

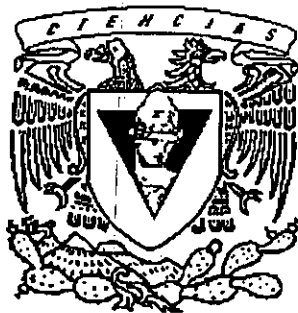


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EFFECTO DEL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES EN
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS
DERIVADOS DE MATERIALES CALCÁREOS DEL
MUNICIPIO DE MIXQUIAHUALA, HGO.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G O
P R E S E N T A :
IVÁN EMMANUEL REYES SOLIS



DIRECTOR DE TESIS: NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN



FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

2001.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVIENOMA DE
MEXICO

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "Efecto del riego con aguas residuales en las propiedades físicas y químicas de suelos derivados de materiales calcáreos del Municipio de Mixquiahuala, Hgo."

realizado por Reyes Solis Iván Emmanuel

con número de cuenta 9220603-6 , pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

Dra. Norma Eugenia García Calderón

Propietario

M. en C. María del Socorro Galicia Palacios

Propietario

M. en C. María de Lourdes Flores Delgadillo

Suplente

M. en C. Rosalía Ramos Bello

Suplente

Biol. Abel Ibañez Huerta

FACULTAD DE CIENCIAS
U.N.A.M.

Consejo Departamental de Biología



Dra. Patricia Ramos Morales
Coordinadora de Licenciatura

DEPARTAMENTO
DE BIOLOGIA

Memento homo qui pulvis es et in pulverem reverteris.

Dedicada a la memoria de Cirila Valiente H.,

a mis hermanas Ivonne y Marlene,

a mi madre Elidia Adelina Solís Valiente,

a mi padre Rodolfo Reyes Jiménez,

a toda mi familia y amigos.

*a la memoria del Dr. Nicolás Aguilera Herrera,
a la comunidad Otomí y
a la Universidad Nacional Autónoma de México.*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las siguientes personas e instituciones su participación y colaboración en el presente trabajo de tesis:

Dra. Norma Eugenia García Calderón coordinadora del Laboratorio de Edafología, Fac. Ciencias, UNAM, por la asesoría, conducción y gran apoyo en la realización del presente trabajo.

Dr. José Guadalupe Palacios Vargas coordinador del Laboratorio de Sistemática de Microartrópodos, Fac. Cien. UNAM, por el gran apoyo para la realización del presente trabajo.

Dr. Alberto Hernández Jiménez del Instituto de Suelos de Cuba por la asesoría y participación en la clasificación de los suelos.

Dr. Abdón Joaquín Trémols González del Instituto de Suelos de Cuba por la asesoría en el manejo de sistemas de información geográfica.

Biol. Abel Ibañez Huerta del laboratorio de Edafología, Fac. Ciencias, UNAM., por la conducción y realización de las barrenaciones.

Lic. C. Margarita Villar Reyes, por su gran apoyo para la impresión del presente trabajo

P. de B. Diana E. Servín Ruíz por su gran apoyo en el trabajo de Laboratorio y la facilitación de Hardware y Software que permitieron el trabajo.

Ing. Arnulfo Ramírez Rojas Riego jefe de distritos 03-Tula y 100 Alfajayucan, CNA., por la aportación de información del DR-03.

Esta tesis se realizó bajo el apoyo económico de los proyectos:
"Efecto del riego con aguas residuales en las propiedades físicas y químicas" PAPID,
" Efecto de los contaminantes del suelo en la fauna edáfica" IN 201598 DGAPA.

Gracias a todos los investigadores, tesisistas, personal docente y técnico del Laboratorio de Edafología, Fac. Ciencias, UNAM.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	8.
SUMMARY	8.
I. INTRODUCCIÓN	9.
II. ANTECEDENTES	
A. Características de las aguas residuales y su aplicación al suelo.	15.
B. Suelo como filtro o amortiguador biológico.	20.
C. Características de los suelos del Valle del Mezquital y del Municipio de Mixquiahuala.	24.
D. Dinámica de los suelos calcáreos.	31.
III. OBJETIVOS	36.
IV. HIPÓTESIS	36.
V. METODOLOGÍA	
A. Muestreo por perfiles en el área de estudio.	37.
B. Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo en el laboratorio.	38.
C. Interpretación y análisis de los resultados.	38.
VI. ÁREA DE ESTUDIO	
A. Ubicación geográfica.	40.
B. Comunicaciones, transportes y servicios.	40.
C. Población y actividades económicas.	41.
D. Climatología.	43.
E. Geología.	
a. Historia geológica.	45.
b. Litología.	46.
c. Estratigrafía.	46.
d. Hidrología.	46.
e. Fisiografía.	47.
f. Suelos.	47.
F. Vegetación.	48.
VII. RESULTADOS	
A. Perfil No. 1, localidad: Temporal Puente Palomar.	55.
a. Morfología del perfil No. 1.	55.
b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 1.	55.
c. Discusión de los resultados del perfil No. 1.	57.
d. Clasificación taxonómica del perfil No. 1.	60.
B. Perfil No. 2, localidad: Monte Palomar.	61.
a. Morfología del perfil No.2.	61.
b. Resultados de los Análisis Físicos y Químicos del Perfil No. 2.	61.
c. Discusión de los resultados del perfil No. 2.	63.
d. Clasificación taxonómica del perfil No. 2.	66.
C. Perfil No. 3, localidad: Puente Palomar.	67.
a. Morfología del perfil No. 3.	67.
b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 3.	67.
c. Discusión de los resultados del perfil No. 3.	69.
d. Clasificación taxonómica del perfil No. 3.	71.
D. Perfil No. 4, localidad: Árbol Grande.	72.
a. Morfología del perfil No. 4.	72.
b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 4.	72.
c. Discusión de los resultados del perfil No. 4.	73.
d. Clasificación taxonómica del perfil No. 4.	75.
E. Perfil No. 5, localidad: Palo Seco.	76.
a. Morfología del perfil No. 5.	76.
b. Resultados del análisis físicos y químicos del perfil No. 5.	76.
c. Discusión de los resultados del perfil No. 5.	78.

	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 5.	80.
F.	Perfil No. 6, localidad: Benito Juárez.	81.
	a. Morfología del perfil No. 6.	81.
	b. Resultados de los análisis físicos y químicos perfil No. 6.	81.
	c. Discusión de los resultados del perfil No. 6.	85.
	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 6.	87.
G.	Perfil No. 7, localidad: La Palma (Denganthza).	88.
	a. Morfología del perfil No. 7.	88.
	b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 7.	89.
	c. Discusión de los resultados del perfil No. 7.	93.
	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 7.	94.
H.	Perfil No. 8, localidad: Tepatepec.	95.
	a. Morfología del perfil No. 8.	95.
	b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 8.	95.
	c. Discusión de los resultados del perfil No. 8.	100.
	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 8.	102.
I.	Perfil No. 9, localidad: La Olla de Motovatha.	103.
	a. Morfología del perfil No. 9.	103.
	b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 9.	103.
	c. Discusión de los resultados del perfil No. 9.	107.
	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 9.	109.
J.	Perfil No. 10, localidad: Colonia Veracruz.	110.
	a. Morfología del perfil No. 10.	110.
	b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 10.	110.
	c. Discusión de los resultados del perfil No. 10.	114.
	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 10.	116.
K.	Perfil No. 11, localidad: Jagüey Colorado.	117.
	a. Morfología del perfil No. 11.	117.
	b. Resultados de los análisis de físicos y químicos del perfil No. 11.	117.
	c. Discusión de los resultados del perfil No. 11.	121.
	d. Clasificación taxonómica del perfil No. 11.	123.
L.	Análisis del comportamiento de las propiedades edáficas en función del tiempo de riego con aguas residuales, con base en el subhorizonte Ap.	
	a. Análisis de regresión lineal	124.
	b. Análisis gráfico de la variación de las propiedades edáficas	130.
VIII.	DISCUSIÓN	142.
IX.	CONCLUSIONES	148.
X.	LÍTERATURA CONSULTADA	151.
XI.	ANEXO	
	A. Resultados de barrenaciones.	158.

RESUMEN

El riego con aguas residuales sobre suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo., es una práctica vieja que ha encontrado, en general, múltiples beneficios. Particularmente, existen estudios en los que se observa que el riego con agua residual contribuye a la acumulación de materia orgánica, y con ello potencialmente al mejoramiento de su estructura, porosidad y capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, poco se aclara acerca de los efectos que causa esta práctica en esta zona, donde inicialmente no se consideraron las características generales del área, sobre todo las del suelo. Dentro del Valle del Mezquital, en el municipio de Mixquiahuala de Juárez, el riego se introdujo gradualmente, encontrándose zonas con mayor tiempo de riego con respecto a otras de menor tiempo. Con ello, se hizo una comparación de las propiedades físicas y químicas de las distintas unidades de suelo del municipio entre sus respectivos tiempos de riego con la finalidad de determinar el grado de fertilidad, deterioro físico y químico, para evaluar los efectos del riego con agua residual sobre dichas propiedades edáficas, considerando en esta evaluación las condiciones genéticas de cada suelo. Mediante fotointerpretación se encontró que esta zona presenta una fisiografía predominantemente plana con escasas elevaciones en donde se observa una gran influencia del material parental calcáreo. Los suelos presentes en esta zona están influenciados por altas concentraciones de CaCO_3 y arcillas, materia orgánica y exceso de nutrimentos que contienen las aguas residuales, lo cual contribuye de manera positiva al mejoramiento de la estructura, porosidad y capacidad de intercambio catiónico (morfología y fertilidad). Sin embargo, se observa un efecto negativo cuando el índice sodio-magnesio y los contenidos de arcilla aumentan mostrando tendencias de alcalinización y dispersión de la estructura. Los suelos de la zona estudiada pertenecen a las unidades Petric Calcisol, Calcaric Phaeozem y Luvic Phaeozem, distribuidos en zonas relativamente altas y zonas de mediana y baja altitud en el municipio, respectivamente. De los parámetros edáficos analizados y su comparación en función del tiempo de riego se observan diferencias significativas, donde se refleja una tendencia al incremento o decremento de algunos parámetros edáficos debido a la depositación diferencial de la materia orgánica y los nutrientes contenidos en las aguas residuales en función de la cercanía o lejanía de los canales de riego, calidad del agua residual, al manejo del suelo por parte del agricultor y a la variación de los contenidos de carbonatos de calcio.

SUMMARY

The watering with wastewaters on agricultural soils of the "Valley of the Mezquital", State of Hidalgo, Mexico, it is an old practice that has found, in general, multiple benefits. Particularly, studies exist in which it is observed that this irrigation method contributes to the accumulation of organic matter, and with this potentially to the improvement of their structure, porosity and cation-exchange capacity. However, little it clear about the effects that it cause this practice in this zone, where initially the general characteristics of the área were not considered, mainly those of the soil. Inside the Valley of the Mezquital, in the municipality of Mixquiahuala, the watering was introduced gradually, being zones with old time of watering with regard to another of minor time. With this, we had a comparison of the physical and chemical properties of the different types of soils of the municipality between their respective times of watering with the purpose of determining the degree of fertility, physical and chemical deterioration, in order to evaluate the effects of the watering with residual water on this edaphic properties, considering the genetic conditions of each soil in this evaluation. By means of photo-interpretation it was that this zone presents a fisiography predominantly plain with scarce elevations where a great influence of the material calcareous parental is observed. The soils presents in this zone is influenced for high concentrations of CaCO_3 and clays, organic matter and excess of nutriments that it contains the residual waters, which it contribute of positive way to the improvement of the structure, porosity and cation-exchange capacity (morphology and fertility). However, a negative way when the index sodium-magnesium and the clays contained begin to grow is observed, show tendency to alkalization and structure dispersion. The soils of the studied zone belong to unities Petric Calcisols, Calcaric Phaeozems and Luvic Phaeozems distributed at high zones relatively, medium elevation zones and zones lower of the municipality, respectively. From the edaphic parameters analyzed and their comparison in function of the time of watering is observed significant differences, where it are reflected a tendency to the increment or decrease of some edaphic parameters due to the differential depositation of the organic matter and the contained nutrients in the wastewaters in function of the proximity or distance of the channels of watering, quality of wastewaters, to the handling of the floor on the part of the farmer and to the variation of the contents of carbonates of calcium.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema de determinadas propiedades físicas y químicas, originado a partir de diversos elementos ambientales, sustenta el desarrollo de organismos y es capaz de evolucionar en función de estos factores, de los cuales encuentra una retroalimentación. Estas características facilitan la confluencia de varios de los ciclos de nutrientes esenciales para las plantas y le permite al hombre desarrollar sistemas agrícolas que satisfacen sus necesidades básicas, lo que convierte al suelo en uno de los recursos más importantes e imprescindibles para el desarrollo de actividades primarias y en un soporte de la economía de una región. Sin embargo, el manejo equivoco de los suelos de un agroecosistema provoca un sin número de efectos sobre sus propiedades, ya sean positivos o negativos, que generalmente no son cuantificados *a priori* y que a su vez contribuyen a su evolución, ya sea en su mejoramiento o en su deterioro.

El manejo y uso del suelo en México ha estado determinado por factores políticos, económicos y sociales en donde, por lo general, no se consideran suficientemente las características edáficas y ambientales presentes de una zona; aún más, al no evaluar los efectos que se pudieran causar sobre éstos antes de tomar una decisión de manejo, se generan problemas que afectan a los agroecosistemas. Un ejemplo de ello es la aplicación de aguas residuales a suelos de cultivo del Distrito de Desarrollo Rural 063 (DDR 063), ubicado dentro del Valle del Mezquital al Suroeste del Estado de Hidalgo, que se ha practicado desde principios de siglo, siendo una de las regiones que iniciaron el desarrollo de esta técnica y, actualmente, es una de las de mayor extensión en el país [Ramírez, 2000]. Este hecho tiene sus orígenes en la respuesta a una problemática mayor al canalizar las aguas de drenaje de la Ciudad de México hacia el río Tula mediante el gran canal del desagüe, con un posterior y constante incremento en el área de riego que ha sido y es el resultado de la creciente urbanización e industrialización de la Ciudad de México.

Las aguas residuales de la Ciudad de México son la mezcla resultante de las aguas de uso industrial con las de uso doméstico y las de lluvia, conducidas por el sistema de drenaje hacia el río Tula, sus contenidos se diluyen al mezclarse con las aguas blancas de éste. Parte del volumen de agua es controlado por la presa Endhó, que cuenta con una capacidad total de almacenamiento

de 183, 000 000 m³ [INEGI, 1992], en donde por sedimentación el agua recibe un tratamiento parcial [Ramírez, *op. cit.*].

El Distrito de Desarrollo Rural 063 (DDR-063) con sede en Mixquiahuala, es la zona de mayor importancia por su extensión y está formado por el Distrito de Riego 03 (DR-03) y por el Distrito de Riego 100 de Alfajayucan (DR-100). El Distrito de Riego 03 es uno de los más importantes después de los del Norte del país, fue establecido por la SARH en 1945 y, actualmente, cubre una superficie de riego de aproximadamente 50,000 ha [Ramírez, *op. cit.*], se abastece de los ríos San Luis, Tepeji, el Salto y Tula; así como de los volúmenes almacenados por las presas Taxhimay en el Estado de México, Requena y Endhó en el Estado de Hidalgo (*Mapa 1*) [INEGI, *op. cit.*]. Con este sistema se manejan tres clases de aguas, la negra (agua residual), la gris (agua blanca mezclada con negra) y la blanca (agua de pozo y manantial) [Ramírez, *op. cit.*]. Diversos estudios han determinado la calidad de las aguas residuales, encontrando que no son recomendables para cultivos sensibles a boro y detergentes, y para suelos de textura arcillosa [Méndez *et al.*, 1990; Méndez, 1982; Mascareño, 1975].

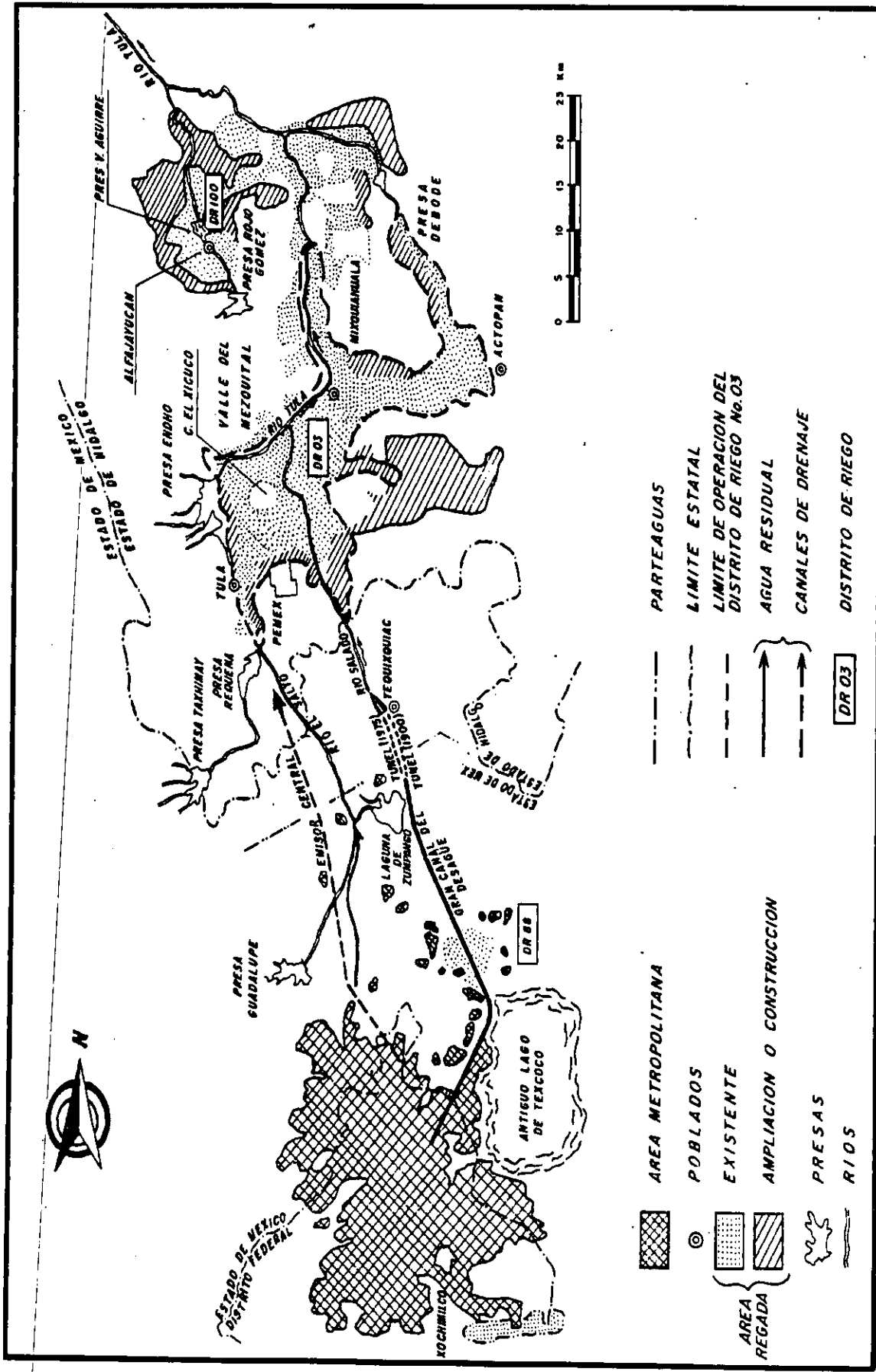
La aplicación de agua residual a este agroecosistema puede encontrar múltiples beneficios; entre los que destacan: el desalojo de aguas residuales de la ciudad, el abasto satisfactorio de agua para riego, ahorro en el gasto público en sistemas de tratamiento del agua residual, incremento en la producción agrícola y ahorro en el gasto en fertilizantes por parte de los agricultores. Particularmente, existen reportes de estudios en los que se observa que el riego con agua residual contribuye al aporte de macro y micro nutrientes, aumento de materia orgánica y arcillas [Haruvy, 1997; Díaz, 1995; Siebe, 1995; Méndez, *op. cit.*; Blásquez, 1938, etc.], con lo que puede aumentar la fertilidad debido al incremento de los sitios de intercambio catiónico, y al mejoramiento de la estructura y porosidad del suelo por el aporte de materia orgánica.

Considerando las ventajas del riego con agua residual, se pueden sugerir propuestas válidas para aprovechar las aguas negras domésticas para riego en otros agroecosistemas del país. Sin embargo, a pesar de que la norma 002-Ecol-1996 regula los límites máximos permisibles de contaminantes de las recargas de agua de uso industrial a los sistemas de alcantarillado [SEMARNAP, 1998], tan solo en el D.F. se descargan 2,522 km³ de aguas industriales anualmente sin recibir tratamiento alguno [GDF, 1999]. Con lo que se han provocado diversos

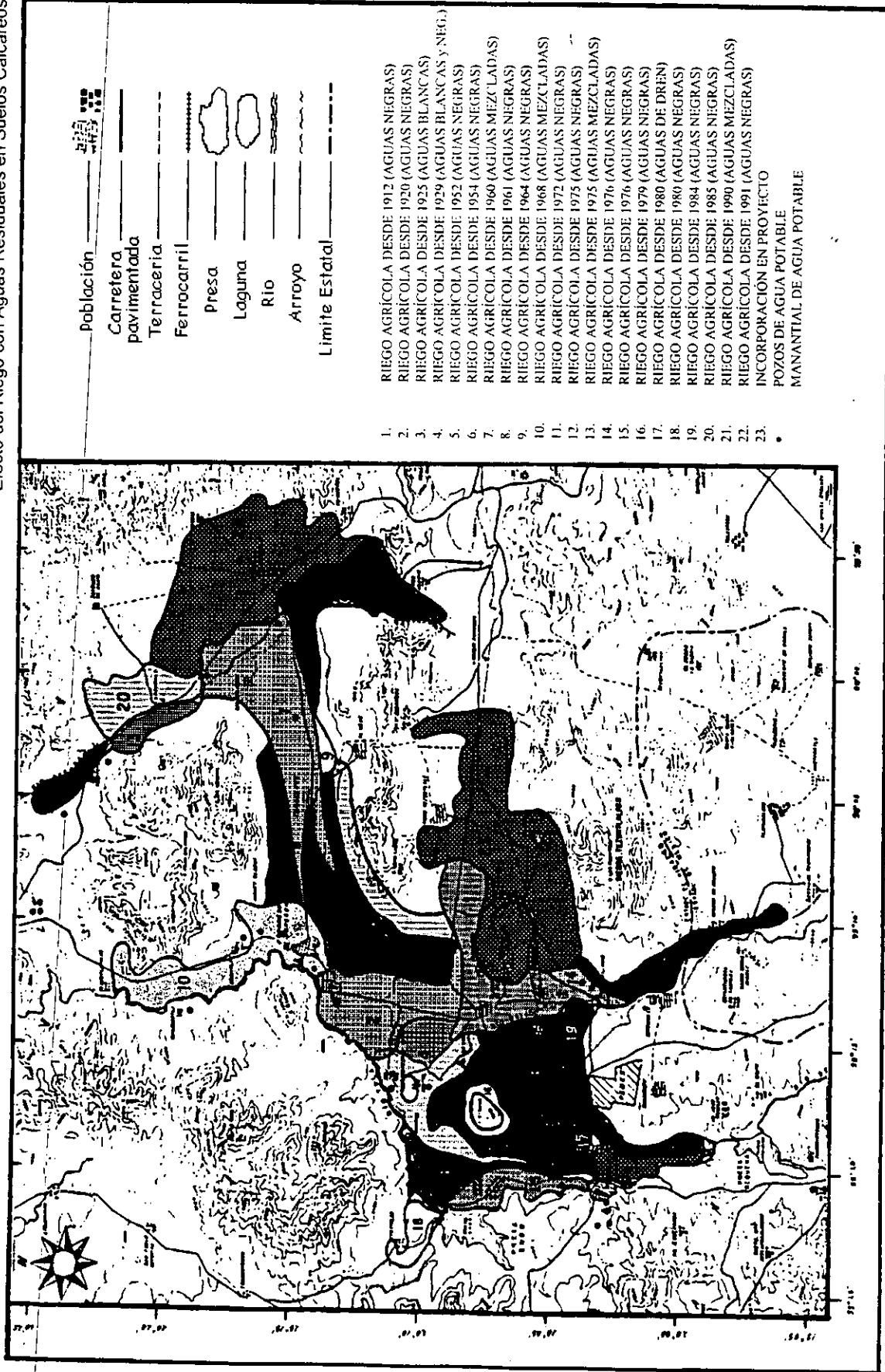
efectos negativos sobre la utilización de estas aguas residuales sobre los agroecosistemas, entre los que destacan: acumulación de metales pesados, tendencias de salinización, contaminación por patógenos y por sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas en suelos, cultivos, ganado, mantos freáticos y al propio humano. Por lo tanto, es de gran importancia la evaluación de las características de todas las partes que conforman al agroecosistema, de la composición del agua residual y de las condiciones sociales y económicas de la región, además de un constante monitoreo antes de tomar decisión alguna sobre su manejo.

Ante estos hechos, poco se aclara acerca de los efectos de este tipo de riego sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos a través del tiempo, sobre todo considerando su naturaleza, siendo necesario evaluar el estado del suelo. A pesar de funcionar como un amortiguador o filtro biológico, debido a la acción adsorbente de las partículas del suelo, los diversos elementos contenidos en el agua residual pueden modificar las propiedades del mismo a través del tiempo en función de las propiedades de dichos elementos, de los mismos suelos y sus condiciones ambientales.

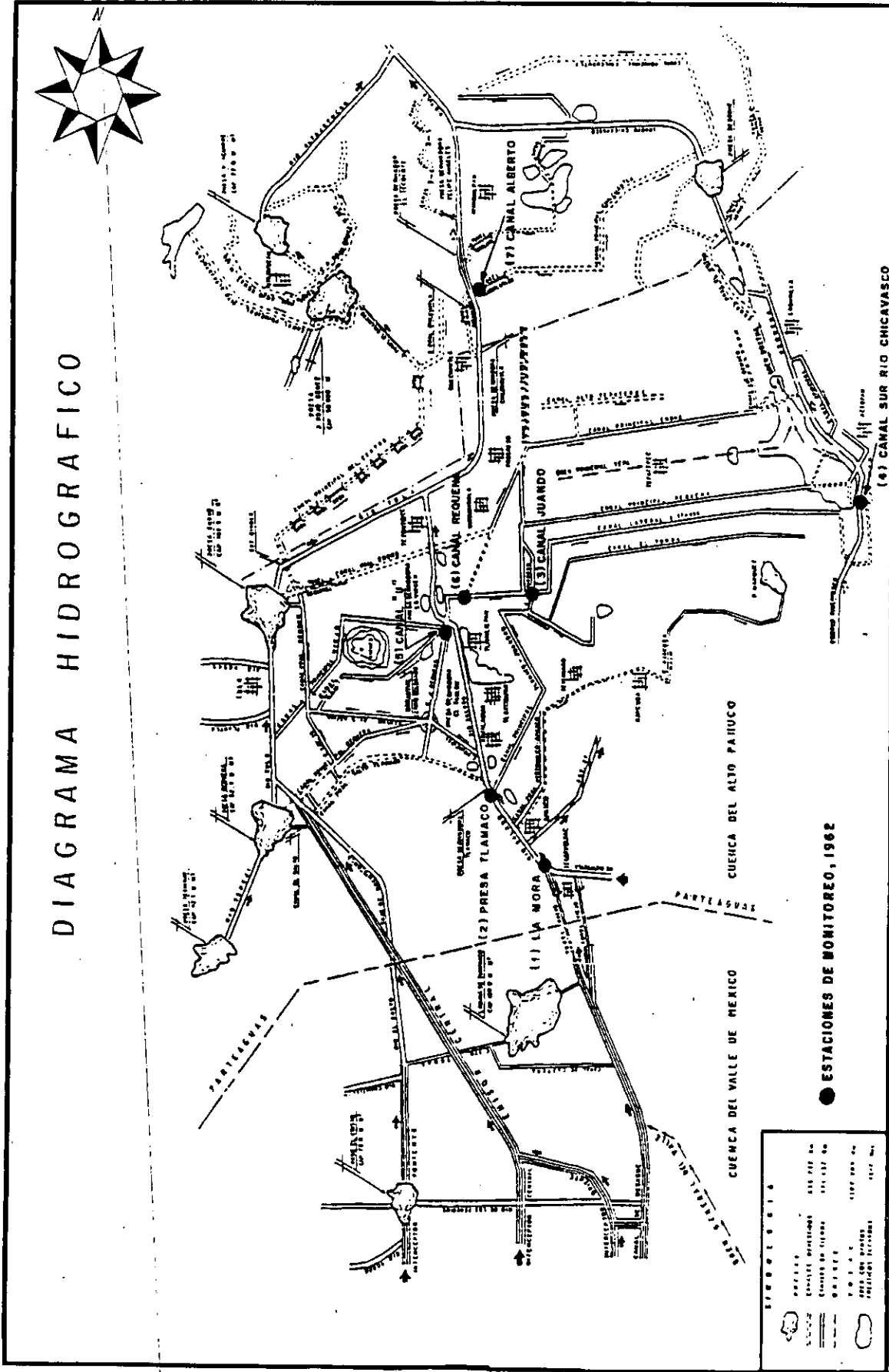
En este sentido, el presente trabajo pretende evaluar los efectos del riego con aguas residuales en suelos calcáreos del municipio de Mixquiahuala, el cual forma parte del Distrito de Riego 03 en el Estado de Hidalgo, en donde el riego se introdujo paulatinamente desde hace 80, 68, 50 y 5 años con aguas negras, así como hace 75, 50 y 10 años con aguas mezcladas; encontrándose zonas con mayor tiempo de riego con respecto a otras de menor tiempo (*Mapa 2*). Esta introducción gradual del riego a las parcelas permite hacer una comparación de las propiedades de las distintas unidades de suelo en función del tiempo de riego, con el fin de determinar el grado de fertilidad y de deterioro físico y químico, considerando las características de todo el agroecosistema, y evaluar los efectos del riego con agua residual sobre el suelo.



MAPA 1.- Sistema de drenaje de las aguas residuales de la Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital, Hidalgo (CNA, inédito; Tomado de Contreras, R., 1998. Modificado por Reyes-Solis I. E.).



MAPA 2.- Desarrollo histórico del riego agrícola en el DDR-063, (CNA, inédito; tomado de Contreras R., (1998); modificado por Reyes-Solis I. E.).



MAPA 3.- Distribución de los canales de riego del Valle del Mezquital, Hidalgo (CNA, inédito; Tomado de Contreras, R., 1998).

II. ANTECEDENTES

A. Características de las aguas residuales y su aplicación al suelo.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, el término aguas residuales se refiere a las aguas de composición variada provenientes de descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas [SEMARNAP, 1998]. Su aprovechamiento se ha convertido en una necesidad en muchas partes del mundo, su descarga con o sin tratamiento en corrientes de agua para su utilización en el abastecimiento de comunidades localizadas aguas abajo ha sido considerada como una medida de emergencia, optando por su uso como agua de enfriamiento, templado de acero en ciertas industrias, generación de electricidad, recarga de mantos acuíferos ya sea vertiéndolas sobre la superficie del suelo o por recarga directa previamente tratadas en lagunas de oxidación y sedimentación, lo que ha generado una gran variedad de experiencias a nivel internacional [Bonomo *et al.*, 1999; Gallegos *et al.*, 1999, Vasseur *et al.*, 1998; Haruvy, 1997; Villafañe, 1997; Takashi, 1993; Förstener, 1993]. Una de las grandes ventajas de la aplicación de las aguas residuales al suelo es que, en general, aportan cantidades significativas de lodos fecales que contienen macronutrientes en concentraciones iguales o cercanas a 5 % de nitrógeno (N), 12 % de fósforo (P) y 1 % de potasio (K) semejantes a los fertilizantes comerciales de Estados Unidos de Norteamérica, además, también contienen cantidades significativas de micronutrientes, algunos en formas queladas que ayudan a proteger su disponibilidad [Troeh, 1993; Mascareño, 1975]. Algunos investigadores han obtenido rendimientos semejantes a los esperados al fertilizar y encalar, debido a que los lodos mejoran las propiedades físicas de los suelos y son fuente de nutrimentos para las plantas [Díaz, 1995; Díaz & Romero, 1995; Siebe, 1995; Méndez *et al.*, 1990; Willet *et al.*, 1986], se han encontrado resultados favorables sobre la fertilidad debido al aporte de componentes orgánicos que contribuyen a la capacidad de intercambio catiónico [Elliott, 1986], lo que se convierte en otra ventaja más de la aplicación de aguas residuales al suelo.

Sin embargo, las aguas negras procedentes de usos domésticos contienen un gran número y diversidad de tipos de organismos que pueden causar enfermedades gastrointestinales, tales como cólera (*Vibrio cholerae*), tifoidea (*Salmonella typhosa*), disentería bacilar (*Shigella sp.*), disentería amibiana (*Entamoeba histolytica*), hepatitis infecciosa (*Enterovirus sp.*), cisticercosis y teniasis

(*Taenia solium*), etc. [Amahmid *et al.*, 1999; Tavarez, 1997], lo que puede considerarse una de las principales desventajas del uso de las aguas residuales.

Aunque los organismos patógenos gastrointestinales no encuentran condiciones favorables para su desarrollo y multiplicación fuera del organismo bajo condiciones naturales, su supervivencia varía considerablemente dependiendo de los factores ambientales; dependiendo del tipo de organismo, puede ser de unas cuantas semanas y en otros incluso meses. En el medio acuático se puede recurrir para la remoción o destrucción de los patógenos a la sedimentación, temperatura, organismos depredadores y valor de pH, considerando el tratamiento de aguas negras mediante tanques de sedimentación, precipitación química, desinfección por cloro y filtración intermitente por arena. Aún más, como medida adicional para la prevención de enfermedades causadas por los patógenos presentes en las aguas residuales, se debe restringir el uso de aguas negras tratadas para el riego de diversos cultivos, incluyendo los que se preparan para su consumo en crudo [SRH, 1962].

Además del riesgo por la contaminación por patógenos, las aguas residuales contienen cantidades variadas de metales pesados que dependen de la naturaleza de las industrias locales y de la proporción entre residuos domésticos e industriales. En su aplicación, los lodos pueden depositarse en dosis que representan 25 ton de materia seca ha⁻¹, aumentando el contenido de metales pesados en el suelo y siendo particularmente peligrosos el Cu, Zn, Ni y Cd. Dado que el Cu es 2 veces y el Ni es 8 veces más fitotóxico que el Zn, se ha formulado el denominado "equivalente de zinc" para determinar la máxima cantidad de lodo aplicable cuando el pH del suelo no es menor a 6.5 [Wild, 1992], debido a la gran movilidad que exhiben estos metales con valores de pH menores a 6.5. Uno de los grandes problemas que se ha observado con la presencia de metales pesados es su toxicidad al acumularse en los suelos y en los cultivos, por resultar peligrosos para la salud humana al consumirlos como alimento [Carrillo *et al.*, 1990; García *et al.*, 1988; Méndez, 1982; Mascareño, 1975]. Sin embargo, los suelos con elevada capacidad de intercambio catiónico, ricos en materia orgánica y con altos valores de pH, presentan menos riesgo que los suelos ácidos y de textura arenosa, ya que la asimilabilidad del Cr, Co, Ni, y Se, decrece cuando el pH aumenta reduciendo la cantidad que absorben las plantas, aunque su absorción puede aumentar o disminuir en función de la composición de los lodos residuales [Wild, 1992]. Ante la acumulación en el suelo de grandes cantidades de oligoelementos fitotóxicos

existen pocas posibilidades de respuesta por parte del agricultor, entre las que destacan el encalado para reducir su solubilidad y asimilabilidad, la utilización de cultivos resistentes a concentraciones elevadas y la selección de cultivos como los cereales, ya que los metales tienden a concentrarse menos en frutos y semillas que en las hojas [Russell, 1961].

La necesidad de desalojar las aguas negras de la Ciudad de México ha facilitado cubrir la demanda de agua en la región del Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, al aprovechar las aguas negras en el riego agrícola. Esta técnica se ha utilizado desde 1902, donde hasta 1962 habían sido conducidas por el Gran Canal sin almacenamiento previo y distribuidas para riego por medio de un sistema de canales y presas derivadoras. De acuerdo a la SRH (*op. cit.*), la distancia que recorren las aguas residuales es de 57 km, en donde tienen considerables cambios físicos, químicos y biológicos relacionados con la sedimentación, reducción de la demanda biológica de oxígeno y del número de organismos patógenos e indicadores. Al salir del túnel y escurrir por el río Salado a través de lechos sinuosos y rápidos, el olor decrece sensiblemente debido a la oxidación, lo que contrasta con la conducción lenta de las aguas por los canales produciendo ácido sulfhídrico (*Mapa 1*). Los canales de flujo lento presentan ligeros indicios de espumas en la superficie, mientras que, en los rápidos la espuma es abundante, lo que indica la presencia de alquil-bencen-sulfonato (ABS). El riego en el área ha contribuido a la meteorización de las rocas constituidas por CaCO_3 en el suelo; los agricultores prefieren usar agua residual para el riego, ya que producen mejores rendimientos en comparación con las aguas de escorrentía y lluvia, cuando disponen de ella.

Dentro de las características físicas y químicas del agua residual, Méndez (*op. cit.*), muestra que presentan fuertes problemas de contaminación por detergentes ($29.3\text{-}69.9 \text{ mg kg}^{-1}$ de ABS), elementos como Co, Ni, Fe y B rebasan los límites permitidos por la Secretaría de Mejoramiento Ambiental y que en comparación con los datos obtenidos por Mascareño (*op. cit.*), su concentración ha ido en aumento en el transcurso del tiempo, en el caso del ABS se ha triplicado. En un reporte posterior, Méndez *et al.* (1990), corroborarían que las aguas residuales, excedidas en detergentes, grasas y aceites, no deben emplearse en cultivos sensibles al boro y a detergentes.

Estas aguas son alcalinas (pH 7.4-8.1) debido a las grandes cantidades de sodio soluble y de sales, mostrando conductividades en promedio de $2581.1 \mu\text{S cm}^{-1}$, lo cual es determinante para el

desarrollo de condiciones de salinidad en los suelos. Por su parte, Mascareño (*op. cit.*), ya había clasificado a las aguas residuales como no recomendables para cultivos sensibles a sales y para suelos con drenaje deficiente, con textura muy arcillosa o bajo un clima seco debido a que el porcentaje de sodio posible (PSP), carbonato de sodio residual (CSR), relación de adsorción de sodio (RAS), salinidad efectiva (SE) y porcentaje de carbonatos y bicarbonatos (PCB) se hallan por arriba del límite máximo permisible, señalando que las sales solubles son la causa principal en la disminución de los rendimientos en los cultivos.

Gutiérrez *et al.* (1995), hacen el análisis de las implicaciones de la aplicación del agua residual al suelo y compilan los resultados de las características del agua residual obtenidos por varios autores, en donde se observa la disipación de la turbidez, color y olor, la depositación de los sólidos solubles y sedimentos, la retención de ABS, grasas, aceites, B y N, la disolución del CaCO_3 y el arrastre de sales, NO_3^- y PO_4^{2-} , durante el transporte del agua residual hasta su salida después de regar los suelos de cultivo. Además, mencionan registros de la presencia de quistes de *Amoeba sp.* en el canal Juandhó-Tlamaco.

En una recopilación de datos acerca de la calidad de las aguas residuales, evaluados por diferentes autores, incluyendo a la CNA, en diferentes puntos del sistema de drenaje de la Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital [Contreras, 1998], se pueden observar datos que refuerza el análisis hecho por Gutiérrez (*op. cit.*). El aporte diferencial de los contaminantes se refleja en los contenidos registrados en el Emisor Central, en comparación con el río Tula y en la presa Endhó (Tabla 1 y mapa 1). Los contenidos registrados de Fe, Cr, Pb, Cu y Zn no rebasan los límites de tolerancia permitidos, siendo más altos en el Emisor Central, en la refinería y en el río Tula y Salado, disminuyendo en la presa Endhó; en el caso del manganeso, el valor más alto se registra en la refinería y sobre pasa el límite de tolerancia, en tanto que en los demás puntos los valores son relativamente más bajos. El pH no rebasa el límite de tolerancia manteniéndose en valores neutros en la presa Endhó, ligeramente más ácidos en el Emisor Central, en el río Tepeji y en el río Tula, y ligeramente más básicos en el río Salado, la refinería y la planta eléctrica, comportamiento que concuerda con el contenido de HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Cl^- y los valores de conductividad eléctrica (CE).

Tabla 1. - Calidad de las Descargas de las Aguas Residuales en el Valle del Mezquital.

Parámetro	Tolerancia	Emisor central	Río Salado	Río Tepeji	Río Tula	Planta Eléctrica	Refinería	Presa Endhó
Clasificación		C3S1	C3S4	C2S1	C3S1	C3S4	C1S3	C3S3
pH	8	6.97	7.64	6.95	6.99	7.43	7.48	7.13
CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	2	1114	1590	431	995	1673	40.92	1136
O ₂ disuelto mg L^{-1}	5.0	0.59	0.95	2.54	0.88	1.8	4.27	2.18
grasas-aceites mg L^{-1}	-	101.8	54.75	111.89	133	57.81	98.02	126.14
Coliformes totales MPN 100 ml ⁻¹	5×10^4	9.8×10^{12}	113×10^6	8×10^6	2×10^{13}	27.5×10^7	11.5×10^5	1.3×10^5
Coliformes Fecales MPN 100 ml ⁻¹	4×10^4	6.54×10^{12}	52×10^5	28×10^5	6×10^{12}	6.4×10^6	20.1×10^3	7.8×10^4
Detergentes mg L^{-1}	-	6.8	2.56	3.40	5.21	1.355	0.505	4.22
B mg L^{-1}	0.7-3.0	1.62	1.02	1.08	1.28	1.88	1.76	0.86
PO ₄ ⁻³ mg L^{-1}	1.0	6.33	5.92	0.85	5.01	2.93	0.444	3.06
O-PO ₄ ⁻³ mg L^{-1}	1.0	5.31	4.94	0.46	4.04	2.00	104	3.00
F mg L^{-1}	1.0	0.515	0.620	0.531	0.772	0.530	0.863	0.420
N-orgánico mg L^{-1}	*	14.71	3.79	6.08	4.57	5.85	5.018	2.35
NH ₄ ⁺ -N mg L^{-1}	*	8.50	18.52	2.93	819	3.44	25.91	10.88
NO ₂ -N mg L^{-1}	*	0.039	0.137	3.40	0.028	0.780	0.780	0.040
NO ₃ -N mg L^{-1}	*	0.192	0.348	0.373	0.289	12.40	7.96	0.066
HCO ₃ ⁻ mg L^{-1}	*	232.85	596.83	312.05	350.4	230.4	237.29	286.64
SO ₄ ²⁻ mg L^{-1}	130	187.49	346.23	79.9	179.9	1253	2627	146.16
Cl ⁻ mg L^{-1}	147	76.97	243.20	47.27	87.97	253.8	294.1	83.97
Na ⁺ mg L^{-1}	250	77.64	337.0	95.16	82.22	482.15	290.56	202.90
K ⁺ mg L^{-1}	5.0	18.28	37.2	9.75	21.50	28.00	32.75	17.88
Fe ³⁺ mg L^{-1}	5.0	0.712	0.240	0.531	0.658	0.183	0.689	0.257
Mn ²⁺ mg L^{-1}	0.3	0.126	0.011	0.112	0.099	0.001	0.499	0.220
Cr ⁶⁺ mg L^{-1}	1.0	0.053	0.036	0.054	0.036	0.033	0.025	0.023
Pb ²⁺ mg L^{-1}	5.0	0.137	0.300	0.009	0.202	0.188	0.364	0.033
Cu ²⁺ mg L^{-1}	0.2	0.087	0.086	0.030	0.050	0.155	0.170	0.040
Zn ²⁺ mg L^{-1}	2.0	0.375	0.228	0.520	0.170	0.412	0.340	0.110

Fuente: Contreras, 1998.

En las acequias de Palo Seco en Mixquiahuala, de acuerdo al estudio realizado por Mascareño (*op. cit.*), los valores promedio registrados de ABS, B, Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se y Zn en las aguas residuales son de 5.3, 1.2, 0.19, 0.8, 0.004, 0.03, 0.04, 0.03, 0.28, 0.46, 0.086, 0.09, trazas, 0.023 y 0.06 en ppm respectivamente, siendo altos los registros para ABS, B y Mg, en el caso del Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se y Zn, los valores están bajo los límites máximos permisibles. El pH de las aguas residuales en promedio es de 7.27, la CE promedio es de 1.57 dS m⁻¹, el contenido de Na⁺, Mg²⁺, K⁺ y Ca²⁺ solubles es de 14.5, 0.29, 0.93, 0.26 cmol kg⁻¹ y la presencia de HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻ solubles en promedio es de trazas, 10.7,

10.4, 1.67 cmol kg^{-1} respectivamente, manteniendo su carácter salino. La concentración de metales pesados registrados en los lodos residuales, es mucho mayor que los registrados para el agua, siendo las siguientes: Cu (140 ppm), Fe (2,148 ppm), Mn (166 ppm), Pb (420 ppm) y Zn (318 ppm), con ello se asume que existe una gran precipitación de los metales junto con la materia orgánica (MO) acumulada en los lodos, lo que posteriormente es observado por Cajuste *et al.* (1995).

La introducción del riego con aguas residuales en el municipio de Mixquiahuala ha ocurrido en diferentes tiempos y en función de diferentes circunstancias, por ejemplo, en el mapa de Desarrollo Histórico del Riego Agrícola del DR-03 [CNA, inédito], se observa que el riego con diferente calidad del agua se introdujo paulatinamente, desde hace 80, 68, y 46 años con aguas negras y desde hace 50 y 10 años con aguas mezcladas. En la parte centro-sur-oeste después del canal Endhó, se introdujeron aguas negras desde 1920; en el centro-sur y parte del Noreste, también con aguas negras, desde 1932; el Sureste dispuesto hacia el norte rodeando al cerro Tumba desde 1954; al Norte de Este a Oeste entre el drenaje Tapa-Lagunilla y el canal Endhó se riega con aguas mezcladas desde 1950; y hacia el Norte dispuesto de Este a Oeste a partir del canal Endhó hasta después de Denganthza y antes de Jagüey Blanco también se riega con aguas mezcladas desde 1990 (*Mapas 5 y 8*). Actualmente, la aplicación de aguas residuales a suelos de cultivo del Valle del Mezquital se ha llevado a cabo tomando ciertas medidas para disminuir la contaminación al ambiente, entre las que destacan el tratamiento parcial del agua por el uso de lagunas de sedimentación, canales de oxidación y la selección de cultivos como forrajes y granos, quedando restringido el riego con aguas residuales en aquellos donde el producto de consumo entra en contacto con el agua y el suelo.

B. Suelo como filtro o amortiguador biológico de las aguas residuales.

El uso del suelo como un descontaminante de las aguas orgánicas residuales puede ser visto como una extensión del reciclaje natural que tiene un efecto benéfico, en donde los materiales que podrían ser contaminantes, al mismo tiempo llegan a ser fuentes de energía para los microorganismos del suelo y fuentes de nutrientes para el crecimiento de las plantas [García, 1997], además de que las partículas del suelo son capaces de retener o adsorber contaminantes como metales pesados, lípidos y diversos compuestos orgánicos iónicos, como los pesticidas

debido a sus características fisicoquímicas. Los coloides del suelo, arcillas y materia orgánica (MO), son los principales causantes de la retención o sorción de contaminantes en el suelo, aunque la capacidad de retención de estas partículas depende del pH de la solución del medio y de la estructura de la molécula orgánica, ya que el pH regula la ionización de los grupos funcionales y la proporción de los contaminantes que aparecen en forma iónica, la MO participa más activamente en el proceso [Flores, 1997; Blas-Martínez *et al.*, 1995; Carrillo *et al.*, 1992], debido a la presencia de áreas hidrófobas e hidrófilas.

Los coloides del suelo ayudan a controlar el movimiento de contaminantes orgánicos como pesticidas y otros compuestos orgánicos no ionizados, como grasas, ceras y resinas con secciones no polares o hidrófobas, hacia el subsuelo y los mantos acuíferos, retardando su movimiento migratorio hasta que los compuestos son metabolizados por los microorganismos [Masaphy & Mandelbaum, 1997; Ramírez, 1997; Smith, 1997]. Actúan como solventes de los químicos aplicados al suelo seccionando o compartamentalizando las concentraciones de los contaminantes manteniéndolos adsorbidos en las zonas hidrófobas de los coloides orgánicos y aquellos que se mantienen en la solución del suelo (hidrófilos) [Leeper, 1978]. De acuerdo con Weber (1993), la tendencia de un pesticida u otro compuesto orgánico a lixiviarse dentro del agua subterránea está determinado por su solubilidad y su radio de concentración sorbido en el suelo, conocido como coeficiente de distribución K_d :

$$K_d = \frac{\text{mg de sustancia o elemento químico sorbido} / \text{kg de suelo}}{\text{mg de sustancia o elemento químico} / \text{L solución}}$$

Una relación similar que se ajusta en solución para la MO es el denominado Coeficiente de Distribución en Carbono Orgánico (K_{oc}):

$$K_{oc} = \frac{\text{mg de sustancia o elemento químico sorbido} / \text{Kg carbono orgánico}}{\text{mg de sustancia o elemento químico} / \text{L solución}}$$

Los valores altos de los coeficientes K_d y K_{oc} indican que gran parte del químico está ligado a los coloides del suelo y es menos tendiente a presentarse en el manto freático. Sin embargo si el objetivo de manejo es eliminar los compuestos orgánicos del suelo, los coeficientes bajos son más deseables. Los datos del *cuadro 1* enfatizan la importancia de la capacidad sorbente del complejo

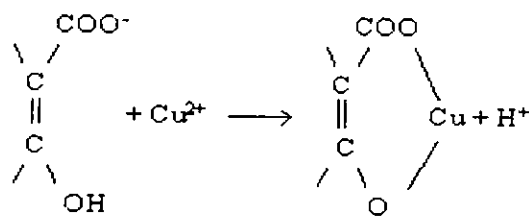
coloidal del suelo especialmente del humus en el manejo de los compuestos orgánicos contaminantes aplicados al suelo [Brady & Weil, 1999].

Cuadro 1.- Coeficientes de seccionamiento de carbono orgánico y del suelo (K_d y K_{oc}) para los herbicidas más comúnmente empleados en Ultisoles en Virginia, USA.

Herbicida	K_d	K_{oc}
Atrazina	1.82	140
Dietil Atrazina	0.99	80
Diisopropil atrazina	1.66	128
Hidroxi atrazina	7.92	609
Metaloclor	2.47	190

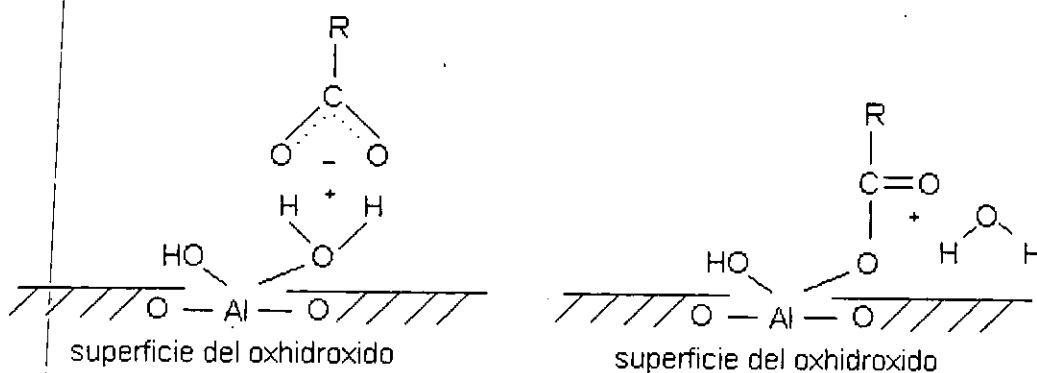
Fuente: Brady & Weil, 1999.

Los pesticidas iónicos como el paraquat y diquat (herbicidas) se adsorben con mayor facilidad a la MO debido al intercambio iónico entre los cationes de los herbicidas y de los polianiones carboxílicos húmicos [Jeffrey *et al.*, 1993]. Los metales pesados y otros iones metálicos especialmente el hierro y el aluminio, son retenidos enérgicamente por las sustancias húmicas y solo pueden liberarse con dificultad. La reacción con iones metálicos puede aumentar la solubilidad del metal, por ejemplo, los iones férricos pueden mantenerse en solución a valores de pH muy superiores a los que provocarían su precipitación en ausencia de estos ácidos. Sin embargo, es mucho más frecuente que la concentración de elementos metálicos en la solución disminuya a causa de la reacción con el humus y la formación de compuestos órgano-metálicos insolubles. En general, las constantes de estabilidad para las reacciones entre el humus y los metales aumentan de acuerdo con las series de Irvins-Williams para la estabilidad de los compuestos metálicos, el Fe^{3+} y Al^{3+} son fijados más enérgicamente seguidos de los divalentes en secuencia: $Cu > Ni > Co > Zn > Fe(II) > Mn(II) > Mg > Ca > Ba$ [Wild, 1992]. La naturaleza exacta de los enlaces químicos entre las sustancias húmicas y los iones metálicos es dudosa aunque se sabe que algunas uniones son del tipo quelato, con el metal unido a dos grupos funcionales adyacentes [van der Zee & de Wit, 1993].



Es poco probable que una gran proporción de cationes esté ligada por una configuración específica de grupos funcionales como en la que se observa para el cobre, existe una gama de constantes de estabilidad para cada metal y la importancia de la constante, para una disposición determinada, depende del medio en que reacciona el grupo funcional. Los grupos funcionales con oxígeno no son los únicos capaces de reaccionar con iones metálicos, p. ej. el cobre reacciona también con grupos =N-H presentes en péptidos húmicos [Senesi, 1993; Wild, *op. cit.*].

Las arcillas también contribuyen a la retención de contaminantes para formar complejos coloidales amorfos en el suelo debido a la interacción ión dipolo y puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. Los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals son débiles pero aditivos al formarse más enlaces a medida de que los polianiones orgánicos se adaptan a las superficies de las arcillas al deshidratarse el conjunto. Las interacciones ión dipolo pueden darse en las superficies tipo mica y las superficies de oxihidróxidos (cargados positivamente) mediante intercambio aniónico. Las arcillas minerales de horizontes superficiales pueden tener revestimientos de películas de oxihidróxidos de Fe y Al en donde el intercambio aniónico proporciona un enlace de relativa debilidad, la unión por un intercambio de ligando proporciona un enlace más estable, intercambiándose únicamente por aniones más energéticos como hidróxidos y pirofosfatos, las arcillas con cargas negativas también pueden retener pesticidas iónicos mediante intercambio catiónico [Mansour *et al.*, 1993; Petruzzelli, 1993].



De acuerdo con Wild (*op. cit.*), diversas partículas del suelo pueden actuar en la retención de elementos pesados o de sustancias tóxicas, por ejemplo los óxidos de hierro y manganeso y los ácidos húmicos intervienen en reacciones de adsorción del cobre. Los complejos orgánicos retienen Zn con menor intensidad que Cu. El molibdeno, en forma de molibdato, puede ser

retenido por óxidos férricos hidratados, óxidos de aluminio, las arcillas 1:1, haloisita y caolinita, su adsorción se reduce cuando el pH sube por arriba de cuatro. Con valores de pH mayores de 7 el $B(OH)_4^-$ es adsorbido por hidróxidos de hierro y aluminio y por arcillas de intercambio de ligando, además el antagonismo de los iones OH^- promueve que descienda su adsorción, siendo la illita más reactiva. En suelos bien aireados muchos compuestos orgánicos e inorgánicos de Hg se convierten en Hg^0 elemental, las formas catiónicas y aniónicas $HgCl_3^-$ y $HgCl_4^{2-}$ pueden ser adsorbidas por oxihidróxidos de Fe y Mn y por la MO [Wild, *op. cit.*]. El As es adsorbido por los hidróxidos de hierro y aluminio mediante intercambio de ligando ($Fe(OH)_3$). Existe una relación muy estrecha entre el As y la goethita, los arseniatos cálcicos pueden precipitarse en los suelos calizos y en condiciones anaerobias pueden reducirse a arseniuros (AsH_3), el aporte de sulfato ferroso o aluminico o cal aumenta su adsorción en suelos contaminados pero resulta difícil desarrollar algún procedimiento que aumente la asimilabilidad del PO_4^{3-} a la par. El plomo en presencia de caliza disminuye su adsorción precipitando en forma de carbonato y puede ser retenido por la MO y los hidróxidos de hierro ($Fe(OH)_3$). Los óxidos de aluminio y arcillas siendo menos asimilable por las plantas, los iones de flúor sustituyen a los OH^- en la superficie de las arcillas [Tan, 1994; Wild, *op. cit.*].

C. Características de los suelos del Valle del Mezquital y del Municipio de Mixquiahuala.

El Valle del Mezquital ha sido objeto de múltiples estudios de manera general; Blásquez en 1938, dirige la Comisión Geológica del Valle del Mezquital, Hgo., en donde se desarrollaron estudios detallados de fisiografía, hidrología, paleontología, geología histórica, hidrogeología y de geología y geoquímica de suelos del Valle. En estos estudios se señala que los suelos de la zona se han formado por la alteración de los materiales que constituyen el relleno de las cuencas y que son de carácter residual (formados *in situ*); aunque algunos de estos tienen origen aluvial. Esta comisión detecta la presencia de carbonato de sodio y de "caliche" distribuido de manera homogénea en la sección Tula-Mixquiahuala. Además, destaca el valor de las aguas negras del desagüe del Valle de México debido al aumento del espesor del suelo por la depositación de materiales acarreados por las aguas en la subsección Atitalaquia-Tlaxcoapan-Tlahuelilpan, y al mismo tiempo la modificación de las fracciones texturales y la contribución a la fertilidad del suelo por el aporte de sedimentos y nutrientes, aunque se considera que su uso debe ser cauteloso debido a los elevados contenidos de carbonato de sodio.

Acerca del trabajo realizado en la sección Tula-Mixquiahuala, esta comisión encontró que los suelos residuales se presentan invariablemente sobre "caliche" cementado sobre materiales que constituyen el relleno de las cuencas, excepto en las subsecciones Mixquiahuala-Progreso, Palmillas, cerro La Cruz, Tezontepec, cabeceras en las inmediaciones de cerro Huitel y algunas fracciones a la altura del Pitol, donde se tiene como subsuelo tezontle o basalto mezclado con tobas y "caliche". El "caliche" está compuesto principalmente por CaCO_3 más o menos impuro, contaminado con MgCO_3 y arcilla, y rico en Na^+ y K^+ . El análisis de su composición, resultado del promedio de los análisis de varias muestras, es la siguiente: insoluble 9.81 %, $(\text{Fe, Al})_2\text{O}_3$ 1.03 %, CaO 36.8 %, MgO 9.48 %, K_2O 0.51 %, Na_2O 0.68 %, Cl^- trazas, SO_3^{2-} 0.03 %, P_2O_5 0.12 % y CO_2 por diferencia 41.54 %. La presencia del caliche se debe a la precipitación secundaria de Ca^{2+} en solución, que predomina debido a la presencia de caliza y feldespatos calco-sódicos; la solución comprende Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y CO_3^{2-} de K^+ , Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , que precipitan como carbonatos y además el calcio como sulfato (CaSO_4). La profundidad a la que se encuentra indica la zona de concentración máxima de sales, la distancia hasta la cual fue elevada el agua capilar y la zona de evaporación de dicha agua.

Este caliche es un horizonte de acumulación de sales dentro del suelo, técnicamente debe denominarse calci-saxeum. Se ha establecido en la región una clasificación de los suelos en función de su espesor limitado por el calci-saxeum, teniéndose tres clases; suelos de primera que abarcan suelos de más de 50 cm de espesor, suelos de segunda con suelos de entre 20 y 50 cm de espesor, y los suelos de tercera clase con suelos de 20 o menos centímetros de espesor. El espesor del suelo en esta sección es muy variable, pero puede decirse que los suelos delgados se localizan uniformemente en los límites de la planicie, en las cercanías del río Tula y paralelo al río Salado y al margen izquierdo del río, a menos de 1 km se extiende una franja de suelos con caliche superficial. No se encuentra gran diferencia entre suelos delgados o profundos; el valor promedio de algunas características de los suelos residuales de la sección es: densidad 2.39 Mg m^{-3} , pH 6.9, N total 1.303 g kg^{-1} , K asimilable 1.186 g kg^{-1} , y P asimilable 0.113 g kg^{-1} . Se recomienda eliminar la capa de calci-saxeum que se halle superficial (20 cm) para mejorar el drenaje, porque estos suelos presentan una tendencia marcada a retener sales solubles, ya que al precipitarse el Ca^{2+} y el Mg^{2+} de la solución del suelo, ésta queda constituida por Na^+ y K^+ como cloruros, y en mucho menor medida como sulfatos. Las acumulaciones excesivas se marcan como costras blancas en la superficie del suelo, en donde se trata de cloruros y sulfatos, o bien como manchones

de color pardo oscuro casi negro que se producen como consecuencia de la disolución de materia orgánica por los carbonatos de sodio, creando ambas una mala condición física para los suelos al disminuir la permeabilidad y ejercen efectos tóxicos sobre los cultivos.

El estudio sobre la contaminación de los suelos en el DR-03 por el uso de aguas negras de la Ciudad de México, realizado por Mascareño (*op. cit.*), menciona que los suelos son de reacción alcalina (pH de 7.7-9.0), tienen una CE de 0.5 a 2.7 dSm⁻¹, son medianamente ricos en MO (1.2 a 5.7 %), en K (250 a 2125 kg ha⁻¹), P asimilable (18 a 130 kg ha⁻¹), y N total (0.110 a 0.270 %), y contienen altas concentraciones de B, Hg, y de Ca y Mg asimilables. En este estudio se detectan incrementos en B, Co y Cd con respecto al tiempo de aplicación de aguas residuales, pero no se presentan incrementos de ABS, suponiéndose que es lavado. Los suelos recolectados en Mixquiahuala presentan en promedio valores de pH de 8.57, CE de 1.5 dSm⁻¹, y concentraciones de MO de 27.9 g kg⁻¹, N total de 1.9 g kg⁻¹, P asimilable de 73.7 kg ha⁻¹, K asimilable de 1216.6 kg ha⁻¹, Mg de 2618.9 kg ha⁻¹, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, HCO₃⁻ y CO₃²⁻ solubles de 5.08, 2.51, 0.77, 8.95, 1.84 y 5.32 cmol kg⁻¹, respectivamente, SO₄²⁻ de 4.28 cmol kg⁻¹, Cl⁻ de 6.02 cmol kg⁻¹, y CO₃²⁻ insolubles de 10.9 %. Las concentraciones promedio de los contaminantes presentes en estos suelos, son: 0.62, 2.96, 1.025, 0.027, 0.527, 5.109, 3.11, 0.88, 4.12, 0.17, 3.77 y 0.089 en ppm de ABS, B, Al, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn, respectivamente, encontrándose trazas de Se, Cr y As (*Cuadro 2*).

Morales (1982), realizó un estudio edafológico en el Valle del Mezquital dentro de los municipios San Salvador, Progreso, Chilcuautila e Ixmiquilpan, encontrando suelos de color gris, porosos, de textura variante entre franco, migajón limoso, migajón arenoso y migajón arcillo limoso, de reacción alcalina, con alto contenido de cationes, en especial Ca²⁺ y Mg²⁺, y elevados contenidos de K⁺, Na⁺, PO₄³⁻, NO₃⁻ y con elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos agrícolas bajo riego con agua residual. De 19 perfiles muestreados, clasifica a 3 perfiles dentro del Orden Mollisols, Suborden Xerolls, Gran Grupo Calcixerolls, y Subgrupo Aridic Calcixerolls y 16 restantes dentro del Orden Entisols, de los cuales 10 pertenecen al Suborden Arents, Subgrupo Xeralfic Arents, 5 pertenecen al Suborden Orthent, Gran Grupo Xerorthent y Subgrupo Lithic Xerorthent, y 1 pertenece al Suborden Psamment, Gran Grupo Torripsamment y Subgrupo Xeric Torripsamment de acuerdo al sistema de clasificación de la USDA, con lo que recomienda mejorar el uso del suelo, favorecer la regeneración de la vegetación natural, levantar barreras

rompevientos y empalizadas para evitar la erosión eólica, rotación de cultivos, establecer terrazas y borrar cárcavas por nivelación para disminuir la erosión hídrica y fomentar el cultivo de *Agave atrovirens* (maguey) y de *Platyopuntia sp.* (nopal para tuna) en zonas donde no existe riego.

Cuadro 2.- Características de suelos recolectados dentro del municipio de Mixquiahuala en 1975 a una profundidad de 0-30 cm.

Sitio No.	11	10	11	26	27	28	40	41	42	43	44	45
cultivo	trigo	alfalfa	alfalfa	alfalfa	alfalfa	alfalfa	alfalfa	alfalfa	ninguno	alfalfa	alfalfa	alfalfa
riego/ T	NB/50	N/60	N/60	NB/15	N/50	N/50	NB/60	NB/60	NB/50	N/40	NB/6	N/9
MO %	2.9	3.5	2.1	3.5	3.4	3.2	1.2	2.3	3.6	2.6	2.8	2.4
N %	0.18	0.22	0.14	0.23	0.2	0.22	0.12	0.23	0.15	0.17	0.27	2.4
P kg/ha	150	95	78	100	88	108	40	60	35	117	68	45
K kg/ha	1187	1313	1125	1437	1313	1080	643	1563	1375	500	1563	1500
Ca kg/ha	10630	10630	8858	70875	14765	20670	14175	43705	15920	20080	70875	93317
Mg kg/ha	2625	3000	1375	287	1938	1938	1000	2750	1775	9375	133	1438
textura	F	F	F-Ar	F	F-Ar	F-Ar	F-Ar	F-Ar	F-Ar	F-a	F-Ar	F-Ar
pH	8.1	8.2	8.6	8.9	8.5	8.4	8.5	8.7	8.8	8.9	8.5	8.7
CE	1.3	1.1	0.8	1.1	1.1	1.2	1.2	1.7	2.4	1.7	2.7	1.7
Ca me/L	T	T	2.4	3.8	3.1	3.3	4.1	6.3	5.3	7.1	9.6	5.8
Mg me/L	T	T	1.7	2.0	1.9	2.7	1.7	2.4	2.1	2.1	5.3	3.2
Na me/L	T	T	6.2	6.1	5.8	6.6	7.8	9.3	17.4	9.6	10.9	9.8
K me/L	T	T	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.4	1.4	1.2
CO ₃ me/L	T	T	3.2	2.0	2.8	1.6	1.2	2.0	2.0	0.8	0.8	2.0
HCO ₃ me/L	T	T	1.2	1.8	8.2	5.2	0.8	6.4	7.0	7.8	7.2	7.6
SO ₄ me/L	T	T	T	3.9	T	0.2	5.8	2.5	5.5	2.6	8.0	5.8
Cl me/L	T	T	4.0	4.7	4.7	5.0	4.2	6.1	9.5	5.8	11.0	5.2
CO ₂ %	10.0	10.1	7.6	11.6	9.0	10.4	6.8	4.3	9.5	13.1	24.9	13.3
ABS*	0.55	0.60	0.85	0.58	0.25	0.20	2.25	2.00	0.20	0.15	0.15	0.15
B*	3.00	3.30	3.65	3.40	3.3	3.00	1.75	2.95	4.05	2.25	2.55	2.4
Al*	1.1	0.6	1.0	1.6	0.6	0.5	0.3	1.5	1.0	1.1	1.5	1.5
As*	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Cd*	0.02	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.01
Co*	0.55	0.67	0.48	0.62	0.62	0.75	0.62	0.45	0.72	0.58	0.15	0.2
Cu*	0.95	5.06	10.36	4.09	2.46	3.77	5.49	4.29	7.86	11.96	2.89	2.13
Cr*	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Fe*	2.3	3.54	3.97	3.27	1.89	3.31	2.44	3.48	2.26	1.64	6.81	2.43
Hg*	0.62	0.1	3.9	T	0.08	T	2.10	T	1.60	1.6	T	T
Mn*	3.7	0.1	3.9	3.7	3.5	4.7	3.6	4.9	2.3	4.2	7.4	7.8
Ni*	0.01	0.15	T	0.03	0.27	0.27	0.15	T	0.15	T	T	T
Pb*	3.5	1.00	4.25	5.25	3.15	5.00	3.00	4.65	2.5	2.5	7.00	3.5
Se*	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Zn*	0.07	0.12	0.09	0.09	0.08	0.11	0.08	0.07	0.07	0.07	0.11	0.11

T= trazas, * ppm, F= franco, F-Ar= migajón arenoso, F-a= migajón arcilloso, Riego/T= calidad de agua / tiempo de riego en años; N= aguas negras, B= aguas blancas.

Méndez (*op. cit.*), coincide en que los suelos del Valle presentan textura variable (franca-migajón arenoso), menciona que son de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR4/2) en seco, que la densidad aparente (DA) y la densidad real (DR) son en promedio de 1.24 y 2 gr ml⁻¹ respectivamente, que tienen valores de pH en promedio de 8.13, CE en promedio de 2.32 dSm⁻¹, y contenidos de MO y N en promedio de 4.05 y 0.198 %

respectivamente, CIC de entre 18.0 y 48.8 cmol kg^{-1} , Ca, Mg, Na y K intercambiables de 76.8, 18.28, 1.64, 1.27 cmol kg^{-1} como máximo, respectivamente, y HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- y SO_4^{2-} solubles de 10.13, 15.52, 12.48 y 21.01 cmol kg^{-1} como máximo, respectivamente. En estos suelos se presentan problemas de salinidad moderada, aunque algunas muestras con exceso de sales, altos contenidos de detergentes y de Pb, Cr, Co, Ni, B, Fe, Mn y Zn. Posteriormente, en otro reporte, Méndez *et al.* (1990), destacan que la MO influye en la retención de surfactantes. García *et al.* (1988), observan la acumulación de Pb, Cr y Cd en suelos y plantas del municipio de Mixquiahuala. Carrillo *et al.* (*op. cit.*), reportan la depositación diferencial de los metales pesados al acumularse en la entrada de la parcela, disminuyendo hasta el dren de salida y manteniéndose en el suelo fijados o adsorbidos; en 1991, reportan la acumulación de metales en alfalfa y en suelos del ejido de Mixquiahuala, donde las concentraciones se incrementan en función de los años de irrigación, pero no reportan diferencias entre los 50 y 90 años de riego, lo cual se atribuye a que la contaminación ha ocurrido en los años de mayor desarrollo industrial de la Ciudad de México; y en 1992, realizaron una comparación de los niveles tóxicos de Cd y Pb en suelos con diferente contenido de MO en Mixquiahuala, observándose un efecto negativo mayor en suelos con menor contenido de MO.

Flores-Delgadillo *et al.* (1992), reportan valores de CE para dos perfiles de la serie Lagunilla y tres perfiles de la serie Tepatepec que van de 1.0-1.9 dS m^{-1} y de 0.9-1.8 dS m^{-1} respectivamente; en la serie Lagunilla el pH va de 8.1-8.3, el Na soluble es el catión más abundante variando de 9.6 a 14.4 meq L^{-1} y los Cl^- son los aniones más abundantes registrando hasta 10 meq L^{-1} , en tanto que en la serie Tepatepec, el Na soluble va de 9.4 a 13.4 meq L^{-1} , los Cl^- y HCO_3^- van de 4.5 a 10 y 3.1 a 5.4 meq L^{-1} , respectivamente.

Hernández-Silva *et al.* (1994), realizaron un análisis estadístico de varios parámetros en las series Actopan, Progreso y Tepatepec, reportando la mineralogía de la fracción gruesa >2 mm en la que la serie Progreso presenta plagioclasa $>$ cuarzo $>$ anfíbol $>$ clinopiroxeno $>$ magnetita $>$ ilmenita $>$ caliche, la serie Actopan presenta andesina $>$ cuarzo $>$ plagioclasa $>$ piroxeno y la serie Tepatepec presenta cuarzo $>$ plagioclasa $>$ ortoclasa $>$ turmalina $>$ hematita $>$ anfíbol $>$ magnetita $>$ ilmenita $>$ toba $>$ toba carbonatada, este análisis mineralógico mostró que el material rodado y acarreado no ha sufrido transformación, con lo que el material de origen no es el causante de la acumulación anómala de magnesio y metales pesados.

Palacio-Prieto & Siebe-Grabach (1994), mediante un análisis por GEOEAS y SIG-ILWIS, realizan la cartografía de la distribución de algunos parámetros físico-químicos del suelo, señalando que la CE y los carbonatos totales mostraron coeficientes altos de variación no solo por el promedio de los años, sino también en cada uno de los sitios, derivada de la variabilidad espacial dentro del distrito y de la variabilidad temporal de los parámetros de acuerdo con el momento del muestreo, con lo que la CE es relativamente más baja al Suroeste ($< 1.2 \text{ mmhos cm}^{-1}$) y más alta al Este ($> 4 \text{ mmhos cm}^{-1}$), con sitios que registran valores altos en San Salvador, Tlahuelilpan, Juandhó, Lagunillas y canal Xochitlán. Siebe (*op. cit.*), evalúa la influencia de las aguas residuales en el contenido de nutrientes de algunos suelos del DDR-063, hallando un incremento significativo en los contenidos de N, P y MO en Leptosoles réndzicos y Vertisoles éútricos. Además, se observa una saturación de bases por Na, K y Mg mayor conforme aumenta el tiempo de riego en Leptosoles y en Vertisoles, con el aumento de la CE debido a la pérdida de Ca^{2+} y la sustitución por Na^+ , aumentando con ello la salinización.

Gutiérrez *et al.* (*op. cit.*), resumen las características generales de los suelos del DR-063 mencionando que muestran valores de pH que van de 6.86 a 8.60, con algunos valores mayores a 9; la CE del extracto de saturación varía de 1.0 a 3.4 dSm^{-1} , pero en algunos sitios con agua subterránea cerca de la superficie y texturas arcillosas, se registran valores de 8 a 40 dSm^{-1} , representando problemas de salinización debido a condiciones de drenaje impedido; el contenido de MO varía de 1.6 a 3.3 % y en suelos de temporal de 0,3 % a 2,58 %; la CIC varía de media a alta (200 a $> 400 \text{ cmol kg}^{-1}$) y la textura del suelo varía de migajón a migajón arcilloso y arcilla migajosa con una mineralogía de arcillas dominada por esmectitas (80-97 %), aunque también están presentes las illitas y caolinitas. Además, destacan que existen diferencias estadísticamente significativas entre suelos irrigados con agua de temporal y suelos irrigados con aguas residuales, en donde los valores de distintos trabajos muestran incrementos significativos de los promedios entre suelos de temporal y suelos regados con aguas residuales del DR-03 que son: pH de 7.7 a 8.1, porcentaje de C orgánico de 1.5 a 2,4 con un valor máximo de 3.3 y porcentaje de N orgánico de 0.16 a 0,26 con un máximo de 0.36. Se observan, además, incrementos en el Na intercambiable de 21.6-36.4 cmol kg^{-1} , P total de 876 a 1070 mg kg^{-1} y P disponible de 48 a 70 mg kg^{-1} . Mencionan que en sitios que se han regado por períodos de tiempo diferentes con suelos de temporal, se obtiene un incremento significativo de C orgánico de 1,6 a 3.3% después de 80 años de irrigación con agua residual; el N total también se incrementó en suelos con periodos más

largos bajo riego; el P mostró un incremento más alto y más significativo, de 3 a 34 mg kg⁻¹ de P en suelos sin riego a 60 a 97 mg kg⁻¹ en suelos que han sido regados con agua residual sin tratamiento por más de 80 años. Por otro lado, mencionan que considerando un riego promedio con aguas residuales de la presa Endhó de 2000 mm ha⁻¹ a⁻¹ para alfalfa y las concentraciones promedio de N y P en el agua (Tabla 2), la irrigación debe proporcionar 320 kg ha⁻¹ a⁻¹ de N y 140 kg ha⁻¹ a⁻¹ de P (con agua residual sin tratamiento los valores aumentan a 580 kg ha⁻¹ a⁻¹ de N y 250 kg ha⁻¹ a⁻¹ de P), sin embargo, el N total que aumentará en el suelo después de 80 años bajo irrigación con agua residual está muy por debajo del excedente calculado agregado anualmente al suelo (aún sin considerar la fijación microbiana de N), lo cual es una importante evidencia de la pérdida de N por lixiviación de NO₃⁻ y/o denitrificación. Aunque actualmente no hay datos disponibles sobre nitratos en el manto freático, lo que convierte a esta relación en un parámetro de mayor importancia en la regulación de la utilización de aguas residuales para riego del suelo.

Tabla 2.- Características generales del agua de riego.

		Agua sin tratamiento (Tlamaco-Juandhó)	Presa Endhó	Agua Drenada (Tepa-Lagunilla)
Turbidez	unidades NTU	182	10	13
Color		amarillo-verdoso	amarillento	incolora
Olor		fétido	fétido	inodora
Clasificación		C3S2	C3S1	C3S1
pH		7.4	7.15	7.5
CE	µScm	1483	760	17.2
Ca ²⁺	meq L ⁻¹	2.66	2.39	50.5
Mg ²⁺	meq L ⁻¹	2.1	1.87	3.14
Na ⁺	meq L ⁻¹	8.9	3.12	8.38
K ⁺	meq L ⁻¹	1.09	0.53	0.66
CO ₃ ²⁻	meq L ⁻¹	2.11	1.24	2.25
HCO ₃ ⁻	meq L ⁻¹	4.84	3.18	3.9
SO ₄ ²⁻	meq L ⁻¹	0.45	0.48	0.81
Cl ⁻	meq L ⁻¹	6.43	2.9	7.85
NO ₃ ⁻	meq L ⁻¹	0.01	0.01	1.84
sólidos solubles	mg L ⁻¹	1009	502	1114
sedimentos sólidos	mg L ⁻¹	128	78	80
sólidos suspendidos	mg L ⁻¹	251	268	228
boro	mg L ⁻¹	0.78	0.25	0.33
grasas y aceites	mg L ⁻¹	14.1	7.6	5.27
C orgánico	mg L ⁻¹	18.9		
ABS	mg L ⁻¹	25.7	18.5	1.68
PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	39	22	
N total	mg L ⁻¹	29.3	15.6	10.9
N-NH ₃	mg L ⁻¹	17.5	8.21	2.43
N-NO ₃	mg L ⁻¹	0.015	0.015	10.11

Fuente: Gutiérrez R., M. E. et al, 1995.

Contreras (1998), realiza un trabajo acerca del impacto del riego con aguas residuales en algunos suelos del DDR-063, en donde, además de observar que la concentración de MO, P y N aumentan en función del tiempo de riego, observó una tendencia a la sodicidad y considera importante evaluar la extensión de la distribución de los problemas de salinidad y sodicidad detectados. Dentro de los suelos clasificados en este trabajo destaca la presencia de los subgrupos Typic Anthracambids, Typic Natrargids, Typic Haplustolls, Lithic Rendolls, Sodic Aquicambids, Typic Haplocalcids y Lithic Haploxerolls, de acuerdo al sistema de taxonomía de suelos de la USDA.

Muñoz (1999), realiza un estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital, donde se caracterizaron, describieron, identificaron y cartografiaron los diferentes tipos de suelos de la zona, que de acuerdo al sistema de clasificación de la FAO/UNESCO son las unidades Leptosol lítico, éutrico, mólico y rendzínico; Phaeozems háplico y calcárico; Fluvisol éutrico y calcárico; Regosol éutrico y calcárico y Vertisol éutrico. El autor menciona que los Leptosoles, Regosoles y Phaeozems se distribuyen en las partes cerriles y montañosas con vegetación natural y uso pecuario, son de textura variable color oscuro, con buenos contenidos de MO, reacción neutra y alta pedregosidad. Los Luvisoles, Vertisoles y algunos Phaeozems se ubican al fondo de los valles o en zonas planas de uso agrícola, son profundos, de textura fina, moderado contenido de MO, colores claros y escasas obstrucciones.

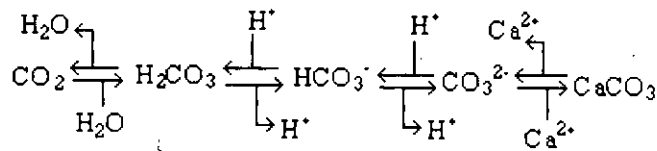
C. Dinámica de los suelos calcáreos.

En general, los valores de pH mayores a 7 se asocian a la presencia de carbonatos y bicarbonatos en el suelo y en solución, en donde la especie predominante a un pH de 6 a 9 es el ión HCO_3^- , aumentando 10 veces su concentración por cada unidad de pH que aumenta, y por arriba de 10 la forma dominante es el ión CO_3^{2-} [Hassett & Banwart, 1992; Wild, *op. cit.*; Bonneau & Souchier, 1987]. Se ha observado que valores de pH mayores a 8.4 corresponden a la presencia de carbonatos de sodio o de magnesio [Wild, *op. cit.*].

Los suelos calcáreos producen valores de pH dependientes del equilibrio entre el CaCO_3 , H_2O y CO_2 [Wild, *op. cit.*; Bonneau & Souchier, 1987], para la calcita se aplica la siguiente serie de reacciones entre las interfases:

<Interfase gas-líquido>

<Interfase líquido-sólido>



En un sistema abierto la calcita y el agua están equilibradas con una presión parcial de CO_2 conocida, por lo que se tiene la siguiente ecuación:

$$2\text{pH} + \log [\text{Ca}] = 9.6 - \log P_{\text{CO}_2} + 1.43 \mu^{1/2} \quad [\text{Wild, } op. \text{ cit.}]$$

Donde μ es la fuerza iónica de la solución = 0.013 y $[\text{Ca}]$ es la concentración molar. Las concentraciones de Ca en la solución de suelos calcáreos son de alrededor de 10^{-3} M, los valores de pH para sistemas en equilibrio están entre 7 y 8.5, para la calcita/agua $\text{pH} = 8.4$ a $P_{\text{CO}_2} = 0.0003$, con ello el pH disminuye cuando la presión parcial de CO_2 sobrepasa las 3.5×10^4 atm, por lo que un subsuelo calcáreo tiene un pH mayor de 8.5 dado que existe menor cantidad de CO_2 .

La calcita es la forma más común de carbonato en el suelo, pero también pueden presentarse la aragonita (CaCO_3), la dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) y la magnesita (MgCO_3). Dependiendo de su clase, la caliza puede meteorizarse mediante la solubilización del carbonato, en donde interviene el CO_2 disuelto en agua, acumulándose residuos silicatados insolubles y arcillas de decalcificación, o mediante la hidratación de las arcillas que, al dilatarse, conducen a la fragmentación de la roca caliza como efecto mecánico formando arcillas de caliza activa [Wild, *op. cit.*; Bonneau & Souchier, *op. cit.*]. El calcio en el suelo puede mantenerse como granos gruesos y cristalinos de CaCO_3 poco soluble y débil actividad química (caliza inactiva), arcillas y limos de carbonatos fácilmente solubles en agua cargada con CO_2 que enriquece la solución del suelo con bicarbonatos solubles y que saturan el complejo de cambio adsorbente (caliza activa), calcio de cambio y soluble dependiendo de la tensión de CO_2 , siendo generalmente el calcio de cambio soluble la forma dominante, por ejemplo, nitrato y sulfato de calcio. La sobresaturación en las soluciones del suelo puede resultar de la presencia de silicatos de calcio más solubles que la calcita, con las cinéticas de disolución de silicatos cálcicos y de precipitación de CaCO_3 controlando los productos de actividad iónica. La intensidad de las reacciones de carbonato dependerá del área superficial y las diferencias de pH entre las muestras de suelo reflejan la solubilidad de los carbonatos. La raíz es una fuente de variación del pH debido a la producción de CO_2 y de la liberación de H^+ o HCO_3^- , la capacidad del suelo para mantener un pH elevado y una

concentración de HCO_3^- alta cerca de las raíces, dependerá de la tasa de solubilidad del carbonato. Los suelos con valores de pH mayores a 7 tienen un coeficiente de acidez relativamente alto que, bajo aportes normales de H^+ o HCO_3^- , forman gradientes de pH pequeños, pero los cambios en la presión parcial del CO_2 conducen a gradientes de concentración relativamente grandes en donde las implicaciones en términos de pH son significativas al reducir 1 unidad [Wild, *op. cit.*].

De acuerdo con Duchaufour (1975), los suelos formados sobre material parental calcáreo presentan caliza activa, pueden evolucionar por descarbonatación progresiva del perfil a formas de transición con suelos pardos, bajo ciertas condiciones de clima y vegetación. Los suelos calcáreos mejor representados son *las rendzinas* caracterizados por un horizonte A de color gris o pardusco, estructura granular, rico en materia orgánica y en carbonatos, con numerosas piedras esparcidas en todo el perfil. Las rendzinas se asocian a la presencia de vegetación xerófitas, presentan una gran actividad biológica y numerosas lombrices. *Los suelos pardos calizos* tienen carbonato de calcio activo en todo el perfil, se desarrollan en afloramientos de caliza mixta blanda rica en arcillas y con pocos elementos silicatados, presentan bajos contenidos de carbonatos, de bases intercambiables y de humus en la parte más superficial del perfil, siendo menos estructurado que la rendzina, presentan grietas y caras de deslizamiento y como consecuencia de mal drenaje por las arcillas la reducción parcial de hierro, aunque son más adecuados para la agricultura porque son más profundos, menos pedregosos, tienen menor contenido de carbonatos, pH cercano a la neutralidad y mayor retención de agua a diferencia de las rendzinas.

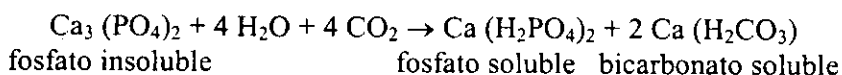
La actividad orgánica juega un papel muy importante en la descarbonatación progresiva de la caliza por la producción de CO_2 , la disolución del CaCO_3 puede ocurrir incluso en condiciones de baja humedad, la migración o arrastre de los HCO_3^- y CO_3^{2-} solubles ocurre hasta su redepositación o precipitación con la liberación de CO_2 y H_2O debido al descenso de la actividad biológica y de la presión parcial de CO_2 con la profundidad del perfil, formándose filamentos blancos en grietas o fisuras (horizonte cálcico) o costras calizas endurecidas continuas o discontinuas (horizonte petrocálcico) en el suelo [Bonneau & Souchier, *op. cit.*; Duchaufour, *op. cit.*].

El Ca^{2+} en exceso impide la absorción de otros iones por antagonismo, tales como Fe y Mg, provocando clorosis, el P es insolubilizado en forma de fosfato apatítico, por lo que su

disponibilidad baja en suelos calizos, el ritmo de difusión de fosfato a las raíces aumenta por reducción del amortiguamiento de la solución del suelo dada por el aumento del CaCO_3 que diluye el material del suelo que contiene oxihidróxidos, los cuales presentan zonas de fuerte adsorción. Así suelos de alto contenido de CO_3^{2-} pueden requerir menos PO_4^{-3} para elevar su disponibilidad a niveles aceptables. La adición de PO_4^{-3} a suelos calcáreos depende de la tolerancia de las plantas a la alcalinidad, donde un exceso de PO_4^{-3} puede aumentar la clorosis. La baja solubilidad del P resulta de la hidrólisis del fosfato de calcio en presencia del carbonato de calcio bajo pH de 8 a 8.5 [Ortíz-Villanueva, 1977]:



El P soluble puede adsorberse en la fase sólida del suelo en formas poco utilizables por los cultivos y, en suelos calcáreos y alcalinos, los iones PO_4^{-3} parecen ser precipitados como fosfatos de calcio y magnesio relativamente insolubles o de acuerdo con algunos investigadores como sales dobles de carbonato como: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3$ [Bonneau & Souchier, 1987] o como: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$, siendo formas aún menos solubles [Ortíz-Villanueva, *op. cit.*]. Los fosfatos primarios insolubles pueden solubilizarse en presencia de CO_2 debido a la respiración radicular y otros exudados [Ortíz-Villanueva, *op. cit.*]:



El Ca^{2+} tiene un poder de sustitución mayor con respecto al resto de los cationes que permanecen más disponibles en el medio reemplazando al Na^+ , lo que eleva aún más el pH y promueve la precipitación de P, Mn, B, Cu, Zn y Fe, y facilita la movilidad del Mg, Na, K, S y Mo, siendo más disponibles que los primeros para la absorción por las plantas, lo cual puede causar problemas principalmente de clorosis férrica, como se ha detectado en algunos suelos de DDR Mixquiahuala [Velásquez, 1991]. El aporte de K y N puede hacer más evidente el desarrollo de clorosis férrica en las plantas, además, se pueden presentar deficiencias en Mn, Cu y Zn dependiendo del contenido de MO.

De acuerdo con Russell, (1961), en los suelos calcáreos, el cobre se haya como (CuOH) a pH de 7, las formas del zinc a valores de pH altos son $\text{Zn}(\text{OH})^+$, $\text{Zn}(\text{HCO}_3)^+$ y ZnCO_3 dependiendo del pH y de la presión parcial de CO_2 , disminuyendo su solubilidad al aumentar el pH. El molibdeno en el suelo se encuentra en la forma MoO_4^{2-} . La forma del boro a pH mayor a 7 aumenta la

concentración de $B(OH)_4^-$. La velocidad de reducción del cromo es baja en este tipo de suelos. La acumulación del selenio se da generalmente en suelos básicos y a menudo ricos en yeso y caliza. El As puede presentarse como arsenito AsO_3^{3-} comportándose como los fosfatos, los arseniatos cálcicos se precipitan en los suelos calizos. El plomo en presencia de caliza disminuye su adsorción, precipitando en forma de carbonato. En suelos ricos en calcio activo el fluoruro reacciona con el calcio formando CaF_2 [Russell, *op. cit.*].

El crecimiento de cultivos en suelos calcáreos presenta pocos problemas de manejo y en este sentido, generalmente, hay tres grupos principales de plantas: las que se desarrollan bien en suelos calcáreos (calcícolas), las que no se desarrollan bien en estos suelos (calcífugas) y las tolerantes a un amplio rango de pH, con lo que es importante elegir el cultivo y la variedad adecuadas acordes al tipo de suelo para reducir los problemas de manejo (Russell, *op. cit.*). Como ya se observó, en los suelos calcáreos hay carencia de nutrientes que pueden suplementarse vía suelo o a través de pulverizaciones foliares. Los iones bicarbonato no exhiben efecto directo sobre la planta pero las concentraciones de bicarbonato están ligadas a propiedades de la solución del suelo como pH, concentración de Ca^{2+} , forma de los iones fosfato y la precipitación de micronutrientes metálicos. El efecto normal de concentraciones altas de bicarbonatos es el desarrollo de clorosis férrica debida a la reducida absorción de hierro por la raíz, la reducida traslocación del hierro a tallos y hojas, la inhibición de la respiración y de la actividad de la citocromo-oxidasa, la disminución de la síntesis de proteínas y de la actividad de oxidasa, ocurriendo comúnmente en suelos muy calcáreos o en suelos poco profundos sobre roca caliza. Se ha propuesto a la caliza activa como un índice de la probabilidad de clorosis, es una medida de la extensión y reactividad del carbonato estando relacionada al carbonato total. Como estrategia de manejo se puede corregir al acidificar el medio, lo cual puede movilizar al fósforo y al hierro, pero al mismo tiempo, se pueden movilizar otras sustancias y los metales pesados [García & Cajuste, 2000].

III. OBJETIVOS

- ⇒ Determinar las propiedades físicas y químicas de suelos recolectados en parcelas de cultivo dentro del Municipio de Mixquiahuala con diferentes tiempos de riego.
- ⇒ Comparar las propiedades de las clases de suelos encontrados, determinar el grado de fertilidad y deterioro de las propiedades físicas y químicas de los suelos en función del tiempo de riego con aguas residuales, considerando las características ambientales
- ⇒ Generar datos que contribuyan a la cartografía del suelo en el área y profundizar en su clasificación para comprender su origen y evolución.
- ⇒ Determinar el efecto del riego con aguas residuales y, con base en las características del agroecosistema, proponer alternativas de mejoramiento del área investigada.

IV. HIPÓTESIS

- Los suelos agrícolas de parcelas con riego de temporal son menos estructurados y contienen menores cantidades de nutrientes que los suelos regados con aguas residuales.
- Los suelos agrícolas de parcelas con menor tiempo de riego con agua residual son menos ricos en nutrientes y materia orgánica con respecto a aquellas que tengan un mayor tiempo de riego.
- Los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo asimilable y potasio intercambiable en el suelo aumentarán en función del tiempo de riego con aguas residuales.
- La capacidad de intercambio catiónico aumenta con el tiempo de riego con aguas residuales, por el aporte de materia orgánica y sedimentos, con el aumento del número de sitios de intercambio, mejora la fertilidad del suelo.
- Los valores de la conductividad eléctrica aumentarán con el tiempo de riego con aguas residuales por el aporte de sodio y magnesio, lo que representa una tendencia a la salinización o sodificación de los suelos.
- Los valores de pH disminuyen conforme aumenta el tiempo de riego con aguas residuales debido al aumento de la actividad orgánica ante los aportes de nitrógeno y carbono.

III. OBJETIVOS

- ⇒ Determinar las propiedades físicas y químicas de suelos recolectados en parcelas de cultivo dentro del Municipio de Mixquiahuala con diferentes tiempos de riego.
- ⇒ Comparar las propiedades de las clases de suelos encontrados, determinar el grado de fertilidad y deterioro de las propiedades físicas y químicas de los suelos en función del tiempo de riego con aguas residuales, considerando las características ambientales
- ⇒ Generar datos que contribuyan a la cartografía del suelo en el área y profundizar en su clasificación para comprender su origen y evolución.
- ⇒ Determinar el efecto del riego con aguas residuales y, con base en las características del agroecosistema, proponer alternativas de mejoramiento del área investigada.

IV. HIPÓTESIS

- Los suelos agrícolas de parcelas con riego de temporal son menos estructurados y contienen menores cantidades de nutrientes que los suelos regados con aguas residuales.
- Los suelos agrícolas de parcelas con menor tiempo de riego con agua residual son menos ricos en nutrientes y materia orgánica con respecto a aquellas que tengan un mayor tiempo de riego.
- Los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo asimilable y potasio intercambiable en el suelo aumentarán en función del tiempo de riego con aguas residuales.
- La capacidad de intercambio catiónico aumenta con el tiempo de riego con aguas residuales, por el aporte de materia orgánica y sedimentos, con el aumento del número de sitios de intercambio, mejora la fertilidad del suelo.
- Los valores de la conductividad eléctrica aumentarán con el tiempo de riego con aguas residuales por el aporte de sodio y magnesio, lo que representa una tendencia a la salinización o sodificación de los suelos.
- Los valores de pH disminuyen conforme aumenta el tiempo de riego con aguas residuales debido al aumento de la actividad orgánica ante los aportes de nitrógeno y carbono.

V. METODOLOGÍA

A. Muestreo por perfiles en el área de estudio.

El área de estudio se localiza en el municipio de Mixquiahuala dentro del DR-03, Valle del Mezquital. La zona muestreada dentro del municipio comprende parcelas ubicadas a los 20° 10' 12" y 20° 18' 32" Latitud Norte y los 99° 13' 44" y 99° 7' 12" Longitud Oeste. La selección de los puntos de muestreo se realizó en función de la distribución de las áreas y períodos de riego con agua residual y de temporal, lo cual fue apoyado por el mapa de Desarrollo Histórico del Riego Agrícola del DR-03 [CNA, inédito], carta Topográfica Mixquiahuala F-14 C89 escala 1:50,000 [INEGI, 1995] y la interpretación de las fotografías aéreas 0004, 0005 y 0006 líneas 163 y 164 zona F 14-11 escala 1:75,000 [INEGI-SINFA, 1995]. La recolección del suelo en los puntos de muestreo se realizó a partir de perfiles edafológicos de 2 x 1.5 hasta 2 m de profundidad o hasta encontrar un límite lítico o paralítico, en donde al mismo tiempo se realizó su descripción morfológica [Cuanalo, 1990]. La toma de muestras se realizó en función del número de subhorizontes descritos; aproximadamente 2 kg de suelo de cada subhorizonte, en el siguiente cuadro se observan los puntos de muestreo seleccionados, el tiempo de riego, ubicación y la profundidad y clasificación del suelo.

Cuadro 2.- Perfiles colectados en el área de estudio con sus respectivos tiempos de riego, profundidades, ubicación geográfica y clasificación.

No. Perfil	Localidad	Profundidad (cm)	Tiempo de Riego (años)	Ubicación	Clasificación FAO-UNESCO (1999)
1	Puente Palomar	32	Temporal (CNA) proyecto Cerro Tumba	20° 10' 48.6" N, 99° 10' 8.4" O 2054 msnm	Grupo: CL; Unidad: CLp Subunidad: CLp
2	Monte Palomar	25	aguas negras 5 (Com. per.)	20° 10' 49.2" N, 99° 10' 21" O 2040 msnm	Grupo: CL, Unidad: CLp Subunidad: CLpe
3	Puente Palomar	31	aguas negras 50 (Com. Per.)	20° 10' 38.6" N, 99° 10' 38" O 2030 msnm.	Grupo: CL, Unidad: CLp Subunidad: CLpe
4	Árbol Grande	41	aguas negras 68 (CNA)	20° 13' 16.8" N, 99° 10' 23.4" O 2000 msnm	Grupo: CL, Unidad: CLp Subunidad: CLpe
5	Palo Seco	25	aguas mezcladas 75 (CNA)	20° 10' 45.4" N, 99° 13' 25.8" O 2000 msnm	Grupo: CL, Unidad: CLp Subunidad: CLpe
6	Benito Juárez	66	Temporal	20° 18' 43.8" N, 99° 08' 1.2" O 2115 msnm	Grupo: CL, Unidad: CLp Subunidad: CLp
7	La Palma	60	aguas mezcladas 10 (CNA)	20° 15' 58.2" N, 99° 07' 24" O 1990 msnm	Grupo: PH, Unidad: PHc Subunidad: PHcpe
8	Tepatepec	83	aguas mezcladas 50 (CNA)	20° 15' 41.4" N, 99° 06' 43.2" O 1990 msnm	Grupo: PH, Unidad: PHc Subunidad: PHcpe
9	Motovatha	98	aguas negras 80 (CNA)	20° 11' 11.3" N, 99° 12' 31.7" O 2000 msnm	Grupo: PH, Unidad: PHc Subunidad: PHcpe
10	Colonja Veracruz	40	aguas mezcladas 50 (CNA)	20° 15' 40.54" N, 99° 8' 13.7" O 1995 msnm.	Grupo: PH, Unidad: PHI Subunidad: PHlp
11	Jagüey Colorado	92	aguas negras 65 (CNA)	20° 12' 34.8" N, 99° 09' 37.7" O. 2020 msnm.	Grupo: PH, Unidad: PHI Subunidad: PHlp

CL= Calcisol, CLp= Petric Calcisol, CLpe= Eutri-petric Calcisol, PH= Phaeozem, PHc= Calcaric Phaeozem, PHcpe= Eutri-petric Calcaric Phaeozem, PHI= Luvic Phaeozem, PHlp= Petri-luvic Phaeozem.

B. Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo en el laboratorio.

Para el procesamiento de las muestras, los suelos se secaron parcialmente al aire, se molieron y tamizaron por malla del número 10 de 2 mm de diámetro. Posteriormente, se determinaron las siguientes propiedades físicas: color en seco y húmedo [Munsell, 1990], densidad aparente (DA) mediante probeta [Baver, 1956], densidad real (DR) mediante picnómetro [Baver, *op. cit.*], porosidad (% P) basándose en la DA y DR [Baver, *op. cit.*] y textura por sedimentación mediante hidrómetro [Bouyoucos, 1951] con la previa destrucción de la materia orgánica con H_2O_2 al 8%, y las siguientes propiedades químicas: reacción del suelo (pH) en relación 1:2.5 y 1:5 en H_2O destilada y KCl 1N, pH 7 [Jackson, 1982], conductividad eléctrica (CE) relación 1:5 en H_2O destilada mediante conductímetro [Richards, 1990], materia orgánica (MO) por método Walkley-Black (1934-1947), combustión húmeda por $K_2Cr_2O_7$ y H_2SO_4 y valoración por retroceso con $FeSO_4$ 0.5 N [Jackson, *op. cit.*], cationes intercambiables mediante extracción con NH_4OAc según Bower *et al.*, (1952) y valoración de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) por el método del Versenato según Schwarzenbach & Biedermann, (1948), y de sodio (Na^+) y potasio (K^+) por flamometría [Jackson, *op. cit.*], capacidad de intercambio catiónico (CIC) extracción mediante $NaOAc$ según Bower, (1952), y valoración por flamometría [Jackson, *op. cit.*], carbonatos totales ($CaCO_3$) por neutralización con HCl 0.5 N y valoración con NaOH 0.25 N [Richards, 1990], fósforo asimilable (P) por extracción alcalina de acuerdo a Olsen, (1945) y valoración espectrofotométrica [Jackson, *op. cit.*], nitrógeno total (Nt) mediante digestión en H_2SO_4 , destilación con NaOH 40% en H_3BO_3 4% y valoración por retroceso con HCl 0.1 N por el método de Kjeldahl, (1965) [Jackson, *op. cit.*], nitratos por el método de Harper (1924) y Prince (1945), extracción con $CuSO_4$ y Ag_2SO_4 , valoración espectrofotométrica con ácido fenol 2, 4-disulfónico [Jackson, *op. cit.*], cloruros en relación 1:2.5 por valoración con $AgNO_3$ de acuerdo a Magistad, (1945) [Jackson, *op. cit.*] y carbonatos y bicarbonatos por HCl 0.1 N [Jackson, *op. cit.*].

C. Interpretación y análisis de los resultados.

Dentro de la interpretación de los resultados se usaron los criterios edafológicos de Aguilera (1989), Porta *et al.* (1999), y Brady & Weil (1999); y los establecidos por la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000 [SEMARNAP, 2000]. Para la clasificación de los suelos se empleó la nomenclatura de la FAO-UNESCO (1999) y a la de USDA (1998), como referencias para ubicarlos de acuerdo a sus características propias y las ambientales, en un taxón determinado.

Se hizo una aproximación gráfica de la variación superficial horizontal de los parámetros de los suelos estudiados, los datos obtenidos de los resultados físicos y químicos en los subhorizontes Ap₁₁ de cada perfil se vaciaron en el programa informático Surfer16 (versión 6.01, 1993-95), además, se realizó una serie de barrenaciones de referencia, en función de la fotointerpretación de la zona, para delimitar la superficie dominada por un perfil representativo (*Anexo*). Se extrapolaron dichos resultados a las barrenaciones correspondientes, en función de su proximidad y similitud estructural y, posteriormente, se interpolaron mediante Kriging para trazar las curvas aproximadas de variación superficial de los parámetros edáficos evaluados. Se usó como mapa base el contorno del municipio de Mixquiahuala, previamente digitalizado usando las fotografías aéreas de la zona, escaneadas y empalmadas en el sistema de información geográfica Mapinfo Professional (version 4.5). El análisis integral de los datos de campo y laboratorio de cada perfil, la aproximación gráfica de la variación superficial horizontal de los parámetros de los suelos estudiados y la fotointerpretación del área de estudio, permitió hacer una aproximación gráfica de la distribución de las subunidades de suelos en el área de estudio.

Se realizó el análisis de regresión lineal para determinar la relación entre el tiempo de riego y las propiedades físicas y químicas de los subhorizontes Ap₁₁ y Ap₁₂ de los grupos de suelos encontrados, con ello, se graficó cada parámetro edáfico (variable dependiente) con respecto los valores de tiempo (variable independiente) y, con el fin de ajustar la tendencia a una recta con la menor varianza posible y con el mejor índice de correlación de las variables (cercano a 1 o -1), en algunos casos se aplicó el cambio de variable por el logaritmo natural o logaritmo base 10 de la variable independiente (tiempo de riego), lo cual se indica en la ecuación obtenida.

Las tendencias y efectos en función del tiempo de riego con aguas residuales se evaluaron de manera integral al relacionar la variación de las características físicas y químicas de los perfiles, mediante el análisis de regresión lineal, la aproximación gráfica de la variación superficial horizontal y la aproximación gráfica de la distribución de las subunidades de suelos en el área de estudio, con los datos colectados en campo y la información recabada en el trabajo de gabinete.

VI. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

A. Ubicación geográfica.

El municipio de Mixquiahuala tiene una superficie de 105.73 km² y representa el 0.51 % de la superficie del Estado [INEGI, 1995], se localiza entre los 20° 19.4' y 20° 09.6' Latitud Norte y los 99° 08.28' y 99° 17.85' de Longitud Oeste, a una altitud promedio de 2000 msnm (*Mapa 4*). Actualmente, el Municipio enfrenta algunos problemas ejidales al suroeste que afectan el establecimiento de sus límites [Roldán, 2000]. Sin embargo, puede decirse que colinda al Norte con los municipios San Salvador, Progreso de Obregón y Chilcuautla; al Sur con Ajacuba, Tetepango, Tlahuelilpan y Tezontepec de Aldama; al Este con San Salvador, Francisco I. Madero y Ajacuba y al Oeste con Tezontepec de Aldama y Chilcuautla [INEGI, 1995]. Los centros poblados del Municipio son la cabecera municipal (Mixquiahuala), cinco cabeceras de subsistema y seis localidades menores, sus principales comunidades son Motovatha, Tepeitic, Colonia Veracruz, Teñhe y Palmillas [SEGOB-GEH, 1988; INEGI, 1995].

B. Comunicaciones, transportes y servicios.

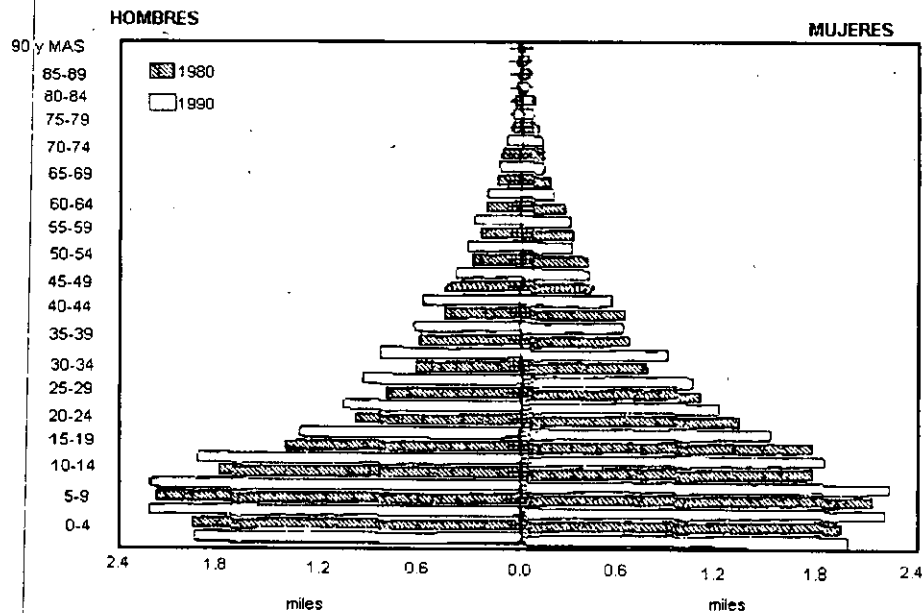
El Municipio está dotado de carretera estatal; su sistema de ciudades está comunicado por carreteras no solo a nivel de cabeceras de subsistema, sino de sus localidades menores. La cabecera y 10 localidades cuentan con servicios de agua potable, y alcantarillado, además de energía eléctrica, servicios de teléfono, correo, telégrafo y recibe señales de radio y televisión [SEGOB-GEH, *op. cit.*]. La longitud total de la red carretera es de 47.5 km; siendo carretera secundaria pavimentada 24.2 km y camino rural 23.3 km de los cuales 13 km están pavimentados, 6 km son terracería y 4.3 km están revestidos [INEGI, 1997]. El Municipio cuenta con 11 unidades médicas en servicio del sector salud, en donde el nivel de operación por institución es el siguiente: ISSSTE cuenta con una unidad de consulta externa y una unidad de hospitalización especializada, el IMSS-Solidaridad cuenta con tres unidades de consulta externa y el SSA cuenta con 7 unidades de hospitalización general [INEGI, 1997]. En cuanto a servicios educativos el Municipio cuenta con 56 escuelas, de las cuales 16 son de nivel preescolar, 23 son primarias, 12 son secundarias y 3 son de nivel bachillerato, el resto es de nivel técnico terminal [INEGI, 1997].

C. Población y actividades económicas.

En 1984, su población se estimaba en 29,275 habitantes con una tasa de crecimiento de 3.90 % y una densidad poblacional de 133 hab/km² [SEGOB-GEH; *op. cit.*], hasta 1990 la población total es de 31,137 habitantes; de estos 49.3 % (15,341) son hombres y 50.7 % (15,796) son mujeres (*Figura 1*) [INEGI, 1995].

POBLACION TOTAL POR SEXO SEGUN GRUPO
QUINQUENAL DE EDAD
1980-1990

GRAFICA 2.b



FUENTE: "Hidalgo, Resultados Definitivos. X y XI Censos Generales de Población y Vivienda, 1980 y 1990". INEGI

Figura 1.- Pirámide de edades del municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, INEGI, 1995.

La población de 5 años o más que habla alguna lengua indígena es de 782, de éstos 661 hablan otomí (hñahñú), 17 náhuatl, 4 zapoteco, 1 mazahua, 1 mixe, 1 purepecha, y 97 otras lenguas indígenas insuficientemente especificadas [INEGI, 1995]. En 1984, la población económicamente activa se estimó en 29 %; de éste porcentaje el 31-% al sector primario, el 13 % al secundario, 18 % al terciario y 37 % a otras actividades [SEGOB-GEH, *op. cit.*], hasta 1990 la población económicamente activa fue de 7,964 personas (25.6 %) de los cuales 6,447 son hombres (6,128 ocupados y 319 desocupados) y 1,517 son mujeres (1,379 ocupadas y 38 desocupadas) [INEGI, 1995]. Entre las actividades económicas destaca la agricultura, siendo alfalfa, maíz y cebada los principales cultivos; en ganadería se cría ganado bovino de leche y carne, ovinos, caprinos y porcinos; en avicultura, se crían aves de engorda y postura, así como pavos; en apicultura, se produce miel y cera; en la industria se cuenta con

5 microempresas [SEGOB-GEH, *op. cit.*]. Hasta 1996, las unidades de producción rural abarcan en total 9,921.989 ha, en donde 9,705.635 ha son superficies de labor, de las cuales 6,043.910 ha presentan riego, 1,920.708 ha son de temporal y 1,741.017 ha son de riego y temporal; 203.960 ha son de pasto natural o agostadero, y 12.394 ha no tienen vegetación. La superficie total sembrada en hectáreas por disponibilidad de agua según el tipo de cultivo y el volumen en toneladas del Municipio se resume en la tabla 3. La superficie total fertilizada en el municipio de Mixquiahuala es de 28,706 ha, la superficie total con semilla mejorada es de 58,520 ha, la superficie total con asistencia técnica es de 10,310 ha, la superficie total atendida con servicios de sanidad vegetal es de 4,122 ha y la superficie total mecanizada es de 82,497 ha [INEGI, 1997].

Tabla 3.- Superficie total sembrada en hectáreas por disponibilidad de agua según el tipo de cultivo y el volumen en toneladas y valor en miles de pesos en el municipio de Mixquiahuala de Juárez.

Cultivo	Área sembrada (ha)		Volumen en toneladas		Valor (miles de pesos)	
	riego	Temporal	riego	temporal	riego	temporal
cíclicos						
maíz	1,574	590	7,370		7,002	
frijol	640	1,160	750		2,250	
calabacita	499	-	3,112		6,852	
avena forraje	38	-	780		21	
cebada forraje	142	20	2,224		56	
chile verde	336	-	1,680		5,880	
trigo	744	-	3,680		2,256	
jitomate	56	-	288		550	
perennes						
alfalfa	1,457	-	189,420		4,546	
pastos	19	-	2,284		66	
nopal-tuna	-	54		110		110

Fuente INEGI, 1997.

Dentro del sector ganadero, 748 ha se dedican a la cría de bovino (de carne, leche y trabajo) con 9,032 cabezas, 946 ha se dedican a la cría de porcino con 4,680 cabezas, 204 ha se dedican a la cría de caprino con 1,695 cabezas, 761 ha se dedican a la cría de ovino con 10,235 cabezas, 1,459 ha se dedican a la cría de aves de corral con 25,155 cabezas y existen 540 cabezas de ganado equino (abarca caballar, mular y asnal) y 138 colmenas de abejas. En el sector minero, se cuenta con 8 unidades económicas en el área de minerales no metálicos. Dentro de las manufacturas, existen 41 unidades económicas en el área de producción de alimentos, bebidas y tabaco, 6 unidades en el área de producción de madera y muebles y 12 unidades de producción en el área de minerales no metálicos [INEGI, 1997]. En cuanto al comercio, el Municipio cuenta con 18 unidades económicas de venta al por mayor y 509 unidades de venta al por menor, 36 unidades de servicios educativos, de investigación

civiles y médicos, 42 de servicios profesionales, 90 de mantenimiento y reparación, 15 tiendas CONASUPO, 1 tianguis y 1 mercado, donde destaca la venta de artesanías de cuero, barro y vara como cinturones, fuetes, bolsas, monederos, ollas, jarros, cazuelas, canastas, paneros, tortilleros y artículos decorativos. Con relación al turismo, el atractivo arquitectónico principal es una iglesia construida en 1786, además se cuenta con dos hoteles de una estrella y 51 restaurantes [INEGI, 1997; 1995].

D. Climatología.

De acuerdo con los datos reportados por la estación 13-032 Mixquiahuala [INEGI, 1995] el tipo climático que cubre el 100 % del Municipio es BS1k (*Mapa 6*), aunque de acuerdo al sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1973), corresponde al seco templado con lluvias en verano y estación seca en invierno, con una oscilación térmica menor a 5° C (BS1 kw (i') gw'). La estación se ubica a 2050 msnm en las coordenadas 20° 14' latitud Norte y 99°12' longitud Oeste; los datos fueron generados durante un período de 46 años para la temperatura y 44 años para la precipitación, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Tabla 4.- Datos climáticos de la estación 13-032 Mixquiahuala.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual	P/T	% Pinv.
T°C	13.8	15.6	17.5	19.2	20.0	19.7	19	19.1	18.4	16.9	15.5	14.4	17.4	28.7	5.2
Pmm	10.2	4.6	10.3	27.5	60.6	95.3	83.8	71.7	80.8	36.9	14.3	7.9	503.8		
T Osc. = 6.2					L	u	v	i	a	s					

Fuente: INEGI, 1996

De acuerdo al IMT* (1998), bajo este régimen de lluvias los suelos tienen una cantidad limitada de humedad, pero es suficiente durante la estación de crecimiento de cultivos por lo que el régimen de humedad es ústico. El régimen es térmico ya que la temperatura promedio anual es de 17.4 °C con una diferencia entre temperaturas de verano e invierno igual a 6.2 °C, en donde los procesos formadores actúan a una velocidad e intensidad mayor. Con los datos de los valores promedio mensual de temperatura (T) y precipitación (P) generados por las estaciones climatológicas se pueden calcular los valores de evapotranspiración, deficiencia de agua, movimiento de humedad en el suelo; una vez obtenidos los índices necesarios para establecer la fórmula climática para hacer un balance de agua en el suelo de acuerdo al método Thornwhaite en 1948 [IMT, *op. cit.*]. Se obtiene el índice de calor mensual (i_n) = $(T/5)^{1.514}$ y el índice de calor anual (I) = $\sum i_n = 79.88$, para calcular la

* Instituto Mexicano del Transporte

evapotranspiración potencial mensual (sin corregir) $EPM = 1.6 (10 T/I)^a$ donde $a = (6.76 \times 10^{-7} I^3) - (7.71 \times 10^{-5} I^2) + (17.92 \times 10^{-3} I) + 0.49289 = 1.78$, y determinar así el movimiento de humedad en el suelo ($MHS = [si EPM > P \Rightarrow MHS = 0; si EPM < P \Rightarrow MHS = P - EPM]$), la evapotranspiración real ($EPR = [si P > EPM \Rightarrow EPR = EPM; si P < EPM \Rightarrow EPR = P + MHS]$) y la deficiencia de agua ($d = EPM - EPR$) (Cuadro 2). Con base en lo anterior, los meses más cálidos son abril, mayo, junio, julio y agosto, la mayor evapotranspiración real se da en los meses de mayo, junio y julio y potencialmente en agosto, los centímetros de agua acumulados en el suelo son 3.46 en junio, julio y septiembre con lo que la zona tiene un déficit general de agua casi todo el año incrementándose en los meses de febrero, marzo y abril.

Cuadro 2.- Calor anual (I) y mensual (i_n), evapotranspiración mensual (EPM) y real (EPR), movimiento de agua en el suelo (MHS) y déficit de agua (d) de la zona de estudio.

Meses	i_n	EPM (mm)	MHS (cm)	EPR(mm)	d (mm)
E	4.65	4.23	0	1.02	3.21
F	5.6	5.27	0	0.46	4.81
M	6.66	6.46	0	1.03	5.43
A	7.67	7.62	0	2.75	4.87
M	8.16	8.19		6.06	2.13
J	7.97	7.98	1.55	7.98	0
J	7.55	7.48	0.9	7.48	0
A	7.61	7.55	0	7.17	0.38
S	7.19	7.07	1.01	7.07	0
O	6.32	6.07	0	3.69	2.38
N	5.54	5.21	0	1.43	3.78
D	4.96	4.57	0	0.79	3.78
	$I = \sum i_n = 79.88$			$\Sigma = 46.93$	

El índice Weinter, que determina la influencia de la T y la humedad en el intemperismo dado por $N = 12 E_j/P_a$, donde E_j = evapotranspiración en junio y P_a = precipitación anual, es igual a 1.9 e indica que en el área de estudio el desarrollo de los suelos es normal, ya que las condiciones climáticas permiten una alteración intensa [IMT, *op. cit.*]. El índice de lixiviación que valora el grado de intemperismo químico sobre roca y suelo, dado por $L_n = P_h - E_h + (P_a/10)$; donde P_h = lluvia en la estación húmeda y E_h = evapotranspiración potencial en estación húmeda, es de 36.5 mm y se ubica en un rango bajo. El valor del índice de alteración también cae dentro del rango bajo, siendo 7.3 y dado por $AL = T L_n / 10^2$ donde T = temperatura máxima promedio anual [IMT, *op. cit.*]. El índice de crecimiento vegetal (ICV) en el área de estudio es de 3.5, dado por $ICV = 1 / [(1/10)^{0.1T} + 10^{0.1t} / 10^{0.5 HA} + 1/10^2]$ x $(12d)^{0.75}$, donde T = temperatura máxima promedio anual, t = temperatura mínima promedio anual, HA = agua almacenada + P anual + EP anual y d = 24 h [IMT, *op. cit.*]. Sin embargo estos índices están dados por

las condiciones naturales del área de estudio y no consideran el agua de riego proporcionada al suelo.

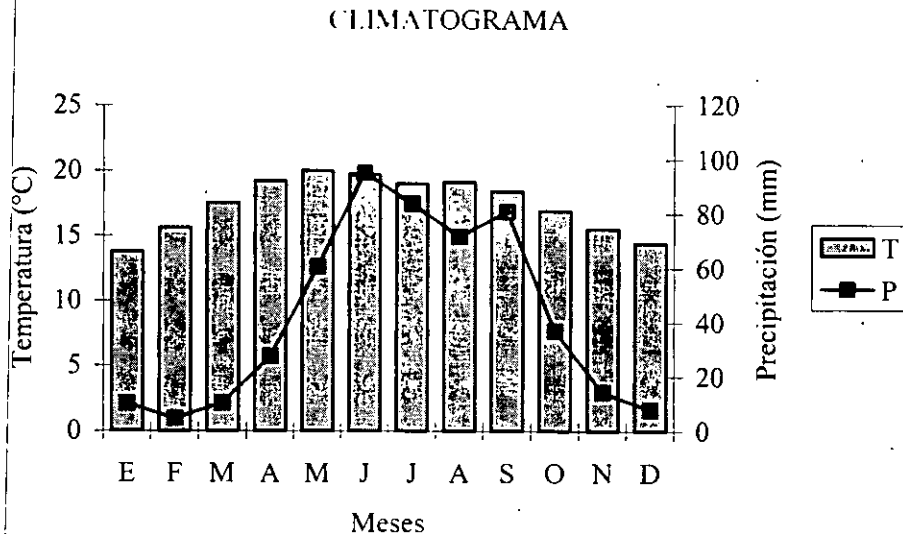


Figura 2.- Diagrama ombrotérmico construido a partir de los datos generados por la estación 13-032, Mixquiahuala de Juárez.

E. Geología

a. Historia geológica.

La historia geológica del Valle del Mezquital se refleja en el Municipio, en la cual, de acuerdo con Blázquez, (*op. cit.*) existen evidencias de plegamientos calizos que emergieron en el Cretácico superior dando lugar a una topografía en la que las eminencias correspondían a anticlinales y las depresiones a los sinclinales. En el Mioceno inicia una gran actividad ígnea con erupciones de andesitas, aquí las fracturas transversales facilitaron derrames de lavas que afectaron aún más la topografía elevando la altura de las montañas y disminuyendo la amplitud de los valles, interrumpiendo el drenaje establecido y dando lugar a la formación de lagos. A las emisiones andesíticas siguieron dacitas y riolitas que las cubren, como en el cerro de Mixquiahuala, posteriormente, andesitas basálticas y ya en el Cuaternario, basaltos. Durante el Cuaternario debido a las glaciaciones se desarrolló un importante trabajo degradante arrastrando grandes volúmenes de materia de las montañas hasta disminuir su altura, rellenando las cuencas nivelando el terreno en los valles de Tula y Actopan. La planicie de Tula se distingue por la interposición de morrenas provenientes de San Miguel de la Cal.

b. Litología.

En la carta geológica de Pachuca Hidalgo F14-11 escala 1: 250 000 [INEGI, 1983] se observa la distribución de los principales elementos litológicos en el municipio de Mixquiahuala. La mesa Rincón-Los Caballos y los cerros circundantes están formados por basáltos del Cuaternario, algunos pequeños manchones en Morelos, Palmillas, Árbol Grande y alrededor del río Salado y Tula. El cerro Dorodeje y pequeñas áreas de la Colonia Veracruz y al norte de los Mendoza y Denganthza se distribuyen calizas del Cretácico inferior. Hacia el Este se distribuyen basaltos y brechas volcánicas básicas del Triásico superior. Todo el Valle está relleno de volcanoclastos del Terciario superior, desde Jagüey Blanco, San José, la Puerta, José Parres, Motovatha, hasta Carrillo Puerto (*Mapa 7*).

c. Estratigrafía.

En la sección geológica de la zona de Mixquiahuala [CNA, inédito] las formaciones geológicas de las más antigua a la más reciente en esta zona, de acuerdo con Segerstrom (1961), son:

- Formación El Doctor.- formado por calizas del Cretácico inferior
- Formación el Soyosal.- formado por calizas intercaladas con lutitas del Cretácico superior.
- Grupo Pachuca.- formado por rocas ígneas, basaltos, andesitas y riolitas del Mioceno.
- Formación Tarango.- Compuesto por sedimentos volcanoclásticos (*Figura 3*).

d. Hidrología.

De acuerdo con Blázquez (*op. cit.*), el río Tula es el principal colector de la región. Es generado en los flancos orientales del cerro de la Bufa de la Sierra de Monte Alto, estado de México, y después se une al río de San Juan, tomando el nombre de río Moctezuma, hasta la confluencia con el río Pánuco, que desemboca en el Golfo de México, cerca del puerto de Tampico. El río Tula recibe como primer afluente al río El Salto, el cual está conectado artificialmente con el río de Cuautitlán de la cuenca de México por medio de Tajo de Nochistongo, posteriormente concurre con el arroyo Tlautla, con el de las Rosas y con el de Nextlalpan y a cuatro kilómetros al Noreste de Tezontepec se encuentra la confluencia del río Salado, de 35 km de cauce que se inicia cerca de Tequixquiac y se conecta por medio del túnel Zumpango-Tequixquiac con el gran canal del desagüe, colector de aguas negras de la Ciudad de México (*Mapa 1*). Cerca de Mandhú se encuentra la confluencia con el río Actopan, después con el arroyo Portezuelo y por último, concurre el arroyo de Orizabita [Blázquez, *op. cit.*].

Prácticamente todo el territorio plano de la sección Tula-Mixquiahuala se encuentra regado formando parte del DR-03. La distribución de los canales de riego en el área de estudio se observa en el mapa 8.

La presa Endhó almacena 183,000,000 m³ de agua para riego beneficiando a 42,843 ha. Las principales áreas de explotación acuífera se localizan sobre todo en la parte que comprende a Tepeji de Ocampo, Ixmiquilpan, Actopan y Tula y están contenidos en sedimentos terciarios continentales y piroclásticos, basálticos y andesíticos, la recarga de estas áreas subterráneas incrementó notablemente al iniciarse el riego con agua superficial. Sin embargo, un aspecto negativo de esta zona es el uso de aguas negras en agricultura, ya que implica un riesgo de contaminación de estos acuíferos con detergentes y componentes nitrogenados debido a su alta transmisibilidad [INEGI, 1992].

e. Fisiografía.

El área de estudio pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y a la subprovincia de llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo [INEGI, 1992]. Los sistemas de topoformas predominantes en Mixquiahuala son llanuras en prácticamente toda su extensión, y lomeríos en la mesa Rincón-Los Caballos y en el cerro el Elefante, aunque en los límites al Norte de Mixquiahuala, se observan topoformas de Cañones del Cerro Dorodeje (*Mapa 9*). Mediante el análisis interpretativo de las fotografías aéreas 004, 005, 006: líneas 163 y 164 de la zona F-14-11, escala 1:75,000 [INEGI, 1995] y la posterior corroboración en campo, se observó que el área de estudio es predominantemente plana. Presenta zonas ligeramente más bajas: cerca de la ciudad de Mixquiahuala, al norte de Árbol Grande y en áreas de influencia del río Tula, y pequeñas elevaciones en dos cerritos en la colonia Veracruz. En áreas no muestreadas del municipio de Mixquiahuala se ubican las formas cerriles la Mesa el Rincón-Los Caballos al Sureste, el cerro Mothandó y el cerro Bathe al Oeste y el cerro Benito Juárez y el cerro Lobo al norte (*Mapa 9*). La sección identificada como áreas de cultivo, dentro de la que se seleccionaron las zonas de muestreo en función del tiempo de riego, abarcan prácticamente todo el Municipio. Los tonos blancos en las formaciones cerriles del c. Benito Juárez y el c. Lobo al norte de Mixquiahuala y del cerro Elefante en el municipio de Progreso coinciden con la presencia de CaCO₃; se presentan también en las áreas de cultivo. Sin embargo, no se presentan en la mesa el Rincón-Los Caballos, la cual presenta un color gris muy oscuro lo que en campo concuerda con materiales ígneos de color rojizo.

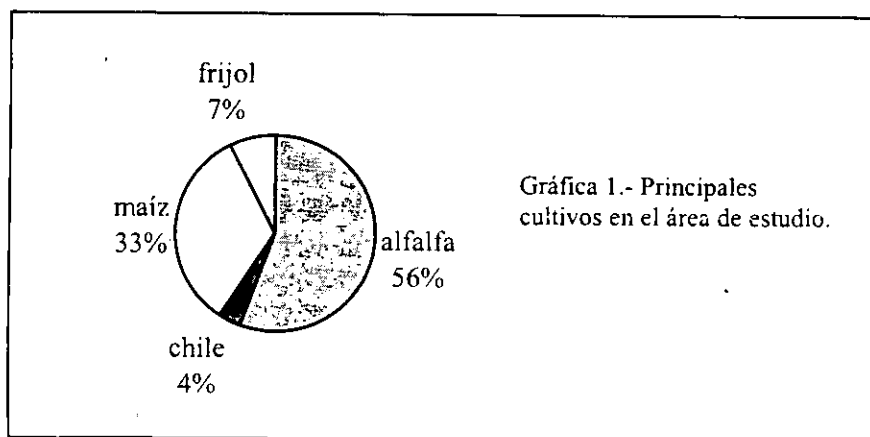
f. Suelos.

Los suelos se originan de materiales coluviales y aluviales transportados de las colinas, dando como resultado perfiles de profundidad variada que reflejan la topografía y geología local. Las áreas de altiplanos tienen suelos formados *in situ* de profundidad escasa, menor a 25 cm, contienen altos contenidos de carbonatos, los cuales tienen su origen en las rocas calizas intemperizadas por la acción

de la precipitación y la temperatura. La presencia y desarrollo de los suelos está condicionada principalmente por el clima, el relieve y el material parental, la mayor parte de los suelos de esta zona tienen fase lítica y son de origen residual, someros y de desarrollo moderado o incipiente. Destacan por orden de abundancia tres categorías de suelos: las Rendzinas, los Vertisoles Pélicos y los Phaeozems Háplicos y calcáricos de acuerdo con la clasificación FAO [INEGI, 1992]. De acuerdo con la Carta Edafológica Mixquiahuala (F14 C89), escala 1:50,000 [INEGI, 1984] en las zonas planas en la Colonia Veracruz, a las afueras de Árbol Grande, Teñhé y la subestación eléctrica la Cañada, predomina el Vertisol Pélico de fase dúrica profunda y textura fina. Bordeando los cerros Lomalarga, Dos Peñas, Colorado y la Virgen se distribuyen Vertisoles Pélicos y Rendzinas de fase petrocálcica y textura fina; a su vez, a ésta le rodea Rendzina de fase petrocálcica y textura media y Phaeozem Háplico y Litosol de fase lítica y textura media. En el resto del Municipio predomina la Rendzina y Vertisol pélico de textura fina y fase petrocálcica. Hacia Santa María Batha se distribuye predominantemente Vertisol pélico bordeando a los cerros Mandó y Bathe en combinación con Cambisol Cálxico y Vertisol Crómico en fases dúricas y dúricas profundas, respectivamente. En las topoformas cerriles se distribuyen Litosoles en combinación con Phaeozem háplico de texturas medias (Mapa 11).

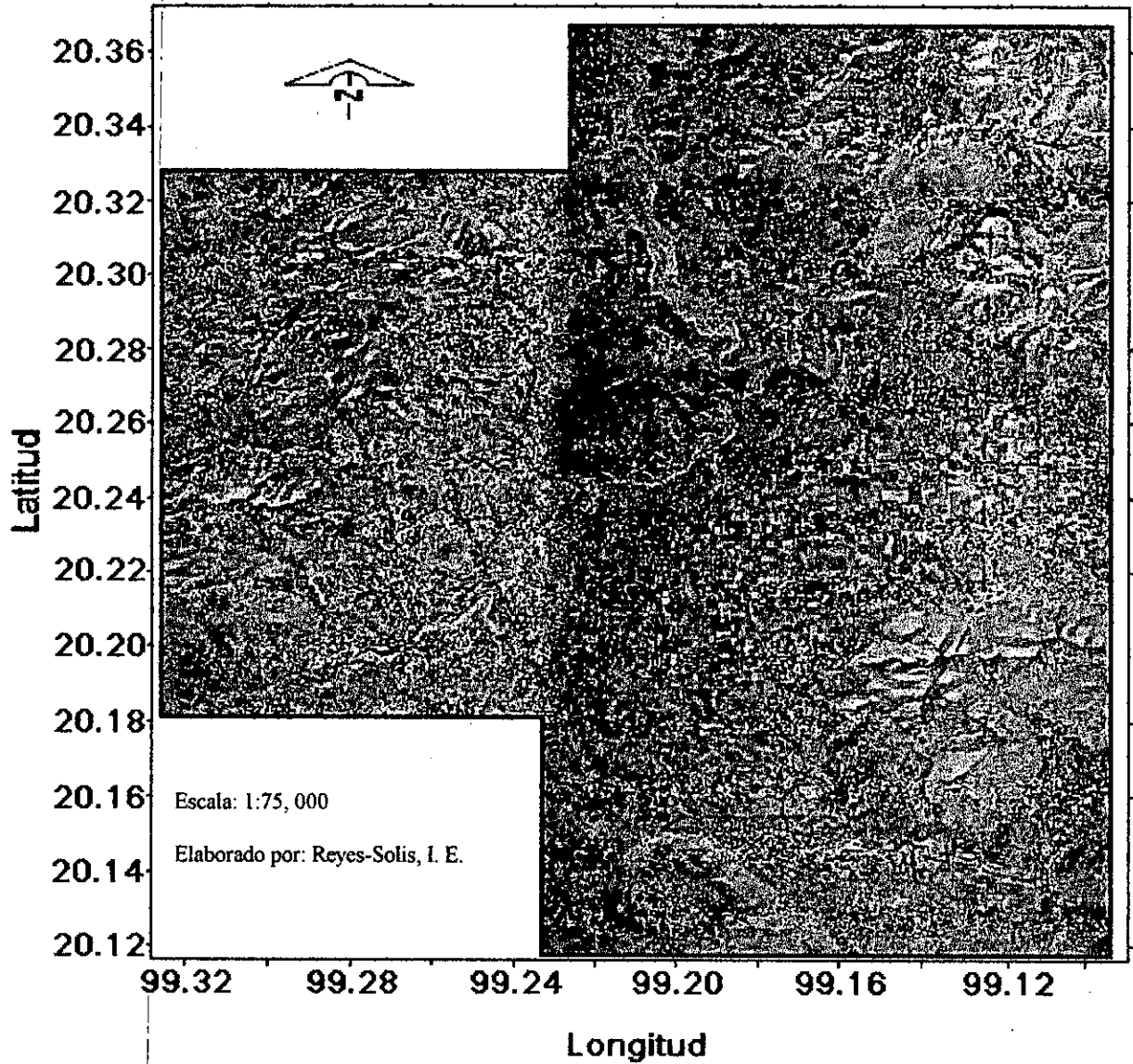
F. Vegetación.

En cuanto a la vegetación, la mayor parte del área de estudio consiste de especies introducidas para cultivo, ya sea bajo agricultura de temporal o de riego, sólo en las partes elevadas que corresponden a las formas cerriles se observa matorral crasicaule, algunas veces en combinación con matorral subinerme (Mapa 10) [INEGI, 1992]. Las formas de vegetación predominante en el área de estudio son los cultivos, aunque existen partes con vegetación natural, los principales cultivos son alfalfa (56 %) y maíz (33 %), seguidos por frijol (7 %) y chile (4 %).

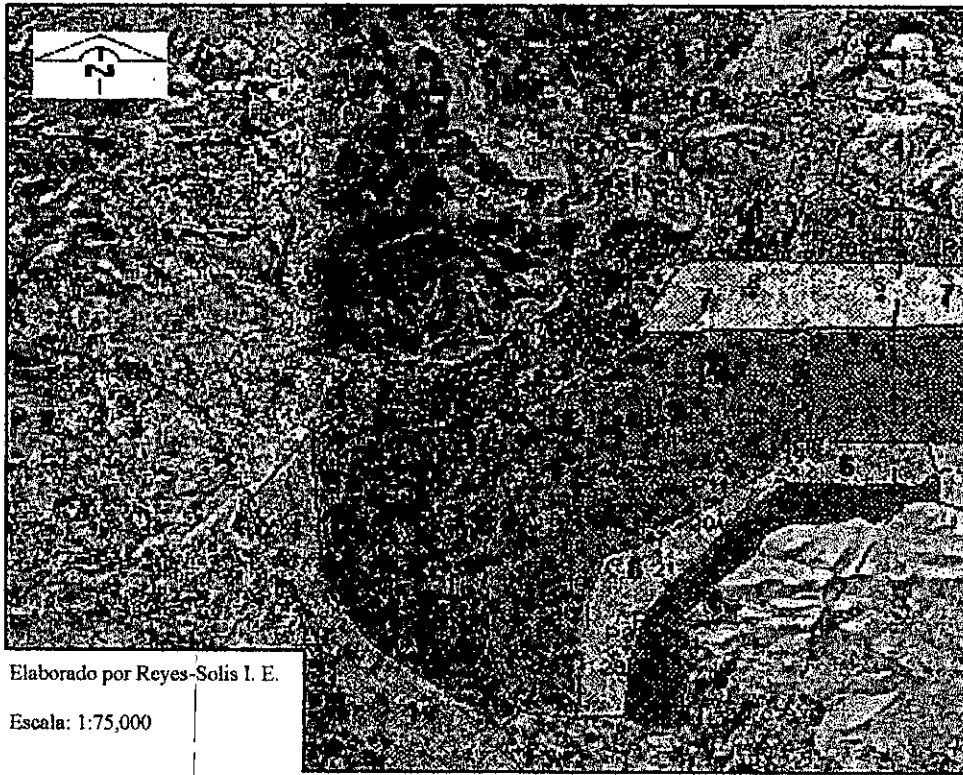


Gráfica 1.- Principales cultivos en el área de estudio.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO



MAPA 4.- Localización geográfica del área de estudio, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hgo. En línea discontinua color rojo se delimita el Municipio, los perfiles están indicados por la letra P delante del número correspondiente. Tanto barrenaciones como perfiles están indicados con símbolos rojos.



HISTORIA DEL RIEGO AGRÍCOLA Y CALIDAD DEL AGUA

- 2 Riego desde 1920 (agua negra)
- 4 Riego desde 1925 (agua mezclada)
- 5 Riego desde 1932 (agua negra)
- 6 Riego desde 1954 (agua negra)
- 7 Riego desde 1960 (agua mezclada)
- 10 Riego desde 1969 (agua mezclada)
- 21 Riego desde 1990 (agua mezclada)
- 11 Proyecto Cerro Tumba

- Límite municipal
- Límite del área de riego

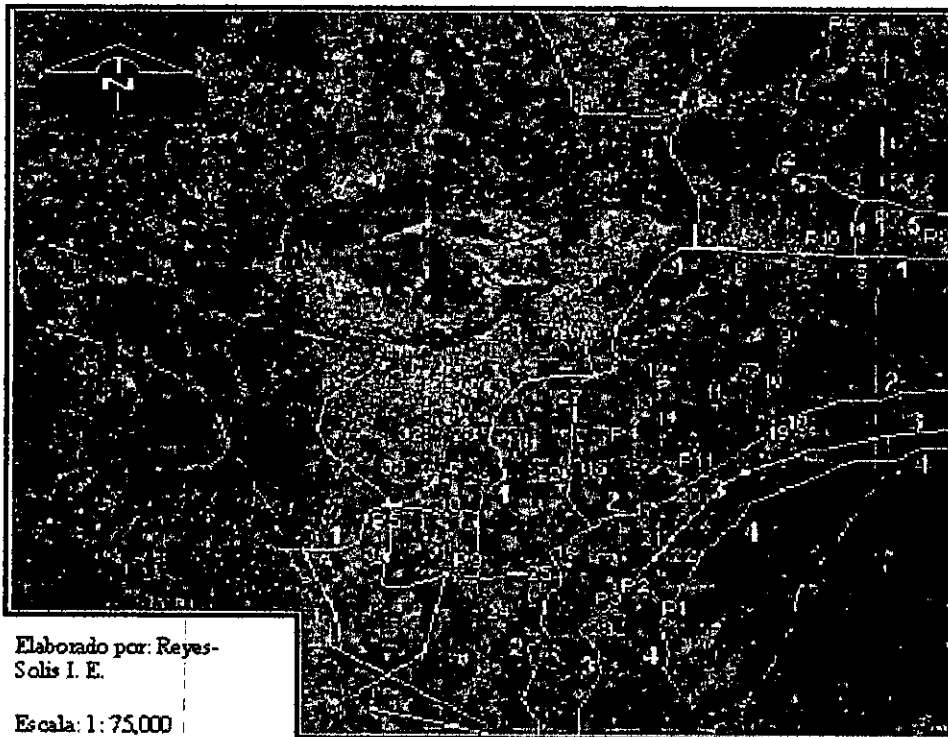
- P Perfil
- ◆ Punto de muestreo por barrenación o por perfil

Elaborado por Reyes-Solis I. E.

Escala: 1:75,000

Fuente: Mapa de Desarrollo Histórico del Riego Agrícola (CNA, inédito).

MAPA 5.- Desarrollo histórico del riego y calidad del agua en el área de estudio, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.



DISTRIBUCIÓN DE LOS CANALES DE RIEGO

- 1 Endhó
- 2 Requena
- 3 Alto Requena
- 4 Proyecto Tumba
- 5 Tepatepec

- Límite municipal
- ◆ Punto de muestreo, Barrenación o Perfil

- P Perfil

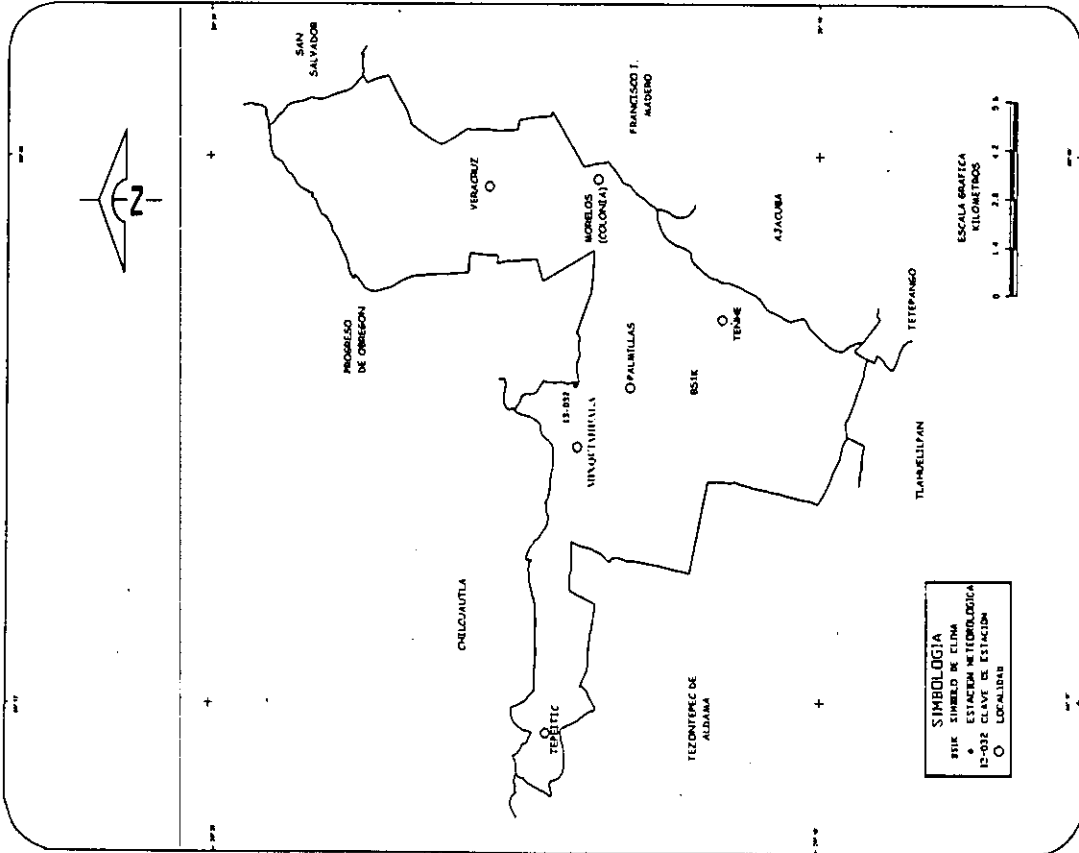
Basado en el Diagrama Hidrográfico (CNA) y en fotointerpretación.

Elaborado por Reyes-Solis I. E.

Escala: 1:75,000

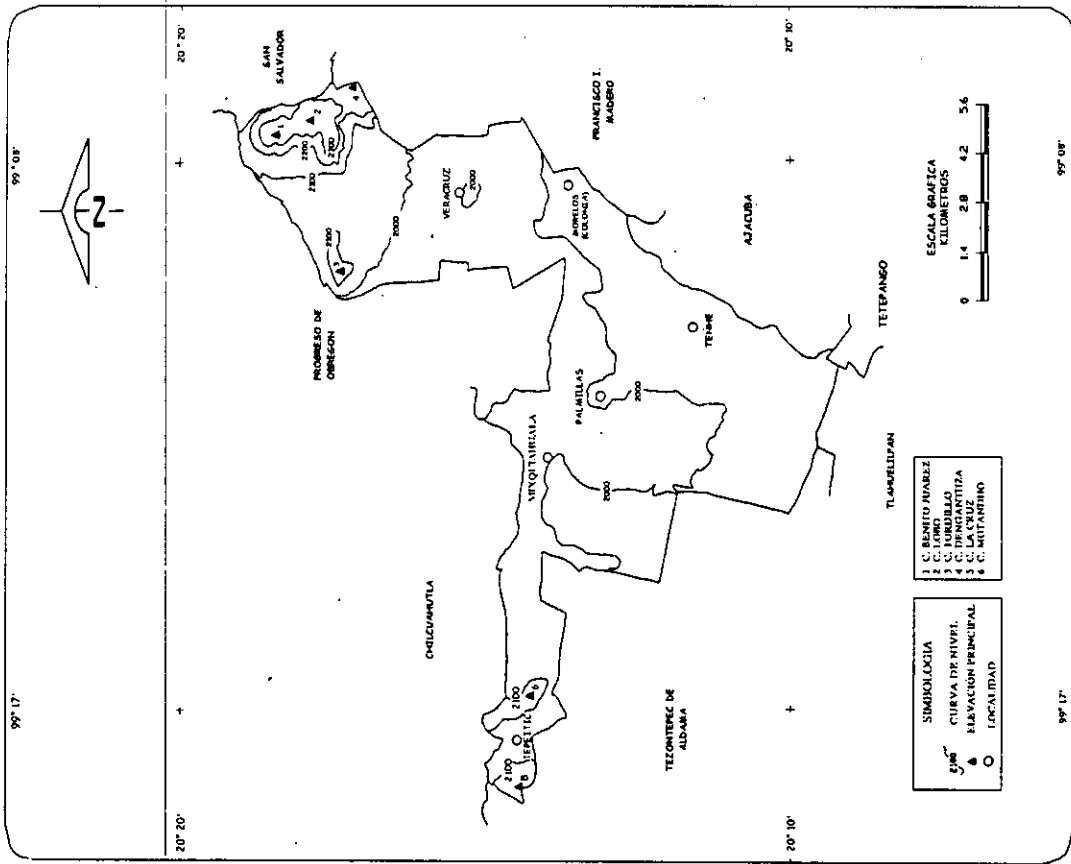
Mapa 8.- Distribución de los canales de riego en el área de estudio, municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

Climas



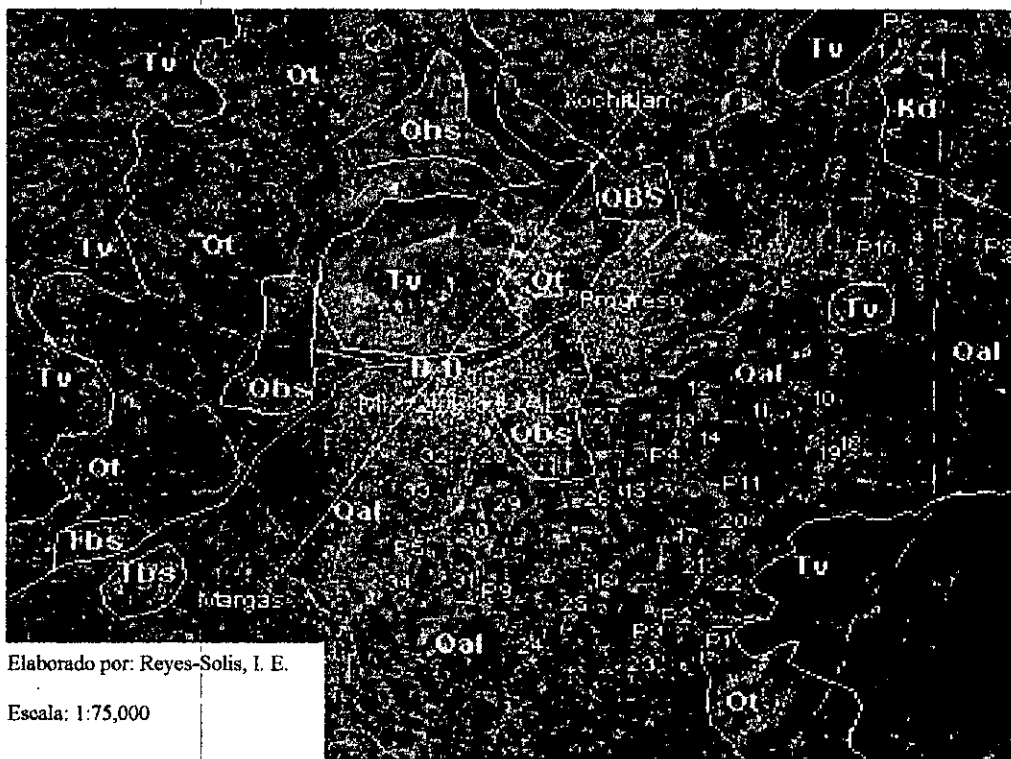
FUENTE: INEGI, Carta de Climas, 1:1 000 000

Orografía



FUENTE: CESNEGI, Carta Topográfica, 1:50 000.

MAPA 6.- Clima y orografía del municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo. Fuente: cuaderno municipal, (INEGI, 1995).



GEOLOGÍA



CUATERNARIO

- Qal Aluvión
- Obs Flujo de lava
- Ot Sedimentos con roca volcánica

TERCIARIO

- Tv Material Igneo

CRETÁCICO

- Kd Caliza

D-D Sección Geológica

◆ Punto de Muestreo, perfil o barrenación, P= Perfil

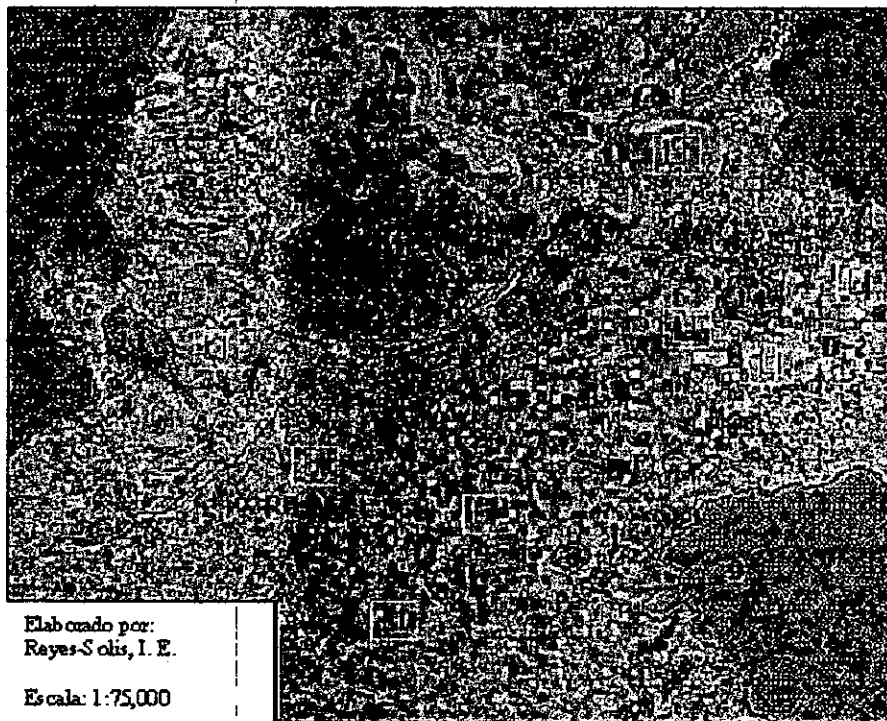
--- Límite municipal

Elaborado por: Reyes-Solis, I. E.

Escala: 1:75,000

Fuente: Carta Geológica F14-11 (INEGI, 1983), Mapa Hidrogeológico (CNA, inédito)

MAPA 7.- Geología del área de estudio, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.



FISIOGRAFÍA E HIDROLOGÍA



COMUNIDADES	ELEVACIONES
1 Mixquiahuala	9 Mesa El Rincón-Los Caballos
2 Palmillas	10 C. Elefante
3 Tenhé	11 C. Bathe
4 Motovatha	13 C. Motandó
5 Ábol grande	14 Dos Cerros
6 Colonia Veracruz	15 C. Lobo
7 Sta. Ma. Baña	16 C. Densardiza
8 Tenseite	

--- Límite Municipal

— Río Tula

■ Fisiografía Cárcica

■ Lomeríos

□ Llanura

RH 26 Región Hidrológica
D-1 Subsección Tula
D-2 Subsección Actopan

◆ Punto de muestreo por perfil o barrenación

P= Perfil

Elaborado por: Reyes-Solis, I. E.

Escala: 1:75,000

Fuente: SIGE Hidalgo (INEGI, 1992), Perspectiva del Municipio (INEGI, 1996)

MAPA 9.- Fisiografía e hidrología del área de estudio, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

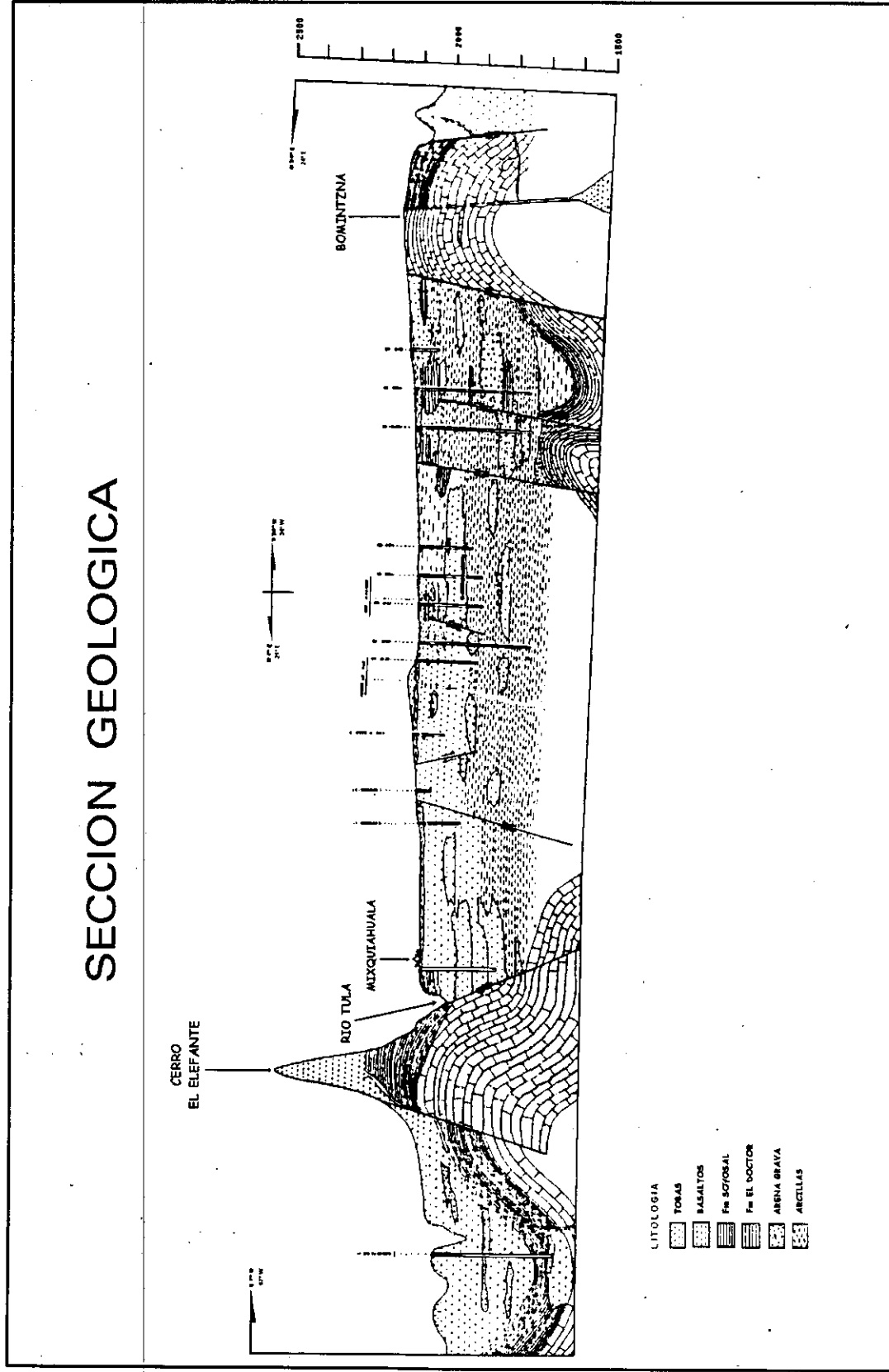
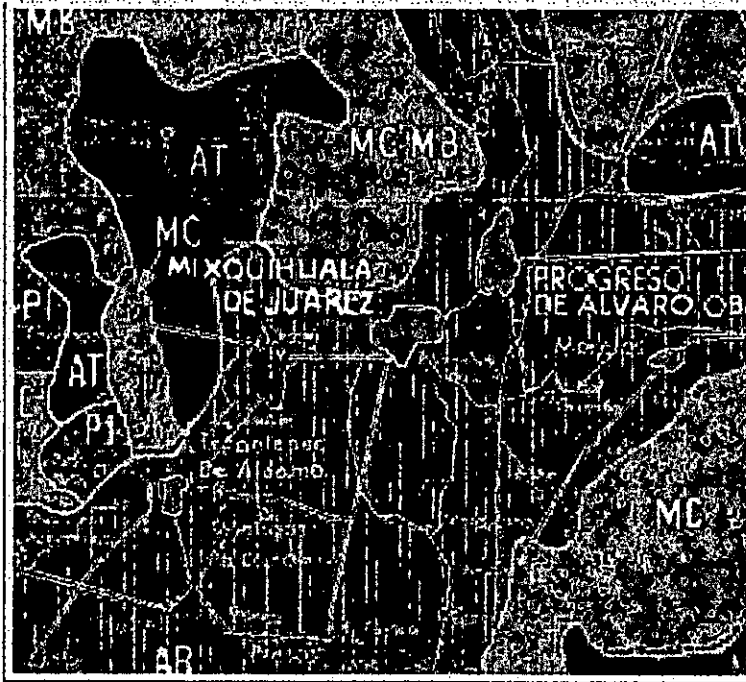


Figura 3.- Sección geológica del área de estudio, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo (CNA, inédito Tomado de Contreras, 1998).



VEGETACIÓN



AT Agricultura de Temporal

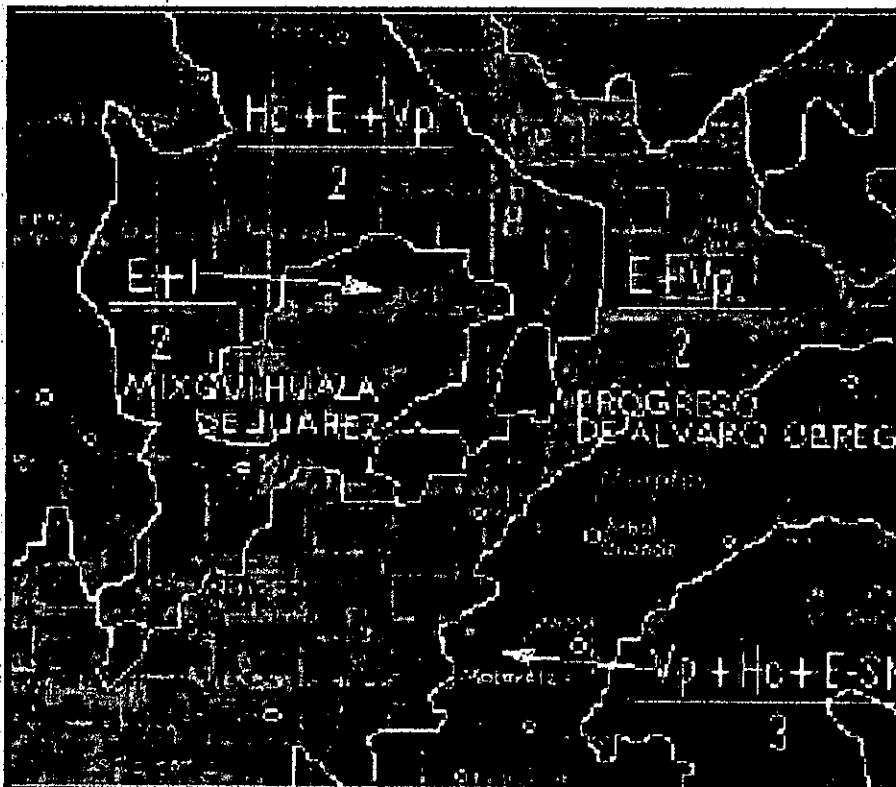
MC Matorral Crasicaule

PI Pastizal Inducido

AR Agricultura de Riego

Tomado de INEGI, 1992 modificado por Reyes-Solis I. E.

MAPA 11.- Vegetación del área de estudio, municipio de Mixquiahuala, Hidalgo. Fuente: INEGI, 1992, modificado por Reyes-Solis I. E.



SUELOS



LEYENDA

E Entisol

I Litosol

Vp Vertisol Pelico

Hc Feozem calcárico

2 textura fina

3 textura gruesa

Fuente: SIGE Hidalgo (INEGI, 1992).

MAPA 10.- Distribución de los suelos en el área de estudio, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo. (Modificado Por: Reyes-Solis, I. E.)

VII. RESULTADOS

A. Perfil No. 1, localidad: Temporal Puente Palomar, clave: 970815-02.

El perfil se localiza en una parcela ubicada a 20° 10' 48.6" de Latitud Norte y 99° 10' 8.4" de Longitud Oeste a 2054 msnm, no existen afloramientos rocosos en el área. Es drenado externamente, la erosión del lugar es de tipo eólica e hídrica laminar de grado leve, el suelo tiene una fase petrocálcica, la cual se halla roturada por el paso del tractor. La parcela tiene riego con aguas blancas por lo que se considera como "testigo", el suelo tiene 32 cm de profundidad efectiva.

a. Morfología del perfil No. 1

Subhorizontes	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-5 cm)	Seco, de 5 cm de profundidad, de separación tenue de forma horizontal. Color en seco gris oscuro (10 YR 4/1), en húmedo pardo muy oscuro (10 YR 2/2). La estructura de sus agregados consiste en formas granulares de desarrollo débil y de tamaño fino. Presenta poros finos abundantes. Consistencia en seco suelta y en húmedo friable, es adhesivo y plástico. La textura al tacto es migajón arenoso. Su esqueleto está formado por abundantes gravas angulares. Reacciona fuerte al HCl en dilución 1:4 y 1N, y débil al H ₂ O ₂ . Presenta raíces finas y medias frecuentes.
Ap ₁₂	(5-32 cm)	Húmedo de 27 cm de grosor, de separación marcada de forma horizontal. Color en seco gris oscuro (10 YR 4/1), en húmedo pardo muy oscuro (10 YR 2/2). Estructura granular y de bloques subangulares de desarrollo débil y de tamaño fino y medio. Poros finos abundantes. Consistencia en seco blanda y en húmedo firme, es adhesivo y plástico. La textura es migajón arenoso. Esqueleto conformado por abundantes gravas angulares. Reacciona fuerte al HCl en dilución 1:4 y 1N, y débil al H ₂ O ₂ . Presenta raíces finas y medias abundantes.
R (C k)	(32-X cm)	Horizonte petrocálcico

b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 1

El color en seco es pardo grisáceo (10 YR 5/2), en húmedo es negro (10 YR 2/1) en ambos subhorizontes. La densidad aparente (DA) no tuvo variación pero la densidad real (DR) decrece ligeramente con la profundidad y con ello la porosidad también aunque la variación es aproximadamente de una unidad. El porcentaje de poros del perfil cae en el rango de porosidad normal, de acuerdo con Hillel (1998). En cuanto a la textura el porcentaje de arenas predomina en el perfil, con lo que la clase textural es migajón arenoso (F-Ar), de acuerdo a la clave usada por Porta *et al.* (1994) (Tabla 5). De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, el tipo de suelo que corresponde con los valores de DA es el mineral franco [SEMARNAP, 2000].

Tabla 5.- Características físicas del perfil 970815-02, localidad: Temporal Puente Palomar

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-5	10 YR 5/2	10 YR 2/1	1.26	2.5	50	75.2	14	10.8	F-Ar
Ap ₁₂	5-32	10 YR 5/2	10 YR 2/1	1.26	2.5	49	72.8	12	15.2	F-Ar

Los valores de pH en agua decrecen en ambas relaciones, en KCl en relación 1:2.5, se mantiene constante en 7.5 y en 1:5 decrece (Tabla 6). Los valores de pH en KCl (7.5-7.6) caen en el rango medianamente básico establecido por USDA en 1971 [Porta *et al.*, 1994]. Los valores de pH en agua de 8.4-8.5 son medianamente alcalinos y el valor 8.7 en la relación 1:5 es considerado fuertemente alcalino, los valores de CE decrecen con la profundidad del perfil y señalan que hay bajos efectos de salinidad, los valores de CIC son altos en Ap₁₁ y medios en Ap₁₂, los contenidos de CaCO₃ representan niveles medios en ambos subhorizontes y los contenidos de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ son altos, de acuerdo a las especificaciones de la NOM-021-RECNAT-2000 [SEMARNAP, *op-cit*].

Tabla 6.- Características químicas del perfil 970815-02, localidad: Temporal Puente Palomar.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca/ Mg	Ca/ Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-5	8.5	8.7	7.5	7.6	0.36	100.0	0.0	5.0	0.37	1.67	1.99	69.33	6.73	24.75	0.33	2.13	8.6
5-32	8.4	8.5	7.5	7.5	0.28	112.5	0.0	4.6	0.30	1.53	1.44	63.53	8.79	16.49	0.62	0.53	3.0

* valor estimado de acuerdo con Jackson. (1982).

El catión predominante es el Ca²⁺, en parte debido al material parental, pero también a una sobrevaloración causada por el método de extracción al disolver parte de los CaCO₃, aunque, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*), la suma de los valores de Na⁺, K⁺ y Mg²⁺ menos el valor de la CIC ofrece una estimación más real del Ca²⁺ intercambiable; siendo ésta de 14.36 y 4.73 cmol kg⁻¹ para Ap₁₁ y Ap₁₂, respectivamente. La relación de proporción entre los cationes intercambiables es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> K⁺ > Na⁺ en Ap₁₁, mientras que en Ap₁₂ es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> Na⁺ > K⁺. El contenido de Na⁺, K⁺ y Ca²⁺ disminuye con base a la profundidad, en tanto que el de Mg²⁺ aumenta. El índice Mg-Na (Mg+Na/CIC) aumenta con la profundidad y las relaciones Ca:Mg y Ca:Na disminuyen, los valores indican una estabilidad estructural no adecuada y la tendencia a la salinización en Ap₁₂, de acuerdo a Flores *et al.*, (1996). Los Cl⁻ y HCO₃⁻ muestran un ligero comportamiento decreciente con la profundidad del perfil, no se registra la presencia de CO₃²⁻ (Tabla 6).

De acuerdo a la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], el contenido de MO se encuentra en niveles medios (24 a 29 g kg⁻¹) en ambos subhorizontes, los valores de CIC son altos en Ap₁₁ y medios en Ap₁₂, y los contenidos de nitrógeno total (N_t) y P asimilable presentes en el perfil son muy altos. Los contenidos de MO, CIC, NO₃⁻ y N_t disminuyen con la profundidad. La concentración de P asimilable se incrementa en el subhorizonte Ap₁₂. La relación C:N en el primer subhorizonte es de 5.50, en tanto que en el segundo es de 4.84 (Tabla 7), sus valores son bajos, de acuerdo con Ortiz-Villanueva (*op. cit.*).

Tabla 7.- Características químicas del perfil 970815-02, localidad: Temporal Puente Palomar (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-5	29	17.17	3.09	5.5	8.653	14.54
5-32	24	14.14	2.89	4.84	8.523	27.86

c. Discusión de los resultados del perfil No. 1

El color negro que presenta en húmedo y el color pardo grisáceo que presenta en seco este perfil indican de la presencia de MO humificada [Aguilera, 1989]. Sin embargo, este color también puede deberse a los contenidos de óxidos de manganeso y hierro, y a órgano-minerales de calcio y magnesio, de acuerdo con Porta *et al.* (1994).

Los valores de DR concuerdan con el rango de valores más frecuentes para minerales de arcilla (2.0 a 2.65 Mg m⁻³), y en el caso de Ap₁₁ además, coincide con los valores para cuarzo y feldspatos (2.5 a 2.6 Mg m⁻³) [Porta *et al.*, 1994], estos valores no caen en los rangos normales de 2.6 a 2.7 Mg m⁻³, considerando el peso específico de la calcita [Dana, 1966], debido a que la MO provoca que la densidad de las partículas descienda a 2.4 o menos [Buckman & Brady, 1991], y al estado de alteración de la calcita.

El porcentaje de poros indica buena aireación y una buena tasa de infiltración de agua [Porta *et al.*, 1994], lo que puede fomentar la reducción del pH debido a la liberación de CO₂ por la respiración radicular, por lo que es necesario mantenerse en rangos normales. La estructura, porosidad y aireación del suelo no son afectadas por las altas proporciones de Ca²⁺ intercambiable que, debido a su alta movilidad y actividad cementante o floculante, permite la agregación de las partículas de arcilla negativas y reduce los espacios porosos [Ortiz-Villanueva, 1977]. Los agregados presentan en una estructura granular en Ap₁₁ y bloques subangulares en Ap₁₂, debido al contenido de MO, pero su

desarrollo es débil y de tamaño fino.

El tipo de suelo mineral francoso dado en parte por la DA, coincide con la clase textural migajón arenoso. La fracción textural predominante es la arena en ambos subhorizontes debido la posición geomorfológica del perfil, ya que se ubica en una zona de aporte, lo que promueve la elevada permeabilidad y macro porosidad [Porta *et al.*, *op. cit.*]; sin embargo, los contenidos de arcilla y MO contrarrestan un poco los efectos de la arena. De acuerdo a la NOM-021, de los valores registrados de CIC se puede inferir que las arcillas dominantes pueden ser cloritas y micas hidratadas [SEMARNAP, *op. cit.*], sin embargo no se realizó un análisis mineralógico que compruebe lo anterior.

Los valores de pH que presenta el perfil están por arriba del rango óptimo y de tolerancia de los principales cultivos del área; maíz (5.5 a 7.0 y 5.0 a 8.0), frijol (5.8 a 6.7 y 5.5 a 7.5) [Young, 1976], en el caso de la alfalfa el pH, el Ca^{2+} y la saturación de bases son factores muy importantes para su desarrollo, ya que se trata de una planta calcícola [Brady, 1974]. El pH es debido a la presencia de CaCO_3 , aunque puede deberse también a la formación de MgCO_3 , debido a que los valores de pH son mayores o iguales a 8.4 y a que hay bajos contenidos de Na^+ intercambiable [Russell, 1961; Porta *et al.*, *op. cit.*]. Dichos valores de pH, promueven la precipitación del S, P, Mn, Mo, Cu, Zn y Fe, y facilita la movilidad del Mg, Na, K, y B, siendo más disponibles éstos que los primeros para la absorción por las plantas, lo que teóricamente, puede causar problemas principalmente de clorosis férrica [Lee *et al.*, 1998; Velázquez, 1991; Porta *et al.*, 1994; Russell, *op. cit.*]. Los valores de pH pueden ser corregidos manteniendo una alta porosidad para promover la respiración radicular o por la adición de abonos verdes para aumentar el contenido de CO_2 , aunque también puede aplicarse S o $(\text{NH}_2)_2\text{SO}_4$ para la liberación de H_2SO_4 , en el primer caso por la acción bacteriana y, en el segundo, por la precipitación del $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Los valores de CE no rebasan el umbral de afectación respectivo de los principales cultivos del área, alfalfa (2.0 a 7.3 dS m^{-1}), maíz (1.8 a 7.4 dS m^{-1}) y frijol (1.7 a 12.0 dS m^{-1}), de acuerdo con Wescot, 1976 y Carter, 1981 [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de CE, del porcentaje de Na^+ intercambiable y del pH, indican que este suelo no tiene problemas de salinidad ni de sodicidad [Porta *et al.*, *op. cit.*; Aguilera, 1989]; aunque, el índice sodio-magnesio ($\text{Mg}+\text{Na}/\text{CIC}$) es mayor de 0.5 en Ap_{12} , lo cual indica que hay tendencias de salinización y alcalinización marcada, lo cual es reforzado también por

el hecho de que las relaciones Ca:Mg y Ca:Na en Ap₁₂ son menores a 1 y a 10, respectivamente, ante el pH que presenta el suelo y los valores estimados de Ca²⁺ intercambiable [Hernández, 2000; Flores *et al.*, 1996]. El porcentaje de saturación de bases intercambiables es del 100 %, debido al exceso de Ca²⁺ intercambiable.

Los contenidos de MO del perfil incluyen materiales incorporados de forma natural y de origen biológico aportados por el cultivo. Ante la dominancia de arenas y la relativa poca presencia de arcillas en este perfil, los contenidos de MO mejoran la estructura de los agregados e influyen en la CIC y en el pH debido a la disociación y unión del ión H⁺ a los grupos funcionales OH, COOH, C₆H₅OH y NH₂ presentes en ella [Porta *et al.*, *op. cit.*]. El contenido de MO decrece con la profundidad, al igual que la CIC, siendo la MO la causa de este comportamiento. La fertilidad dada en parte por los valores de CIC, es alta en Ap₁₁ y media en Ap₁₂, dado que hay una buena reserva de bases intercambiables. La relación C:N es baja debido a los contenidos de Nt, dado que se requiere un rango de 8 a 14, con un óptimo de 10 a 12, para orientar un buen manejo de la MO en los suelos agrícolas, la relación se puede mejorar con el aporte de residuos orgánicos derivados del rastrojo para aumentar el contenido de C.

Aunque predomine un pH básico y la presencia de CaCO₃, los valores de P disponible y NO₃⁻ son altos, lo que facilita su asimilación por los cultivos. En estas condiciones de pH, textura y drenaje, los NO₃⁻ y PO₄⁻³ no absorbidos por las plantas, al no ser retenidos por las arcillas y la MO son susceptibles de ser lavados, transfiriéndose al manto freático en función de su movilidad [Porta *et al.*, *op. cit.*].

A pesar de que este suelo se halla ubicado cerca de la zona proyecto Tumba de la CNA y de no ser regado con aguas residuales, presenta valores de P, N y NO₃⁻ relativamente altos, lo cual puede referir cierto grado de influencia de la zona de riego con agua negra que limita con ésta.

d. Clasificación del perfil No. 1

En este perfil el proceso dominante ha sido la acumulación y cementación del CaCO_3 a poca profundidad, aunque, debido al cultivo del suelo, al laboreo del terreno y a la influencia de la zona de riego con agua negra, ha ocurrido un ligero enriquecimiento de nutrientes y de materia orgánica en esta zona semi-árida. Los horizontes de diagnóstico, con base en lo observado en los resultados de los análisis de laboratorio y en la morfología de este perfil, constituyen un epipedón mólico, dado por el color, la estructura, el contenido de MO y el porcentaje de saturación de bases que presenta en los subhorizontes Ap_{11} y Ap_{12} , y un horizonte petrocálcico como horizonte genético Ck. Como características de diagnóstico presenta: un suelo calcárico, dado por el contenido de CaCO_3 , y contacto lítico a 32 cm de profundidad.

Perfil No. 1 localidad: Temporal Puente Palomar, clave 970815-02.

Ap 11 (0-5 cm)
 Gris oscuro en seco, pardo muy oscuro en húmedo, agregados granulares, desarrollo débil, tamaño fino. Poros finos abundantes. Consistencia suelta en seco, friable en húmedo, adhesivo y plástico

Ap 12 (5-32 cm)
 Gris oscuro en seco, pardo muy oscuro en húmedo, agregados granulares y bloques subangulares, desarrollo débil, tamaño fino. Poros finos abundantes. Consistencia blanda en seco, firme en húmedo, adhesivo y plástico



Migajón arenoso, gravas angulares. Reacción fuerte al HCl 1N y dil. 1:4, moderada al H_2O_2 . Raíces finas. Separación difusa horizontal.

Migajón arenoso, gravas angulares abundantes. Reacción fuerte al HCl 1N y dil. 1:4, moderada al H_2O_2 . Raíces finas. Separación abrupta horizontal.

Horizonte Petrocálcico

Clasificación FAO (1999)
 Grupo: Calcisol
 Unidad: Petric Calcisol
 Subunidad: *Petric Calcisol*

Clasificación USDA (1998)
 Orden: Mollisol
 Suborden: Ustoll
 Gran grupo: Calciustoll
 Subgrupo: *Lithic Petrocalcic Calciustoll*

C (k)

Sin riego, $20^{\circ} 10' 48.6''$ L.N., $99^{\circ} 10' 8.4''$ L.O., 2054 msnm. Grupo: Calcisol, Unidad: Petric Calcisol

Figura 4.- Monolito del perfil 1, Temporal Puente Palomar, municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

B. Perfil No. 2, localidad: Monte Palomar, clave: 970815-01.

Se ubica a 20° 10' 49.2" Latitud Norte y 99° 10' 21" Longitud Oeste a 2040 msnm. La erosión del lugar es de tipo eólica-hídrica laminar de grado leve. El suelo es bien drenado, tiene fase petrocálcica y en su superficie se observan los fragmentos que afloraron con el paso del tractor. En el petrocálcico hay vetas de material calcáreo, aunque también aparecen materiales de varias clases depositados artificialmente por el agricultor. El suelo se riega desde 1995 y tiene 25 cm de profundidad efectiva.

a. Morfología del perfil No.2

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-10 cm)	Es ligeramente húmedo, de 10 cm de profundidad, de separación marcada de forma ondulada. El color en húmedo es pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2). La estructura de sus agregados consiste en bloques subangulares de desarrollo moderado y de tamaño medio. Presenta poros finos escasos. La consistencia en húmedo es friable, es adhesivo y plástico. La textura al tacto es de tipo migajón arenoso. Su esqueleto está conformado por gravas planas frecuentes. Reacciona fuerte al HCl 1N y en dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ . Presenta raíces finas abundantes.
Ap ₁₂	(10-25 cm)	Subhorizonte húmedo de 15 cm de espesor, de separación marcada de forma ondulada. Su color en húmedo es gris muy oscuro (10 YR 3/1). La estructura consiste de bloques subangulares de desarrollo moderado y tamaño grueso. Presenta poros finos abundantes. La consistencia en húmedo es firme, es adhesivo y plástico. La textura al tacto es de tipo migajón arenoso. Su esqueleto está conformado por gravas planas abundantes. Reacciona fuerte al HCl 1N y dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ . Presenta raíces finas abundantes.
R (C k)	(25-X cm)	Horizonte petrocálcico

b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 2

El color en seco es pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2) en ambos subhorizontes, en húmedo es negro (10 YR 2/1) y gris muy oscuro (10 YR 3/1) en Ap₁₂. Los valores de DA y DR aumentan con la profundidad, lo que provoca que la porosidad disminuya. El porcentaje de poros del perfil cae en el rango de porosidad normal, de acuerdo con Hillel (*op. cit*). El contenido de arena es mayor que el de arcilla y limo, dando como resultado una clase textural de tipo migajón arenoso en ambos subhorizontes (F-Ar), de acuerdo a la clave usada por Porta *et al.* (*op. cit*); los contenidos de arena y de limo disminuyen, por consecuencia los contenidos de arcilla aumentan (*Tabla 8*). De acuerdo con la NOM-021, el tipo de suelo que corresponde con los valores de DA es el mineral francoso

[SEMARNAP, *op. cit.*].

Tabla 8.- Características físicas del perfil 970815-01, localidad: Monte Palomar.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³			%			
Ap ₁₁	0-10	10 YR 4/2	10 YR 2/1	1.17	2.52	54	71.6	16.8	11.6	F-Ar
Ap ₁₂	10-25	10 YR 4/2	10 YR 3/1	1.20	2.55	53	66.4	23.2	10.4	F-Ar

Los valores de pH en KCl en ambas diluciones caen en el rango determinado como medianamente básico (7.4 a 7.5) [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de pH en H₂O en el subhorizonte Ap₁₁ son medianamente alcalinos (8.0 a 8.4), en tanto que en el subhorizonte Ap₁₂ son fuertemente alcalinos (8.6), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. El pH en H₂O aumenta con la profundidad, lo cual se relaciona con los contenidos de HCO₃⁻ solubles que tienen el mismo comportamiento, sin embargo, el pH en KCl se mantuvo constante en ambos subhorizontes en ambas relaciones (Tabla 9). De acuerdo a la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], ambos subhorizontes del perfil presentan niveles altos de CaCO₃, CIC, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ y los valores CE no tiene efectos sobre la salinidad. Los valores de CE, Cl⁻, Ca²⁺ y K⁺ intercambiables tienden a disminuir con la profundidad, no así el Mg²⁺ intercambiable y HCO₃⁻ solubles que aumentan, el Na⁺ intercambiable se mantiene y no se detectaron CO₃²⁻ solubles (Tabla 9). La estimación de Ca²⁺ intercambiable para Ap₁₁ es de 21.91 y para Ap₁₂ es de 14.26 cmol kg⁻¹, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*). La relación de proporción de los cationes intercambiables es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> Na⁺ > K⁺ en ambos subhorizontes. El índice Mg-Na (Mg+Na/CIC) aumenta con la profundidad, indicando tendencias de alcalinización, y los índices Ca:Mg y Ca:Na disminuyen e indican una estabilidad estructural adecuada, de acuerdo a Flores *et al.*, (*op. cit.*).

Tabla 9- Características químicas del perfil 970815-01 Monte Palomar.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca*/ Mg	Ca*/ Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5						cmol kg ⁻¹							
0-10	8.0	8.4	7.4	7.5	0.37	222.5	0.0	5.3	0.49	1.25	1.19	54.95	7.81	32.16	0.28	2.8	17.5
10-25	8.6	8.6	7.4	7.5	0.20	226.5	0.0	5.68	0.33	1.25	0.77	45.89	14.2	30.45	0.50	1.02	11.7

* valor estimado de acuerdo con Jackson, (1982).

La MO presente se encuentra en niveles medios en ambos subhorizontes, los contenidos de Nt y P asimilable presentes en el perfil son muy altos, de acuerdo a la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. El contenido de MO disminuye con la profundidad, lo cual concuerda también con el comportamiento

de la CIC; los contenidos de P asimilable y Nt se incrementan ligeramente con la profundidad, en tanto que los contenidos de NO_3^- decrecen con una diferencia de 3 mg kg^{-1} . La relación C:N en el primer subhorizonte es de 5.88 y en el inferior es de 3.4 (Tabla 10), pero sus valores son bajos, de acuerdo con Ortiz-Villanueva (*op. cit.*).

Tabla 10.- Características químicas del perfil 970815-01 Monte Palomar (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-10	33	19	3.23	5.88	11.733	28.79
10-25	27	15	4.41	3.40	8.296	31.27

c. Discusión de los resultados del perfil No. 2

Su color en húmedo y en seco es indicio de la presencia de MO humificada y coincide con un nivel medio de MO en el perfil [Aguilera, *op. cit.*]. Este perfil es muy similar al anterior debido a su cercanía, está influenciado por la materia orgánica soluble (MOS) contenida en las aguas de riego (Mapas 4, 5 y 8).

Los valores de DR en ambos subhorizontes del perfil concuerdan con los valores más frecuentes para minerales de arcilla (2.0 a 2.65 Mg m^{-3}) y con los valores para cuarzo y feldespatos (2.5 a 2.6 Mg m^{-3}), de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*), están por debajo del valor de gravedad específica de la calcita (2.71 Mg m^{-3}) debido al intemperismo y al contenido de MO, aunque sus valores aumentan con la profundidad del perfil por descenso de la MO. La DA decrece en comparación con los valores de DA del perfil 1 ya que hay un aumento en el contenido de MO que es observable en ambos subhorizontes (Tablas 6 y 9). La porosidad también está ligada con el aumento de MO, lo cual se observa en el subhorizonte Ap₁₁ en comparación con Ap₁₂, y en comparación con la porosidad del perfil 1 (Tablas 5 y 8). El porcentaje de poros del suelo promueve la aireación y tasa de infiltración de agua, lo que fomenta la ligera reducción del pH, debido a la liberación de CO₂ por la respiración radicular (Porta *et al.*, *op. cit.*), en comparación con el valor de pH del perfil 1 (Tablas 6 y 9).

La fracción de arena de ambos subhorizontes, promueve la alta permeabilidad y macroporosidad, facilita el laboreo, pero disminuye la retención de agua y almacenamiento e intercambio de nutrientes [Porta *et al.*, *op. cit.*]; sin embargo los contenidos MO y de arcilla, que aumentan en comparación con los obtenidos en el perfil anterior, contrarrestan dichos efectos. Los contenidos de arcilla y limo aumentan, con respecto a los contenidos obtenidos en el perfil 1, y los de arena disminuyen ligeramente, aunque en ambos perfiles la clase textural migajón arenoso (Tablas 5 y 8). En

comparación con el perfil 1, los agregados presentan un desarrollo moderado y un tamaño medio en una estructura de bloques subangulares en ambos subhorizontes, lo que puede deberse al ligero aumento de MO y arcillas.

Los valores de pH registrados disminuyen con respecto a los valores obtenidos en el perfil anterior, con lo que la disponibilidad de los micronutrientes puede aumentar [Russell, *op. cit.*; Brady, 1974], sin embargo, rebasan el rango de crecimiento óptimo y de tolerancia para maíz y frijol [Young, *op. cit.*]. El ligero aumento de pH en Ap₁₂ puede estar relacionado con el incremento de Mg²⁺ intercambiable y la formación de MgCO₃, a diferencia de lo observado en el perfil 1 [Wild, *op. cit.*; Russell, *op. cit.*; Flores *et al.*, *op. cit.*]. Los niveles de CaCO₃ son más altos en este perfil a diferencia de los contenidos del perfil anterior, junto con la presencia de Mg²⁺ intercambiable y la formación de MgCO₃, el pH debería tener valores más alcalinos; sin embargo, los valores de pH son relativamente más bajos, lo cual puede deberse al aumento de la porosidad y al ligero aumento de nutrientes que provocan una mayor actividad metabólica de los microorganismos que eleva el porcentaje de CO₂ en el suelo y disminuye el pH.

Los valores de CE no rebasan los umbrales de afección correspondiente a alfalfa, maíz y frijol de acuerdo con Wescot, 1976 y Carter, 1981 [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de CE, de Na⁺ intercambiable y pH no indican problemas de salinización o sodificación, aunque, el índice Na-Mg (Na+Mg/CIC) es de 0.5 en Ap₁₂ y las relaciones Ca:Mg y Ca:Na en Ap₁₂ son menores a 1 y a 10, respectivamente, lo cual indica que hay ciertas tendencias de salinización y alcalinización, dado el pH que presenta el suelo y los valores estimados de Ca²⁺ intercambiable [Hernández, *op. cit.*; Flores *et al.*, *op. cit.*]. El porcentaje de saturación de bases es del 100 % debido a las altas concentraciones de Ca²⁺ intercambiable. En comparación con los valores obtenidos en el perfil 1, los valores de CE, Na, Ca, y K son menores y los de Mg aumentan, lo que sugiere un lavado en los primeros y un aporte en éste último por las aguas negras, al mismo tiempo el índice Na-Mg aumenta y las relaciones Ca:Mg y Ca:Na disminuyen, indicando una mayor tendencia a la alcalinización (Tablas 6 y 9).

El contenido de MO disminuye con base en la profundidad y no concuerda con el comportamiento de la CIC, dado que hay una ligera acumulación de arcilla en el subhorizonte Ap₁₂ que contribuye a la retención de cationes por adsorción, lo que aumenta ligeramente la fertilidad en comparación con los valores de CIC del perfil 1. Sin embargo, al comparar los valores obtenidos en éste perfil con los del perfil 1, se aprecia que hay un aumento de CIC en Ap₁₁ debido al aumento de MO (Tablas 7 y 10).

Los contenidos de MO del perfil incluyen materiales incorporados de forma natural, de origen biológico aportados por el cultivo y productos xenobióticos resultantes de la síntesis industrial aportados por el agua residual, que mejoran la estructura de los agregados e influyen en la CIC y en el pH debido a la disociación y unión del ión H^+ a los grupos funcionales OH, COOH, C_6H_5OH y NH_2 presentes en ella [Tate, 1987]. Sin embargo, es importante detectar la naturaleza de los productos xenobióticos que se mantienen en el suelo y las funciones que puedan tener en él, en especial los productos tóxicos como los plaguicidas, ya que algunos pueden seguir vías de humificación y permanecer enlazados a las arcillas o al humus.

Los contenidos de C y Nt aumentan y el radio C:N mejora ligeramente, con respecto a los contenidos del perfil anterior, debido a su aporte por las aguas negras; aunque sigue siendo baja de acuerdo al rango óptimo (10 a 12), por lo que se recomienda aportar residuos orgánicos ricos en carbono para mejorar ésta relación (*Tablas 7 y 10*).

Hay un mayor contenido de Nt, P asimilable y de NO_3^- en el suelo debido a su aporte por las aguas negras, con respecto a los registrados en el perfil anterior; al mismo tiempo, la probabilidad de ser lavados y transferidos al manto freático, en función del tiempo de residencia del agua en el perfil y de la frecuencia del riego, es mayor (*Tablas 7 y 10*). En este perfil, la adición de S y P puede tener un efecto positivo sobre la reducción del pH y la mejora de la dinámica de nutrientes, además, se ha observado que puede tener efectos positivos sobre la inmovilización de Zn y otros metales pesados contaminantes aportados por las aguas residuales [García & Cajuste, *op. cit.*].

d. Clasificación del perfil No. 2

En este perfil el proceso dominante ha sido la acumulación y cementación de CaCO_3 a poca profundidad y ha ocurrido un mayor enriquecimiento de nutrientes y de MO bajo un régimen ústico-árido, debido al cultivo del suelo, el manejo del terreno y al riego con aguas residuales. Los horizontes de diagnóstico observados con base en los resultados de los análisis de laboratorio y en la morfología de este perfil son: epipedón mólico dado por el color, estructura, contenido de MO y porcentaje de saturación de bases en los subhorizontes Ap_{11} y Ap_{12} , y un horizonte petrocálcico como horizonte genético Ck. Las características de diagnóstico son: suelo calcárico, dado por los contenidos de CaCO_3 , y contacto lítico a 25 cm de profundidad.

Perfil No. 2, localidad: Monte Palomar, clave: 970815-01

Ap_{11} (0-10 cm)
Pardo grisáceo muy oscuro en húmedo. Bloques subangulares medianos. Poros finos escasos. Friable en húmedo, adhesivo y plástico.

Ap_{12} (10-25 cm)
Gris muy oscuro en húmedo. Bloques subangulares gruesos. Poros finos. Firme en húmedo, adhesivo y plástico.

C (k)



Migajón arenoso, frecuentes gravas planas. Reacción fuerte a HCl y débil a H_2O_2 . Raíces finas abundantes. Separación horizontal ondulada

Migajón arenoso, abundantes gravas planas. Reacción fuerte a HCl y débil a H_2O_2 . Raíces finas abundantes. Separación abrupta ondulada

Horizonte petrocálcico

CLASIFICACIÓN

FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Calcisol
Unidad: Petric Calcisol
Subunidad: *Eutri-Petric Calcisol*

USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calciustoll
Subgrupo: *Lithic Petrocalcic Calciustoll*

Se ubica a $20^\circ 10' 49.2''$ L.N., $99^\circ 10' 21''$ L.O. a 2040 msnm. Tiene 5 años de riego con aguas negras. Grupo: Calcisol, Unidad: Petric Calcisol, Subunidad: Eutri-petric Calcisol.

Figura 5.- Monolito del perfil 2, Monte Palomar, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hgo.

C. Perfil No. 3, localidad: Puente Palomar, clave: 970612-01.

El perfil se ubica a los 20° 10' 38.6" Latitud Norte y 99° 10' 38" Longitud Oeste, a una altitud de 2030 msnm. Esta parcela tiene 50 años de riego con agua negra, el suelo tiene 31 cm de profundidad efectiva y se siembra maíz (variedad H-135), calabaza, trigo y van a probar con frijol.

a. Morfología del perfil No. 3

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap11	(0-4 cm)	Ligeramente húmedo, de 4 cm de profundidad, de separación marcada ondulada. Color gris muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1). Estructura en bloques subangulares de fuerte desarrollo y tamaño medio. Poros finos. Consistencia en seco suelta y en húmedo muy firme, adhesivo y plástico. Textura migajón. Esqueleto conformado por gravillas frecuentes. Reacción moderada al HCl 1N y dilución 1:4, y débil al H ₂ O ₂ . Raíces finas abundantes.
Ap12	(4-31 cm)	Ligeramente húmedo, de 27 cm de profundidad y separación marcada ondulada. Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10 YR 3/2). Estructura en bloques subangulares de fuerte desarrollo y tamaño medio. Poros finos. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, adhesivo y plástico. Textura migajón. Reacción al HCl 1N y dilución 1:4 es fuerte, y débil al H ₂ O ₂ . Raíces finas abundantes.
C (k)	(31-X cm)	Horizonte petrocálcico

b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 3

El color del perfil no tuvo variación, es gris oscuro en seco (10 YR 4/1) y negro (10 YR 2/1) en húmedo. La DA no tuvo variación con la profundidad, pero la DR disminuye junto con la porosidad. La porosidad tiene valores normales de acuerdo a Hillel, (*op. cit.*), lo que indica que hay una buena transmisión de fluidos. El tipo de suelo que se relaciona con los valores de DA obtenidos corresponde a los suelos minerales arcillosos, de acuerdo a la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. En cuanto a la textura del suelo, el porcentaje de arenas y arcillas disminuye, en tanto que la fracción de limo aumenta ligeramente, la clase textural del perfil es migajón o franco (F), de acuerdo a la clasificación de Porta *et al.*, (*op. cit.*) (Tabla 11).

Tabla 11.- Características físicas del perfil 970612-01 Puente Palomar.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ³						
Ap11	0-4	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.19	2.55	53	41.61	28.18	30.2	F
Ap12	4-31	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.19	2.41	51	39.48	26.04	34.48	F

Los valores de pH en KCl son medianamente básicos de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*), manteniéndose en 7.6 en ambos subhorizontes del perfil. Los valores de pH en agua en ambas relaciones son medianamente alcalinos en Ap₁₁ y aumentan con la profundidad a fuertemente alcalinos en Ap₁₂, de acuerdo a la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los valores de CIC no varían en el perfil, los de CE y CaCO₃ decrecen con la profundidad. Los valores de CIC, los contenidos de CaCO₃ y Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y K⁺ intercambiables son elevados y la CE no representa efectos en la salinidad, de acuerdo a la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación de proporción de los cationes intercambiables en ambos subhorizontes del perfil es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> Na⁺ > K⁺. Las altas concentraciones de Ca²⁺ se deben al CaCO₃ del suelo, la estimación de Ca²⁺ intercambiable, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*), es de 14.36 y 4.73 cmol kg⁻¹ para Ap₁₁ y Ap₁₂, respectivamente. Las relaciones Ca:Mg y Ca:Na disminuyen con la profundidad y el índice Na-Mg aumenta (*Tabla 12*), los valores indican una estabilidad estructural no adecuada y tendencias de alcalinización, de acuerdo a Flores *et al.*, (*op. cit.*).

Tabla 12.- Características químicas del perfil 970612-01 Puente Palomar.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca ⁺ / Mg	Ca ⁺ / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-4	8.4	8.5	7.6	7.6	0.39	145.0	0.0	4.4	0.75	2.7	2.22	52.93	20.1	35.62	0.64	0.71	5.31
4-31	8.7	8.7	7.6	7.6	0.37	117.5	0.15	4.6	0.42	2.5	1.71	57.35	27.3	35.62	0.83	0.17	1.89

* de acuerdo a los valores estimados de Ca, Jackson (*op. cit.*)

El contenido de MO se encuentra en niveles altos en Ap₁₁ y medios en Ap₁₂ de acuerdo con Aguilera, (1989) y la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los contenidos de N_t aumentan y los de C disminuyen con la profundidad del suelo y la relación C:N en el primer subhorizonte es de 5.02 y en el inferior es de 2.52, aunque sus valores son bajos, de acuerdo con Ortiz-Villanueva (*op. cit.*). Los contenidos de P asimilable y de N_t se encuentran en niveles altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los contenidos de P asimilable son mayores en el subhorizonte Ap₁₁ y disminuyendo a 28.79 mg kg⁻¹ en Ap₁₂, los NO₃⁻ al igual que los Cl⁻ disminuyen con la profundidad, en tanto que los CO₃²⁻ y HCO₃⁻ aumentan ligeramente (*Tabla 13*).

Tabla 13.- Características químicas del perfil 970612-01 Puente Palomar (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-4	45	26	5.18	5.02	34.779	32.69
4-31	27	15	5.95	2.52	8.915	28.79

c. Discusión de los resultados del perfil No. 3

En este perfil se observa un mayor oscurecimiento del suelo que en los dos perfiles anteriores (negro en húmedo y gris oscuro en seco), lo cual está relacionado al aumento del contenido de MO en comparación con los contenidos de MO en los perfiles 1 y 2. Es similar al anterior en cuanto a morfología, el riego con agua residual afecta el color del suelo debido al recubrimiento de los granos de arena y limo por la MOS.

El tipo de suelo mineral francoso corresponde con los valores de DA (1.19 Mg m^{-3}), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], y coincide con un aumento en el contenido de arcillas en comparación con los contenidos en los perfiles 1 y 2 (*Tablas 5, 8 y 11*). Los valores de DA y DR son ligeramente menores que los obtenidos en los perfiles 1 y 2, debido a que hay un mayor contenido de MO que provoca que la densidad de las partículas descienda [Buckman & Brady, *op. cit.*]. El contenido de CaCO_3 y de Ca^{2+} intercambiable es menor en comparación con los contenidos del perfil 2, sin embargo, la mayor cantidad de arcillas y MO con respecto a los perfiles anteriores y los valores de pH observados en el perfil, permiten que la movilidad y actividad floculante de las proporciones de Ca^{2+} intercambiable presentes en el perfil sean suficientes para que haya una mayor agregación de las partículas de arcilla y MO [Ortiz-Villanueva, *op. cit.*], por lo que los agregados presentan estructuras de fuerte desarrollo, pero no afectan a la porosidad.

La fracción textural predominante es la arena en ambos subhorizontes del perfil, aunque sus contenidos decrecen en comparación con los contenidos en los perfiles 1 y 2, los contenidos de arcillas y limos aumentan, lo que cambia la clase textural de migajón arenoso en los perfiles 1 y 2, a franca en este perfil (*Tablas 5, 8 y 11*). El incremento de arcillas y de limos está relacionado con su aporte por las aguas residuales y/o con su neoformación. Aunque en esta secuencia de perfiles se observa una ligera pendiente, en donde el perfil 1 se ubica a una altitud mayor al perfil 2, y éste a su vez mayor, al perfil 3, el aumento de MO y de arcillas se debe también al transporte horizontal en esta pendiente (*Esquema 20*). Este enriquecimiento de arcilla y MO contribuye a mejorar la CIC, que aumenta en comparación con los valores de los perfiles 1 y 2 (*Tablas 6, 9 y 12*).

El porcentaje de saturación de bases es elevado (100 %) debido al contenido de Ca^{2+} intercambiable que disminuye ligeramente en comparación con los contenidos de los perfiles 1 y 2, sus sitios de intercambio son sustituidos por Mg^{2+} o Na^+ intercambiables, cuyos valores aumentan. Los valores de Mg^{2+} intercambiable aumentan, a diferencia de los valores obtenidos en los perfiles 1 y 2, debido a su aporte por las aguas negras, lo que provoca que los valores de pH aumenten por la formación de MgCO_3 . Los

valores de pH rebasan los rangos de tolerancia y rendimiento satisfactorio para maíz, trigo y frijol [Young, *op. cit.*], los dos primeros se han cultivado en la parcela y el último se pretende cultivar. Los valores registrados de CE no rebasan el umbral de tolerancia para maíz, calabaza, trigo y frijol [Porta *et al.*, *op. cit.*]. El índice Mg-Na y las relaciones Ca:Na y Ca:Mg aumentan en comparación con los obtenidos en los perfiles 1 y 2, debido al aumento del Mg^{2+} y de Na^+ intercambiables, lo que sugiere una mayor tendencia a la alcalinización y a la pérdida de la estructura [Hernández, *op. cit.*; Flores *et al.*, *op. cit.*], a diferencia de los perfiles anteriores (Tablas 6, 9 y 12); sin embargo, el pH, la CE y los contenidos de Na^+ intercambiable no indican problemas actuales de sodicidad ni de salinidad marcada [Aguilera, *op. cit.*; Porta *et al.*, 1999].

Los contenidos de MO de este perfil aumentan en comparación con los obtenidos en los perfiles 1 y 2 (Tablas 7, 10 y 13), incluyen materiales de origen biológico y, en mayor proporción, productos xenobióticos de síntesis industrial aportados por las aguas residuales, que mejoran la estructura de los agregados y la CIC [Porta *et al.*, 1994]. Los productos xenobióticos pueden interactuar en el intercambio iónico, debido a que pueden establecer enlaces temporales (puentes de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals), o bien persistir en el suelo mediante enlaces covalentes con arcillas y/o ácidos húmicos o fúlvicos y afectar de algún modo la dinámica de los sistemas, por ejemplo los pesticidas [Tate, 1987]. Es necesario detectar la naturaleza de esta interacción, sobre todo porque el canal que riega a esta zona transporta aguas clasificadas como negras (sin tratamiento parcial por sedimentación). Aunque hay un aporte de C, la relación C:N es muy baja, en comparación con los valores obtenidos en el perfil 1 y 2 (Tablas 7, 10 y 13), como resultado del elevado contenido de N aportado por las aguas residuales, lo cual requiere de adición de MO rica en C que pueda tener una mayor tendencia a persistir en el suelo (recalcitrante).

Los contenidos de Cl^- , NO_3^- y P aprovechable son mayores que los registrados en los perfiles 1 y 2, lo cual se debe a su aporte por las aguas negras (Tablas 7, 10 y 13). El contenido de P aprovechable es elevado a pesar de que los CO_3^{2-} y los $CaCO_3$ que, ante los valores de pH registrados, pueden precipitarlo [Ortiz-Villanueva, *op. cit.*]. La presencia de mayores contenidos de arcilla y MO puede ocasionar una mayor adsorción del P, en comparación de los dos perfiles anteriores, sin embargo, el riesgo de que algunos contenidos de P sean lavados junto con los NO_3^- hacia el manto freático es elevado, debido a que hay mayores contenidos de P y NO_3^- . Los contenidos de HCO_3^- son mayores en comparación con los contenidos en los perfiles 1 y 2, además de la presencia de CO_3^{2-} en Ap_{12} , indican que hay una mayor meteorización del material parental.

d. Clasificación del perfil No. 3

El proceso dominante ha sido la acumulación y cementación de CaCO_3 a poca profundidad, debido al cultivo del suelo y al riego con aguas residuales ha ocurrido un fuerte enriquecimiento de nutrientes y de MO que mejoran la agregación del suelo; sin embargo, se observa una elevada tendencia hacia la salinización y alcalinización dada por el índice Mg-Na y las relaciones Ca:Na y Ca:Mg, que junto con el aumento de los contenidos de arcilla (por aporte o por neoformación), promueven una tendencia hacia la dispersión de la estructura del suelo. Los horizontes de diagnóstico observados basándose en los resultados de los análisis de laboratorio y de la morfología del perfil son: un epipedón mólico, dado por el color, la estructura y el contenido de MO y el porcentaje de saturación de bases en los subhorizontes Ap_{11} y Ap_{12} , y un horizonte petrocálcico como horizonte genético Ck; las características de diagnóstico son: suelo calcárico, dado por los contenidos de CaCO_3 , y contacto lítico a 25 cm de profundidad.

Perfil No. 3, localidad: Puente Palomar, clave 970612-01.

Ap (0-4 cm)

Gris muy oscuro H. Bloques subangulares medianos fuertemente desarrollados. Poros finos. Consistencia suelta S, muy firme H. Adhesividad y plásticidad moderadas

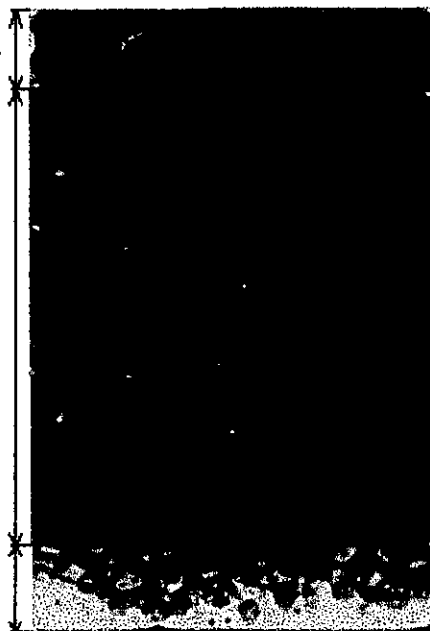
Ap12 (4-31 cm)

Pardo grisáceo muy oscuro. Bloques subangulares de fuerte desarrollado de tamaño medio. Poros finos. Consistencia suelta S y firme H. Adhesividad y plásticidad moderadas.

C (k)

50 años de

Riego con aguas negras, 20° 10' 38.6" L.N., 99° 10' 21" L.O. 2040 msnm. Grupo: Calcisol, Unidad: Petric Calcisol, Sub-unidad: Eutri-Petric Calcisol.



Migajón arcilloso. Frecuentes gravillas. Reacción moderada al HCl y débil al H_2O_2 . Raíces finas abundantes. Separación clara hondulada.

Migajón arcilloso. Reacción fuerte al HCl y débil a H_2O_2 . Separación clara irregular

Horizonte Petrocálcico

Clasificación
FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Calcisol
Unidad: Petric Calcisol
Subunidad: *Eutri-Petric Calcisol*

USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calciustoll
Subgrupo: *Lithic Petrocalcic Calciustoll*

Figura 6.- Monolito del perfil 3 en la localidad Puente Palomar, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

D. Perfil No. 4, localidad: Árbol Grande, clave: 980530-03.

El perfil se encuentra en una parcela ubicada a 20° 13' 16.8" Latitud Norte y 99° 10' 23.4" Longitud Oeste a 2000 msnm. En esta parcela se ha cultivado maíz, el suelo contiene los residuos recién incorporados del cultivo, limita a una profundidad de 41 cm con material de origen calcáreo y se riega con aguas negras desde 1932, de acuerdo con la CNA.

a. Morfología del perfil No. 4

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-41 cm)	Seco, separación marcada ondulada. Color gris oscuro (10 YR 4/1) en seco y negro (10 YR 2/1) en húmedo. Estructura de bloques subangulares de tamaño medio y desarrollo débil, con escasos poros finos. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. La textura es migajón arenoso. Esqueleto formado de gravas escasas de forma angular y subangular, guijarros abundantes subredondeados, angulares, subangulares y planos. Reacción moderada al HCl 1N y dilución 1:4, y al H ₂ O ₂ ; su pH es de 6, no hay raíces.
C k	(41-X cm)	Horizonte petrocálcico

b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 4

El color en seco es pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2) y en húmedo es negro (10 YR 2/1). La DA y la DR son de 1.17 y 2.37 Mg m⁻³, respectivamente. La porosidad es del 55 % y cae en niveles de porosidad normal (30 a 60 %), de acuerdo con Hillel (*op. cit.*). En cuanto a la textura del suelo, la fracción textural predominante es la arena (57.6 %), le sigue el limo (26.4 %) y, por último, las arcillas (16 %), con lo que la clase textural es migajón arenoso (F-Ar), de acuerdo a la clasificación de Porta *et al.* (*op. cit.*).

Tabla 14.- Características físicas del perfil 980530-03 Árbol Grande, Mixquiahuala.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-40	10 YR 4/2	10 YR 2/1	1.17	2.37	54.85	57.6	16.0	26.4	F-Ar

Los valores de pH en KCl de ambas diluciones caen en el rango de valores neutros, de acuerdo con USDA [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de pH en agua en ambas diluciones se encuentran en niveles medianamente alcalinos (7.4 a 8.5), los niveles de CaCO₃ total se encuentran en niveles medios (21 a 150 g kg⁻¹), los contenidos de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ son altos, y la CE tiene bajos efectos en la salinidad

(1 dSm^{-1}), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación de proporción de los cationes intercambiables en el perfil es $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \gg \text{K}^+ > \text{Na}^+$. La estimación de Ca^{2+} intercambiable es de $30.06 \text{ cmol kg}^{-1}$, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*). El índice Mg:Na y las relaciones Ca:Na y Ca:Mg no indican una fuerte tendencia a la salinización y alcalinización, de acuerdo con Flores (*op. cit.*) y Hernández (*op. cit.*). No se registra la presencia de CO_3^{2-} pero sí de HCO_3^- , Cl^- y NO_3^- .

Tabla 15.- Características químicas del perfil 980530-03 Árbol Grande

Profundidad cm	pH				CE dSm^{-1}	CaCO ₃ total g kg^{-1}	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca ²⁺ / Mg	Ca ²⁺ / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-40	7.6	7.7	7.3	7.1	0.29	107.5	0.0	4.9	0.47	1.61	2.58	57.4	5.78	40.02	0.18	5.2	18.7

* de acuerdo a los valores estimados de Ca, Jackson (*op. cit.*)

El valor dado de CIC es muy alto, los contenidos de P asimilable, MO y N_t son altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación C:N es de 2.46, siendo baja de acuerdo con Ortiz-Villanueva (*op. cit.*)

Tabla 16.- Características químicas del perfil 980530-03 Árbol Grande (continuación)

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg^{-1}				mg kg^{-1}	
0-40	35	20	8.134	2.46	10.687	17.5

c. Discusión de los resultados del perfil No. 4.

La influencia del agua residual sobre el suelo es muy similar al perfil 3, debido a que el aporte de MOS obscurece al suelo; el color en húmedo y en seco indica la presencia de MO humificada [Aguilera, *op. cit.*].

La DR registrada no cae en los rangos normales ($2.6\text{-}2.7 \text{ Mg m}^{-3}$), considerando el peso de la calcita, debido a que la MO provoca que la densidad de las partículas descienda a menos de 2.4 Mg m^{-3} [Buckman & Brady, *op. cit.*], sus valores concuerdan con los valores más frecuentes para minerales de arcilla, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). De acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], los valores de DA coinciden con un tipo de suelo mineral arcilloso, aunque no coinciden con la clase textural arenosa del suelo, concuerda con mayores contenidos de MO que disminuyen la densidad de las partículas, a diferencia del perfil 1 (Tablas 5, 7, 14 y 16). La porosidad del perfil indica que hay una buena aireación y tasa de infiltración de agua y que fomenta la reducción del pH debido a la liberación de CO₂ por la respiración radicular [Porta *et al.*, *op. cit.*], a diferencia del perfil 3 (Tablas 12 y 15).

A pesar de que este perfil se localiza al centro del Municipio en una parte relativamente baja es muy similar a los perfiles 1 y 2, que se encuentran en partes de mayor altitud, ya que la fracción textural predominante es la arena y las fracciones de limo y arcilla son más bajas a diferencia del perfil 3 (*Mapas 4, 5 y 8*). Los contenidos de arcilla y limo son menores que los registrados en el perfil 3, ya que en ese perfil hay una depositación de sedimentos por la pendiente del terreno y por su aporte por las aguas negras, que a diferencia de éste perfil, las aguas negras se mezclan con las grises que reciben un tratamiento parcial por sedimentación en la presa Endhó (*Tablas 11 y 17; Mapa 5, 8 y 9*). El contenido de arcillas no está relacionado con los altos valores de CIC, por lo que la calidad y naturaleza de la MO pueden provocar dichos valores, en parte, aumentando la fertilidad.

Los valores de pH en KCl y en H₂O disminuyen en comparación con valores registrados en los perfiles anteriores, lo que puede deberse a que hay un mayor tiempo de riego y de actividad biológica en la zona a diferencia de los perfiles 1, 2 y 3, lo que provoca un mayor contenido de CO₂ y la acidificación del medio (*Tablas 6, 9, 12 y 15*). Estos valores de pH no rebasan los rangos de tolerancia y rendimiento satisfactorio del maíz [Young, *op. cit.*]. Los valores de CE no rebasan el umbral de tolerancia para maíz [Porta *et al.*, *op. cit.*], junto con los valores de pH y los contenidos de Na⁺ intercambiable, indican que no hay problemas salinización o sodicidad [Aguilera, *op. cit.*]. A diferencia del perfil 3, los niveles de Na⁺ y Mg²⁺ son menores debido a los canales que distribuyen las aguas negras y grises se mezclan, están revestidos y recorren una distancia mayor, con lo que su aporte es menor (*Mapa 5 y 8*); con ello el índice Mg-Na disminuye y las relaciones Ca:Na y Ca:Mg aumentan, indicando bajas tendencias de alcalinización y salinización [Flores *et al.*, *op. cit.*] (*Tablas 12 y 15*).

El contenido relativamente más bajo de MO a diferencia de los contenidos del perfil 3, puede deberse al mayor tiempo de laboreo con respecto al perfil 3 y a que el terreno acaba de ser cosechado, además de que el aporte de MO es menor al tratarse de aguas mezcladas. Sin embargo, debido a que los contenidos de MO y arcillas son más bajos y los valores de CIC son mayores, a diferencia de los obtenidos en el perfil 3, la calidad de la MO parece ser mayor al tener más sitios de intercambio (*Tablas 13 y 16*). Los contenidos de materiales xenobióticos pueden ser menores en este caso, debido a la mezcla de aguas y depositación diferencial mencionada anteriormente. La relación C:N es más baja en comparación con el perfil anterior, lo que evidencia la pérdida de C de la parcela. Los contenidos de P asimilable y NO₃⁻ presentes en el perfil son altos, aunque son más bajos en comparación con los obtenidos en el perfil 3 debido probablemente a su lavado hacia los canales de drenaje o al manto freático o a su bajo aporte por las aguas mezcladas (*Tablas 13 y 16*).

d. Clasificación del perfil No. 4.

El proceso dominante en el perfil es la acumulación y cementación de CaCO_3 a poca profundidad, debido al uso agrícola, al manejo del terreno y al empleo de aguas residuales para riego, ha ocurrido un enriquecimiento de nutrimentos y de MO. Los horizontes de diagnóstico observados basándose en los resultados de los análisis de laboratorio y en la morfología del perfil, son: un epipedón mólico, dado por el color, estructura, contenido de MO y porcentaje de saturación de bases en el subhorizonte Ap_{11} , y horizonte petrocálcico como horizonte genético Ck; las características de diagnóstico en este perfil son: suelo calcárico, dado por los contenidos de CaCO_3 , y contacto lítico a 25 cm de profundidad.

Clasificación:

FAO-UNESCO (1999)
 Grupo: Calcisol
 Unidad: Petric Calcisol
 Subunidad: *Eutri-petric Calcisol*

Clasificación USDA (1998)
 Orden: Mollisol
 Suborden: Ustoll
 Gran grupo: Calciustoll
 Subgrupo: *Lithic Petrocalcic Calciustoll*



Figura 7.- Perfil 4, localidad de Arbol Grande, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hgo.

E. Perfil No. 5, localidad: Palo Seco Mixquiahuala, clave: 980531-02.

Este perfil se localiza en una parcela de cultivo ubicada a 20° 11' 45.40" Latitud Norte y 99° 13' 20.57" Longitud Oeste a una altitud de 2000 msnm, en donde se cultiva calabaza, su drenaje es moderado, tiene 25 cm de profundidad efectiva y limita con un horizonte petrocálcico. De acuerdo a la CNA tiene riego con aguas mezcladas desde hace 75 años.

a. Morfología del perfil No.5

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-15 cm)	Seco, la transición a la siguiente capa es marcada de forma horizontal. Color en seco gris oscuro (10 YR 4/1) y en húmedo negro (10 YR 2/1). Estructura granular de tamaño mediano y fino, desarrollo moderado. Poros finos abundantes. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura franca. Esqueleto formado por gravas escasas de forma angular y subangular. Reacción moderada al H ₂ O ₂ y débil al HCl 1N y dilución 1:4, raíces finas y medias frecuentes.
Ap ₁₂	(15-25 cm)	Ligeramente húmedo, la transición a la siguiente capa es marcada de forma horizontal. El color en seco gris oscuro (10 YR 4/1) y húmedo negro (10 YR 2/1). Estructura granular. Poros finos abundantes. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura franca. Esqueleto formado por gravas subangulares muy escasas. Raíces finas y medias, reacción es moderada al H ₂ O ₂ y débil al HCl 1N y dilución 1:4.
C (k)		Horizonte petrocálcico

b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No.5

El color en el perfil no tuvo variación en Ap₁₁ y Ap₁₂, siendo gris oscuro (10 YR 4/1) en seco y negro (10 YR 2/1) en húmedo. La DA aumenta y la DR disminuye con la profundidad. La porosidad disminuye (Tabla 17) y sus valores caen en rangos de porosidad normal, de acuerdo con Hillel (*op. cit.*). En cuanto a la textura del suelo, el porcentaje de arenas disminuye, el porcentaje de arcillas aumenta de 19.8 a 26.0 % y la fracción de limo prácticamente se mantiene en 30.3 y 30.4 %; en ambos casos la clase textural es franco (F), de acuerdo con la clasificación de Porta *et al.* (*op. cit.*).

Tabla 17.- Características físicas del perfil 980531-02 Palo Seco Mixquiahuala.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-15	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.17	2.43	52	49.9	19.8	30.3	F
Ap ₁₂	15-25	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.21	2.39	49	43.6	26.0	30.4	F

Los valores de pH en KCl en ambas diluciones caen en el rango determinado como neutro (6.6 a 7.3), de acuerdo con USDA [Porta *et al.*, *op. cit.*], en tanto que los valores de pH en H₂O son medianamente alcalinos (7.4 a 8.5), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. El pH en H₂O y en KCl de ambas relaciones aumenta ligeramente con la profundidad. Los valores de CE disminuyen con la profundidad y no indican salinidad, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los valores de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ son altos y los de CaCO₃ son muy altos en ambos subhorizontes del perfil, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación de proporción de los cationes intercambiables en ambos subhorizontes del perfil es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> K⁺ > Na⁺. La estimación de Ca²⁺ es de 22.61 y de 14.84 cmol kg⁻¹ en Ap₁₁ y Ap₁₂, respectivamente, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*); con ello, el índice Mg-Na aumentan y las relaciones Ca:Mg y Ca:Na disminuyen con la profundidad del suelo, indicando una baja tendencia a la salinización y alcalinización, ya que los valores no rebasan 0.5 y no son menores a 1 y 10, respectivamente, de acuerdo a Flores *et al.* (*op. cit.*). No se registra la presencia de CO₃²⁻, pero si la de HCO₃⁻ y Cl⁻ los cuales aumentan con la profundidad (Tabla 18).

Tabla 18.- Características químicas del perfil 980531-02 Palo Seco Mixquiahuala.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca ⁺ / Mg	Ca ⁺ / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-15	7.7	7.7	7.1	7.1	0.32	65	0.0	3.1	0.34	1.39	2.33	31.28	8.42	34.75	0.28	2.68	16.3
15-25	7.9	7.9	7.2	7.3	0.25	72.5	0.0	3.6	0.67	1.39	2.33	31.86	10.6	29.18	0.41	1.39	10.7

* de acuerdo a los valores estimados de Ca, Jackson (*op. cit.*)

Los contenidos MO se encuentran en niveles altos en Ap₁₁ y medios en Ap₁₂, los contenidos de P asimilable, Nt y CIC son altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los contenidos de MO, NO₃⁻, Nt y P asimilable disminuyen con la profundidad (Tabla 19). La relación C:N registra un ligero incremento con la profundidad, pero sus valores son bajos, de acuerdo con Ortiz-Villanueva (*op. cit.*).

Tabla 19.- Características químicas del perfil 980531-02 Palo Seco Mixquiahuala (Continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-15	36	21	6.02	3.49	11.719	32.14
15-25	33	19	4.76	3.99	2.742	25.25

c. Discusión de los resultados del perfil No.5

Este suelo tiene una influencia parcial de las aguas residuales debido a que recibe aguas grises y está próximo a un canal revestido, caso similar al perfil 4, sin embargo, hay un oscurecimiento del suelo debido al recubrimiento de las partículas por la MOS aportada, a diferencia del valúe y croma obtenido en seco en el perfil 1 (*Tablas 5 y 17*).

La DR de las partículas desciende a menos del valor normal para suelos con calcita (2.6 a 2.7 Mg m^{-3}), lo cual se debe al intemperismo provocado por el agua residual y al efecto de la MO aportada por las aguas residuales. Los valores de DA coinciden con el tipo de suelo mineral francoso, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Dada la buena transmisión de fluidos por la porosidad; junto con el aporte de MO, N, y otros macro y micronutrimientos del agua de riego, disminuye el pH del suelo por el aumento de la actividad microbiana, a diferencia del perfil 1 (*Tablas 6 y 18*).

Los contenidos de arcilla y limo son menores que los registrados en el perfil 3, ya que en ese perfil hay una depositación de sedimentos por la pendiente del terreno y por su aporte por las aguas negras, que a diferencia de este perfil, las aguas de riego reciben un tratamiento parcial por sedimentación en la presa Endhó (*Tablas 11 y 17; Mapa 5*).

Los valores de pH son similares al perfil 4, el tiempo que tiene el suelo con riego, el aporte de MO y otros macro y micronutrientes, la porosidad y la actividad biológica, provocan la disminución del pH a diferencia de lo que ocurre en los perfiles anteriores. Al mismo tiempo, existe una disminución en los contenidos de CaCO_3 y de Ca^{2+} intercambiable, a diferencia de los contenidos en los perfiles anteriores, debido al lavado por el riego. Ante los valores de pH registrados hay una mayor asimilabilidad de N, P, Mn, B, Cu, Zn, y Fe, a diferencia de los suelos más alcalinos (perfiles 1, 2 y 3) [Russell, *op. cit.*; Buckman & Brady, *op. cit.*]. Los valores de pH rebasan los rangos de tolerancia y rendimiento satisfactorio de la calabaza (5.5 a 6.5), pero no rebasan los rangos respectivos en maíz (5.0 a 8.0) y frijol (5.8 a 7.5) [Young, *op. cit.*].

Los valores de CE no rebasan el umbral de tolerancia del maíz, frijol y alfalfa [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Con base en los valores de pH, CE y Na^+ intercambiable, no existen problemas de salinidad ni sodicidad [Aguilera, *op. cit.*; Porta *et al.*, *op. cit.*], lo cual es reforzado con el índices Mg-Na y las relaciones Ca:Mg y Ca:Na, que sugieren una tendencia baja hacia la salinización y mediana a la alcalinización, a diferencia del perfil 3 (*Tablas 12 y 18*). La disminución de Ca^{2+} , Mg^{2+} y arcillas, en comparación de los contenidos en el perfil 3, provoca la baja adhesividad y plasticidad y el desarrollo

débil de los agregados, situación similar a la del perfil 4.

Los contenidos de MO son muy similares al los registrados en el perfil 4, menores a los del perfil 3 y mayores a los del perfil 1; lo que refuerza una depositación diferencial en función del tipo de agua de riego, ya que en este perfil y en el 4 se riega con aguas mezcladas (negras y grises), a diferencia del perfil 3 que se riega con aguas negras y del perfil 1 que es de temporal (*Tablas 7, 13, 16 y 19*). La MO ayuda a contrarrestar los efectos causados por la arena, fracción textural predominante.

La fertilidad indicada en parte por la CIC es alta, está relacionada con la elevada reserva de bases intercambiables, la calidad o naturaleza de la MO del suelo y los elevados contenidos de Nt, P asimilable y NO_3^- , y es mayor que la observada en el perfil 1 (*Tablas 7 y 19*). Este suelo tiene un mayor tiempo de riego, sin embargo el aporte de MO, Mg^{2+} y Na^+ intercambiable y de productos xenobióticos contenidos en el agua residual es menor, ya que el riego se realiza con aguas mezcladas, en comparación con el perfil 3 (*Mapa 5*).

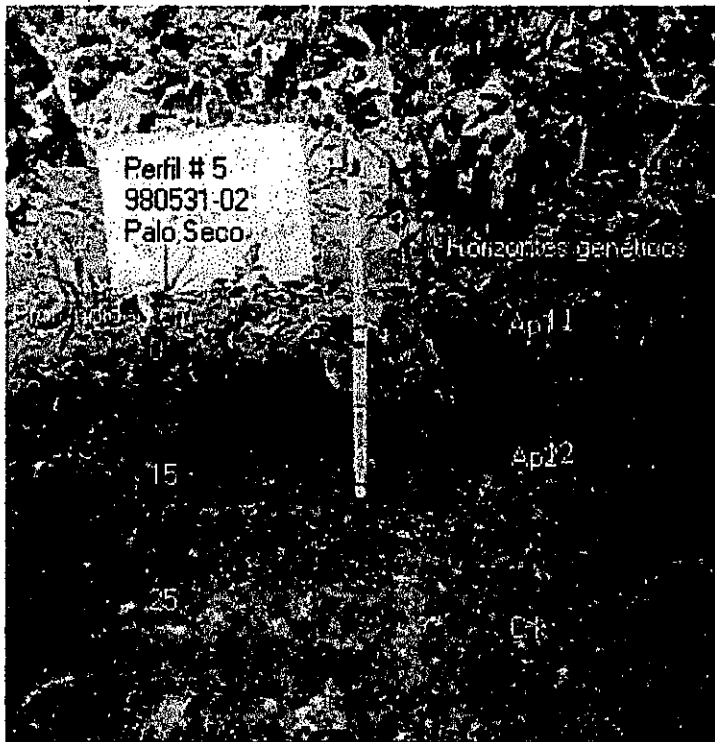
La relación C:N es menor al índice óptimo (12), aunque el índice mejora con respecto a la obtenida en el perfil 4; esta relación refleja los altos contenidos de N en diferentes formas aportados por las aguas residuales, a diferencia del aporte de C que es menor, y el agotamiento de las reserva de C en el suelo. Esta relación puede disparar el metabolismo microbiano por el consumo de N que puede mejorar esta relación posteriormente.

Los contenidos de P soluble, Cl^- y NO_3^- son menores a los obtenidos en el perfil 3, pero mayores a los registrados en el perfil 4, debido a que en el perfil 3 el riego es con aguas negras y en el perfil 4 el tiempo de riego es menor (*Tablas 13, 16 y 19*).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

d. Clasificación del perfil No.5

El proceso dominante en el perfil es la acumulación y cementación de CaCO_3 a escasa profundidad, ha ocurrido un enriquecimiento de micro y macro nutrientes en esta zona semiárida debido al manejo del terreno y al uso del agua residual. Los horizontes de diagnóstico son: epipedón mólico dado por el color, estructura, contenido de MO y porcentaje de saturación de bases en los horizontes Ap_{11} y Ap_{12} , y horizonte petrocálcico como horizonte genético Ck; las características de diagnóstico son: suelo calcárico, dado por los contenidos de CaCO_3 , y contacto lítico a 25 cm de profundidad.



Clasificación
FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Calcisol
Unidad: Petric Calcisol
Subunidad: *Eutri-petric
Calcisol*

USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calciustoll
Subgrupo: *Lithic
Petrocalcic Calciustoll*

Figura 9.- Perfil 5, localidad Palo Seco, municipio de Mixquiahuala, Hgo.

F. Perfil No. 6, localidad: Benito Juárez, clave: 980530-02.

Se ubica a 20° 18' 43.8" Latitud Norte y 99° 08' 1.2" Longitud Oeste a 2115 msnm, cerca de la barranca la Sierrita, se cultivan magueyes bajo riego de temporal. La zona es muy pedregosa y se encuentran rocas de origen sedimentario e ígneo. La vegetación es de tipo matorral espinoso, donde predominan *Ferrocactus sp.* y biznagas. El suelo es de origen aluvial-coluval, tiene buen drenaje externo. La erosión predominante en el lugar es eólica, aunque también hídrica laminar de grado moderado a fuerte. La influencia humana es moderada y el factor nocivo es la sequedad. El suelo limita con material calcáreo a 66 cm de profundidad.

a. Morfología del perfil No. 6

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
A ₁₁	(0-25 cm)	Seco, separación tenue de forma irregular. Color gris oscuro en seco (10 YR 4/1) y negro en húmedo (10 YR 2/1). Estructura granular de tamaño muy fino y débil desarrollo, abundantes poros finos. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico. Textura franca. Esqueleto formado por gravas subangulares escasas, guijarros angulares y subangulares frecuentes, y piedras escasas. Resistividad promedio de 2.58 kg m ² . Raíces finas, medianas y gruesas frecuentes, reacción moderado al H ₂ O ₂ y fuerte al HCl 1N y dilución 1: 4, pH de 7.
A ₁₂	(25-54 cm)	Seco, separación clara de forma plana-discontinua. Color gris oscuro en seco (10 YR 4/1) y negro en húmedo (10 YR 2/1). Estructura granular de tamaño fino y débil desarrollo, escasos poros finos. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura migajón arenoso. Esqueleto formado por gravas subangulares escasas, guijarros angulares y subangulares escasos y rocas angulares frecuentes. Raíces finas escasas, medianas y gruesas frecuentes. Reacción moderada al H ₂ O ₂ y fuerte al HCl 1N y dilución 1:4, pH de 7.
AC	(54-66 cm)	Seco, de separación marcada irregular. Color gris oscuro en seco (10 YR 4/1) y negro en húmedo (10 YR 2/1). Estructura granular de tamaño fino y medio de ligero desarrollo; escasos poros finos. Consistencia suelta en seco y firme en húmedo, ligeramente adhesivo y no plástico. Textura migajón arenoso. Esqueleto formado por gravas subangulares escasas, guijarros angulares y subangulares escasos y piedras angulares y subangulares abundantes. Raíces medianas escasas y gruesas frecuentes. Reacción débil al H ₂ O ₂ y muy fuerte al HCl 1N y dilución 1:4, pH de 6.
R (k)		Contacto lítico con roca caliza

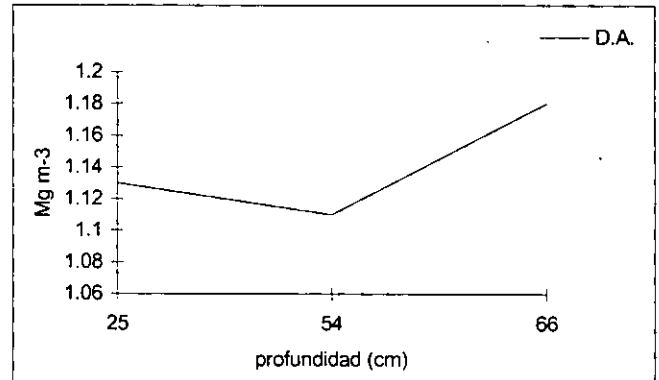
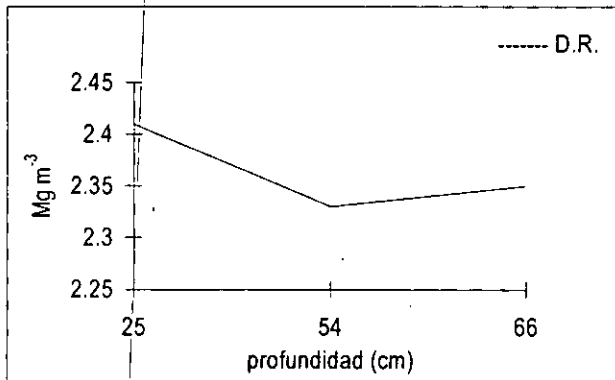
b. Resultados de los análisis físicos y químicos perfil No. 6

El color en seco es gris oscuro (10 YR 4/1) y en húmedo es negro (10 YR 2/1) ambos permanecen constantes en todo el perfil. Los valores de DR disminuyen con la profundidad y los de DA aumentan

(Gráficas 2 y 3). La porosidad decrece con la profundidad y sus valores son normales, de acuerdo con Hillel (*op. cit.*). La fracción textural predominante es la arena, que incrementa con la profundidad, en tanto que la arcilla y el limo disminuyen. La clase textural va de franca (F) en el subhorizonte A₁₁ a migajón arenoso (F-Ar) en A₁₂ y AC, de acuerdo con la clave de Porta *et al.* (*op.cit.*) (Tabla 20).

Tabla 20.- Propiedades físicas del perfil 980530-02 Benito Juárez.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
A ₁₁	0-25	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.13	2.41	53	49.9	19.3	30.8	F
A ₁₂	25-54	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.11	2.33	52	67.2	17.2	15.6	F-Ar
AC	54-66	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.18	2.35	50	70.0	12.8	12.8	F-Ar



Gráfica 2.- Variación de los valores de DR en el perfil 6

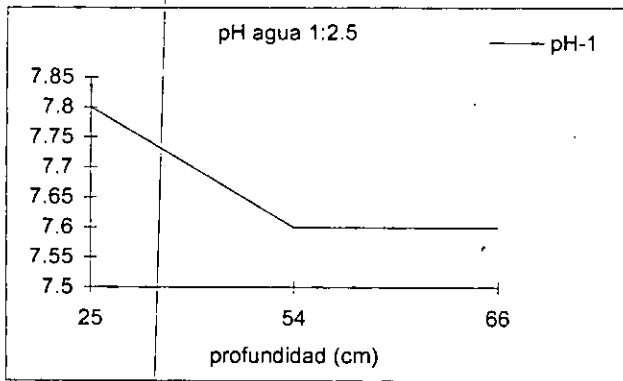
Gráfica 3.- Variación de los valores de DA del perfil 6

Los valores registrados de pH tanto en H₂O como en KCl en ambas relaciones tienden a disminuir, los valores de pH en KCl son medianamente básicos y en la relación 1:2.5 en el subhorizonte AC es neutro, de acuerdo con USDA [Porta *et al.*, *op. cit.*]; los valores de pH en agua caen dentro del rango considerado como medianamente alcalino, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los valores de CIC disminuye con la profundidad, sus valores se clasifican como altos en A₁₁ y muy altos en A₁₂ y AC, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (Tabla 21, gráficas 4 y 5).

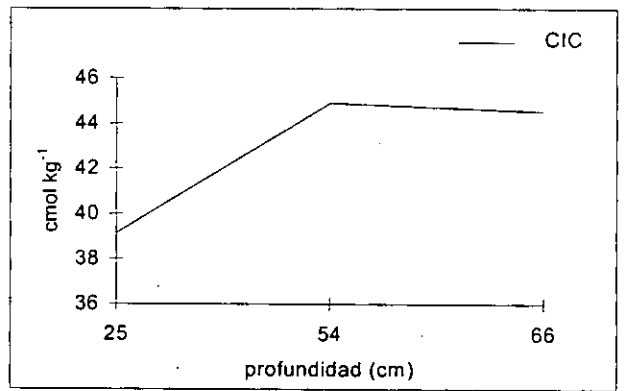
Tabla 21.- Características químicas del perfil 980530-02 Benito Juárez.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca ²⁺ / Mg	Ca ²⁺ / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-25	7.8	7.9	7.4	7.5	0.21	145	0.0	4.4	0.23	0.47	0.73	51.71	21.7	39.14	0.57	0.74	34.5
25-54	7.6	7.7	7.4	7.4	0.32	127.5	0.0	4.3	0.78	0.57	0.25	64.32	13.0	44.89	0.30	2.4	54.6
54-66	7.6	7.8	7.2	7.4	0.77	185	0.0	3.9	1.97	0.87	0.25	65.88	12.9	44.52	0.31	2.35	35.0

* de acuerdo a los valores estimados de Ca²⁺, Jackson (*op. cit.*)

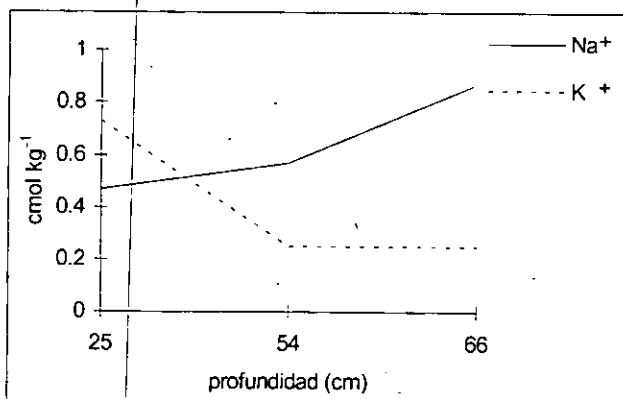


Gráfica 4.- Variación de los valores de pH en H₂O 1:2.5 (pH-1) el perfil 6.

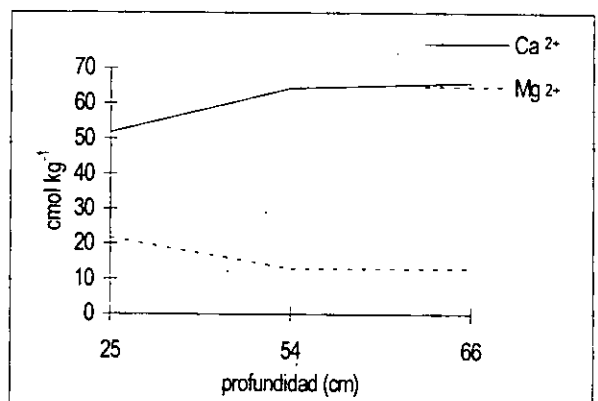


Gráfica 5.- Variación de los valores de CIC en el perfil 6.

Los contenidos de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ son elevados, los contenidos de K⁺ son bajos en A₁₂ y AC, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación de proporción de los cationes intercambiables en Ap₁₁ la relación es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> K⁺ > Na⁺, aunque en los 2 subhorizontes inferiores es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> Na⁺ > K⁺. El Ca²⁺ intercambiable estimado, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*), es de 16.2, 31.11 y 30.45 cmol kg⁻¹ en Ap₁₁, Ap₁₂ y AC, respectivamente. El Na⁺ y Ca²⁺ aumentan con la profundidad; caso contrario en K⁺ y Mg²⁺, con ello la relación Ca:Mg aumenta, la relación Ca:Na y el índice Mg-Na disminuyen con la profundidad (*Tabla 21, graficas 7 y 8*). Las relaciones indican que no hay una estabilidad adecuada en Ap₁₁, pero no hay tendencias de salinización, de acuerdo con Flores *et al.* (*op. cit.*).



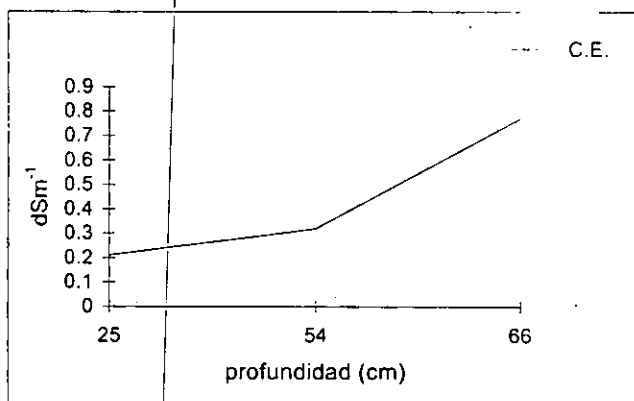
Gráfica 6.- Variación de los contenidos de Na⁺ y K⁺ intercambiables en el perfil 6.



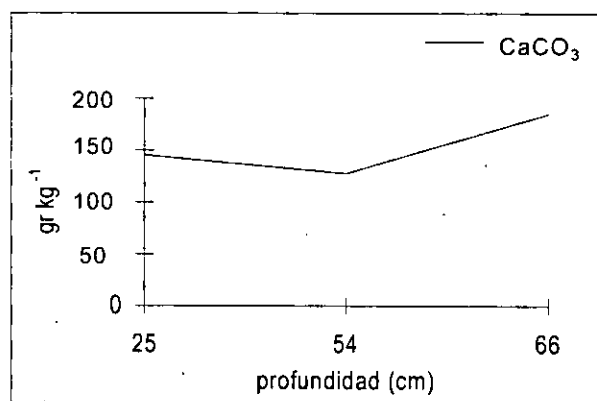
Gráfica 7.- Variación de los contenidos de Ca²⁺ Mg²⁺ intercambiables del perfil 6.

Los valores de CE no tienen efectos en la salinidad, los contenidos de CaCO₃ total son medios en A₁₁ y A₁₂ y altos en AC de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La CE aumenta con la

profundidad, lo que coincide con el aumento de Na^+ intercambiable y Cl^- . Los contenidos de CaCO_3 total aumentan con la profundidad, los HCO_3^- solubles disminuyen con la profundidad, lo que concuerda con el comportamiento del pH (Tabla 21). No se registra la presencia de CO_3^{2-} solubles, pero si de Cl^- y HCO_3^- solubles, en donde la tendencia del primero es a aumentar con la profundidad y la del segundo es a disminuir.



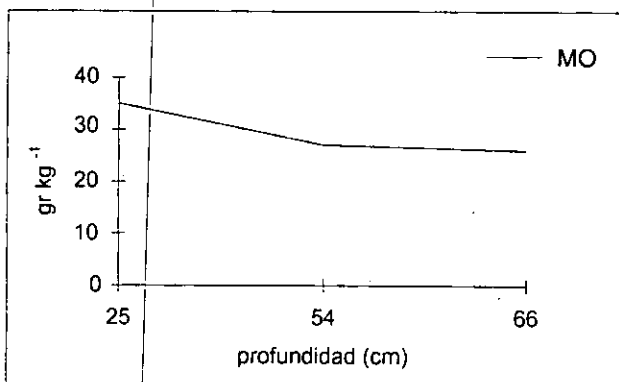
Gráfica 8.- Variación de la CE con la profundidad del perfil 6.



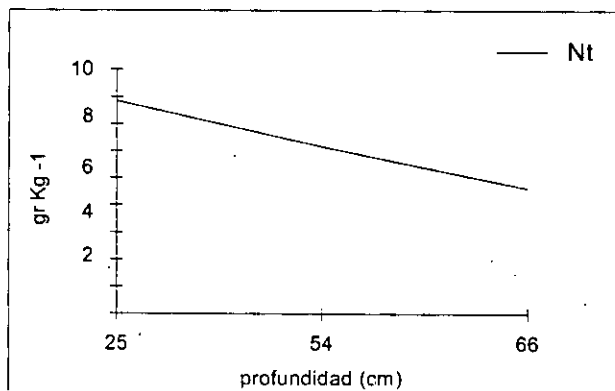
Gráfica 9.- Variación de los CaCO_3 totales con la profundidad del perfil 6.

Tabla 22.- Características químicas del perfil 980530-02 Benito Juárez (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N_t	C/N	NO_3^-	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-25	35	20	7.84	2.55	1.062	6.60
25-54	27	16	6.16	2.59	1.405	10.77
54-66	26	15	4.62	3.25	0.918	14.77



Gráfica 10.- Variación de los contenidos de MO con la profundidad.



Gráfica 11.- Variación de los contenidos de N_t con la profundidad.

Los contenidos de MO, N_t y NO_3^- disminuyen y los de P asimilable y la relación C:N aumentan con la profundidad. Los valores de MO son medios, los de N_t son muy altos y los de P asimilable son

altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (Tabla 22).

c. Discusión de los resultados del perfil No. 6.

Este perfil tiene una profundidad mayor que los perfiles anteriores; no tiene riego con agua residual al igual que el perfil 1, pero el color oscuro indica la presencia de MO humificada [Aguilera, *op. cit.*]. Sin embargo, el color también puede indicar contenidos de MnO_2 y Fe_2O_3 ó Fe_3O_4 , y organominerales de Ca^{2+} y Mg^{2+} , de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*), ya que los contenidos de MO disminuyen mientras el color se mantiene homogéneo en el perfil (Tabla 20).

De acuerdo con Brady (*op. cit.*), el contenido de MO provoca que la DR de las partículas disminuya por debajo del valor normal para suelos con CaCO_3 (2.6 a 2.7 Mg m^{-3}), ya que los valores obtenidos son menores a este rango. Los valores de DA coinciden con los valores de densidad presentes en los suelos minerales arcillosos, de acuerdo con la NOM-021 (*op. cit.*), sin embargo esto no concuerda con la clase textural obtenida (Tabla 20). La porosidad obtenida indica que puede contribuir a la aireación y a la infiltración de agua (Porta, *op. cit.*), lo que fomenta la liberación de CO_2 por la respiración radicular y la actividad microbiana.

De acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*), los contenidos de MO y las arcillas ayudan a contrarrestar los efectos de la arena, macroporosidad, permeabilidad alta y escasa retención de humedad, ya que es la fracción textural predominante del perfil (Tabla 20). Los agregados presentan un ligero desarrollo y la porosidad es buena, lo cual puede deberse a que los contenidos de MO y al manejo del terreno. La alta movilidad del Ca^{2+} y su actividad cementante y floculante, debido al pH del perfil y las altas proporciones de calcio intercambiable, no afectan la estructura, porosidad y aireación del suelo, ya que hay un gran porcentaje de espacios porosos y la MO aumenta la agregación [Ortiz-Villanueva, *op. cit.*].

Los valores de pH son debidos a los niveles medios de CaCO_3 aportados por el material parental, y muy probablemente también a los MgCO_3 que elevan la reacción del suelo a valores mayores a 7, lo que puede causar problemas de absorción de ciertos micronutrientes, como la clorosis férrica (Russell, *op. cit.*). El Ca^{2+} tiene un poder de sustitución mayor con respecto al resto de los cationes, lo que provoca un elevado porcentaje de saturación de bases del perfil, que junto con los

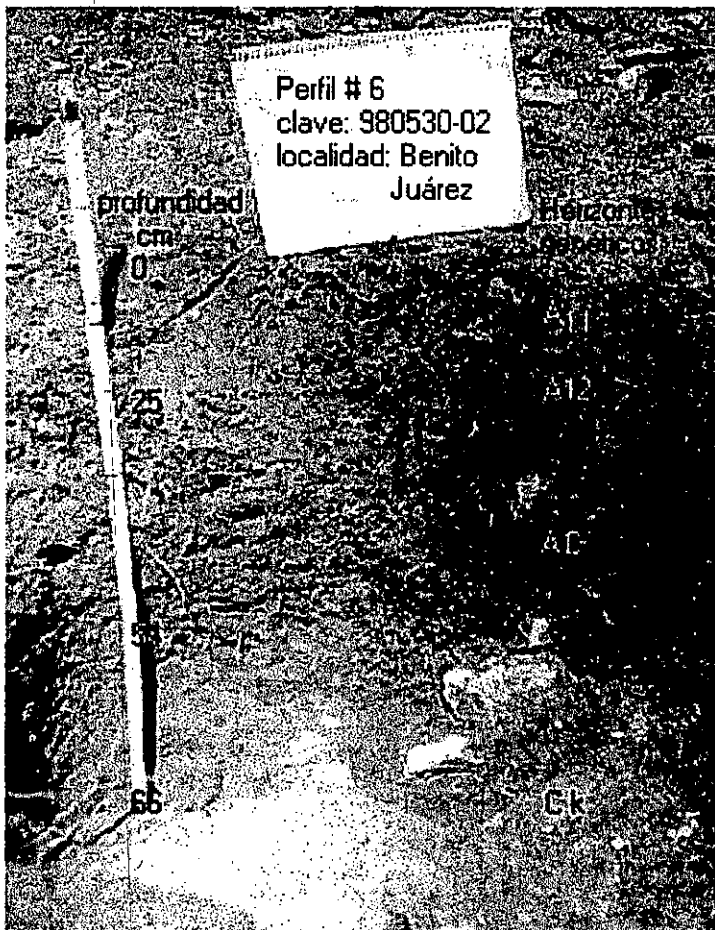
valores de CIC, MO, Nt, P asimilable y NO_3^- , indican una alta fertilidad (*Tablas 21 y 22*).

La baja presencia de Na^+ intercambiable y la disminución de sus valores en función de la profundidad, junto con los Cl^- , tienen estrecha relación con los valores de CE que, junto con los valores de pH, indican que no hay problemas de sodicidad y salinidad (*Tabla 21*). Sin embargo los altos contenidos de Mg decrecientes en el perfil, acumulados en el subhorizonte Ap_{11} , hacen que los índices Mg-Na, y las relaciones Ca:Na y Ca:Mg indiquen una mayor tendencia a la salinización y alcalinización en este subhorizonte, de acuerdo con Flores *et al.* (*op. cit.*).

Los contenidos de MO son muy altos en comparación con perfil 1, lo que puede deberse en mayor medida al manejo que se le da al terreno, al no practicar un uso intensivo la acumulación de C y MO es mayor, junto con la actividad biológica. La relación C:N es baja debido a la acumulación de N junto con la MO. En este perfil los contenidos de P asimilable y de NO_3^- son muy bajos lo que contrasta con los valores altos observados en otros perfiles regados con agua residual (*Tablas 13, 16, 19, y 22*).

d. Clasificación del perfil No. 6.

En este perfil el proceso dominante ha sido la acumulación de MO y su agregación y estructuración debida a la conservación del suelo sobre un material calcáreo. Como horizontes de diagnóstico apoyándose en lo observado en los resultados de los análisis de laboratorio y en la morfología de este perfil, se observan un epipedón mólico, dado por el color, la estructura, el contenido de MO y saturación de bases en el subhorizonte Ap₁₁; las características de diagnóstico son: suelo calcárico, dado por los contenidos de CaCO₃, régimen de humedad ústico límite con un régimen árido y contacto lítico con roca caliza (C k) a 66 cm de profundidad.



Clasificación
 FAO-UNESCO (1999)
 Grupo: Calcisol
 Unidad: Petric Calcisol
 Subunidad: *Petric Calcisol*

USDA (1998)
 Orden: Mollisol
 Suborden: Ustoll
 Gran grupo: Calciustoll
 Subgrupo: *Lithic Calciustoll*

Figura 9.- Perfil 6, localidad Benito Juárez, municipio de Mixquiahuala, Hgo.

G. Perfil No. 7, localidad: la Palma (antes Denganthza), clave 970816-02.

Este perfil se encuentra ubicado a 20° 15' 58.2" Latitud Norte y 99° 07' 24" Longitud Oeste a 1990 msnm. En esta parcela se ha sembrado maíz y cebada; en el momento de la recolecta no había ningún cultivo. El suelo es drenado externamente, de alteración y naturaleza calcárea. Se riega con aguas mezcladas desde 1991. No aplican fertilizantes ni fungicidas. Este lote se ubica cerca del pueblo de Denganthza y tiene 60 cm de profundidad.

a. Morfología del perfil No. 7

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-14 cm)	Es seco, de 14 cm de profundidad, separación marcada de forma ondulada. Color pardo grisáceo en seco (10 YR 5/2) y pardo grisáceo oscuro en húmedo (10 YR 4/2). Estructura granular y de bloques subangulares de desarrollo débil y moderado, tamaño fino y medio. Poros finos escasos. Consistencia suelta en seco y friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico. Textura migajón arenoso. Raíces finas escasas, reacción fuerte al HCl 1N y dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ .
Ap ₁₂	(14-31 cm)	Ligeramente húmedo de 17 cm de espesor, límite de separación abrupta de forma horizontal. Color pardo grisáceo en seco y en húmedo (10 YR 5/2). Estructura granular y de bloques subangulares, de desarrollo débil y moderado, finos y medios. Poros finos escasos. Consistencia friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico. Textura migajón arenoso. Raíces finas frecuentes y medias escasas. Reacción fuerte al HCl 1N y dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ .
A ₁₃	(31-44 cm)	Seco, de 13 cm de espesor, separación marcada de forma horizontal. Color pardo grisáceo oscuro en seco (10 YR 4/2) y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10 YR 3/2). Estructura en bloques subangulares, desarrollo moderado y tamaño grueso. Poros esponjosos escasos. Consistencia friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico. Textura migajón arenoso. Raíces finas y medias escasas. Reacción fuerte al HCl 1N y dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ .
AC	(44-60 cm)	Ligeramente húmedo, 16 cm de espesor separación marcada de forma horizontal. Color pardo grisáceo en seco (10 YR 5/2) y pardo amarillento oscuro en húmedo (10 YR 4/4). Estructura de bloques subangulares, desarrollo débil y tamaño medio. Poros finos escasos. Consistencia muy friable en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura migajón arenoso. Raíces finas escasas. Reacción muy fuerte al HCl 1N y dilución 1:4 y muy débil al H ₂ O ₂ . Presenta manchas blancas de color pardo pálido (10 YR 6/3) y pardo (10 YR 5/3).
C (k)	(60-X cm)	Horizonte petrocálcico muy alterado

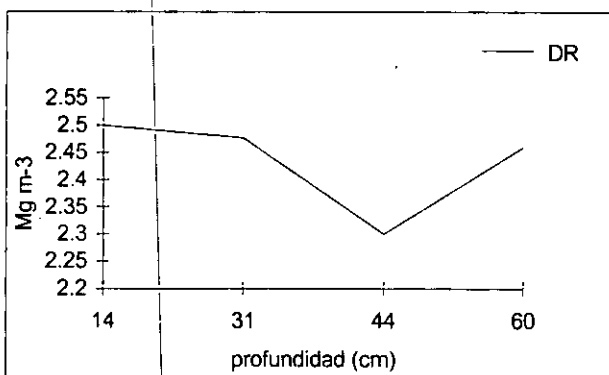
b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil No. 7

En seco el color varia con base en la profundidad tornándose más claro pasando de gris pardusco claro (10 YR 6/2) en Ap₁₁ y AP₁₂ a gris (10 YR 5/1) en A₁₃ y gris claro (10 YR 7/2) en AC. En húmedo el suelo se oscurece más, siendo gris muy oscuro (10 YR 3/1) en los tres primeros subhorizontes y aclarándose en el último a pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2) (Tabla 23).

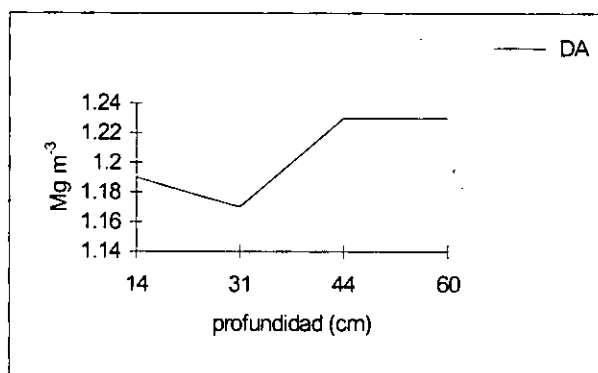
Tabla 23.- Características físicas del perfil 970816-02 La Palma

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-14	10 YR 6/2	10 YR 3/1	1.19	2.5	52	45.2	23.2	31.6	F
Ap ₁₂	14-31	10 YR 6/2	10 YR 3/1	1.17	2.47	52	64.8	23.4	11.8	F-Ar
A ₁₃	31-44	10 YR 5/1	10 YR 3/1	1.23	2.3	47	48.4	26.0	25.6	F
AC	44-60	10 YR 7/2	10 YR 4/2	1.23	2.46	50	46.4	24.0	29.6	F

Los valores de DA aumentan con la profundidad y concuerdan con los valores más frecuentes para suelos minerales francosos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARMAP, *op. cit.*]. Los valores de DR disminuyen ligeramente con la profundidad y concuerdan con los valores más frecuentes para minerales de arcilla y en Ap₁₁, concuerda con los valores frecuentes para cuarzo y feldespatos, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*) (Gráficas 12 y 13). La porosidad disminuye ligeramente con la profundidad y sus valores corresponden a una porosidad normal, de acuerdo con Hillel (*op. cit.*) (Tabla 23).

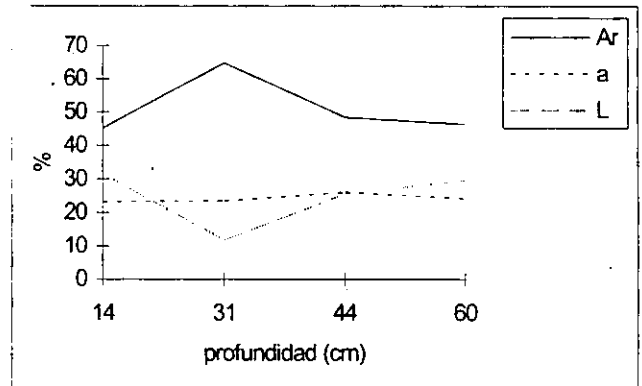


Gráfica 12.- Variación de los valores de la DR con la profundidad del perfil 7.



Gráfica 13.- Variación de los valores de la DA con la profundidad del Perfil 7.

La fracción de predominio es la arena. aumenta en el subhorizonte Ap₁₂ en donde la clase textural cambia de migajón (F) en todo el perfil a migajón arenoso (F-Ar), de acuerdo con la clasificación de Porta *et al.* (*op. cit.*). Las arcillas registran un ligero aumento con la profundidad, sobre todo en A₁₃, en tanto que el limo registra un comportamiento variable (*Tabla 23*).



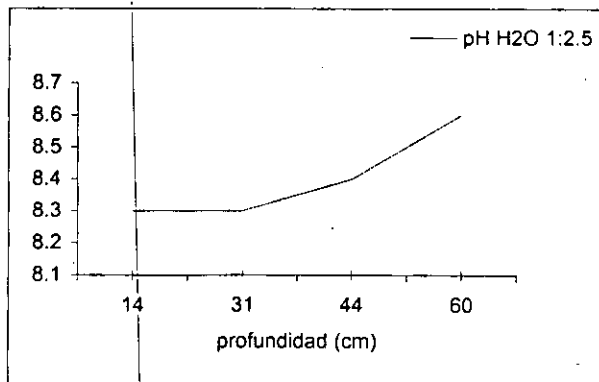
Gráfica 14.- Variación de los contenidos de Arenas

Los valores de pH en H₂O son medianamente alcalinos en Ap₁₁ y A₁₃ y fuertemente alcalinos en Ap₁₂ y AC, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], y aumentan con la profundidad del perfil (*Gráfica 15*). El pH en KCl en la relación 1:2.5 es constante, en tanto que en la relación 1:5 aumenta, sus valores son medianamente básicos, de acuerdo con USDA [Porta *et al.*, *op. cit.*] (*Tabla 24*).

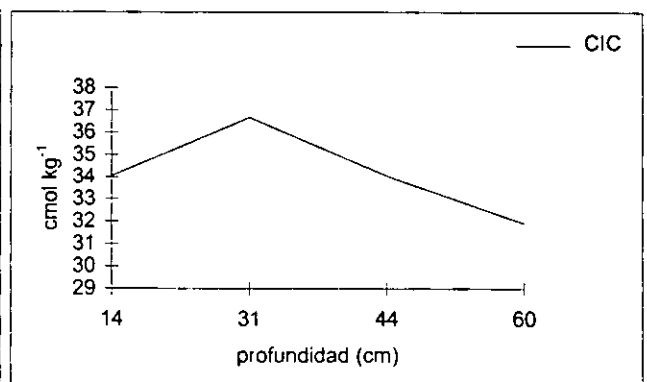
Tabla 24.- Características químicas del perfil 970816-02 La Palma.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca ²⁺ / Mg	Ca ²⁺ / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-14	8.3	8.3	7.7	7.6	0.61	140.0	0.0	4.9	0.88	2.37	1.34	73.4	10.6	34.05	0.38	1.87	8.33
14-31	8.3	8.7	7.7	7.6	0.35	145.0	0.0	5.4	0.45	2.13	1.19	72.2	10.5	36.66	0.34	2.19	10.7
31-44	8.3	8.7	7.7	7.6	0.41	147.5	0.0	4.3	0.68	1.98	1.09	76.5	12.7	34.05	0.43	1.43	16.7
44-60	8.6	8.7	7.7	7.8	0.38	190.0	0.4	8.9	0.52	2.29	0.82	70.1	14.7	31.9	0.54	0.94	16.1

* de acuerdo a los valores estimados de Ca²⁺, Jackson (*op. cit.*)



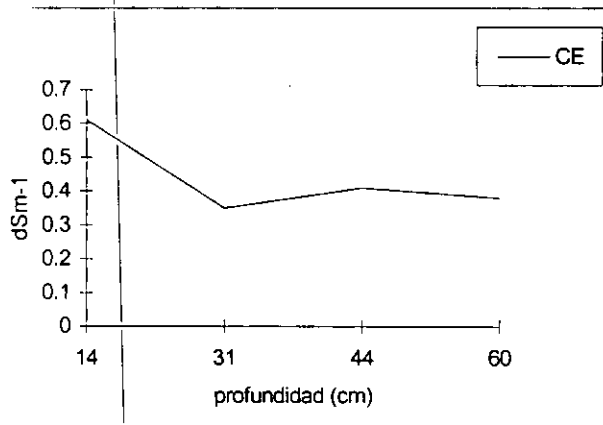
Gráfica 15.- Variación de los valores del pH en H₂O, relación 1:2.5 en el perfil 7.



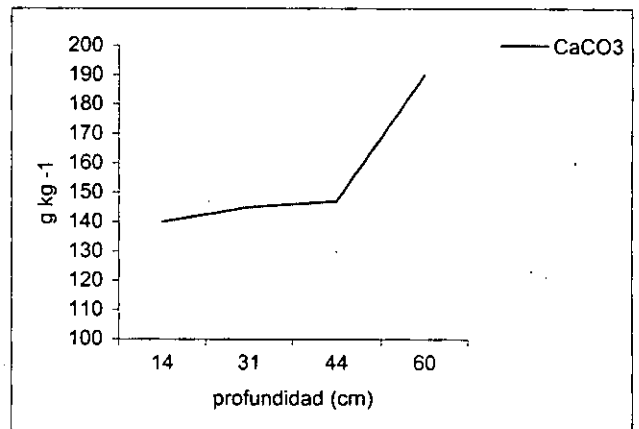
Gráfica 16.- Variación de los valores de CIC con la profundidad en el perfil 7.

La CIC disminuye con la profundidad del suelo, el porcentaje de CaCO₃ aumenta con la profundidad y los valores de CE van de 0.6 a 0.38 dSm⁻¹, teniendo el mayor valor en Ap₁₁ con respecto al resto del

perfil (Gráfica 16). De acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], los valores de CIC y de CaCO_3 son altos y los valores de CE indican baja salinidad (Tabla 24).

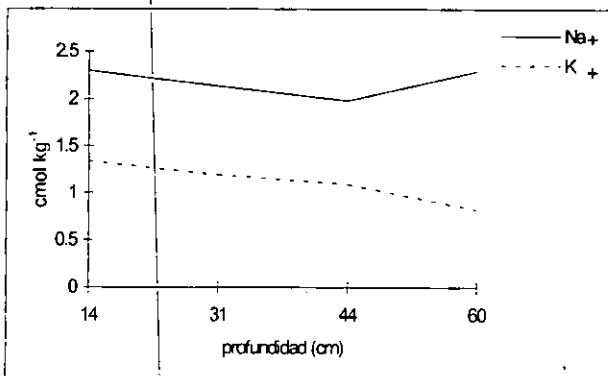


Gráfica 17.- Variación de los valores de CE con la profundidad en el perfil 7.

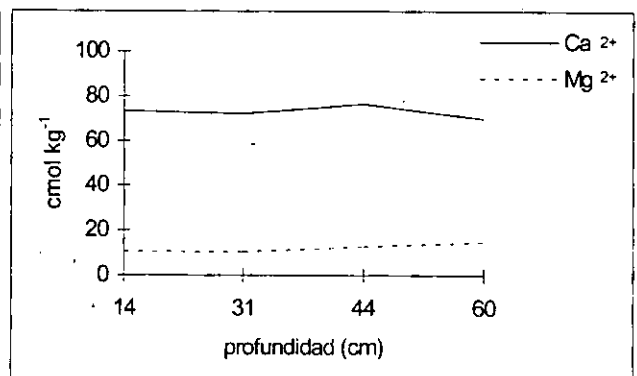


Gráfica 18.- Variación de los contenidos de CaCO_3 con la profundidad del perfil 7.

La relación de proporción de los cationes intercambiables en todo el perfil es $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \gg \text{Na}^+ > \text{K}^+$. El Mg^{2+} se incrementa con la profundidad en tanto que el K^+ , Na^+ y Ca^{2+} tienden a decrecer (Gráficas 19 y 20). La estimación de Ca^{2+} para el perfil es de 19.76, 22.84, 18.24 y 13.92 cmol kg^{-1} en los subhorizontes Ap_{11} , Ap_{12} , A_{13} y AC, respectivamente, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*). El índice Mg-Na y la relación Ca:Na aumentan con la profundidad, el índice Ca:Mg disminuye, lo que señala una tendencia a la alcalinización en el subhorizonte AC al obtenerse valores de 0.5 y 0.94 en el índice Mg-Na y la relación Ca:Mg, respectivamente [Hernández, *op. cit.*; Flores *et al.*, *op. cit.*] (Tabla 24).



Gráfica 19.- Variación de los contenidos de Na^+ y K^+ intercambiables en el perfil 7.

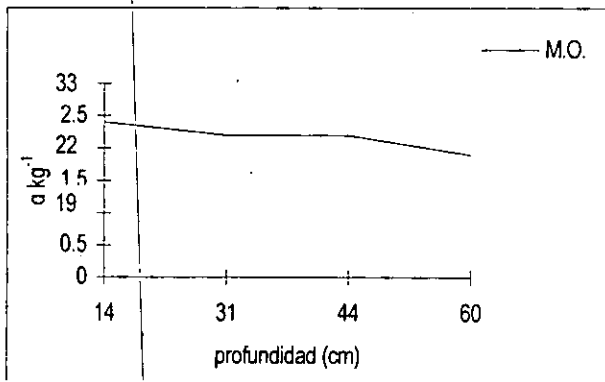


Gráfica 20.- Variación de los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables en el perfil 7.

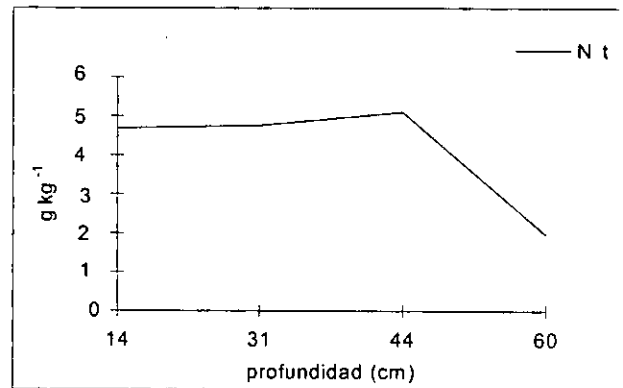
El contenido de MO disminuye con la profundidad del suelo y sus valores son medios (16 a 35 g kg⁻¹), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (Tabla 25, gráfica 21).

Tabla 25.- Características químicas del perfil 970816-02 La Palma (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-14	24	14	4.69	2.99	12.208	40.81
14-31	22	13	4.76	2.73	4.325	42.72
31-44	22	13	5.11	2.54	3.881	43.49
44-60	19	11	1.96	5.61	1.979	40.42

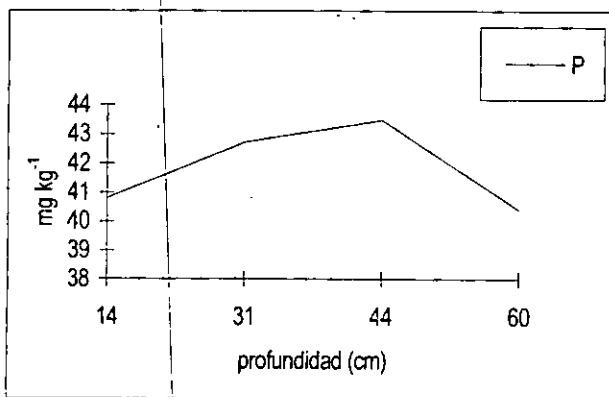


Gráfica 21.- Variación de los contenidos de MO con la profundidad del perfil 7.

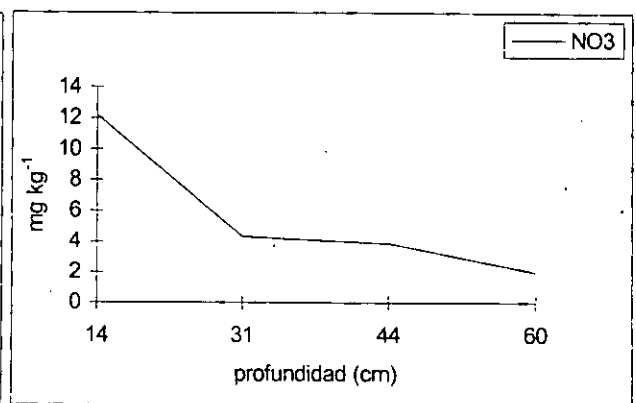


Gráfica 22.- Variación del contenido de Nt con la profundidad del perfil 7.

Los contenidos de P asimilable y Nt aumentan ligeramente con la profundidad, aunque en AC disminuyen, sus valores son altos de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] y sus valores máximo se registran en el subhorizonte A₁₃ (Gráfica 25). Los NO₃⁻ disminuyen con la profundidad del suelo, registrándose una mayor concentración en el primer subhorizonte (Gráfica 27). La relación C:N aumenta con la profundidad (Tabla 25).



Gráfica 23.- Variación de los contenidos de P con la profundidad del perfil 7.



Gráfica 24.- Variación de los contenidos de NO₃⁻ con la profundidad del perfil 7.

c. Discusión de los resultados del perfil No. 7

El color oscuro del suelo disminuye conforme a la profundidad, debido a la disminución de los contenidos de MO y al gradual aumento de CaCO_3 con la profundidad del perfil (*Tablas 24 y 25*). El color gris muy oscuro que presenta en húmedo y el color gris pardusco que presenta en seco indica la presencia de MO humificada [Aguilera, *op. cit.*].

Los valores de DR aumentan, con respecto a los valores obtenidos en el perfil 6, lo que coincide con la disminución del contenido de MO en el perfil (*Tablas 22 y 25*). La porosidad normal, ofrece una buena aireación y drenaje, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). Este suelo es muy parecido al de la localidad Benito Juárez en cuanto a la profundidad y origen, pero en cuanto a la morfología presenta mayor agregación, probablemente derivado de la calidad de la MO que permite una mayor agregación [Aguilera, *op. cit.*; Porta *et al.*, *op. cit.*]. Las fracciones de arcilla y limo aumentan y la fracción de arena disminuye, en comparación con los valores del perfil 6 (*Tablas 21 y 24*). El ligero incremento de arcillas y de limos en Ap_{11} y AC, respectivamente, y los contenidos de MO presente en el perfil, contrarrestan los efectos que genera la arena de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*).

Los valores de Na^+ y K^+ son más altos, a diferencia del perfil 6, lo que coincide con el aumento de la CE en Ap_{11} y A_{13} , no así en AC (*Tablas 21 y 24*). A pesar del aumento de Na^+ , el índice Mg-Na no incrementa en referencia al perfil anterior, la salinidad no cruza el umbral de tolerancia del maíz, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). Los valores medianamente básicos o alcalinos se deben a los niveles de CaCO_3 , están por arriba del rango de valores de tolerancia para un rendimiento satisfactorio para el caso del maíz [Young, *op. cit.*].

La CIC muestra un aumento a la mitad del perfil lo cual puede coincidir con el incremento de arcillas, la fertilidad es alta, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], junto con los valores de MO, reserva de bases intercambiables, P asimilable y Nt, semejantes a los registrados en con los perfiles 2 y 3 (*Tablas 12, 13, 24 y 25*).

Los contenidos de Nt son más bajos con respecto del perfil 6, junto con la MO, aunque coinciden con los niveles del perfil 2. Sin embargo el contenido de P y de NO_3^- es mucho mayor a los niveles del perfil 6 y similares a los del perfil 3, lo que puede deberse a su transporte desde otras zonas de riego (*Tablas 13 y 25, Mapa 5 y 8*).

d. Clasificación del perfil 7

El proceso dominante es la acumulación de MO, agregación y estructuración del suelo sobre un material calcáreo con una fuerte alteración del mismo. Presenta una fuerte agregación debido a la calidad de MO aportada por el agua residual, a diferencia del perfil anterior. Con base en lo observado en los resultados de los análisis de laboratorio y en la morfología, los horizontes de diagnóstico son: epipedón mólico de 30 cm de profundidad, dado por las características del color, estructura, contenido de MO y porcentaje de saturación de bases de los subhorizontes Ap₁₁ y Ap₁₂, y un horizonte petrocálcico muy alterado como horizonte genético C(k) a 60 cm de profundidad. Las características de diagnóstico del perfil son: suelo calcárico dado por los contenidos de CaCO₃ y régimen ústico que limita con arídico.

Perfil No. 7, localidad: la Palma (Denganthza), clave 970816-02.

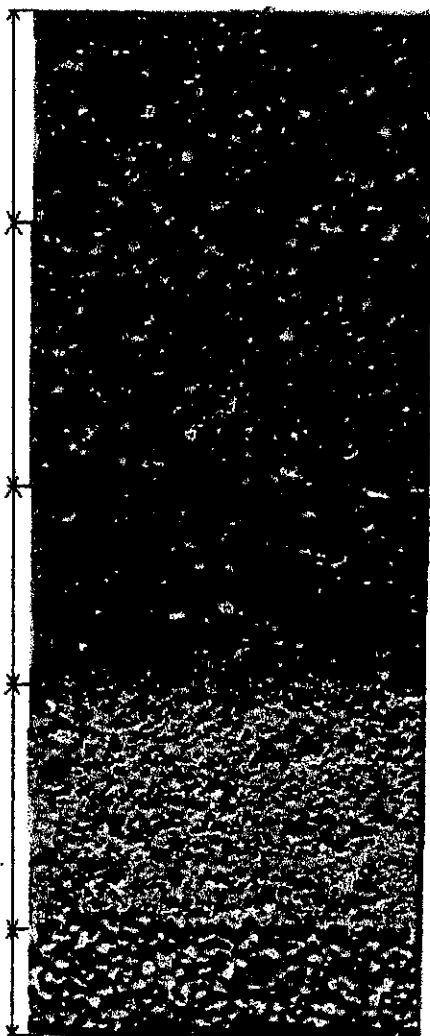
Ap₁₁ (0-14 cm)
 Pardo grisáceo en seco, pardo grisáceo oscuro en húmedo. Estructura granular y en bloques subangulares moderados, tamaño fino y medio. Poros finos. Consistencia suelta en seco y friable en húmedo. Adhesividad ligera y plástico.

Ap₁₂ (14-31 cm)
 Pardo grisáceo. Estructura granular y bloques subangulares medianos desarrollo moderado. Poros finos escasos. Adhesivo y plástico.

A₁₃ (31-44 cm)
 Pardo grisáceo oscuro seco pardo grisáceo muy oscuro húmedo. Bloques subangulares de desarrollo moderado.

AC (44-60 cm)
 Pardo grisáceo en seco, pardo amarillento oscuro en húmedo. Bloques subangulares medianos débiles. Poros finos escasos. Consistencia muy friable, poco adhesivo y poco plástico.

C (k)



Migajón arenoso. Reacción fuerte al HCl y débil al H₂O₂. Raíces escasas.

Migajón arenoso. Reacción fuerte al HCl y débil al H₂O₂. Transición ondulada clara

Consistencia friable, adhesivo y plástico moderada. Migajón arenoso. Reacción fuerte al HCl y débil al H₂O₂. Separación abrupta plana.

Migajón arenoso. Reacción fuerte al HCl y muy débil al H₂O₂. Raíces finas muy escasas. Separación clara ondulada

Petrocálcico muy alterado

Clasificación
 FAO-UNESCO (1999)
 Grupo: Phaeozem
 Unidad: Calcárico Phaeozem
 Subunidad: *Eutri-Petri Calcárico Phaeozem*

USDA (1998)
 Orden: Mollisol
 Suborden: Ustoll
 Gran grupo: Calcicustoll
 Subgrupo: *Petrocalcic Calcicustoll*

Figura 10.- Monolito del Perfil 7, localidad: La Palma (Denganthza), Municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

60 años de riego con aguas negras. Ubicado a los 20° 15' 58.2" L.N., 99° 7' 24" L.O., 1990 msnm. Grupo: Phaeozem, Unidad: Calcárico Phaeozem, Sub-unidad: Eutri-petri Calcárico Phaeozem

H. Perfil No. 8, localidad: Tepatepec, clave: 970816-01.

Se encuentra ubicado a 20° 15' 41.4" Latitud Norte y 99° 06' 43.2" Longitud Oeste a 1990 msnm. En esta parcela (lote No. 4794) se siembra frijol (peruano), anteriormente maíz (variedad H-135), calabaza y chile, se recogen de 2.5 a 3 ton Ha⁻¹. Según la CNA esta parcela se riega desde 1950 con aguas mezcladas provenientes de la presa Endhó. Existe abundante material calcáreo con alto grado de intemperización en el horizonte C donde limita a los 83 cm de profundidad.

a. Morfología del perfil No.8

Subhorizonte	profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-11 cm)	Ligeramente húmedo, 11 cm de profundidad, separación abrupta horizontal. El color gris en seco (10YR5/1) y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR3/2). Estructura granular y de bloques subangulares, desarrollo moderado, tamaño fino y medio. Poros finos escasos. Consistencia blanda en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura migajón limoso. Raíces finas y gruesas escasas; reacción muy débil al HCl 1 N y dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ .
Ap ₁₂	(11-35 cm)	Húmedo, 24 cm de grosor, separación abrupta de forma horizontal. Color pardo grisáceo oscuro en seco (10YR4/2) y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR3/2). Estructura de bloques subangulares de tamaño grueso de fuerte desarrollo. Poros finos y cavernosos escasos. Consistencia firme en húmedo; adhesivo y plástico. Textura migajón limoso. Raíces finas y medias escasas; reacción débil al HCl 1 N y dilución 1:4, débil al H ₂ O ₂ .
AC	(35-55 cm)	Húmedo, 20 cm de grosor, separación abrupta en forma de lenguas. Estructura de bloques subangulares, tamaño medio y desarrollo moderado. Poros finos abundantes. Color pardo en seco (10YR4/3) y pardo oscuro húmedo (10YR3/3). Consistencia friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico. Textura migajón areno-limoso. Raíces finas y medias escasas, reacción muy fuerte al HCl 1 N y relación 1:4 y muy débil al H ₂ O ₂ .
C ₁	(55-83 cm)	Es húmedo, 28 cm de grosor, separación clara horizontal. Color pardo en seco (10YR5/3) y pardo amarillento en húmedo (10YR6/4). Sin estructura. Poros finos y esponjosos abundantes y escasos, respectivamente. Consistencia friable en húmedo; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura migajón arenoso. Esqueleto conformado por piedras redondeadas muy escasas. Reacción muy fuerte a HCl 1 N y relación 1:4 y muy débil al H ₂ O ₂ .
C (k)	(83-X cm)	Horizonte petrocálcico ligeramente reblandecido.

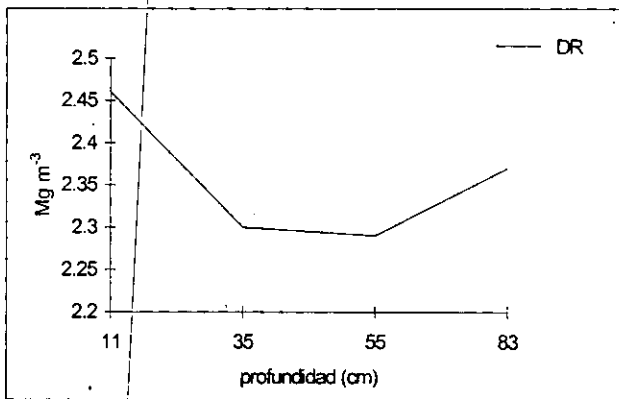
b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil 8

El color en seco es más oscuro en el primer subhorizonte aclarándose en los tres siguientes, va de pardo grisáceo (10 YR 5/2) a gris ligero (10 YR 7/2) en seco y de gris muy oscuro (10 YR 3/1) a pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo. Los valores de DA en los dos primeros subhorizontes son menores que los de los dos últimos subhorizontes y concuerda con los valores para

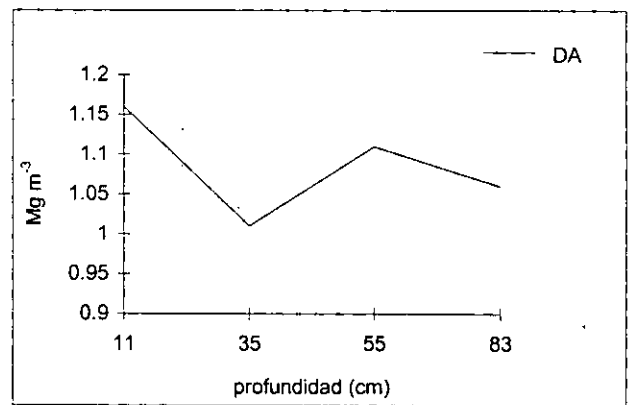
suelos minerales arcillosos en todo el perfil, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La DR parece descender con la profundidad pero en el último subhorizonte aumenta ligeramente, sus valores concuerdan con los registrados para minerales de arcilla [Porta *et al.*, *op. cit.*]. La porosidad tiene el mismo comportamiento de la DR, sus valores caen dentro del rango considerado normal, de acuerdo con Hillel, (*op. cit.*) (Tabla 26, gráficas 25 y 26).

Tabla 26.- Características físicas del perfil 970816-01, Lote 4794, municipio de Tepatepec, Hgo.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-11	10 YR 5/2	10 YR 3/1	1.13	2.46	54.06	22.4	34.4	43.2	F-a
Ap ₁₂	11-35	10 YR 6/1	10 YR 3/1	1.13	2.30	50.86	28.8	31.2	40.0	F-a
AC	35-55	10 YR 7/2	10 YR 3/2	1.18	2.29	48.47	42.4	30.4	27.2	F-a
C ₁	55-83	10 YR 7/2	10 YR 3/2	1.18	2.37	50.21	38.4	22.8	38.8	F

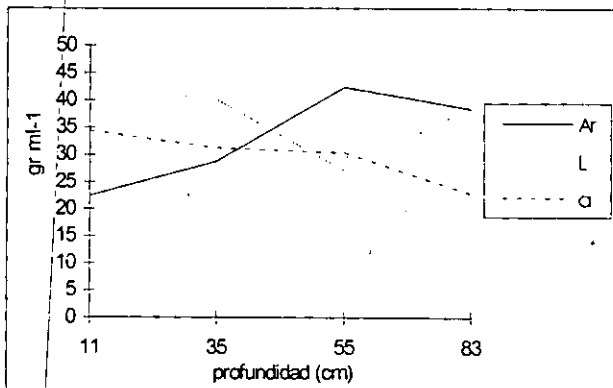


Gráfica 25.- Variación de la DR con la profundidad.



Gráfica 26.- Variación de la DA con la profundidad.

La fracción textural predominante en el perfil es el limo, la arcilla disminuye y la arena aumenta con la profundidad del suelo. La clase textural en los tres primeros subhorizontes es migajón arcilloso (F-a) y en el cuarto es franco (F), de acuerdo con Porta *et al.*, (*op. cit.*) (Tabla 26, gráfica 27).



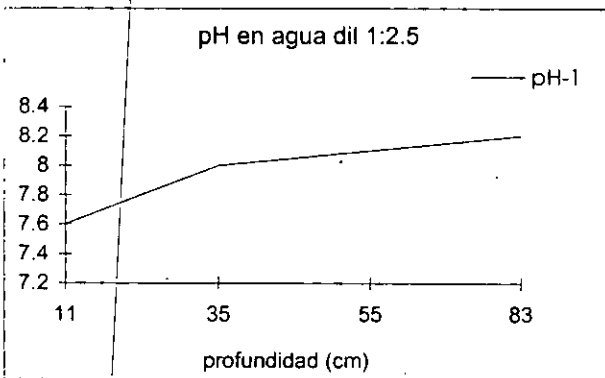
Gráfica 27.- Variación de los contenidos de arenas (Ar), arcillas (a) y limos (L) con la profundidad del perfil.

Los valores de pH en agua caen en el rango medianamente alcalino en todo el perfil (7.6 a 8.2), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]; en tanto que los de KCl son neutros en Ap₁₁ y en Ap₁₂ (6.7 a 7.3), medianamente básicos en Ap₁₂, en AC y en C₁ (7.6 a 7.7), y básicos en C₁ (8), de acuerdo con USDA en 1971 [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de pH en agua y KCl aumentan con la profundidad en ambas relaciones (Tabla 27 y grafica 28). Los contenidos de CaCO₃ caen en el rango de valores medios en Ap₁₁, Ap₁₂, AC y altos en C₁, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], dichos valores disminuyen con la profundidad del suelo (Tabla 27).

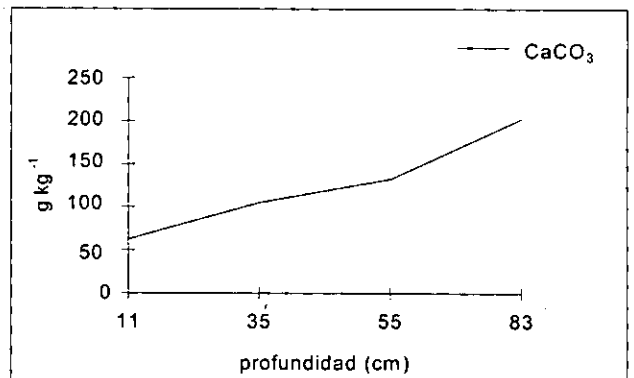
Tabla 27.- Características químicas del perfil 970816-01, Lote 4794, municipio de Tepatepec.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca ²⁺ / Mg	Ca ²⁺ / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-11	7.6	7.8	6.7	6.9	0.42	62.5	0.0	3.5	0.42	1.83	2.90	40.29	18	46.67	0.42	1.33	13.1
11-35	8.0	8.0	7.3	7.6	0.36	105.0	0.0	4.3	0.43	1.83	3.03	51.03	18	40.75	0.42	0.99	9.79
35-55	8.1	8.1	7.5	7.7	0.29	132.5	0.0	6.6	0.42	1.76	2.58	59.58	32.4	38.35	0.89	-	0.9
55-83	8.2	8.2	7.7	8.0	0.26	202.5	0.0	7.0	0.41	1.67	2.28	72.97	20.7	35.23	0.63	0.5	6.34

* de acuerdo a los valores estimados de Ca²⁺, Jackson (*op. cit.*)



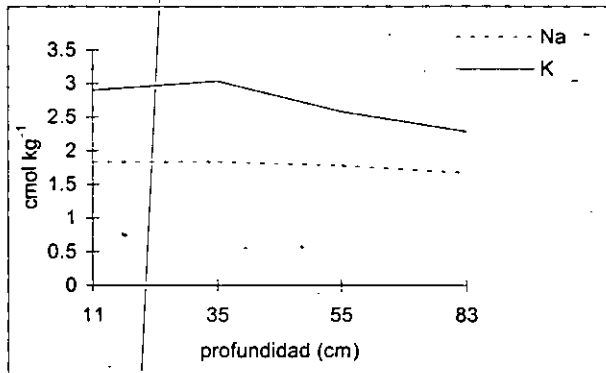
Gráfica 28.- Variación del pH en H₂O relación 1:2.5 con la profundidad del suelo en el perfil 8



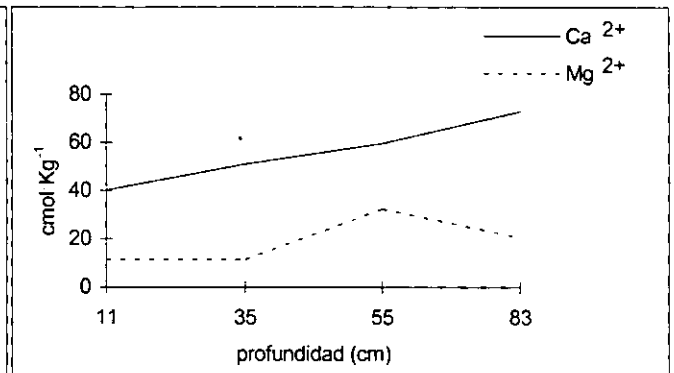
Gráfica 29.- Variación de los contenidos de CaCO₃ totales con la profundidad en el perfil 8.

Los contenidos de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ son altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación de proporción de los cationes intercambiables en este perfil es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> K⁺ > Na⁺, lo cual difiere de la mayoría de los perfiles. Los contenidos de Na⁺ y K⁺ disminuyen y los de Ca²⁺ y Mg²⁺ aumentan con la profundidad del suelo (Gráficas 30 y 31). La estimación de Ca²⁺ intercambiable es de 23.98, 17.93, 1.62, 10.6 cmol kg⁻¹ en los subhorizontes del perfil respectivamente, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*). Las relaciones Ca:Mg y Ca:Na, con base en la estimación de calcio, aumentan con la profundidad y son menores a 1 y 10, respectivamente; los valores del índice Mg-Na son variables y en AC y C son mayores a 0.5 (Tabla 27), estos valores indican una tendencia alta a la salinización, alcalinización y la inestabilidad de la estructura, de

acuerdo con Flores *et al.* (*op. cit.*).

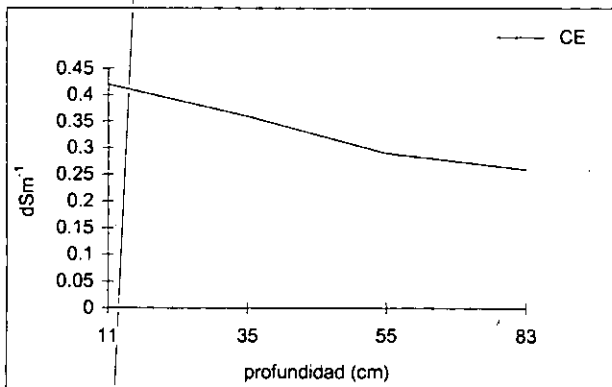


Gráfica 30.- Variación de los contenidos de Na⁺ y K⁺ intercambiables en el perfil 8.

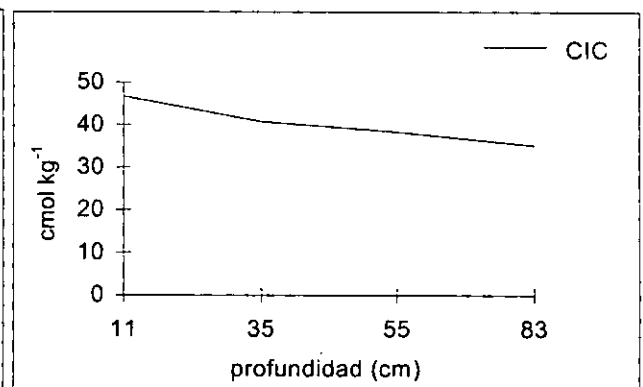


Gráfica 31.- Variación de los contenidos de Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables en el perfil 8.

Los contenidos de Na⁺ y K⁺ intercambiables coinciden con el comportamiento de la CE (*Tabla 27, gráficas 60 y 32*). De acuerdo con la NOM-021, la CE no tiene efectos considerables en la salinidad, los valores de CIC son muy altos en Ap₁₁ y Ap₁₂ y altos en AC y C₁ [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los valores de CIC disminuyen con la profundidad del suelo (*Tabla 27, gráfica 33*).



Gráfica 32.- Variación de los valores de CE con la profundidad del suelo, perfil 8

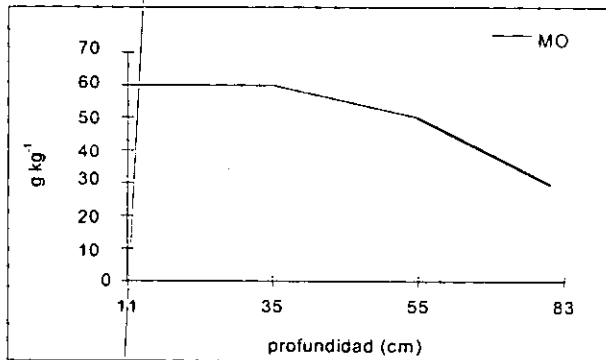


Gráfica 33.- Variación de los valores de CIC con la profundidad, perfil 8.

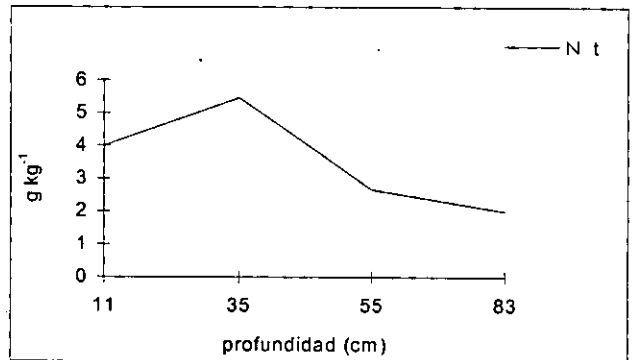
Tabla 28.- Características químicas del perfil 970816-01, lote 4794, municipio de Tepatepec (continuación).

Profundidad cm	g kg ⁻¹			C/N	mg kg ⁻¹	
	MO	C	N _t		NO ₃ ⁻	P
0-11	20.6	11.9	3.99	2.98	7.815	36.84
11-35	19.7	11.4	5.46	2.09	8.986	43.13
35-55	8.6	4.9	2.66	3.21	4.636	46.77
55-83	3.3	1.9	2.03	1.61	3.130	33.68

La MO presenta valores que disminuyen con la profundidad del suelo (Tabla 28, gráfica 34), los contenidos representan niveles medios en Ap₁₁ y Ap₁₂, bajos en AC y muy bajos en C, de acuerdo con Aguilera (op. cit.). Los contenidos de Nt disminuyen ligeramente con la profundidad del suelo (Gráfica 35), sus niveles se encuentran en un rango muy alto en Ap₁₁, Ap₁₂ y AC; y altos en C₁, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, op. cit.].

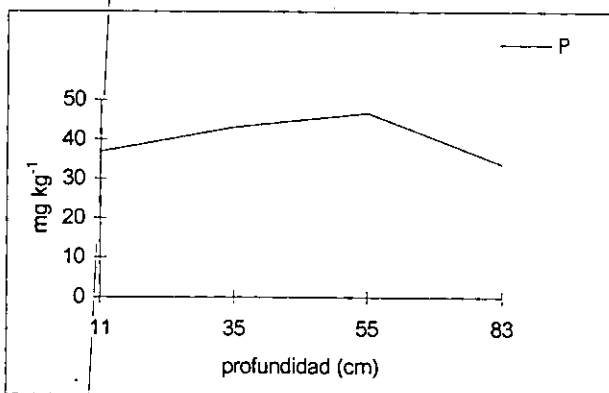


Gráfica 34.- Variación de los contenidos de MO con la profundidad del suelo en el perfil 8.

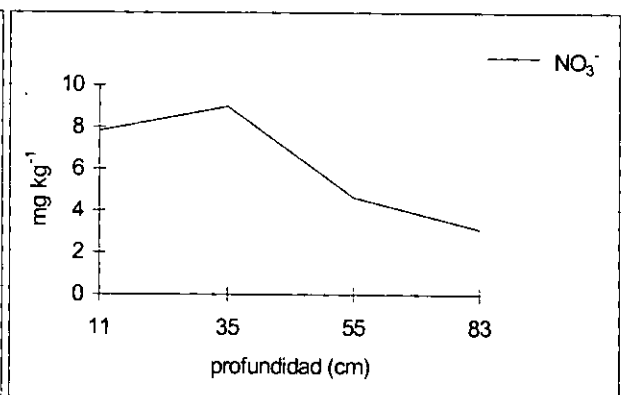


Gráfica 35.- Variación de los contenidos de Nt con la profundidad del suelo en el perfil 8.

Los valores de fósforo son altos y varían en el perfil teniendo la máxima en AC, los nitratos disminuyen ligeramente con la profundidad del suelo (Tabla 28, gráficas 36 y 37). El contenido de cloruros decrece muy ligeramente con la profundidad, no así los bicarbonatos que aumentan. No se registran carbonatos solubles (Tabla 27, gráficas 36 y 37).



Gráfica 36.- Variación de los contenidos de P asimilable con la profundidad del suelo en el perfil 8.



Gráfica 37.- Variación de los contenidos de NO₃⁻ con la profundidad del suelo, perfil 8.

c. Discusión de los resultados del perfil 8

Presenta un color más gris con respecto al perfil anterior, tanto en húmedo como en seco, aunque un poco atenuados por los CaCO_3 (Tablas 24 y 26). Este color puede deberse a la disminución del contenido de MO, con respecto al perfil 7 (Tablas 25 y 28), probablemente debido a su pérdida por el uso intensivo de la parcela o a que a esta distancia del trayecto de las aguas mezcladas la depositación de MOS soluble es menor (Mapa 5 y 8). Este suelo es muy similar a los perfiles 6 y 7, se halla cercano al perfil anterior dentro del Municipio de Tepatepec.

Los valores de DA y DR decrecen ligeramente con respecto al perfil 7 y 8, corroboran la presencia de arcillas más predominantes en porcentaje que en los perfiles anteriores debido a que se localiza a una altitud relativamente más baja siendo mayor su aporte. El porcentaje de poros decrece ligeramente con respecto al perfil anterior, aunque sus valores caen en rangos normales indicando una buena transmisión de fluidos, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*).

Los contenidos de arena son menores y los de limo al igual que los de arcilla aumentan, en comparación con los obtenidos en el perfil 7 (Tablas 23 y 26). Los mayores contenidos de arcilla promueven el intercambio catiónico, la retención de agua y la agregación de las partículas [Porta *et al.*, *op. cit.*], dada la ligera disminución de los contenidos de MO, en comparación con los obtenidos en el perfil 7 (Tablas 25 y 28).

La estructura tiene un desarrollo mayor a diferencia de los perfiles 6 y 7, la presencia de bloques subangulares de tamaño grueso y de moderado a fuerte desarrollo en el subhorizonte Ap_{11} a comparación de estructura granular en el perfil 6 y bloques subangulares de débil desarrollo en el perfil 7 (Morfología de perfiles 6, 7 y 8), debido al aumento en los contenidos de arcillas y de magnesio al ser un agente dispersor [Porta *et al.*, *op. cit.*; Russell, *op. cit.*].

Los valores medianamente alcalinos del pH están por arriba de los rangos de tolerancia para maíz, frijol y calabaza y se deben a los contenidos de CaCO_3 y MgCO_3 , aunque disminuyen ligeramente con respecto a los valores de pH del perfil anterior (Tablas 24 y 27). La disponibilidad de algunos micronutrientes para su absorción por las plantas es menor debido a su precipitación bajo este medio alcalino, de acuerdo con Russell (*op. cit.*). La capacidad de sustitución del Ca^{2+} facilita la

movilidad del Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , lo cual eleva el porcentaje de saturación de bases del perfil. El contenido de Mg^{2+} intercambiable es mucho más alto que el registrado en el perfil anterior y su concentración incrementa con la profundidad, lo que puede deberse a su grado de lixiviación, junto con el sodio intercambiable que decrece en relación con el perfil anterior. El índice Mg-Na muestra una tendencia hacia la inestabilidad de la estructura, junto con las relaciones Ca:Mg y Ca:Na que indican una fuerte tendencia hacia la salinización y alcalinización, incluso mayor a la registrada en el perfil 3 (*Tablas 24 y 27*). Sin embargo, los valores de CE, pH y Na intercambiable no representan problemas de salinidad y sodicidad, de acuerdo con Aguilera (*op. cit.*) y Porta *et al.* (*op. cit.*).

Los contenidos de MO del perfil decrecen con respecto al perfil 7 (*Tablas 25 y 28*), la incorporación de C al suelo es menor, probablemente debido a la pérdida de MO por el uso intensivo de la parcela o a la baja depositación de MO por la distancia que recorren las aguas mezcladas (*Mapa 5 y 8*). La relación C:N es muy baja con respecto a la relación óptima (12), los altos contenidos de Nt indican que hay un acarreo de compuestos solubles de nitrógeno desde otras zonas de riego, ya que este perfil se ubica cerca del dren natural de la zona (*Mapa 3 y 5*).

Los valores de CIC indican una fertilidad alta, junto con los valores registrados de MO, bases intercambiables, P asimilable y Nt. El comportamiento de la CIC coincide con la disminución en los contenidos de MO y de arcillas con la profundidad del suelo, aunque aumenta comparativamente respecto al perfil anterior debido al aumento de los contenidos de arcilla (*Tablas 23 y 26*).

Las concentraciones de nitratos y fósforo son similares a los registrados en el perfil 7, la cantidad de nitratos y de fósforo es también mayor a la presente en el perfil 3, el cual es regado con aguas negras desde hace 46 años (*Tablas 13, 25 y 28*), lo que coincide con el transporte de estos compuestos hacia la zona de dren desde otras áreas de riego (*Mapa 3 y 5*).

d. Clasificación del Perfil 8

El proceso dominante es la acumulación de MO, agregación y estructuración del suelo sobre un material calcáreo fuertemente alterado. En este suelo hay un enriquecimiento de arcillas debido a la posición del terreno, al igual que de MO debido al riego con agua residual, lo que hace que los agregados tengan una estabilidad estructural mayor. Los horizontes de diagnóstico que presenta el perfil son: un epipedón mólico dado por la estructura, color, porcentaje de saturación de bases y contenido de MO en el subhorizonte Ap₁₁ y Ap₁₂, y un horizonte petrocálcico como horizonte genético C(k) a los 83 cm de profundidad. Las características de diagnóstico observables son: suelo calcárico dados los contenidos de CaCO₃ y un régimen de humedad ústico limitrofe con arídico.

Perfil No. 8, localidad: Tepatepec, Clave 970816-01.

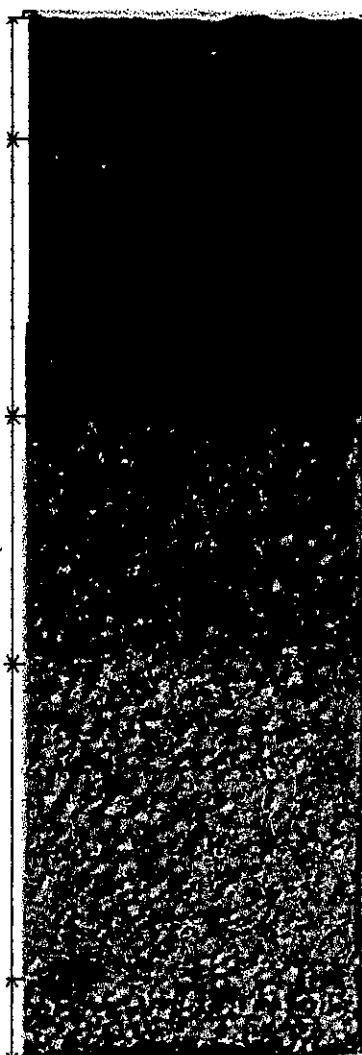
Ap₁₁ (0-11 cm)
Ligeramente húmedo de separación abrupta de forma plana. Orla en seco y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo. Estructura de bloques subangulares y granular de desmenuamiento moderado y de tamaño fino y medio.

Ap₁₂ (11-35 cm)
Pardo grisáceo oscuro en seco pardo grisáceo muy oscuro en húmedo. Bloques subangulares de tamaño grueso de fuerte desmenuamiento, poros finos escasos. Consistencia firme, adhesividad y plasticidad moderadas.

AC (35-55 cm)
Pardo en seco y pardo oscuro en húmedo. Bloques subangulares medianos, moderados, poros finos abundantes. Consistencia friable en húmedo, poco adhesivo y plástico.

C₁ (55-83 cm)
Poros finos y esponjosos abundantes y escasos respectivamente. Pardo en seco y pardo amarillento en húmedo. Consistencia friable en húmedo, adhesividad y plasticidad ligeras.

C (k)



poros finos escasos. Consistencia blanda en seco y friable en húmedo, adhesividad y plasticidad ligeras. Textura al tacto migajón limoso. Reacción muy débil al HCl y débil al H₂O₂. Raíces finas y gruesas escasas.

Textura al tacto migajón limoso. Reacción débil al HCl y débil al H₂O₂. Raíces finas y medias escasas, separación abrupta de forma plana.

Migajón arenolimoso. Reacción muy fuerte al HCl 1 N y muy débil al H₂O₂. Raíces finas y medias escasas. Separación abrupta en forma de lenguas.

Migajón arenoso. Esqueleto de piedras redondeadas muy escasas. Reacción muy fuerte al HCl y muy débil al H₂O₂.

Clasificación
FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Phaeozem
Unidad: Calcaric Phaeozem
Subunidad: *Eutri-Petri Calcaric Phaeozem*

Clasificación USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calciustoll
Subgrupo: *Petrocalcic Calciustoll*

Figura 11.- Monolito del Perfil 8, localidad lote 4794, municipio de Tepatepec, Hidalgo.

50 años de riego con aguas mezcladas. Ubicación: 20° 15' 41.4" L.N., 99° 6' 43.2" L.O. 1990 msnm. Grupo: Phaeozem, Unidad: Calcaric Phaeozem, Sub-unidad: Eutri-Petri Calcaric Phaeozem.

I. Perfil No. 9, localidad: La olla de Motovatha, clave: 980531-01.

Se ubica a 20° 11' 11.35" Latitud Norte y 99° 12' 31.71" Longitud Oeste, a una altura de 2000-msnm.

La parcela tiene riego con aguas negras desde hace 80 años según la CNA. El suelo limita a 98 cm de profundidad con material calcáreo indurado, tiene drenaje moderado.

a. Morfología del perfil No. 9

Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-10 cm)	Seco, separación gradual de forma horizontal. Color gris oscuro en seco (10YR 4/1) y negro en húmedo (10YR2/1). Estructura granular tamaño fino y medio, moderado desarrollo. Poros finos cantidad moderada. Consistencia dura en seco y muy firme en húmedo. Fuertemente adhesivo y fuertemente plástico. Textura arcilla. Esqueleto conformado por gravas subangulares escasas. Raíces finas frecuentes. Reacción moderada al H ₂ O ₂ 8% y muy débil al HCl 1N y dilución 1:4; pH de 7.
Ap ₁₂	(10-32 cm)	Ligeramente húmedo, transición gradual de forma horizontal. Color negro en húmedo (10YR2/1). Estructura de poliedros subangulares, tamaño medio y desarrollo moderado. Poros finos escasos. Consistencia muy dura en seco y muy firme en húmedo. Fuertemente adhesivo y fuertemente plástico. Textura arcilla. Esqueleto conformado por gravas subangulares muy escasas. Raíces escasas finas. Reacción moderada al H ₂ O ₂ 8% y al HCl 1N y dilución 1:4, pH de 7.
AB	(32-43 cm)	Húmedo, transición gradual de forma horizontal. Color negro en húmedo (10YR2/1). Estructura de poliedros subangulares desarrollados, tamaño medio y grande. Consistencia muy firme en húmedo. Fuertemente adhesivo y fuertemente plástico. Textura arcilla. No presenta gravas ni gravillas. Policromía ligera, manchas blancas y naranjas. Reacción moderada al HCl 1N y dilución 1:4, débil al H ₂ O ₂ .
B	(43-76 cm)	Húmedo, transición clara de forma horizontal. Color pardo muy oscuro en húmedo (10YR2/2). Estructura de bloques angulares, tamaño medio y desarrollo fuerte (láminas de arcilla sobre la superficie de agregados). Escasos poros finos. Consistencia firme en húmedo. Fuertemente adhesivo y plástico. Textura arcilla. Policromía por drenaje interno. Raíces muy finas escasas. Reacción moderada al HCl 1N y dilución 1:4 y débil al H ₂ O ₂ , pH de 7.
BC	(76-98 cm)	Ligeramente húmedo, transición clara horizontal. Color pardo muy oscuro en húmedo (10YR2/2). Estructura de bloques angulares, tamaño medio y grandes, moderado desarrollo. Poros finos moderados. Consistencia firme en húmedo. Adhesivo y plástico. Textura arcilla. Reacción débil al HCl 1N y dilución 1:4, y muy débil al H ₂ O ₂ .
C (k)	(98-X cm)	Horizonte petrocálcico

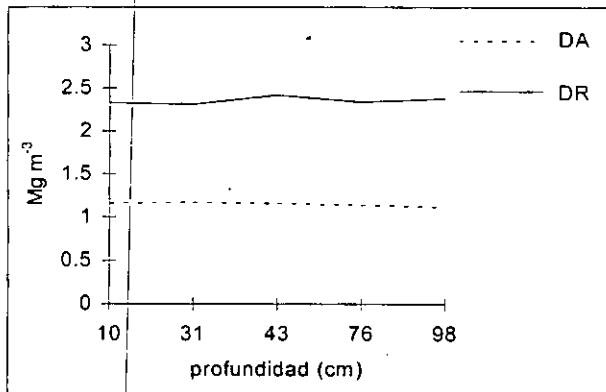
b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil 9

El color varía con la profundidad del suelo de gris oscuro (10 YR 4/1) a gris (10 YR 5/1) en seco y de negro (10 YR 2/1) a gris muy oscuro (10 YR 3/1) en húmedo (*Tabla 29*).

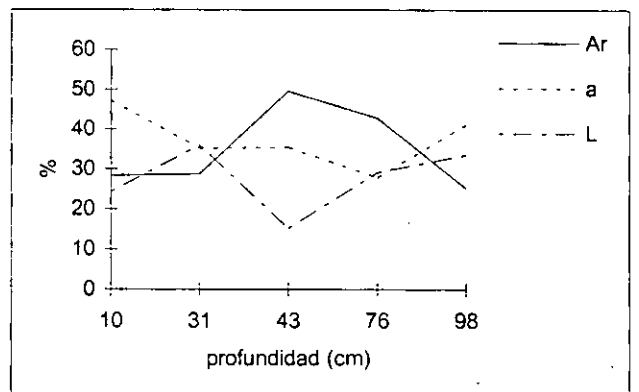
Tabla 29.- Características físicas del perfil 980531-01, La Olla de Motovatha, Mixquiahuala.

	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-10	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.16	2.33	50.2	28.4	40.2	31.4	aL
Ap ₁₂	10-31	10 YR 5/1	10 YR 2/1	1.17	2.31	49.35	22.8	41.2	36.0	aL
AB	31-43	10 YR 5/1	10 YR 2/1	1.16	2.42	52.06	18.4	42.0	39.6	aL
B	43-76	10 YR 5/1	10 YR 3/1	1.14	2.34	51.28	14.4	48.0	37.6	aL
BC	76-98	10 YR 5/1	10 YR 3/1	1.12	2.38	52.94	25.2	41.2	33.6	aL

La DA decrece con la profundidad del suelo (*Gráfica 38*), sus valores coinciden con los registrados para suelos minerales arcillosos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La DR es ligeramente variable (*Tabla 29*), sus mayores valores se registran en AB y BC y coinciden con el rango de valores más frecuentes para minerales de arcilla, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). La porosidad es ligeramente variable en el perfil y registra cierta tendencia creciente con la profundidad, sus valores caen en el rango normal, de acuerdo con Hillel (*op. cit.*). La fracción textural predominante es la arcilla, le sigue el limo y finalmente la arena, la clase textural corresponde a arcilla limosa (aL), de acuerdo con Tamhane *et al.* (1978).



Gráfica 38.- Variación de la DA y DR con la profundidad del suelo en el Perfil 9.



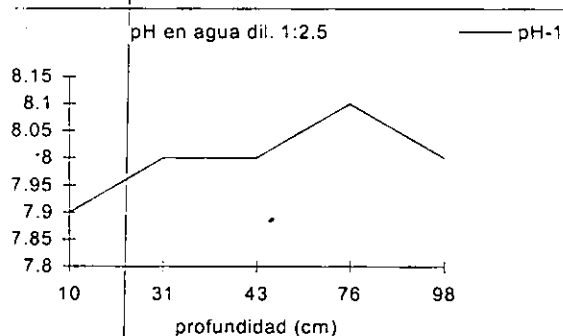
Gráfica 39.- Variación de los contenidos de arena (Ar), arcilla (a) y limo (L) con la profundidad en el perfil 9.

Los valores de pH en agua en ambas relaciones aumentan ligeramente con la profundidad (*Gráfica 40*), sus valores son medianamente alcalinos (7.9 a 8.0), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los valores en KCl se mantienen constantes en el rango neutro, de acuerdo con USDA 1971 [Porta *et al.*, *op. cit.*]. El contenido de CaCO₃ total aumenta con la profundidad (*Gráfica 41*), sus contenidos son medios, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (*Tabla 30*).

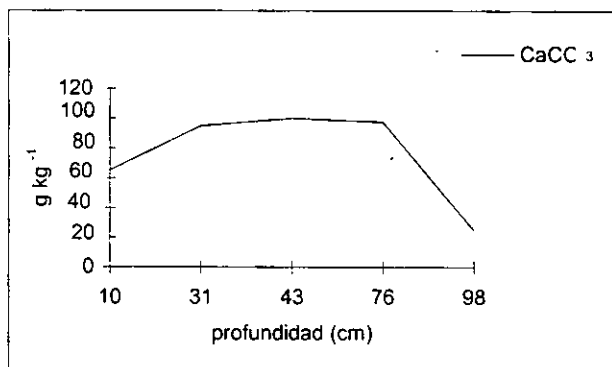
Tabla 30.- Características químicas del perfil 980531-01, La Olla de Motovatha, Mixquiahuala.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca / Mg	Ca / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5	cmol kg ⁻¹												
0-10	7.9	7.9	7.2	7.2	0.34	65	0.0	3.6	0.42	1.87	3.29	27.68	21.7	31.9	0.74	0.23	2.67
10-31	8.0	8.0	7.2	7.2	0.26	95	0.0	3.7	0.36	2.06	2.9	28.09	24.1	46.56	0.56	0.73	8.51
31-43	8.0	8.0	7.3	7.3	0.26	97.5	0.4	3.7	0.36	2.06	2.46	34.01	25.5	46.50	0.58	0.51	8.48
43-76	8.1	8.1	7.2	7.2	0.29	100	0.0	4.4	0.32	1.98	1.24	38.22	34.0	40.95	0.9	0.11	1.89
76-98	8.0	8.0	7.2	7.2	0.28	125	0.0	4.1	0.37	2.29	2.70	37.54	33.2	43.36	0.88	0.15	2.18

* de acuerdo a los valores estimados de Ca²⁺, Jackson (*op. cit.*)

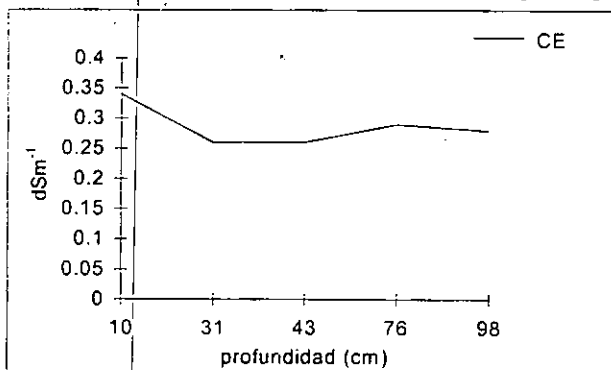


Gráfica 40.- Variación de los valores de pH en H₂O (dilución 1:2.5) con la profundidad en el perfil 9.

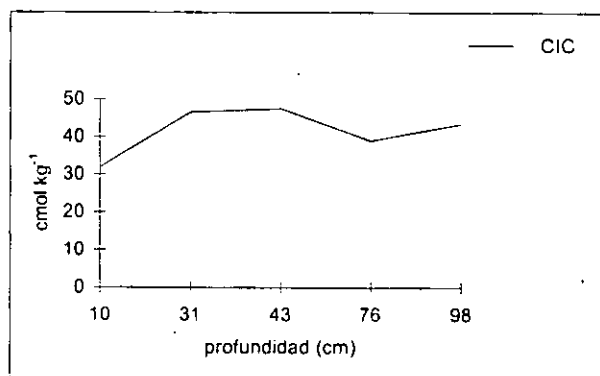


Gráfica 41.- Variación de los contenidos de CaCO₃ con la profundidad del suelo en el perfil 9.

Los valores de CE disminuyen ligeramente con la profundidad del suelo. Los valores de CIC son ligeramente variables, aunque aumentan ligeramente con la profundidad del suelo (*Tabla 30, gráficas 42 y 43*). Los valores de CIC son altos y los valores de CE no representan problemas de salinidad, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*].



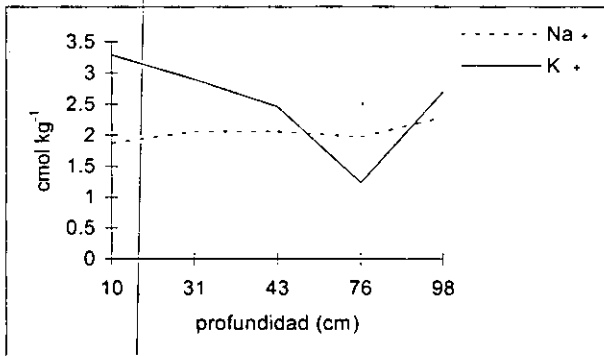
Gráfica 42.- Variación de los valores de CE con la profundidad del suelo en el perfil 9.



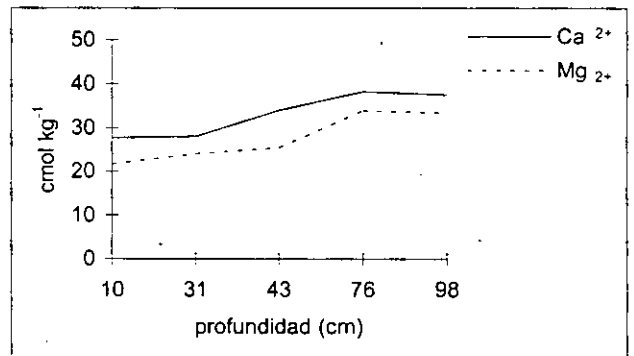
Gráfica 43.- Variación de los valores de la CIC con la profundidad del suelo en el perfil 9.

De acuerdo con Jackson (*op. cit.*), la estimación de Ca²⁺ intercambiable es de 5, 17.53, 17.47, 3.75 y 4.99 cmol kg⁻¹ en Ap₁₁, Ap₁₂, AB, B y BC, respectivamente. La relación de proporción de los cationes intercambiables en el perfil es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> K⁺ > Na⁺, aunque en BC es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> Na⁺ > K⁺ (*Tabla 30*). Los valores de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ son altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op.*

cit.]. El K^+ decrece con la profundidad en tanto que el Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} aumentan ligeramente (Gráficas 44 y 45). De acuerdo con los valores estimados de Ca^{2+} , las relaciones Ca:Mg y Ca:Na son menores a 1 y 10 respectivamente y el índice Mg-Na está por arriba de 0.5 en todo el perfil, lo que señala una estabilidad estructural no adecuada y tendencias de alcalinización y salinización (Tabla 30) [Flores et al., op. cit.].



Gráfica 44.- Variación de los contenidos de Na^+ y K^+ intercambiables con la profundidad en el Perfil 9.

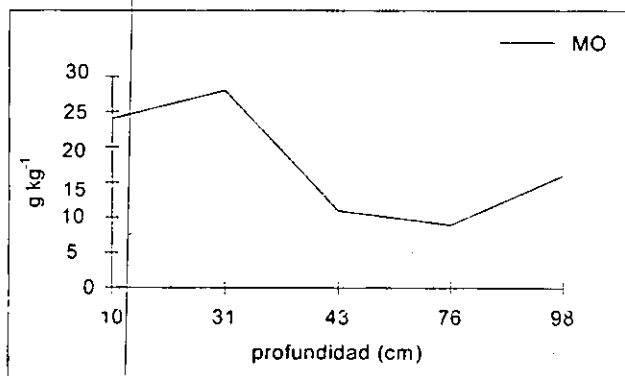


Gráfica 45.- Variación de los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables con la profundidad en el perfil 9.

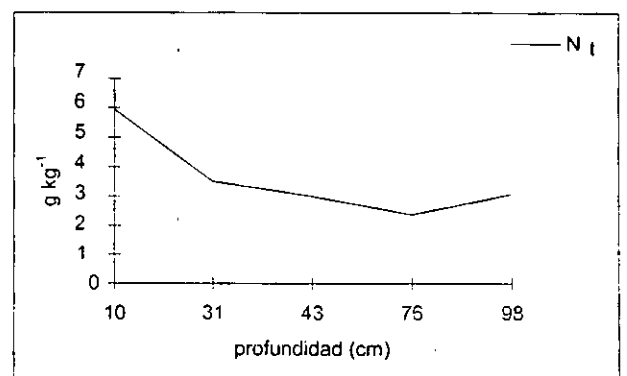
El contenido de MO disminuye con la profundidad del suelo (Gráfica 46), dichos valores son medios en Ap_{11} y Ap_{12} y bajos en AB, B, y BC (Tabla 31), de acuerdo con Aguilera (op. cit.). El N_t también tiene un comportamiento decreciente (Gráfica 47). Los contenidos de N_t son muy altos de los 0-43 cm de profundidad y altos de los 43-98 cm, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, op. cit.].

Tabla 31.- Características químicas del perfil 980531-01, La Olla de Motovatha, Mixquiahuala.

Profundidad cm	MO	C	N_t	C/N	NO_3^-	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-10	24	14	5.95	2.35	11.304	41.09
10-31	28	16	3.50	4.57	3.447	42.81
31-43	11	6	3.01	1.99	1.978	43.92
43-76	9	5	2.38	2.1	2.342	41.62
76-98	6	3	3.08	2.92	2.146	39.88

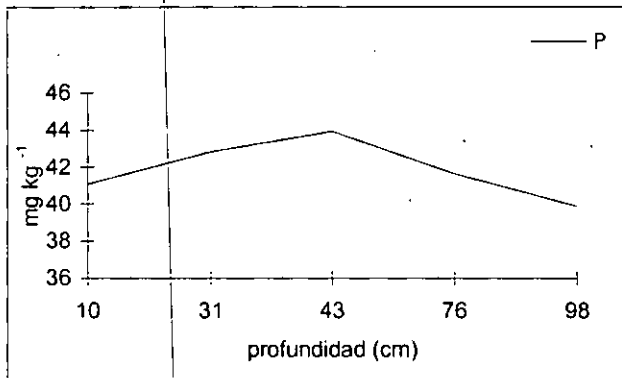


Gráfica 46.- Variación de los contenidos de MO con la profundidad del suelo en el perfil 9.

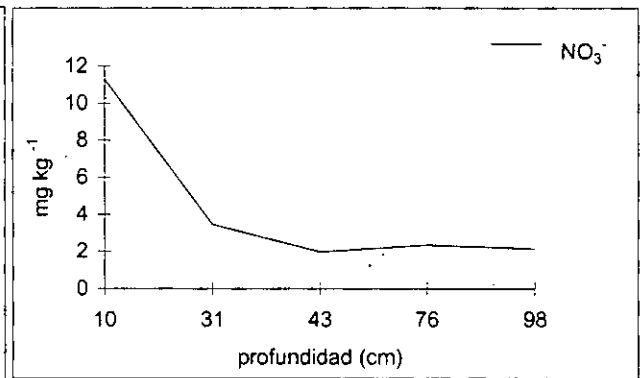


Gráfica 47.- Variación de los contenidos de N_t con la profundidad del suelo en el Perfil 9.

Los contenidos de P asimilable decrecen ligeramente con la profundidad del suelo (*Gráfica 48*) y son altos de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los NO_3^- decrecen con la profundidad del suelo (*Gráfica 49*). El contenido de cloruros decrece ligeramente con la profundidad, contrario al comportamiento de los HCO_3^- solubles; no se registra la presencia de CO_3^{2-} solubles a excepción del subhorizonte AB (*Tabla 30*).



Gráfica 48.- Variación de los contenidos de P asimilable con la profundidad del perfil 9.



Gráfica 49.- Variación de los contenidos de Nt con la profundidad del suelo en el perfil 9.

c. Discusión de los resultados del perfil 9

El color del suelo en este perfil está relacionado con los contenidos de MO, aunque este suelo tiene buenos contenidos de MO, su color probablemente está más relacionado a la influencia de las partículas aportadas por las aguas residuales. Este suelo ha sido regado desde hace 80 años con aguas negras, al igual que el perfil 8, presenta tonos más grises tanto en húmedo como en seco un poco atenuados por la presencia de CaCO_3 (*Tablas 26 y 29*).

Los valores de DA y DR decrecen ligeramente en comparación con los registrados en el perfil 7 y 8 y coinciden con un mayor contenido de arcillas, en comparación con los perfiles anteriores (*Tablas 23, 26 y 29*). El porcentaje de poros decrece ligeramente con respecto al perfil anterior, aunque sus valores caen en rangos normales indicando una buena transmisión de fluidos, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). La aireación y el drenaje promueven los procesos de acidificación del suelo mediante la respiración radicular y el lavado de CaCO_3 , como se observa al comparar los valores obtenidos con los registrados en los perfiles 7 y 8, donde los valores de CaCO_3 , Ca^{2+} , y HCO_3^- son mayores (*Tablas 24, 27 y 30*).

Los contenidos de arena son menores a los registrados en los perfiles 7 y 8, los de arcilla al igual que los de limo aumentan (*Tablas 23, 26 y 29*), estos contenidos de arcilla promueven el aumento en la CIC, la retención de agua y la agregación de las partículas, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). El Mg^{2+}

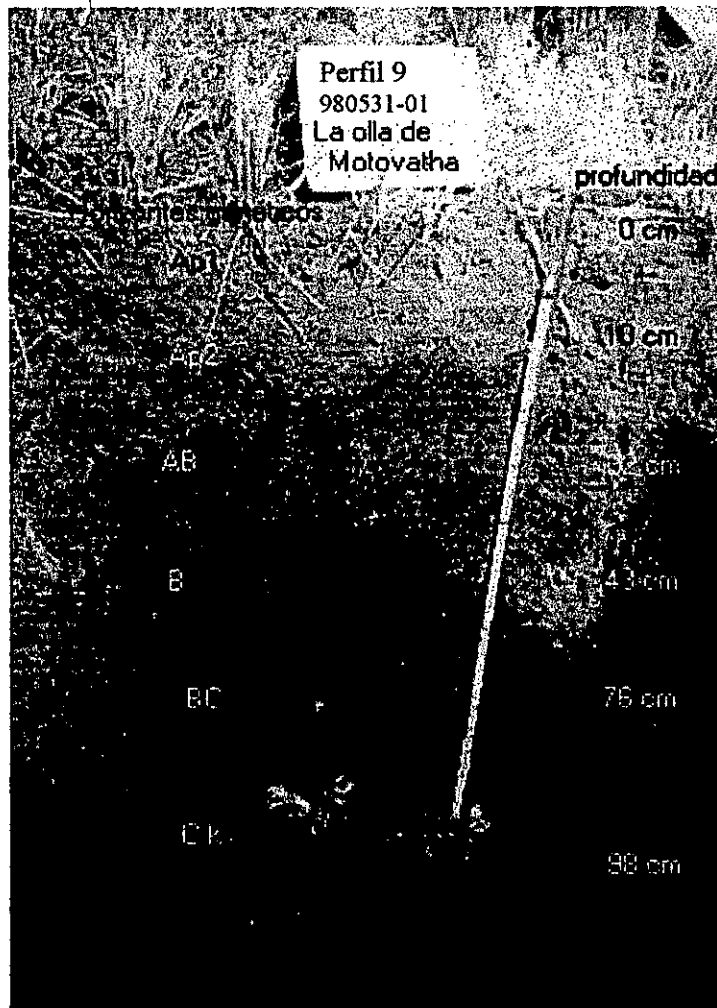
intercambiable es el catión predominante dejando atrás al Ca^{2+} en este perfil, en comparación con el perfil 8 (Tablas 24, 27 y 30). En el suelo se observa un desarrollo moderado en los bloques subangulares en Ap_{12} y un índice Mg-Na elevado en el suelo [Flores *et al.*, *op. cit.*], que se deben a la disminución de Ca^{2+} intercambiable, el aumento de arcilla y Mg^{2+} intercambiable en el perfil en comparación con los contenidos en los perfiles 7 y 8, ya que la agregación de las partículas de arcilla es menor cuando aumentan los contenidos de Mg, debido a su actividad dispersante, con lo que la estructura del suelo se ve modificada [Porta *et al.*, *op. cit.*; Russell, *op. cit.*].

Los valores de pH en agua, están arriba del rango óptimo y de tolerancia para un rendimiento satisfactorio para el maíz [Porta *et al.*, *op. cit.*], son debidos a la formación de CaCO_3 y MgCO_3 . De acuerdo con Russell (*op. cit.*), ante los valores registrados de pH puede haber una mayor movilidad de ciertos elementos tóxicos adsorbidos en la MO que son aportados por el agua residual. Los contenidos de Na^+ , K^- y Mg^{2+} aumentan con respecto a los valores del perfil 8 (Tablas 24, 27 y 30). Los contenidos de magnesio incrementan con la profundidad lo que puede deberse a su grado de lixiviación, junto con el sodio intercambiable, aumentan la tendencia hacia la salinización y alcalinización del suelo, al observarse las relaciones Ca:Mg, Ca:Na. Sin embargo, los valores de CE, Na^+ intercambiable y pH, señalan que no hay problemas de salinidad y sodicidad, de acuerdo con Aguilera (*op. cit.*) y Porta *et al.* (*op. cit.*). Los valores de CE no rebasan el umbral de tolerancia para maíz, de acuerdo con Young (*op. cit.*), y ciertos valores de CE decrecen con respecto a los registrados en el perfil 8 (Tablas 27 y 30).

Los contenidos de MO del perfil aumentan con respecto los valores obtenidos en el perfil 8 (Tablas 28 y 31), debido a su aporte mayor por las aguas negras en comparación con las aguas mezcladas y grises (Mapa 5 y 8). La incorporación de MO derivada de las aguas residuales incluye materiales xenobióticos que pueden participar en la CIC, en la regulación del pH y en la adsorción de metales pesados en función de su calidad [Tate, *op. cit.*]. La relación C:N no cae en el rango satisfactorio (10 a 12), siendo muy bajos, aunque aumentan en el subhorizonte AC, estos valores se deben al aporte de N que aumenta a diferencia del perfil 8 debido al riego con aguas negras. Los niveles de Nt son similares a los del perfil 3 que tiene 50 años de riego con aguas negras. Los contenidos de P asimilable y NO_3^- son mayores a los del perfil 3, lo cual puede deberse al tiempo de riego que tiene cada parcela, el P tiene una disponibilidad ligeramente mayor debido al pH del perfil. La fertilidad es mayor que la del perfil anterior dada por los valores de CIC y por las proporciones de N, P, K, incluso puede haber mayor disponibilidad y absorción de oligoelementos esenciales y de fosfatos, nitratos y cloruros por las plantas, de acuerdo con Russell (*op. cit.*).

d. Clasificación del perfil 9

En este perfil el proceso dominante es la acumulación de MO, arcillas y limo, la agregación y estructuración del suelo con una cementación de CaCO_3 a 1 m de profundidad. Ha ocurrido una fuerte alteración del horizonte petrocálcico y un enriquecimiento de Mg^{2+} , K^+ , Nt, P y MO debido al manejo del terreno y al riego con agua residual, el suelo muestra fuertes tendencias de salinización y alcalinización debido a los contenidos de Na^+ y Mg^{2+} que presenta. Los horizontes de diagnóstico observados son: un epipedón mólico, dado por la estructura y el color, y un horizonte petrocálcico como horizonte genético C(k). Las características de diagnóstico observadas son: suelo calcárico, debido a los contenidos de CaCO_3 , y régimen de humedad ústico limítrofe con arídico.



Clasificación
FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Phaeozem
Unidad: Calcaric Phaeozem
Subunidad: *Eutri-Petri*
Calcaric Phaeozem

USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calciustoll
Subgrupo: *Petrocalcic*
Calciustoll

Figura 12.- Perfil 9, localidad la Olla de Motovatha, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

J. Perfil No. 10, localidad: Colonia Veracruz, clave: 980530-02.

Se localiza a 20° 15 ' 40.54" Latitud Norte y 99° 8' 13.71" Longitud Oeste a 1995 msnm. El suelo tiene 40 cm de profundidad efectiva, limita con material parental de origen calcáreo, tiene cincuenta años de riego con aguas residuales con drenaje moderado.

a. Morfología del perfil No. 10.

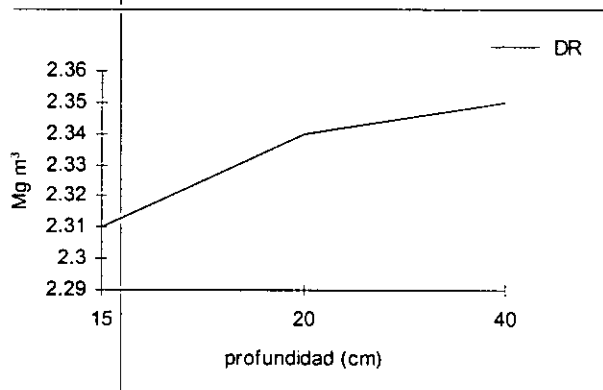
Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-15 cm)	Ligeramente húmedo, separación clara horizontal. Color gris oscuro en seco (10YR 4/1) y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR3/2). Estructura de poliedros subangulares, tamaño medio y fuerte desarrollo. Poros finos escasos. Consistencia suelta en seco y muy friable en húmedo. Adhesividad y plasticidad ligeras. Textura migajón arcillo-limoso. Esqueleto conformado por gravas, guijarros y piedras subangulares, muy escasos. Raíces finas y medianas escasas. Reacción de moderada al H ₂ O ₂ y débil al HCl 1N y dilución 1:4. pH de 6.
Ap ₁₂	(15-20 cm)	Ligeramente húmedo, separación clara ondulada. Color gris oscuro en seco (10YR 4/1) y negro en húmedo (10YR2/1). Estructura de bloques subangulares, tamaño medio y moderado desarrollo. Abundantes poros finos. Consistencia blanda en seco y firme en húmedo. Ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Textura migajón arcilloso. Esqueleto conformado por escasas gravas de forma angular. Raíces finas escasas. Reacción moderada al HCl 1N y dilución 1:4, débil al H ₂ O ₂ , hay presencia de cloruros.
BC	(20-40 cm)	Ligeramente húmedo. Color gris oscuro en seco (10YR 4/1) y negro en húmedo (10YR2/1). Estructura de poliedros subangulares medianos y gruesos, moderadamente desarrollados. Abundantes poros finos. Consistencia blanda en seco y friable en húmedo. Muy adhesivo y muy plástico. Textura arcillosa. Esqueleto conformado por gravas escasas de forma angular y subangular, escasos guijarros angulares. Raíces finas escasas. Reacción débil a HCl 1N, HCl dilución 1:4 y a H ₂ O ₂ .
C (k)		Horizonte Petrocálcico.

b. Resultados de los análisis físicos y químicos del perfil 10.

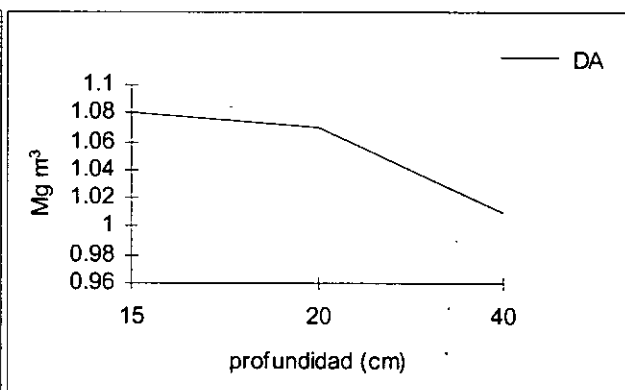
El color no vario con la profundidad del suelo, es gris oscuro en seco (10 YR 4/1) y negro (10 YR 2/1) en húmedo (Tabla 32). La DA decrece ligeramente con la profundidad (Gráfica 51); sus valores coinciden con los más frecuentes para suelos minerales arcillosos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Los valores de DR coinciden con los más frecuentes para minerales de arcilla, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*), e incrementan ligeramente con la profundidad (Gráfica 50). El porcentaje de poros cae dentro del rango normal, de acuerdo con Hillel (*op. cit.*). (Tabla 32).

Tabla 32.- Características físicas del perfil 980530-02, Colonia Veracruz, Mixquiahuala.

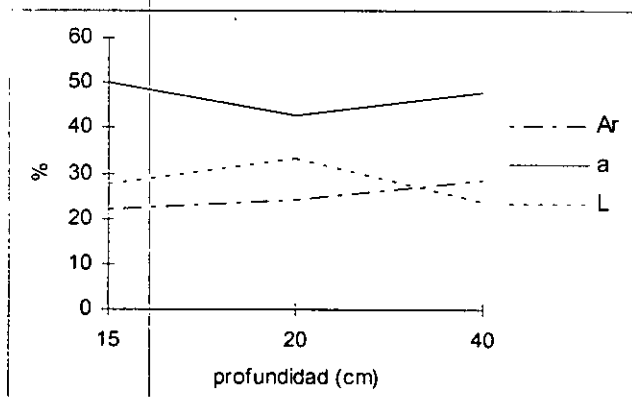
	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-15	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.08	2.31	53	22	50.2	27.8	a
Ap ₁₂	15-20	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.07	2.34	54	24	43	33	a
BC	20-40	10 YR 4/1	10 YR 2/1	1.01	2.35	57	28.4	48	23.6	a



Gráfica 50.- Variación de la DR con la profundidad del suelo en el perfil 10.



Gráfica 51.- Variación de la DA con la profundidad del suelo en el perfil 10.



Gráfica 52.- Variación de los contenidos de arenas (Ar), arcillas (a) y limos (L).

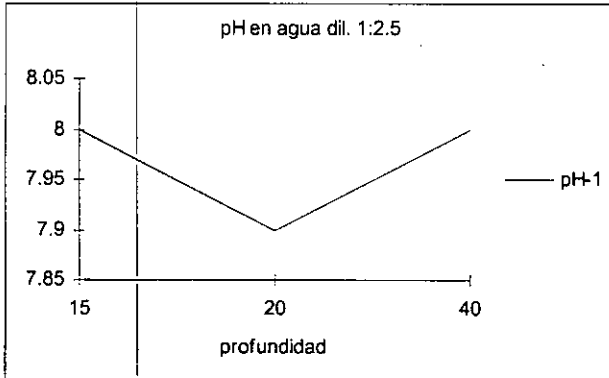
La fracción textural predominante en todo el perfil es la arcilla, enseguida el limo y finalmente la arena. La clase textural es arcilla limosa (aL), de acuerdo con Tamhane (*op. cit.*). La arena aumenta ligeramente con la profundidad del suelo, mientras que la arcilla y el limo disminuyen (Gráfica 52).

En promedio los valores de pH en agua en ambas relaciones se mantiene en 8 y se consideran medianamente alcalinos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (Gráfica 53); en tanto el pH en KCl en promedio es de 7.1 en la relación 1:2.5 y en 7.2 en la relación 1:5, sus valores son neutros, de acuerdo con USDA, 1971 [Porta *et al.*, *op. cit.*] (Tabla 33). La CIC tiene un comportamiento variable con la profundidad del suelo (Gráfica 54); sus valores muy altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (Tabla 33).

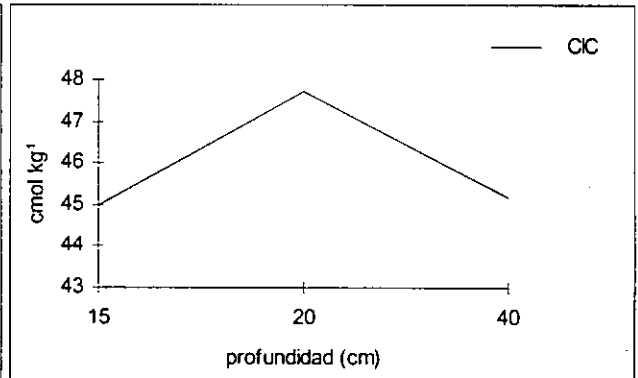
Tabla 33.- Características químicas del perfil 980530-02 Colonia Veracruz, Mixquiahuala.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca / Mg	Ca / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-15	8.0	8.0	7.2	7.2	0.32	82.5	0.0	4.0	0.33	2.29	0.91	40.18	7.40	44.97	0.21	4.64	15.0
15-20	7.9	7.9	7.1	7.1	0.28	87.5	0.0	4.3	0.37	2.21	2.16	41.80	9.40	47.71	0.24	3.61	15.4
20-40	8.0	8.0	7.1	7.2	0.31	77.5	0.0	8.5	0.43	1.98	1.34	40.41	10.5	45.19	0.27	2.97	15.8

* de acuerdo a los valores estimados de Ca²⁺, Jackson (*op. cit.*)



Gráfica 53.- Variación del pH en agua en dilución 1:2.5 con la profundidad del suelo en el perfil 10.



Gráfica 54.- Variación de la CIC con la profundidad del suelo en el perfil 10.

Los valores de CE decrecen ligeramente con la profundidad (*Gráfica 55*). Los valores de CaCO₃ presentan una ligera disminución con la profundidad del perfil (*Gráfica 56*). De acuerdo con la NOM-021, los contenidos de CaCO₃ son medios y los valores de CE indican baja salinidad (*Tabla 33*)

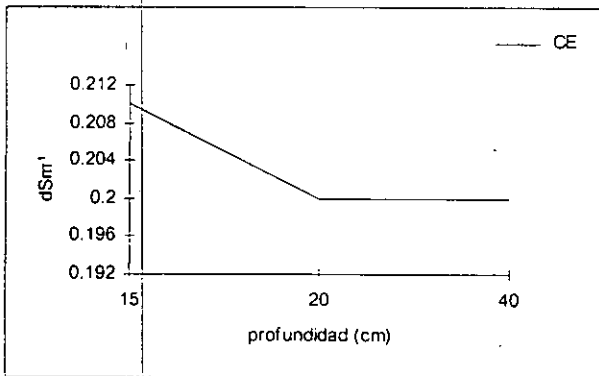
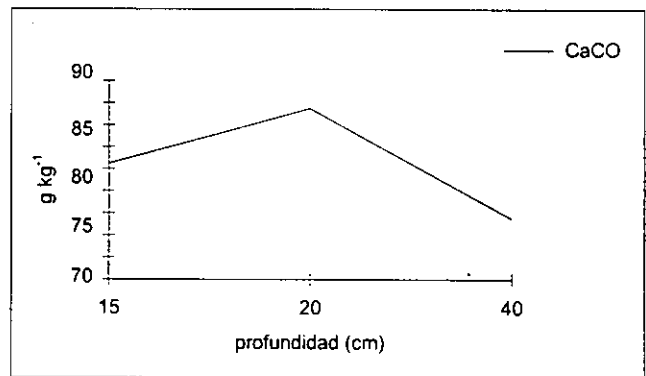


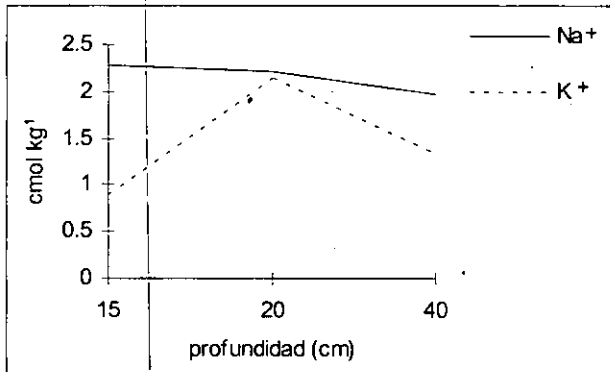
Gráfico 55.- Variación de la CE con la profundidad en el perfil 10.



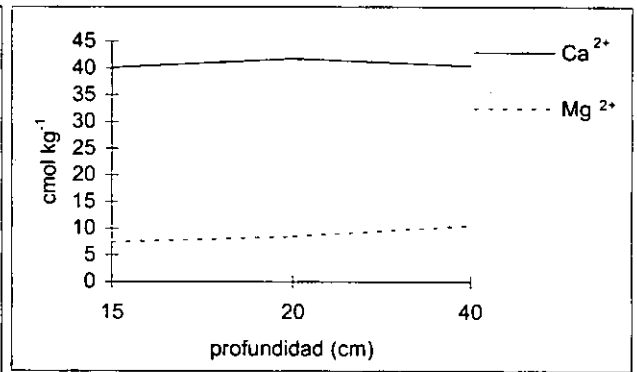
Gráfica 56.- Variación de los contenidos de CaCO₃ totales con la profundidad en el perfil 10.

El catión intercambiable predominante es el Ca²⁺, debido a la presencia de CaCO₃, su estimación de acuerdo con Jackson (*op. cit.*) es de 34.37, 33.94 y 31.33 cmol kg⁻¹ en Ap₁₁, Ap₁₂ y BC, respectivamente en el perfil. La concentración de Ca²⁺ intercambiable aumenta ligeramente con la profundidad del suelo; en importancia le sigue el Mg²⁺ que aumenta ligeramente con la profundidad y finalmente el Na⁺ y el K⁺ cuyas concentraciones disminuyen y aumentan, respectivamente (*Gráficas 57 y 58*). La relación de

proporción de los cationes intercambiables en ambos subhorizontes del perfil es $Ca^{2+} > Mg^{2+} \gg Na^+ > K^+$. Los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ presentan valores altos en todo el perfil, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. De acuerdo con los valores estimados de Ca^{2+} intercambiable, las relaciones Ca:Mg y Ca:Na son mayores de 1 y de 10, respectivamente, y el índice Mg-Na no es mayor a 0.5, lo que señalan que no hay indicios de salinización, alcalinización y alteración estructural en el suelo [Flores *et al.*, *op. cit.*](Tabla 33).



Gráfica 57.- Variación de los contenidos de Na^+ y K^+ intercambiables en el suelo, perfil 10.

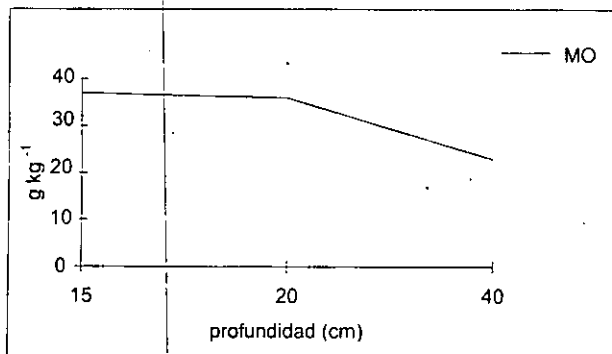


Gráfica 58.- Variación de los niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables en el suelo.

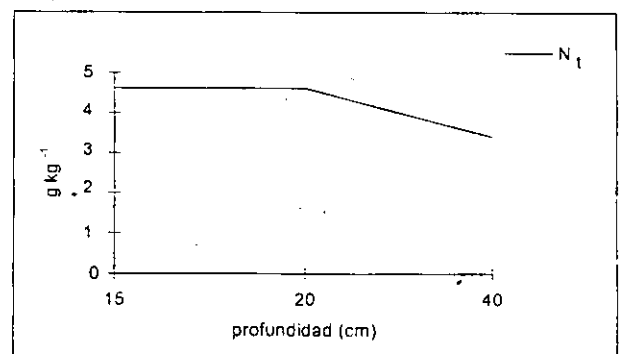
Los contenidos de MO y Nt disminuyen con la profundidad del suelo (Gráficas 59 y 60). Los niveles de MO son altos en Ap_{11} , medios en Ap_{12} y BC, y los de Nt son valores muy altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]; con lo que la relación C:N es baja, de acuerdo al nivel óptimo (12), y también disminuye con la profundidad [Ortiz-Villanueva, *op. cit.*](Tabla 34).

Tabla 34.- Características químicas del perfil 980530-02 Colonia Veracruz (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-15	37	22	4.62	4.76	1.209	40.10
15-20	36	21	4.62	4.54	3.447	37.69
20-40	23	13	3.43	3.79	2.416	40.39

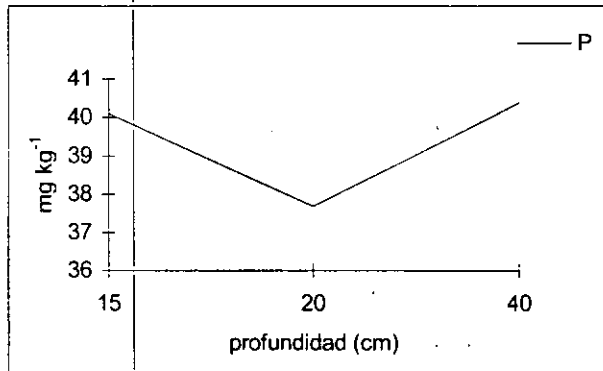


Gráfica 59.- Variación de los niveles de MO en el perfil.

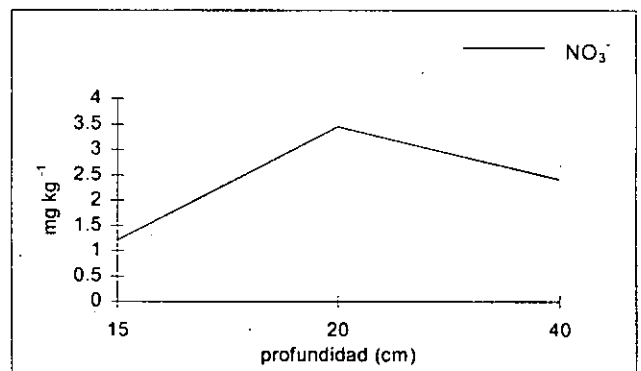


Gráfica 60.- Variación de los niveles de Nt en el perfil.

Los contenidos de P asimilable son altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*], aumentan con la profundidad al igual que los NO_3^- , Cl^- y HCO_3^- ; no se registra la presencia de CO_3^{2-} (Tabla 34). Los contenidos de NO_3^- son variables y son más bajos en comparación con otros perfiles (Gráfica 62).



Gráfica 61.- Variación de los contenidos de fósforo en función de la profundidad.



Gráfica 62.- Variación de los contenidos de nitratos en función de la profundidad.

c. Discusión de los resultados del perfil No. 10

El suelo es más oscuro debido al mayor contenido de MO y al ligero decremento en el contenido de CaCO_3 , a comparación de contenidos de MO y CaCO_3 de los perfiles 7 y 8. Aunque este perfil se halle próximo a estos perfiles, la depositación de MO es mayor ya que el perfil 7 tiene un menor tiempo de riego y el perfil 8 parece estar influenciado por una depositación diferencial de MO y/o por el uso intensivo del suelo.

Los valores bajos de DR y DA son debidos a los contenidos de MO [Buckman & Brady, *op. cit.*] y concuerdan con los valores más frecuentes para suelos arcillosos, lo que coincide con el contenido de arcillas y la clase textural del suelo, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La porosidad registrada en el suelo fomenta la reducción del pH debido a la liberación de CO_2 por la respiración radicular. La presencia de arcillas es más elevada en comparación con los niveles del perfil 9 y, aunque los contenidos de MO contribuyen a la agregación de las partículas, las arcillas junto con el calcio provocan una mejor estructuración, por lo que los agregados tienen un fuerte desarrollo.

Los contenidos de arcilla del suelo pueden dificultar el laboreo al provocar problemas como formación de grietas, exceso de humedad por mayor retención de agua y alta agregación debido al

calcio, como se observó anteriormente con el fuerte desarrollo de los agregados, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*). Sin embargo, estos niveles de arcilla también promueven la retención y almacenamiento e intercambio de nutrientes, como se observa en los altos valores de CIC y de cationes intercambiables, que forman una buena reserva de bases intercambiables en el suelo [Porta *et al.*, *op. cit.*].

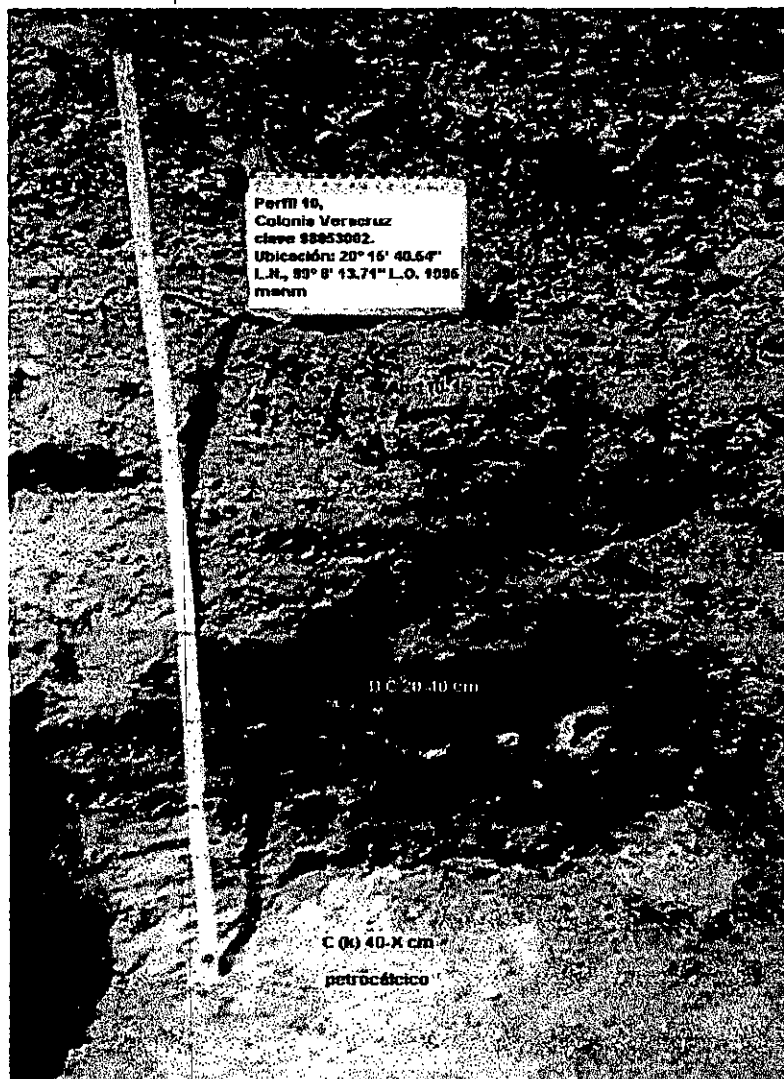
Los valores de pH en H₂O y KCl son ligeramente más bajos que los registrados en el perfil 8, debido a que los niveles de CaCO₃ son menores, en comparación con este perfil. Los valores de pH en agua están en el rango de tolerancia para un rendimiento satisfactorio de maíz y de trigo, y están por arriba del óptimo para trigo y calabaza, de acuerdo con Young (*op. cit.*). A diferencia del perfil anterior los contenidos de Mg²⁺ intercambiable son más bajos debido a que su aporte por las aguas mezcladas puede ser menor, con lo que el riesgo de alcalinización por MgCO₃ y estabilidad estructural no adecuada es menor [Russell, *op. cit.*; Flores *et al.*, *op. cit.*; Hernández, *op. cit.*]. Los valores de Na⁺ intercambiable, pH y CE no indican problemas de sodicidad y salinidad (Aguilera, *op. cit.*), junto con las relaciones Ca:Mg, Ca:Na y el índice Mg-Na [Flores *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de CE no rebasan el umbral de tolerancia del trigo, frijol, maíz y alfalfa, de acuerdo con Porta *et al.*, (*op. cit.*).

Los contenidos de MO de este perfil incluyen materiales xenobióticos que junto con la presencia de arcillas intervienen en la estructura y dinámica del suelo, influyendo en el pH, CIC y en la retención de algunos metales pesados y plaguicidas; los niveles de MO y los valores de pH promueven una mayor precipitación de los metales que pueden llegar a ser tóxico para las plantas [Russell, *op. cit.*]. La relación C:N es muy baja y no cae en el rango óptimo (10 a 12), debido a que las aguas residuales contienen un exceso de N y a la mineralización rápida del C, lo que puede mejorarse aportando residuos orgánicos ricos en C que se mantengan estables en el suelo.

La fertilidad del suelo es alta debido al contenido de arcillas, MO, Nt, P asimilable, K⁺, Mg²⁺, porcentaje de saturación del suelo y disponibilidad de nutrientes debido a la saturación por el Ca²⁺, además de la indicada por la CIC, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Sin embargo, la frecuencia de riego y la calidad del agua hace que los PO₄³⁻, NO₃⁻ y otros contaminantes, como los metales pesados y plaguicidas, alcancen los mantos freáticos aún cuando este suelo pueda sorberlos debido al elevado contenido de MO y a los valores de pH.

d. Clasificación del perfil No. 10

En este perfil el proceso dominante es la acumulación de MO y arcillas, y por consecuencia los atributos y procesos derivados y característicos del contenido de arcillas (agregación en poliedros de fuerte desarrollo y grietas cuando secos), aunque no se presentan estructuras más complejas, como columnas, caras de deslizamiento, relleno de grietas y microrelieve, debido al manejo del terreno. Las arcillas pueden derivar del acarreo debido a la ubicación altitudinal del perfil, y probablemente del aporte por el riego con agua residual y/o por neoformación. Debido al riego con aguas residuales y al manejo del terreno hay un elevado contenido de nutrientes y mayor retención de humedad. Con base en lo observado en los resultados se corrobora la presencia de un epipedón mólico, endopedón argílico y un horizonte petrocálcico. Las características de diagnóstico observadas son: suelo calcárico y régimen de humedad ústico limitrofe con arídico.



Clasificación
FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Phaeozem
Unidad: Luvic Phaeozem
Subunidad: *Petri-Luvic
Phaeozem*

USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calcistoll
Subgrupo: *Vertic Calcistoll*

Figura 13.- Perfil 10, localidad: Colonia Veracruz, municipio de Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo.

K. Perfil No. 11, localidad: Jagüey Colorado, clave: 970612-02.

Se localiza a 20° 12' 34.28" Latitud Norte y 99° 09' 37.7" Longitud Oeste a 2020 msnm. En esta parcela se cultiva trigo, maíz y chile. Utilizan el rastrojo y aplican fertilizantes al maíz. Desde hace 60 años se introdujo el riego con aguas negras. El suelo tiene 92 cm de profundidad efectiva.

a. Morfología del perfil No. 11

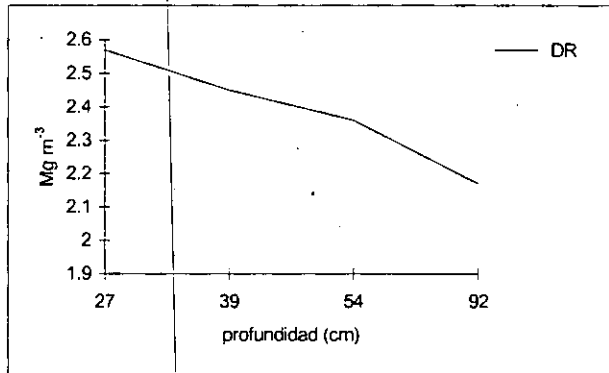
Subhorizonte	Profundidad	Descripción morfológica
Ap ₁₁	(0-27 cm)	Húmedo, 27 cm de profundidad, de separación gradual. Color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10 YR 3/1). Estructura en bloques subangulares medianos de desarrollo fuerte. Poros finos. Consistencia firme en húmedo. Muy adhesivo y muy plástico. Textura arcilla. Reacción muy débil al HCl 1N y dilución 1: 4, moderada al H ₂ O ₂ .
B ₁	(27-39 cm)	Húmedo, 12 cm de espesor, de separación gradual. Color pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/1) en húmedo. Estructura en bloques subangulares medianos de fuerte desarrollo. Consistencia muy firme en húmedo. Muy adhesivo y muy plástico. Textura arcilla. Reacción muy débil al HCl 1N y dilución 1: 4 y moderada al H ₂ O ₂ .
B ₂	(39-54 cm)	Húmedo, de 15 cm de profundidad, de separación clara horizontal. Color pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/1) en húmedo. Estructura en bloques subangulares de desarrollo fuerte. Consistencia friable en húmedo, adhesivo y plástico. Textura al tacto de tipo arcilla. Reacciona fuerte al HCl 1N y dilución 1: 4 y débil al H ₂ O ₂ .
C ₁	(54-92 cm)	Muy húmedo, de 38 cm de profundidad de separación clara discontinua. Color en húmedo es gris oscuro (10 YR 4/2). Consistencia friable en húmedo, la adhesivo y plástico. Textura al tacto de tipo arcilla. Reacción muy fuerte al HCl 1N y dilución 1: 4 y muy débil al H ₂ O ₂ .
C(k)		Horizonte Petrocálcico.

b. Resultados de los análisis de físicos y químicos del perfil No. 11

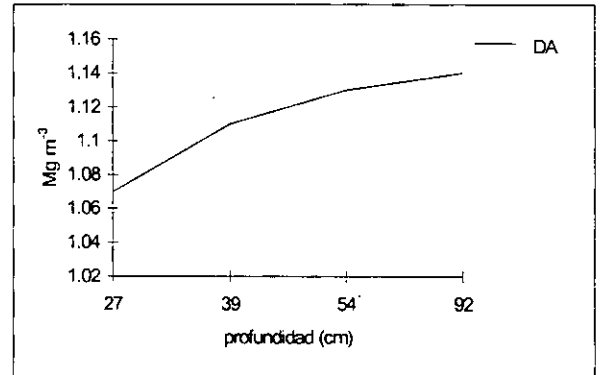
El color en seco y en húmedo del perfil es más oscuro en el subhorizonte Ap₁₁, tornándose más claro en B₂ y C₁. Va de gris muy oscuro (10 YR 3/1) a gris pardusco claro (10 YR 6/2), pasando por gris oscuro (10 YR 4/1) en seco; y de negro (10 YR 2/1) a pardo grisáceo oscuro, pasando por gris muy oscuro (10 YR 3/1) en húmedo (*Tabla 35*). La DA aumenta con la profundidad del suelo, al contrario de la DR (*Gráficas 63 y 64*), por lo que la porosidad disminuye (*Tabla 35*) y sus valores corresponden a una porosidad normal de acuerdo con Hillel, (op. cit.). Los valores de DA coinciden con los valores más frecuentes en suelos minerales arcillosos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, op. cit.].

Tabla 35.- Características físicas del perfil 970612-02 Jagüey Colorado, Mixquiahuala.

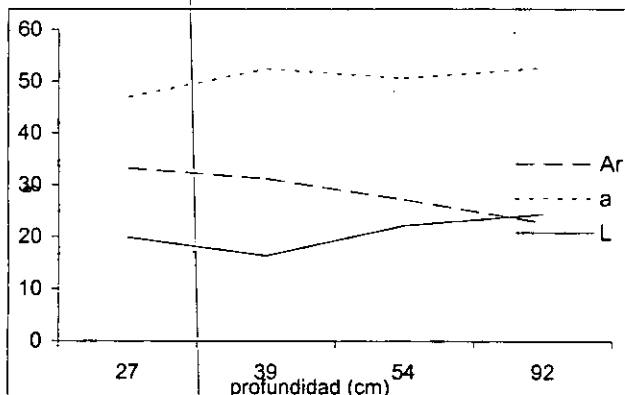
	Profundidad cm	COLOR		DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA			CLASE TEXTURAL
		en seco	en húmedo	DA	DR		arena	arcilla	limo	
				Mg m ⁻³						
Ap ₁₁	0-27	10 YR 3/1	10 YR 2/1	1.07	2.57	58.36	33.2	46.90	19.9	aL
B ₁	27-39	10 YR 3/1	10 YR 3/1	1.11	2.45	54.69	31.2	52.4	16.4	aL
B ₂	39-54	10 YR 4/1	10 YR 3/1	1.13	2.36	52.11	27.2	50.6	22.2	aL
C ₁	54-92	10 YR 6/2	10 YR 4/2	1.14	2.17	47.47	22.8	52.8	24.4	aL



Gráfica 63.- Variación de la DR con la profundidad del suelo en el perfil 11.



Gráfica 64.- Variación de la DA con la profundidad del suelo en el perfil 11.



Gráfica 65.- Variación de las fracciones texturales Ar = arena, a= arcilla, L= limo en el perfil 11.

Los valores de DR coinciden con los valores más frecuentes para minerales de arcilla, de acuerdo con Porta *et al.* (*op. cit.*) (Tabla 35).

La fracción predominante es la arcilla (a), que aumenta ligeramente con la profundidad del suelo; en segundo término se encuentra la arena (Ar), que decrece gradualmente con la profundidad, y posteriormente el limo (L), que aumenta. La clase textural es arcilla limosa (aL), de acuerdo con Tamhane (*op. cit.*) (Tabla 35).

Los valores de pH en H₂O y KCl generalmente aumenta con base en la profundidad, a excepción de la relación 1:2.5 en KCl la cual se mantuvo constante en 7.1 (Tabla 36, gráfica 66); estos valores pueden deberse a la presencia de CaCO₃ total y HCO₃⁻ solubles que muestran la misma tendencia (Tabla 36, gráfica 69). Los valores de pH en KCl son neutros (6.6 a 7.3) en la relación 1:2.5 y medianamente básicos (7.4 a 7.8) en la relación 1:5, de acuerdo con USDA, 1971 [Porta *et al.*, *op. cit.*]. Los valores de pH en H₂O son medianamente alcalinos (7.4 a 8.5), de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*] (Tabla 36).

Tabla 36.- Características químicas del perfil 970612-02, Jagüey Colorado, Mixquiahuala.

Profundidad cm	pH				CE dSm ⁻¹	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Cationes Intercambiables				CIC	Mg + Na/ CIC	Ca / Mg	Ca / Na
	H ₂ O		KCl							Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺				
	1:2.5	1:5	1:2.5	1:5													
0-27	8.3	8.5	7.1	7.4	0.32	102.5	0	4.4	0.39	2.54	2.7	38.83	25.6	51.37	0.54	0.8	8.1
27-39	8.4	8.5	7.1	7.4	0.32	102.5	0	4.2	0.45	3.04	2.33	40.79	26.5	54.46	0.54	0.85	7.4
39-54	8.4	8.8	7.1	7.5	0.36	140.0	0	5.4	0.34	3.21	2.1	56.25	26.9	54.41	0.55	0.82	6.9
54-92	8.6	8.9	7.1	7.6	0.31	185.0	0	5.4	0.39	3.30	1.6	61.89	40.1	50.26	0.86	0.13	1.6

* de acuerdo a los valores estimados de Ca²⁺, Jackson (*op. cit.*).

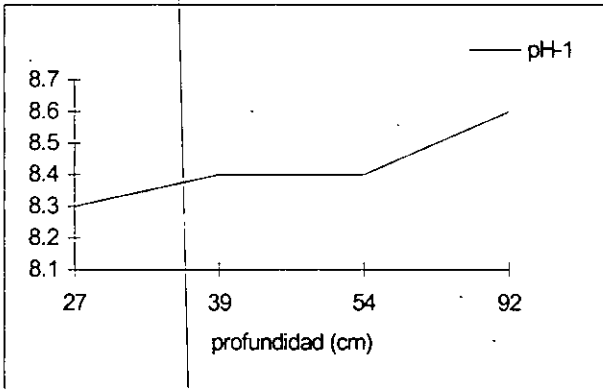


Gráfico 66.- Variación del pH en H₂O en dilución 1:2.5 con la profundidad del suelo en el perfil 11.

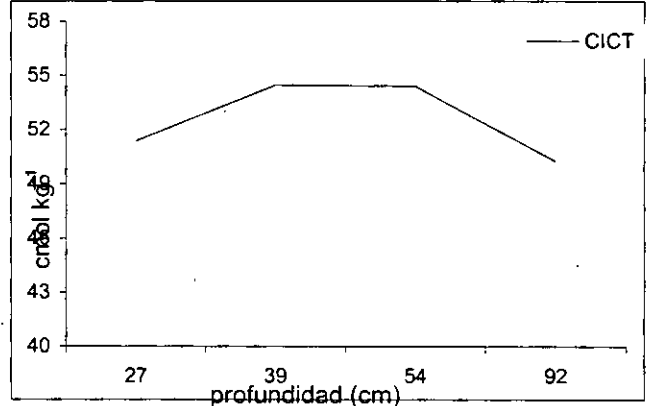
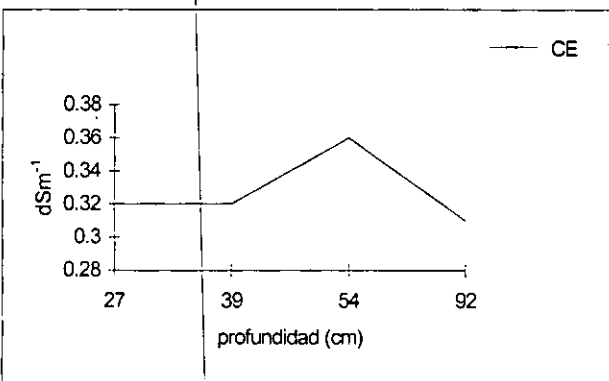
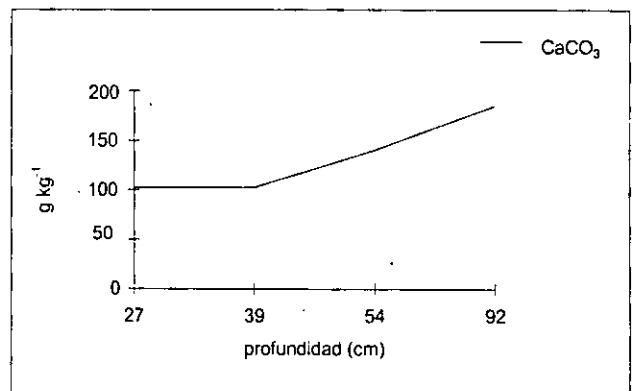


Gráfico 67.- Variación de la CIC con la profundidad del suelo en el perfil 11.

La CIC y la CE mantienen un comportamiento similar, en donde los valores respectivos en el primer subhorizonte son menores que en los dos siguientes, y en el último subhorizonte decrecen por debajo del valor inicial (*Gráficas 67 y 68*); de acuerdo con la NOM-021 los valores de CIC son muy altos y los de CE no indican salinidad, respectivamente [SEMARNAP, *op. cit.*].



Gráfica 68.- Variación de la CE con la profundidad del suelo en el perfil 11.



Gráfica 69.- Variación de los contenidos de CaCO₃ totales con la profundidad del suelo en el perfil 11.

La relación de proporción de los cationes intercambiables en el perfil es Ca²⁺ > Mg²⁺ >> Na⁺ > K⁺; excepto en el primer subhorizonte en donde los contenidos de K⁺ son mayores que los de Na⁺. La concentración de Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ intercambiables aumenta con la función de la profundidad del suelo y

en el caso del K^+ disminuye (Gráficas 70 y 71). La estimación de Ca^{2+} intercambiable es de 20.57, 22.6, 22.21 y 5.21 $cmol\ kg^{-1}$ en Ap₁₁, B1, B2 y C1, respectivamente, de acuerdo con Jackson (*op. cit.*); de acuerdo con ello, las relaciones Ca:Mg y Ca:Na son menores a 1 y 10, respectivamente, y el índice Mg-Na está por arriba de 0.5 (Tabla 36), lo que indica hay una elevada tendencia hacia la alcalinización y salinización, bajo los pH registrados [Flores *et al.*, *op. cit.*].

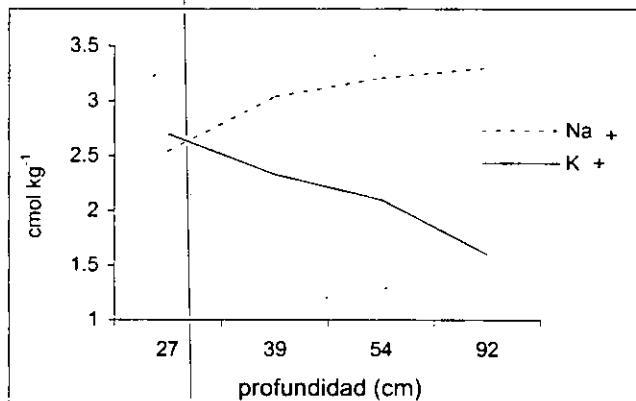


Gráfico 70.- Variación de los contenidos de Na^+ y K^+ intercambiables con la profundidad en el perfil 11.

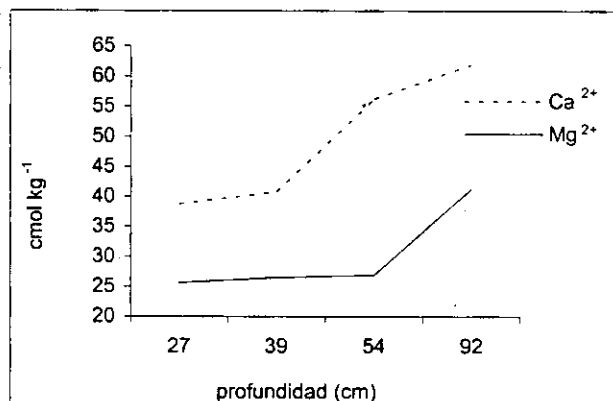
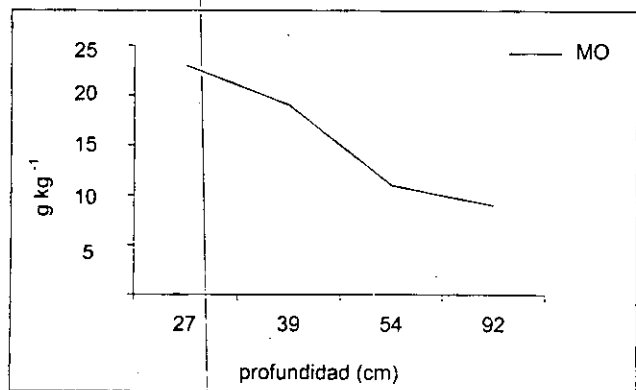


Gráfico 71.- Variación del Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables con la profundidad en el perfil 11.

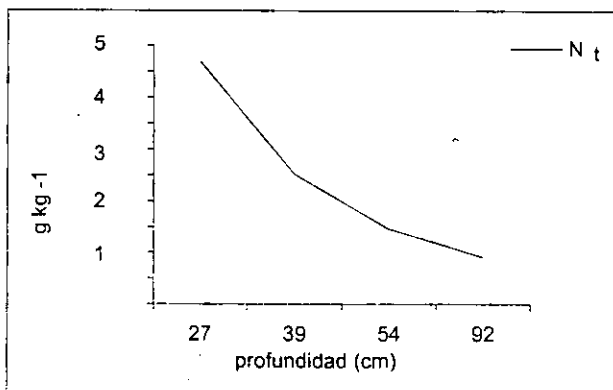
Tabla 37.- Características químicas del perfil 970612-02 Jagüey Colorado (continuación).

Profundidad cm	MO	C	N _t	C/N	NO ₃ ⁻	P
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	
0-27	23	13	4.69	2.77	7.624	42.04
27-39	19	11	2.52	4.36	2.415	43.65
39-54	11	7	1.47	4.76	1.209	40.78
54-92	9	5	0.91	5.49	1.837	39.93

El contenido de MO disminuye con la profundidad (Gráfica 72). De acuerdo con Aguilera (*op. cit.*), el suelo tiene niveles medios, pobres y muy pobres de MO en Ap₁₁, B1 y B2, y C1, respectivamente. La relación C:N crece con la profundidad del suelo debido a la disminución de la MO y N_t (Tabla 37).

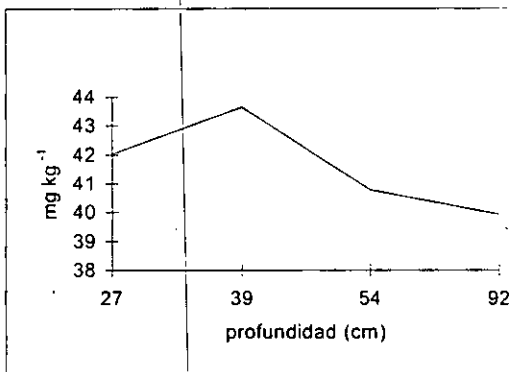


Gráfica 72.- Disminución de los contenidos de MO con la profundidad del suelo en el perfil 11.

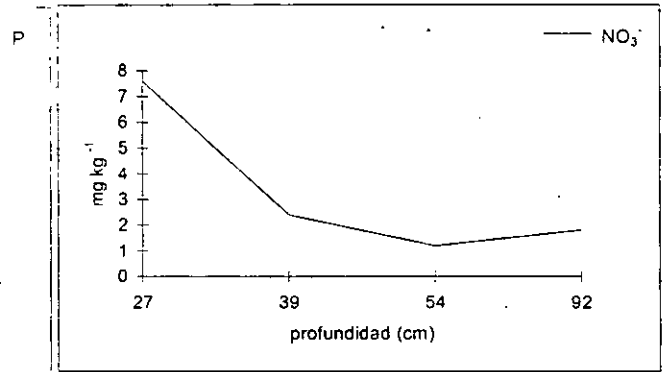


Gráfica 73.- Disminución de los contenidos de N_t con la profundidad del suelo en el perfil 11.

Los contenidos de P asimilable, NO_3^- y Nt también decrecen con base a la profundidad, acumulándose en los subhorizontes superiores (Gráficas 73, 74 y 75), de acuerdo con la NOM-021 los contenidos de P y Nt son altos y muy altos respectivamente, en Ap_{11} y B1 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La relación C:N está por debajo del rango óptimo (10 a 12) para suelos agrícolas [Ortiz-Villanueva, *op. cit.*].



Gráfica 74.- Variación de los contenidos de P asimilable con la profundidad en el perfil 11.



Gráfica 75.- Variación de los contenidos de NO_3^- con la profundidad en el perfil 11.

c. Discusión de los resultados del perfil No. 11

La disminución del color con la profundidad del suelo concuerda con los ricos contenidos de MO en los subhorizontes superiores, su posterior disminución en los inferiores y con el aumento de CaCO_3 conforme aumenta la profundidad. La presencia de tonos grises, tanto en húmedo como en seco, a diferencia de los registrados en los perfiles 6 y 7, está relacionada con la influencia de las partículas de MOS aportadas por las aguas residuales; sin embargo, también pueden indicar ciertos problemas de filtración o aireación [Porta *et al.*, *op. cit.*], lo cual aunque no concuerda con la porosidad del perfil pero se relaciona con la influencia del riego y con el incremento de arcillas en el perfil (Tabla 35).

Los valores bajos de DR a diferencia de los valores registrados para suelos con CaCO_3 (2.6 a 2.7) [Dana, *op. cit.*], se deben a los contenidos de MO [Buckman & Brady, *op. cit.*]. Los valores de DA concuerdan con los valores más frecuentes para suelos arcillosos y coincide con un alto contenido de arcillas en el suelo, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La porosidad es buena y que fomenta el intercambio de fluidos en el suelo [Porta *et al.*, *op. cit.*]. El suelo presenta mayores contenidos de arcillas en comparación de todos los perfiles anteriores y, junto con la MO y el Ca^{2+} intercambiable contribuyen a la agregación de las partículas provocando un fuerte desarrollo en los

agregados [Porta et al., *op. cit.*; Russell, *op. cit.*]. El contenido de arcillas contribuye a aumentar la CIC, dado que se observaba una disminución de los contenidos de MO, a diferencia de los contenidos del perfil 10; así, la retención y almacenamiento e intercambio de nutrientes es alta, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. Las arcillas pueden provocar problemas principalmente en la formación de grietas, exceso de humedad por mayor retención de agua, dificultando el laboreo [Porta et al., *op. cit.*].

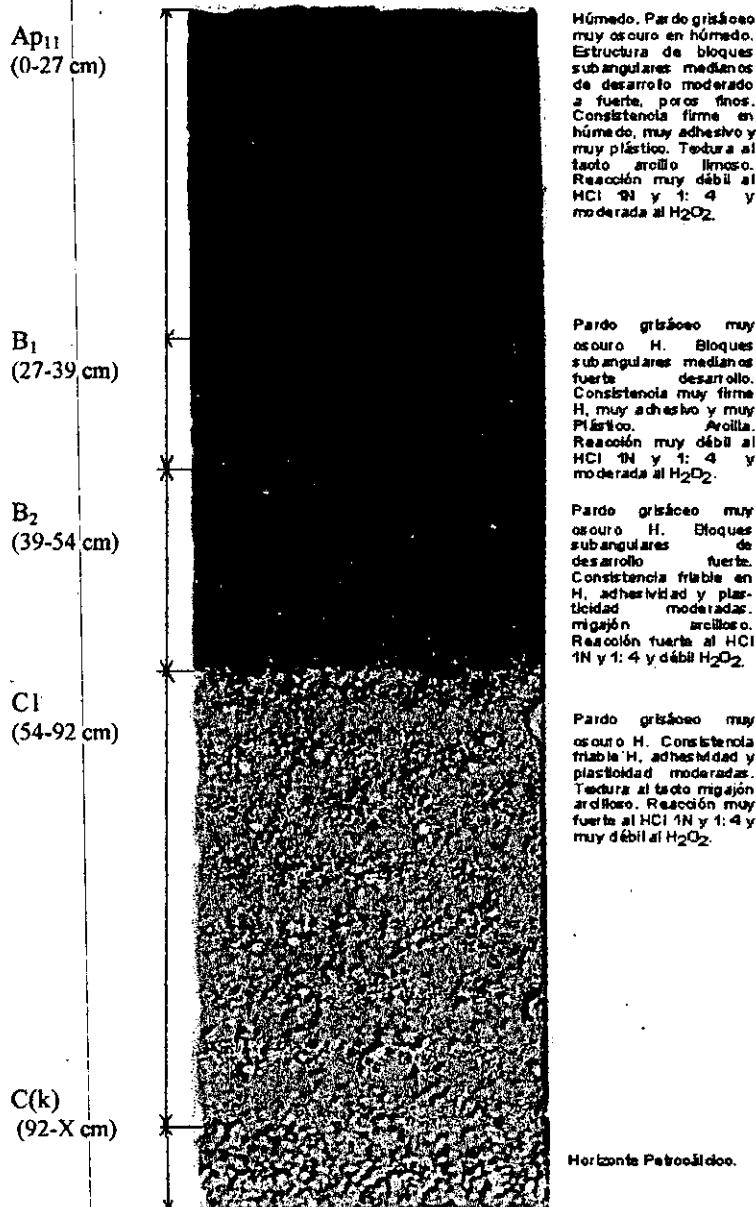
Los valores medianamente alcalinos de pH en agua son debidos a los elevados contenidos de CaCO_3 y MgCO_3 , la probabilidad de clorosis férrica aumenta, de acuerdo con Russell (*op. cit.*), aunque bajo estas circunstancias se facilita la movilidad del K^+ y Na^+ , que aumentan en concentración a diferencia de los contenidos en el perfil 10. Los valores de Na^+ intercambiable, pH y CE no indican problemas de sodicidad y salinidad [Porta et al., *op. cit.*; Aguilera, *op. cit.*]. Sin embargo, el índice Mg-Na y las relaciones Ca:Mg y Ca:Na evidencian mayores tendencias de salinización y alcalinización, a diferencia de lo observado en el perfil 10, siendo estas tendencias similares a las del perfil 3 y 9 (Tablas 12, 30 y 36). El valor de pH en agua de 0-39 cm está dentro del rango de tolerancia para el trigo, sin embargo rebasa el rango para maíz [Porta et al., *op. cit.*]. Los valores de CE no rebasan el umbral de tolerancia de maíz y de trigo [Young, *op. cit.*].

Los contenidos de Nt y P asimilable presentes en el perfil son muy altos, de acuerdo con la NOM-021 [SEMARNAP, *op. cit.*]. La fertilidad es alta debido a los valores registrados de CIC, Mg^{2+} , K^+ intercambiables, N total, P disponible, lo que concuerda con el alto contenido de arcillas, MO, porcentaje de saturación del suelo (Tablas 36 y 37). Los contenidos de Na^+ y K^+ son mayores a los registrados en el perfil 10 a su aporte por las aguas residuales sin tratamiento (negras) y a su almacenaje por el contenido de arcillas (Tablas 32, 33, 35 y 36). Los contenidos de MO de este perfil incluyen productos xenobióticos, que junto con los productos incorporados de origen natural, intervienen en la estructura y dinámica del suelo influyendo en el pH, CIC y a la retención de algunos metales pesados y plaguicidas; además, los valores de pH registrados, provocan la precipitación de metales que pueden llegar a ser tóxicos para los cultivos [Russell, *op. cit.*; Tate, *op. cit.*]. La relación C:N es muy baja y no cae en el rango óptimo de (10 a 12) para suelos agrícolas [Ortiz-Villanueva, *op. cit.*], debido al aporte de N por las aguas residuales, lo que puede mejorarse aportando residuos orgánicos ricos en C recalcitrante al suelo.

d. Clasificación del perfil No. 11

En este perfil el proceso dominante es la acumulación de MO y arcillas, y las características derivadas por la presencia de arcillas (poliedros de fuerte desarrollo y grietas cuando secos). Las arcillas derivan del transporte desde zonas más altas, también pueden ser aportadas por el agua residual y/o por neoformación. Debido al riego con aguas residuales y al manejo del terreno hay un elevado contenido de nutrientes y mayor retención de humedad. Los horizontes de diagnóstico son: un epipedon mólico, dado por el color, contenido de MO y la estructura en el subhorizonte Ap₁₁, un endopedón argílico, dado por la estructura y los contenidos de arcilla en B₁ y B₂, y un horizonte petrocálcico, como subhorizonte C(k). Las características de diagnóstico son: suelo calcárico, dado por los altos contenidos de CaCO₃, y un régimen de humedad ústico.

Perfil 11, localidad: Jagüey Colorado, clave: 970612-02



Clasificación
FAO-UNESCO (1999)
Grupo: Phaeozem
Unidad: Luvic Phaeozem
Subunidad: *Petri-Eutri Luvic Phaeozem*

USDA (1998)
Orden: Mollisol
Suborden: Ustoll
Gran grupo: Calcicustoll
Subgrupo: *Vertic Calcicustoll*

Figura 14.- Monolito del Perfil 11, Localidad Jagüey Colorado, Municipio de Mixquiahuala, Hgo.

L. Análisis del comportamiento de las propiedades edáficas en función del tiempo de riego con aguas residuales, con base en el subhorizonte Ap.

A. Análisis de regresión lineal

Se analizó el comportamiento de las propiedades físicas y químicas del subhorizonte Ap de los suelos recolectados en el área de estudio, en función del tiempo de riego con las diferentes clases de agua residual. Para este análisis se agruparon los suelos de acuerdo al Grupo y Unidad taxonómica al que corresponden, de acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO (1999), considerando el tiempo y tipo de riego con aguas residuales (*Tablas 38 y 39*), y se obtuvo la ecuación de comportamiento mediante análisis de regresión lineal.

Unidad Petric Calcisol									
años de riego	0		5		50		68	75	
Tipo de riego	temporal		aguas negras		aguas negras		aguas negras	aguas mezcladas	
Perfil No.	1		2		3		4	5	
Subhorizonte	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₁	Ap ₁₂
DA (Mg m ⁻³)	1.26	1.26	1.17	1.2	1.19	1.19	1.07	1.17	1.21
DR (Mg m ⁻³)	2.5	2.5	2.52	2.55	2.55	2.41	2.37	2.43	2.39
Porosidad (%)	50	49	54	53	53	51	55	52	49
Arenas (%)	75	73	71	66	42	39	58	50	44
Arcillas (%)	14	12	17	23	28	26	16	20	26
Limos (%)	11	15	12	11	30	35	26	30	30
pH (H ₂ O 1:2.5)	8.5	8.4	8	8.6	8.4	8.7	7.6	7.7	7.9
pH (H ₂ O 1:5)	8.7	8.5	8.4	8.6	8.5	8.7	7.7	7.7	7.9
pH (KCl 1:2.5)	7.5	7.5	7.4	7.4	7.6	7.6	7.3	7.1	7.2
MO (g kg ⁻¹)	29	24	33	27	45	27	35	36	33
C (g kg ⁻¹)	17	14	19	15	26	15	20	21	19
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	1.67	1.53	1.25	1.25	2.7	2.5	1.61	1.39	1.39
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	1.99	1.44	1.19	0.77	2.22	1.71	2.58	2.33	2.33
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	69.33	63.53	54.95	45.89	52.93	57.35	57.4	31.28	31.86
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	6.73	8.79	7.81	14.17	20.1	27.3	5.78	8.42	10.62
CIC (cmol kg ⁻¹)	24.75	16.49	32.16	30.45	35.62	35.62	40.02	34.75	29.18
CE (dSm ⁻¹)	0.36	0.28	0.37	0.2	0.39	0.37	0.29	0.32	0.25
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	100.0	112.5	222.5	226.5	145.0	117.5	107.5	65.0	72.5
P (mg kg ⁻¹)	14.54	27.86	28.79	31.27	32.69	28.79	17.5	32.14	25.25
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	8.653	8.523	11.73	8.3	34.8	8.9	10.69	11.72	2.7
Nt (g kg ⁻¹)	3.09	2.89	3.23	4.41	5.2	6.0	8.1	6.0	4.8
Relación C:N	5.5	4.84	5.9	3.4	5.02	2.52	2.46	3.49	3.99
Índice Mg-Na	0.33	0.62	0.28	0.5	0.64	0.83	0.18	0.28	0.41
Cl ⁻ (cmol kg ⁻¹)	0.37	0.3	0.49	0.33	0.75	0.42	0.47	0.34	0.67
HCO ₃ ⁻ (cmol kg ⁻¹)	5	4.6	5.3	5.68	4.4	4.6	4.9	3.1	3.6

Tabla 38.- Matriz de características físicas y químicas de los suelos pertenecientes al Grupo Calcisol en los subhorizontes Ap₁₁ y Ap₁₂.

Grupo Phaeozem												
Unidad	Calcaric								Luvic			
Perfil No.	perfil 6		perfil 7		perfil 8		perfil 9		perfil 10		perfil 11	
Años de riego	0		10		50		80		50		65	
Tipo de riego	temporal		aguas mezcladas		aguas mezcladas		aguas negras		aguas mezcladas		aguas negras	
Subhorizonte	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂	Ap ₁₁	Ap ₁₂
DA (Mg m ⁻³)	1.13	1.11	1.19	1.17	1.13	1.13	1.16	1.17	1.08	1.07	1.07	1.11
DR (Mg m ⁻³)	2.41	2.33	2.5	2.47	2.46	2.3	2.33	2.31	2.31	2.34	2.57	2.45
Porosidad (%)	53	52	52	52	54	51	50	49	53	54	58	55
Arenas (%)	50	67	45	65	22	29	29	23	22	24	33	31
Arcillas (%)	19	17	23	23	34	31	40	41	50	43	47	52
Limos (%)	31	16	32	12	43	40	31	36	28	33	20	16
pH (H ₂ O 1:2.5)	7.8	7.6	8.3	8.3	7.6	8	7.9	7.9	8	7.9	8.3	8.4
pH (H ₂ O 1:5)	7.9	7.7	8.3	8.7	7.8	8	8	8	8	7.9	8.5	8.5
pH (KCl 1:2.5)	7.4	7.4	7.7	7.7	6.7	7.3	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1
MO (g kg ⁻¹)	35	27	24	22	21	20	24	28	37	36	23	19
C (g kg ⁻¹)	20	16	14	13	12	11	14	16	22	21	13	11
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	0.47	0.57	2.37	2.13	1.83	1.83	1.87	2.06	2.29	2.21	2.54	3.04
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	0.73	0.25	1.34	1.19	2.9	3.03	3.3	2.9	0.91	2.16	2.7	2.33
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	51.7	64.3	73.4	72.2	40.29	51.03	27.7	28	40.2	41.8	38.8	40.7
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	21.74	13.0	10.6	10.5	17.96	17.96	21	24	7.4	9.4	26	26
CIC (cmol kg ⁻¹)	39.14	44.89	34.05	36.66	46.67	40.75	31	47	44.9	47.7	51	54.5
CE (dSm ⁻¹)	0.21	0.32	0.61	0.35	0.42	0.36	0.34	0.26	0.32	0.28	0.32	0.32
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	145	128	140	145	62.5	105	65.0	95.0	82.5	87.5	102.5	102.5
P (mg kg ⁻¹)	30.6	34.77	40.8	42.7	36.84	43.13	41	43	40	38	42	43
NO ₃ (mg kg ⁻¹)	1.1	1.4	12.2	4.3	7.81	8.98	11	3.4	1.2	3.4	7.6	2.4
Nt (g kg ⁻¹)	7.8	6.2	4.7	4.8	4.0	5.5	5.9	3.5	4.62	4.62	4.7	2.5
Relación C:N	2.55	2.59	2.9	2.7	2.98	2.09	2.35	4.57	4.76	4.54	2.77	4.36
Índice Mg-Na	0.57	0.30	0.38	0.34	0.42	0.42	0.74	0.56	0.21	0.24	0.54	0.54
Cl ⁻ (cmol kg ⁻¹)	0.23	0.78	0.88	0.45	0.42	0.43	0.42	0.36	0.33	0.37	0.39	0.45
HCO ₃ ⁻ (cmol kg ⁻¹)	4.4	4.3	4.9	5.4	3.5	4.3	3.6	3.7	4	4.3	4.4	4.2

Tabla 39.- Matriz de características físicas y químicas de los suelos pertenecientes a la Unidad Phaeozems en los subhorizontes Ap₁₁ y Ap₁₂.

El resultado del análisis de regresión, ofrece un modelo aproximado de la tendencia de cada una de las características físicas y químicas de cada grupo de suelo como variables dependientes del tiempo de riego, bajo cierto tipo de agua, que es observado en la ecuación de cada propiedad y en el índice de correlación entre estas variables (Tablas 40 y 41). En los Calcisoles regados con aguas negras y los Calcaric Phaeozems regados con aguas mezcladas, las variables son directa o inversamente proporcionales al tiempo de riego con agua residual, es decir aumenta o disminuye su valor marcado con el valor positivo o negativo de la pendiente (m) respectivamente (Tabla 40, gráfica 76); por otro lado, en el caso del Calcaric Phaeozem y Petric Calcisol regados con aguas negras, y los Luvic Phaeozems, la densidad de muestreo y la diferencia en la calidad de riego no permite hacer este modelaje. El aumento o la disminución de las propiedades edáficas, sobre todo el aporte de nutrientes, está relacionado con el efecto del riego con las aguas residuales, a medida que aumenta el tiempo de riego, y el índice de correlación señala el grado de probabilidad de que esas tendencias

ocurran. En los Calcisoles, los valores DA y DR disminuyen con respecto al tiempo de riego, esta disminución tiene un índice de correlación elevado, en comparación con la disminución del porcentaje de arenas y del valor de pH en H₂O con el tiempo de riego, que tienen un índice de correlación menor. Por el contrario, en este grupo de suelos, el aumento de MO, K y Nt con el tiempo de riego con aguas negras es más probable que el aumento en arcillas, NO₃⁻, P asimilable, Na⁺ y Mg²⁺ intercambiables, debido a los índices de correlación que presentan (Tabla 40).

Subhorizonte Parámetro	Ap11			Ap12		
	Ecuación $y = m x + b$	Coefficiente de Correlación	Comportamiento con el tiempo de riego	Ecuación $y = m x + b$	Coefficiente de Correlación	Comportamiento con el tiempo de riego
DA (Mg m ⁻³)	DA = -0.02(lnT) + 1.24	0.70	disminuye	DA = -0.02 (lnT) + 1.25	0.64	disminuye
DR (Mg m ⁻³)	DR = -0.008 (LogT) + 2.53	0.54	disminuye	DR = -0.01 (LogT) + 2.51	0.71	disminuye
Porosidad (%)	Poros = -3.47 (1/T) + 53.66	0.77	aumenta	Poros = 0.01 (log T) + 49.54	0.39	aumenta
Arenas (%)	Ar = -0.1 (log T) + 77.52	0.82	disminuye	Ar = -0.11 (logT) + 74.56	0.81	disminuye
Arcillas (%)	L = 0.24 (log T) + 9.8	0.96	aumenta	L = 0.21 (log T) + 11.85	0.83	aumenta
Limos (%)	a = 0.08 (Log T) + 14.54	0.61	aumenta	a = 0.11 (Log T) + 14.44	0.62	aumenta
pH (H ₂ O 1:2.5)	pH = -0.67 (T) + 8.34	0.67	disminuye	pH = -0.087 (T) + 8.59	0.67	disminuye
pH (H ₂ O 1:5)	pH = -0.01 (T) + 8.64	0.85	disminuye	pH = -0.0001 (T) + 8.65	0.72	disminuye
pH (KCl 1:2.5)	pH = -0.6 (T) + 7.51	0.6	disminuye	pH = -0.002 (T) + 7.50	0.55	disminuye
MO (g kg ⁻¹)	MO = 0.06 (log T) + 2.96	0.74	aumenta	MO = 0.01 T + 2.47	0.86	aumenta
C (g kg ⁻¹)	C = 0.059 (log T) + 1.72	0.73	aumenta	C = 0.006 (log T) + 1.4	0.85	aumenta
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	Na ⁺ = 0.036 (log T) + 1.5	0.23	aumenta	Na ⁺ = 0.05 (log T) + 1.4	0.34	aumenta
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	K ⁺ = 0.01 T + 1.59	0.78	aumenta	K ⁺ = 0.016 T + 1.04	0.88	aumenta
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	Ca ²⁺ = -0.08 (log T) + 62.19	0.54	disminuye	Ca ²⁺ = -0.06 (log T) + 59.3	0.43	disminuye
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	Mg ²⁺ = 0.47 (ln T) + 10.68	0.15	aumenta	Mg ²⁺ = 0.81 (ln T) + 11.03	0.19	aumenta
CIC (cmol kg ⁻¹)	CIC = 0.047 T + 33.55	0.59	aumenta	CIC = 0.15 (log T) + 19.17	0.84	aumenta
CE (dSm ⁻¹)	CE = -0.0007 T + 0.37	0.61	disminuye	CE = 0.039 (log T) + 0.24	0.34	aumenta
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	CaCO ₃ = -0.098 T + 16.8	0.59	disminuye	CaCO ₃ = -0.11 T + 17.2	0.68	disminuye
P (mg kg ⁻¹)	P = -13.34 (1/T) + 28.46	0.66	aumenta	P = 3.66 (1/T) + 25.5	0.3	disminuye
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ = 0.06 (log T) + 9.27	0.46	aumenta	NO ₃ ⁻ = -0.09 (log T) + 9.24	0.32	disminuye
Nt (g kg ⁻¹)	Nt = 0.19 (log T) + 0.28	0.9	aumenta	Nt = 0.167 (log T) + 0.308	0.85	aumenta
Relación C:N	C:N = -0.13 (log T) + 6.2	0.71	disminuye	C:N = -0.097 (log T) + 4.4	0.67	disminuye
Índice Mg-Na	Mg-Na = 0.047 (log T) + 16.7	0.2	aumenta	Mg-Na = 0.06 (log T) + 16.83	0.3	aumenta
Cl ⁻ (cmol kg ⁻¹)	Cl ⁻ = 0.04 (log T) + 0.41	0.26	aumenta	Cl ⁻ = 0.0036 T + 0.288	0.9	aumenta
HCO ₃ ⁻ (cmol kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ = -0.018 T + 5.27	0.75	disminuye	HCO ₃ ⁻ = -0.04 (log T) + 5.13	0.43	disminuye

Tabla 40.- Modelos de comportamiento de los parámetros edáficos en función del tiempo de riego con agua negra en el subhorizonte Ap del Grupo Calcisol.

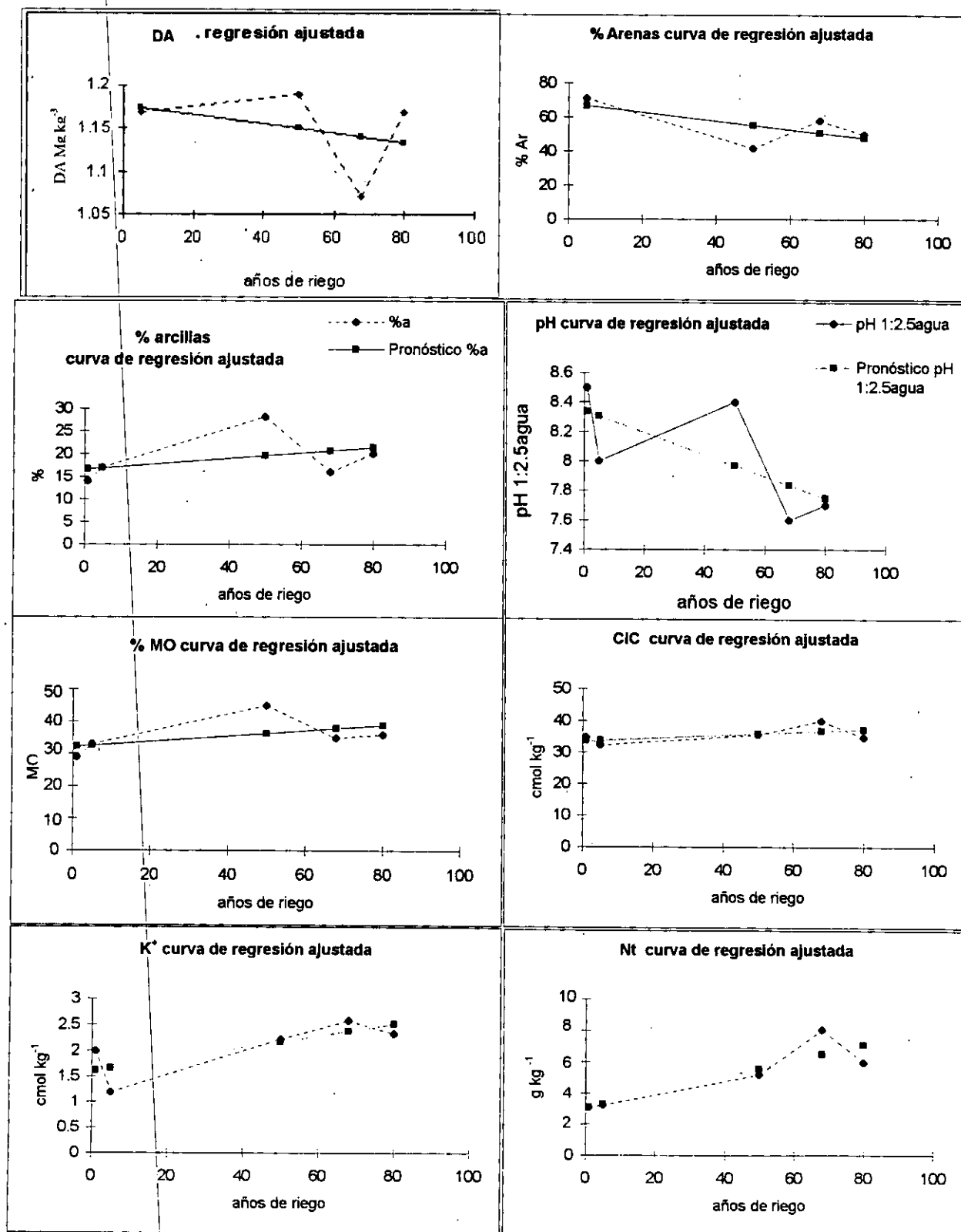
Dentro de las propiedades físicas en los Calcisoles se observa que hay una disminución con una correlación alta en los valores de DA, DR y porosidad con el tiempo de riego, debido a que también aumenta la MO; además se observa un descenso del contenido de arenas y un aumento en los contenidos de arcillas y limos (con un alto índice de correlación) que, sumados al aumento de Na^+ y Mg^{2+} intercambiables y la disminución de pH contribuyen a la buena agregación del suelo que se observó comparativamente en la morfología de los perfiles 1, 2, 3, 4 y 5 (Tabla 40, gráfica 76). En cuanto a las características químicas se observa un aumento en los contenidos de C, Nt y K^+ asimilable, como nutrimentos que asociados al aumento en MO y al ligero aumento en CIC, con altos índices de correlación, contribuyen a la fertilidad del suelo (Gráfica 76). Los valores de pH en agua registran una disminución con el tiempo de riego, con un índice de correlación mayor en la relación 1:5; el pH en KCl (1:2.5) tiene un coeficiente de correlación semejante al registrado en agua en la misma relación, esta reducción de los valores de pH coincide con la disminución en los contenidos de CaCO_3 totales y de HCO_3^- solubles con el tiempo de riego, y puede fomentar la disponibilidad de micronutrimentos para las plantas [Russell, *op. cit.*]. El aumento del índice Na-Mg coincide con el aumento de Na^+ y Mg^{2+} intercambiables con el tiempo de riego, aunque los índices de correlación de cada uno son bajos (Tabla 40), con lo que la tendencia hacia la alcalinización y salinización aumenta con el tiempo de riego, de acuerdo con la escala dada por Flores *et al.* (*op. cit.*). En el caso de P y NO_3^- se observa un aumento de los contenidos en Ap_{11} con el tiempo de riego (con índices de correlación bajos); sin embargo, en el subhorizonte Ap_{12} sus concentraciones muestran una disminución con el tiempo de riego (también con índices de correlación bajos), quizá debido a que hay un lavado hacia los mantos freáticos, como lo observado por Gutiérrez *et al.* (*op. cit.*).

El efecto del riego es más marcado en los Petric Calcisols que en los Calcaric Phaeozems, debido a que en estos últimos existe una diferencia derivada del tipo de riego y de la acumulación de arcillas y probablemente tienen un uso más intensivo, con lo que la correlación en el comportamiento es ligeramente diferente (Tablas 40 y 41). En los Phaeozems, los valores de DA en el subhorizonte Ap_{11} tienen un ligero aumento con el tiempo de riego con aguas residuales a comparación de la DR que disminuyen en ambos subhorizontes, los índices de correlación son mayores en DA que en DR, hay una mayor correlación en la disminución de la porosidad con el tiempo de riego. En cuanto a las fracciones texturales hay una mayor correlación en el aumento de arcillas y la disminución de arenas con el tiempo de riego con aguas residuales. Los valores de pH en H_2O y KCl disminuyen con el tiempo de riego y el mayor índice de correlación lo tiene el pH en KCl; lo que coincide con la disminución en los contenidos de CaCO_3 total, HCO_3^- solubles, y el aumento de Mg^{2+} intercambiable, con el tiempo de riego con aguas residuales. En cuanto a la fertilidad del

suelo, hay una mayor correlación en la disminución de los contenidos de C y Nt con el tiempo de riego, aunque el aumento de los contenidos de K⁺ intercambiable, P asimilable y NO₃⁻ tiene una correlación muy alta. Los valores de CIC disminuyen en Ap₁₁ y aumentan en Ap₁₂ con el tiempo de riego; aunque para el primero la correlación es muy baja y para el segundo es mayor. El índice Na-Mg tiene una correlación alta en el aumento del índice con respecto al tiempo de riego con aguas residuales, lo que aumenta la tendencia de salinización y alcalinización, de acuerdo con la escala de Flores *et al.* (op. cit.) (Tabla 41).

Subhorizonte	Ap ₁₁			Ap ₁₂		
	Ecuación y = m x + b	Coefficiente de Correlación	Comportamiento con el tiempo de riego	Ecuación y = m x + b	Coefficiente de Correlación	Comportamiento con el tiempo de riego
DA (Mg m ⁻³)	DA = 0.002 (log T) + 1.15	0.16	aumenta	DA = 0.0078 (log T) + 1.12	0.6	aumenta
DR (Mg m ⁻³)	DR = -0.003 (Log T) + 2.44	0.22	disminuye	DR = -0.005 (Log T) + 2.38	0.29	disminuye
Porosidad (%)	P % = -0.02 T + 53.05	0.50	disminuye	P% = -0.036 T + 52.28	0.96	disminuye
Arenas (%)	Ar = -0.31 T + 47.22	0.86	disminuye	Ar = -0.54 T + 66.6	0.94	disminuye
Arcillas (%)	L = -0.02 T + 32.86	0.11	disminuye	L = 0.33 T + 14.3	0.88	aumenta
Limos (%)	a = 0.34 T + 18.91	0.99	aumenta	a = 0.16 T + 16.68	0.62	aumenta
pH (H ₂ O 1:2.5)	pH = -0.0029 T + 8.07	0.48	disminuye	pH = -0.0025 T + 8.215	0.2	disminuye
pH (H ₂ O 1:5)	pH = -0.0028 T + 7.99	0.35	disminuye	pH = 0.008 (log T) + 7.89	0.296	aumenta
pH (KCl 1:2.5)	pH = -0.007 T + 7.49	0.59	disminuye	pH = -0.004 (T) + 7.53	0.76	disminuye
MO (g kg ⁻¹)	MO = -0.1 (log T) + 3.3	0.88	disminuye	MO = -0.02 (log T) + 2.53	0.26	disminuye
C (g kg ⁻¹)	C = 0.71 (1/T) + 1.29	0.97	disminuye	C = 0.25 (1/T) + 1.34	0.53	disminuye
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	Na ⁺ = 0.29 (log T) + 0.64	0.79	aumenta	Na ⁺ = 0.27 (log T) + 0.72	0.85	aumenta
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	K ⁺ = 0.35 (log T) + 0.69	0.99	aumenta	K ⁺ = 0.58 (log T) + 0.28	0.99	aumenta
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	Ca ²⁺ = -0.13 (log T) + 64.27	0.64	disminuye	Ca ²⁺ = -0.15 (log T) + 75.87	0.72	disminuye
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹)	Mg ²⁺ = 0.049 T + 16.1	0.35	aumenta	Mg ²⁺ = 0.16 T + 10.88	0.96	aumenta
CIC (cmol kg ⁻¹)	CIC = -0.029 T + 38.7	0.16	disminuye	CIC = 0.06 T + 40.20	0.49	aumenta
CE (dSm ⁻¹)	CE = 0.11 (log T) + 0.27	0.486	aumenta	CE = -0.02 (log T) + 0.34	0.29	disminuye
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	CaCO ₃ = -0.11 T + 14.34	0.93	disminuye	CaCO ₃ = -0.056 T + 13.77	0.91	disminuye
P (mg kg ⁻¹)	P = 0.05 (log T) + 32.2	0.77	aumenta	P = 0.04 (log T) + 36.06	0.86	aumenta
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ = 0.47 (log T) + 1.7	0.83	aumenta	NO ₃ ⁻ = 0.29 (log T) + 1.7	0.83	aumenta
Nt (g kg ⁻¹)	Nt = -0.098 (log T) + 0.699	0.67	disminuye	Nt = -0.089 (log T) + 0.62	0.72	disminuye
Relación C:N	C:N = -0.0028 T + 2.79	0.35	disminuye	C:N = 0.02 T + 2.49	0.99	aumenta
Índice Mg-Na	Mg-Na = 0.31 T + 16.9	0.94	aumenta	Mg-Na = 0.37 T + 12.47	0.95	aumenta
Cl ⁻ (cmol kg ⁻¹)	Cl ⁻ = 0.1 (log T) + 0.33	0.39	aumenta	Cl ⁻ = -0.16 (log T) + 0.75	0.95	disminuye
HCO ₃ ⁻ (cmol kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ = -0.015 T + 4.6	0.84	disminuye	HCO ₃ ⁻ = -0.01 T + 4.9	0.71	disminuye

Tabla 41.- Modelos de comportamiento de los parámetros edáficos en función del tiempo de riego con agua residual en el Subhorizonte Ap del Grupo Fluvozem.



Gráfica 76.- Efecto del tiempo de riego con aguas negras en los contenidos de arenas, arcillas, MO, K⁺, Nt y en los valores de DA, pH, CIC del subhorizonte Ap₁₁ del Grupo Calcisol.

B. Análisis gráfico de la variación de las propiedades edáficas.

Los resultados de las propiedades morfológicas, físicas y químicas de los perfiles, apoyados con las observaciones morfológicas en campo mediante las barrenaciones, la interpretación de las fotografías aéreas y los mapas disponibles del área de estudio, permiten realizar una esquematización gráfica de la variación superficial de las propiedades del suelo, establecer un modelo de distribución de los suelos en el área de estudio y tener un panorama en forma de gradiente que se relacione con la influencia del riego con aguas residuales.

La variación de la profundidad en la zona de muestreo es mayor en la parte central donde se encuentran perfiles y barrenaciones que van de 1 m a menos de 40 cm encontrando el límite petrocálcico invariablemente a menos que se halle roturado (*Esquema 1*).

Los valores porcentuales de arena mayores de 50 % en el área de estudio coinciden con las zonas de profundidad limitada ubicadas en las laderas del Municipio y de mayor altitud, en tanto que los menores contenidos coinciden con la parte central predominantemente en las partes más bajas (*Esquemas 1, 2 y 5*). Los valores porcentuales de limo muestran una distribución inversa a la de la arena, los valores mayores a 35 % se hallan en la parte central y los valores por debajo de 32 se hallan en algunas de las zonas de profundidad limitada. El mayor porcentaje de arcillas concuerda con las áreas de mayor tiempo de riego con aguas residuales y con las zonas de baja altitud (*Esquemas 3 y 4*).

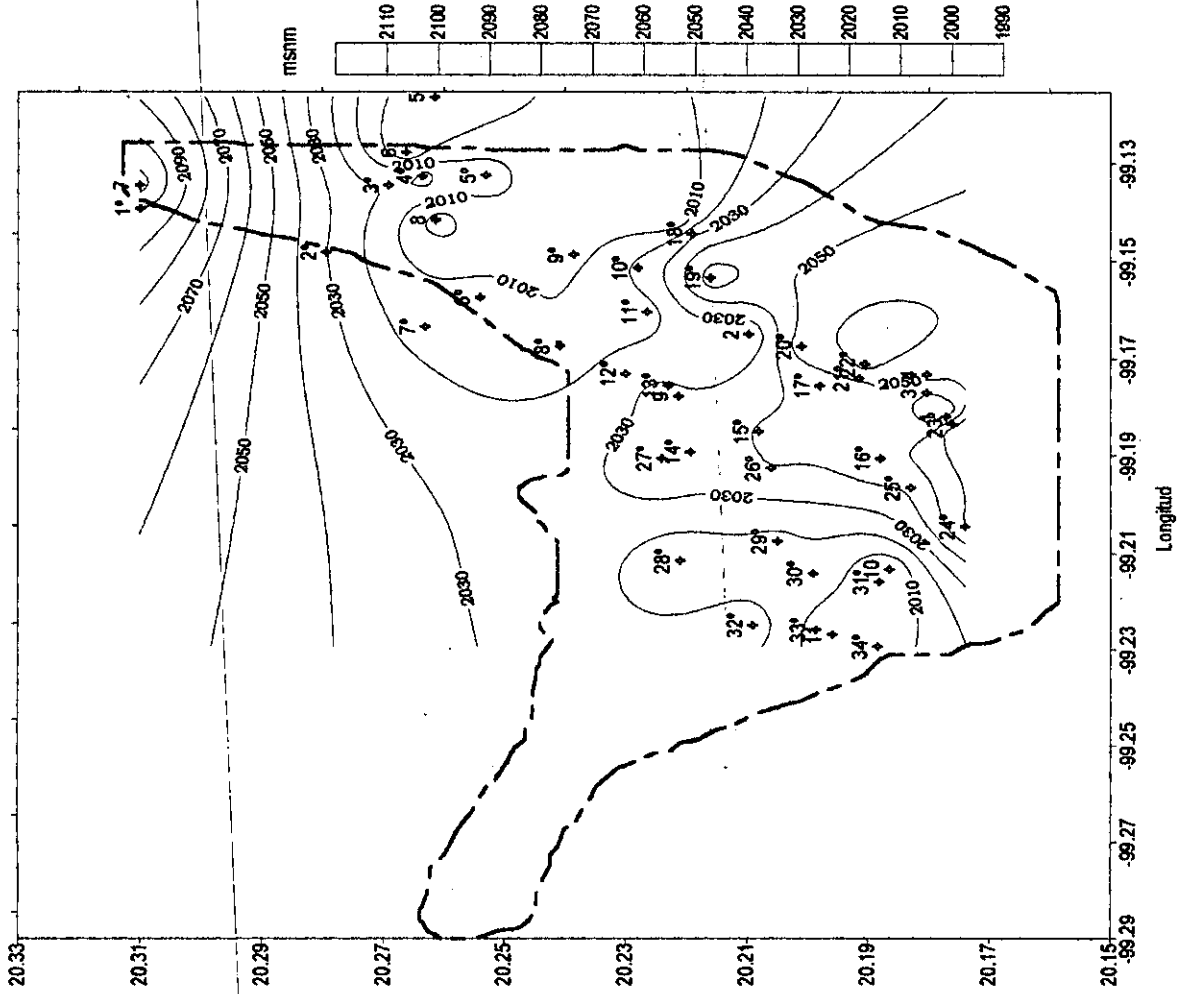
Los valores de pH en agua relación 1:2.5 decrecen hacia las partes relativamente más bajas, coincidiendo con algunas áreas de mayor tiempo de riego con agua residual. Los valores ligeramente alcalinos coinciden con los suelos de escasa profundidad. Los valores básicos y medianamente básicos se distribuyen cercanos a Palmillas y Motovatha coincidiendo con zonas de riego con aguas mezcladas. La distribución de los valores de pH en KCl relación 1:2.5 es semejante a la del pH en agua, los valores más bajos se localizan en la franja central y los más altos cercanos a las partes relativamente más altas con suelos someros (*Esquema 7 y 8*).

La fertilidad con relación a la CIC, Nt, P asimilable, K⁺ intercambiable y MO es mayor en la franja central y concuerda con algunas zonas de mayor contenido de arcillas y de mayor tiempo de riego con agua residual, disminuyendo hacia las zonas de suelos más someros (*Esquema 10, 11, 12, 13 y 14*).

La concentración de Ca^{2+} intercambiable es mayor en la zona de suelos someros disminuyendo hacia los de mayor profundidad, caso contrario al K^+ , Mg^{2+} y Na^+ que también coinciden con áreas de riego con aguas negras (*Esquema 15, 16, 17 y 18*). Los valores de CE aumentan hacia zonas con mayor tiempo con aguas negras y mezcladas asociado a los incrementos de Na^+ y Mg^{2+} intercambiables (*Esquema 9*). Los CaCO_3 totales son más abundantes en las zonas relacionadas a mayor altitud y menor profundidad de suelo (c. B. Juárez, mesa rincón-los caballos, palmillas y dos cerritos) a diferencia de la franja central de suelos más profundos y donde se incrementa el tiempo de riego (*Esquema 6*).

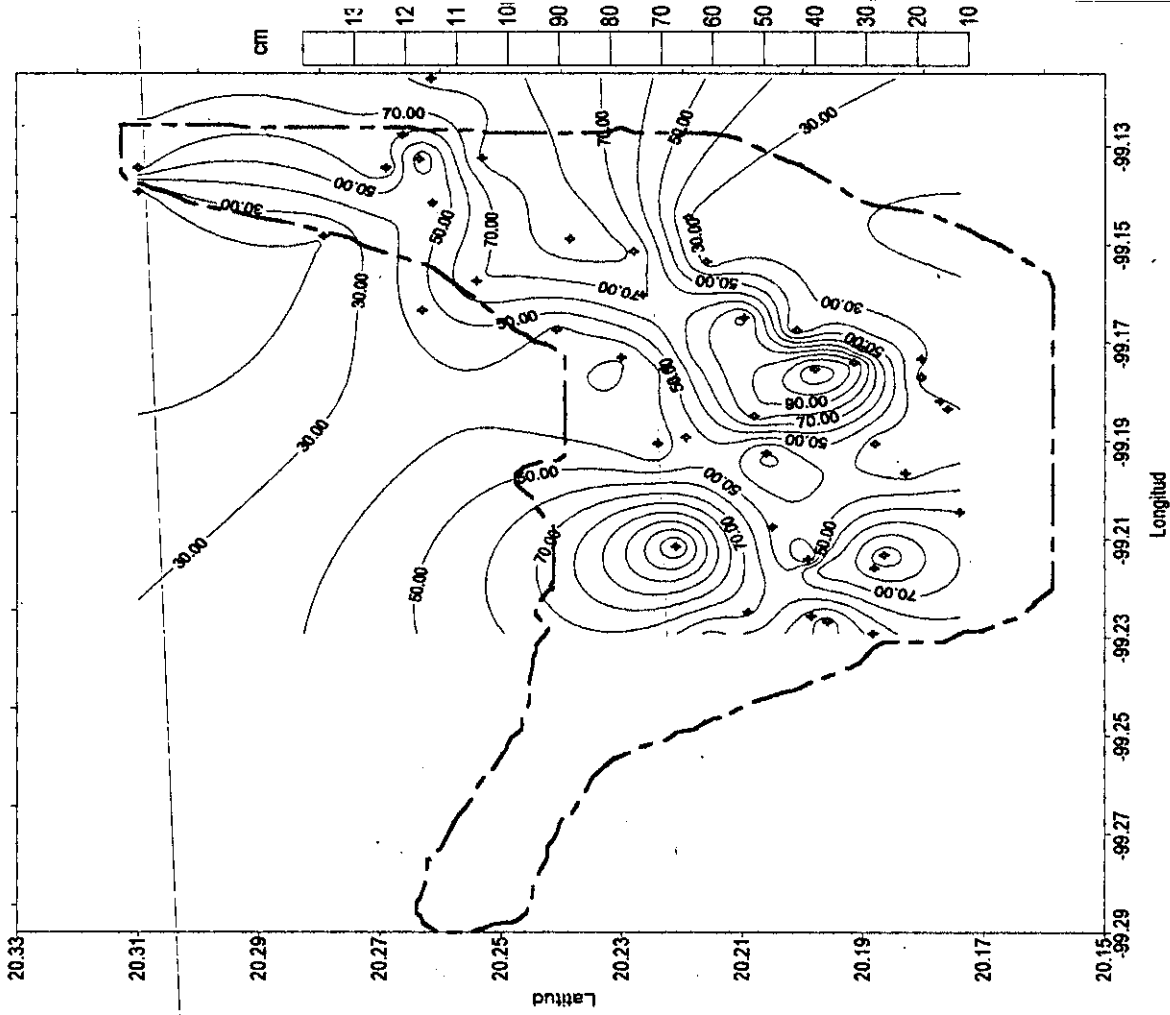
Ante los parámetros físicos y químicos señalados anteriormente, las Subunidades de suelo de acuerdo a la nomenclatura de la FAO Petric Calcisols, Eutri-Petri Calcisols, Eutri-Petric Calcaric Phaeozems y Petri-Eutri Luvic Phaeozems se distribuyen en función de la acumulación diferencial de la MO, arcillas en zonas del límite petrocálcico. Mediante fotointerpretación, el mapa de suelos del INEGI (*op. cit.*) y dados los datos obtenidos en los perfiles y las barrenaciones, se observa que los Petric Calcisols se distribuyen en una franja que bordea ligeramente al cerro Benito Juárez en donde concuerda con el riego de temporal y con aguas mezcladas desde 1990 conducidas por el canal Tumba. Los Petri-Calcaric Phaeozems se distribuyen abundantemente en el área donde el riego se introduce con aguas mezcladas y en una parte regada con aguas negras desde 1960-69 y 1932 respectivamente, entremezclándose posteriormente con los Petri-Eutri Luvic Phaeozems más hacia el sureste irrigado con aguas negras del canal principal Endhó desde 1932-1920. Los Eutri-Petric Calcisols se ubican en una franja que bordea a la mesa "el Rincón-Los caballos" donde el riego es con aguas negras conducidas por el canal Lateral Alto Requena (*Mapas 4 y 7, Esquema 19*).

VARIACIÓN DE LA ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR



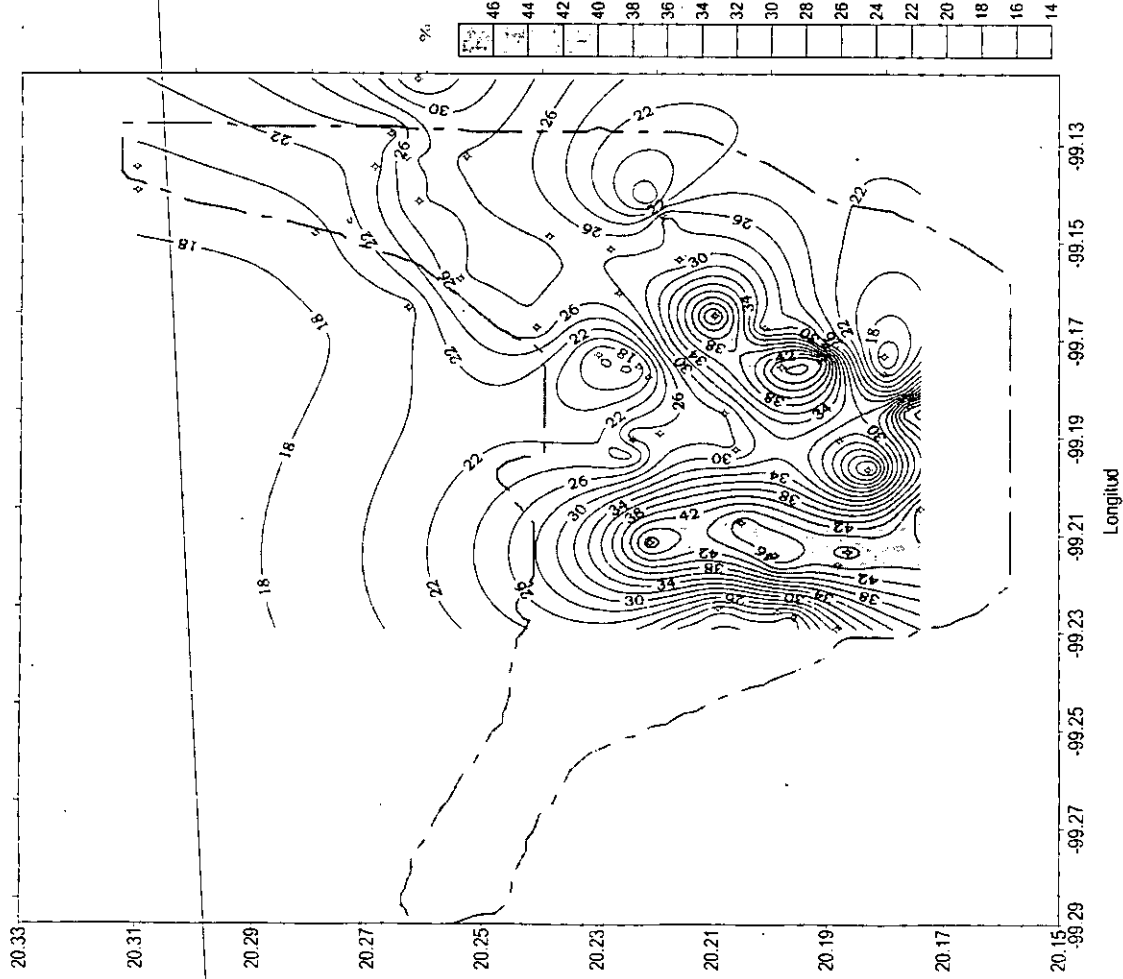
Esquema 1.- Variación de la altitud en el área de estudio dentro del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo. Los puntos de muestreo se señalan con rojo, las barrenaciones se indican con números ordinales.

VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL SUELO



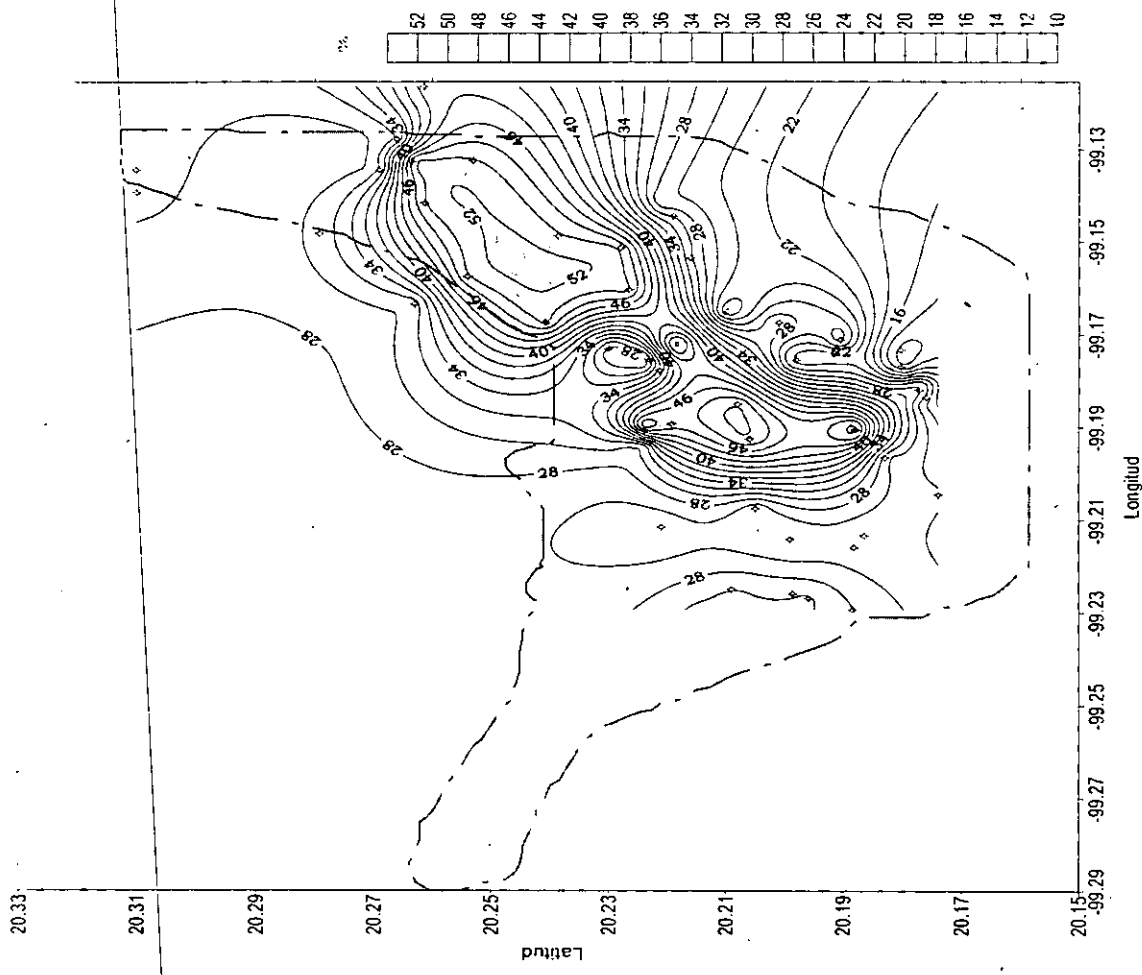
Esquema 2.- Variación de la profundidad del suelo en el municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE ARCILLAS



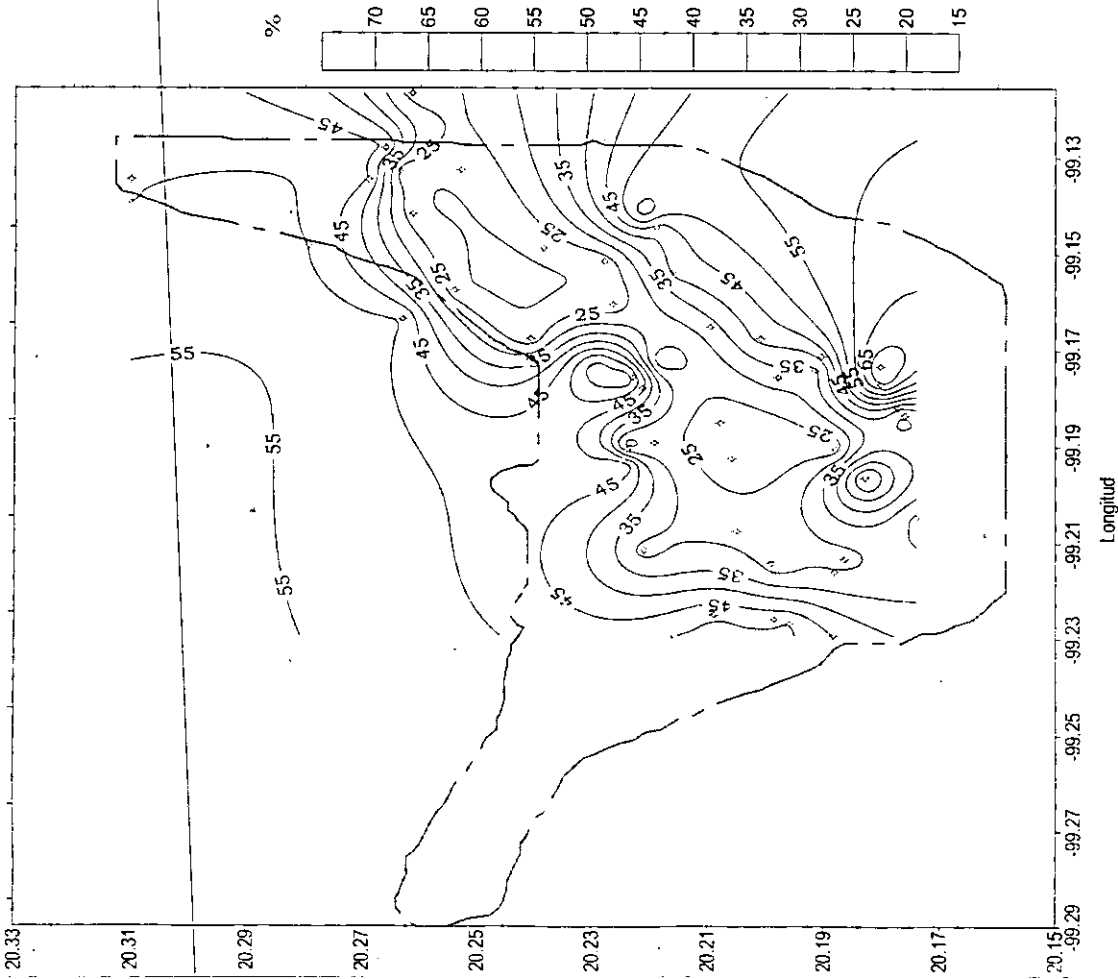
Esquema 3.- Variación del contenido porcentual de arcillas en sub-horizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCION DEL PORCENTAJE DE LIMO



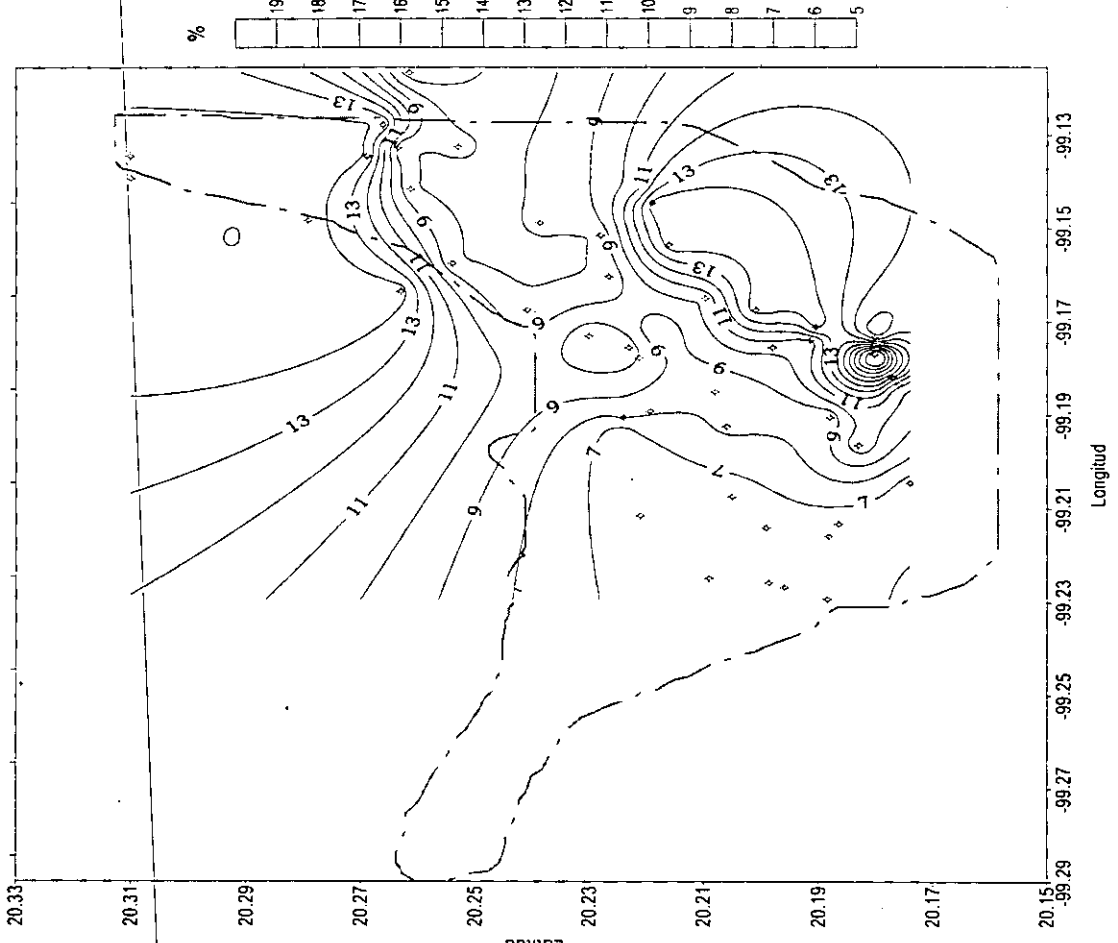
Esquema 4.- Variación del contenido porcentual de limo en los subhorizontes Ap11 el municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE ARENA



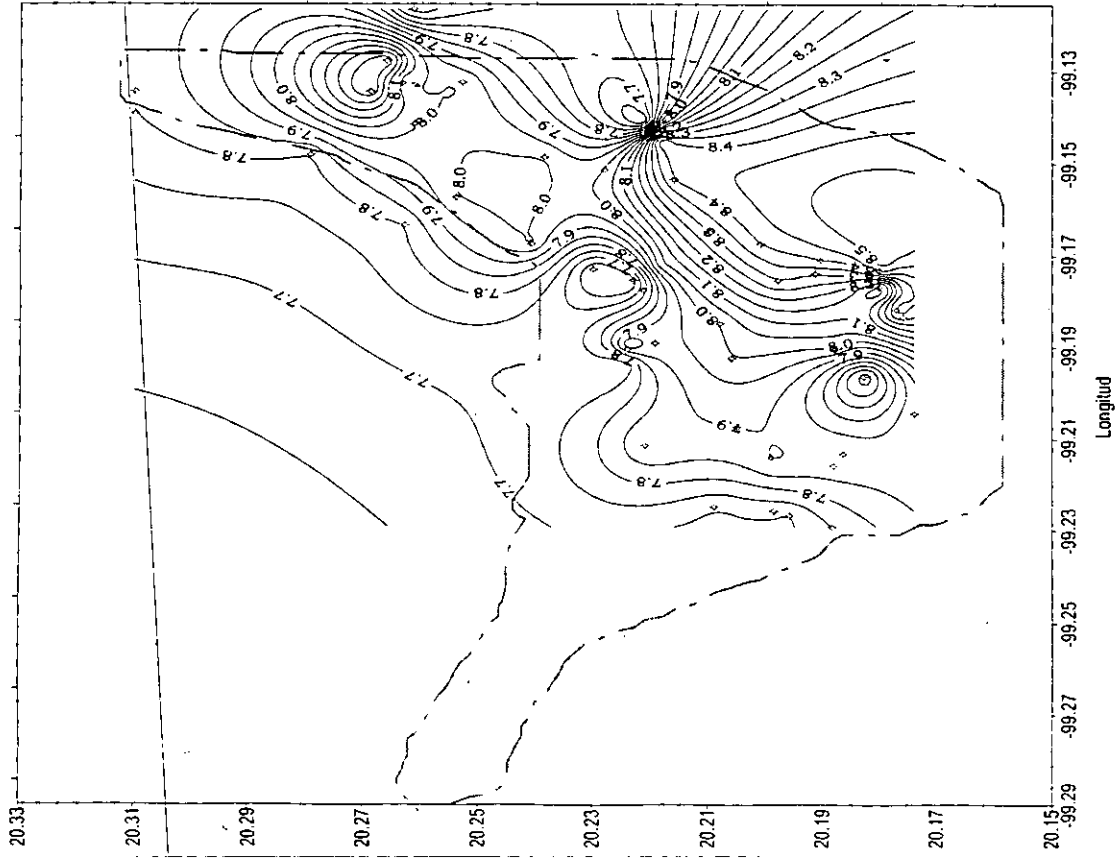
Esquema 5.- Variación del porcentaje de arenas en los subhorizontes Ap 1 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DE LOS CARBONATOS TOTALES



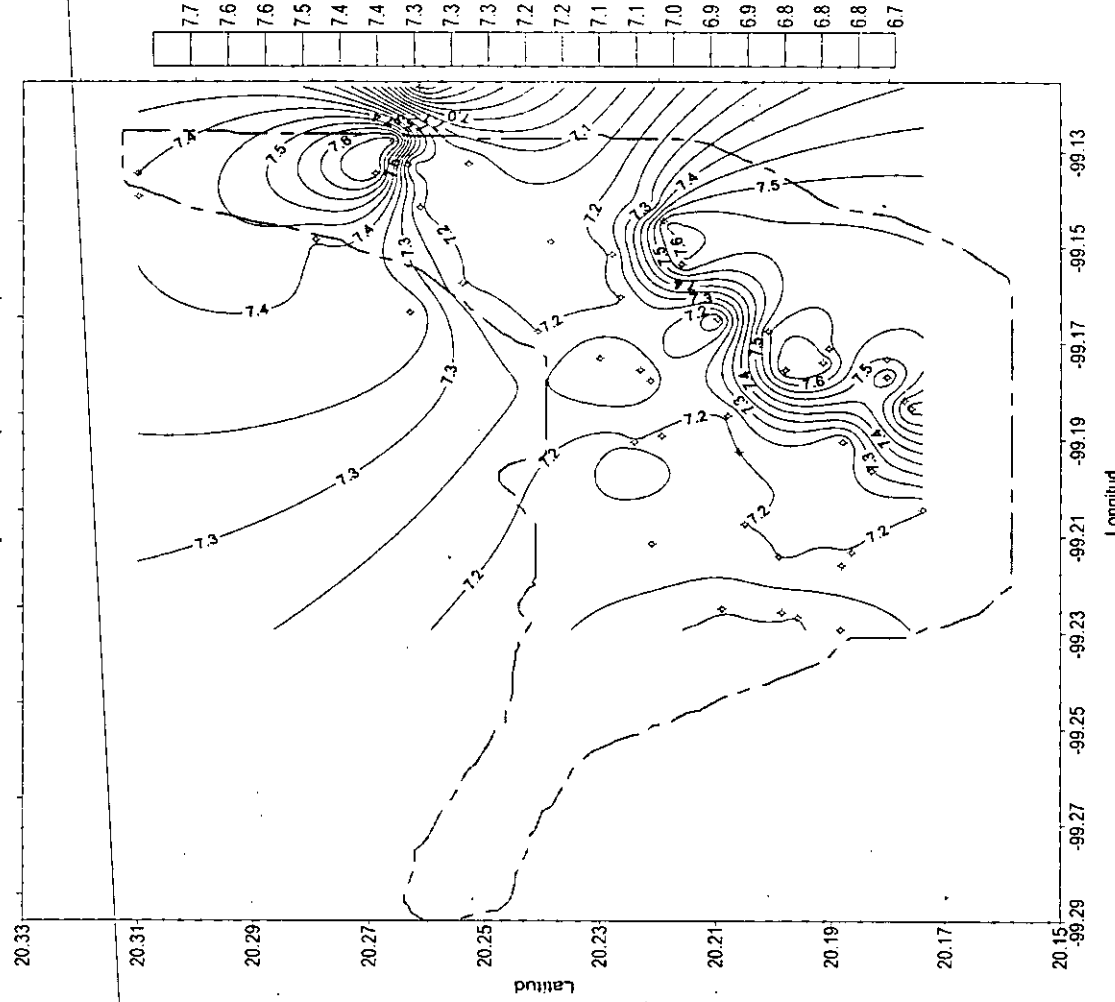
Esquema 6.- Variación de los contenidos porcentuales de carbonatos totales en subhorizontes Ap de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

VARIACIÓN DEL pH EN AGUA



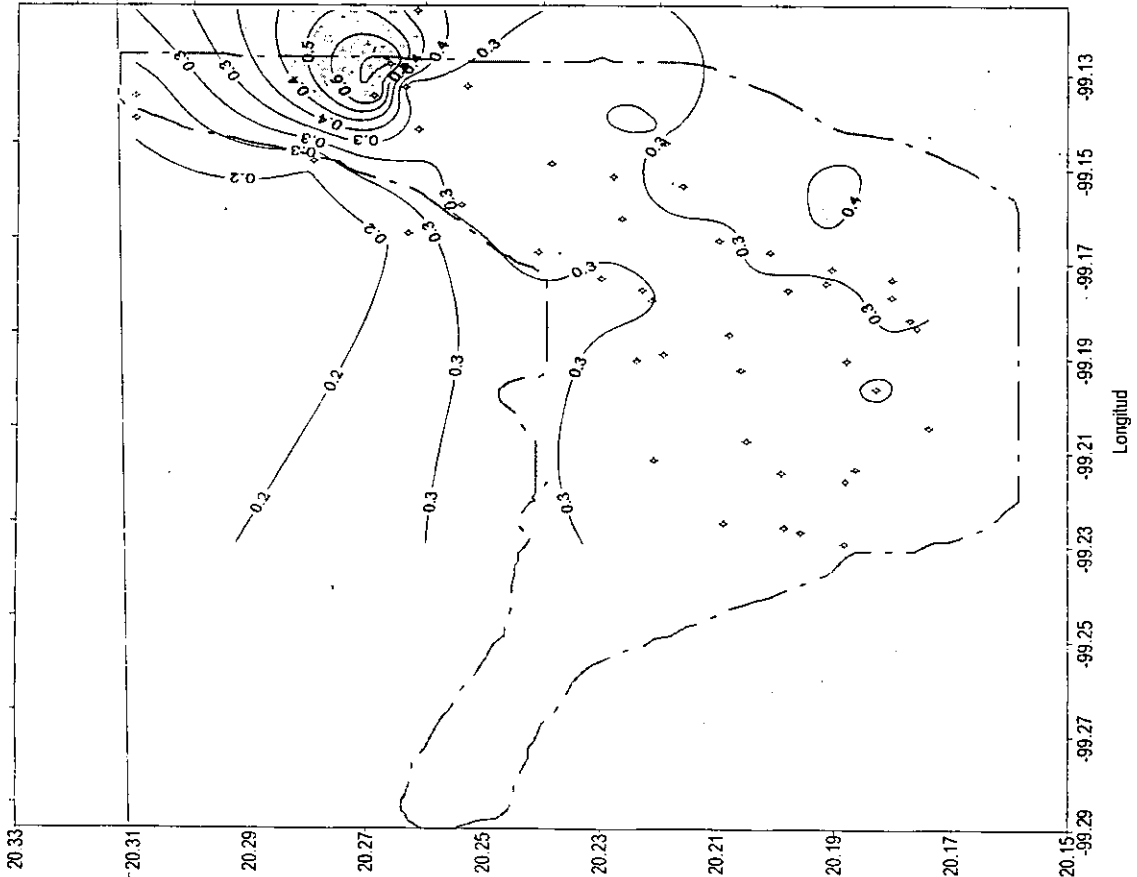
Esquema 7.- Variación del pH en los subhorizontes Ap11 del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo. Se empleó la lectura del pH en dilución 1:2.5

VARIACIÓN DEL pH EN KCl (dilución 1:2.5)



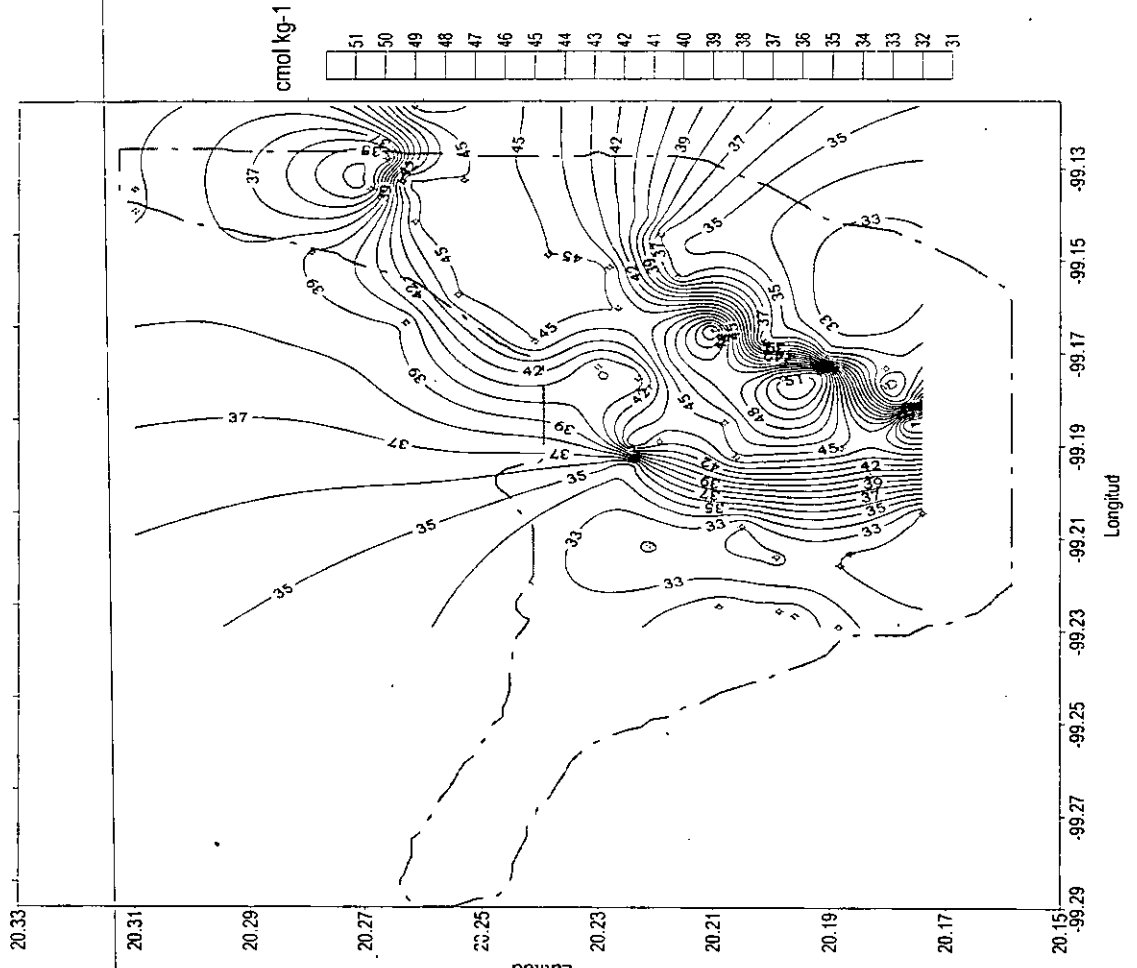
Esquema 8.- Variación de los valores de pH en KCl 1N pH7 en dilución 1:2.5 en subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA



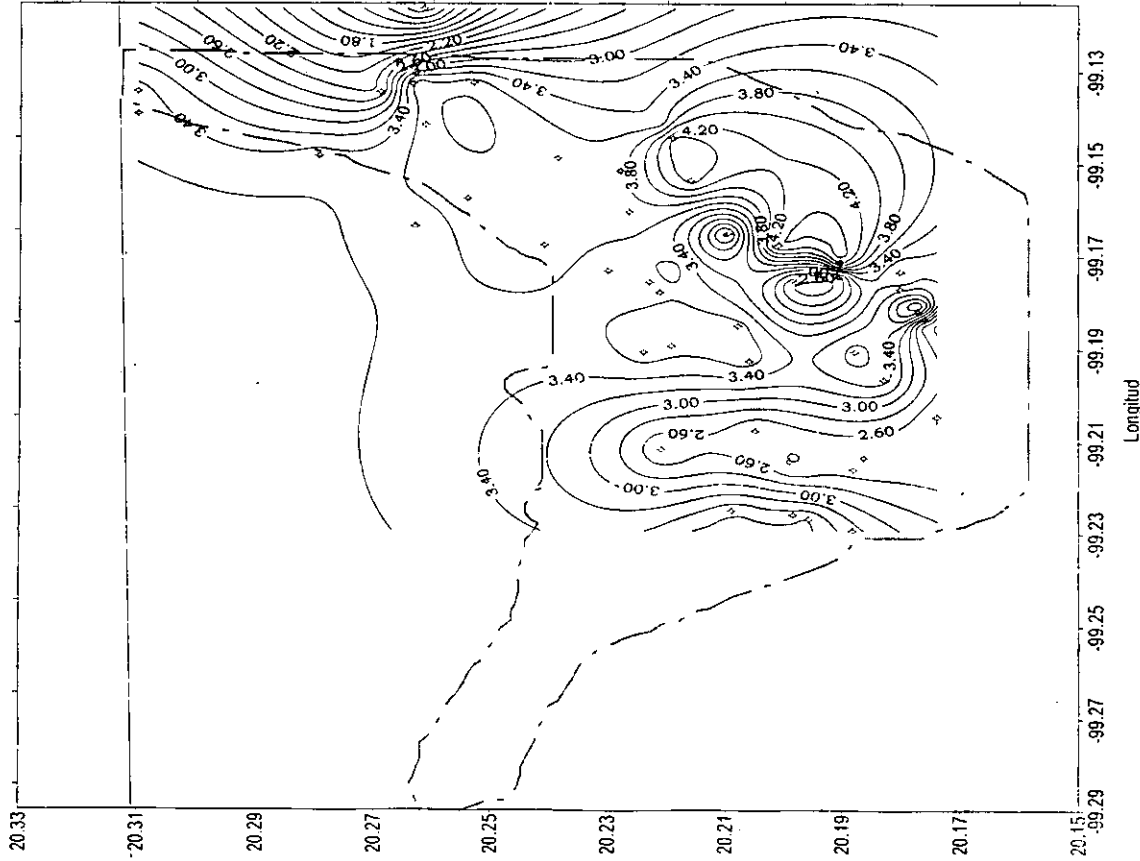
Esquema 9.- Variación de los valores de C.E. en subhorizontes Ap11 de los perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

VARIACIÓN DE LA CIC



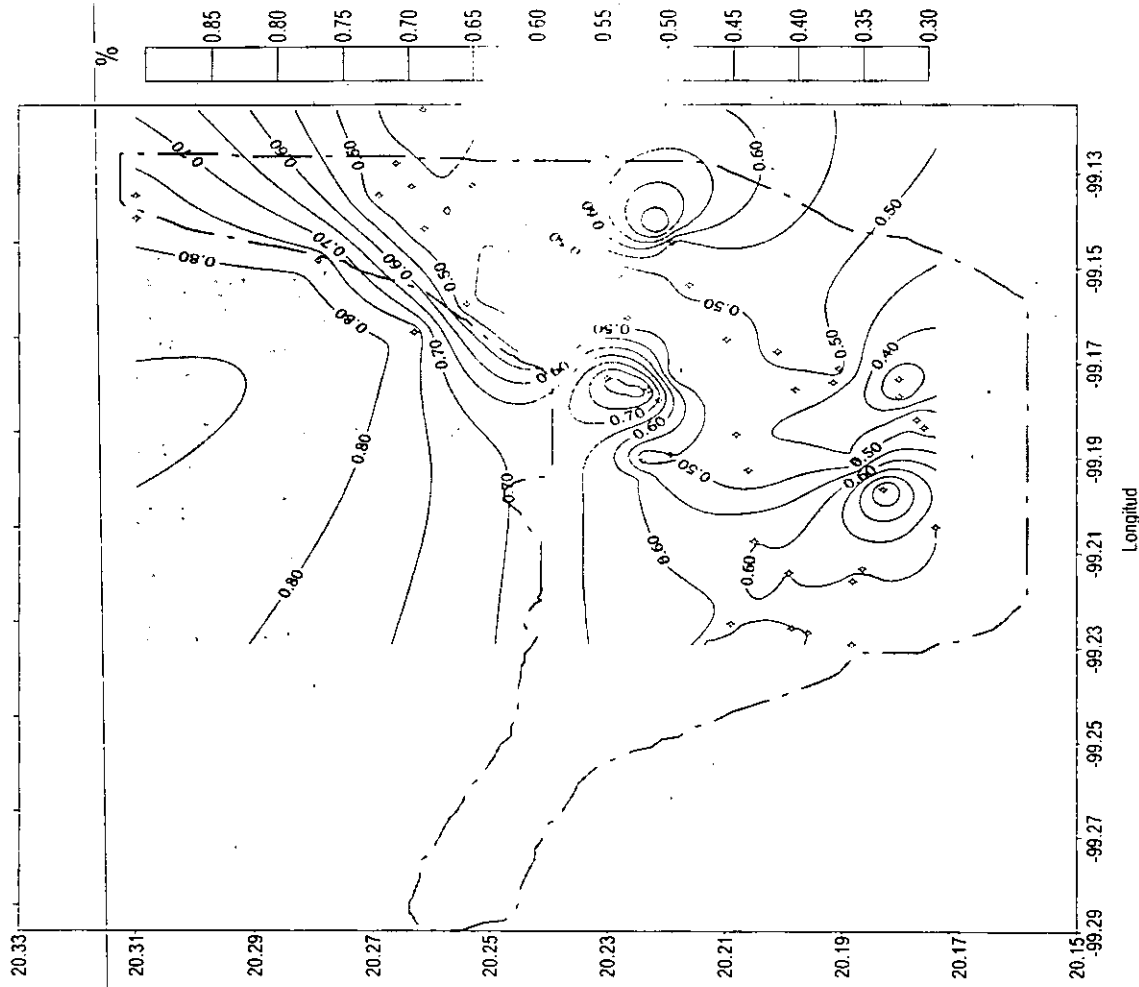
Esquema 10.- Variación de los valores de la capacidad de intercambio catiónico en los subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA



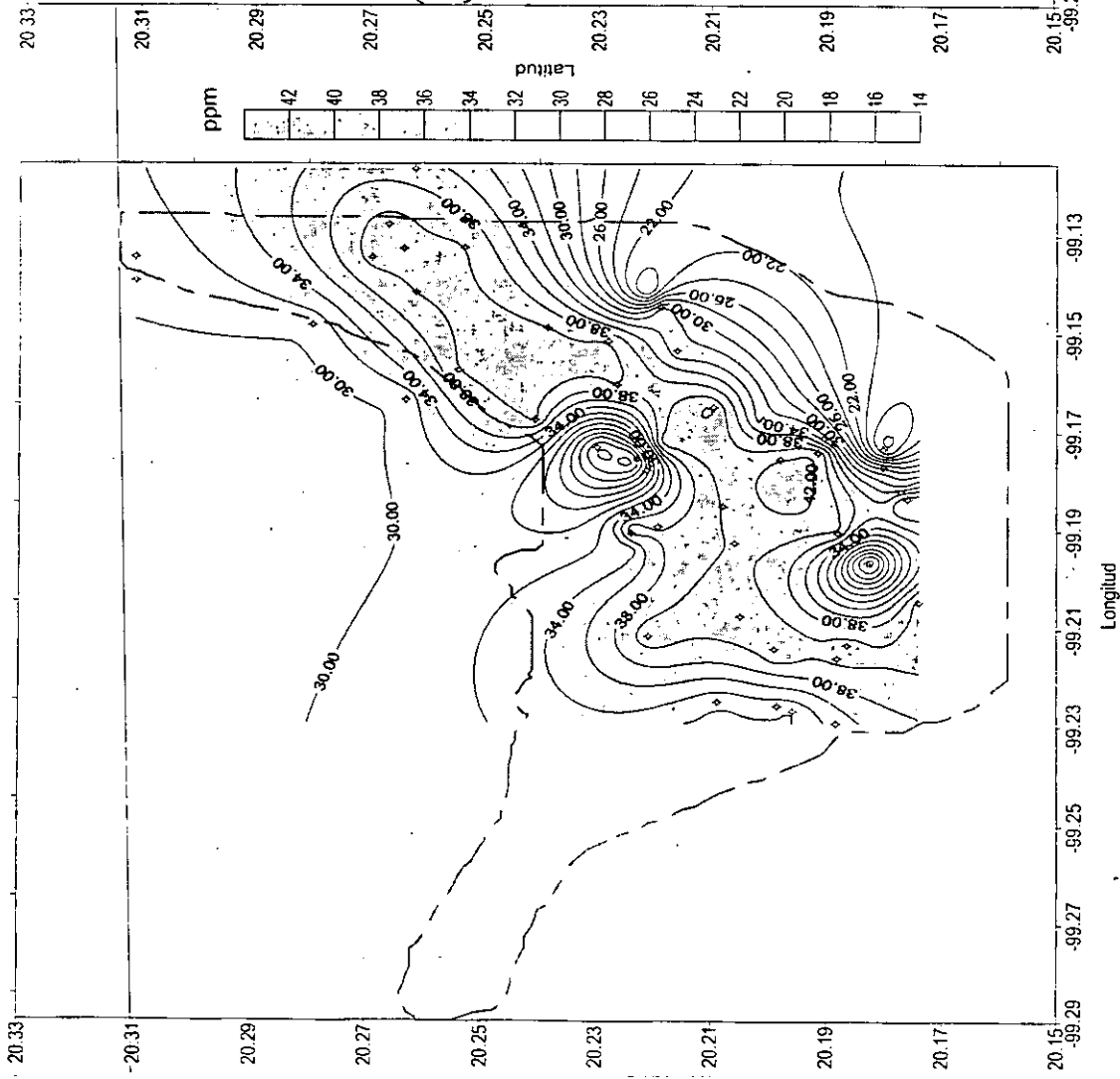
Esquema 11.- Variación del contenido porcentual de la materia orgánica en los subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquihuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL NITRÓGENO



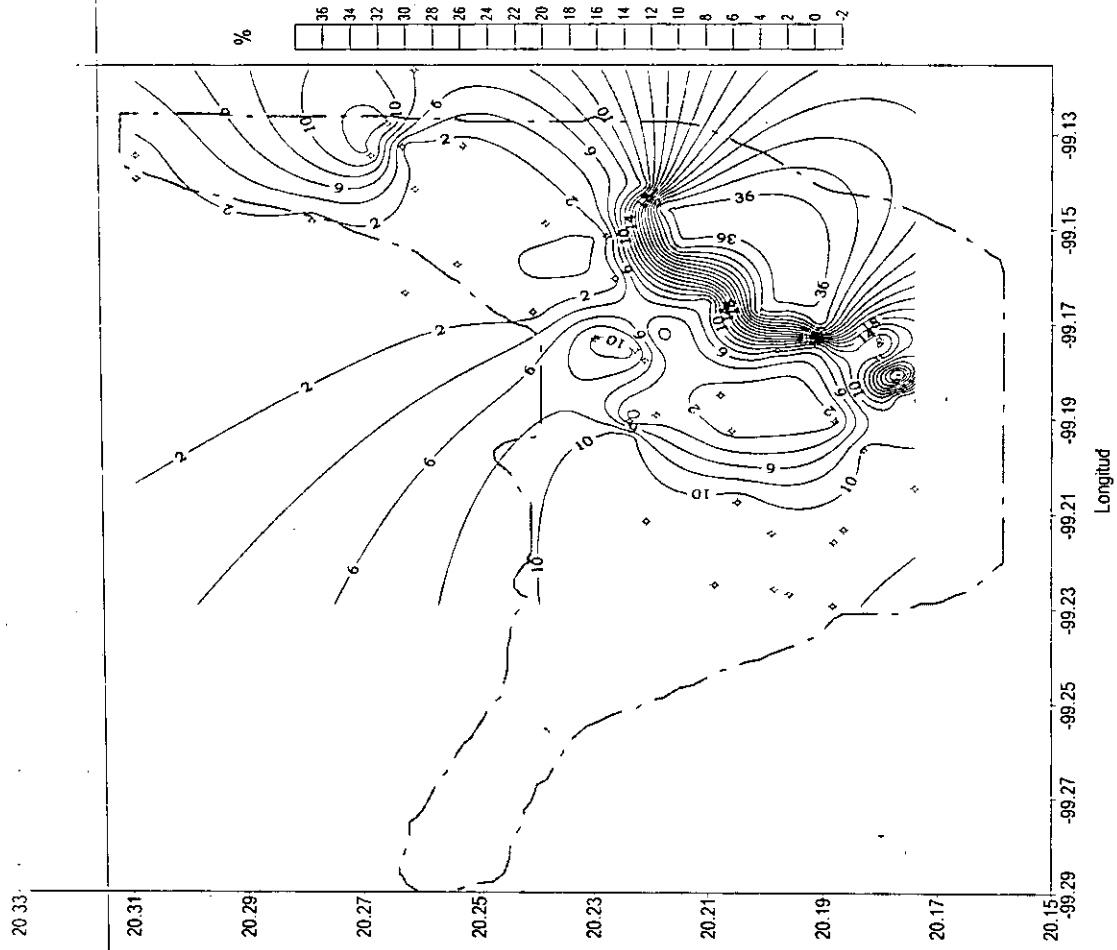
Esquema 12.- Variación de los contenidos de nitrógeno total en los subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquihuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL FÓSFORO DISPONIBLE



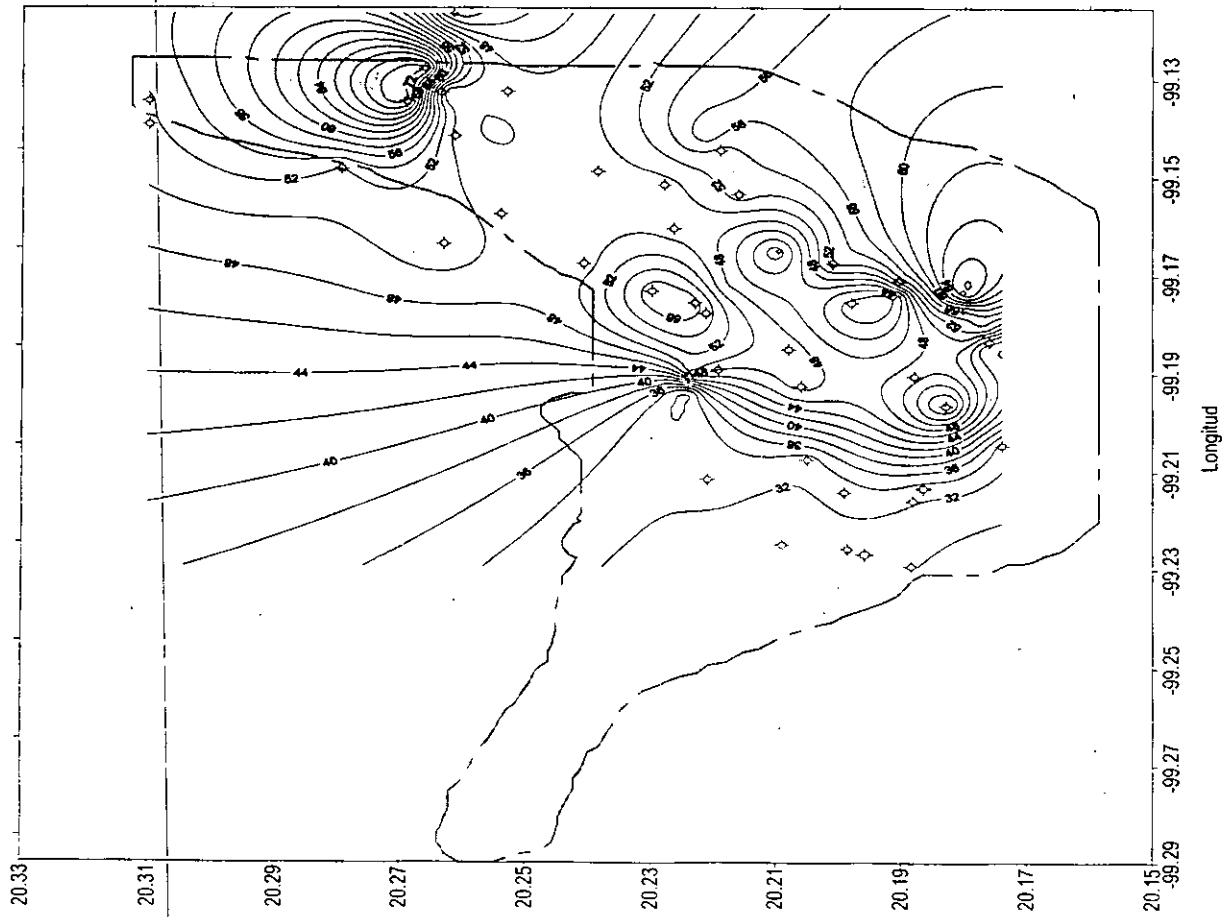
Esquema 13.- Variación de los contenidos de fósforo disponible en los subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DE LOS NITRATOS



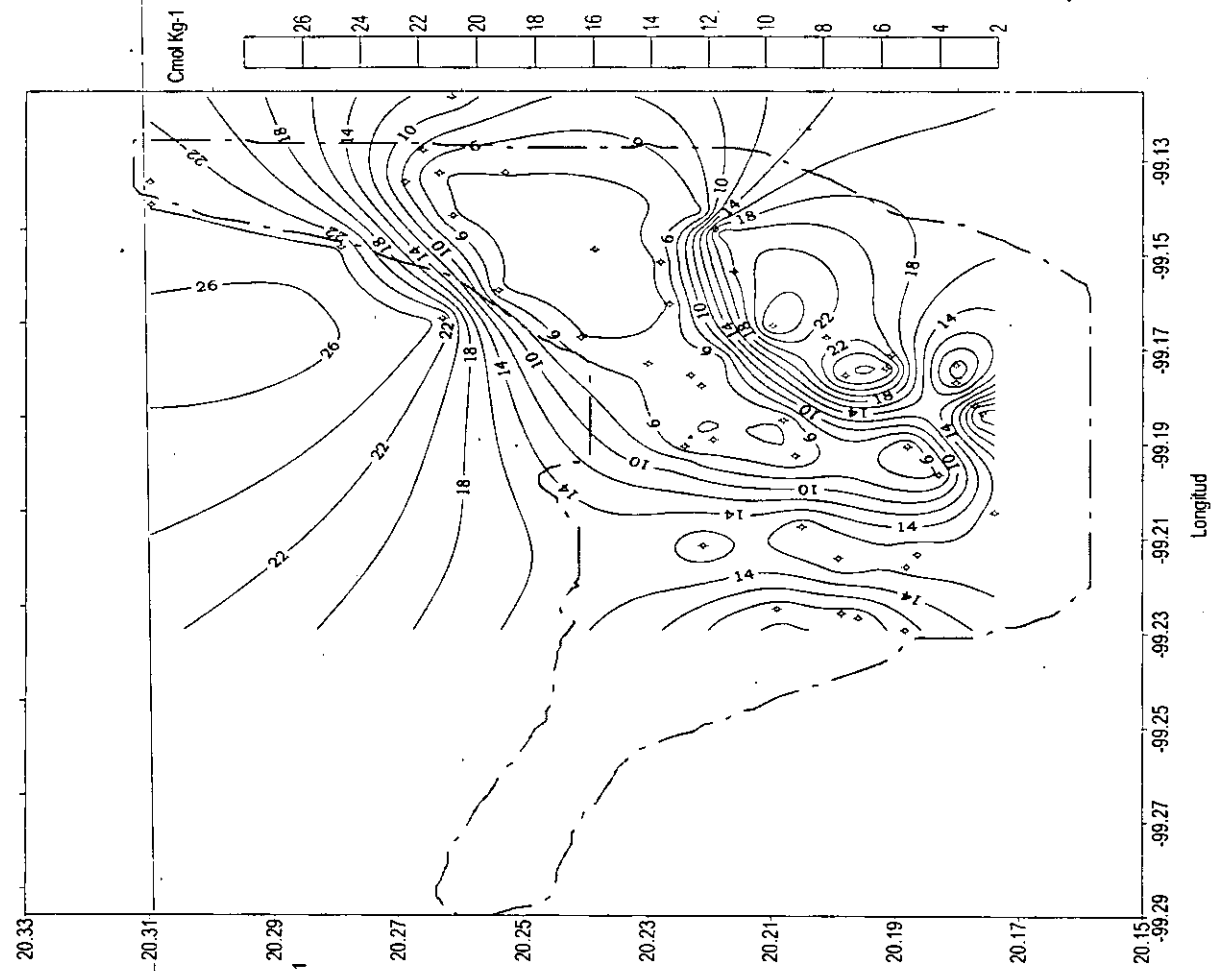
Esquema 14.- Variación de los contenidos de nitratos en subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL CALCIO INTERCAMBIABLE



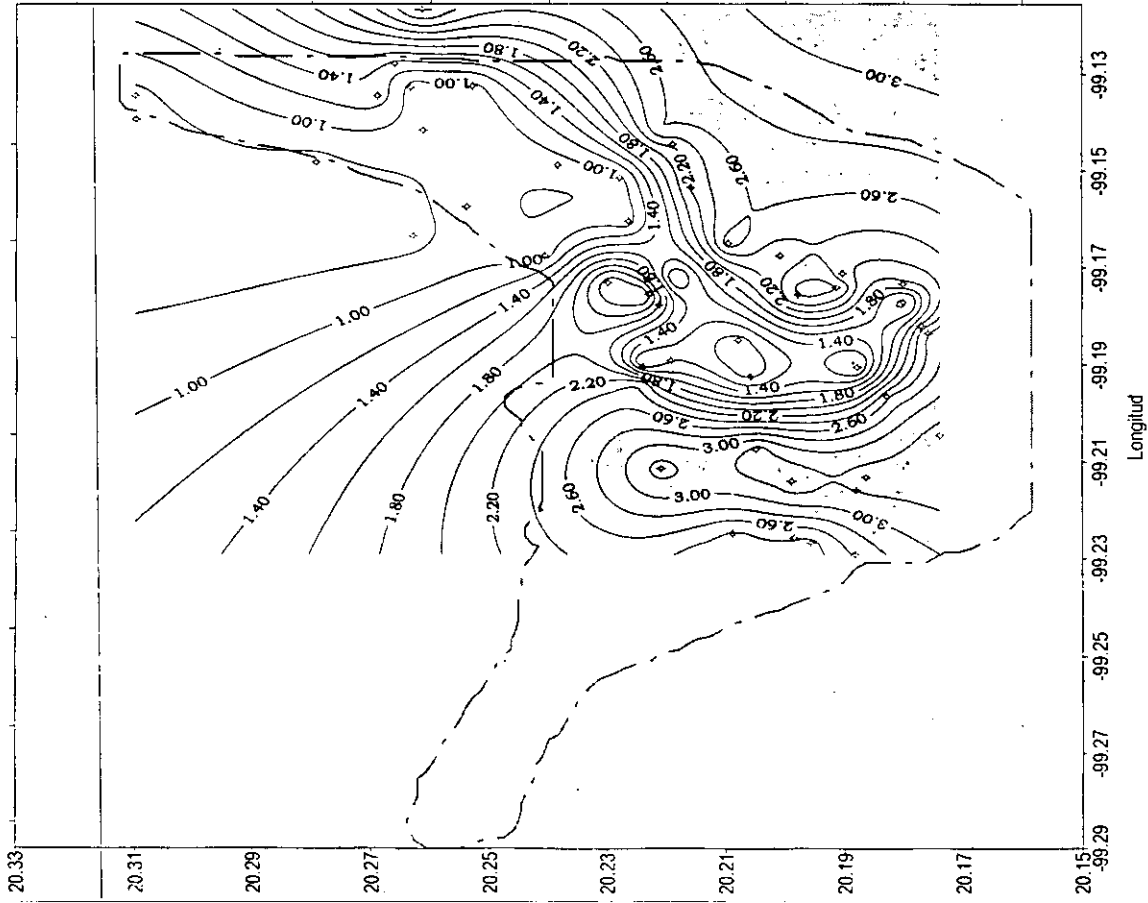
Esquema 15.- Variación de los contenidos de calcio intercambiable de subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL MAGNESIO INTERCAMBIABLE



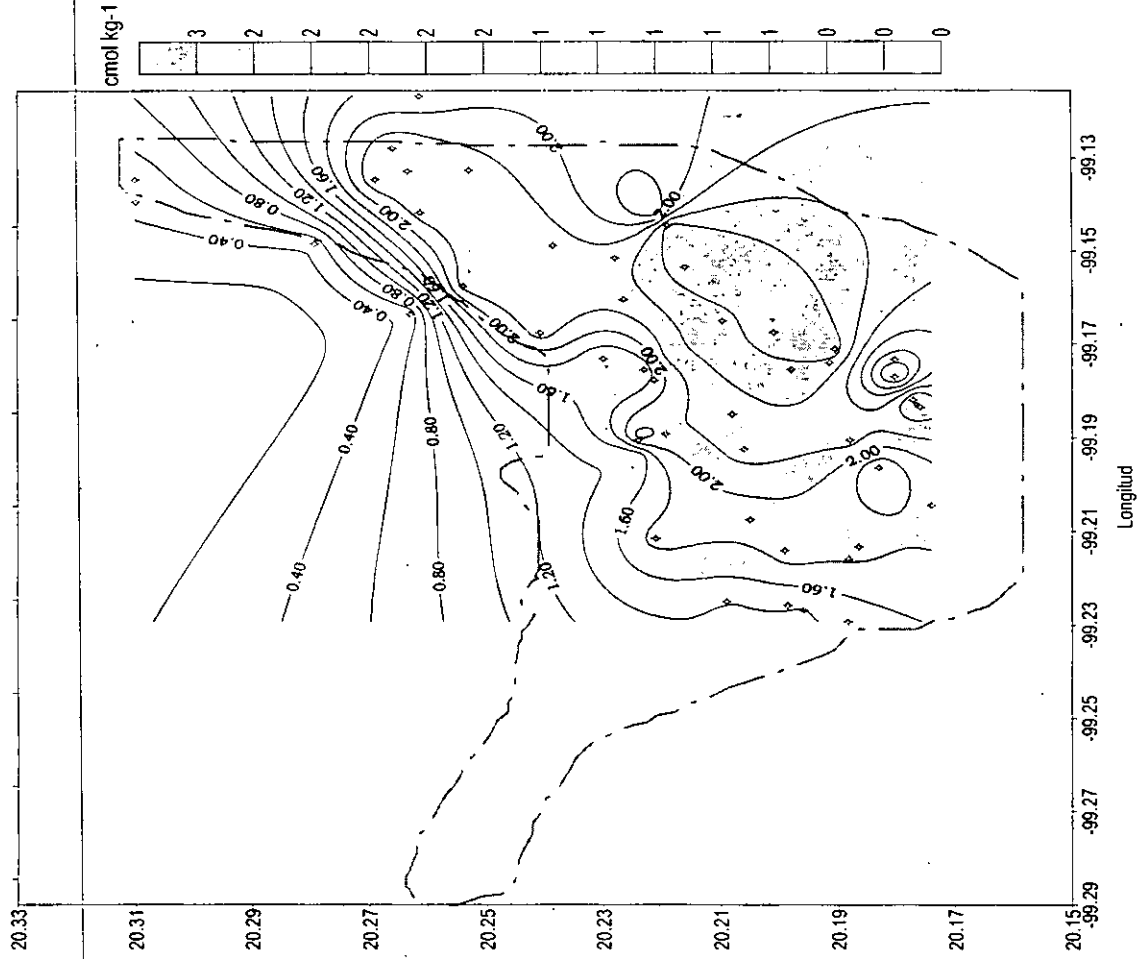
Esquema 16.- Variación de los contenidos de magnesio intercambiable de subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DEL POTASIO INTERCAMBIABLE



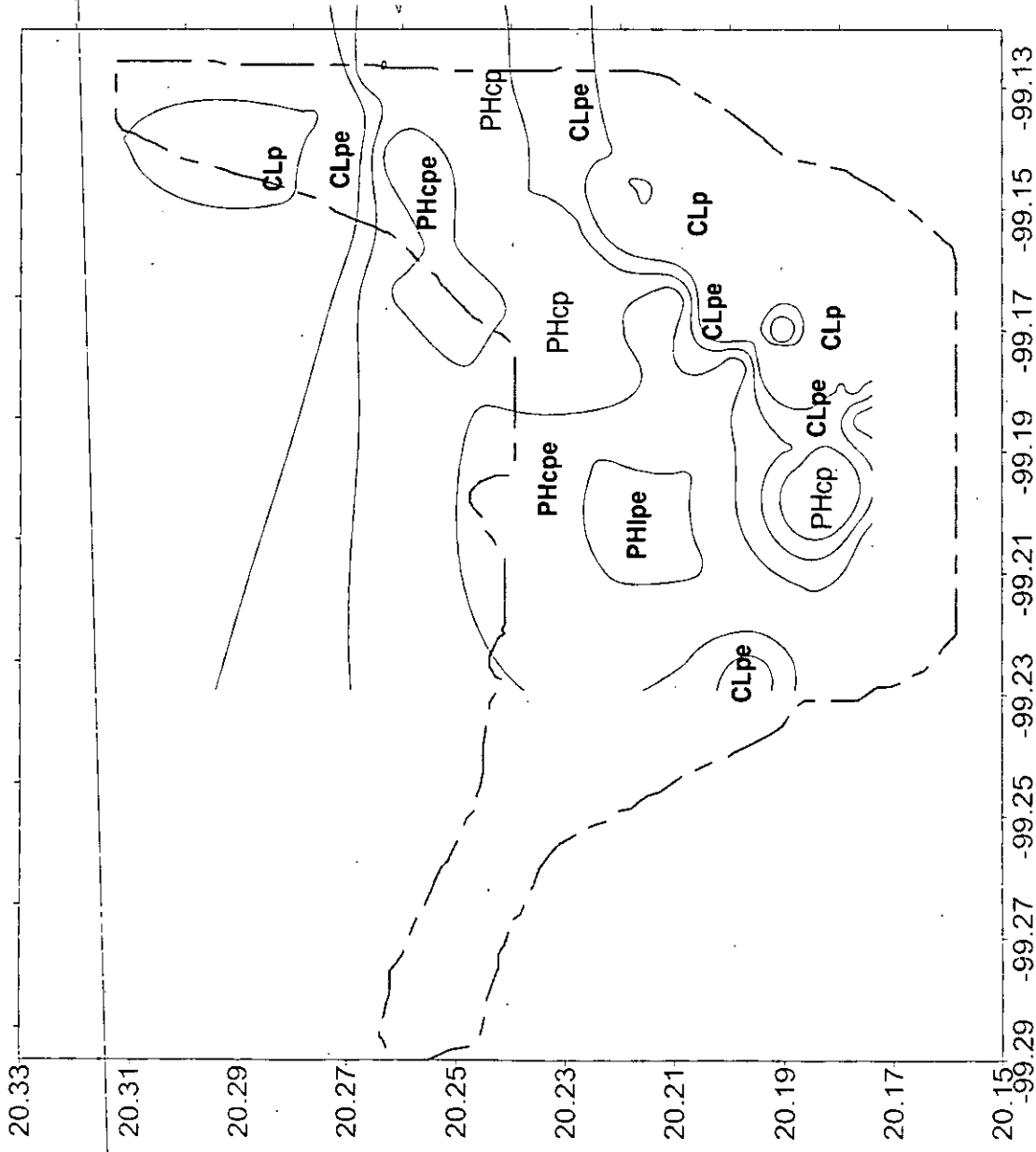
Esquema 17.- Variación del contenido de potasio intercambiable de los subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

DISTRIBUCIÓN DE SODIO INTERCAMBIABLE



Esquema 18.- Variación de los contenidos de Sodio Intercambiable en los subhorizontes Ap11 de perfiles del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo.

Suelos del Área de Estudio



Clave

- Eutri-Petri Luvic Phaeozems (PHlpe)
- Eutri-Petri Calcaric Phaeozem (PHcpe)
- Petri Calcaric Phaeozems (PHcp)
- Eutri-Petric Calcisols (CLpe)
- Petric Calcisols (CLp)

Longitud

Esquema 19.- Distribución de las Subunidades de Suelos del Área de Estudio, Municipio de Mixquiahuala, Hgo. (Basado en el sistema de clasificación FAO, 1999)

VIII. DISCUSIÓN

En condiciones naturales, la zona de estudio tiene una cantidad limitada de humedad en el suelo y un régimen de temperatura térmico que provocan poca alteración y lixiviación, lo que promueven el desarrollo de suelos tipificados como áridos bajo el esquema de zonalización geográfica, el material parental de la zona es calcáreo, con presencia de materiales ígneos (que los agricultores han removido de sus parcelas), lo que influye en el desarrollo de suelos relativamente pobres en MO, con baja agregación, baja fertilidad y con elevados contenidos de CaCO_3 que caracterizan al Grupo Calcisols [FAO-UNESCO, 1999].

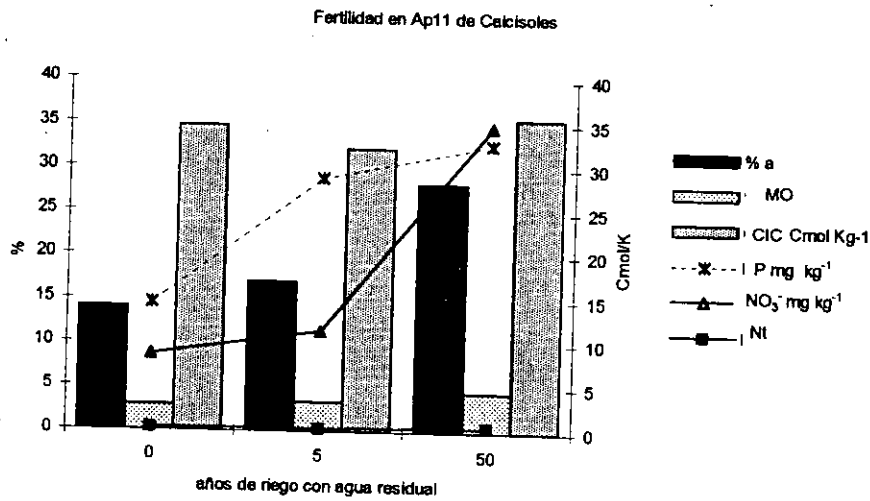
Sin embargo, como se ha observado anteriormente, el riego con aguas residuales ha tenido un efecto positivo en las propiedades químicas de los suelos del área de estudio, el análisis de cada grupo de suelo encontrado refleja un aumento en los contenidos de MO, Nt, NO_3^- , P asimilable, Mg^{2+} y K^+ intercambiables que repercuten en la fertilidad y en la agregación del suelo en el horizonte Ap de los Calcisoles (*Tablas 38 y 40, perfiles 1, 2 y 3*). El manejo de las parcelas de cultivo, el riego continuo y el aporte de nutrientes promueven una mayor alteración y lixiviación de los materiales originarios a diferencia de las condiciones naturales, lo que a su vez modifica otras características del suelo como los valores de pH, CIC, CE y el contenido de CaCO_3 , HCO_3^- , arenas, limos y arcillas (*Tablas 38 y 40, perfiles 1, 2 y 3*).

La depositación diferencial de MO y macro y micronutrientes que depende del tiempo de riego, la clase de agua de riego (blanca, negra y gris), y el uso intensivo del suelo, intervienen en la variación de la fertilidad y morfología de suelos regados con aguas residuales, lo que es observado en la disminución de los contenidos de MO en el subhorizonte Ap11 de algunos Phaeozems (*Tablas 39 y 40*), además de que no se observa un gradiente de depositación muy marcado, en los esquemas de cada una de las propiedades físicas y químicas evaluadas, que esté relacionado con el tiempo y tipo de agua de riego (*Esquemas*). Sin embargo, esto se debe a que la densidad de muestreo en las diferentes clases de agua en los Phaeozems no es elevada (*Tablas 39 y 40*).

La mayoría de los suelos estudiados tienen un perfil de tipo AC o AR, solo los perfiles más profundos presentan acumulación de arcilla y horizonte (B), su distribución está asociada con el relieve y su desarrollo natural se ve influenciado por la intervención humana (*Perfiles 1 a 11*).

El análisis físico y químico de los perfiles 1, 2 y 3, ejemplifican el aumento en los contenidos de K^+ , Mg^{2+} y Na^+ como bases intercambiables en los Calcisoles, que junto con el aumento de N, P asimilable y MO, lo que sumado al incremento de arcillas y al ligero decremento del pH promueve una mayor fertilidad y una

mejor agregación, ligero decremento de la DA y aumento de la porosidad, lo que también es observado en el análisis de regresión lineal (*Perfiles 1, 2 y 3, tablas 38 y 40, gráficas 77, 78 y 79*). Sin embargo, junto con estos beneficios también hay una tendencia hacia a la salinización, alcalinización y pérdida de la estabilidad estructural señalada por el aumento del índice Mg-Na [Flores *et al.*, *op. cit.*], el lavado continuo de los carbonatos por el agua residual, el relieve y la disminución del contenido de Ca^{2+} provocan que esta tendencia se incremente en los perfiles 3 y 5, aunque en el perfil 4 el índice Mg-Na es bajo probablemente debido al sobrelavado de Na^+ y Mg^{2+} intercambiables por el riego (*Perfiles 1, 2, 3, 4 y 5*).



Gráfica 77.- Evolución de las características físicas y químicas que repercuten en la fertilidad en los subhorizontes Ap₁₁ de los perfiles 1, 2 y 3.

El perfil 6 se ubica a una altitud donde no llega el agua residual y el riego es de temporal, sin embargo, la conservación de la cobertura vegetal natural y el empleo de barreras de *Agave sp.* promueven el mantenimiento y desarrollo del suelo evitando la erosión. A diferencia de los perfiles 1, 2 y 3 correspondientes a Eutri-Petric Calcicustolls, en donde el lavado y la maquinaria provocan cierta erosión, el mantenimiento de estas condiciones permiten el desarrollo de un suelo de mayor profundidad con suficientes nutrimentos derivados de la reincorporación orgánica de raíces y microfauna.

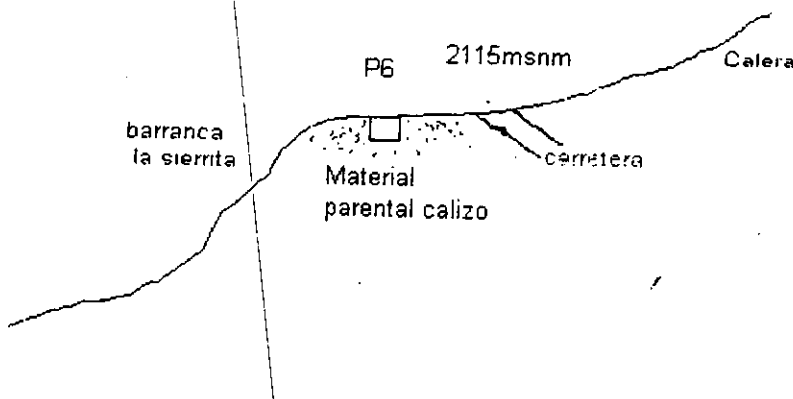
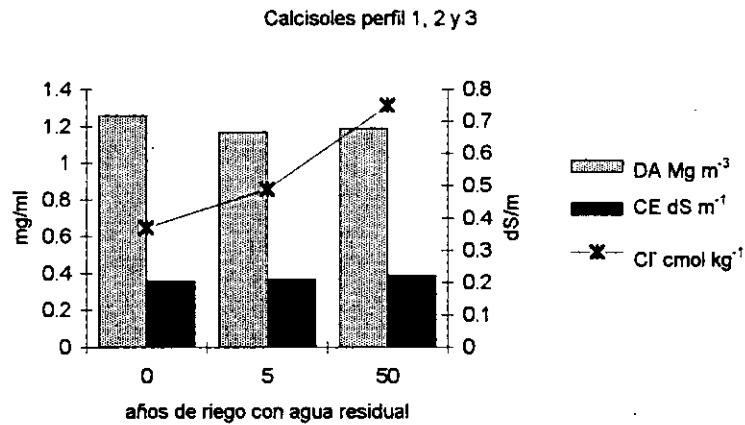
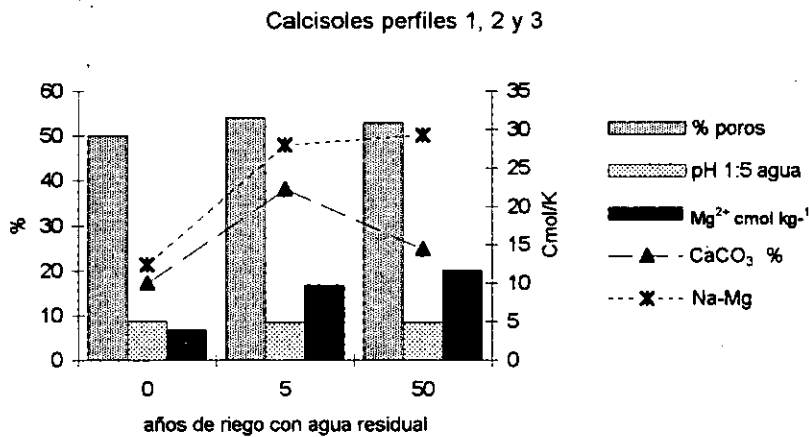


Figura 15.- Situación geomorfológica del perfil 6.



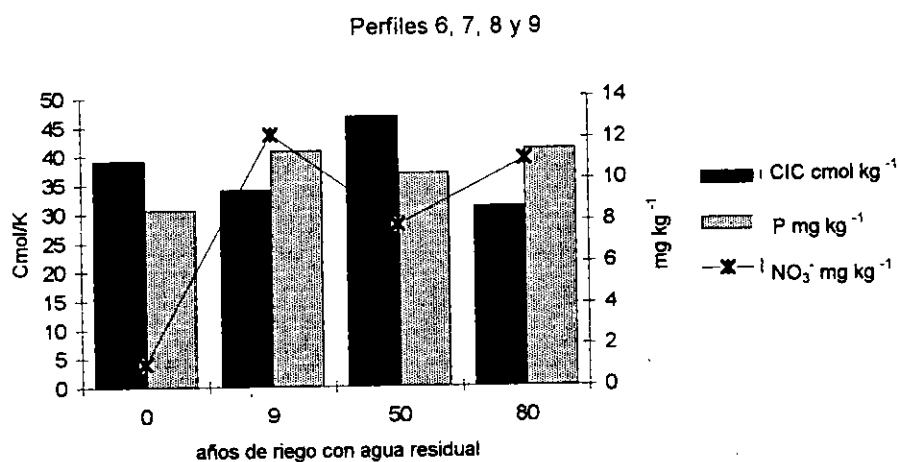
Gráfica 78.- Evolución de las propiedades físicas y químicas que repercuten en la morfología en los subhorizontes Ap₁₁ de los perfiles 1, 2 y 3 con 0, 5 y 50 años de riego con aguas negras.



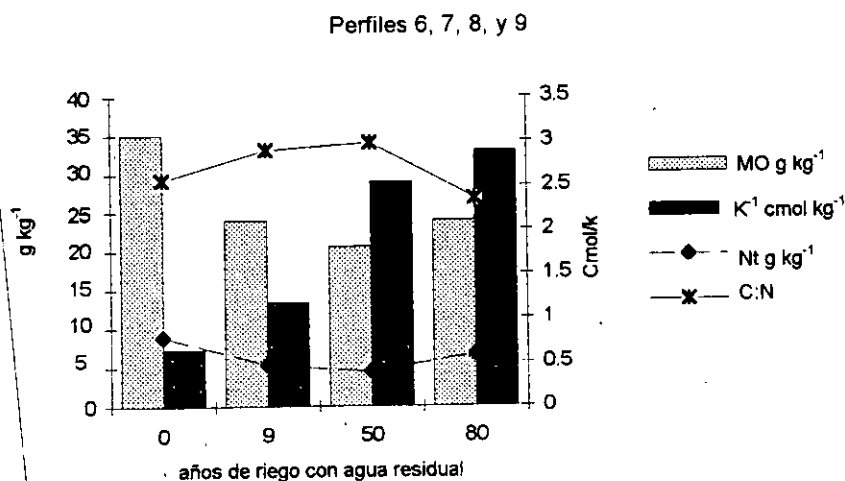
Gráfica 79.- Evolución de las propiedades físicas y químicas que repercuten en la morfología en los subhorizontes Ap₁₁ de perfiles 1, 2 y 3 con 0, 5 y 50 años de riego con aguas negras.

En zonas más bajas del área de estudio la acumulación de materia orgánica y de arcilla junto con la meteorización por el riego con aguas residuales, promueven el desarrollo de suelos relativamente más profundos, en comparación con los calcisoles, que son los Phaeozems (*Perfiles 7, 8, 9, 10 y 11*). Los índices de correlación que indican la probabilidad del aumento de los contenidos de P asimilable, K⁺, Na⁺ y Mg²⁺ intercambiables, y el decremento de CaCO₃ totales, HCO₃⁻ solubles y los valores de pH con el tiempo de riego con agua residual en los Phaeozems, son más altos a diferencia de los Calcisoles (*Tablas 40 y 41*). Sin embargo, hay un elevado índice de correlación que señala la probabilidad de disminución de los contenidos de MO y Nt con el tiempo de riego, lo que puede deberse al uso intensivo del suelo o a la depositación diferencial de estos nutrientes por la clase de agua residual, que

a su vez repercute en el comportamiento de la CIC al disminuir sus valores en Ap_{11} y aumentar en Ap_{12} , debido al aumento de arcillas en Ap_{12} (Tabla 41). En estos suelos se registra un aumento de la DA y decremento de la DR y del porcentaje de poros con el tiempo de riego con agua residual en comparación con los Calcisoles lo que coincide con la disminución de MO y el aumento de arcillas (Tabla 41). El aumento del índice Mg-Na y en la CE con el tiempo de riego tiene un índice de correlación más elevado, a diferencia del índice registrado en los calcisoles, con lo que la probabilidad de salinización, alcalinización y pérdida de la estabilidad estructural es mayor en los Phaeozems.

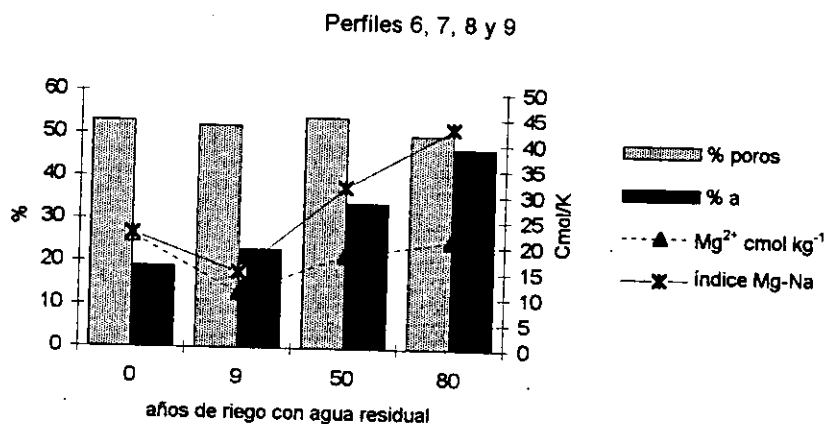


Gráfica 80.- Evolución de las características químicas que repercuten en la fertilidad en los subhorizontes Ap_{11} de los perfiles 6, 7, 8 y 9 con 0, 9, 50 y 80 años de riego con aguas residuales.

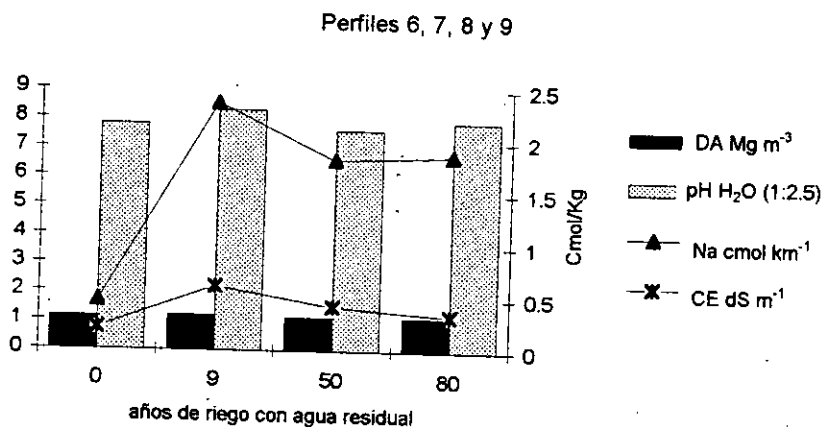


Gráfica 81.- Evolución de las características químicas que repercuten en la fertilidad en los subhorizontes Ap_{11} de los perfiles 6, 7, 8 y 9 con 0, 9, 50 y 80 años de riego con aguas residuales.

La distribución de los suelos de la zona se encuentra asociada también al relieve, y siendo el rasgo que determinó la planeación y distribución de los canales de riego, hay cierta relación en la distribución de los suelos con las zonas de riego y el tiempo que tienen con riego (*Mapa 5 y 8*).



Gráfica 82.- Evolución de las propiedades físicas y químicas que repercuten en la morfología en los subhorizontes Ap11 de los perfiles 6, 7, 8 y 9 con 0, 9, 50 y 80 años de riego con aguas residuales.



Gráfica 83.- Evolución de las propiedades físicas y químicas que repercuten en la morfología en los subhorizontes Ap11 de los perfiles 6, 7, 8 y 9 con 0, 9, 50 y 80 años de riego con aguas residuales.

Debido a la dinámica de redepositación de CaCO_3 y de MgCO_3 formando el caliche, aportados por el material parental y por el agua residual, en zonas con mayor tiempo de riego se pueden encontrar Pheozems con petrocálcico cercano a la superficie, pero la mayoría de los agricultores lo roturan mediante arado profundo. En suelos donde el petrocálcico se llega a formar a más de 1 m de profundidad, el contenido de arcillas es muy alto (50%), lo que puede ser debido probablemente a

la neoformación de arcillas mediante la meteorización por lavado o por el aporte de estas por el agua residual y mediante procesos aluviales y coluviales [Kovda & Lobova, 1968], generando suelos muy agrietados y masivos como en los perfiles 10 y 11 [Russell, *op. cit.*].

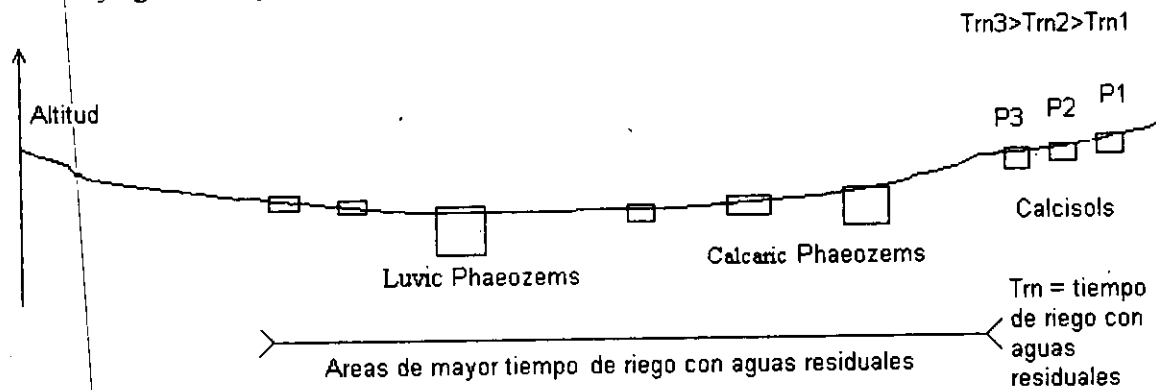


Figura 16.- Patrones de distribución de los suelos en el área de cultivo condicionados por el tiempo de riego con aguas residuales y por el relieve.

La tendencia a la acumulación de Na^+ y Mg^{2+} mencionada anteriormente contribuye al deterioro de las propiedades físicas de los suelos con gran contenido de arcilla, promoviendo la inestabilidad de los agregados, el aumento del índice Na-Mg debido al aporte de Na^+ y Mg a través de las aguas residuales y el aumento de arcillas en el suelo pueden provocar la inestabilidad en los agregados, las partículas de arcilla y MO se dispersan y la estructura del suelo es inestable en agua siendo muy plásticas y adherentes en húmedo y formando los terrones masivos, duros y compactos en seco que se observaron en el muestreo de campo (*Anexo 1, Perfiles*), lo que representa una desventaja del riego con aguas residuales. Las zonas de mayor tiempo de riego con aguas residuales y sobre todo con aguas clasificadas como negras, tienen mayor riesgo de salinización, alcalinización y pérdida de la estabilidad de los agregados, ocurriendo tanto en Phaeozems como en Calcisols si no se da un manejo adecuado al suelo mediante el desplazamiento de estos cationes del suelo. Existe un alto riesgo de acumulación de metales pesados y contaminantes orgánicos hidrófobos e hidrófilos aportados por el agua residual en las zonas donde se presenta el mayor contenido de MO y de arcillas, debido a la retención o sorción por parte de estas partículas del suelo que, junto con el pH básico de la solución del suelo, limitan su disponibilidad para ser absorbidos por las plantas, aunque en los suelos más profundos los valores de pH en Ap_{11} tienden a ser neutros. Por otro lado, las zonas que no presentan elevados contenidos de arcilla y MO prácticamente no ofrecen muchas oportunidades de retención de contaminantes provocando su lavado hacia otros cuerpos de agua subterráneos o de drenaje (*Esquemas 3 y 11*).

IX. CONCLUSIONES

1. Se ha profundizado en la clasificación de los suelos muestreados, de 11 perfiles muestreados, 6 pertenecen al Grupo Calcisol, de estos dos pertenecen a la Subunidad Petric Calcisol (*Perfiles 1 y 6*) y cuatro a la Subunidad Eutri-petric Calcisol (*Perfiles 2, 3, 4 y 5*). Los cinco perfiles restantes pertenecen al Grupo Phaeozem, de los cuales tres pertenecen a la Unidad Calcaric Phaeozems, Subunidad Eutri-petric Calcaric Phaeozem (*Perfiles 7, 8 y 9*) y dos pertenecen a la Unidad Luvic Phaeozem, Subunidad Petri-Luvic Phaeozem.
2. En las propiedades físicas se observa un obscurecimiento del suelo (de 10YR5/2 a 10YR4/1), una mejor estabilidad en los agregados, disminución en los valores de DA y DR, y aumento de la porosidad con un índice de 0.7, 0.54 y 0.77, respectivamente, conforme aumenta el tiempo de riego con aguas negras en el subhorizonte Ap₁₁ de los suelos del Grupo Calcisols (*Tabla 40*). La disminución en el contenido de arenas y el aumento de arcillas y limos tienen una correlación de 0.82, 0.96 y 0.61, respectivamente, con relación al tiempo de riego con aguas negras, pero en este caso hay una influencia dada por el relieve (*Perfiles 1 a 4*). En cuanto a las propiedades químicas, hay un aumento de los contenidos de C, Nt, K⁺, P asimilable y NO₃⁻ con un índice de correlación de 0.73, 0.9, 0.78, 0.66 y 0.46, respectivamente, conforme aumenta el tiempo de riego con aguas negras en el subhorizonte Ap₁₁ de los suelos del Grupo Calcisols, que como nutrimentos, junto con el aumento de arcillas y el ligero aumento de la CIC, aumentan la fertilidad del suelo (*Tabla 40*). Hay una disminución de los valores de pH, CE y de los contenidos de CaCO₃ y HCO₃⁻ solubles con el tiempo de riego, con índices de correlación de 0.7, 0.59 y 0.75 respectivamente. Sin embargo, se observan ligeros aumentos en los contenidos de Na⁺ y Mg²⁺ intercambiables que, junto con la ligera disminución del Ca²⁺ intercambiable, aumentan el índice Mg-Na y las relaciones Ca:Na y Ca:Mg (*Perfiles 1 a 4*).
3. Dentro de las características físicas de los Phaeozems, el obscurecimiento del suelo en el subhorizonte Ap₁₁ tiene relación con el tipo de agua de riego (blanca, mezclada o negra) y no se observa una relación entre el desarrollo de la agregación y el tiempo de riego con aguas residuales. Hay un aumento de la plasticidad y adhesividad del suelo y del desarrollo de los agregados donde aumentan los contenidos de arcillas, Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables (*Perfiles 10 y 11, Tabla 41*). Hay un aumento de la DA y una disminución de la DR y de la porosidad conforme aumenta el tiempo de riego con aguas residuales, con un índice de correlación de 0.16, 0.22 y 0.5 en Ap₁₁ y 0.6, 0.29 y 0.96 en Ap₁₂, respectivamente (*Tabla 41*). Dentro de las fracciones texturales, hay una disminución

en el contenido de arenas y aumento del contenido de arcillas y limos con una correlación de 0.94, 0.88 y 0.62, respectivamente, con respecto al tiempo de riego en el subhorizonte Ap₁₂ (Tabla 41). Dentro de las características químicas, hay un aumento en los contenidos de P, K⁺, Na⁺ y Mg²⁺ intercambiables, Cl⁻, NO₃⁻ y una disminución de C y Nt en el subhorizonte Ap₁₁ de los Phaeozems con forme aumenta el tiempo de riego con aguas residuales, con índices de correlación de 0.77, 0.99, 0.79, 0.35, 0.39, 0.83, 0.97 y 0.67, respectivamente (Tabla 41). En el subhorizonte Ap₁₂, el comportamiento mencionado anteriormente es similar, sin embargo el aumento de Mg²⁺ tiene una correlación de 0.96, y hay una disminución de Cl⁻ con una correlación de 0.95 (Tabla 41). Hay una disminución de los valores de pH y CIC, y de los contenidos de HCO₃⁻, CaCO₃ y Ca²⁺ intercambiable conforme aumenta el tiempo de riego con aguas residuales en el subhorizonte Ap₁₁, con índices de correlación de 0.4, 0.16, 0.84, 0.93 y 0.64, respectivamente. En Ap₁₂ hay un aumento de los valores de CIC con respecto al tiempo de riego, con un índice de correlación de 0.49, que coincide con el aumento de arcillas. Hay un aumento de los valores de CE y del índice Mg-Na conforme aumenta el tiempo de riego con aguas residuales, con índices de correlación de 0.5 y 0.94, respectivamente (Tabla 41). La disminución de los contenidos de MO y Nt en el horizonte Ap de los Phaeozems tiene relación con el uso intensivo de los suelos y con la depositación diferencial de estos nutrientes por la clase de agua residual, lo cual repercute en el comportamiento de la CIC que muestra un decremento de sus valores en Ap₁₁ y un aumento en Ap₁₂ junto con el aumento de arcillas.

4. Los datos generados por los perfiles y las barrenaciones contribuyen a la cartografía ya existente del área de estudio, la distribución de los suelos se asocia con el relieve y está condicionada por el material calcáreo, su desarrollo natural se ve influenciado por la intervención humana, en gran medida por el riego con aguas residuales. En cada Unidad de suelo se observa una mejoría de las propiedades físicas y químicas en el subhorizonte Ap que repercuten en la fertilidad y en la morfología del suelo con relación al tiempo de riego y calidad de las aguas residuales. El aumento o disminución de algunos parámetros edáficos tiene relación con la distribución de las zonas de riego y su tiempo de introducción (*Esquema 19, Anexo 1, Perfiles 1 a 11*).
5. Los datos generados en la investigación cubren los objetivos planteados inicialmente. Los resultados corroboran parcialmente las hipótesis que se plantearon, ya que en el caso de los Calcisoles, los suelos con riego de temporal y los que tienen menor tiempo de riego con aguas residuales son menos estructurados y contienen menos nutrientes que los que tienen un mayor tiempo de riego, pero en el caso de los Phaeozems no se observó esta relación.

6. Como alternativas se propone:

- Controlar el pH de la solución del suelo en función de que se observe la tendencia de alcalinización o que incremente el riesgo de absorción de metales pesados y contaminantes.
- Roturar el horizonte petrocálcico con arado profundo para promover la filtración.
- Aumentar el contenido de materia orgánica y el índice C:N mediante la adición de residuos orgánicos ricos en carbono para disminuir así el riesgo de absorción de contaminantes y promover la fertilidad en zonas donde no se observa esta tendencia.
- Para investigaciones posteriores se propone:
 - a) La realización de estudios que profundicen en determinar el tipo y origen de arcillas en el área de estudio y sus interacciones con los contaminantes orgánicos, metales pesados y el magnesio.
 - b) Evaluar la calidad de la MO y sus relaciones con la retención de contaminantes y la tasa de retención de los mismos
 - c) Evaluar la dinámica de la redepositación de los carbonatos y la relación de los contaminantes en la estructuración de sus cristales
 - d) Considerar la implementación de una norma fiscal que considere al suelo como una fuente de recursos para destinarlos a instrumentar medidas de rescate y remediación e investigación de áreas dañadas, para contribuir a la disminución de las emisiones negativas al agua residual.

X. LITERATURA CONSULTADA

- Aguilera H., N. 1989. *Tratado de Edafología de México. Tomo I*. UNAM. México. 222 p.
- Amahmid, O., Asmama, S. & K. Bouhoum. 1999. The effect of waste water reuse in irrigation on the contamination level of food crops by *Giardia cystis* and *Ascaris* eggs. *International Journal of Food Microbiology*, Vol. 49 (1-2): 19-26.
- Baver, L. D. 1956. *Soil Physics*. Chapman & Hall. New York, USA. 529 p.
- Blas-Martínez, G., Flores-Delgadillo, L., Alcalá M., R., & G. Hernández-Silva. 1995. *Metales pesados en cuatro perfiles de suelo en el estado de Hidalgo*. In García C., N. & G. R. M. Ramírez. 1995. Resúmenes in extenso del Simposio Universitario de Edafología. Fac. Cien. UNAM. pp 179.
- Blásquez L., L. 1938. *Memorias de la comisión geológica del Valle del Mezquital, Hgo.* Instituto de Geología. UNAM. México. 250 p.
- Bonneau M. & B. Souchier. 1987. *Constituyentes y propiedades del suelo*. Revisión de Duchaufour, P. & B. Souchier. Trad. Vallejo C., V. R. & E. Ferrer V. Masson, Barcelona, España
- Bonomo L., Nurizzo, C., & E. Rolle. 1999. Advanced wastewater treatment and reuse: related problems and perspectives in Italy. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40 (4-5): 21-28.
- Bouyoucos G., J. 1951 A Recalibration of the Hydrometer Method of Mechanical Analysis of Soil. *Agronomy Journal* 56: 453-456.
- Buckman O., H. & N. C. Brady. 1991. *Naturaleza y Propiedades de los suelos*. Montaner y Simon, S.A. Barcelona, Esp. 590 p.
- Brady C., N. & R. R. Weil. 1999. *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall. USA 881 p.
- Brady C., N. 1974. *The Nature and Properties of Soils*. MacMillan, New York, USA. 639 p.
- Bremner, J. M. 1965. *Total Nitrogen*. In Black, C. A., D. D. Evans, L. E. Ensminger, J. L. White, F. E. Clark. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy (ASA), Madison. Wisconsin, USA. pp 1,149-1,178.
- Cajuste, L. J.; Carrillo-González, R.; Cuevas-González, B. G.; Cajuste B., L. & E. Osoreo C. 1995. *Transporte y retención de metales pesados en aguas residuales del Valle de Mezquital*. In Tovar S., J. L., V. Ordaz Ch. y R. Quintero L. (Eds.-1995). *La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Cd. Victoria, Tamaulipas. pp 46.
- Carrillo G., R., Cruz D., J. & L. J., Cajuste. 1992. *Comparación de los niveles tóxicos de Cd y Pb en suelos con diferente contenido de Materia Orgánica*. In Tovar S., J. L., V. Ordaz Ch. y R. Quintero L. (Eds.-1995). *La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Cd. Victoria, Tamaulipas. pp 46.
- Carrillo G., R. & L. J. Cajuste. 1991. *Acumulación de Pb, Cr y Cd a través del tiempo en suelos regados con aguas residuales*. In Tovar S., J. L. y R. Quintero L. (Eds.-1991). *La investigación edafológica*

- en México 1990-1991. Memorias XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hidalgo. pp 72.
- Carrillo G., R. & L. J. Cajuste. 1991. *Cuantificación de Pb, Cr y Cd en alfalfa regadas con aguas residuales. In Tovar S., J. L. y R. Quintero L. (Eds.-1991). La investigación edafológica en México 1990-1991. Memorias XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hidalgo. pp 73.*
- Carrillo G., R., Cajuste, L. J. & L. Hernández H. 1990. *Distribución horizontal de metales pesados en un predio irrigado con agua residual. In Aguilar S., A., G. Alcántara G. & J. Etchevers, B. (Eds-1990) Memorias XXIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Comarca Lagunera, Coahuila. pp 58.*
- Carrillo G., R., Cruz D., J. & A. M. García Z. 1990. *Cuantificación de Pb, Cd y Cr con diferentes surfactantes químicos en suelos contaminados (DDR-063). In Aguilar S., A., G. Alcántara G. & J. Etchever B. (Eds-1990) Memorias XXIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Comarca Lagunera, Coahuila. pp 59.*
- Cheng K. & R. H. Bray. 1951. Two specific methods of determining Calcium and Magnesium in Soil. *Anal. Chem.* 25:655-695.
- CNA, inédito. *Mapa del Desarrollo Histórico del Riego Agrícola del DDR-063, Hidalgo.* Comisión Nacional del Agua, México.
- Contreras V., R. 1998. *Clasificación e impacto por el riego con aguas residuales de algunos suelos del DDR-063, Estado de Hidalgo.* Tesis de Licenciatura, Biología, Fac. Cien. UNAM, México. 104 p.
- Cuanalo de la Cerda, H. 1990. *Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo.* Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 40 p.
- Dana, E. S. & W. E. Ford. 1966. *A textbook of mineralogy.* John Wiley & Sons, USA.
- Díaz S., F. R. 1995. *Lodos residuales municipales en agricultura. In Tovar S., J. L., V. Ordaz Ch. y R. Quintero L. (Eds.-1995). La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas. pp 45.*
- Díaz S., F. R. & M. E. Romero V. 1995. *Utilización de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales en la agricultura. In García C., N. E.; R. M. Ramírez G. 1995. resúmenes in extenso del Simposio Universitario de Edafología. Fac. de Ciencias UNAM. pp. 142*
- Duchaufour, P. 1960. *Précis de pedologie.* Masson & Cie, Paris, France. 438 p.
- Duchaufour, P. 1984. *Edafología 1. Edafogénesis y clasificación.* Masson, Barcelona, España. 493 p.
- Duchaufour, P. 1978. *Atlas ecológico de los suelos del mundo.* Trad. M. T. Caballas F. Toray-Masson, Barcelona, España.
- Elliott H., A. 1986. Land application of municipal sewage sludge. *J. Soil. Water Cons.* 41: 5-10.
- FAO. 1998. *World reference base for soil resources.* 84 World Soil Resources Reports. International Society of Soil Science, Rome.

- FAO, 1989. *FAO/Unesco Soil Map of the World, revised legend*. World Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen, 1989.
- Flores D., L. 1997. *Fraccionamiento de metales pesados en suelos regados con aguas residuales*. In García C., N. E., A. Ibañez H. & C. Vallejo-Albarrán (Eds-1997) Seminario sobre uso de Aguas Residuales para Riego, Problemática del Valle del Mezquital, Red a-Mezquital. pp 29-39.
- Flores D., A.; V. Gálvez V.; O. Hernández L.; J. G. López A.; A. Obregón S.; R. Orellana G.; L. Otero G. & M. Valdés P. 1996. *Salinidad un nuevo concepto*. Universidad Autónoma Metropolitana-Universidad de Colima, México & CIDA-Ministerio de Agricultura-Instituto de Suelos de Cuba, Cuba. pp 51.
- Förstener, U. 1993. *Dispersion of contaminants from landfill operations*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) Migration and fate of pollutants in soils and subsoils. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp 435-446.
- Galicia P., M. S.; N. E. García C.; N. Aguilera H. 1995. Caracterización del humus en un agroecosistema chinampero de Tlahuac, D. F. In N. E. García C.; R. M. Ramírez G. Simposio Universitario de Edafología. Fac. de Ciencias UNAM. pp. 96
- Gallegos, E., Warren, A., Robies, E., Campoy, E., Calderón, A., Sainz, M. G., Bonilla, P. & O. Escolero. 1999. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40 (2): 45-52.
- García C., N. E. 2000. *Comunicación Personal*. Coordinación del Laboratorio de Edafología "Nicolás Aguilera Herrera", Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- García C., N. E. 1997. *Dinámica y retención de contaminantes en el complejo arcilla-humus de los suelos del DDR-063*. In García C., N. E., A. Ibañez H. & C. Vallejo-Albarrán (Eds-1997) Seminario sobre uso de Aguas Residuales para Riego. Problemática del Valle del Mezquital, Red a-Mezquital. pp 29-39.
- García Z., A. M. & L. J. Cajuste. 2000. *Efecto de la aplicación de fósforo sobre la movilidad de metales pesados en suelos y plantas del Valle del Mezquital, Hgo*. In Quintero-Lizaola, R., T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibañez-Huerta, N. E. García-Calderón (Eds-2000) La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados-UNAM-UACH, México pp 260-263.
- García Z., A. M., Cajuste, L. J. & J. Cruz D. 1988. *Estudio del grado de contaminación por plomo, cadmio y cromo en suelos y tejidos vegetales por el riego de aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo*. In Santelises, A. & J. Baus Picard (Ed.-1988) Memorias XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.
- García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM, México. 246 p.
- GDF. 1999. *El Informe de Gobierno: Anexo Estadístico*. Ciudad de México. pp 169-170.
- Gutiérrez R., M. E., Siebe, C. & Sommer, I. 1995. Environmental aspects of land application of wastewater from Mexico city metropolitan area: a bibliographical review and analysis of implications. *Environmental Review*. pp. 445-466.

- Haruvy, N. 1997. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 66 (1997): 113-119.
- Hassett, J. J. & W. L. Banwart. 1992. *Soils & their environment*. Prentice Hall, New Jersey, USA. pp. 205-206.
- Hernández J., A. 2000. *Comunicación personal*. Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba.
- Hernández-Silva, G; L. Flores-Delgadillo; M. Maples-Vermeersh; J. G. Solorio-Munguía & J. R. Alcalá-Martínez. 1994. Riesgo de Acumulación de Cd, Pb, Cr, y Co en 3 series de suelos del DR03, Estado de Hidalgo, México. *Rev. Mex. Cien. Geol.* Vol. 2 (1):53-61. UNAM, Instituto de Geología, México.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, USA. 771 p.
- IMT. 1998. *Génesis, identificación y uso de suelos de México: distribución, propiedades, clasificación y manejo de suelos residuales y transportados con aplicaciones a la ingeniería civil*. Instituto Mexicano de Transporte (IMT), Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Documento técnico 19. Sanfandila, Qro, México. 212 p.
- INEGI. 1997. *Perspectiva estadística de Hidalgo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. 109 p.
- INEGI. 1995. *Mixquiahuala de Juárez, Estado de Hidalgo: Cuaderno Estadístico Municipal*. Gobierno del Estado de Hidalgo, Instituto de Estadística Geografía e Informática, Ayuntamiento de Mixquiahuala de Juárez, México. 109 p.
- INEGI. 1995. *Serie de fotografías aéreas 0004, 0005 y 0006 líneas 163 y 164 zona F 14-11 escala 1: 75,000*. INEGI-SINFA, México.
- INEGI. 1995. *Carta Topográfica Mixquiahuala, escala 1:50,000, clave F14C89*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI. 1995. *Estado de Hidalgo, México: Guía turística*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. pp 79-81.
- INEGI. 1992. *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. 134 p.
- INEGI. 1984. *Carta Edafológica Mixquiahuala, escala 1:50,000, clave F14C89*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI. 1983. *Carta Geológica Pachuca, escala 1:250,000, clave F14-11*. SPP-INEGI. México.
- Jackson, M. L. 1982. *Análisis Químico del Suelo*. Traducción de Beltrán M., J. Omega. Barcelona, España. 662 p.
- Jeffrey H., H., Sabatini, D. A. & T. S. Soerens. 1993. *Fate of non-aqueous phase liquids: modeling of surfactant effects*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) Migration and fate of pollutants in soils and subsoils. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp 309-328.

- Kovda, U. A. & E. V. Lobova. 1968. *Geography and classification of soils of Asia*. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem. pp. 34-193.
- Lee R., T. 1998. Aplicación de ácido sulfúrico corrige la clorosis férrica de los cultivos en suelos calcáreos. *Terra*. Vol. 16 (2): 149-161.
- Leeper G., W. 1978. *Managing the heavy metals on the land*. G. W. Lepeer. Marcel Dekker. New York. 121 p.
- López L., J. 1985. Aspectos básicos de la Geoestadística I. *Geomimet*. Vol. 136 (jun-jul): 50-63.
- Masaphy, S. & Mandelbaum, R. T. 1997. Atrazine mineralization in slurries from soils irrigated with treated waste water. *Applied Soil Ecology*, Vol. 6 (3): 283-291.
- Mansour, M., Scheunert, I. & F. Korte. 1993. *Fate of persistent organic compounds in soil and water*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) Migration and fate of pollutants in soils and subsoils. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp 111-128.
- Mascareño C., F. 1975. *Estudio preliminar sobre contaminación de los suelos y de la producción agrícola en el DR-03 por uso de aguas negras de la Ciudad de México*. Colegio de Posgraduados de Chapingo. México. 114 p.
- Méndez G., T., Guajardo V., R. & L. Hernández H. 1990. *Impacto en los suelos del DDR-063 por el efecto de detergentes, boro, grasas y aceites presentes en las aguas residuales de la zona metropolitana de la ciudad de México*. In Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología, UNAM, México. pp 44-45.
- Méndez G., T. 1982. *Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo. por A.B.S., boro y metales pesados por el uso de aguas negras de la Ciudad de México*. Tesis de Licenciatura en Biología, Fac. Cien., UNAM. México. 109 p.
- Morales R., J. 1982. *Estudios Edafológicos en el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo*. Tesis de Licenciatura en Biología, Fac. Cien., UNAM. México. 136p.
- Munsell. 1990. *Munsell Soil Color Charts*. Baltimore Maryland, USA.
- Muñoz I., D. J. 1999. *Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital*. Tesis de Maestría, Fac. Cien., UNAM. México. 105 p.
- Olsen S. R. & L. A. Dean. 1965. *Phosphorus*. In Black C. A. et al, (Ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agronomy 9. ASA. Madison Wisconsin, USA. pp 1035-1049.
- Ortiz-Villanueva., B. 1977. *Edafología*. Escuela Nacional de Agronomía, Chapingo, México. 291 p.
- Palacio-Prieto, J. L.; C. Siebe-Grabach & A. Cortés-Anaya. 1994. Variabilidad y distribución espaciales de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el DR-03, Estado de Hidalgo, México: Parte 1, semivariogramas. *Rev. Mex. de Cien. Geol*. Vol. 11 (1): 62-67.
- Palacio-Prieto, J. L. & C. Siebe-Grabach. 1994. Variabilidad y distribución espaciales de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el DR-03, Estado de Hidalgo, México: Parte 2, cartografía. *Rev. Mex. de Cien. Geol*. Vol. 11 (1): 68-78.

- Petruzzelli, D. & A. López. 1993. *Interactions of toxic organic with subsoils components*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) Migration and fate of pollutants in soils and subsoils. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany. pp 93-110.
- Porta C., J.; M. López-Acevedo R. & C. Roquero L. 1999. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente, 2da ed. Revisada y ampliada*. Mundi-prensa, Madrid-México. 849 p.
- Porta C., J.; M. López-Acevedo R. & C. Roquero L. 1994. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-prensa, Madrid, España. 807 p.
- Ramírez R., A. 2000. *Comunicación Personal*. Jefatura de los Distritos de riego 03-Tula y 100 Alfajayucan, Gerencia Estatal Comisión Nacional del Agua, Mixquiahuala, Hidalgo, México.
- Ramírez G., R. M. 1997. *Actividad microbiana en suelos irrigados con aguas residuales*. In García C., N. E., A. Ibañez H. & C. Vallejo-Albarrán (Eds-1997) Seminario sobre uso de Aguas Residuales para Riego, Problemática del Valle del Mezquital, Red α -Mezquital. pp 45-49.
- Roldán V., J. 2000. *Crean franja territorial en Hidalgo, Pretenden autoridades evitar la disputa de tierras entre ejidatarios de Tezontepec y Mixquiahuala*. EL UNIVERSAL, Nacional, 18 junio 2000. México.
- Russell W., E. 1961. *Soil Conditions and Plant Growth*. Longmans, Green & Co. Ltd, London, Great Britain. 688 p.
- Siebe, C. 1995. *Efecto del Riego Agrícola con aguas residuales sobre la fertilidad de los suelos del D.D.R. 03, Hidalgo*. In García C., N. E.; R. M. Ramírez G. Simposio Universitario de Edafología. Fac. de Ciencias UNAM. pp 128-129.
- Segerstrom, K., 1961. Geología del sureste del estado de Hidalgo y noreste del estado de México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petr.* Vol. 13 (3-4): 147-168.
- SEGOB-GEH. 1988. *Los municipios de Hidalgo*. In Enciclopedia de los municipios de México. Centro Estatal de Estudios Municipales de Hidalgo. México. pp 144-149.
- SEMARNAP. 2000. *Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000*. Diario Oficial de la Federación 17 de octubre de 2000.
- SEMARNAP. 1998. *Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996*. INE. Diario Oficial de la Federación 3 de junio de 1998.
- Senesi, N. 1993. *Organic pollutant migration in soils as affected by soil organic matter. Molecular and mechanistic aspects*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) Migration and fate of pollutants in soils and subsoils. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany. pp 47-74.
- Smith, S. R. 1997. Rhizobium in soils contaminated with copper and zinc following the long-term application of sewage sludge and other organic wastes. *Soil Biology & Biochemistry*, Vol.29 (9-10): 1475-1489.
- Soil Survey Staff. 1998. *Keys to soil taxonomy*. United States Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Service, USA.

- S.R.H. 1962. *Informe sobre el uso de las aguas negras y superficiales del valle de México y la región del Mezquital*, Hgo. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. 81 p.
- Takashi, A. 1993. *Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) *Migration and fate of pollutants in soils and subsoils*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp 413-433.
- Tan, K. H. 1994. *Environmental Soil Science*. Marcel Dekker, New York, USA. pp. 218-254
- Tate III., R. L. 1987. *Soil organic matter. Biological and ecological effects*. John Wiley & Sons. New York, USA. 291 p.
- Tavarez J., A. M. 1997. *Efectos de los contaminantes ambientales biológicos y químicos sobre la salud humana*. In García C., N. E., A. Ibañez H. & C. Vallejo-Albarrán (Eds-1997) *Seminario sobre uso de Aguas Residuales para Riego, Problemática del Valle del Mezquital*, Red α -Mezquital. pp 45-49.
- Troeh, F. R. & L. M. Thompson. 1993. *Soils and soil fertility*. Oxford University Press, USA. 462 p.
- Vasseur, L., Fortin, M. J. & J. Cyr. 1998. *Clover and cress as indicator species of impacts from limed sewage sludge and landfill wastewater land application*. *The Science of the Total Environment*. Vol. 217 (3): 231-239.
- Van der Zee, & J. C. M. de Wit, 1993. *Theoretical and practical aspects of soil chemical behavior of contaminants in soil*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) *Migration and fate of pollutants in soils and subsoils*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp 27-46.
- Velásquez H., A. 1991. *Corrección de la clorosis férrica por la aplicación de fierro, azufre y molibdeno y su influencia sobre el rendimiento del maíz en suelos calcáreos del DDR-Mixquiahuala*. In Tovar S., J. L. y R. Quintero L. (Eds.-1991). *La investigación edafológica en México 1990-1991. Memorias XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Pachuca, Hidalgo. pp 278.
- Villafañe, R. 1997. *Prácticas de riego con aguas residuales en la cuenca del lago de Valencia, Venezuela: situación actual y perspectivas*. In García C., N. E., A. Ibañez H. & C. Vallejo-Albarrán (Eds-1997) *Seminario sobre uso de Aguas Residuales para Riego, Problemática del Valle del Mezquital*, Red α -Mezquital. pp 145-155.
- Walkey A. 1947. *A critical Examination of a Rapid Method for Determinig Organic Carbon in Soils: Effect of Variations in Digestion Conditions and of Inorganic Soil Constituents*. *Soil Sci.* 63:251-263.
- Weber, W. J. 1993. *Transport and fate of pollutants in subsurface systems: contaminant sorption and retardation*. In Petruzzelli, D. & F. G. Helfferich (Eds-1993) *Migration and fate of pollutants in soils and sub soils*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp 2-26.
- Wild, A. 1992. *Condiciones del Suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Trad. P. U. Terron & C. R. Hernández. Mundi-Prensa. Madrid. España. 1045 p.
- Willett I., R., Jakobsen, P. & K. W. J. Malafant. 1986. *Fertilizer and liming value of lime-treated sewage sludge*. *Fert. Res.* Vol. 8: 313-328.
- Young, 1976. *Tropical soils and soil survey*. Cambridge University Press. Cambridge UK, 468 p.

XI. ANEXO

Resultados de las barrenaciones.

1. Ubicación: 20° 18' 35.67" L.N. y 99° 08' 5.14" L.O. a 2,100 msnm
Vegetación: matorral crasicaule y agavaceas
Pedregosidad: muy pedregoso; rocas grandes y medianas subangulares y angulares de naturaleza calcárea -color blanco y beige- e ígnea -color rojo y negro.
Profundidad: AC 0-15 cm, R límite pedregoso de naturaleza calcárea y estrato endurecido: petrocálcico
Humedad: AC seco
Color: AC 10YR5/2 pardo grisáceo
Estructura: granular fina-media de desarrollo moderado
Consistencia: suelta y friable
Adhesividad y Plasticidad: ligeramente adhesivo y ligeramente plástico
Textura: migajón arenoso
Reacción: HCl 1:1 muy fuerte
Erosión: hídrica laminar y en surcos
Clasificación: Molli-Petric Calcisol (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)
2. Ubicación: 20° 16' 45.40" L.N., 99° 08' 37.71" L.O. a 2,030 msnm
Vegetación: matorral crasicaule
Pedregosidad: pedregoso; rocas pequeñas medianas subangulares y angulares de naturaleza calcárea (10% de 1m²).
Profundidad: Ap 0-10 cm, AC 10-20 cm, R límite Petrocálcico
Humedad: Ap seco y AC ligeramente húmedo
Color: Ap y AC 10YR5/2 pardo grisáceo
Estructura: Ap laminar y granular media ambas débilmente desarrolladas
Consistencia: suelta
Textura: migajón arenoso
Adhesividad y Plasticidad: ligeramente adhesivo y ligeramente plástico
Reacción: HCl 1:1 muy fuerte en Ap y AC
Erosión: hídrica laminar
Clasificación: Molli-Petric Calcisol (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)
3. Ubicación: 20° 16' 24.32" L.N. y 99° 07' 48" L.O. a 2,020 msnm
Vegetación: herbáceas, vegetación natural
Pedregosidad: muy escasa; rocas pequeñas subangulares de naturaleza calcárea color blanco: 10YR9/1 y amarillento: 10YR7/6. Profundidad: A 0-69 cm, R límite Petrocálcico
Humedad: A seco, C ligeramente húmedo
Color: A 10YR5/2 pardo grisáceo, C 10YR5/2 pardo grisáceo
Estructura: A granular de débil desarrollo
Consistencia: suelta
Textura: migajón arenoso
Adhesividad y Plasticidad: ligeramente adhesivo y ligeramente plástico
Reacción: HCl 1:1 fuerte
Erosión: hídrica laminar y en surcos
Clasificación: Molli-Petric Calcisol (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calciustolls (USDA)
4. Ubicación: 20° 15' 48.65" L. N. y 99° 07' 41.14" L. O. a 2,025 msnm
Vegetación: cultivo de maíz
Pedregosidad: poco pedregoso; rocas medianas subangulares y angulares de naturaleza calcárea -color blanco y beige- (1% m²)
Profundidad: Ap 0-31 cm, R límite petrocálcico
Humedad: Ap húmedo, C húmedo
Color: Ap 10YR2/2 pardo muy oscuro, C 10YR6/4 pardo amarillento ligero

Estructura: Ap bloques subangulares de moderado a fuerte desarrollo

Adhesividad y Plasticidad: adhesivo y plástico

Consistencia: friable

Textura: migajón arcilloso

Reacción: HCl 1:1: Ap fuerte; C muy fuerte

Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

5. Ubicación: 20° 15' 9.73" L.N. y 99° 07' 41.14" L.O. a 2,015 msnm

Vegetación: cultivo de alfalfa

Pedregosidad: poco pedregoso; rocas medianas y pequeñas subangulares calcáreas

Profundidad: Ap 0-24 cm, A12 24-64, C 64-84, R límite petrocálcico

Humedad: Ap ligeramente húmedo, A12 húmedo, C muy húmedo

Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, A12 10YR3/2, C 10YR6/3 pardo pálido.

Estructura: Ap granular fina de fuerte desarrollo, A 12 bloques subangulares de moderado desarrollo, C sin estructura.

Adhesividad y Plasticidad: Ap y A12 son adhesivos y plásticos

Consistencia: Ap y A12 son friables

Textura: Ap franco limoso, A 12 franco limoso

Reacción: HCl 1:1: Ap moderada; A12 débil y C fuerte

Erosión: hídrica laminar

Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calciustolls (USDA)

6. Ubicación: 20° 15' 12.97" L.N. y 99° 9' 12.00" L.O. a 2,015 msnm

Vegetación: cultivo de alfalfa

Pedregosidad: poco pedregoso de naturaleza calcárea

Profundidad: Ap 0-25 cm, AC 25-60, C 60-70; R límite pedregoso de naturaleza calcárea

Humedad: Ap, AC y C ligeramente húmedos

Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, AC 10YR5/2 pardo grisáceo, C 10YR6/3 pardo pálido.

Estructura: Ap granular débil desarrollo, AC granular de moderado desarrollo, C sin estructura.

Adhesividad y Plasticidad: Ap, AC y C adhesivos y plásticos

Consistencia: Ap suelta, AC friable, C suelta

Textura: Ap migajón limoso, AC migajón arenoso, C arenoso

Reacción: HCl 1:1: Ap débil; AC débil, C moderada

Erosión: hídrica laminar

Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Pachic Calciustolls

7. Ubicación: 20° 15' 47.01" L.N. y 99° 09' 32.57" L.O. a 2,015 msnm

Vegetación: cultivo de chile

Pedregosidad: pedregoso de naturaleza calcárea

Profundidad: Ap 0-40 cm, C 40-45; R límite pedregoso, material calcáreo

Humedad: Ap húmedo, C húmedo

Color: Ap 10YR2/2 pardo oscuro, C 10YR5/4 pardo.

Estructura: Ap bloques subangulares de moderado a fuerte desarrollo

Adhesividad y Plasticidad: Ap adhesivo y plástico

Consistencia: Ap firme

Textura: Ap migajón limoso

Reacción: HCl 1:1: Ap fuerte; C muy fuerte

Erosión: hídrica laminar

Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Calciustolls (USDA)

8. Ubicación: 20° 14' 26.76" L.N. y 99° 9' 45.43" L.O. a 2,010 msnm

Vegetación: cultivo de maíz

Pedregosidad: muy pedregoso; Ap piedras medianas y pequeñas, naturaleza calcárea

Profundidad: Ap 0-12 cm, A12 12-38, R límite pedregoso

Humedad: Ap seco, Ap12 ligeramente húmedo

Color: Ap 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro, Ap12 10YR5/2 pardo grisáceo
Estructura: Ap granular y bloques subangulares pequeños de débil a moderado desarrollo con gravillas, A12 bloques subangulares pequeños de moderado desarrollo con arenas y gravillas
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 adhesivos y plásticos
Consistencia: Ap suelta, A12 friable
Textura: Ap y A12 migajón arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap y A12 fuertes
Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Calcicustolls (USDA)

9. Ubicación: 20° 14' 19.46" L.N. y 99° 08' 39.43" L.O. a 2,008 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: nula
Profundidad: Ap 0-12 cm, A12 12-33 cm, A13 33-87 cm, C 87-95, R límite lítico
Humedad: Ap ligeramente húmedo, Ap12 ligeramente húmedo, A13 húmedo, C húmedo
Color: Ap 10YR3/3 pardo oscuro, Ap12 10YR3/3 pardo oscuro, A13 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, C 10YR5/3 pardo
Estructura: Ap granular fina de moderado desarrollo, A12 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, A13 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, C sin estructura
Adhesividad y plasticidad: Ap, A12 y A13 son adhesivos y plásticos, C adhesivo y ligeramente plástico
Consistencia: Ap firme, A12 friable y firme, A13 firme, C suelta
Textura: Ap migajón limoso, A12 migajón limo-arcilloso, A13 migajón limo-arcilloso, C arena
Reacción: HCL 1:1 Ap, A12 y A13 sin reacción, C moderado
Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calcicustolls (USDA)

10. Ubicación: 20° 13' 43.78" L.N., 99° 08' 49.71" L.O. a 2,023 msnm
Vegetación: cultivo de maíz
Pedregosidad: presencia de materiales ígneos de color rojo y negro de tamaño mediano
Profundidad: Ap 0-22 cm, A12 20-45 cm, A13 45-80 cm, C 80-90, R límite lítico.
Humedad: Ap ligeramente húmedo, A12 húmedo, A13 húmedo, C húmedo.
Color: Ap 10YR3/3 pardo oscuro, A12 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, A13 10YR3/1 gris muy oscuro, C 10YR4/4 pardo
Estructura: Ap granular fina de moderado desarrollo, A12 y A13 bloques subangulares de moderado desarrollo, C sin estructura
Adhesividad y plasticidad: Ap, A12 y A13 adhesivos y plásticos, C ligeramente plástico y adhesivo.
Consistencia: Ap y A12 friable, A13 firme. Textura: Ap, A12 y A13 migajón limoso, C arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap moderado, A12 y A13 débil y C fuerte
Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calcicustolls (USDA)

11. Ubicación: 20° 13' 35.68" L.N., 99° 09' 21.43" L.O. a 2,015 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: poco pedregoso; Ap rocas medianas subangulares y angulares de naturaleza ígnea recubiertas con carbonatos de calcio
Profundidad: Ap 0-29 cm, A12 29-66, C 66-71, R límite pedregoso de naturaleza calcárea.
Humedad: Ap y A12 ligeramente húmedo, C húmedo
Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, A12 10YR3/1 gris muy oscuro, C 10YR4/4 pardo.
Estructura: Ap bloques subangulares medianos moderado desarrollo, A12 bloques subangulares grandes bien desarrollos, C sin estructura.
Adhesividad y plasticidad: Ap adhesivo y plástico, A12 muy adhesivo y muy plástico.
Consistencia: Ap y A12 firme. Textura: Ap y A12 migajón limo-arcilloso. Reacción: HCL 1:1 Ap moderada, A12 muy débil.
Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calcicustolls (USDA)

12. Ubicación: 20° 13' 48.65" L.N., 99° 10' 06.83" L.O. a 2,028 msnm
Vegetación: cultivo de maíz

Pedregosidad: poco pedregoso; rocas finas y medianas subangulares y angulares de naturaleza ígnea (basaltos, granodioritas y gabros, algunas recubiertas con capa de carbonato de calcio de reacción HCl 1:1 muy fuerte)
Profundidad: Ap 0-15 cm, A12 15-30, C 30-40, R límite petrocálcico
Humedad: Ap, A12 ligeramente húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gri muy oscuro, A12 10YR3/2 gris oscuro, C 10YR4/4 pardo. Estructura: Ap granular fina de moderado desarrollo, A12 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 adhesivos y plásticos
Consistencia: Ap y A12 friables
Textura: Ap y A12 migajón limo arenoso
Reacción: HCl 1:1 Ap y A12 moderada
Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

13. Ubicación: 20° 13' 24.32" L.N., 99° 10' 17.14" L.O. a 2,031 msnm

Vegetación: cultivo de maíz
Pedregosidad: poco pedregoso 30%; rocas medianas y grandes de naturaleza ígnea con recubrimientos de carbonato de calcio, y de caliche
Profundidad: Ap 0-16 cm, A12 16-42, C 42-50, R límite lítico
Humedad: Ap y A12 húmedos
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro, A12 10YR2/1 negro
Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, A12 bloques subangulares de fuerte desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 muy adhesivos y muy plásticos
Consistencia: Ap y A12 firmes y friables
Textura: Ap y A12 arcillo arenoso
Reacción: HCl 1:1 Ap y A12 muy débil, C muy fuerte
Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

14. Ubicación: 20° 13' 09.73" L.N., 99° 11' 15.14" L.O. a 2,026 msnm

Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: poco pedregoso 10%; rocas pequeñas de 2-3 cm
Profundidad: Ap 0-30 cm, A12 30-50 cm, A13 50-70 cm, C de naturaleza calcárea, R límite pedregoso de color ligeramente anaranjado
Humedad: Ap y Ap12 ligeramente húmedo, A13 húmedo
Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, A12 10YR3/1 gris muy oscuro, A13 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro
Estructura: Ap granular nuciforme de fuerte desarrollo, A12 bloques subangulares pequeños de moderado desarrollo, A13 bloques subangulares pequeños débilmente desarrollados
Adhesividad y plasticidad: Ap, A12 y A13 adhesivos y plásticos
Consistencia: Ap fuerte, A12 moderada, A13 friable
Textura: Ap, A12 y A13 migajón limoso
Reacción: HCl 1:1 Ap, A12 y A13 moderada, C fuerte
Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Pachic Calciustolls (USDA)

15. Ubicación: 20° 12' 29.19" L.N., 99° 10' 49.71" L.O. a 2,041 msnm

Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: poco pedregoso
Profundidad: Ap 0-20 cm, A12 20-50, C1 50-73, C2 73-85
Humedad: Ap ligeramente húmedo, Ap12 húmedo, C1 muy húmedo, C2 inundado
Color: Ap 10YR4/1 gris oscuro, A12 10YR3/1 gris muy oscuro, C1 10YR4/4 pardo, C2 10YR7/2 gris ligero
Estructura: Ap bloques subangulares medianos de muy fuerte desarrollo, A12 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, C sin estructura
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 adhesivos y plásticos
Consistencia: Ap friable, A12 firme
Textura: Ap y A12 arcillo-limo arenoso, C1 y C2 migajón arenoso
Reacción: HCl 1:1 Ap y A12 moderado, C1 fuerte, C2 muy fuerte

Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Pachic Calciustolls (USDA)

16. Ubicación: 20° 11' 17.84" L.N., 99° 11' 10.29" L.O. a 2,050 msnm

Vegetación: cultivo de frijol

Pedregosidad: predominan guijarros de naturaleza ígnea de diferentes tamaños algunos recubiertos de carbonatos de calcio

Profundidad: Ap 0-10 cm, A12 10-35, R límite petrocálcico

Humedad: Ap y A12 ligeramente húmedo

Color: Ap y A12 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro

Estructura: Ap granular fino moderado desarrollo, A12 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo

Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 adhesivos y plásticos

Consistencia: Ap y A12 friables

Textura: Ap y A12 migajón-limo arenoso

Reacción: HCL 1:1 Ap y A12 moderadas

Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

17. Ubicación: 20° 11' 53.51" L.N., 99° 10' 17.14" L.O. a 2,043 msnm

Vegetación: cultivo de frijol

Pedregosidad: nula

Profundidad: Ap 0-27 cm, A12 27-90, BC 90-105, C 105-121

Humedad: Ap húmedo, A12, BC y C muy húmedos

Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, A12 10YR3/1 gris muy oscuro, BC 10YR3/3 pardo oscuro, C 10YR4/3 pardo

Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado a fuerte desarrollo con brillos debidos a minerales primarios debidos a feldespatos, A12 bloques subangulares grandes de fuerte desarrollo con muchos brillos, BC, bloques subangulares medianos de moderado desarrollo con pocos brillos debidos a minerales primarios, C sin brillos

Adhesividad y plasticidad: Ap, A12 y BC muy adhesivos y muy plásticos

Consistencia: Ap firme, A12 muy firme, BC firme

Textura: Ap arcillo limoso, A12 arcilla, BC migajón limoso, arenoso

Reacción: HCL 1:1 Ap, A12 y BC sin reacción, C débil

Erosión: hídrica laminar por el riego

Clasificación: Eutri-Luvic Phaeozems (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

18. Ubicación: 20° 13' 09.72" L.N., 99° 08' 25.71" L.O. a 2,129 msnm

Vegetación: cultivo de maíz

Pedregosidad: pocas rocas, superficie con materiales ígneos (basaltos y piroclastos)

Profundidad: Ap 0-25 cm, C 25-30 cm, límite pedregoso materiales de naturaleza calcárea

Humedad: Ap ligeramente húmedo

Color: Ap 10YR3/3 pardo oscuro, C 10YR6/3 pardo pálido

Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, C arenas y gravillas de naturaleza ígnea en matriz de material calcáreo

Adhesividad y plasticidad: Ap adhesivo y ligeramente plástico

Consistencia: Ap friable

Textura: Ap migajón arenoso

Reacción: HCL 1:1 Ap de moderado a fuerte

Clasificación: Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Lithic Calciustolls (USDA)

19. Ubicación: 20° 12' 56.76" L.N., 99° 08' 40.29" L.O. a 2,056 msnm

Vegetación: cultivo de Maíz

Pedregosidad: corrales formados de materiales ígneos, límite petrocálcico

Profundidad: Ap 0-25 cm, R 25-X cm

Humedad: Ap ligeramente húmedo

Color: Ap 10YR4/3, C1 10YR4/3 pardo

Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado desarrollo

Adhesividad y plasticidad: Ap, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico

Consistencia: Ap ligeramente firme, C suelto
Textura: Ap migajón arenoso, C arena
Reacción: HCL 1:1 Ap fuerte, C fuerte
Clasificación: Molli-Petri Calcisols (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

20. Ubicación: 20° 12' 04.87" L.N., 99° 09' 48 " L.O. a 2,056 msnm
Vegetación: cultivo de maíz
Pedregosidad: muchas rocas medianas y finas de origen calcáreo
Profundidad: Ap 0-30 cm, R 30-X límite petrocálcico
Humedad: Ap ligeramente húmedo
Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro
Estructura: Ap granular de tamaño medio a fino de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap poco adhesivo y poco plástico
Consistencia: Ap friable
Textura: Ap migajón arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap muy fuerte, C muy fuerte
Clasificación: Molli-Petri Calcisols (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

21. Ubicación: 20° 11' 29.19" L.N., 99° 10' 10.28" L.O. a 2,050 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: poco pedregoso, rocas pequeñas de naturaleza calcárea
Profundidad: Ap 0-22 cm, AC 22-100, R 100-X petrocálcico
Humedad: Ap ligeramente húmedo, AC húmedo
Color: Ap 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro, AC 10YR5/3 pardo, C 10YR5/4 Estructura: Ap granular mediano de moderado desarrollo, AC bloques subangulares medianos débilmente desarrollados
Adhesividad y plasticidad: Ap adhesivo y plástico, AC ligeramente adhesivo y ligeramente plástico
Consistencia: Ap friable, AC suelta
Textura: Ap migajón arenoso, AC migajón arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap fuerte, AC muy fuerte
Clasificación: Molli-Petri Calcisols (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calciustolls (USDA)

22. Ubicación: 20° 11' 25.94" L.N. y 99° 10' 00" L.O. a 2,064 msnm
Vegetación: cultivo de maíz y chile
Pedregosidad: del subsuelo extraen rocas grandes de naturaleza ígnea de color rojo y negro, posteriormente se encuentra el "caliche"
Profundidad: Ap 0-52 cm, R límite petrocálcico a profundidad variable
Humedad: Ap ligeramente húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares y angulares de fuerte desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivos y muy plásticos
Consistencia: Ap muy firme
Textura: Ap arcilla
Reacción: HCL 1:1 Ap muy débil
Clasificación: Eutri-Luvic Phaeozems (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

23. Ubicación: 20° 10' 35.05" L.N., 99° 10' 46.28" L.O. a 2,068 msnm
Vegetación: cultivo de maíz
Pedregosidad: límite petrocálcico
Profundidad: Ap 0-31 cm, R petrocálcico
Humedad: Ap ligeramente húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares de fuerte desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivo y muy plástico
Consistencia: Ap muy firme

Textura: Ap arcilla
Reacción: HCL 1:1 Ap muy fuerte
Erosión: hídrica laminar por el riego
Clasificación: Eutri-Luvic Phaeozems (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

24. Ubicación: 20° 10' 25.1" L.N. y 99° 12' 1.71" L.O. a 2,061 msnm
Vegetación: cultivo de frijol
Pedregosidad: superficial 5%
Profundidad: Ap 0-22 cm, A12 22-60, R límite petrocálcico
Humedad: Ap muy ligeramente húmedo, A12 húmedo
Color: Ap y A12 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares de fuerte desarrollo, A12 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 son muy adhesivos y muy plásticos
Consistencia: Ap y A12 muy firme
Textura: Ap y A12 migajón arcilloso
Reacción: HCL 1:1 Ap fuerte, A12 muy fuerte
Erosión: hídrica laminar por el riego
Clasificación: Eutri-Luvic Phaeozems (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

25. Ubicación: 20° 11' 00" L.N. y 99° 11' 30" L.O. a 2,041 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: nula
Profundidad: Ap 0-26 cm, C 26-36, R límite petrocálcico
Humedad: Ap ligeramente húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro, C 10YR4/4 pardo
Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap adhesivo y plástico
Consistencia: Ap suelta
Textura: Ap migajón arenoso, C arena
Reacción: HCL 1:1 Ap fuerte, C muy fuerte
Clasificación: Molli-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Lithic Petrocalcic Calciustolls (USDA)

26. Ubicación: 20° 12' 21.08" L.N., 99° 11' 18.86" L.O. a 2,040 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: rocas medianas y pequeñas en todo el perfil
Profundidad: Ap 0-25 cm, R límite petrocálcico
Humedad: Ap ligeramente húmedo
Color: Ap 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares medianos de fuerte desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivo y muy plástico
Consistencia: Ap muy firme
Textura: Ap migajón-arcillo arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap moderado
Erosión: hídrica laminar por el riego
Clasificación: luvi-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

27. Ubicación: 20° 13' 25.95" L.N. y 99° 11' 12" L.O. a 2,031 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: predominan guijarros de naturaleza ígnea con recubrimientos de carbonato de calcio
Profundidad: Ap 0-36 cm, R límite petrocálcico
Humedad: Ap muy húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado desarrollo con gravillas
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivo y muy plástico

Consistencia: Ap firme
Textura: Ap migajón-arcillo arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap moderado
Clasificación: luvi-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

28. Ubicación: 20° 13' 16.21" L.N., 99° 12' 25.71" L.O. a 2,012 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: nula
Profundidad: Ap 0-5 cm, A12 5-70, BC 70-131 cm no se alcanzó el material parental
Humedad: Ap muy seco; suelo muy agrietado (1.5 cm ancho), A12 ligeramente húmedo, BC muy húmedo
Color: Ap 10YR5/1, A12 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro, BC 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares grandes muy fuerte desarrollados, A12 bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, BC bloques subangulares medianos de fuerte desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap, A12 y BC muy adhesivos y muy plásticos
Consistencia: Ap extra firme, A12 firme, BC firme
Textura: Ap, A12 y BC arcilla
Reacción: HCL 1:1 Ap muy débil, A12 y BC moderada
Clasificación: Eutri-Luvic Phaeozems (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

29. Ubicación: 20° 12' 19.46" L.N., 99° 12' 12.05" L.O. a 2,017 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: predominan rocas medianas de carbonato de calcio blancas
Profundidad: Ap 0-48 cm, R límite pedregoso
Humedad: Ap húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares grandes de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivo y muy plástico
Consistencia: Ap firme
Textura: Ap migajón arcilloso
Reacción: HCL 1:1 Ap muy fuerte
Erosión: hídrica laminar por el riego
Clasificación: luvi-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

30. Ubicación: 20° 11' 56.76" L.N., 99° 12' 34.29" L.O. a 2,019 msnm
Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: predominan piedras de carbonato de calcio color beige-ligeramente anaranjado
Profundidad: Ap 0-30 cm, límite pedregoso
Humedad: Ap húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares grandes de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivo y muy plástico
Consistencia: Ap firme
Textura: Ap migajón arcilloso
Reacción: HCL 1:1 Ap moderado a fuerte
Clasificación: luvi-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

31. Ubicación: 20° 11' 57.51" L.N., 99° 12' 39.43" L.O. a 2,017 msnm
Vegetación: parcela sin cultivo
Pedregosidad: predominan piedras pequeñas de carbonato de calcio, grietas en la superficie y manchas de sales
Profundidad: Ap 0-10 cm, A12 10-51, C 51-76
Humedad: Ap seco, A12 ligeramente húmedo y C húmedo
Color: Ap 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro, A12 10YR3/1 gris muy oscuro, C 10YR4/4 pardo ligero
Estructura: Ap bloques subangulares muy grandes de muy fuerte desarrollo, A12 bloques subangulares de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 muy adhesivos y muy plásticos

Consistencia: Ap muy firme, A12 friable
Textura: Ap y A12 arcilla
Reacción: HCL 1:1 Ap y A12 moderado, C fuerte
Clasificación: Eutri-Luvic Phaeozems (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

32. Ubicación: 20° 12' 32.43" L.N., 99° 13' 13.71" L.O. a 2,024 msnm

Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: piedras pequeñas abundantes en A y grandes en C de carbonato de calcio color blanco
Profundidad: Ap 0-30 cm, A12 30-61, R 61-X petrocálcico
Humedad: Ap ligeramente húmedo, A12 húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro, A12 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares medianos de moderado desarrollo, A12 bloques subangulares pequeños débilmente desarrollados
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 son adhesivos y plásticos
Consistencia: Ap friable, A12 muy firme
Textura: Ap migajón arenoso, A12 migajón arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap y A12 moderada y C muy fuerte
Clasificación: Petri-Calcaric Phaeozems (FAO-UNESCO), Petrocalcic Calciustolls (USDA)

33. Ubicación: 20° 12' 55.13" L.N., 99° 13' 13.71" L.O. a 2,024 msnm

Vegetación: cultivo de alfalfa
Pedregosidad: predominan piedras medianas de carbonato de calcio
Profundidad: Ap 0-48 cm, límite pedregoso
Humedad: Ap húmedo
Color: Ap 10YR3/1 gris muy oscuro
Estructura: Ap bloques subangulares grandes de moderado desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap muy adhesivo y muy plástico
Consistencia: Ap firme
Textura: Ap migajón arcilloso
Reacción: HCL 1:1 Ap muy fuerte
Erosión: hídrica laminar por el riego
Clasificación: luvi-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)

34. Ubicación: 20° 13' 29.14" L.N. y 99° 11' 18.16" L.O. a 2,038 msnm

Vegetación: parcela sin cultivo
Pedregosidad: muy pedregoso, piedras grandes
Profundidad: Ap 0-5 cm, A12 5-35 cm límite pedregoso
Humedad: Ap seco, A12 ligeramente húmedo
Color: Ap y A12 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro
Estructura: Ap granular muy fina, A12 bloques subangulares medianos de débil desarrollo
Adhesividad y plasticidad: Ap y A12 adhesivo y plástico
Consistencia: Ap suelta, A12 friable
Textura: Ap migajón arcilloso, A12 migajón-limo arenoso
Reacción: HCL 1:1 Ap, A12 fuerte
Clasificación: luvi-Petric Calcisols (FAO-UNESCO), Vertic Calciustolls (USDA)