

00381

- 2 -



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Efecto de la aplicación de vinazas crudas y modificadas por microorganismos anaerobios y aerobios sobre las propiedades químicas de dos suelos del municipio Miguel Alemán del Estado de Veracruz, México.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)  
P R E S E N T A

Francisco Bautista Zúñiga

México, D.F. Enero del 2000

Directora de tesis: María del Carmen Durán de Bazúa

972955



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Agradecimientos

A la UNAM por el apoyo académico y económico de la Facultad de Ciencias y la DGAPA.

A la Dra. María del Carmen Durán de Bazúa por la dirección de esta tesis en la que invirtió mucho de su valioso tiempo. Le agradezco su paciencia.

A las Dras. Teresa de Jesús Reyna Trujillo y Lourdes Villers Ruiz por la asesoría a lo largo del desarrollo de este trabajo, a través de sus enriquecedores consejos en los comités tutorales.

Al Dr. Lenom Cajuste por sus sabios consejos, así como por el valioso tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Al Dr. Francisco Javier Álvarez por el apoyo recibido para la conclusión de este trabajo y por sus correcciones.

A la Dra. Ana Luisa Anaya Lang por las correcciones a este trabajo y por el tiempo dedicado.

La fase analítica se realizó con apoyo del Laboratorio de Análisis del Ambiente del Instituto de Geografía-UNAM coordinado por la M en C. Margarita Gutiérrez R. Mil gracias maestra.

Al Dr. Víctor Luna y a la Dra. Silke Cram por sus valiosos comentarios al manuscrito.

A la Biól. Hilda Rivas, Ing. R.M Jiménez, Ing. M. A. Martínez, Ing. M. Ríos, Ing. A. Espinosa, Ing. R. Lozano, Biól. J. Villatoro, Biól. Guadalupe González, y M en G. G. Palacio, M en C. Maricela Arteaga y M en C Lourdes Castillo por el apoyo técnico.

A los Ings M. Chávez y M. Ahumada por el apoyo en la toma de muestras y por el aprovisionamiento de vinazas.

Al Dr. Juan Jiménez Osornio coordinador del Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales de la Facultad de Medicina Veterinaria de la UADY, por las facilidades para la terminación de este trabajo, por la paciencia y por la confianza.

Al Sr. Vicente Medina por su valioso apoyo en el trabajo de campo.

A la Sra. Rosa Ríos quien realizó los múltiples trámites para la presentación de este trabajo.

Al Dr. Manuel Barceló, Dr. Bernard Triomphe e Ing. Isabel Sohn por la revisión de los artículos derivados de esta tesis.

A los alumnos de la Licenciatura en Biología de la Facultad de Ciencias participantes en las dos "Biologías de Campo".

## Dedicatoria

A la memoria de mi madre Sra. Teresa Zúñiga  
y a mi querido padre, el Sr. Antonio Bautista

A la familia Bautista Zúñiga

A Carmen Delgado, mi compañera

A mis hijos: Dorian y Paco

*La interacción suelo-materia orgánica es vital para la  
continuación de la vida, tanto como la fotosíntesis,  
desafortunadamente está menos entendida*

Jacks

# C O N T E N I D O

Prólogo	xi
Resumen	xii
Abstract	xiv
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
La problemática de los Ingenios azucareros	2
Objetivos	4
Hipótesis	4
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1 Principales fuentes de desechos líquidos	5
2.1.1 Contaminación del agua	5
2.1.2 Vinazas	8
2.1.3 Importancia del alcohol etílico y la generación de vinazas en el mejoramiento del ambiente en las grandes ciudades	13
2.2 El proceso de descomposición	14
2.2.1 Mineralización	15
2.2.2 Las fases	16
2.2.3 Factores limitantes	17
2.2.4 Modelos matemáticos	19
2.3 Calidad del agua de riego	19
2.4 Clasificación de suelos	21
2.4.1 Clasificación FAO de algunas unidades de suelo encontradas en la zona de estudio	23
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	<b>25</b>
3.1 Caracterización y clasificación de suelos	26
3.2 Análisis de las vinazas	29
3.3 Ensayos	32
3.4 Experimento con macetas para observar los cambios químicos en el suelo	34
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS</b>	<b>37</b>
4.1 Caracterización y clasificación de suelos	37
4.1.1 Morfopedología	37

Llanura de piedemonte alta, porción cercana a las serranías, muy húmeda	39
Llanura de piedemonte alta, porción lejana a las serranías, húmeda	42
Llanura de piedemonte baja, porción cercana a las serranías, muy húmeda	43
Llanura de piedemonte baja, porción cercana a las serranías, húmeda	43
4.1.2 Ordenación y clasificación numérica de los sitios	44
Ordenación	
Clasificación numérica	
4.1.3 Correlaciones simples	46
4.2 Caracterización de las vinazas	48
4.3 Ensayos	53
4.3.1 Ensayos en columnas	53
4.3.2 Ensayos en macetas a cuatro meses	55
Potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica	55
Materia orgánica	58
Propiedades microbiológicas	59
Cationes intercambiables	63
4.4 Experimentos en macetas para observar los cambios químicos en el suelo	64
4.4.1 Potencial de hidrógeno	64
4.4.2 Conductividad eléctrica	68
4.4.3 Carbono orgánico total	70
4.4.4 Carbono orgánico soluble	71
4.4.5 Producción de CO <sub>2</sub>	76
4.4.6 Análisis elemental	79
4.4.7 Cambios en los cationes intercambiables y en la CIC por la aplicación de vinazas	80
4.4.8 Cambios en algunos micronutrientes	81
4.4.9 Cambios en el fósforo asimilable y en el hierro y Al extraíbles con oxalato de amonio	82
4.4.10 Cambios en los minerales	84
4.4.11 Experimentos con plantas	85
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN</b>	<b>89</b>
5.1 Suelos	89
5.2 Vinazas	91
5.3 Ensayos en columnas	93

5.4 Ensayos en macetas	94
5.5 Experimentos en macetas para observar los cambios químicos en el suelo	96
5.6 Discusión general	101
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b>	<b>107</b>
<b>CAPÍTULO 7. REFERENCIAS</b>	<b>111</b>
Glosario	I
Apéndice 1. Clasificación de suelos	V
Apéndice 1-1. Propiedades químicas de los suelos de municipio de Atoyac, Córdoba, Veracruz México	V
Apéndice 1-2. Propiedades físicas y químicas de campo de los suelos de municipio de Atoyac, Córdoba, Veracruz México.	VI
Apéndice 2. Espectros de infrarrojo de los ácidos húmicos de las vinazas	VII
Apéndice 3. Datos del experimento en macetas con suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol tratados con vinazas crudas, tratadas anaerobiamente y anaerobia-aerobiamente	X
Apéndice 3-1. Datos de las propiedades del Acrisol tratado con vinazas	X
Apéndice 3-2. Datos de las propiedades del Fluvisol tratado con vinazas	XI
Apéndice 3-3. Producción de CO <sub>2</sub>	XII
Apéndice 4. Resultados del análisis de regresión de los experimentos en macetas con suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol con vinazas crudas, anaerobias y anaerobias-aerobias	XIII
Apéndice 5. Prueba de diferencias significativas de Tukey para cada uno de los parámetros por semana	XXXIV
Apéndice 6. Valores de pH de los suelos tratados con vinaza cruda en el corto plazo (minutos)	XXXVIII
Apéndice 7. Datos de conductividad eléctrica de disoluciones porcentuales del azúcar	XXXIX
Apéndice 8. Conductancia de algunos iones	XXXIX

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.-1. Principales giros industriales responsables de las mayores descargas de aguas residuales (porcentuales)	5
Cuadro 2.1-1. Constituyentes de las vinazas crudas y sus posibles efectos en cuerpos de agua y suelos	7
Cuadro 2.1-2. Principales constituyentes y características de las vinazas (Durán-de-Bazúa <i>et al.</i> , 1991a)	10
Cuadro 2.1-3. Propiedades de las vinazas antes y después del tratamiento anaerobio (Durán-de-Bazúa <i>et al.</i> , 1991a)	10
Cuadro 2.1-4. Propiedades de las vinazas antes y después del tratamiento con un reactor de biodiscos (Durán-de-Bazúa <i>et al.</i> , 1991a)	11
Cuadro 2.1-5. Propiedades de las vinazas antes y después del tratamiento con una secuencia de un reactor de manto de lodos y un reactor de biodiscos (Olvera, 1992)	11
Cuadro 2.1-6. Principales ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio	12
Cuadro 2.1-7. Principales ventajas y desventajas del tratamiento aerobio	12
Cuadro 2.3-1. Comportamiento de las principales sales que se encuentran en los suelos (modificado de Szabolcs, 1989)	21
Cuadro 2.3-2. Efecto de las sales en el crecimiento de cultivos en función de la concentración de sales en el extracto de la pasta de saturación (Richards, 1985)	21
Cuadro 2.4-1. Comparación entre ambos métodos de diagnóstico	24
Cuadro 4.1-1. Características geográficas y de manejo de los sitios en los que se realizaron las calicatas y pozos	39
Cuadro 4.1-2. Principales características de los horizontes de los suelos	41
Cuadro 4.1-3. "Valores propios" de las propiedades de los sitios en los dos ejes del análisis de componentes principales	44
Cuadro 4.1-4. Proporción de la variación explicada para cada propiedad de los sitios por cada componente	45
Cuadro 4.1-5. Agrupación de suelos por pares	45
Cuadro 4.1-6. Matriz de correlación, del análisis de componentes principales, entre propiedades de los sitios (Datos centrados y estandarizados)	43
Cuadro 4.2-1. Caracterización de la vinaza cruda	48
Cuadro 4.2-2. Constituyentes inorgánicos en las vinazas	49
Cuadro 4.2-3. Micronutrientes en los tres tipos de vinazas y contenidos	51



máximos permisibles en aguas residuales

Cuadro 4.2-4. Parámetros orgánicos medidos en los tres tipos de vinazas	51
Cuadro 4.2-5. Bandas y grupos funcionales detectados con el espectro de infrarrojo de reflexión difusa con transformadas de Fourier de las vinazas crudas y tratadas	52
Cuadro 4.3-1. Valores de conductividad eléctrica en las columnas de suelo	54
Cuadro 4.3-2. Contenidos de carbono orgánico y nitrógeno total en los suelos tratados con vinaza cruda a lo largo del tiempo	58
Cuadro 4.4.1-1. Valor de pH del Acrisol tratado con vinazas	64
Cuadro 4.4.1-2. Valor de pH del Fluvisol tratado con vinazas	68
Cuadro 4.4.2-1. Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) en el Acrisol tratado con vinazas	69
Cuadro 4.4.2-2. Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) en el Fluvisol tratado con vinazas	69
Cuadro 4.4.3-1. Porcentaje de carbono orgánico total en el Acrisol tratado con vinazas	70
Cuadro 4.4.3-2. Porcentaje de carbono orgánico total en el Fluvisol tratado con vinazas	70
Cuadro 4.4.4-1. Contenido de carbono orgánico extraíble con agua en el Acrisol tratado con vinazas	73
Cuadro 4.4.4-2. Contenido de carbono orgánico extraíble en agua en el Fluvisol tratado con vinazas	74
Cuadro 4.4.6-1. Análisis químico elemental de los suelos tratados con vinazas analizados por espectroscopía de fluorescencia de rayos X	79
Cuadro 4.4.7-1. Cationes intercambiables y capacidad de intercambio de cationes en los suelos tratados con vinazas	81
Cuadro 4.4.8-1. Cambios en la disponibilidad de algunos micronutrientes por la aplicación de vinazas (Villatoro, 1997)	82
Cuadro 4.4.9-1. Cambios en el hierro y aluminio extraíbles con oxalato de amonio y en el fósforo ocasionados por la aplicación de vinazas	83
Cuadro 4.4.10-1. Minerales secundarios en el Acrisol tratado con vinazas	84
Cuadro 4.4.10-2. Minerales secundarios en el Fluvisol tratado con vinazas	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-1. Proceso y residuos en la producción de azúcar y alcohol	9
Figura 2.4-1. Relaciones entre suelos de las unidades Acrisol, Alfisol, Lixisol y Luvisol (Spaargaren, 1994)	23
Figura 3-1. Metodología utilizada para el estudio de la interacción suelo-vinaza	25
Figura 3.1-1. Localización de los sitios de muestreo e isoyetas mayo a octubre	27
Figura 3.2-1. Diagrama de flujo sobre el tratamiento de las vinazas en el tren anaerobio-aerobio	30
Figura 3.2-2. Diagrama conceptual para el análisis de las vinazas	31
Figura 3.3-1. Columnas de suelo para la medición de la infiltración	33
Figura 3.4-1. Diagrama metodológico para el análisis de los efectos de las vinazas en el suelo	35
Figura 4.1-1. Mapa de la morfoedología del Valle de Atoyac	38
Figura 4.1-2. Mapa de suelos del valle de Atoyac	40
Figura 4.3-1. Valores de pH en los suelos de las columnas tratadas con vinazas	54
Figura 4.3-2. Cambios en los valores de pH del suelo por la aplicación de vinaza cruda	56
Figura 4.3-3. Cambios en la conductividad eléctrica del suelo por la aplicación de vinaza cruda	57
Figura 4.3-4. Estimaciones de flagelados en los suelos tratados con vinaza cruda	60
Figura 4.3-5. Estimaciones de ciliados en los suelos tratados con vinaza cruda	61
Figura 4.3-6. Cationes intercambiables en los suelos tratados con vinaza cruda	62
Figura 4.4-1. Cambios de los valores de pH en suelos de la unidad Acrisol por la aplicación de vinazas	65
Figura 4.4-2. Cambios en los valores de pH en suelos de la unidad Fluvisol por la aplicación de vinazas	67
Figura 4.4-3. Tendencias de cambio en el contenido de carbono orgánico total en suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol por la aplicación de vinazas	72
Figura 4.4-4. Tendencias de cambio en el contenido de carbono orgánico extraíble en agua de los suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol	75
Figura 4.4-5. Producción de CO <sub>2</sub> en un suelo de la unidad Acrisol tratado con vinazas	77

Figura 4.4-6. Producción de CO <sub>2</sub> en un suelo de la unidad Fluvisol tratado con vinazas	78
Figura 4.4-7. Germinación de semillas de maíz y frijol utilizando vinazas y un sustrato inerte (Villatoro, 1998)	86
Figura 4.4-8. Altura de las plantas de maíz en suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol tratada con vinazas (Villatoro, 1998)	87
Figura 5.5-1. Modelo conceptual de la interacción entre los compuestos orgánicos de las vinazas crudas y el Acrisol	99
Figura 5.5-2. Modelo conceptual de la interacción entre los compuestos orgánicos de la vinaza cruda y el Fluvisol	99
Figura 5.6-1. Subproductos de la industria azucarera-alcoholera y sus opciones de manejo en el municipio de Atoyac, Veracruz, México	103

## Prólogo

El manejo integral de los recursos naturales alrededor de los ingenios azucareros debe presentar cambios profundos que lo conduzcan hacia la sustentabilidad del sistema productivo. La mayoría de los ingenios azucareros llevan más de 60 años de operación y fueron diseñados para operar en condiciones de abundancia de recursos naturales (suelo y agua principalmente). Es por esto que, actualmente, se presentan diversos problemas que pueden llegar a ocasionar un serio agotamiento y deterioro de los recursos naturales. Por ejemplo, disminución del agua disponible para el proceso productivo (como ya ocurre en otros países), contaminación de los cuerpos de agua subterráneos y superficiales, así como degradación del suelo (compactación, erosión, contaminación, pérdida de la fertilidad y salinización). Los problemas de agotamiento y deterioro de recursos naturales son el comienzo de problemas económicos y sociales de grandes consecuencias.

En los últimos años, a nivel mundial, la obtención intensiva de recursos de los ecosistemas se ha hecho de manera tal que no tiene precedente en la historia. Este tipo de desarrollo actual en el que se presenta una sobre-explotación del "capital natural" con la finalidad de obtención de la máxima ganancia y del excedente económico en el corto plazo, es el causante de los problemas ambientales globales (efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono, contaminación atmosférica y contaminación del agua, entre otros), y en buena proporción de los problemas locales (deforestación, erosión, pérdida de la biodiversidad, pobreza, etc.). A su vez, estos problemas ambientales limitan al mismo desarrollo.

El nuevo paradigma de desarrollo basado en el manejo de los recursos naturales, también llamado de ecosistemas, requiere que los sistemas productivos de aprovechamiento de los recursos naturales tengan en cuenta los procesos ecológicos y el estado de los recursos. Con base en ello, se deben diseñar las prácticas de manejo del ecosistema y así disminuir los problemas de agotamiento y deterioro de recursos naturales. Sin embargo, la instrumentación del manejo de los recursos naturales, con este enfoque, requiere que se asuman responsabilidades a nivel local, municipal, estatal y federal, así como la coordinación entre las dependencias encargadas de regular el consumo de agua (CNA), actividades agrícolas, ganaderas y forestales (SAGAR), ambiente (SEMARNAP), salud (SSA), entre otras.

Existen dos grandes restricciones de operación para la implementación de un manejo integral de los ecosistemas: 1) La distribución espacial y los procesos naturales influyen en las decisiones del manejo de la tierra; y 2) La dificultad que se presenta por las fronteras culturales, de propiedad privada, jurisdiccionales y de otro tipo que no son "respetadas" por los procesos ecológicos.

Es claro que difícilmente se podrá incorporar la complejidad total de los ecosistemas en las prácticas de manejo, por lo que se requiere que los planes de manejo sean flexibles y evaluados periódicamente con base en propiedades de los recursos que pudieran ser consideradas como indicadoras de sustentabilidad. Por ejemplo, indicadores de la calidad del suelo como: compactación, estado y dinámica de la

fertilidad, pérdida de suelo, entre otras. De igual manera, se deben incluir indicadores de la cantidad y calidad del agua como: nivel de agua en el acuífero, demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuelto, pH, coliformes fecales, entre otras; así como la cantidad y calidad del producto (caña de azúcar, café, maíz, etc.), entre otros.

Por último, otra restricción importante para la implementación de planes de manejo sustentable de los recursos naturales estriba en la preparación de profesionales con una visión global del ecosistema y capaces de entender y mejorar el proceso productivo. Ambas cualidades se requieren para coordinar las actividades de especialistas en cada una de las áreas de producción (agronomía, manejo del agua, proceso industrial, manejo de suelo, administración y desarrollo rural).

Ante esta situación de un paradigma de desarrollo actual en crisis y otro en construcción, se requiere trabajar en ambos sentidos, es decir, por un lado deben darse respuestas tecnológicas a los problemas de contaminación y tratamiento de desechos. Por otro lado, tratar de incorporar los conceptos ecológicos a lo largo del proceso productivo e insertando la actividad productiva en el funcionamiento del ecosistema (unidad de paisaje o cuenca), así como generar herramientas ecológicas tales como los indicadores de la calidad del ambiente que permitan predecir nuevos escenarios para la continuación de las actividades productivas y para las nuevas opciones de mejoramiento.

En este marco, la información y recomendaciones generadas en el presente trabajo de tesis representan parte de la base científica para la generación de una propuesta tecnológica que pudiera ayudar a la disminución de los problemas de contaminación y deterioro de los recursos naturales en el municipio de Atoyac; sin embargo, considerando la magnitud y relevancia de los problemas ambientales de los ingenios azucareros la aplicación de las soluciones apenas comienza.

## RESUMEN

El estudio consta de tres partes: 1) Diagnóstico de los suelos aledaños al ingenio; 2) Caracterización de vinazas; y 3) Experimentos con macetas y suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol. Se llevó a cabo un estudio de los suelos de la zona cañera de Córdoba, Veracruz, México, con el fin de realizar una clasificación numérica por componentes principales y otra según la FAO. Se generaron dos mapas, uno morfopedológico y otro edafológico con el propósito de usarlos para el manejo de los suelos. Por la ordenación numérica se identificaron sus propiedades de agrupamiento. Las propiedades distintivas de los suelos fueron: Valor de pH, porcentaje de arcillas, densidad real y precipitación pluvial. Se recomienda la realización de un mapa de suelos con mayor detalle, conteniendo estas propiedades, el cual sería poco costoso y muy útil en la práctica, por la relación con la retención de fosfatos, toxicidad por aluminio, retención de humedad y condiciones de óxido-reducción, entre otras. Se encontraron en la zona de estudio, suelos de las unidades Acrisol, Lixisol, Fluvisol y Cambisol, los dos primeros no habían sido reportados en la carta edafológica 1:250 000 del INEGI. La caracterización de los tres tipos de vinazas: Crudas, VC, tratadas anaerobiamente, VA y tratadas anaerobia-aerobiamente, VAA, se realizaron con el fin de conocer los beneficios potenciales y los riesgos de su aplicación al suelo. Los resultados indican que las vinazas tratadas biológicamente podrían ser una mejor enmienda que las crudas, principalmente por las formas químicas del carbono, que son moléculas con propiedades coloidales, que mejorarían las propiedades de los suelos. Los valores de pH para vinaza cruda o sin tratar, vinaza anaerobia y vinaza anaerobia-aerobia son 4.5, 9.3, 9.5, respectivamente. Cabe mencionar, sin embargo que los tres tipos de vinazas presentan una alta conductividad eléctrica, motivo por el cual constituyen un riesgo de salinización del suelo (29.3, 19.5, 19.1 dSi m<sup>-1</sup>, respectivamente). Los tres tipos de vinazas contienen metales pesados en cantidades bajas, excepto el Zn (60 a 49.6 mg L<sup>-1</sup>), que se encuentra por arriba de los contenidos permitidos por la legislación mexicana. Los resultados de los experimentos con macetas a condiciones de invernadero analizaron pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y soluble, potasio intercambiable, fósforo (técnica Olsen), identificación de minerales y contenido total de elementos e indican que, con la adición de las vinazas, el pH de los suelos aumenta, siendo el Acrisol el suelo en el que el aumento es mayor (1.5 unidades de pH). La conductividad eléctrica del suelo se incrementa fuertemente en el Fluvisol, por lo que es el suelo que presentaría mayores riesgos de salinización. En cuanto a la mineralización de la materia orgánica, comparando entre suelos, el Acrisol tratado con vinaza cruda funcionó, ligeramente mejor como reactor que el Fluvisol, presentando una K= -0.093, equivalente a una pérdida de carbono orgánico de 0.93 g kg<sup>-1</sup> de suelo por semana. La mineralización del carbono orgánico soluble en el Acrisol tratado con vinaza cruda presentó una tasa casi cuatro veces superior al Fluvisol. Las vinazas tratadas (VA y VAA) mejoran las propiedades de los

## Resumen

El estudio consta de tres partes: 1) Diagnóstico de los suelos aledaños al ingenio; 2) Caracterización de vinazas; y 3) Experimentos con macetas y suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol. Con respecto a los suelos, se llevó a cabo un estudio de los suelos de la zona cañera de Córdoba, Veracruz, México con el fin de realizar una clasificación numérica por componentes principales y otra según la FAO. Se generaron dos mapas, uno morfopedológico y otro edafológico con objetivos de manejo de suelo. Por la ordenación numérica se identificaron sus propiedades de agrupamiento. Las propiedades distintivas de los suelos son: pH, porcentaje de arcillas, densidad real y precipitación pluvial. Se recomienda la realización de un mapa de suelos con mayor detalle, conteniendo estas propiedades, el cual sería poco costoso y muy útil en la práctica, por la relación con la retención de fosfatos, toxicidad por aluminio, retención de humedad y condiciones de óxido-reducción, entre otras. Se encontraron en la zona de estudio, suelos de las unidades Acrisol, Lixisol, Fluvisol y Cambisol, los dos primeros no habían sido reportados en la carta edafológica 1:250 000 del INEGI. La caracterización de los tres tipos de vinazas: crudas, tratadas anaerobiamente y tratadas anaerobia y aerobiamente, se realizaron con el fin de conocer los beneficios potenciales y los riesgos de su aplicación al suelo. Los resultados indican que las vinazas tratadas biológicamente podrían ser una mejor enmienda que las crudas, principalmente por las formas químicas del carbono, que son moléculas con propiedades coloidales, que mejorarían las propiedades de los suelos. Cabe mencionar, sin embargo que los tres tipos de vinazas presentan una alta conductividad eléctrica, motivo por el cual constituyen un riesgo de salinización del suelo. Los valores de pH son 4.5, 9.3, 9.5 para vinaza cruda, vinaza anaerobia y vinaza anaerobia-aerobia, respectivamente. Los tres tipos de vinazas contienen metales pesados en cantidades bajas, excepto el Zn (60 a 49.6 mg L<sup>-1</sup>), que se encuentra por arriba de los contenidos permitidos por la legislación mexicana. El experimento con macetas se realizó bajo condiciones de invernadero y con dos suelos (Acrisol y Fluvisol). Los resultados de los experimentos indican que con la adición de las vinazas el pH de los suelos aumenta, siendo el Acrisol el suelo en el que el aumento es mayor (1.5 unidades de pH). La conductividad eléctrica del suelo se incrementa fuertemente en el Fluvisol, por lo que es el suelo que presentaría mayores riesgos de salinización. En cuanto a la mineralización de la materia orgánica, comparando entre suelos, el Acrisol tratado con vinaza cruda funcionó, ligeramente mejor como reactor que el Fluvisol, presentando una K= -0.093, equivalente a una pérdida de carbono orgánico de 0.93 g kg<sup>-1</sup> de suelo por semana. La mineralización del carbono orgánico soluble en el Acrisol tratado con vinaza cruda presentó una tasa casi cuatro veces superior al Fluvisol. Las vinazas tratadas (VA y VAA) mejoran las propiedades de los dos suelos y no parecen constituir un riesgo de salinización tan grande como el de las vinazas crudas, por ello, los suelos podrían recibir mayores dosis de vinazas tratadas. Se concluye que el Acrisol es el suelo en el cual los beneficios son mayores y los riesgos de salinización y contaminación de los cuerpos de agua aledaños menores, en comparación con el Fluvisol. Las vinazas deben ser consideradas como enmiendas edáficas y no como agua de riego.

dos suelos y no parecen constituir un riesgo de salinización tan grande como el de las vinazas crudas, por ello, los suelos podrían recibir mayores dosis de vinazas tratadas. Se concluye que el Acrisol es el suelo en el cual los beneficios son mayores y los riesgos de salinización y contaminación de los cuerpos de agua aledaños menores, en comparación con el Fluvisol y que las vinazas deben ser consideradas como enmiendas edáficas y no como agua de riego.

## ABSTRACT

This research has approached three subjects: 1) Soil diagnosis; 2) Characterization of vinasses; and 3) Experiments with flower-pots using soils from the Acrisol and Fluvisol units. Soils from the sugarcane zone of Cordoba, Veracruz, Mexico, were studied with the aim of classifying them, either considering its main components, and by using the FAO nomenclature. The objective was to generate two maps, one morphopedological and the other one edaphological, both for soil management purposes. Soil group properties were identified using the numerical or components classification. The distinctive soil properties considered were pH values, clay percentage, real density and rainfall. A recommendation derived from these activities is the drawing of a more detailed soil map containing these properties. Such activity would be very unexpensive considering its practical usefulness, since such soil properties are very relevant (i.e. soil fosfates retention, aluminum toxicity, moisture retention, oxido-reduction conditions, among others). The soil groups found in the zone were Acrisol, Lixisol, Fluvisol, and Cambisol. The first two units have not been reported in the actual INEGI soil charts. In order to evaluate the potentialities and risks of the vinasses application on soils chemical characteristics of three types of vinasses [crude or untreated vinasses (VC), anaerobically-treated vinasses (VA), and anaerobic-aerobically-treated vinasses (VAA)] were analyzed. Results indicate that those biologically treated can be considered a better soil amendment than crude vinasses (VC), due to its C compounds, which are present as molecules with colloidal properties, may improve the soil characteristics. Values of pH for VC, VA, and VAA were 4.5, 9.3 and 9.5, respectively. However, it should be mentioned that the three types of vinasses have high electrical conductivity values (29.3, 19.5, 19.1 dSi m<sup>-1</sup>, respectively). For this reason, they represent a risk of soil salinization. The three types of vinasses contain low quantities of heavy metals, except for Zn (60 to 49.6 mg L<sup>-1</sup>), with contents above the permissible levels of the Mexican law. For the experiments carried out in the pots, under nursery conditions, the effects of the vinasses on soil properties were determined by analyzing pH, electrical conductivity, total and soluble organic carbon, exchangeable potassium, Olsen-technique phosphorous, identification of minerals, and total contents of elements. Results showed that soil pH levels increased with the addition of vinasses. The Acrisol registered recorded the highest increment (1.5 pH units). Electrical conductivity increased greatly on the Fluvisol, placing it as the soil with the highest risk of salinization. Comparing organic matter mineralization between soils, Acrisol with VC



## Abstract

The research have tree parts: 1) Soil diagnosis; 2) Characterization of vinasses; and 3) Experiment with flower pots use Acrisol and Fluvisol. Soils from the sugarcane zone of Cordoba, Veracruz, Mexico, were studied with the aim to classify them both numerically (by principal components), and by FAO nomenclature. Two maps, a morphopedological and edaphological, with soil management objectives were generated. By numerical classification, group properties were identified. The distinctive soil properties were: (pH, clay percentage, real density and precipitation). From these results, it was recommended making a much detailed soils map. Having these properties it would be less expensive and in practice, more useful, due to its relation with P retention, Al toxicity, moisture retention and oxide-reduction conditions, among others. Soil groups found in the zone were Acrisol, Lixisol, Fluvisol and Cambisol, with the first two not being reported in the soil chart. To determine the potential and risks of vinasses on the soils, chemical characteristics of three types of vinasses [crude vinasses (CV), vinasses treated anaerobic (VA), and vinasses anaerobic and aerobically (VAA)] were analyzed. Results from the analysis of vinasses indicated that those (vinasses) treated biologically can be a better amendment than crude vinasses (CV), principally, due to their C chemical forms, which are molecules with colloidal properties that improve the physical, chemical and biological properties of the soil. However, it is worth to mention that the three types of vinasses have high electrical conductivities, reason why they pose the risk of soil salinization. Values of pH for CV, VA and VAA were 4.5, 9.3 and 9.5, respectively. The three vinasses contain low quantities of heavy metals, except for Zn (60 to 49.6 mg L<sup>-1</sup>), which was found to be in higher quantities than the permissible levels of Mexican law. The study was carried out with flower pots, under nursery conditions and using two soils (Acrisol and Fluvisol). After four weeks, the effects of the vinasses on soil properties were determined by analyzing pH, electrical conductivity, total and soluble organic carbon, exchangeable potassium, Olsen phosphorous, identification of minerals and total contents of elements. Results from the flower pot study showed that soil pH levels increased with the addition of vinasses, in which the Acrisol soil recorded the highest increment (1.5 pH units). Soil electrical conductivity increased greatly on the Fluvisol soil, making it the soil with the highest risk of salinization. Comparing organic matter mineralization between soils, Acrisol with VC treatment worked a little better as a reactor than Fluvisol, with a K= -0.093 equivalent to a loss of 0.93 g kg of soil<sup>-1</sup> per week of organic carbon. Acrisol treated with CV registered a rate of soluble organic carbon mineralization almost four times superior to Fluvisol. The treated vinasses (VA and VAA) improved the properties of both soils and did not seem to constitute a salinity risk as high as CV thus, soils could receive higher doses of treated vinasses. In conclusion, Acrisol is the soil that presents the most benefits and has lower risks of salinizing and contaminating nearby water bodies, than Fluvisol. The vinasses should be considered as a soil amendment, not as irrigation water.

treatment worked a little better as a reactor than Fluvisol, with a  $K = -0.093$ , equivalent to a loss of  $0.93 \text{ g kg}^{-1}$  of soil per week of organic carbon. Acrisol treated with CV registered a rate of soluble organic carbon mineralization almost four times higher than Fluvisol. The treated vinasses (VA and VAA) improved the properties of both soils and did not seem to constitute a salinity risk as high as CV, thus soils could receive higher doses of treated vinasses. In conclusion, Acrisol is the soil that presents the most benefits and has lower risks of salinization and contamination of nearby water bodies, than Fluvisol. Final conclusion is that vinasses should be considered as a soil amendment and not as irrigation water.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La relación e interacciones entre los constituyentes del suelo y la materia orgánica ha sido y es de gran interés debido a que estas interacciones participan de manera importante en el reciclaje de nutrientes, intemperismo, desarrollo del perfil, estabilidad de los agregados, lixiviación, capacidad amortiguadora del suelo y en la recepción, transformación y desactivación de contaminantes.

Los suelos retienen iones y moléculas mediante el intercambio de cationes y aniones, atracción electrostática débil, formación de complejos y por la absorción de microorganismos. Si un solo mecanismo o componente del suelo retuviera cierto tipo de ion, la química de los suelos sería relativamente simple. En cambio, la reacción de cada ion ó molécula con los diversos componentes de la fase sólida del suelo obedece a diferentes mecanismos y se llevan al cabo a grados distintos. Las interacciones son excesivamente complejas (Alexander y Scow, 1987; Bohn *et al.*, 1993).

Los estudios sobre la interacción entre los constituyentes del suelo y la materia orgánica pueden ser de muy variados tipos y dependen del mineral y de la estructura molecular del compuesto orgánico. Es por esto, que se tienen problemas para la identificación de los mecanismos de interacción de los compuestos orgánicos y de los minerales del suelo (Theng, 1982). Por ejemplo, la mezcla de compuestos orgánicos (monómeros y polímeros) se comportan de manera diferente, las cadenas de polímeros son flexibles, multisegmentadas y polifuncionales y pueden adoptar varias conformaciones en disolución. Es decir, pueden ser polímeros sin carga, policationes y polianiones. Por otro lado, los suelos contienen cationes solubles e intercambiables, aluminosilicatos, sustancias húmicas y óxidos de hierro, aluminio y manganeso, entre otros, que participan en la retención de compuestos orgánicos.

A pesar de lo complejo de las interacciones entre la materia orgánica y la fase sólida del suelo, las investigaciones sobre el tema han arrojado las siguientes conclusiones, con respecto a los componentes del suelo:

- El aumento del pH provoca la disociación de los grupos ácidos. En condiciones alcalinas aumenta la repulsión entre polianiones y arcillas. La adsorción de proteínas es pH dependiente, aumentando con el incremento del pH. La adsorción de ácidos nucleicos y nucleoproteínas en las arcillas disminuye con el aumento del pH (Varadachari *et al.*, 1994). La actividad de las enzimas es mayor a valores de pH alcalinos.
- El tipo de carga y cantidad de sitios de intercambio (McBride, 1989), repercuten en la adsorción y absorción de las enzimas extracelulares disminuyendo su actividad, así como en la formación de agregados, lo cual ocasiona la protección física de la materia orgánica. Los ácidos nucleicos y las núcleo-proteínas que se adsorben a las arcillas se encuentran protegidas de las enzimas extracelulares. La actividad catalítica de los óxidos de hierro, manganeso (Larson y Hufnal, 1980; Oades, 1989; McBride, 1989) y aluminio (McBride, 1979) es bien conocida.

- Los cationes intercambiables se unen a las arcillas con diferente fuerza e influyen en los enlaces arcilla-cation-compuesto orgánico. El tipo de enlace depende del potencial iónico del elemento (Varadachari *et al.*, 1994).
- En condiciones de sequedad y humedecimiento los compuestos orgánicos solubles y las arcillas, pueden formar uniones más firmes. En condiciones de secado se forman complejos arcilla-humus (Varadachari *et al.*, 1994).

En cuanto al comportamiento de los compuestos orgánicos, se sabe lo siguiente:

- Los grupos hidrofílicos de los compuestos orgánicos influyen en la retención. A mayor tamaño de los polímeros mayor adsorción.
- Los polianiones pueden ser adsorbidos en condiciones ácidas (intercambio de ligantes y fuerzas residuales de van der Waals) (McBride, 1989; Theng, 1982; Varadachari *et al.*, 1994). Los polianiones pueden ser adsorbidos por la presencia de cationes polivalentes como los óxidos de hierro y aluminio, así como por las arcillas, como polianión-cation-aluminosilicato (McBride, 1989; Varadachari *et al.*, 1994).
- Los policationes pueden ser adsorbidos por los aluminosilicatos y neutralizar su carga. Los policationes pueden neutralizar la carga de las arcillas y funcionar como coagulantes (Theng, 1982).
- Los polisacáridos pueden ser neutros, con carga negativa o positiva. Son altamente retenidos y participan en la formación de los agregados (Theng, 1982).
- Los minerales del suelo como los óxidos de los metales de transición ( $MnO_2$ , ZnO, CuO), cationes ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) y las arcillas participan en la polimerización de los compuestos orgánicos fenólicos (Larson y Hufnal, 1980).

Por otro lado, si se tiene en cuenta la cantidad de aguas residuales que se generan en el país ( $105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de origen doméstico y  $82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de origen industrial, en las cuales el principal componente es la materia orgánica) y los problemas de manejo y de contaminación que esto ocasiona, se comprenderá la necesidad apremiante del conocimiento de la interacción de la materia orgánica disuelta y de los diversos suelos agrícolas.

Además, los desechos orgánicos pueden verse como un recurso que puede ser aprovechado, de hecho, la legislación recomienda la aplicación a los suelos de aguas residuales en las que el principal componente es la materia orgánica; sin embargo, es bien sabido que los productos de la fermentación inhiben la germinación de las semillas y producen compuestos fitotóxicos (García *et al.*, 1991a; b), por lo cual debe tenerse cuidado con dicha recomendación.

El escaso avance en el conocimiento de la interacción entre la materia orgánica disuelta y los diferentes suelos, ha ocasionado que se desaprovechen las ventajas de su aplicación al suelo y ha generado problemas ambientales.

### ***Problemática de los ingenios azucareros***

La producción de azúcar en el mundo es de alrededor de 100 millones de toneladas anuales. De esta cantidad el 60% aproximadamente se obtiene de la caña de

azúcar de 110 países, situados en su mayoría entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, es decir, en las zonas intertropicales y ecuatoriales. En general, los países productores de caña de azúcar tienen economías débiles y, para algunos de ellos, este cultivo es su principal medio de subsistencia (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991a).

La industria azucarera mexicana cuenta en la actualidad con 64 ingenios distribuidos en 14 estados que son : Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Colima, Tamaulipas, Veracruz, San Luis Potosí, Oaxaca, Morelos, Puebla, Campeche, Chiapas y Quintana Roo, siendo una actividad productiva de alto impacto a lo largo del país (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991b). En México, en la zafra 1992-1993 se cosecharon 44 millones de toneladas de caña de las cuales se generaron 4 millones 80 mil toneladas de azúcar que a nivel mundial solo fue superado por la India, Brasil y Cuba. A pesar del aparente éxito productivo, para 1994 cerraron dos ingenios y varios más se encuentran en problemas económicos graves (Moreno, 1994). El estado de Veracruz es el más importante productor de azúcar a nivel nacional con 14 ingenios azucareros (Rodríguez, 1994).

La industria azucarera mexicana, enfrenta tres grandes problemas: 1) la aparición de otros edulcorantes naturales y sintéticos; 2) altos costos de producción; y 3) contaminación ambiental (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1994; Moreno, 1994). Ante estos problemas, las opciones son disminuir los costos de producción y aumentar la productividad. El reúso de los desechos puede ayudar a alcanzar esas opciones, como lo muestran los resultados de este estudio.

La idea de agregar al suelo las vinazas crudas, tratadas anaerobiamente y tratadas anaerobia-aerobiamente busca, por un lado, inducir la formación de compuestos húmicos (polimerización) y, por el otro, oxidar de manera natural (sin un gasto energético adicional) los compuestos "no estructurales" como los carbohidratos, aminoácidos y proteínas, lo cual representa una visión novedosa en cuanto a tratamiento de residuos orgánicos industriales.

Además, se pretende mejorar la fertilidad del suelo debido al aumento de elementos nutrimentales y por el mejoramiento de las propiedades bioquímicas, químicas y físicas del suelo. Sin embargo, no se conoce con profundidad la capacidad de los diferentes tipos de suelo para recibir y transformar compuestos orgánicos del tipo de las vinazas, así como identificar los cambios químicos en los suelos por la aplicación de la materia orgánica contenida en las vinazas.

Por otro lado, en el municipio de Atoyac en Córdoba Veracruz, se localizan alrededor de 30,000 ha de cultivo de caña. Allí se encuentran operando dos grandes ingenios azucareros-alcoholeros: "El Potrero" y "San José de Abajo". En ambos, se genera gran cantidad de subproductos orgánicos que pudieran llegar a servir como enmiendas para los suelos. Desafortunadamente se carece de información acerca de las propiedades y procesos edáficos, lo cual dificulta la toma de decisiones en relación con la disposición y uso agrícola de los desechos producidos en los ingenios de la zona. Por esto es de primordial importancia la realización de levantamientos edáficos (Bautista y Estrada, 1988) y/o de

levantamientos de tierras campesinas (Ortiz *et al.*, 1990) así como de experimentación agrícola con el fin de utilizar los desechos orgánicos tanto como enmiendas, así como fuente de nutrimentos para la caña de azúcar.

Con base en esta problemática, en este trabajo de investigación se plantean los objetivos que a continuación se desglosan.

## **Objetivos**

### General

- Hacer una propuesta de selección de los suelos en los cuales la aplicación de vinaza sea conveniente desde una perspectiva agronómica y ambiental.

### Particulares

- Elaboración de un diagnóstico de los suelos cañeros del municipio Atoyac en Córdoba, Veracruz, México e identificar las propiedades y procesos del suelo más importantes para identificarlos de manera rápida y sencilla, con el fin de recomendar la aplicación de enmiendas.
- Caracterizar e identificar los componentes de las vinazas crudas, tratadas anaerobiamente y tratadas anaerobia-aerobiamente y evaluar los riesgos y beneficios potenciales de su aplicación al suelo.
- Caracterizar e identificar los suelos en los cuales sea más rápida la descomposición de los compuestos orgánicos contenidos en las vinazas.
- Conocer los cambios químicos de los suelos ocasionados por las vinazas, con el fin de seleccionar los suelos en los cuales los riesgos ambientales sean menores y que presenten mayores beneficios agronómicos.

## **Hipótesis**

Se supone que si en las vinazas crudas el carbono orgánico se encuentra en formas más "inestables" (por ejemplo, carbohidratos, proteínas, aminoácidos, aldehídos, cetonas, etc), en las tratadas biológicamente (formas más estables, probablemente humus), la materia orgánica contenida en las vinazas, se mineralizará en los suelos de acuerdo a la siguiente secuencia: vinaza cruda > vinaza anaerobia > vinaza anaerobia-aerobia. La vinaza cruda será la de mayor riesgo de salinización.

Es probable que en suelos ácidos de la unidad Acrisol en los cuales predominan coloides del tipo de los oxohidroxos de Fe y Al, la aplicación de las VC y tratadas, se mineralicen más rápido y sean una mejor enmienda, debido a la oxidación química y a la menor capacidad de los coloides inorgánicos para proteger física y químicamente a la materia orgánica de la biodegradación microbiana. Por el contrario, en suelos menos intemperizados, como los de la unidad Fluvisol, las VC pueden llegar a destruir las arcillas y ocasionar importantes cambios en los minerales del suelo por su acidez y poder ligante, respectivamente.

Para demostrar estas hipótesis y cumplir los objetivos propuestos, es necesario conocer los fundamentos teóricos, así como los métodos experimentales que se seguirán. Ambos rubros se presentan en los siguientes capítulos.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Principales fuentes de desechos líquidos

En México, se generan entre 170 y 184  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  de aguas residuales, de las cuales 105  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  son de origen doméstico y de 79 a 82  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  de origen industrial. La SEDESOL calcula que, para el año dos mil, el volumen llegará a 207  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  (Gutiérrez *et al.*, 1994). Del total, solamente el 15% recibe algún tratamiento (INEGI, 1994).

Las aguas residuales de la industria son de muy variados tipos y características, siendo las industrias azucarera, química, de papel y celulosa y petrolera los cuatro giros industriales más importantes por la extracción, consumo y descarga de agua a nivel nacional.

Las tres industrias que más extraen agua son la azucarera, química y de papel y celulosa. Las que más agua consumen son la química, azucarera, papel y celulosa; las que más descargan son la azucarera, química y petrolera, respectivamente (INEGI, 1994) (Cuadro 2-1).

De las industrias arriba mencionadas, cinco de ellas (azucarera, papelera, petrolera, bebidas y alimentos) generan aguas residuales en las que el constituyente más importante es la materia orgánica. La suma de sus porcentajes de descarga alcanzan el 55.6% del total nacional (INEGI, 1994).

La materia orgánica es uno de los principales constituyentes de las aguas residuales. Por ejemplo, la cuenca del río Pánuco que desemboca en el Golfo de México recibe, en términos de demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), 650 mil toneladas anuales de materia orgánica (INEGI, 1994).

Cuadro 2-1. Principales giros industriales responsables de las mayores descargas de aguas residuales (porcentuales)

Industria	Extracción	Consumo	Descarga
Azucarera	35.2	22.3	38.8
Química	21.7	24.4	21.0
Papel y celulosa	8.2	16.1	6.0
Petróleo	7.2	3.7	8.2
Bebidas	3.3	6.4	2.4
Textil	2.6	2.4	2.7
Siderúrgica	2.5	5.5	1.7
Eléctrica	1.5	4.7	0.7
Alimentos	0.2	0.3	0.2

Fuente: Estadísticas del medio ambiente, México 1994 (INEGI, 1994)

#### 2.1.1 Contaminación del agua

En la producción de azúcar y alcohol de caña en México se utilizan enormes cantidades de agua, que superan el millón de metros cúbicos al día. Esto hace que

la agroindustria azucarera además de consumir grandes cantidades de agua, que es un recurso limitado en el país, contamine fuertemente las cuencas hídricas, que es donde generalmente arrojan sus efluentes (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991a).

Las aguas residuales de los ingenios azucareros-alcoholeros tienen diferente composición, dependiendo del proceso del que provienen como lavado de caña, limpieza de evaporadores y calentadores, purgas de calderas, enfriamiento de condensadores, servicios sanitarios, tinas de fermentación y torres de destilación (vinazas). De las aguas residuales mencionadas, las que más contaminan son las vinazas, las cuales provienen de la destilación del alcohol y que se producen en una proporción de 10 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado.

Se considera que la generación nacional de vinazas es mayor a los 1.5 millones de metros cúbicos al año (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991a). Las vinazas contienen principalmente material orgánico disuelto que, medido como demanda química de oxígeno (DQO), alcanza valores de  $150 \text{ g L}^{-1}$  (casi mil veces la cantidad presente en aguas residuales domésticas), un pH menor a 5, lo que las convierte en un residuo ácido y, debido a este pH va corroyendo los materiales de recipientes y tuberías acumulando metales en disolución. Contienen cantidades importantes de iones sulfato lo que puede generar problemas al ser metabolizadas por las bacterias sulfatorreductoras. Por otro lado, contienen cantidades importantes de nitrógeno total ( $1600 \text{ mg L}^{-1}$ ) y amoniacal ( $150 \text{ mL L}^{-1}$ ) lo que podría constituir una fuente de nitrógeno barata para los suelos en los que se cultiva la caña. Finalmente, la temperatura a la que salen las vinazas de las torres de destilación es de casi  $80^\circ \text{C}$  (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1988; Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991b), lo que dificulta su manejo, originando graves problemas ambientales por su descarga directa.

El tratamiento de estos residuos ha sido motivo de varias investigaciones a nivel de laboratorio y planta piloto, las cuales han logrado reducir el contenido de materia orgánica disuelta hasta en un 90% vía tratamientos aerobios, anaerobios y combinados aerobio-anaerobios (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1988; Durán-de-Bazúa *et al.*, 1994; Durán-de-Bazúa 1994). Sin embargo, el 10% restante es material no biodegradable (muy probablemente humus). Al respecto, no se tiene información sobre el efecto de este material en ríos y demás cuerpos receptores; sin embargo, es muy probable que este material ocasione daños a especies acuáticas tanto animales como vegetales. Además, los iones solubles como el sodio y el potasio se encuentran en altas concentraciones por lo que constituyen un riesgo de salinización de los cuerpos de agua y suelos receptores.

Resulta importante mencionar que, dada la complejidad analítica, no se ha estudiado la transformación bioquímica de los diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos en las vinazas por los organismos anaerobios y aerobios presentes durante las reacciones de conversión.

De hecho, las vinazas per se son aguas residuales que contienen en disolución los productos metabólicos de *Saccharomyces cerevisiae* y otros organismos presentes en las tinas de fermentación después de usar los azúcares reductores remanentes de las mieles incristalizables del jugo de caña concentrado. También contienen la



materia soluble proveniente del jugo de caña sujeta a condiciones extremas de pH y temperatura.

Estas vinazas, llamadas crudas (VC), porque no han recibido ningún tratamiento, tienen, aparentemente, propiedades químicas favorables para ser usadas como mejoradores de suelos con baja capacidad de intercambio de cationes, baja capacidad de campo y, por supuesto, con bajos contenidos de nitrógeno, potasio y otros micronutrientes. Estas cualidades "benéficas" son: gran cantidad de materia orgánica, potasio y nitrógeno (Cuadro 2.1-1).

Debido a que no existen en México estudios sobre la utilización de las vinazas como mejoradores de suelos, se hace necesario estudiar el efecto de la aplicación de las vinazas "crudas" en los suelos utilizados en el cultivo de la caña de azúcar. Para esto, lo primero es la identificación de los riesgos en la salinidad del suelo por el uso de las vinazas y la identificación y localización de los suelos susceptibles de ser tratados con este desecho.

En países en vías de desarrollo como es el caso de México, resulta muy importante desde el punto de vista económico el uso del suelo como sistema de tratamiento de la materia orgánica soluble contenida en diversas aguas residuales, ya sean industriales o domésticas.

Cuadro 2.1-1. Constituyentes de las vinazas crudas y sus posibles efectos en cuerpos de agua y suelos

Parámetro	cantidad	agua	suelos
pH	4.2	X	b, i, X
alcalinidad g L <sup>-1</sup>	5.8	i	i
turbiedad	30000	XX	i
sólidos totales g L <sup>-1</sup>	69 - 90	XX	b, i, X
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	31500	XXX	B
Demanda Química de Oxígeno (DQO) g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	69 - 128	XXX	B
nitrógeno total g L <sup>-1</sup>	1.2 - 1.6	XXX	B, p
nitrógeno amoniacal mg L <sup>-1</sup>	150	XXX	B, p
iones sulfato g L <sup>-1</sup>	3.1 - 5.8	X	b, i, p
iones potasio g L <sup>-1</sup>	8.1	X	B, i
ion sodio g L <sup>-1</sup>	0.14	i	i, p

X= dañino, XX= muy dañino, XXX= extremadamente dañino, b= benéfico, B= muy benéfico, i= indiferente y p= potencialmente peligroso

En el suelo, la materia orgánica se transforma mediante dos procesos, 1) la mineralización y 2) la humificación. En el caso de los compuestos de carbono, la mineralización consiste en la transformación de los compuestos en gases como el CO<sub>2</sub> (en condiciones aerobias) y el CH<sub>4</sub> (en condiciones anaerobias) que pasan a la atmósfera y la humificación se refiere a la transformación de los compuestos orgánicos en grandes moléculas como los ácidos húmicos y fúlvicos y las huminas.

Debido a los procesos de retención y transformación de compuestos orgánicos, los suelos funcionan como reactores en los que el agua se "purifica" de manera natural<sup>1</sup> por supuesto, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del suelo (Bautista *et al.*, 1995).

De manera general, puede decirse que el efecto de la materia orgánica en los suelos es ampliamente conocido (fuente de nutrimentos que se liberan gradualmente, agregación, estructura, infiltración y retención de agua, capacidad de intercambio catiónico (CIC), color del suelo y, por lo tanto, activación y/o desactivación de agroquímicos, fitohormonas, etc) (Buckman y Brady, 1991; Bohn *et al.*, 1993).

Previendo la posible transformación de la industria azucarera en alcoholera, debido al posible cambio de gasolina por alcohol como combustible para los automóviles con el objeto de reducir los problemas de contaminación atmosférica de la Ciudad de México se tratan a continuación varios puntos que apoyan este cambio tecnológico.

### 2.1.2 Vinazas

En los ingenios azucareros se llevan a cabo diversos procesos industriales en los que se generan cantidades considerables de residuos o subproductos, como se muestra en la Figura 2.1-1.

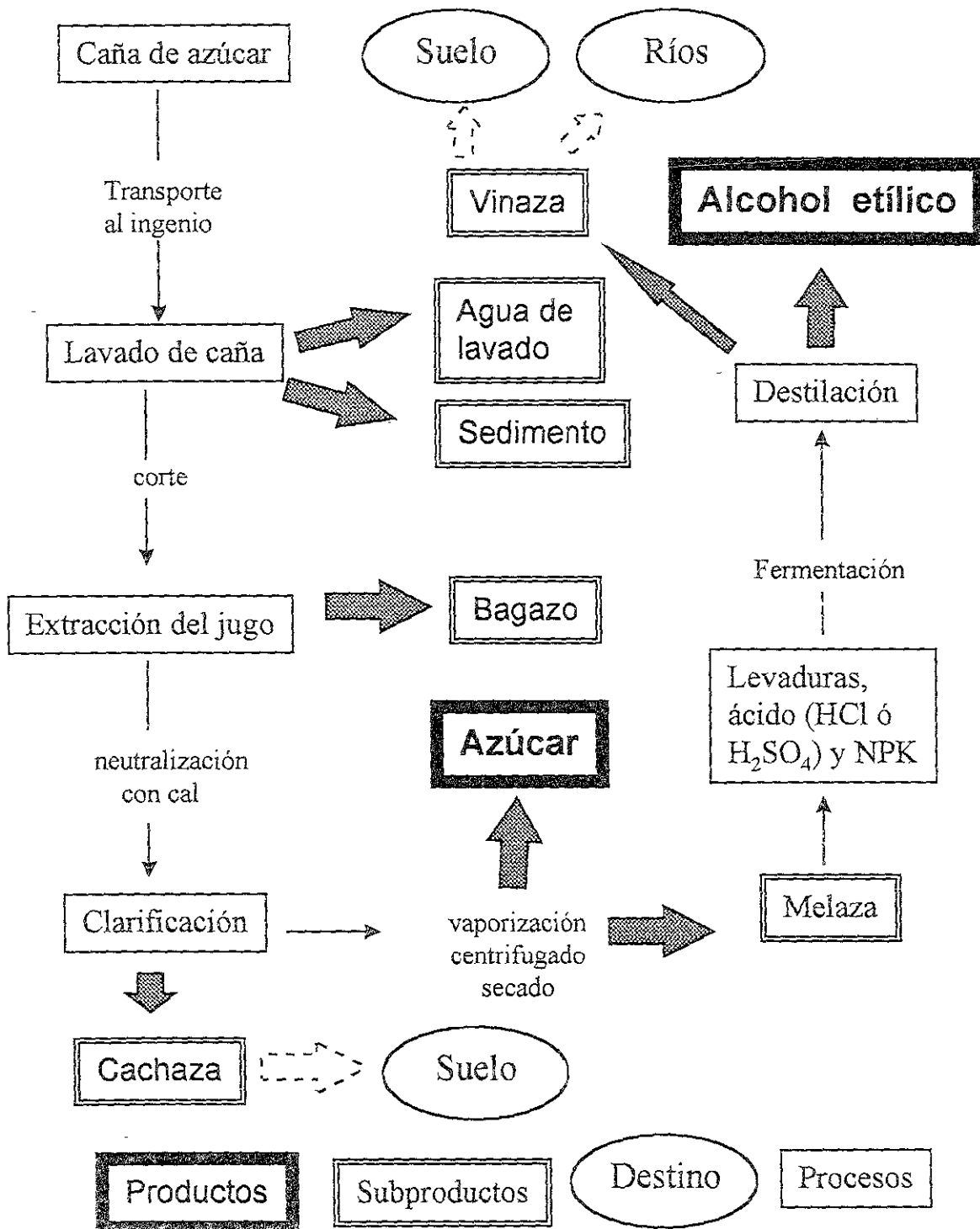
Las melazas son las mieles incristalizables o finas. Constituyen un subproducto de la producción de azúcar. Estas melazas se diluyen y se llevan a un pH de 3.0 con ácido sulfúrico para favorecer el desarrollo de las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) e inhibir a otros microorganismos. Esta mezcla se complementa con sulfato de amonio y fosfato de amonio para obtener la relación C:N:P óptima para que las levaduras se desarrollen adecuadamente. Se coloca en las tinajas de fermentación y se inocula con *S. cerevisiae*. Al terminar la fermentación, el líquido fermentado (denominado vino) se envía a un sistema de dos o tres columnas de destilación.

En la primera columna fraccionadora se inicia la destilación por arrastre de vapor, lo que origina la separación de los componentes que por su punto de ebullición salen por el domo, constituidos por agua, alcohol, aldehídos y cetonas. Del fondo sale una corriente líquida a una temperatura entre 85 y 88°C que se denomina vinaza y es la corriente pobre en etanol. Ésta contiene casi todos los productos secundarios de la fermentación, cuyo punto de ebullición es mayor y restos de levaduras y de los nutrimentos agregados.

---

<sup>1</sup> El suelo posee una capacidad limitada para recibir sustancias orgánicas sin deteriorarse; pasado este límite se pueden presentar problemas de migración de los compuestos orgánicos y/o alteraciones a la biota edáfica, con el consecuente deterioro del ecosistema

Figura 2.1-1. Procesos y residuos en la producción de azúcar y alcohol etílico



Cuadro 2.1-2. Principales constituyentes y características de las vinazas  
(Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991a)

Parámetro	valor
pH	4.2-7.0
alcalinidad, g L <sup>-1</sup>	5.8
turbiedad, UTN	30000
sólidos totales, g L <sup>-1</sup>	69 - 90
DBO <sub>5</sub> , g L <sup>-1</sup>	31.5
DQO, g L <sup>-1</sup>	69 - 128
nitrógeno total, g L <sup>-1</sup>	1.2 - 1.6
nitrógeno amoniacal, g L <sup>-1</sup>	0.150
iones sulfato, g L <sup>-1</sup>	3.1- 5.8
iones potasio, g L <sup>-1</sup>	8.1
ion sodio, g L <sup>-1</sup>	0.14

Las vinazas, como todos los residuos industriales de destilación, varían en su composición (por período y por ingenio), la cual depende de la materia prima utilizada durante la fermentación (caña de azúcar, uvas, maíz, centeno, agaves, etc) así como del proceso industrial en general. En el cuadro 2.1-2 se muestran algunas características de las vinazas producidas en el ingenio Alianza Popular que se encuentra en el estado de San Luis Potosí.

Actualmente las vinazas se analizan y estudian para utilizarse como complemento dietético para animales y se han logrado resultados alentadores aunque no definitivos (Valdés *et al.*, 1991a).

Se ha intentado obtener biomasa microbiana mediante el tratamiento aerobio de las vinazas con el fin de utilizarla como alimento en actividades pecuarias; sin embargo, los altos contenidos de Pb y Zn, entre otros aspectos, han desalentado la utilización de la biomasa microbiana con esos fines (Castro y Villegas, 1989).

Cuadro 2.1-3. Propiedades de las vinazas antes y después del tratamiento anaerobio (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991a)

Parámetro	vinazas		
	sin tratar	tratadas	remoción (%)
pH	5.0	7.4	-
alcalinidad g L <sup>-1</sup>	2.2	8.6	-
sólidos totales g L <sup>-1</sup>	88	66.6	24.32
DQO g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	69.3	19.7	71.57

También existen estudios preliminares sobre la evaluación de los lodos anaerobios producidos a partir del tratamiento de las aguas residuales de las destilerías como "biofertilizantes" (Valdés *et al.*, 1991b), encontrándose que poseen una alta calidad como abono (biofertilizante, es el término utilizado por los autores) debido a las altas cantidades de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio y cantidades

importantes de cobre, zinc y cromo reportadas por Otero y González (1991). Valdés y colaboradores (1991a b) reportan los siguientes metales en las vinazas de su país (Cuba): Pb, Mn, Cu, Zn, Ni, Fe, Al y Cr.

Cuadro 2.1-4. Propiedades de las vinazas antes y después del tratamiento con un reactor de biodiscos (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991a)

Parámetro	vinazas		
	sin tratar	tratadas	remoción (%)
pH	3.6-4.9	6 - 7.1	-
alcalinidad g L <sup>-1</sup>	1.0	9.067	-
turbiedad, TN*	6626	3931	-
sólidos totales g L <sup>-1</sup>	63	43.5	31.0
DBO <sub>5</sub> , g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	29.675	13.450	54.7
DQO g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	69	37	46.4

La biomasa adherida a los biodiscos contiene 27.7% de proteína cruda en base seca y 1.5 de nitrógeno amoniacal. \* Unidades de turbiedad nefelométrica

Existen algunas investigaciones (Durán-de-Bazúa *et al.*, 1988; Durán-de-Bazúa *et al.*, 1991 a, b) que se han dedicado al estudio del tratamiento biológico anaerobio y aerobio de estos residuos con el fin de reducir la carga orgánica y que han alcanzado excelentes resultados pero que, debido a la gran cantidad de material no biodegradable presente en las vinazas, aún hacen necesarias otras investigaciones que ayuden a resolver el problema de la contaminación remanente en las aguas tratadas (Cuadros 2.1-3; Cuadro 2.1-4; y Cuadro 2.1-5).

#### a) Los procesos anaerobios

El objetivo de este proceso es la separación de la MO del agua por la vía anaerobia, con microorganismos que puedan crecer y desarrollarse en un medio carente de oxígeno molecular libre en solución y que en su lugar las reacciones bioquímicas empleen compuestos inorgánicos como aceptores de electrones.

Los organismos convierten la materia orgánica soluble genéricamente en tres etapas: 1) Hidrólisis y fermentación de biopolímeros a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. 2) Transformación de los ácidos grasos a ácido acético y 3) Producción de CH<sub>4</sub>. La producción de metano bajo estas condiciones llega a ser importante y puede considerarse a este gas como un producto con valor intrínseco. El material separado está en la fase gaseosa o en la sólida (biomasa y biogás).

Cuadro 2.1-5. Propiedades de las vinazas antes y después del tratamiento con una secuencia de un reactor de manto de lodos y un reactor de biodiscos (Olvera, 1992)

parámetro	vinazas		
	sin tratar	tratadas	remoción (%)
pH	5.0	7.4	
alcalinidad g L <sup>-1</sup>	2.2	8.6	
sólidos totales g <sup>-1</sup> L	88	67	92.39
DQO g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	69.3	2.9	95.82

Cuadro 2.1-6. Principales ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio

Ventajas	Desventajas
Baja producción de sólidos biológicos de desecho	Las bacterias son muy sensibles
Funciona para altas cargas orgánicas	El arranque del proceso sin inóculo es extremadamente lento
El lodo puede reutilizarse	El lodo y el efluente requieren postratamiento
Producción de metano	
Bajo requerimiento de nutrientes	
Bajo costo energético	

Los microorganismos que intervienen en la degradación de la MO son: Bacterias metanogénicas, bacterias sulfatorreductoras, bacterias fermentativas y bacterias propiónicas y butíricas (Rosas *et al.*, 1993).

Recientemente, el uso de los procesos de depuración de aguas residuales industriales bajo condiciones de anaerobiosis se ha incrementado, debido a su bajo costo en comparación con los procesos aerobios y a que se puede trabajar con altas cargas orgánicas (Cuadro 2.1-6) (Ilangoan y Noyola, 1993).

*b) Los procesos aerobios*

En estos procesos se incorpora oxígeno al agua residual, con el fin de favorecer el crecimiento de organismos aerobios y la degradación (oxidación) de la MO, pasándola de la fase soluble a la fase sólida (biomasa) y a la gaseosa (CO<sub>2</sub>).

La incorporación de oxígeno al medio debe ser superior a dos miligramos por litro, para que este elemento no se convierta en un factor limitativo del crecimiento de los microorganismos aerobios. La biodegradación aerobia de la MO consiste en la formación de compuestos minerales como: CO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, principalmente.

Los microorganismos que intervienen en este proceso para el caso de las vinazas, además de bacterias y hongos microscópicos, son ciliados flagelados, amibas, nemátodos y rotíferos. Por grupo, destacan los flagelados y los ciliados (Luna-Pabello *et al.*, 1994). Cabe destacar que conforme la estructura comunitaria es más compleja, el nivel depurativo logrado por tratamientos biológicos es mayor.

Cuadro 2.1-7. Principales ventajas y desventajas del tratamiento aerobio

Ventajas	Desventajas
La velocidad del proceso	Requiere aeración (energía)
Se pueden tratar grandes volúmenes de aguas residuales	Alta producción de sólidos biológicos que deben estabilizarse
No requiere postratamiento	Funciona para bajas cargas orgánicas (ya que la energía suministrada debe aumentar conforme aumenta la carga orgánica)

### **2.1.3 Importancia del alcohol etílico y la generación de vinazas en el mejoramiento del ambiente en las grandes ciudades**

Los gases de combustión de la gasolina, combustóleo y gas natural generan monóxido de carbono, bióxido de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, todos ellos componentes principales de la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana en la Ciudad de México.

La magnitud del problema de contaminación atmosférica se explica por los 30 millones de viajes que se realizan diariamente en la ciudad de México. Estos viajes se realizan en los vehículos automotores que circulan en el área metropolitana que consta de 2 661 000 autos; 85 679 taxis; 67 000 combis; y 450 trolebuses (Lacy, 1993). Además, prácticamente todas las casas utilizan mezclas butano-propano (líquido conocido como LP) como combustible.

El riesgo de contaminación por el manejo (transporte, almacenamiento y uso) de los combustibles derivados del petróleo son altos debido a que contienen sustancias tóxicas y xenobióticas difícilmente biodegradables.

Ante esta problemática, una opción de solución a los graves problemas de contaminación atmosférica del área metropolitana de México es la utilización de alcohol etílico como combustible. Esta práctica ya ha sido explorada y utilizada con éxito en países como Brasil.

Por el alto potencial productivo de caña de azúcar en el país (44 millones de toneladas de caña anuales y quinto nivel mundial en producción de azúcar) es posible producir directamente el alcohol etílico necesario para las zonas metropolitanas del país.

Con esta opción productiva, los estados cañeros cercanos a la capital del país como Morelos y Veracruz, los más productivos, podrían destinar buena parte de su producción de caña de azúcar a la elaboración de alcohol etílico directamente, es decir, sin producir azúcar.

El cambio tecnológico para la producción de alcohol etílico en sustitución del azúcar, es mínimo ya que solamente se necesitaría invertir en el aumento de la capacidad de destilación de los ingenios azucareros; estos cuentan con la infraestructura para la limpieza y molienda de la caña que son los dos procesos previos a la preparación del mosto y destilación.

La transformación de los ingenios azucareros a alcoholeros reduciría de manera importante la extracción y consumo de las grandes cantidades de agua potable utilizadas durante el proceso de separación y refinación del azúcar. De la misma manera y, de acuerdo con Klomp y colaboradores (1995), se produciría una reducción considerable en el consumo de energía debido a la eliminación de los procesos arriba mencionados.

Las ventajas ambientales del uso de alcohol etílico como combustible son claras: Disminución de los óxidos de azufre, nitrógeno y de compuestos orgánicos volátiles, así como disminución de los riesgos de manejo del combustible ya que el alcohol

etílico es un producto natural fácilmente biodegradable en comparación con la gasolina.

El riesgo ambiental por la utilización de alcohol etílico como combustible radica en el tratamiento de las grandes cantidades de vinaza generadas (10 a 15 L de vinaza por litro de alcohol). Es por esto que es de suma importancia realizar investigación tendiente a entender el tratamiento y efecto de las vinazas crudas y tratadas en los suelos cañeros, ya que es posible, que en un futuro no muy lejano, el alcohol etílico sea el combustible más utilizado en las grandes ciudades del mundo, entre ellas, la zona metropolitana de la capital de México.

## **2.2 El proceso de descomposición en el suelo**

La descomposición es el proceso durante el cual un recurso primario es transformado progresivamente a uno secundario que, a su vez, es transformado a otro terciario, hasta lograr la mineralización total (Swift *et al.*, 1979; Lavelle *et al.*, 1993). Como recurso, en este sentido puede entenderse a cualquier compuesto orgánico inanimado, como por ejemplo, hojarasca, heces, humus y restos de organismos.

Los componentes del proceso de descomposición según Swift y colaboradores (1979) consta de los siguientes tres mecanismos:

1. Lavado. Mecanismo abiótico por el cual se pierden compuestos solubles por acción del agua, se producen cambios químicos y pérdida de peso.
2. Catabolismo. Término bioquímico que describe la producción de energía por reacciones enzimáticas o cadenas de reacciones en las que se presenta una transformación de los compuestos orgánicos de mayor tamaño a moléculas pequeñas y simples.
3. Comminution o Fragmentación. Reducción de tamaño de partícula de los compuestos orgánicos, es diferente del catabolismo porque la fragmentación es más física que química

En la práctica los tres mecanismos actúan simultáneamente.

La descomposición está formada por dos subprocesos, la mineralización y la humificación, los cuales se encargan de evitar la acumulación desmedida de los restos orgánicos en los ecosistemas (Swift *et al.*, 1979; Begon *et al.*, 1988).

La mineralización es el proceso de transformación de los restos orgánicos en compuestos inorgánicos (minerales), es decir, se trata de la descomposición total. La mineralización determina la fertilidad del medio al controlar la liberación de los elementos nutritivos y, de esta manera, contribuir al reciclaje de nutrimentos.

La humificación consiste en una transformación del compuesto original a sustancias orgánicas coloidales de difícil descomposición (humus). Su importancia radica en el mantenimiento de las cantidades de las sustancias húmicas (SH) en el suelo. Las SH contribuyen a la fertilidad del suelo en tres formas:



1. Cuando hay una gran cantidad de SH, estas funcionan como agentes cementantes en la formación de los agregados granulares del suelo y, por lo mismo, en la estructura, lo que influye en la velocidad de infiltración, retención de humedad y aereación, así como en la disminución de la erosión (Tate, 1992; Lavelle *et al.*, 1993).
2. Las SH tienen cargas negativas electrostáticas que contribuyen fuertemente al aumento de la capacidad de intercambio de cationes (Swift *et al.*, 1979; Tate, 1992; Lavelle *et al.*, 1993).
3. Las SH conservan nutrientes y energía que pueden ser asimilables por los microorganismos (Oades, 1989; Tate, 1992; Lavelle *et al.*, 1993).

En los ecosistemas terrestres la descomposición de la hojarasca es el proceso que mantiene la fertilidad natural de los suelos. Es fundamentalmente, un proceso biológico. La oxidación química abiótica no llega a ser superior al 20% y, normalmente, más del 95% del CO<sub>2</sub> proviene de la respiración (Tate, 1992; Lavelle *et al.*, 1993).

### 2.2.1 Mineralización

La mineralización de la materia orgánica consiste en la transformación de los elementos que se encuentran en los compuestos orgánicos a sus formas inorgánicas (Zibilske, 1994). La mineralización puede realizarse por fotooxidación; oxidación y reducción química (catalizada por el pH y minerales); hidrólisis y oxidación biológica (Lee *et al.*, 1989). La mineralización de los compuestos orgánicos es de suma importancia en el reciclaje de nutrientes, disminución de la hojarasca, fertilidad del suelo y en la nutrición vegetal.

La mineralización puede presentarse tanto en ambientes aerobios como anaerobios. En condiciones de anaerobiosis los subproductos de este tipo de metabolismo son: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, R-COOH, NH<sub>3</sub>, RNH<sub>2</sub>, RSH y H<sub>2</sub>S, principalmente. El producto principal es la obtención de energía (2 moléculas de ATP) y ácido pirúvico. Se opera en un nivel bajo de energía y de menor eficiencia en la mineralización de la materia orgánica por lo que el proceso de descomposición es lento (Alexander y Scow, 1987).

En condiciones de aerobiosis la degradación de los carbohidratos conduce a la formación de ácido pirúvico y por el ciclo de Krebs se obtienen 36 moléculas de ATP. Como subproductos se obtienen, principalmente, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O debido a la acción de oxidasas. Las proteínas se descomponen hasta NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Alexander y Scow, 1987; Lehninger *et al.*, 1993). El metabolismo aerobio es más eficiente en la obtención de energía y en la mineralización de la materia orgánica edáfica.

Los iones (por ejemplo, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) producto de la mineralización pueden perderse por lixiviación y/o escurrimiento con el consecuente riesgo de contaminar los cuerpos de agua, sean subterráneos o superficiales, generando problemas de eutroficación. Del mismo modo, los iones generados por la

mineralización pueden llegar a la superficie del suelo por capilaridad y ser absorbidos por las plantas (Sawhney y Brown, 1989).

La actividad microbiana genera ácidos orgánicos, ácidos inorgánicos (oxidación del nitrógeno y azufre), cambios en las condiciones de óxido-reducción y productos orgánicos (ligantes). Dichos compuestos pueden solubilizar a los elementos contenidos en la estructura de los minerales del suelo (Huang y Keller, 1972; Tate, 1992; Huang, 1993). Estas condiciones contribuyen al intemperismo de los minerales del suelo y son especialmente importantes en la rizosfera, donde los exudados son abundantes y la actividad microbiológica es más intensa (Huang, 1993).

Estos cambios químicos ocasionados por la materia orgánica influyen fuertemente en los procesos de eluviación y lixiviación. La intensidad de estos procesos edafogénicos con la participación de la materia orgánica, depende de las condiciones ambientales (redox, temperatura, humedad del suelo, clima en general), biota (cantidad y tipo de compuestos provenientes de la vegetación, fauna edáfica macro y micro, etc.). Por ejemplo, en el proceso de podzolización, la migración química del aluminio, hierro y materia orgánica, da como resultado la concentración de sílice en las capas eluviadas (Buol *et al.*, 1991).

### 2.2.2 Las fases

La descomposición es un proceso continuo pero en el tiempo puede visualizarse como una sucesión de fases activas separadas por períodos de inhibición debido a limitaciones físicas, químicas y biológicas que algunas veces disminuyen la velocidad del proceso (Lavelle *et al.*, 1993). De manera general, se distinguen claramente dos fases, de rápida y lenta descomposición. La primera se debe a los compuestos lábiles y la segunda a los recalitrantes como la lignina.

Las bacterias y los hongos suelen ser los primeros en tener acceso a los recursos, inmediatamente a la muerte de los organismos. Tienden a utilizar materiales solubles como azúcares y aminoácidos y carecen de las enzimas necesarias para descomponer los componentes estructurales. Posteriormente, intervienen microorganismos especializados que pueden utilizar la celulosa y lignina, así como desdoblar las proteínas más complejas.

Los organismos desintegradores representan una sucesión natural que empieza con los hongos simples del azúcar (phycomicetes y hongos imperfectos), posteriormente participa la meso y macrofauna y, al final, continúa habitualmente con hongos septados (ascomycetes, basidiomycetes y actinomycetes), que son de crecimiento más lento, producen menos esporas, establecen un contacto más estrecho con el sustrato y presentan un metabolismo más especializado (Pugh, 1980; citado por Begon *et al.*, 1988).

El proceso de descomposición vegetal se ve enormemente acelerado por cualquier actividad que triture y fragmente los tejidos, acciones que realizan los detritívoros (micro, meso y macrofauna) (Sing y Gupta, 1977).

### 2.2.3 Factores limitantes

Los factores que controlan la intensidad de la descomposición son llamados limitantes; los principales son clima, calidad del recurso, tipo de suelo y la fauna del suelo. A continuación se describe solamente el papel del suelo y de los desintegradores ya que son los que tienen mayor relación con el tema de este estudio.

#### **Suelo**

La hidrólisis es un proceso que depende fuertemente del pH y la temperatura. A mayores valores tanto de pH y temperatura, se hidrolizarán mayores cantidades de MO (Lee *et al.*, 1989).

El valor del pH del suelo es muy importante, ya que se ha comprobado que a valores ácidos, la descomposición se realiza por hongos y, a valores altos, son las bacterias las que realizan esta actividad. En la neutralidad, la descomposición se realiza tanto por bacterias como por hongos. La actividad enzimática es dependiente del pH del medio, en el suelo, valores entre 6.3 y 7.2 son los óptimos para la deshidrogenasa, polifenoloxidasa, proteasa, ureasa y otras.

Con relación a la actividad microbiana, existen dos micro-ambientes en el suelo, inter e intra-agregados. Los microorganismos que se localizan dentro de los agregados tiene menor cantidad de oxígeno y de materia orgánica a su disposición por lo que su actividad es menor, pero se encuentran bien protegido de los flujos de agua. Entre los agregados, el flujo del agua facilita el desplazamiento de los microorganismos y se incrementa el contacto con la materia orgánica. Sin embargo, el ambiente es altamente inestable en términos de retención de humedad y disponibilidad de nutrimentos (Lavelle *et al.*, 1993).

A mayor densidad de carga y superficie específica de los coloides edáficos, aumenta la capacidad de los mismos para proteger física y químicamente a la materia orgánica de la biodegradación microbiana (Coleman *et al.*, 1989; Oades, 1989; Lavelle *et al.*, 1993).

Las condiciones de óxido-reducción son de suma importancia en la descomposición de la MO ya que determinarán el tipo de metabolismo prevaleciente. En condiciones anaerobias la descomposición será más lenta. Si las condiciones son aerobias la descomposición será más rápida (Sing y Gupta, 1977).

Los coloides del suelo pueden limitar e inhibir la acción de las enzimas extracelulares al adsorberlas, a mayor área superficial y mayor capacidad de intercambiar cationes, la actividad de las enzimas extracelulares es menor (Alexander, 1980; Oades *et al.*, 1989; Lavelle *et al.*, 1993). Por ejemplo, Lynch y Cotnoir (1956) citados por Alexander (1980) encontraron que las enzimas que degradan la hemicelulosa se inhiben en presencia de montmorilonita.

## ***Desintegradores***

El proceso de descomposición es controlado, principalmente, por enzimas producidas por las bacterias, actinomicetos y los hongos (Smith, 1982). Las bacterias presentan una menor actividad, son menos eficientes que los actinomicetos y los hongos en la descomposición de los recursos ya que se ha notado que éstas liberan mayor cantidad de CO<sub>2</sub> y que el aumento de la biomasa es bajo (Alexander, 1980). Este hecho posiblemente tenga relación con los bajos valores de la relación C/N (5 a 7) de las bacterias. Las bacterias se desarrollan a valores de pH arriba de 5, prefiriendo los niveles alcalinos (Alexander, 1980; Paul y Clark, 1989). La población de bacterias del suelo sobrepasa a todos los demás grupos de microorganismos, tanto en número como en variedad. Las hay autótrofas, heterótrofes, mesófilas, termófilas, psicrófilas, aerobias, anaerobias, degradadoras de celulosa, oxidantes del azufre, fijadoras de nitrógeno, degradadoras de proteínas, entre otros tipos (Alexander, 1980).

Los actinomicetos aparecen cuando los compuestos lábiles han desaparecido, no toleran valores bajos de pH y condiciones de anaerobiosis. Tienen un alto grado de resistencia a la desecación y persisten durante mayores períodos en comparación con otros grupos taxonómicos. Muchas especies de actinomicetos descomponen la celulosa, quitina, hemicelulosa, lignina, glucósidos, parafinas, fenoles y esteroides, entre otros. Diferentes cepas tienen la capacidad de sintetizar metabolitos tóxicos antimicrobianos.

Los hongos filamentosos proliferan a valores de pH ácido como consecuencia de la baja competencia con las bacterias y actinomicetos, aunque también pueden vivir en ambientes alcalinos. Son muy sensibles a los bajos niveles de humedad, son aerobios estrictos y la mayoría de las especies son mesófilas. Se ha notado que existe cierta especificidad en cuanto al recurso a descomponer; pueden degradar celulosa, hemicelulosa y lignina, entre otros. Participan en la formación de humus a partir de restos orgánicos frescos. Bajo ciertas condiciones compiten con las plantas superiores por el nitrato y el amonio. De manera general, puede decirse que los hongos prefieren el nitrógeno en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y las plantas en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; cuando se tienen mayores cantidades de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> que de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> el nitrógeno se inmoviliza más fácilmente, es decir, el N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se convierte en nitrógeno en forma de biomasa microscópica (Alexander, 1980).

La mayoría de las distintas especies de desintegradores microbianos solo pueden utilizar un número limitado de sustratos. Es la diversidad de especies implicadas la que permite la descomposición de los tejidos estructurales y químicamente complejos (Begon *et al.*, 1988).

Algunos componentes del suelo como los coloides, iones solubles y otros, disminuyen la actividad de las enzimas extracelulares (Tate, 1992; Lavelle *et al.*, 1993).

#### 2.2.4 Modelos matemáticos

El proceso de descomposición de la MO puede describirse por modelos matemáticos de los siguientes tipos:

*Exponencial simple o de primer orden.* En este modelo la tasa relativa de descomposición es constante (Jenny *et al.*, 1949; Paul y Clark, 1989). Esta premisa es su principal limitación ya que se ha observado que existen compuestos de rápida y lenta descomposición. Sin embargo, cuando el recurso es de baja calidad, por ejemplo madera de *Coccothrinax* sp, la primera fase de la descomposición puede ser descrita con este modelo.

$$X_t = X_0 e^{-kt}$$

donde:  $X_t$  = la masa remanente en gramos para un tiempo  $t$

$X_0$  = la cantidad inicial de masa cuando  $t = 0$

$e$  = exponencial

$k$  = coeficiente de la tasa de descomposición

*Disminución constante.* La tasa de descomposición relativa disminuye linealmente con el tiempo debido al aumento de los compuestos refractarios en la hojarasca remanente. La ecuación que describe la dinámica del modelo es la siguiente:

$$Y = mt + b$$

donde:  $Y$  = la masa remanente en gramos

$b$  = la ordenada al origen o cantidad inicial a un tiempo  $t = 0$

$m$  = pendiente de la recta o tasa de descomposición

$t$  = tiempo

Existe una gran variedad de modelos matemáticos complejos en los que se incorpora una gran cantidad de parámetros físicos, biológicos y químicos como los descritos por Smith (1982), sin embargo los arriba mencionados son los más utilizados, dada su relativa simplicidad.

### 2.3 Calidad del agua de riego

Los componentes del agua que ocasionan daños, tanto a los suelos como a las plantas, pueden clasificarse en inorgánicos y orgánicos. Dentro de los primeros se tiene a las sales solubles como el sodio, los iones que dan la alcalinidad, los sulfatos y el boro y, dentro de los segundos, los más importantes son los fenoles y los ácidos orgánicos como el butírico, isobutírico y el propiónico ya que se pueden formar de manera natural. También deben tenerse en cuenta los plaguicidas y otros compuestos biocidas, los hidrocarburos y sus derivados, los detergentes, etc.

A continuación se mencionaran brevemente las causas por las que se debe tener especial cuidado en los constituyentes del agua de riego.

#### 2.3.1 Salinidad

En el agua de riego, valores de conductividad eléctrica mayores de 2 mmho  $\text{cm}^{-1}$  a 25°C pueden causar daño a los cultivos al dificultarles la absorción de agua (Aguirre, 1993; Bohn *et al.*, 1993). No todas las sales tienen el mismo efecto en los

suelos, ya que pueden ser de reacción ácida, neutra y básica, algunas dispersan las arcillas, otras las flocculan, algunas son tóxicas y otras no lo son, etc. (Cuadro 2.3-1). Los efectos en la producción agrícola se indican en el cuadro 2.3-2.

Otros riesgos de contaminación del suelo por el uso de aguas residuales son:

- Sodicidad. Cantidades relativamente altas de sodio (15% o más de a CIC) pueden causar dispersión de los coloides edáficos. Los procesos de sodificación a menudo se encuentran acompañados por procesos de alcalinización y es importante diferenciarlos. A menudo se utiliza el valor de pH= 8.5 como distinción entre ambos (Cuadro 2.3-1).
- Alcalinidad. La alcalinidad se debe a los contenidos de carbonatos y bicarbonatos cuando se presentan valores de pH de 8.5 o mayores. Los carbonatos y bicarbonatos solubles, de sodio por ejemplo, al contacto con los iones divalentes del suelo (calcio y magnesio) precipitan, generando un aumento indirecto en las cantidades relativas de sodio y con ello favoreciendo la sodificación.

Cuadro 2.3-1. Comportamiento de las principales sales que se encuentran en los suelos (modificado de Szabolcs, 1989)

Sal	Origen	Solubilidad	pH	Toxicidad	Efecto en el suelo
CaCO <sub>3</sub>	RS, CA	Baja	Alcalino	No tóxico	Concreciones duripan,
MgCO <sub>3</sub>	RS CA	Baja	Alcalino	No tóxico	Rara en forma libre, dolomita
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Intem	Alta	12 o mas	Muy tóxico	Peptización, baja K, no lavable, precipitación de CaCO <sub>3</sub> , solubiliza la MO.
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	RS	Baja, T	Lig alcal	No tóxico	
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	RS	Baja, T	Lig alcal	No tóxico	
Na(HCO <sub>3</sub> )	RS	Muy alto, T	Alcalino	Tóxico	Peptización, baja K, no lavable. pp de CaCO <sub>3</sub> sol de MO.
CaSO <sub>4</sub>	Int RS	2 g L <sup>-1</sup>	Lig ácido	No tóxico	Recuperación de suelos sódicos
MgSO <sub>4</sub>	Int RS	262 g L <sup>-1</sup> , T	Lig ácido	Muy tóxico	Recuperación por lavado
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Int RI	280 g L <sup>-1</sup> , T	Neutro	Tóxico	Dispersión de arcillas
CaCl <sub>2</sub>	Int RI, CA	muy sol	Lig ácido	Tóxico	Higroscopicidad
MgCl <sub>2</sub>	Int RI	353 g L <sup>-1</sup>	Neutro	Muy tóxico	Higroscopicidad
NaCl	RI, CA	264 g L <sup>-1</sup>	Neutro	Muy tóxico	Peptización
NaNO <sub>3</sub>	Biól	muy sol	Neutro	No tóxico	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Biól	muy sol	Lig ácido	No tóxico	
NaS	Biól	475 g L <sup>-1</sup>	Alcalino	Muy tóxico	Alcalinidad conduce a CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> y SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Int	muy sol	Alcalino	Tóxico pH>9	Peptización

Int= intemperismo, RS= rocas sedimentarias, CA= cuerpos de agua, RI= rocas ígneas, T= dependiente de la temperatura, Biól= biológico, K= conductividad hidráulica, pp= precipitación, sol= solubilidad y MO= materia orgánica

Cuadro 2.3-2. Efecto de las sales en el crecimiento de cultivos en función de la concentración de sales en el extracto de la pasta de saturación (Richards, 1985).

dS m <sup>-1</sup>	0	2	4	8	16
Efecto en cultivos	no hay	cultivos sensitivos	producción restringida	cultivos tolerantes	cultivos muy tolerantes
eq L <sup>-1</sup>	0	0.02	0.04	0.08	0.16
Presión osmótica en bares	0	1	2	4	8
clasificación	normal	ligeramente salino	salino	muy salino	extremadamente salino

- Sulfatos. Los sulfatos del agua de riego precipitan con el calcio del suelo, lo que provoca que las concentraciones relativas de sodio, potasio y magnesio aumenten, provocando la sodificación del suelo.

En ocasiones, el boro llega a ser un elemento peligroso, a pesar de ser un elemento considerado esencial en la nutrición vegetal, debido a que llega a ser tóxico en bajas cantidades, por lo que se recomienda que el agua de riego no tenga concentraciones mayores de 1 ó 2 mg L<sup>-1</sup>.

Recientemente se reconoce que los ácidos orgánicos como el acético, propiónico, isobutírico y butírico ocasionan diversos problemas de toxicidad a las plantas, desde inhibición de la germinación de semillas hasta retraso en el desarrollo y crecimiento de la planta (García *et al.*, 1991a; b). Los fenoles son sustancias ampliamente conocidas como tóxicas.

## 2.4 Clasificación de suelos

Los suelos se clasifican con el objeto de: 1) facilitar su estudio; 2) recordar sus propiedades y procesos característicos y 3) realizar un mejor manejo.

Existe una amplia variedad de clasificaciones de suelo, por ejemplo: la estadounidense "Soil taxonomy", canadiense, rusa, francesa, alemana, brasileña, belga, entre otras (Buol *et al.*, 1991).

Cada una de ellas presenta diferentes criterios de agrupación y, por lo tanto, de distinción. Algunas son genéticas, es decir, ponderan las propiedades que revelan los procesos de génesis de suelo. Otras le dan más peso a su potencial de utilización agrícola, forestal, pecuario, etc.

Las clasificaciones presentan un orden jerárquico de acuerdo con las propiedades distintivas que son las que en un primer término deben identificarse. Es deseable que las características o procesos distintivos sean los más importantes y característicos de los grupos.

Por el contrario, los caracteres de diagnóstico de menor jerarquía, permitirán conocer, con mayor detalle, a los suelos y, por lo tanto, el manejo de este recurso tendrá mayores posibilidades de éxito.

En México, se ha adoptado la nomenclatura "FAO"<sup>2</sup> que tiene una amplia aceptación en los países que no poseen una clasificación propia. Dicha nomenclatura presenta varias ventajas que la hacen atractiva, como la facilidad en la identificación de las unidades por los horizontes de diagnóstico ya que sólo tiene dos grupos (unidades y subunidades); es de carácter genético y de un amplio uso a nivel mundial.

"El conocimiento de suelos en México, históricamente puede remontarse a épocas prehispánicas" (Ortiz *et al.*, 1990). "Como ejemplos pueden citarse las clasificaciones de la culturas: maya (Pérez, 1984), azteca (Gibson, 1964; Sahagún, 1979; Williams, 1981), purépecha, otomí (Quiroz, 1983) y otras" (citadas por Ortiz *et al.*, 1990).

"Williams y Ortiz (1981) mencionan que el conocimiento campesino del suelo es diferente al empleado por los técnicos. En el medio rural el concepto *tierra* se refiere al área específica de la superficie terrestre que incluye a todos los atributos de la biosfera que son observables, directa (en la capa arable) o indirectamente (en la planta), tanto en el tiempo como en el espacio y que afectan su uso (Ortiz *et al.*, 1990).

Esto implica que: 1) A pesar de hablar del mismo objeto, técnicos y productores tienen escaso entendimiento y 2) Los técnicos tienen diferentes métodos de estudio y descripción (horizontes y perfiles) del *suelo* vs los productores, que realizan observaciones y comparaciones del funcionamiento de la *tierra* en el tiempo, en relación con el ambiente y los organismos (plantas y animales)" (Ortiz *et al.*, 1990).

A nivel técnico otro concepto con relación al suelo y la tierra es el de capa arable que se refiere a la capa de tierra en la que se puede cultivar.

El problema de comunicación entre productores y técnicos, en ocasiones puede resolverse validando o refutando argumentos con análisis químicos y físicos; sin embargo, cuando la observación se refiere a un proceso debe tenerse la capacidad para encontrar las determinaciones analíticas más adecuadas así como el tiempo en el que deben ser medidas (Ortiz *et al.*, 1990).

La clasificación campesina de tierras tienen un fin utilitario, relacionado con: a) Cultivos adaptables; b) Labores de cultivo; c) Manejo de abonos; d) Manejo de arvenses y e) Métodos de conservación y recuperación del suelo (Ortiz *et al.*, 1990).

La realización de levantamientos de tierras campesinas permite detectar tecnologías propias ya que las tierras se encuentran en una gran amplitud espacial o con una dispersión amplia y con diferente predominancia, lo cual ha ocasionado que los productores se especialicen en el manejo de alguna tierra en especial. En ese sentido, este conocimiento puede ser propagado entre los productores menos especializados.

En cuanto a la experimentación agrícola, los levantamientos de tierras campesinas permiten realizar una mejor y más útil experimentación que redunde directamente en la producción agropecuaria y forestal, ya que se pueden detectar las principales

---

<sup>2</sup> Se denomina nomenclatura y no clasificación por la carencia de un orden jerárquico en el ordenamiento de las unidades de suelo.



clases de tierras utilizadas por los productores y las recomendaciones de uso serán mucho más eficientes (Cuadro 2.4-1). La realización de mapas edafológicos de gran escala, es decir, a nivel comunitario, además de realizarse con la nomenclatura FAO, deben contemplar el conocimiento local sobre el suelo debido a que en la práctica es la de mayor uso entre campesinos y técnicos, por su mayor nivel de detalle en la descripción.

Cuadro 2.4-1 Comparación entre ambos métodos de diagnóstico

	Levantamiento técnico	Levantamiento campesino
Precisión	menor	mayor
Costo	mayor	menor
Tiempo de realización	mayor	menor
Parámetros definidos con claridad	sí	no siempre
Usos	planeación a menor escala	manejo de suelo por productores
Genera confusiones	no	sí
Comparaciones con otros lugares	sí	no

Ante esta problemática es necesario realizar una identificación y selección de las propiedades distintivas de los suelos que sean fáciles, baratas y rápidas de realizar con el objeto de reconocer de manera rápida y precisa los suelos.

#### 2.4.1 Clasificación FAO de algunas unidades de suelo encontradas en la zona de estudio

A continuación se mencionan las propiedades de los suelos a considerar para su clasificar dentro de las unidades *Acrisol*, *Fluvisol*, *Cambisol* y *Lixisol*.

##### Unidad *Fluvisol*

Las condiciones ambientales durante el proceso de sedimentación invariablemente dan como resultado la estratificación del material parental en los suelos aluviales. Esta estratificación es la principal característica usada para identificar a los Fluvisoles. La estratificación puede detectarse fácilmente por la presencia de capas de diferente distribución de partículas o por los irregulares contenidos de carbono orgánico en las capas. Los suelos de la unidad *Fluvisol* presentan rasgos de alteración a una profundidad mayor de 25 centímetros.

Las subunidades son: *Thionic*, *salic*, *vertic*, *mollic*, *calcaric*, *umbric*, *dystric* y *eutric* Fluvisoles. Los Fluvisoles vérticos presentan grietas cuando se secan, presentan caras de deslizamiento y agregados paralelepípedos.

##### Unidad *Acrisol*

Los Acrisoles se caracterizan por una acumulación de arcillas de baja actividad (menor de  $24 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  de arcilla) en los horizontes subsuperficiales (horizonte  $B_t$  árgico), es decir, la cantidad de arcillas se incrementa con la profundidad. Presentan una saturación de bases menor del 50%. Estos suelos se localizan en el trópico.

Uso del suelo. Muchos Acrisoles de las regiones tropicales tienen vegetación de bosque tropical. Una gran parte de las raíces (80%) de la vegetación que puede

vivir en estos suelos se encuentra en la superficie. El cultivo sobre estos suelo requiere de grandes cantidades de fertilizantes y de carbonatos y como son suelos "pesados" la labranza se dificulta. Como cultivos perennes se pueden establecer plantíos de café, mangos, palmas y *Pinus caribaea* (Spaargaren, 1994).

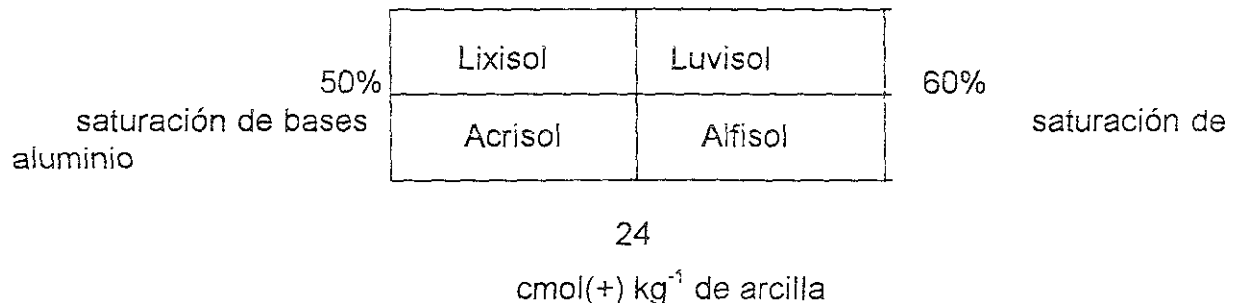


Figura 2.4-1. Relaciones entre suelos de las unidades Acrisol, Alfisol, Lixisol y Luvisol (Spaargaren, 1994)

#### Unidad *Lixisol*

Estos suelos se caracterizan por una acumulación subsuperficial de arcillas de baja actividad, capacidad de intercambio catiónico de las arcillas, menor a 24 cmol(+) kg<sup>-1</sup>, y de moderada a alta saturación de bases. Muestran incremento de arcillas con la profundidad (horizonte argico).

Las diferencias entre el Lixisol y otras unidades se basan en la capacidad de intercambio de cationes, la saturación de bases y la saturación por aluminio (Figura 2.4-1).

#### Unidad *Cambisol*

El término Cambisol proviene del latín *cambiare* que significa cambio. Los suelos que reciben este nombre presentan un horizonte B cámbico, que se identifica por una profundidad mayor de 15 cm; CIC mayor de 16 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de arcilla.

Presentan un grado mínimo de desarrollo edáfico que se evidencia por cambios en el color; son ricos en bases a nivel superficial en comparación con los horizontes más bajos y tienen marcas de alteración como estructura del suelo, fuerte cromas, alto contenido de arcilla con respecto a los horizontes subsuperficiales. Estos suelos se encuentran en regiones con planicies aluviales jóvenes, asociados a suelos bien desarrollados como los Acrisoles y Ferrarsoles.

Los Cambisoles son buenos suelos agrícolas, por lo cual son utilizados intensamente.

Después de revisar algunos conceptos sobre las fuentes, tratamiento de desechos y sus efectos en el agua y suelo, así como la descomposición, la calidad del agua de riego, vinazas, ecología microbiana y tipos de suelos de la región de estudio, se entiende más claramente la idea de utilizar al suelo como reactor en el tratamiento y reuso de los desechos orgánicos.

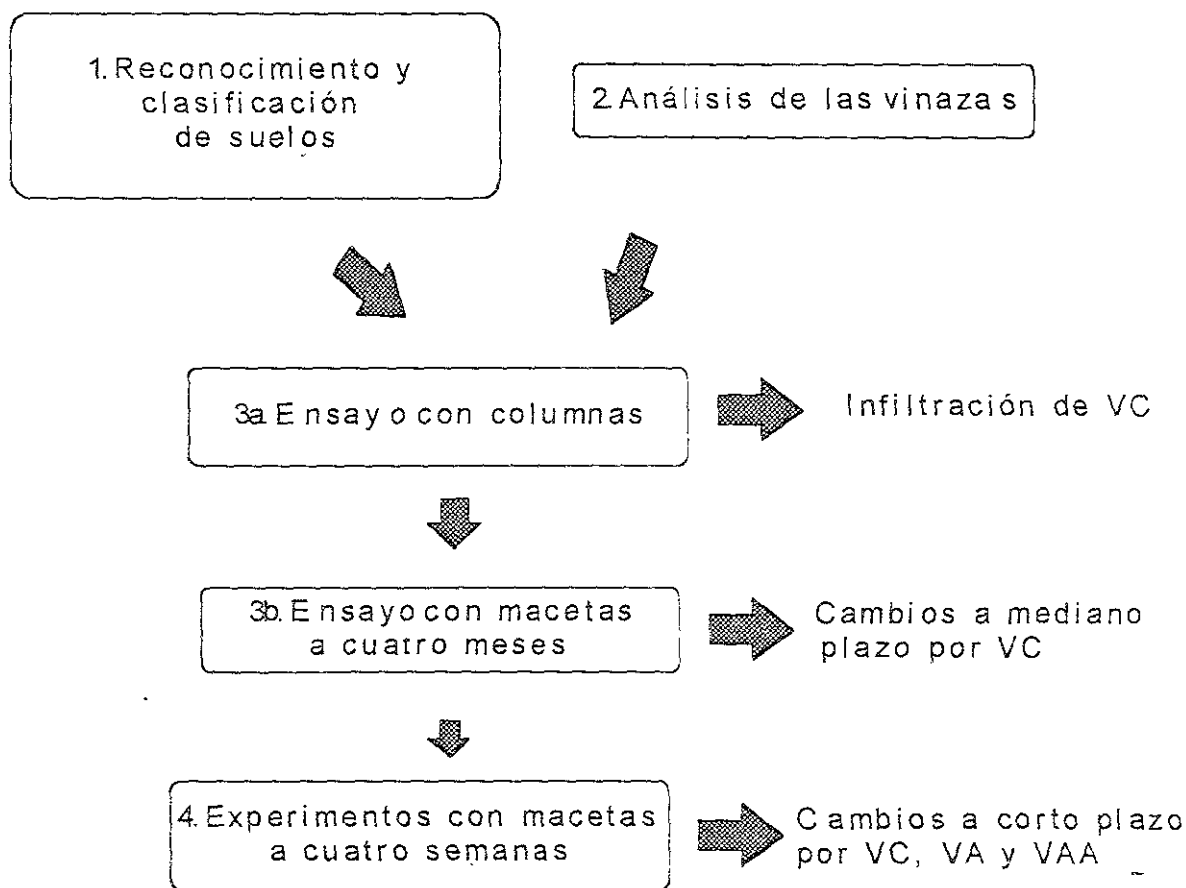
A continuación se presenta la metodología que se realizó con el fin de alcanzar los objetivos.

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La investigación se dividió en cuatro etapas (Figura 3-1).

La primera etapa correspondió al reconocimiento, localización, y clasificación de los suelos aledaños al ingenio. En esta etapa se seleccionaron los tipos de suelo, uno más intemperizado que otro (Acrisol y Fluvisol), con el fin de realizar los experimentos con vinazas .

La segunda etapa consiste en el análisis de las vinazas. El arranque de los reactores para el tratamiento fue realizado por los ingenieros Rosa. Ma. Jiménez, Miguel Martínez, Tania Campos y Miguel Angel Ríos, supervisados por el Ing Antonio Espinoza y el Dr. Víctor Manuel Luna-Pabello. En este trabajo únicamente se presentan y discuten los resultados del análisis de las vinazas crudas y tratadas, quedando fuera los aspectos técnicos del manejo de los reactores.



VA= vinaza cruda, VA= vinaza anaerobia y VAA= vinaza anaerobia-aerobia

Figura 3-1. Metodología utilizada para el estudio de la interacción suelo-vinaza

El propósito del análisis de las vinazas fue la identificación de las propiedades de las vinazas que pudieran ser útiles en el mejoramiento de los suelos así como aquellas que pudieran ser dañinas.

La tercera etapa se conformó de una serie de ensayos con columnas y macetas con dos suelos y vinazas crudas exclusivamente. Los experimentos se realizaron con suelos de parcelas en las cuales se estaba cultivando caña de azúcar, por lo que no son exactamente los mismos que se utilizaron para la clasificación. Esta etapa se desarrolló durante 1993-1994.

La cuarta etapa corresponde a un experimento con vinazas crudas y tratadas biológicamente con dos suelos de la región. Esta etapa se desarrolló durante 1994-1995.

### **3.1 Caracterización y clasificación de los suelos**

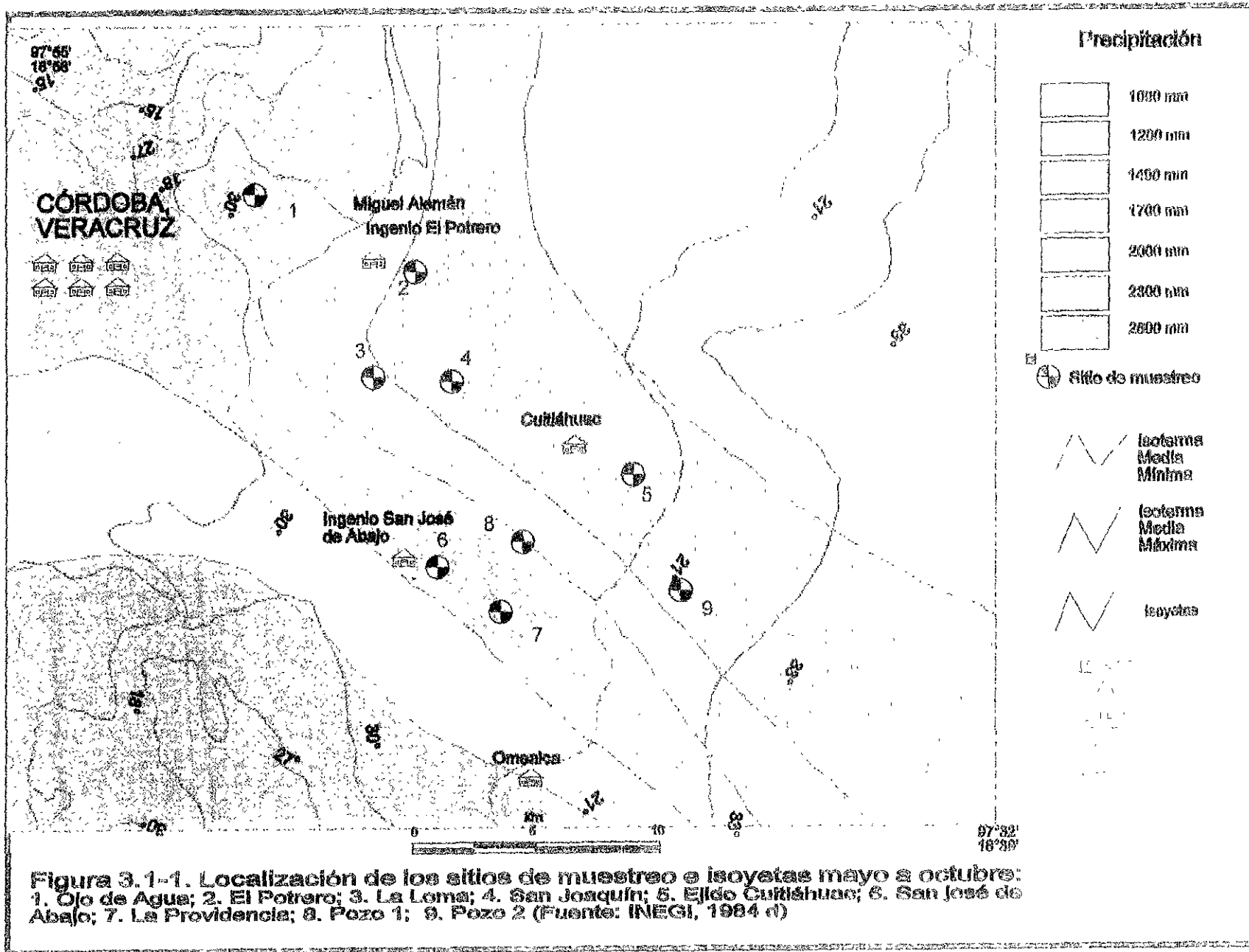
#### **Zona en estudio**

El municipio de Atoyac se encuentra a 20 km al noreste de la ciudad de Córdoba en el estado de Veracruz. Se localiza entre los 18° 55' y 18° 45' de latitud norte y los 96° 40' y 96° 52' longitud oeste (INEGI, 1984g). El ingenio "El Potrero" tiene una superficie de cultivo de 18,000 ha con un rendimiento de caña de 76 t ha<sup>-1</sup> y con un tiempo de zafra promedio de 161 días por año. Al sur de la zona de estudio se localiza el ingenio "San José de Abajo". En ambos se generan vinazas que son mezcladas con el agua de riego (Figura 3.1-1).

La zona de estudio y de cultivo de la caña de azúcar se encuentra en una llanura aluvial que está rodeada por la sierra Atoyac que tiene una pendiente de 1.44% con orientación noroeste suroeste. La llanura se puede dividir, topográficamente, en tres subzonas, la noroeste más alta (600 msnm), la central (500 a 400 msnm) y la sureste (300 msnm), las cuales presentan claras diferencias en cuanto al clima y, por lo tanto, en el manejo agrícola (principalmente riego) (INEGI, 1984g).

Las zonas norte y central son las de mayor precipitación, debido a que la sierra Atoyac detiene los vientos y favorece la lluvia (INEGI, 1984de). Las zonas central y sureste reciben agua de riego y vinazas diluidas. De acuerdo con la carta de efectos climáticos regionales de mayo a octubre (INEGI, 1984d) y, considerando sólo las partes norte y central, se pueden diferenciar tres subzonas que reciben diferente precipitación. La oeste con un intervalo de lámina de lluvia de 1700 a 2000 mm, que se presenta en un período de tiempo de 60 a 89 días; la central con 1400 a 1700 mm, en un intervalo de 30 a 50 días y la zona este con una lámina de 900 a 1000 mm de 30 a 59 días (INEGI, 1984de).

El material geológico está constituido por sedimentos aluviales del cuaternario (INEGI, 1984b). El clima, junto con la topografía, son los factores formadores de suelo que pueden ser utilizados para la identificación y localización de los diversos suelos de la región, debido a que los otros factores formadores como la geología del lugar, la vegetación (INEGI, 1984c) y tiempo, no varían.



### **3.1.1 Levantamiento y clasificación de suelos (FAO)**

El levantamiento de suelos se realizó con base en dos estrategias. El conocimiento de los productores y el análisis de la información generada por INEGI (1984) que consiste en mapas (geológico, edafológico, vegetación y uso actual, efectos climáticos, aguas superficiales en escala 1:250 000 y topográfico 1:50 000) y fotografías aéreas (escala 1:20 000), con lo cual se identificaron las unidades geomorfológicas y morfopedológicas.

Se seleccionaron nueve sitios para la realización de siete perfiles, dos pozos y varias barrenaciones. Se clasificaron los suelos de acuerdo con la nomenclatura FAO (Spaargaren, 1994) y se identificaron los procesos pedogénicos.

### **3.1.2 Toma de muestras y análisis**

Se realizó una calicata para cada uno de los nueve perfiles. Para la realización de las calicatas se seleccionaron los sitios de menor perturbación, prefiriéndose los sitios no cultivados, cuando esto fuera posible. Las muestras se tomaron teniendo en cuenta los horizontes identificados y de abajo hacia arriba con el objeto de evitar la mezcla de los horizontes. Los perfiles se describieron en campo.

El suelo utilizado en los ensayos y experimentos se tomó de las parcelas de cultivo de caña en cada sitio.

Las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron con una malla de 2 mm, siendo las propiedades analizadas: color por comparación con las tablas Munsell (1990); densidad aparente por el método de la probeta (Blake, 1976); densidad real; porosidad; textura por Bouyoucos (Blake, 1976); retención de humedad a capacidad de campo a 0.3 atmósferas con el método de la olla de presión (Blake, 1976); valor de pH 1:2.5 relación suelo:agua; conductividad eléctrica, relación 1:2.5 suelo:agua, capacidad de intercambio de cationes, con cloruro de bario y con acetato de amonio (Houba, 1988); cationes intercambiables con acetato de amonio (Houba *et al.*, 1988); saturación de bases calculada con la suma de cationes y la CIC; carbono orgánico con dicromato de potasio (Walkley y Black, en Jackson (1970); fijación de fosfatos con ácido oxálico (Blakemore y Searle, 1981) y fósforo (Houba *et al.*, 1988).

Se realizaron análisis de difracción y fluorescencia de rayos X en dos suelos, con el fin de clasificarlos con mayores argumentos. El análisis de difracción de rayos X se realizó con un difractómetro Philips PW-1050. Aplicando una modificación del método desarrollado por Biscaye (1965), se midió el área bajo la curva para el pico más intenso de cada mineral, lo anterior con el fin de obtener una estimación relativa de la concentración del mineral en la muestra, para comparar entre suelos.

### **3.1.3 Ordenación y clasificación numérica de los sitios**

Con el fin de realizar una ordenación y clasificación numérica de los datos, se creó una matriz de siete propiedades de los sitios (profundidad, pH, capacidad de intercambio de cationes (CIC), carbono orgánico, porcentaje de arcilla y capacidad de campo (CC) y con la precipitación pluvial de cada sitio, de nueve suelos. El análisis estadístico se realizó con técnicas multivariadas, que permiten el estudio de

las relaciones existentes entre diversas variables continuas (propiedades del suelo), y variables no continuas con escasas repeticiones (perfiles). Se aplicaron técnicas de ordenación y clasificación (Webster y Oliver, 1990; Afifi y Clark, 1990)

La ordenación se realizó con el método de "componentes principales", el cual permite simplificar la descripción de un grupo de variables interrelacionadas, tratando a las variables con igualdad (Afifi y Clark, 1990). Para realizar este análisis la matriz se centró y estandarizó, con el objeto de homogeneizar las varianzas. Esto presenta la ventaja adicional de trabajar con una matriz de correlación en lugar de una matriz de covarianzas (Kovach, 1995).

Se aplicó el análisis de similitud, seguido de un análisis de conglomerados o "clusters", el cual realiza una clasificación numérica jerárquica entre sitios, primero a través de una medida de similitud y después por un algoritmo de agrupación (Webster y Oliver, 1990; Jongerman *et al.*, 1987). En este caso, para medir la similitud entre los sitios, se utilizó el coeficiente general de Gower, que es utilizado cuando las variables son físicas y químicas (Legendre y Legendre, 1983). Como algoritmo de agrupación se utilizó el denominado UPGMA, el cual calcula el promedio aritmético de la similitud entre el objeto que va a ser incluido en un grupo y los miembros de éste o entre los miembros de dos grupos en un margen de fusión. En el cálculo, todos los objetos poseen pesos iguales (Legendre y Legendre, 1983).

Los dos sitios más similares se agruparon en una unidad, cuya similitud es comparada con el resto de los sitios. Los dos grupos más cercanos se agruparon en uno solo y así de manera sucesiva.

### **3.1.4 Correlaciones simples**

Una vez detectadas las propiedades "clave", se realizaron correlaciones simples entre ellas y otras propiedades del suelo con el fin de identificar aquellas que por su sencillez fueran las más apropiadas para utilizar en un diagnóstico rápido.

## **3.2 Análisis de las vinazas**

Se emplearon tres tipos de vinaza: 1) Vinaza cruda almacenada y fría (VC); 2) Vinaza con tratamiento anaerobio (VA) producida mediante el tratamiento de vinazas crudas con un reactor de lecho de lodos de flujo ascendente (Jiménez y Martínez, 1995) también almacenada y fría; y 3) Vinaza que ha recibido tratamiento anaerobio y, secuencialmente, un tratamiento aerobio (VAA) con un reactor de biodiscos (Luna-Pabello *et al.*, 1994), también almacenada y fría (Figura 3.2-1).

Primero se realizó una caracterización completa de la vinaza cruda siguiendo la norma oficial mexicana NOM-064-ECOL-1994. Se realizó el análisis de 10 muestras de las vinazas frescas, los análisis fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos sedimentables, material flotante, demanda química de oxígeno (DQO), cloruros, sulfatos, fósforos, sólidos totales (STT), sólidos totales fijos (STF), sólidos totales volátiles (STV), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos fijos (SSF), sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos disueltos volátiles (SDV), sólidos disueltos fijos (SDF).

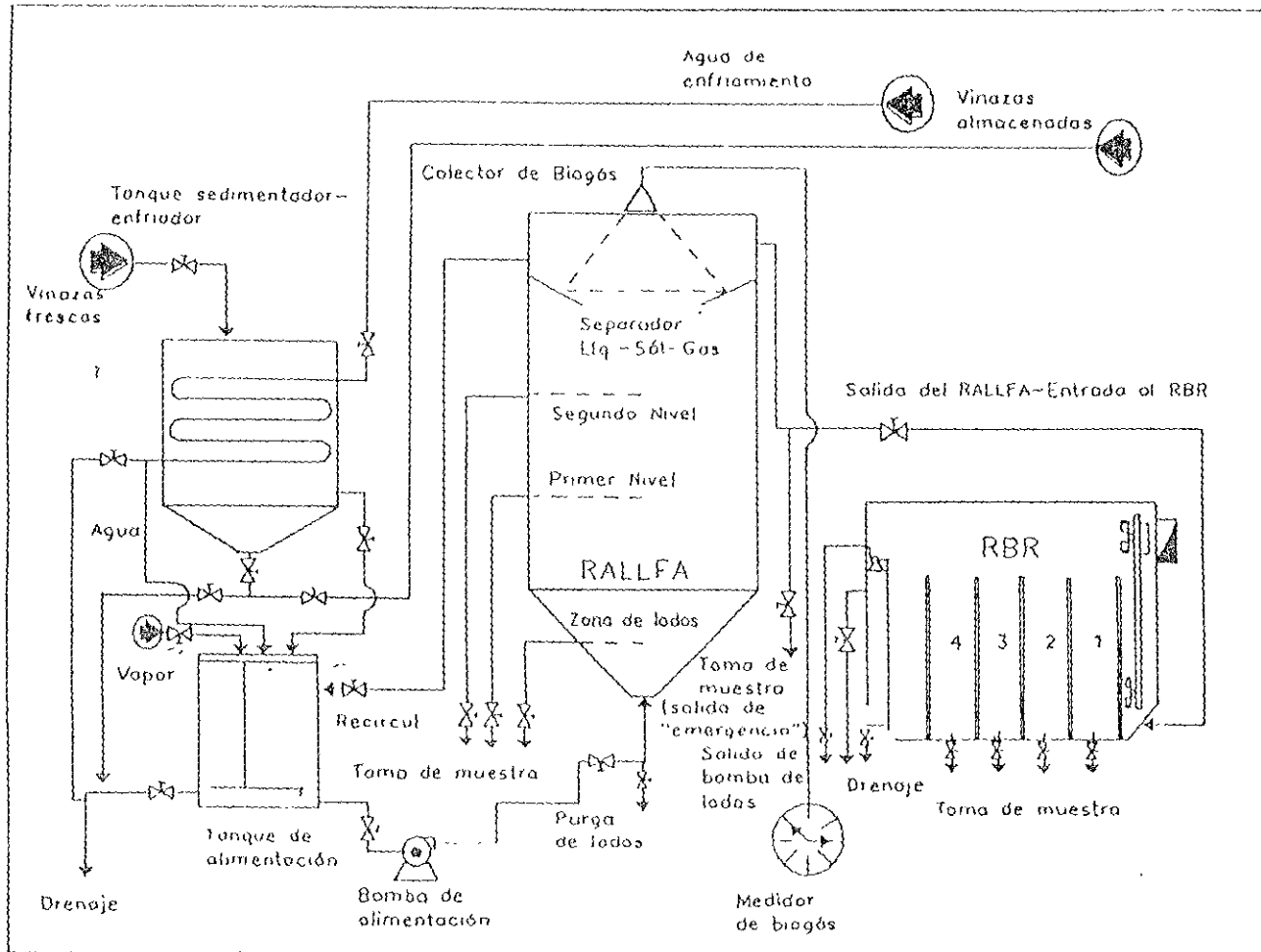


Figura 3 2-1. Diagrama de flujo del tratamiento de las vinazas en el tren anaerobio-aerobio (Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente y reactor de biodiscos rotatorios) (Jiménez y Martínez, 1995).



La separación de los ácidos húmicos de las vinazas se realizó tratando las vinazas con ácido sulfúrico a pH=2, centrifugando y decantando. Esta fracción se llevó a sequedad, se pesó (García *et al.*, 1991a, b) y se le analizó carbono y nitrógeno con un autoanalizador.

La fracción precipitada (FP) se redisolvió para analizar las propiedades ópticas (E4/E6) por espectrofotometría visible (Chen *et al.*, 1977).

Se realizaron análisis de espectrofotometría de infrarrojo de los polvos de la FP de las tres vinazas, en pastillas con KBr con transformadas de Fourier con un espectrofotómetro Nicolet Impact 410. Se realizaron 60 barridos con una resolución y ganancia de 16.

### **3.3 Ensayos<sup>3</sup>**

Como ya se mencionó al inicio de este capítulo, los experimentos se realizaron con suelos de parcelas en las cuales se estaba cultivando caña de azúcar, por lo que no son exactamente los mismos que se utilizaron para la clasificación.

En los ensayos se utilizó vinaza proveniente del ingenio “El Potrero” en el cual la acidificación del mosto se realiza con ácido sulfúrico.

#### **3.3.1 Ensayo en columnas**

Para cuantificar el transporte vertical a lo largo del perfil se construyeron columnas de 70 cm de altura y 10 cm de diámetro, conteniendo 30 cm de altura de suelo y divisiones cada cinco centímetros (Tiller y Murray, 1982; Yaron y Shalhevet, 1966; y Fuller y Warrick, 1985; Cameron *et al.*, 1992; Cameron *et al.*, 1994). En la parte baja de la columna se colocó papel filtro y una malla de 2 cm de diámetro para sostener el suelo. Las columnas se montaron sobre una base de madera con orificios en toda la base para que por allí se drenara el lixiviado, a su vez la base de madera estaba montada sobre una estructura de hierro, debajo de ella se colocaron embudos y probetas para coleccionar el lixiviado.

La formación de las columnas se realizó con una mezcla del epipedón<sup>4</sup> del Acrisol y del Fluvisol. Se usó suelo secado al aire, tamizado a 2 mm. Se aplicaron 30 cm de agua al testigo y 10 cm de vinaza cruda más 20 cm de agua como tratamiento, se utilizaron seis repeticiones. Debido a que no hubo salida por la parte inferior de las columnas (drenaje), se midió únicamente el valor de pH y la CE.

#### **3.3.2 Ensayo en macetas durante cuatro meses**

Con el fin de cuantificar la transformación de la materia orgánica a lo largo de cuatro meses, se utilizaron macetas (por cuadruplicado) con un kilogramo de suelo (Acrisol y Fluvisol), sin drenaje, con un nivel de humedad cercano a la capacidad de campo y en condiciones de invernadero en el que la temperatura se mantuvo entre 20 y 37° C. Se adicionaron 300 mL de VC a las macetas.

---

<sup>3</sup> Los ensayos son experimentos que se consideran importantes porque permitieron diseñar el experimento principal descrito en el apartado 3.4 que es el centro de este trabajo.

<sup>4</sup> Horizonte superficial

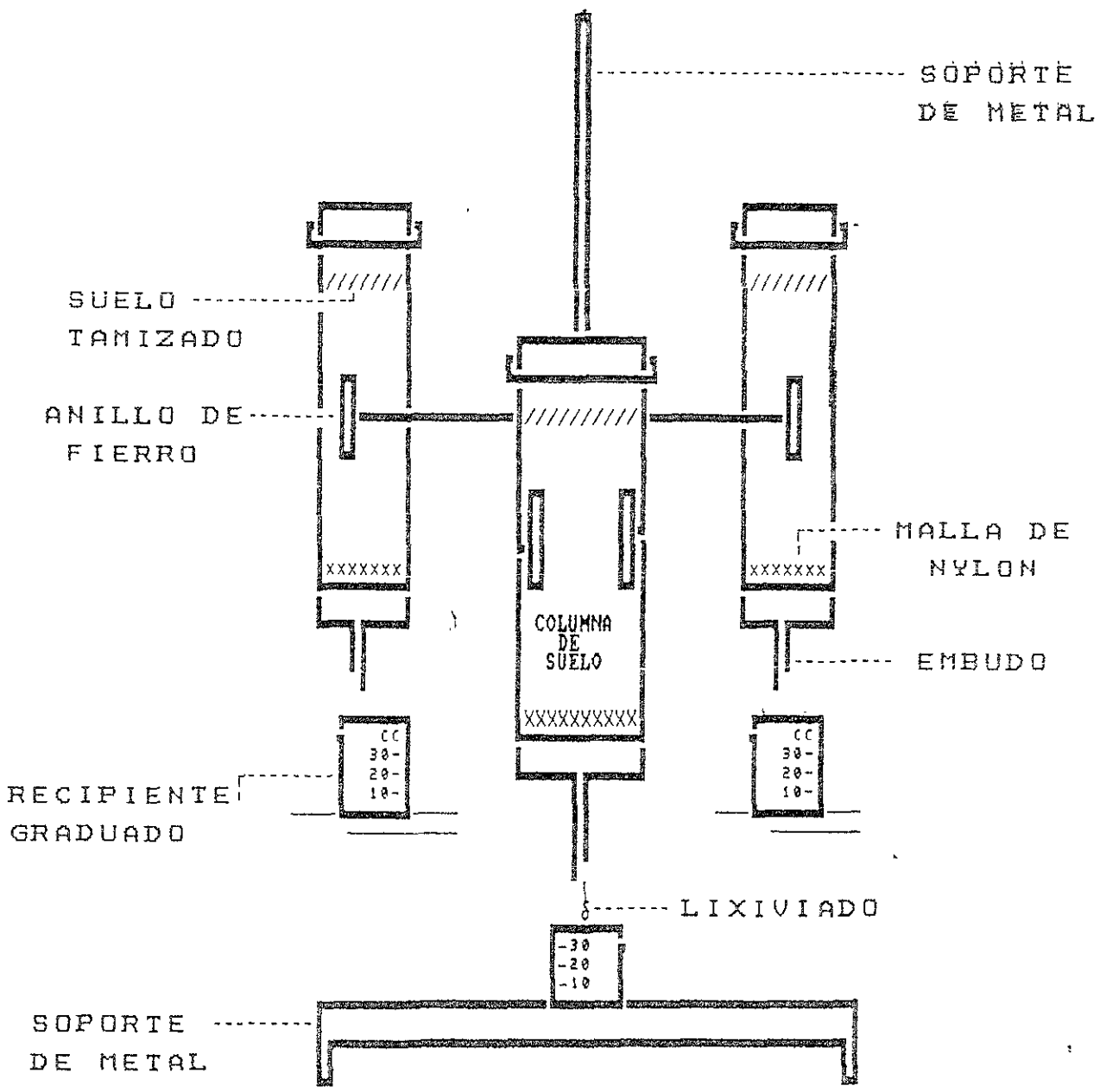


Figura 3.3-1. Columnas de suelo para medir la retención de la materia orgánica

Para observar los cambios en el C orgánico se desmontaron cuatro testigos y cuatro tratamientos (Acrisol y Fluvisol con y sin vinaza) por mes durante cuatro meses.

Las salidas o pérdidas por lixiviación se suprimen en este ensayo ya que las macetas no cuentan con drenaje y la entrada de carbono se restringe a la adición de vinaza ya que las otras entradas (incorporación fotosintética por algas, por ejemplo) al sistema se consideraron despreciables. Las propiedades a evaluar fueron: el valor de pH, CE, cationes intercambiables (desplazados con acetato de amonio), saturación de bases, nitrógeno total (Anderson e Ingram, 1994), carbono orgánico total (Yeomans y Bremner, 1988) carbono hidrosoluble, carbono extraíble con pirofosfato de sodio (Saá, *et al.* 1993); García *et al.* 1991b; Stevenson, 1982; Yeomans y Bremner, 1988), carbono precipitado a pH= 2 (AH) y la fracción que no precipitaba (AF).

Se realizaron estimaciones cualitativas de las poblaciones de bacterias, flagelados y ciliados de los suelos, utilizando un microscopio óptico marca Olympus BH-2 con contraste de fases, cámara fotográfica y sistema de videograbación. Se utilizaron preparaciones temporales de la parte superficial de las macetas. Se prepararon mezclas con suelo y agua de la llave 1/10 (p/v), la cual se agitaba y posteriormente se dejaba en reposo. Del sobrenadante se tomaba una alícuota para observar al microscopio. Se realizaron seis observaciones por cada maceta. Las observaciones se realizaron cada mes durante tres meses.

Las estimaciones cualitativas de los microorganismos fueron: 0= ausencia, 1= escasa, 2= regular, 3= mediana, 4= abundante y 5= muy abundante.

### **3.4 Experimento en macetas para observar los cambios químicos en el suelo**

Se utilizaron vinazas crudas (VC); vinazas anaerobias (VA), tratadas en un reactor anaerobio de flujo pistón; y vinazas anaerobias-aerobias (VAA), tratadas en un tren anaerobio-aerobio realizado con reactores de flujo pistón y con un reactor de biodiscos (Jiménez y Martínez, 1995).

Se utilizó suelo de la capa arable de un Acrisol y de un Fluvisol. Se utilizaron macetas (sin drenaje) con 500 g de suelo que se colocaron dentro de una bolsa de plástico con el fin de evitar la pérdida de vinaza por lavado. La dosis única de vinazas fue de 100 mL por maceta, se aplicó en la superficie. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero con una distribución de las macetas al azar.

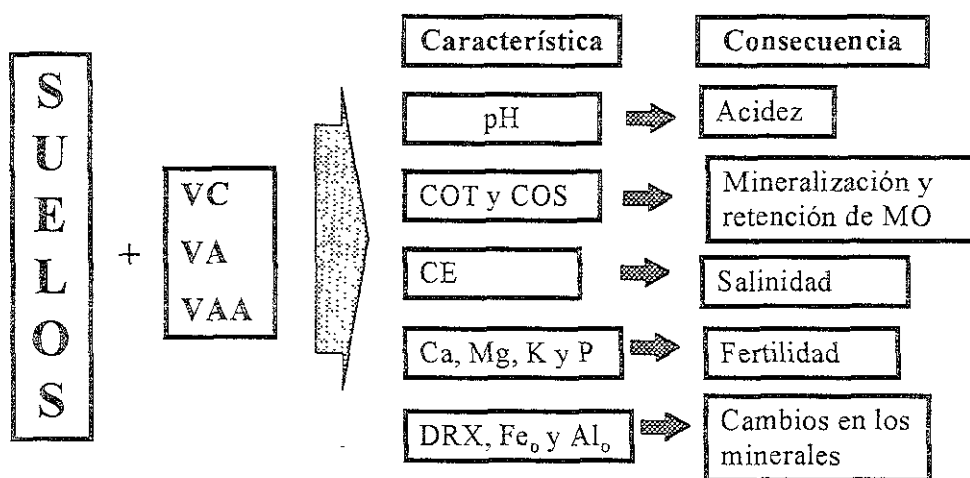
A las muestras se les adicionó agua, con el fin de que permanecieran cerca de la capacidad de campo.

Los tratamientos fueron: aplicación de VC, VA y VAA, más un control con agua destilada (T). Los tratamientos se realizaron por cuadruplicado y se evaluaron semanalmente a lo largo de un mes.

Las variables de respuesta fueron: el valor de pH en relación suelo agua de 1:2.5, conductividad eléctrica del extracto 1:2.5, con un puente de conductividad, carbono

orgánico total (Nelson y Sommers, 1975 en Okalebo *et al.*, 1993) con calor externo y leyendo en un espectrofotómetro de luz visible a 600 nm y carbono hidrosoluble realizando una extracción 1:2.5 de suelo:agua (Figura 3.4-1). Los cambios a lo largo del tiempo (cuatro semanas) se ajustaron a los modelos: lineal y exponencial, según el caso. En el caso de los cambios de carbono orgánico, la tasa de descomposición corresponde a la pendiente del modelo matemático que describe la cinética.

Figura 3.4-1. Diagrama metodológico para el análisis de los efectos de las vinazas en el suelo



Se midió la producción de CO<sub>2</sub> (respiración) del suelo en la segunda y cuarta semanas, utilizando un recipiente de un litro de capacidad con 300 g de suelo y 100 mL de cada vinaza. Este frasco se cerraba herméticamente y se colocaba en un ambiente a 27°C de temperatura constante durante 24 h.

Dentro del frasco de 1 L, se colocó un frasco de 50 mL de capacidad (abierto) con 20 mL de NaOH 1.0 N. En esta disolución se capturaba el CO<sub>2</sub> producido por los microorganismos del suelo. Una vez transcurridas las 24 h de incubación, se abría el frasco de 1 L y se adicionaban 5 mL de BaCl<sub>2</sub> y unas gotas de fenoftaleína para titular con HCl 1.0 N.

Se calculó la cantidad de CO<sub>2</sub> con la siguiente fórmula:

$$\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ por día} = ((B-T)Npe)/0.6$$

B = Volumen del blanco (sin suelo)

T = Volumen de titulación del HCl

N = Concentración normal del HCl

Pe = Peso equivalente (12 para el CO<sub>2</sub>)

0.6 = (0.3 kg de suelo) \* 2 (días de las 48 h de incubación)

En las muestras de la cuarta semana, se analizó la capacidad de intercambio de cationes (CIC) utilizando KCl y acetato de amonio (Houba *et al.*, 1988). Los cationes intercambiables se desplazaron con acetato de amonio y se midieron por espectrofotometría de absorción atómica (Houba *et al.*, 1988). En el Acrisol, se analizó el contenido de hierro y aluminio "activos" extraíbles con oxalato de amonio (Fe<sub>o</sub> y Al<sub>o</sub>) (Houba, 1988). Se realizaron análisis de varianza con el fin de conocer el efecto de los tratamientos.

Los micronutrientes fueron extraídos con la mezcla Mehlich II y analizados por espectrofotometría de absorción atómica. En este método, la disolución extractora se compone de HCl 0.05 M y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.05 M.

El fósforo se analizó utilizando la técnica diseñada por Olsen (Houba *et al.*, 1988), es decir, con una extracción de bicarbonato de sodio 0.5 M a pH 8.5.

Se estudiaron los cambios en los minerales secundarios mediante análisis de difracción de rayos X con un difractómetro Philips PW-1050. Aplicando una modificación del método desarrollado por Biscaye (1965), se midió el área bajo la curva para el pico más intenso de cada mineral, lo anterior con el fin de obtener una estimación de la concentración del mineral en la muestra, para comparar entre tratamientos. No se realizaron repeticiones. Se midió el contenido total de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por espectroscopia de fluorescencia de rayos X con un espectrómetro secuencial Siemens SRS 3000 automatizado. No se realizaron repeticiones.

Los experimentos con plantas fueron realizados por Villatoro (1998). El experimento de germinación se realizó con semillas de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad T100 proveniente de los campos experimentales del Colegio de Postgraduados de Montecillos Estado de México y frijol (*Phaseolus vulgaris*) proporcionado por el Laboratorio de Bioquímica Vegetal de la Facultad de Química de la UNAM. Las condiciones de germinación fueron 25 °C y en la obscuridad, las semillas se embebieron en vinazas crudas, vinazas anaerobias y vinazas anaerobias-aerobias, más un tratamiento con agua destilada. Cada tratamiento contó con 18 semillas. Se utilizó papel estraza en forma de toallas, utilizando dos, una abajo luego las semillas y en la parte superior otra toalla. Ambas toallas se embebieron completamente en las vinazas respectivas. La germinación de las semillas se midió una semana después (Bernal y Leopold, 1995).

El experimento con plantulas de maíz se realizó utilizando tres semillas por maceta del mismo lote proveniente del Colegio de Posgraduados. Las macetas se formaron con una proporción de suelo:vinaza 3:1 en peso y volumen. La medición de las plantas se realizó a los 26 días después de la siembra.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. Caracterización y clasificación de los suelos<sup>5</sup>

#### 4.1.1. Morfopedología

La morfología del valle de Atoyac corresponde a una planicie de piedemonte. Es una planicie inclinada que se extiende al pie de sistemas montañosos y serranías que rodean a la ciudad de Córdoba, Veracruz y que ha sido formada por la sedimentación de corrientes de agua que emergen de los terrenos elevados hacia las zonas más bajas y abiertas. La dispersión combinada de materiales deluviales y fluviales originan superficies niveladas en donde los materiales se depositan en capas o estratos delgados dispuestos en forma caótica al pie de las serranías y con un claro sorteamiento en la áreas propiamente fluviales

Dentro de la planicie de piedemonte se pueden delimitar dos unidades geomórficas caracterizadas por diferentes ritmos sucesivos de acumulación y por las condiciones fisicogeográficas regionales y locales. Estas unidades fueron nombradas: planicie de piedemonte alta y planicie de piedemonte baja. Son alta y baja según la ocurrencia temporal en el ritmo de acumulación sucesiva de abanicos superpuestos, su variabilidad altitudinal y su clima regional y local.

La planicie de piedemonte baja está compuesta por materiales extendidos en una primera avanzada de acumulación originando una planicie suavemente inclinada que gradualmente se confunde con la planicie contigua. Sobre ésta, una segunda acumulación alcanza, por una actividad fluvial y deluvial más reciente y activa, mayores niveles altitudinales.

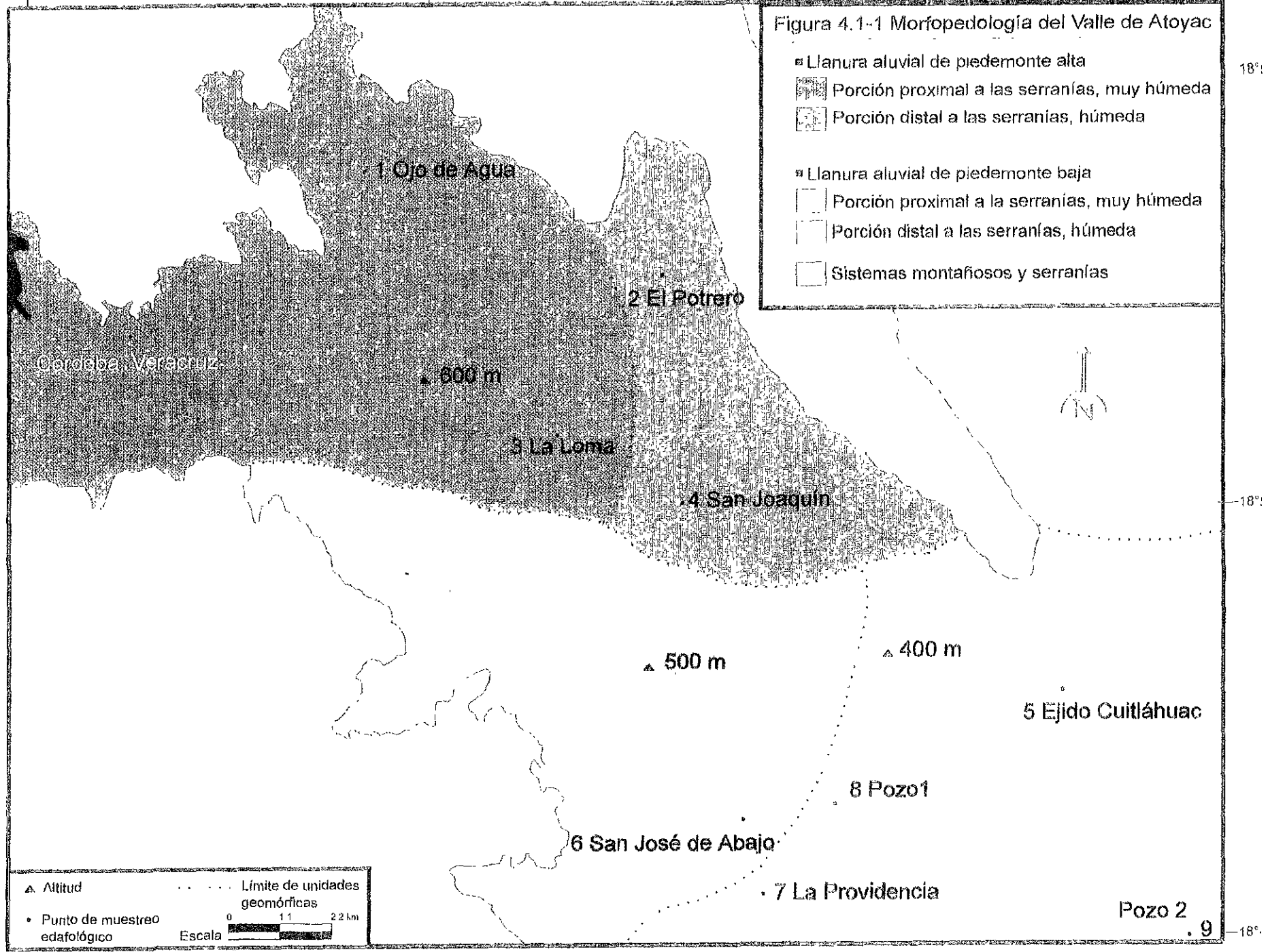
Una vez diferenciadas estas dos grandes unidades, hacia su interior se pueden reconocer dos subunidades por su posición relativa con respecto a los principales aportes de sedimentos y son: la porción cercana al ápice o punto de dispersión de sedimentos y piedemonte inmediato a las serranías, y la porción alejada de los principales aportes de sedimentos compuesta por los cuerpos y las bases de la coalescencia de varios abanicos aluviales.

---

<sup>5</sup> Parte de esta información ya ha sido publicada, las citas bibliográfica son: a) Rivas-Solórzano H., Bautista-Zúñiga F. y Durán-de-Bazúa C. 1996. Estudio y evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas aledaños al ingenio azucarero "El Potrero" en Córdoba, Veracruz, México. Informe técnico del proyecto SUELO-01-96. Pub. UNAM, Facultad De Química, Programa de Ingeniería Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA). México D.F. México.  
b) Bautista-Zúñiga F., Rivas-Solórzano H., Durán de Bazúa C. y Palacio G. 1998. Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas Boletín*, 36: 21-33.

Figura 4.1-1 Morfopedología del Valle de Atoyac

- Llanura aluvial de piedemonte alta
- ▨ Porción proximal a las serranías, muy húmeda
- ▩ Porción distal a las serranías, húmeda
- Llanura aluvial de piedemonte baja
- Porción proximal a la serranías, muy húmeda
- Porción distal a las serranías, húmeda
- Sistemas montañosos y serranías



▲ Altitud  
● Punto de muestreo edafológico  
... Límite de unidades geomórficas  
Escala 0 1.1 2.2 km

Pozo 2

9

Al mismo tiempo ambas porciones lejanas coinciden con la regularidad climática impuesta por la isoyeta de 1400 mm en la época de lluvias (mayo-octubre) como frontera de humedad. Como condición adicional, las áreas cercanas a las serranías son colectoras naturales de la humedad condensada por altitud, existiendo por tanto zonas con cantidades adicionales de agua (Figura 4.1.-1).

Cada subunidad tiene asociados procesos morfodinámicos determinados principalmente por los efectos de la meteorización física y química impuesta en primera instancia por el clima regional y cuyos efectos participan en el conjunto de los procesos pedogenéticos primarios que originan la diferenciación de los suelos.

A continuación se describen los suelos de cada una de las subunidades geomórficas con sus correspondientes perfiles (Cuadro 4.1-1) y principales características de cada uno (Cuadro 4.1-2).

*Llanura de piedemonte alta, porción cercana a las serranías, muy húmeda*

Acrisol

Las evidencias que se tienen para clasificar como Acrisol al suelo de la localidad "Ojo de Agua" (perfil 1) son: presencia de un horizonte Bt, acidez, baja capacidad de intercambio de cationes y saturación de bases mayor de 50%. Además, como en todos los horizontes hay más de 1% de materia orgánica, se le clasifica como Acrisol húmico. El análisis de difracción de rayos X revela la presencia de halloysita como principal aluminosilicato, así como la presencia de hematita y bohemita.

Cuadro 4.1-1. Características geográficas y de manejo de los sitios en los que se realizaron las calicatas y pozos

Número de sitio	Perfiles (Localidad)	Precipitación mm <sup>1</sup>	Altitud msnm	Manejo <sup>2</sup>	Calidad agrícola <sup>3</sup>
1	Ojo de Agua	1700-2000	600	Sin riego y cachaza	Baja
2	El Potrero	1200-1400	500	Riego, AR y cachaza	Muy buena
3	La Loma	1400-1700	555	Sin riego, Cachaza	Baja
4	San Joaquín	1200-1400	555	Riego, Cachaza	Mediana
5	Ejido Cuitláhuac	1200-1400	320	Riego y AR	Baja
6	San José de Abajo	1700-2000	400	Sin riego y Cachaza	Baja
7	La Providencia	1700-2000	380	Cachaza	Mediana
Pozos					
8	Pozo 1 Sureste del Nanche	1700-2000	360	Riego y Cachaza	Baja
9	Pozo 2 Suroeste del Nanche	1400-1700	280	Riego	Baja

<sup>1</sup> Datos de precipitación mayo-octubre tomados de INEGI (1994)

<sup>2</sup> Manejo = referido a la aplicación de materia orgánica; AR = agua residual

<sup>3</sup> Criterio de los productores

Para la localización ver Figura 3.1-1







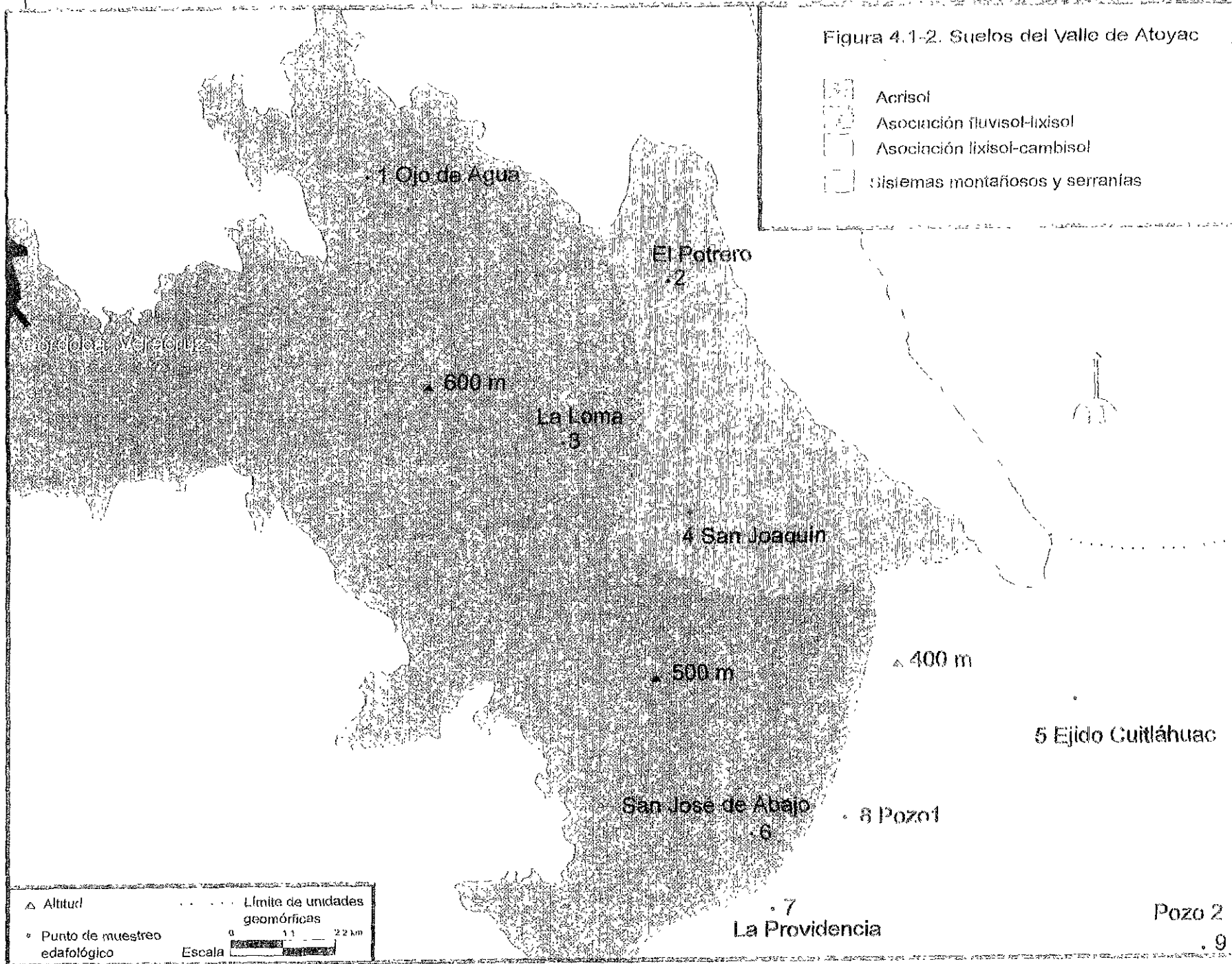
96°55'

96°50'

96°45'

Figura 4.1-2. Suelos del Valle de Atoyac

-  Acrisol
-  Asociación fluvisol-lixisol
-  Asociación lixisol-cambisol
-  Sistemas montañosos y serranías



△ Altitud

--- Límite de unidades geomórficas

◦ Punto de muestreo edafológico

Escala 0 1.1 2.2 km

Pozo 2

9

Cuadro 4.1-2. Principales características de los horizontes de los suelos

Localidad	H	Profun	pH	CIC BaCl <sub>2</sub>	CIC AcNH <sub>4</sub>	SB	CC	C org.	Limos	Arcilla	textura
		cm		c(+)mol kg <sup>-1</sup>		%	%	%	%	%	
Ojo de Agua	Ap	0-20	4.48	14.0	4.09	35	41	4.37	27	44	Arcilla
<i>Acrisol</i>	Ap	20-28	4.88	10.2	3.51	35	38	1.49	32	45	Arcilla
<i>húmico</i>	Bt	28-36	5.20	4.2	9.29	35	35	2.48	19	50	Arcilla
	Bt	36-50	5.36	4.2	13.57	35	36	1.38	15	65	Arcilla
La Loma	Ap	0-21	4.91	27.2	4.73	79	37	1.66	16	73	Arcilla
<i>Acrisol</i>		21-36	4.90	13.0	4.74	80	38	3.31	18	77	Arcilla
		36-60	5.13	3.6	4.14	80	43	2.05	16	49	Arcilla
San José de Abajo	Ap	0-20	4.50	ND	15.12	ND	39	2.66	20	50	Arcilla
<i>Acrisol</i>	B	20-40	4.60	ND	9.20	ND	40	0.74	12	54	Arcilla
	C	40-60	4.50	ND	9.83	ND	40	0.38	10	56	Arcilla
La Providencia	Ap	0-16	5.40	ND	14.38	ND	25	3.52	30	22	Franco
<i>Lixisol</i>	Ap	16-27	5.20	ND	17.55	ND	27	3.16	30	26	Franco
	Bt	27-47	5.30	ND		ND	37		30	46	Arcilla
	C	47-80	5.1	ND	9.41	ND	36	0.49	23	44	Arcilla
San Joaquín	Ap	0-36	5.76	8.6	16.79	80	33	3.75	28	35	Migajón arcilloso
<i>Lixisol</i>	Bt	36-60	6.40	6.4	21.15	80	37	1.87	20	41	Migajón arcilloso
Cuittláhuac	Ap	0-21	6.62	20.0	17.18	95	28	3.73	18	35	Arcillo arenoso
<i>Cambisol</i>	Bw	21-33	6.81	10.2	15.27	95	28	2.94	18	37	Migajón arcilloso
	C	33-64	6.99	3.0	17.83	95	35	2.10	26	35	Migajón arcilloso
El Potrero	Ap	0-30	6.16	30.2	25.45	80	32	3.78	28	46	Arcilla
<i>Fluvisol</i>	Ap	30-44	6.45	31.0	24.11	80	36	3.30	44	32	Franco arcilloso
<i>vértico</i>	B	44-60	6.83	27.2	17.03	80	32	1.94	32	38	Franco arcilloso
	B	60-110	6.95	21.8	12.90	80	34	1.31	20	47	Arcilla
Pozo 1	Ap	0-25	6.1	ND	18.27	ND	15	7.26	22	8	Migajón arenoso
Pozo 2	Ap	0-25	5.5	ND	12.05	ND	22	2.42	28	18	Migajón arenoso

H= horizonte, Profun= profundidad, C org= carbono orgánico, CIC= capacidad de intercambio de cationes, SB= saturación de bases, ND = no determinado, y CC= capacidad de campo; Promedios, n= 3.

Los procesos que se identifican por su morfología y el análisis físico y químico son: fuerte lixiviación de cationes intercambiables, intemperismo intenso y deficiencia del drenaje interno en la parte baja del perfil. Este suelo se localiza en la parte norte de la zona de estudio.

Este suelo no ha sido regado con aguas residuales, pero ha recibido aplicaciones de cachaza. En cuanto a las cuestiones agrícolas, este suelo presenta diversos problemas: fijación de fósforo; bajas cantidades de calcio, magnesio y potasio; problemas por el aluminio intercambiable (toxicidad y disminución de la CIC); condiciones reductoras en la parte baja del perfil y compactación. Este suelo se considera como marginal para el cultivo de caña de azúcar.

#### Acrisol

El suelo de la localidad "La Loma" se clasifica como Acrisol. Este suelo presenta horizonte Bt, pH= 4.9, baja CIC. Las cantidades de arcillas son altas en los tres horizontes (entre 49% y 77%). Los valores de la CIC obtenidos con  $BaCl_2$  son mayores a los obtenidos con la técnica del acetato de amonio, por lo que se deduce que algunos sitios de intercambio de cationes pueden estar ocupados por aluminio intercambiable.

Este suelo no ha sido regado con aguas residuales pero ha recibido aplicaciones de cachaza. Presenta compactación (identificada en campo); acidez; bajas cantidades de potasio, calcio y magnesio; disminución de la CIC por Fe y Al intercambiables; y fijación de fósforo (23.3%). Es considerado como suelo de baja calidad agrícola.

#### *Llanura de piedemonte alta, porción lejana a las serranías, húmeda*

#### Fluvisol

El suelo de "La pequeña propiedad" del Ingenio "El Potrero" se clasifica como Fluvisol vértico por la distribución irregular del tamaño de partículas, no presenta alteración en los horizontes a 25 cm de profundidad, se presentan grietas profundas cuando se encuentra seco, tiene relieve en gilgai, alta capacidad de intercambio de cationes y potencial de hidrógeno cercano a la neutralidad. El análisis de difracción de rayos X revela la predominancia de halloysita.

Este suelo se encuentra en la parte plana del terreno. Ha sido regado con aguas residuales y recibido aplicaciones de cachaza. No presenta problemas de salinidad. Este suelo está considerado, por los productores, como de alta calidad agrícola.

#### Lixisol

El suelo de la localidad "San Joaquín" es un Lixisol, se caracteriza por presentar un horizonte Bt, CIC de  $16.8\text{ c}(+)\text{mol kg}^{-1}$  y alta saturación de bases (bien provisto de calcio y magnesio, pero con cantidades bajas de potasio). En la superficie es pedregoso, gravoso, con 3.75% de MO y valor de pH ácido (5.8). Presenta condiciones reductoras en la parte baja del perfil y está muy compacto, lo cual es un factor limitativo del crecimiento radicular de la caña de azúcar. Ha recibido aplicaciones de cachaza. Se utiliza riego de aguas fluviales pero no aguas residuales del ingenio.

### *Llanura de piedemonte baja, porción cercana a las serranías, muy húmeda*

#### Acrisol

El suelo al sureste de "San José de Abajo" es un Acrisol. La capacidad de intercambio de cationes en la superficie del suelo es de 15 c(+)mol kg<sup>-1</sup> y en los horizontes subsuperficiales de 9.8 c(+)mol kg<sup>-1</sup>. Los valores de pH son muy ácidos (4.5). No presenta el horizonte Bt debido a las labores agrícolas. Los tres horizontes se clasifican como arcilla.

Las arcillas aumentan con la profundidad pero sin alcanzar a formar el horizonte árgico. También la capacidad de campo aumenta con la profundidad, debido a aumento de las arcillas. En este suelo el drenaje es deficiente por la compactación de los horizontes subsuperficiales, se identifican condiciones reductoras en la parte baja del perfil. Los porcentajes de materia orgánica son de 2.6 a 0.38%. El suelo se localiza sobre superficies de lomeríos poco inclinados y parcialmente decapitados.

### *Llanura de piedemonte baja, porción lejana a las serranías, húmeda*

#### Cambisol

El suelo de la localidad "Ejido Cuicláhuac" es un Cambisol, con un horizonte Bw. En la superficie es pedregoso, gravoso, presenta una CIC de 17 c(+)mol kg<sup>-1</sup>, saturación de bases arriba del 80%, altas cantidades de MO (3.7%) y valores de pH de 6.4 a 6.99.

Presenta compactación en los horizontes subsuperficiales. Este suelo ha sido regado con aguas residuales de los ingenios; no presenta problemas de salinidad y es considerado como marginal. La retención de fosfatos se incrementa con la profundidad, al igual que el aluminio; la capacidad de campo aumenta con la profundidad y se relaciona con la disminución del porcentaje de arenas.

#### Lixisol

El suelo localizado al norte de "La Providencia" es un Lixisol. Presenta un horizonte Bt, una CIC de 17.55 a 14.38 c(+)mol kg<sup>-1</sup>, saturación de bases mayor del 50%, valores de pH de 5.4. La estructura es granular en el horizonte superficial y de bloques angulares en los subsuperficiales; drenaje deficiente en la parte baja del perfil; y el porcentaje de materia orgánica es de 3.52 a 0.38%. La capacidad de campo aumenta en los horizontes subsuperficiales y la cantidad relativa de arenas disminuye. De manera general puede decirse que se presentan problemas por acidez, drenaje y compactación.

#### Pozos 1 y 2

Los pozos 1 y 2, tienen su origen en los sedimentos arcillosos sobre los aluviones de los arroyos que surcan la planicie de monte. Se han desarrollado sobre tepetates en superficies ligeramente onduladas.

De manera general y en relación con todos los perfiles descritos, la identificación de las unidades de suelos se dificulta porque tienen cerca de un siglo de labores agrícolas en las que han recibido aguas residuales y/o cachaza, han desarrollado el piso de arado y los horizontes superficiales han sido mezclados; por esta razón algunas de sus propiedades características se han perdido.

#### 4.1.2. Ordenación y clasificación numérica de los sitios

##### Ordenación

El análisis de componentes principales, indica que la varianza es explicada por el eje 1 en 43.5% (3.916), eje 2 en 65.5% (1.977), eje 3 en 81.1% (1.402) y el eje 4 en 92.7% (1.046). Con los valores propios de las propiedades de los sitios (Cuadro 4-3 y 4-4) obtenidos con el análisis de componentes principales, se calculó la variación explicada para cada propiedad, utilizando la siguiente fórmula (Pla, 1986 en López-Hernández *et al.*, 1992):

$$r(jk) = [ I(jk) * [ \lambda(k) ]^{1/2} ]^2$$

donde: r(jk)= variación explicada

I(jk)= valor propio de cada propiedad del sitio para un componente dado

$\lambda(k)$ = valor propio de cada componente

Ejemplo: variación explicada para pH=  $[0.455 * [ 3.916 ]^{1/2}]^2 = 0.81$

El primer eje se encuentra asociado con los valores de pH y de CIC explicando la variación en 81 y 82%, respectivamente; por lo que estas propiedades del suelo son las más importantes para la distinción entre sitios.

Considerando el segundo eje, las propiedades que mejor explican la variación entre sitios son: precipitación pluvial (97%); CIC (93%); arcilla (92%) y pH (83%). El carbono, limos y fósforo fueron las propiedades explicadas por los ejes 3 y 4 y, por lo tanto, las que menos explican la variación.

Cuadro 4.1-3. "Valores propios"<sup>6</sup> de las propiedades de los sitios en los dos ejes del análisis de componentes principales

Propiedad	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4
Profundidad	0.32	- 0.36	0.06	0.48
pH	0.46	- 0.10	-0.05	-0.30
CIC	0.46	- 0.24	0.005	0.02
C	0.30	0.36	-0.42	0.19
Arcilla	- 0.32	- 0.51	-0.16	0.3
pp	- 0.37	0.47	0.03	0.08
CC	- 0.37	- 0.36	-0.008	0.32
Limos	0.14	0.24	0.47	0.64
Fósforo	0.02	- 0.05	0.76	-0.34

<sup>6</sup> Eigenvectors

### Clasificación numérica

Por el análisis de conglomerados se identifican dos grupos con el 54% de similitud. El primero de ellos presenta al interior 61% de similitud y el otro 64%. El primero contiene a los sitios que reciben menor cantidad de precipitación pluvial. Esto es contrario a lo que sucede con el segundo grupo, con los sitios localizados en la zona que recibe mayor cantidad de agua de lluvia.

Cuadro 4.1-4. Proporción de la variación explicada para cada propiedad de los sitios por cada componente

Propiedad	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Variación explicada acumulada (%)
Profundidad	0.40	0.25	0.01	0.24	90
pH	0.81	0.02	0.00	0.10	93
CIC	0.82	0.11	0.00	0.00	93
C	0.35	0.26	0.25	0.04	90
Arcilla	0.41	0.51	0.03	0.00	96
pp	0.53	0.44	0.00	0.01	98
CC	0.53	0.26	0.00	0.11	90
Limos	0.07	0.12	0.31	0.43	93
Fósforo	0.002	0.01	0.80	0.12	93

A continuación se describen tomando en cuenta los grupos formados por el análisis de conglomerados (Cuadro 4.1-5).

El primer grupo está compuesto por los sitios San José de Abajo y Ojo de Agua que se encuentran dentro de la isoyeta de mayor precipitación, son los suelos más semejantes (84%) aún cuando no son los más cercanos entre sí. A este grupo se les asocian La Providencia y La Loma.

El segundo grupo, que presenta un 83.6%, está compuesto por El Potrero y San Joaquín que se encuentran cerca y aún cuando su epipedón es parecido, difieren en otros aspectos, siendo el primero más profundo y menos compacto que el segundo. A este grupo se asocian: El Ejido Cuitláhuac, Pozo 1 y Pozo 2.

Cuadro 4.1-5. Agrupación de suelos por pares

grupos	sitios	sitios	similaridad	sitios por grupo
1	San José (Acrisol)	Ojo de Agua (Acrisol)	0.84	2
2	Potrero (Fluvisol)	San Joaquín (Lixisol)	0.83	2
3	Nodo 2	Cuitláhuac (Cambisol)	0.75	3
4	Nodo 1	Providencia (Lixisol)	0.73	3
5	Nodo 4	Loma (Acrisol)	0.67	4
6	Nodo 3	Pozo 2	0.64	4
7	Nodo 6	Pozo 1	0.61	5
8	Nodo 5	Nodo 7	0.54	9

Los sitios que menor similitud presentan con los dos grupos formados son los Pozos 1 y 2 y La Loma. Esto puede deberse a que se encuentran cerca de los ríos y han perdido parcialmente el horizonte A.

#### 4.1.3. Correlaciones simples

La matriz de correlación de datos centrados y estandarizados generada en el análisis de componentes principales, presenta valores altos entre: pp vs pH; pp vs CIC; y arcillas vs CC (Cuadro 4.1-6), por lo que se realizaron las regresiones lineales.

Teóricamente se conoce que los suelos que reciben mayor precipitación pluvial presentan valores de pH ácidos y arcillas de menor capacidad de intercambio de cationes, por lo que la relación entre precipitación pluvial y la capacidad de intercambio de cationes se presenta matemáticamente de acuerdo con la ecuación:

$$y = -1.435x + 38.62 \quad (r = 0.56)$$

Donde  $y = \text{CIC en c (+)mol kg}^{-1}$

$x = \text{mm de precipitación pluvial } 100^{-1}$

El valor de la relación ( $r$ ) entre la CIC y la precipitación pluvial es baja debido, probablemente, a la forma en la que se calculan las isoyetas. Por la escasa relación entre la CIC y la pp los mapas de efectos climáticos no son del todo confiables para identificar las zonas más intemperizadas.

La ecuación que describe la relación entre la precipitación pluvial y el pH también es inversamente proporcional. La ecuación es:

$$y = -0.2311x + 9.4211 \quad (r = 0.80)$$

donde  $y = \text{pH}$

$x = \text{mm de precipitación pluvial } 100^{-1}$

Cuadro 4.1-6. Matriz de correlación, del análisis de componentes principales, entre propiedades de los sitios (Datos centrados y estandarizados)

	Prof.	pH	CIC	C	Arcilla	pp	CC	Limos	P
Profundidad	1.00	0.41	0.71	0.16	-0.08	-0.74	-0.09	0.29	-0.02
pH		1.00	0.84	0.40	-0.46	-0.80	-0.66	0.02	0.07
CIC			1.00	0.42	-0.31	-0.84	-0.45	0.15	0.11
C				1.00	-0.64	-0.06	-0.54	0.15	-0.44
Arcilla					1.00	0.00	0.84	-0.47	-0.17
pp						1.00	0.22	0.08	-0.06
CC							1.00	-0.16	-0.07
Limos								1.00	0.21
P									1.0

CIC= Capacidad de intercambio catiónico; C= carbono; pp= precipitación; CC= capacidad de campo y P= Fósforo.

El coeficiente de regresión ( $r$ ) indica que la relación entre variables se presenta como se esperaba de manera teórica ya que es sabido que el lavado de bases de los minerales aumenta la acidez del suelo (Buckman y Brady, 1991; Bohn *et al.*, 1994; Doménech, 1995).

La relación entre el pH y la CIC alcanza valores de  $r= 0.55$ , pero si no se toma en cuenta el dato del epipedón San José la relación aumenta, lo cual sugiere que pudiera existir alguna interferencia en la medición de la CIC. El modelo se describe por la siguiente ecuación:

$$y = 0.084x + 4.43 \quad (r= 0.85)$$

La relación entre el porcentaje de arcilla y la capacidad de campo se presenta de la siguiente manera:

$$y= 0.037x + 1.66 \quad (r= 0.84)$$

donde  $y=$  porcentaje de arcilla

$x=$  porcentaje de agua a  $CC 10^{-1}$

La capacidad de campo es directamente proporcional al porcentaje de arcilla y el modelo lo explica con suficiencia.

Por las observaciones de campo puede decirse que los suelos con altos contenidos de arcilla presentan condiciones reductoras en los horizontes subsuperficiales, principalmente en los suelos de mayor acidez.

La capacidad de intercambio de cationes es directamente proporcional a la densidad real, alcanzando una relación estrecha como lo indica la ecuación de regresión lineal:

$$y= 0.006x + 2.65 \quad (r= 0.91)$$

donde  $y=$  densidad real en  $g mL^{-1}$

$x=$  CIC en  $c (+)mol kg^{-1}$

La importancia de esta relación radica en la posibilidad de estimar un parámetro que se puede considerar "barato" (densidad real) en tiempo de realización, reactivos utilizados y especialización del técnico analista en comparación del análisis "caro" de capacidad de intercambio de cationes.

No es común encontrar una relación lineal entre estas características edáficas; sin embargo, en este caso la predominancia de las arcillas en todos los suelos ocasiona que la densidad real se encuentre dominada por esta fracción que varía ampliamente y que presenta características muy diferentes, que se muestran más claramente por la CIC. El valor de la densidad real es una propiedad distintiva de los minerales de arcilla, sin embargo, cuando en los suelos domina la fracción de arena o limos y siendo la misma roca madre, el valor de la densidad real permanece con escasa variación y no se presenta relación alguna con la CIC.

Los contenidos de carbono orgánico no presentan correlación con las demás propiedades medidas debido a que las cantidades presentes en los suelos de la región dependen del manejo más que de los procesos pedogénicos.



Por la facilidad de medición, el valor de pH, porcentaje de arcillas y la densidad real son propiedades del suelo que, para este caso, pueden funcionar como propiedades distintivas. Además, la precipitación pluvial también es un carácter distintivo entre sitios. Un mapa de suelos con estas propiedades sería poco costoso y muy útil para señalar los sitios en los que la adición de las aguas residuales sería más benéfica. También podría hacerse con implicaciones productivas en relación al cultivo de la caña de azúcar, como por ejemplo, retención de fosfatos, toxicidad por aluminio, retención de humedad, capacidad de intercambio de cationes y condiciones de óxido-reducción.

#### 4.2. Caracterización de las vinazas<sup>7</sup>

Las características de la vinaza cruda indican: 1) La presencia de grandes cantidades de materia orgánica disuelta; 2) Altos riesgos de deterioro del suelo por su aplicación de manera directa ya que presenta temperaturas de 85° C, valores de pH ácidos, conductividad eléctrica de 16.01  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y contenidos de cloruros 4,094  $\text{mg L}^{-1}$  (Cuadro 4.2-1) A continuación se analizan los parámetros más importantes.

La vinaza cruda presenta un valor de pH= 4.5 por la adición de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, según el proceso presente en cada ingenio, al mosto para llevarlo a un pH= 3.0 con el objeto de favorecer la predominancia de *Saccharomyces cerevisiae*, la cual lo fermenta y produce alcohol etílico (alcohol de caña).

Cuadro 4.2-1. Caracterización de la vinaza cruda

Parámetro	Unidades	X	s	Muestra compuesta
Temperatura	°C	85	2.50	86
pH		4.5	0.13	4.5
Conductividad eléctrica	dS $\text{m}^{-1}$	16.01	1.94	16.30
Sólidos sedimentables	$\text{mL L}^{-1}$	48	6.54	47
DQO	$\text{g L}^{-1}$	117.88	4.26	120.32
Fosfatos	$\text{mg L}^{-1}$	700	0.00	700
Sólidos totales	$\text{g L}^{-1}$	116.20	6.35	107.06
Sólidos totales volátiles	$\text{g L}^{-1}$	82.22	5.88	80.73
Sólidos totales fijos	$\text{g L}^{-1}$	26.98	1.92	26.33
Sólidos suspendidos totales	$\text{g L}^{-1}$	10.68	2.19	8.00
Sólidos suspendidos volátiles	$\text{g L}^{-1}$	9.22	1.88	6.85
Sólidos suspendidos fijos	$\text{g L}^{-1}$	1.47	0.87	1.15
Sólidos disueltos totales	$\text{g L}^{-1}$	105.51	6.31	99.06
Sólidos disueltos volátiles	$\text{g L}^{-1}$	81.00	5.15	73.88
Sólidos disueltos fijos	$\text{g L}^{-1}$	24.51	3.93	25.18

n= 10 repeticiones

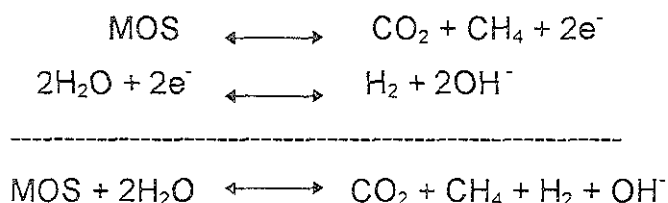
<sup>7</sup> Parte de esta información ha sido publicada. La cita bibliográfica es: Bautista-Zúñiga F. y Durán-de-Bazúa C. 1998. Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 14(1): 11-17.

Cuadro 4.2-2. Constituyentes inorgánicos en las vinazas

Parámetros	VC	VA	VAA
pH	4.44 ± 0.13	8.73 ± 0.05	8.93 ± 0.03
Conductividad eléctrica (dS m <sup>-1</sup> )	29.3 ± 0.2	19.5 ± 0.17	19.1 ± 0.001
Ca <sup>2+</sup> (mmol <sup>(+)</sup> L <sup>-1</sup> )	45.7 ± 1.41	9.6 ± 0.001	1.7 ± 0.29
Mg <sup>2+</sup> (mmol <sup>(+)</sup> L <sup>-1</sup> )	46.0 ± 0.3	46.0 ± 0.48	29.5 ± 0.69
Na <sup>+</sup> (mmol <sup>(+)</sup> L <sup>-1</sup> )	0.44 ± 0.02	0.70 ± 6.5x10 <sup>-8</sup>	0.60 ± 0.005
K <sup>+</sup> (mmol <sup>(+)</sup> L <sup>-1</sup> )	10.1 ± 0.15	3.9 ± 1.6x10 <sup>-6</sup>	3.8 ± 0.06
Cl <sup>-</sup> (mmol <sup>(-)</sup> L <sup>-1</sup> )	112.8 ± 13.8	nm	27 ± 6.9
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (mmol <sup>(-)</sup> L <sup>-1</sup> )	31.2 ± 8.6	nm	nm
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (mmol <sup>(-)</sup> L <sup>-1</sup> )	nd	0.60 ± 0.1	1.2 ± 0.23
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mmol <sup>(-)</sup> L <sup>-1</sup> )	nd	2.5 ± 0.17	7.3 ± 0.13

VC= vinaza cruda; VA= vinaza anaerobia; VAA= vinaza anaerobia-aerobia. nm= no medido, nd= no detectado

El tratamiento anaerobio eleva el pH de las vinaza crudas, debido a la actividad microbiana que al descomponer la materia orgánica disuelta forma bióxido de carbono con lo que se presenta un aumento de iones OH<sup>-</sup>. Otra fuente de iones OH<sup>-</sup> es la reacción de óxido-reducción que se presenta cuando el agua es el aceptor de electrones (Bohn *et al.*, 1993; Domenéch, 1995) (Cuadro 4.2-2).



donde: MOS= materia orgánica soluble.

Las vinazas pudieran ser una opción para aumentar el pH de los suelos ácidos de uso agrícola y de esta manera evitar el gasto por el encalado.

Los valores de la conductividad eléctrica indican alto riesgo de salinidad (Richards, 1985; Aguirre, 1993). Esta característica de las vinazas se debe principalmente a la participación de todos los iones presentes. Se sabe que los iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> son los que presentan mayor conductancia eléctrica y movilidad iónica (Chang, 1987). Por esto y por los valores de pH de las VC y VA y VAA, es posible que dichos iones presentes en la VC (H<sup>+</sup>) y en las tratadas de manera biológica (OH<sup>-</sup>), contribuyan de manera importante en el valor de la CE. Esta aseveración se encuentra fundamentada en los niveles de CE que los suelos presentan después de la aplicación de las vinazas, como más adelante se explicará.

Al aplicarse las vinazas al suelo, la CE del suelo no llega a los niveles de la vinaza, debido probablemente a que el pH se amortigua por los coloides del suelo.

Si se considera que:

$$CE = N \times 100$$

donde: CE= Conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$

N = concentración normal de los iones en disolución ( $\text{eq L}^{-1}$ )

La conductividad eléctrica calculada con la suma de los cationes (Ca, Mg, Na y K) para las vinazas es:  $10.22 \text{ dS m}^{-1}$  (VC);  $6.02 \text{ dS m}^{-1}$  (VA); y  $3.56 \text{ dS m}^{-1}$  (VAA). Si se calcula la CE con la suma de los aniones, el valor es más alto,  $14.4 \text{ dS m}^{-1}$  para las VC e igual,  $3.5 \text{ dS m}^{-1}$  para las VAA. Estas estimaciones son menores que los valores medidos con el puente de conductividad, debido a que no se toman en cuenta otros iones como  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ , y Zn, así como a la materia orgánica soluble. Es decir, los valores de la CE de la vinaza no se deben únicamente a los aniones y cationes, también influye la materia orgánica disuelta y los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ . Sin embargo, la vinaza presenta un alto riesgo de salinidad para los suelos, por lo cual debe diluirse para ser aplicada.

Dentro de las ventajas de la utilización de las vinazas como enmiendas en suelos marginales están las siguientes:

- a) El contenido de sodio no constituye ningún riesgo de sodicidad, debido a su baja concentración ( $0.44 \text{ mmol}^{(+)} \text{ L}^{-1}$ ) con respecto a la suma del calcio y magnesio ( $91.7 \text{ mmol}^{(+)} \text{ L}^{-1}$ ).
- b) Las vinazas contienen  $10.1 \pm 0.15 \text{ mmol}^{(+)} \text{ L}^{-1}$  de K, además de Ca y Mg que beneficiarían a los suelos. Además, las VC contienen alrededor de  $700 \text{ mg L}^{-1}$  de fosfatos, lo cual constituye una fuente de fósforo para el suelo.

Los elementos como el Ca, Mg y K son nutrimentos que la caña necesita y que se encuentran en bajas cantidades en la mayoría de los suelos, por lo cual la adición de estos elementos puede considerarse como benéfica, siempre y cuando no se salinice.

Las diferencias en los contenidos de potasio de las VC, VA y VAA se deben a la incorporación de este elemento en la biomasa microbiana de las vinazas tratadas que, al final de tratamiento, se separa del residuo líquido (Cuadro 4.2-2).

La caña de azúcar requiere grandes cantidades de potasio (0.62 al 2.0% en hojas) por lo que en algunos lugares la fertilización con este elemento es entre 74 y  $330 \text{ kg ha}^{-1}$  (Anderson y Bowen, 1994).

El contenido de Ca disminuye con los tratamientos ya que es incorporado a la biomasa microbiana pero, además, pueden precipitarse como carbonatos con el  $\text{CO}_2$ . La adición de Ca y Mg favorecería al suelo y a la caña de azúcar. La disminución de Ca en las VA y VAA podría constituirse en un factor limitativo del crecimiento microbiano y de la mineralización de la materia orgánica soluble, como lo reportan Ilangovan y Noyola (1993).

No es deseable que las concentraciones de magnesio adicionadas al suelo sean mayores que las de calcio, pues en el largo plazo, podría formarse un suelo

magnésico de baja permeabilidad (Szabolcs, 1989). Por esto, debe tenerse cuidado con las aplicaciones de VA y VAA a los suelos.

Cuadro 4.2-3. Micronutrientes en los tres tipos de vinazas y contenidos máximos permisibles en aguas residuales

vinaza	Zn	Mn	Cu
	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
VC	60.0	3.4	nd
VA	62.4	nd	nd
VAA	49.6	nd	nd
LMP	10.0		4.0

LMP= límite máximo permisible en agua residual (CNA, 1997)  
nd= no detectado

c) No se detectaron cantidades importantes de elementos menores como Mn y Cu (Cuadro 4.2-3).

El Zn se encuentra muy por arriba del límite máximo permisible (10 mg L<sup>-1</sup>) de acuerdo con la normatividad mexicana (CNA, 1997) (Cuadro 4.2-3). Los altos contenidos de Zn encontrados en los tres tipos de vinazas hacen necesario el estudio de este metal en el suelo y plantas. Este metal podría provenir del efecto corrosivo de los jugos, mieles y vinazas ácidas que durante todo el proceso tienen sobre los materiales de construcción de los equipos y accesorios.

Los contenidos de carbono orgánico total son, lógicamente, mayores en las vinazas crudas que en las tratadas (Cuadro 4.2-4). Las VAA contienen un poco menos carbono orgánico que las VA debido a la conversión bioquímica a CO<sub>2</sub> y biomasa y a la evaporación durante el tratamiento aerobio; la diferencia entre ambas radica en las formas del carbón que presentan, siendo mayores las cantidades de sustancias húmicas en las VAA (Cuadro 4.2-4).

La tasa E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>, también llamada densidad óptica, es inversamente proporcional al peso molecular de los AH, a la condensación y viscosidad (Chen *et al.*, 1977). Los valores de E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> = 6.0 de la fracción precipitada a pH= 2 de las VA indican que los AH son de bajo peso molecular, contrario a lo que ocurre en las VAA en las que la tasa E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> = 4.6 presenta un valor cercano al "ideal" (4.8) para los AH como propone Schnitzer (1978) y Marthur *et al.*, (1993).

Cuadro 4.2-4. Parámetros orgánicos medidos en los tres tipos de vinazas

Vinazas	COT	Fracción soluble a pH=2	Fracción precipitada a pH 2	Fracción no dializable	E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>
	g C L <sup>-1</sup>	g C L <sup>-1</sup>	g C L <sup>-1</sup>	g C L <sup>-1</sup>	
VC	89 ± 3.89	79.19 ± 2.52	8.52	6.20 ± 0.48	2.5 ± 0.4
VA	28 ± 0.85	26.28 ± 0.10	2.04	0.99 ± 0.35	6.0 ± 0.5
VAA	27 ± 1.87	18.03 ± 0.10	8.00	0.63 ± 0.20	4.6 ± 0.1

COT= carbono orgánico total; E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>= densidad óptica a los 465 nm/665 nm. VC= vinaza cruda, VA= vinaza anaerobia y VAA= vinaza anaerobia-aerobia.

La densidad óptica  $E_4/E_6$ , de la fracción precipitada a pH = 2 de las VC indica que las sustancias húmicas son de mayor peso molecular y más condensadas que las de las VA y VAA.

Siendo ácidos húmicos (AH) la fracción precipitada a pH = 2 y considerando que la VC se diluye ( $1 \cdot 10^{-1}$ ) en agua, se deduce que durante ambos tratamientos biológicos se generan cantidades importantes de AH; siendo 2.4 veces más durante el tratamiento anaerobio y 9.4 veces más con el tratamiento anaerobio-aerobio.

Los espectros de infrarrojo de las VC, VA y VAA son parecidos a los de las sustancias húmicas, mostrando los picos típicos de absorción infrarroja (Cuadro 4.2-5). Se dice que son parecidos debido a su procedencia (industrial) ya que no se generaron en el suelo. El análisis permite identificar la presencia de sustancias húmicas por lo que puede decirse que la extracción y purificación es la correcta; sin embargo, no se detectan cambios a nivel de grupos funcionales en las sustancias húmicas de los diferentes tipos de vinazas. Las diferencias entre sustancias húmicas en los tres tipos de vinazas fue únicamente de cantidad.

Tal vez las diferencias químicas entre las vinazas se encuentren a nivel de sustancias solubles de bajo peso molecular y en los ácidos fúlvicos, así como en las fracciones hidrófilas e hidrófobas como lo sugiere (Kaiser *et al.*, 1996; Kaiser y Zech, 1997). La separación entre sustancias hidrófobas e hidrófilas podría servir para estimar la absorción de la materia orgánica en los minerales del suelo.

Cuadro 4.2-5. Bandas y grupos funcionales detectados con el espectro de infrarrojo de con transformadas de Fourier de las vinazas crudas y tratadas

Grupos funcionales	Región característica	VC	VA	VAA	Referencias
	Número de onda				
OH	3300-3400	3286	3255	3294	Shugahara e Inoko, 1981; Schnitzer e Schuppli, 1989; Francioso <i>et al.</i> , 1998
-CH, -CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub>	2900-3000	2939	2962	2939	Shugahara e Inoko, 1981; Francioso <i>et al.</i> , 1998
-C=O ligado a -COOH	1720	1728			Shugahara e Inoko, 1981; Schnitzer y Schuppli, 1989; Francioso <i>et al.</i> , 1998
-C=O ligado a -COOH		1700	1712	1712	Shugahara e Inoko, 1981; Schnitzer y Schuppli, 1989; Francioso <i>et al.</i> , 1998)
COO-		1666	1666	1666	Shugahara e Inoko, 1981
C=C Aromático	1525	1536	1535	1535	Shugahara e Inoko, 1981; Francioso <i>et al.</i> , 1998
CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub>	1450		1435	1435	Schnitzer y Schuppli, 1989; Francioso <i>et al.</i> , 1998
COH Fenólico	1270	1242	1250	1242	Francioso <i>et al.</i> , 1998

Una vez conocidas las características de las vinazas crudas y tratadas, así como las propiedades de los suelos se diseñaron los siguientes ensayos con columnas y macetas con el fin de conocer la retención y mineralización de las vinazas en los suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol que son las más diferentes en cuanto a sus propiedades químicas.

### 4.3 Ensayos

#### 4.3.1 Ensayo en columnas

Este experimento se realizó con el fin de cuantificar el carbono retenido a diferentes niveles (0 a 5, 5 a 10, 10 a 15, 15 a 20, 20 a 25 y 25 a 30 cm) a lo largo de una columna de 30 cm y para cuantificar el carbono orgánico que saldría del sistema en forma de lixiviado. Sin embargo, en este ensayo no se logró el objetivo planteado, debido a que la infiltración no se produjo de manera rápida tal a pesar del uso de suelo seco y no compactado.

En las columnas en la que se utilizó agua solamente la infiltración fue demasiado lenta, las primeras gotas de lixiviado se presentaron entre las 6 y 8 horas después de la aplicación.

En el caso de los tratamientos con dosis de 10 cm de vinaza, las primeras gotas del lixiviado se obtuvieron a los tres días y solo en algunos casos. En otros casos, el lixiviado comenzó hasta después de una semana e incluso algunas columnas nunca presentaron lixiviado. Debido a esto, ya no se midieron los niveles de carbono orgánico. Se midió el valor de pH y la CE como indicadores del nivel de infiltración de la vinaza a lo largo de la columna.

El pH aumenta en 3 y 1.5 unidades en el Acrisol y Fluvisol respectivamente (Figura 4.3-1). En el Acrisol la distribución de la vinaza a lo largo de la columna fue más uniforme, ocasionando cambios en el valor de pH y CE a los 30 cm de profundidad.

La infiltración de la vinaza en la columna con el Fluvisol alcanzó hasta 25 cm de profundidad (Cuadro 4.3-1), ya que hasta allí se detectaron cambios en la CE y, en menor grado, en el valor de pH.

Cuadro 4.3-1. Valores de conductividad eléctrica en las columnas de suelo

profundidad (cm)	Fluvisol testigo	Fluvisol con VC	Acrisol testigo	Acrisol con VC
	dS m <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>
5	0.15	7.27	0.16	1.09
10	0.15	5.11	0.19	1.08
15	0.16	3.11	0.16	2.48
20	0.15	1.51	0.17	4.04
25	0.16	0.38	0.24	4.14
30	0.16	0.15	0.13	4.54

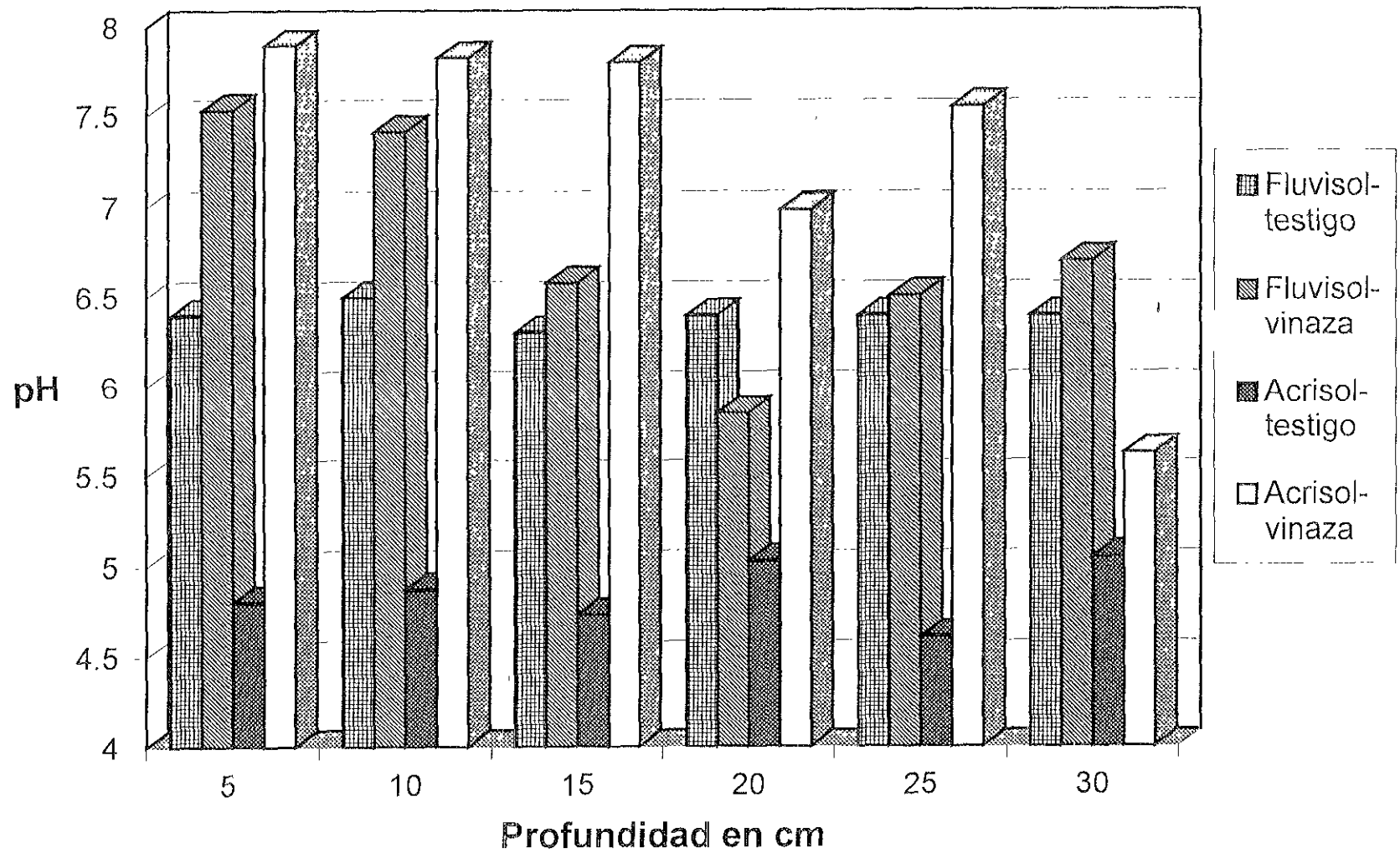


Figura 4.3-1. Valores de pH en los suelos de las columnas tratadas con vinaza cruda

La conductividad eléctrica en el FV disminuye con la profundidad, comportamiento contrario a lo que ocurre en el Acrisol (Cuadro 4.3-1). Estos patrones en los cambios en la CE, que indican la penetración de la vinaza a lo largo de la columna, pueden ser explicados por la mayor CIC del Fluvisol debido a la mayor retención de los iones en las arcillas aluminosilicatadas (Cuadro 4.4.6-1).

El Fluvisol tienen mayores cantidades de arcillas aluminosilicatadas que el Acrisol en el cual dominan los óxidos de Fe y Al. Se observó que en el Fluvisol se producía crecimiento microbiano muy denso en las primeras capas, es posible que esto contribuyera a la disminución del paso de la vinaza.

De lo anterior se deduce que tanto la velocidad de infiltración como la forma de aplicación de la vinaza son dos factores que se deben tener en cuenta al aplicarla en el campo ya que es muy probable que domine la escorrentía sobre la infiltración vertical, con el consecuente riesgo de contaminación de los cuerpos de agua superficiales.

La aplicación de dosis excesivas (como la aplicada a las columnas) de vinaza podrían aumentar las condiciones reductoras en los suelos, con su consecuente efecto negativo en el desarrollo de la caña por la generación de compuestos fitotóxicos como los ácidos orgánicos volátiles.

La aplicación de VC aumenta el riesgo de salinización del suelo, principalmente del Fluvisol.

#### *4.3.2 Ensayo en macetas a cuatro meses*

##### Potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica

La aplicación de vinaza cruda ocasiona que el valor de pH aumente en ambos suelos, siendo mayor el aumento en el Acrisol (1.25) que en el Fluvisol (0.5) (Figura 4.3-2).

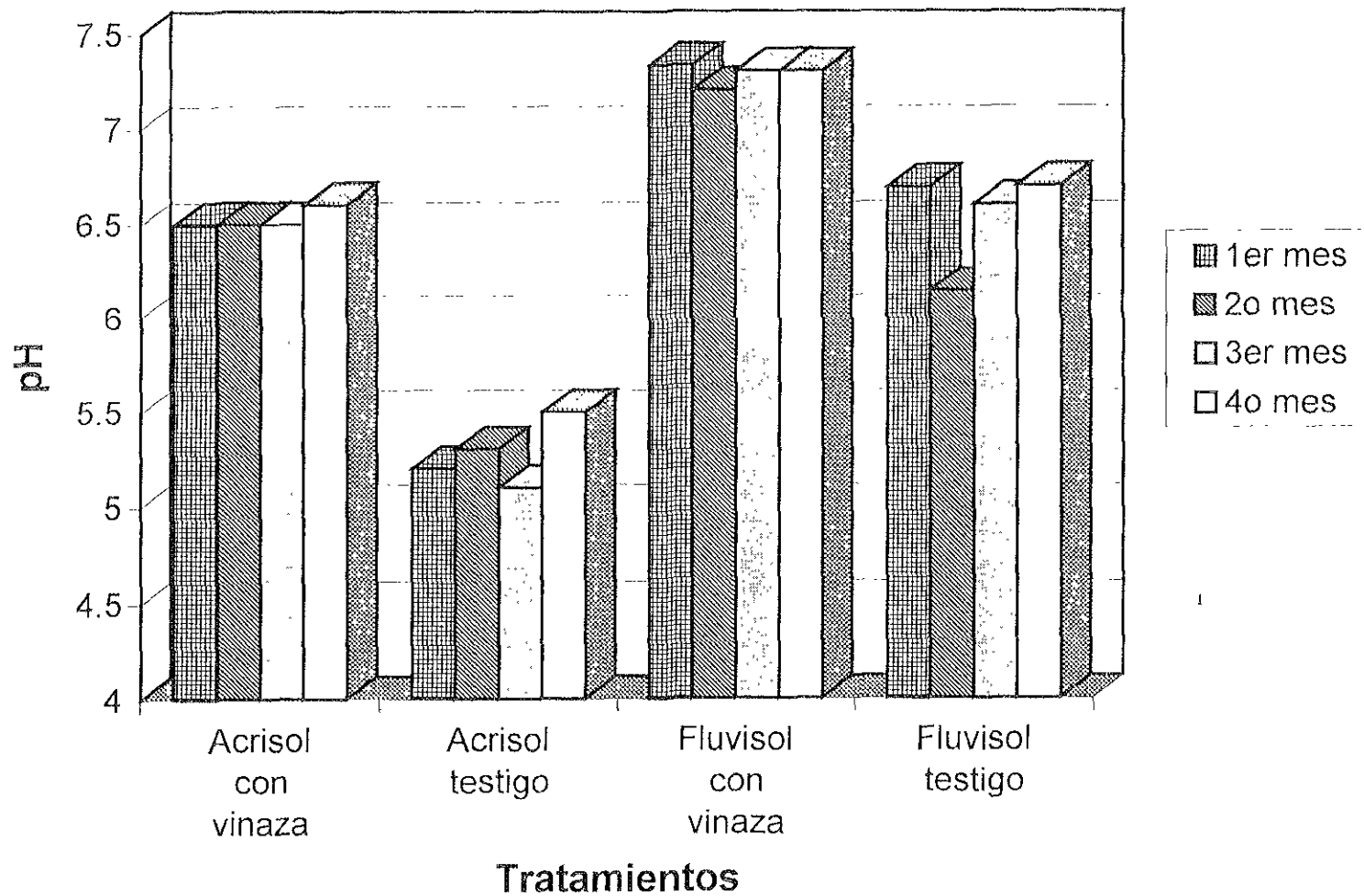
Existen diferencias significativas entre tratamientos, pero no entre meses. Se observa que el pH del suelo no disminuye con el tiempo lo que hace suponer que no será un efecto temporal.

El aumento de pH en ambos suelos puede considerarse como benéfico en el Fluvisol y como muy benéfico en el Acrisol, debido a la relación de esta variable con los elementos nutritivos para las plantas.

Ambos suelos se salinizaron por la aplicación de la vinaza cruda, alcanzando niveles de conductividad eléctrica de entre 3 y 4 dS m<sup>-1</sup> (Figura 4.3-3). Sin embargo, considerando el valor de la conductividad eléctrica de la vinaza cruda (27 dS m<sup>-1</sup>), el aumento no es muy grande ya que se esperaba que fuera mayor.

La conductividad eléctrica aumentó hasta niveles posiblemente peligrosos para la caña de azúcar (Aguirre, 1993), por efecto de la aplicación de vinaza cruda, en ambos suelos





**Figura 4.3-2. Cambios en los valores de pH del suelo por la aplicación de vinazas crudas**

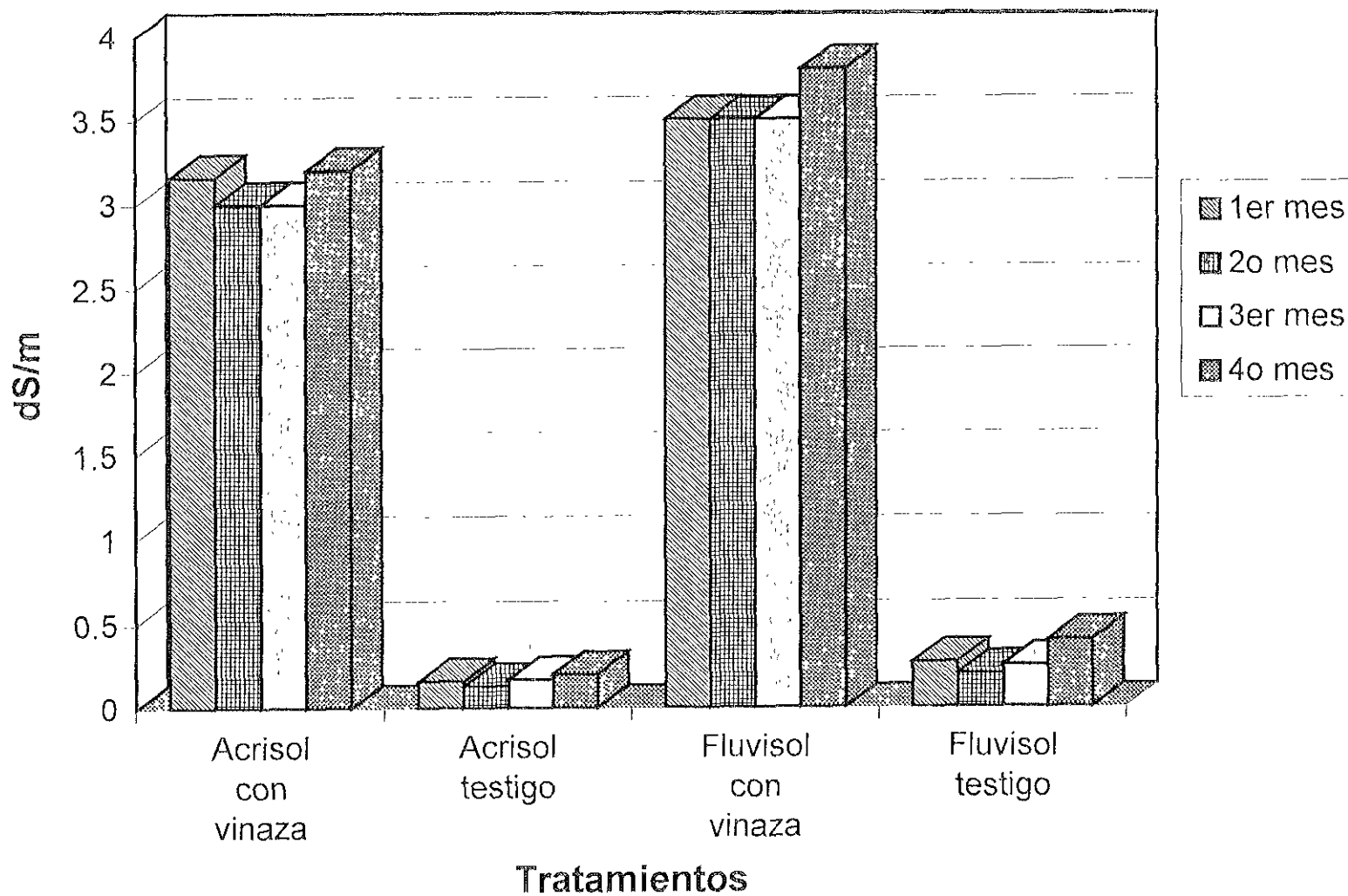


Figura 4.3-3. Cambios en la conductividad eléctrica del suelo por la aplicación de vinaza cruda

Las vinazas son consideradas, en teoría por su valor de conductividad eléctrica como de alta peligrosidad de salinización. Sin embargo, en la práctica es posible que con dosis menores de 200 mL de vinaza por kilogramo de suelo no se tengan problemas de salinización.

### Materia orgánica

Los contenidos de carbono orgánico cambian muy poco en función del tiempo en todos los tratamientos, lo cual hace suponer que la mayor descomposición de las vinazas se realiza durante el primer mes.

La dinámica de la mineralización del carbono orgánico, en el Acrisol con vinaza, se ajusta al modelo de descomposición lineal, descrito matemáticamente de la siguiente forma:

$$y = -0.155x + 14.7 \quad (r= 0.89) \text{ Acrisol con vinaza cruda}$$

ligeramente mayor a Acrisol testigo

$$y = -0.112x + 10.85 \quad (r= 0.79) \text{ Acrisol testigo}$$

En el Fluvisoll testigo, se tiene

$$y = -0.102x + 24 \quad (r= 0.99) \text{ Fluvisoll testigo}$$

En Fluvisol con vinaza, se tiene

$$y = -0.120x + 256.68 \quad (r= 0.70) \text{ Fluvisol con vinaza}$$

cruda

En ambos suelos se presenta una mayor tasa de mineralización en los tratamientos que recibieron la aplicación de vinaza cruda, debido a la estimulación de los microorganismos del suelo ya que la vinaza cruda contienen compuestos de carbono solubles de fácil biodegradación. Comparando entre suelos, el Acrisol es el suelo que mejor actúa en la mineralización del carbono orgánico, presentando una  $k = -0.155 \text{ g de C kg}^{-1}$  de suelo por mes, mayor que el Fluvisol que es de  $k = -0.120 \text{ g de C kg}^{-1}$  de suelo por mes.

En el Fluvisol con vinaza el incremento de nitrógeno total (0.4%) se mantiene a lo largo de los cuatro meses. En el Fluvisol testigo no se presentaron cambios a lo largo del tiempo.

Cuadro 4.3-2. Contenidos de carbono orgánico y nitrógeno total en los suelos tratados con vinaza cruda a lo largo del tiempo

	C (%)				N (%)				C/N			
	Meses				Meses				Meses			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AT	1.00 <sup>a</sup>	1.06 <sup>a</sup>	0.94 <sup>a</sup>	0.89 <sup>b</sup>	0.12 <sup>a</sup>	0.12 <sup>a</sup>	0.11 <sup>a</sup>	0.13 <sup>a</sup>	8.33	8.83	8.5	6.8
AV	1.37 <sup>a</sup>	1.4 <sup>a</sup>	1.29 <sup>b</sup>	1.2 <sup>b</sup>	0.18 <sup>a</sup>	0.17 <sup>a</sup>	0.13 <sup>b</sup>	0.13 <sup>b</sup>	7.6	8.23	9.9	9.2
FT	2.37 <sup>a</sup>	2.33 <sup>a</sup>	2.28 <sup>ab</sup>	2.25 <sup>b</sup>	0.16 <sup>a</sup>	0.16 <sup>a</sup>	0.16 <sup>a</sup>	0.17 <sup>a</sup>	14.8	14.6	14.2	13.2
FV	2.57 <sup>a</sup>	2.60 <sup>a</sup>	2.48 <sup>b</sup>	2.47 <sup>b</sup>	0.20 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>	0.19 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>	12.8	13.0	13.0	12.3

Las letras diferentes, en sentido horizontal, indican diferencias significativas a lo largo del tiempo entre las variables como C= carbono, N= nitrógeno y relación

El contenido de nitrógeno no cambia con el tiempo en el Acrisol testigo, pero en el Acrisol con vinaza se observan cambios en los dos últimos meses, presentando la siguiente relación (Cuadro 4.3-2):

$$y = -0.019 + 0.2 (r= 0.93)$$

En el tratamiento de Fluvisol testigo, no cambia el porcentaje de N con el tiempo pero es menor que con el Fluvisol con vinaza que tampoco cambia con el tiempo.

La relación C/N disminuye con el tiempo en el Acrisol testigo, pero en el Acrisol con vinaza aumenta. Este fenómeno, en el Acrisol con vinaza, se encuentra relacionado con la mayor mineralización de los compuestos nitrogenados en comparación con los de carbono, ocasionado por la estimulación de la actividad microbiológica por adición de vinaza cruda.

En el Fluvisol, tanto en el control como en el tratado con vinaza cruda, la relación C/N mantiene la tendencia a la disminución. Este hecho no ocurre en el Acrisol y posiblemente se debe a la protección química de los compuestos nitrogenados en las arcillas del Fluvisol que contienen mayor CIC que el Acrisol (Tate, 1992; Lavel *et al.*, 1993; Doménech, 1995).

El efecto de la adición de la materia orgánica contenida en las vinazas, no es de corto plazo, se observa que el aumento del valor de pH se mantienen a lo largo del tiempo.

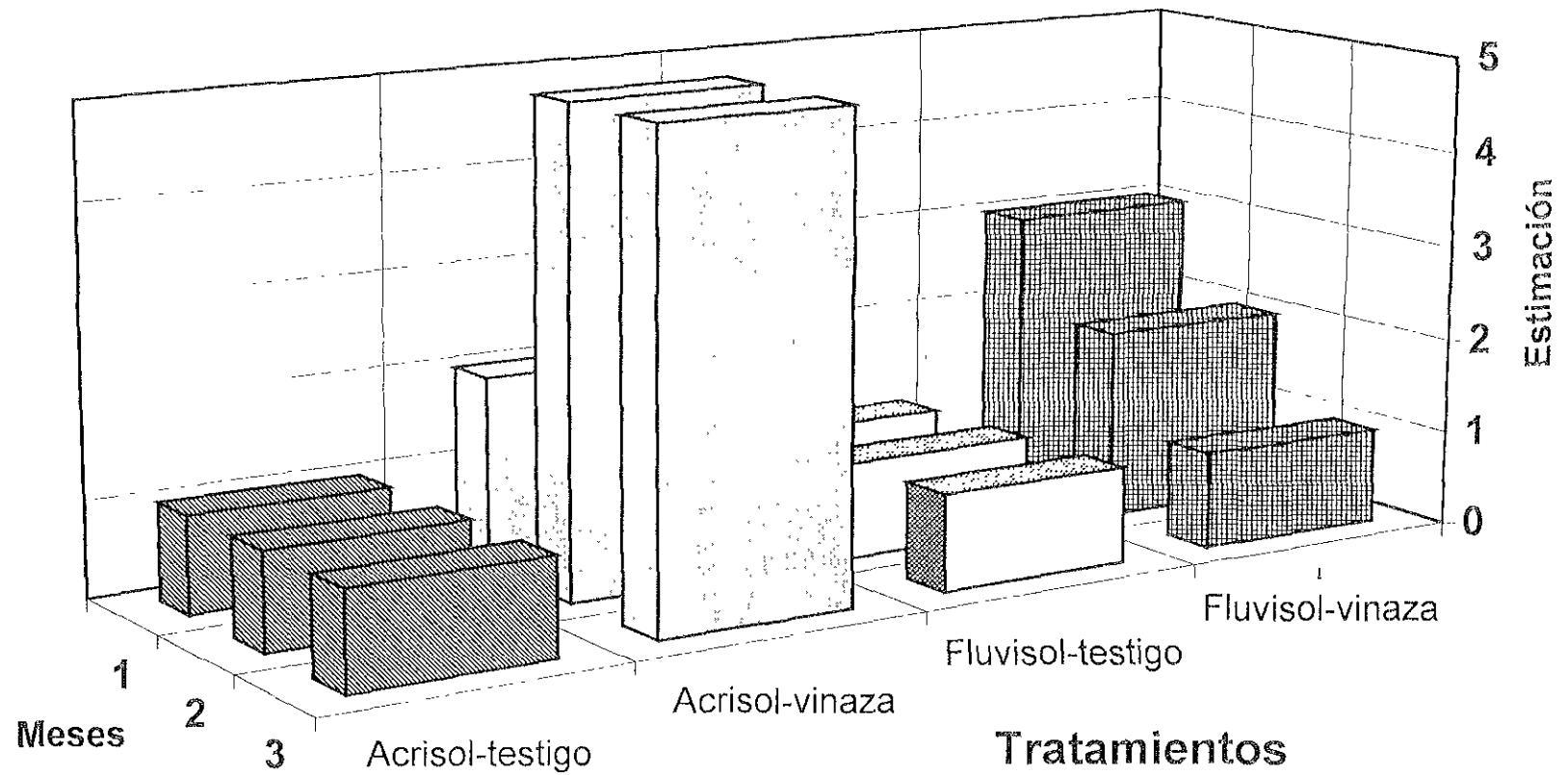
#### Propiedades microbiológicas

Las estimaciones sobre el grupo y cantidad de microorganismos sirven, de manera general, para aportar datos sobre la actividad microbiana. En este caso, la mayor actividad biológica se encuentra en los suelos tratados con VC, en comparación con los testigos de ambos suelos. Las diferencias más grandes se encuentran en las poblaciones de protozoarios, tanto ciliados como flagelados.

Tanto en el Acrisol como en el Fluvisol, al mes de la aplicación de las VC, ya presentaron flagelados y ciliados, lo cual es un indicio de un mejor ambiente para estos organismos debido a la disminución de la materia orgánica disuelta.

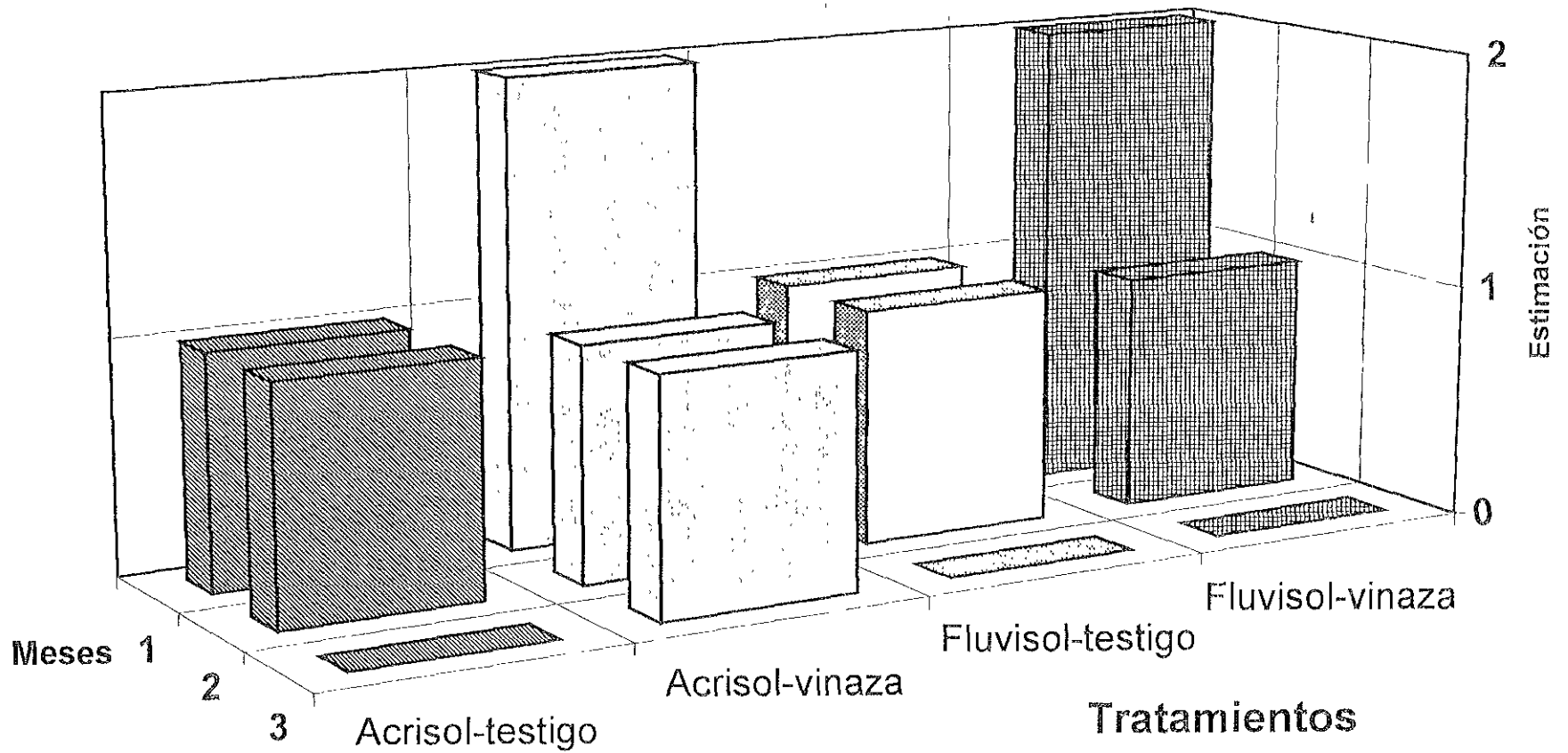
Es bien sabido que la diversidad y abundancia de las poblaciones de protozoarios son un claro indicio de las cantidades de materia orgánica en disolución, siendo menos diversa y abundante la comunidad de microorganismos en condiciones eutróficas por la materia orgánica soluble, donde las bacterias pueden desarrollarse casi de manera exclusiva.

En el primer mes se alcanza la mayor población de ciliados en el Fluvisol y en el Acrisol al segundo mes. De manera general, para los tres meses se observa un mayor número de microorganismos en el Acrisol en comparación con el Fluvisol, de lo cual se deduce una mayor actividad microbiológica en el Acrisol.



0=ausencia, 1=escasa, 2=regular, 3= mediana, 4= abundante, 5= muy abundante

**Figura 4.3-4. Estimacion cualitativa de flagelados en los suelos tratados con vinaza cruda**



0=ausencia, 1=escasa, 2=regular, 3= mediana, 4= abundante, 5= muy abundante

**Figura 4.3-5. Estimacion cualitativa de los ciliados en los suelos tratados con vinaza cruda**

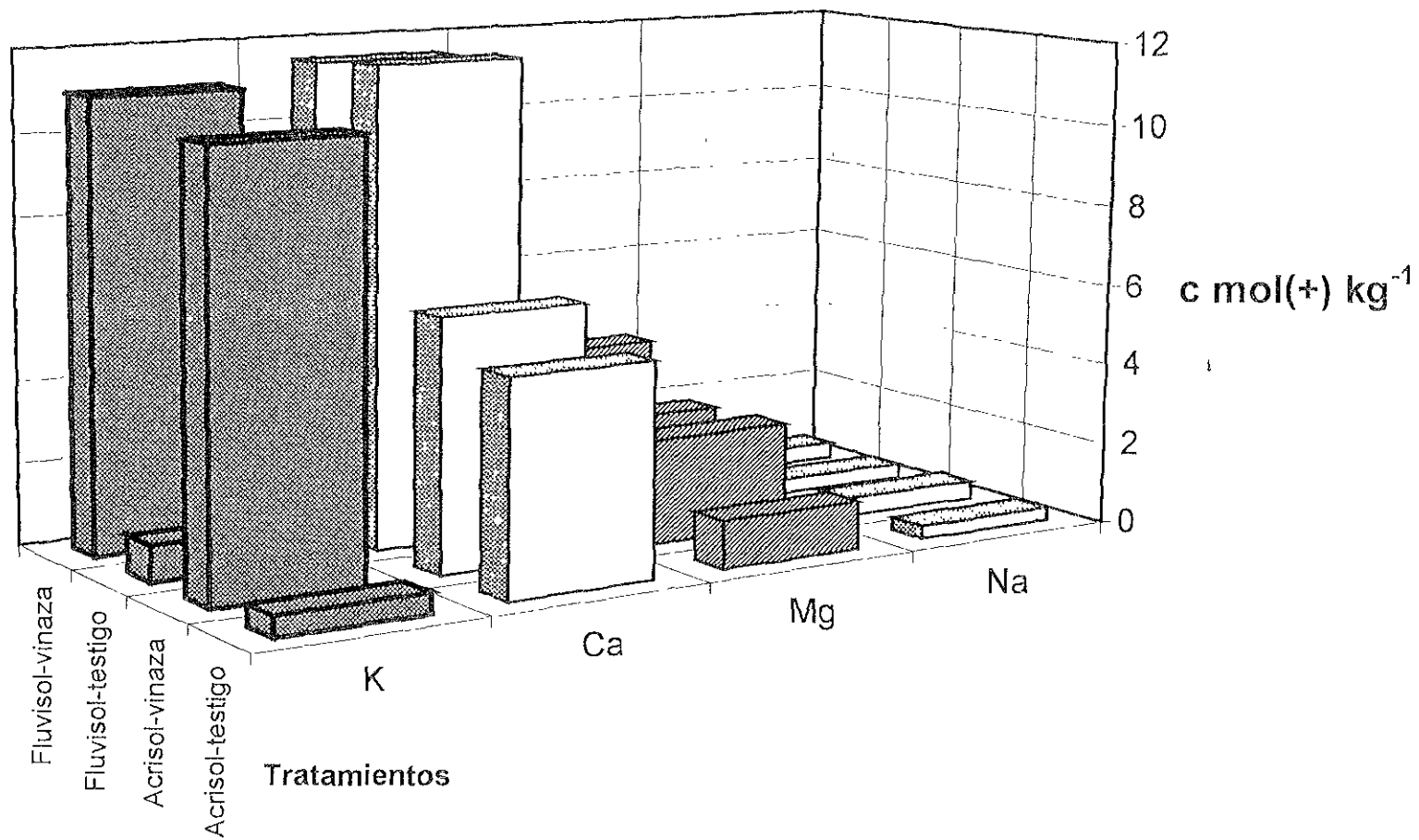


Figura 4.3-6. Cationes intercambiables en los suelos tratados con vinazas crudas

Las poblaciones de los flagelados son semejantes entre testigos (AT y FT). Los suelos que recibieron VC muestran tendencias muy diferentes; observándose una disminución de las poblaciones de flagelados a lo largo del tiempo en el FV. Por el contrario, en AV el incremento en el primer mes es menor en comparación con el FV, pero para el segundo mes las poblaciones aumentan de manera considerable, probablemente debido a que se encuentran aclimatadas (Figura 4.3-5).

Las poblaciones de ciliados disminuyen con el tiempo en todos los tratamientos. Los suelos que recibieron VC presentan los máximos valores de ciliados en el primer mes, lo cual es un indicio de la disminución de la materia orgánica disuelta en el suelo. Lo anterior se infiere a partir de que al ser los ciliados bacterívoros, requieren de la existencia previa de bacterias, las cuales a su vez proliferaron a partir de la degradación de la materia orgánica (Figura 4.3-6).

En el FV, las poblaciones de flagelados y ciliados disminuyen con el tiempo. En el FT no hay cambios en el tiempo de las poblaciones de bacterias y flagelados. Las poblaciones de ciliados disminuyen en el tercer mes, probablemente debido a la disminución de bacterias y de agotamiento del sustrato.

En el AV los ciliados disminuyen con el tiempo; sin embargo, las poblaciones de flagelados aumentan en el segundo y tercer mes. Es posible que este hecho esté relacionado con la disminución de los contenidos de nitrógeno orgánico en el tercer mes y con los cambios en la relación C/N.

#### Cationes intercambiables

A un mes de la aplicación de la vinaza a los suelos, la concentración de potasio aumenta considerablemente, como producto de la adición de este elemento durante la elaboración de alcohol etílico. No se notan diferencias entre el Acrisol y el Fluvisol.

Se nota un ligero aumento en la concentración de calcio en el Acrisol tratado con vinaza. En el Fluvisol no se observan diferencias por el tratamiento con vinaza. La concentración de Mg intercambiable aumenta a un mes de la aplicación de la vinaza en ambos suelos, como consecuencia de los contenidos de Mg en la vinaza; sin embargo, los contenidos de Mg antes del tratamiento se encuentran en niveles muy altos probablemente asociados a los minerales. Esto explicaría los altos contenidos de este elemento en la vinaza (Figura 4.3-6).

Con respecto al sodio, no se encontraron diferencias significativas en ambos suelos. Tanto los aumentos de potasio como los de magnesio son benéficos para el suelo y para la caña de azúcar, debido a que son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas.



#### 4.4 Experimentos en macetas para observar los cambios químicos en el suelo<sup>8</sup>

##### 4.4.1 Potencial de hidrógeno

###### Acrisol

Los tres tipos de vinaza ocasionan aumento del valor de pH en el Acrisol (Cuadro 4.4.1-1).

En el Acrisol tratado con vinaza cruda, el pH aumenta considerablemente (1.8 unidades de pH) con respecto al testigo desde la primera semana y muestra una tendencia de incremento constante durante el período de estudio.

$$y = -0.26x + 5.4 \quad \text{AVC} \quad (r^2 = 0.95 \quad p = 0.025)$$

En el Acrisol tratado con las vinazas anaerobias, en un principio el valor del pH aumenta 0.67 unidades (Cuadro 4.4.1-1) y con el paso del tiempo disminuye hasta muy cerca del valor inicial (con una diferencia de 0.3 unidades), con lo cual se observa que el cambio del valor del pH es temporal (Figura 4.4-1), posiblemente por la descomposición de la materia orgánica adicionada.

La dinámica del valor de pH se describe con el siguiente modelo:

$$y = -0.16x + 5.73 \quad \text{AVA} \quad (r^2 = 0.93 \quad p = 0.036)$$

En el Acrisol, el valor de pH aumenta con el tiempo por la aplicación de las vinazas anaerobias-aerobias, presentando una tendencia exponencial (Figura 4.4-1), llegando a incrementos arriba de 2.41 unidades de pH cuando se le compara con el testigo (Cuadro 4.4.1-1). La ecuación que describe la cinética del potencial de hidrógeno es la siguiente:

$$y = 4.96e^{0.085x} \quad \text{AVAA} \quad (r^2 = 0.87 \quad p = 0.70)$$

Cuadro 4.4 1-1. Valor de pH del Acrisol tratado con vinazas

semanas	AT X ± s	AVC X ± s	AVA X ± s	AVAA X ± s
1	4.86 ± 0.04 a	5.74 ± 0.06 c	5.53 ± 0.02 b	5.62 ± 0.06 b
2	4.84 ± 0.05 a	6 ± 0.07 c	5.5 ± 0.07 b	5.61 ± 0.08 b
3	4.71 ± 0.11 a	6.13 ± 0.11 c	5.24 ± 0.05 b	6.23 ± 0.07 c
4	4.8 ± 0 a	6.57 ± 0.5 c	5.1 ± 0 b	7.21 ± 0.14 c
r <sup>2</sup> (p)	0.36 (0.40) NS	0.95 (0.025)	0.93 (0.036)	0.85 (0.076) NS

AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia; AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey. r<sup>2</sup>= índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha = 0.05$ . NS= no significativo

<sup>8</sup> Parte de esta información ha sido sometida para su revisión y posterior publicación. La cita del artículo sería: Bautista-Zúñiga F., Durán-de-Bazúa C. y Lozano R. 1998. Cambios químicos en el suelo por la aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.

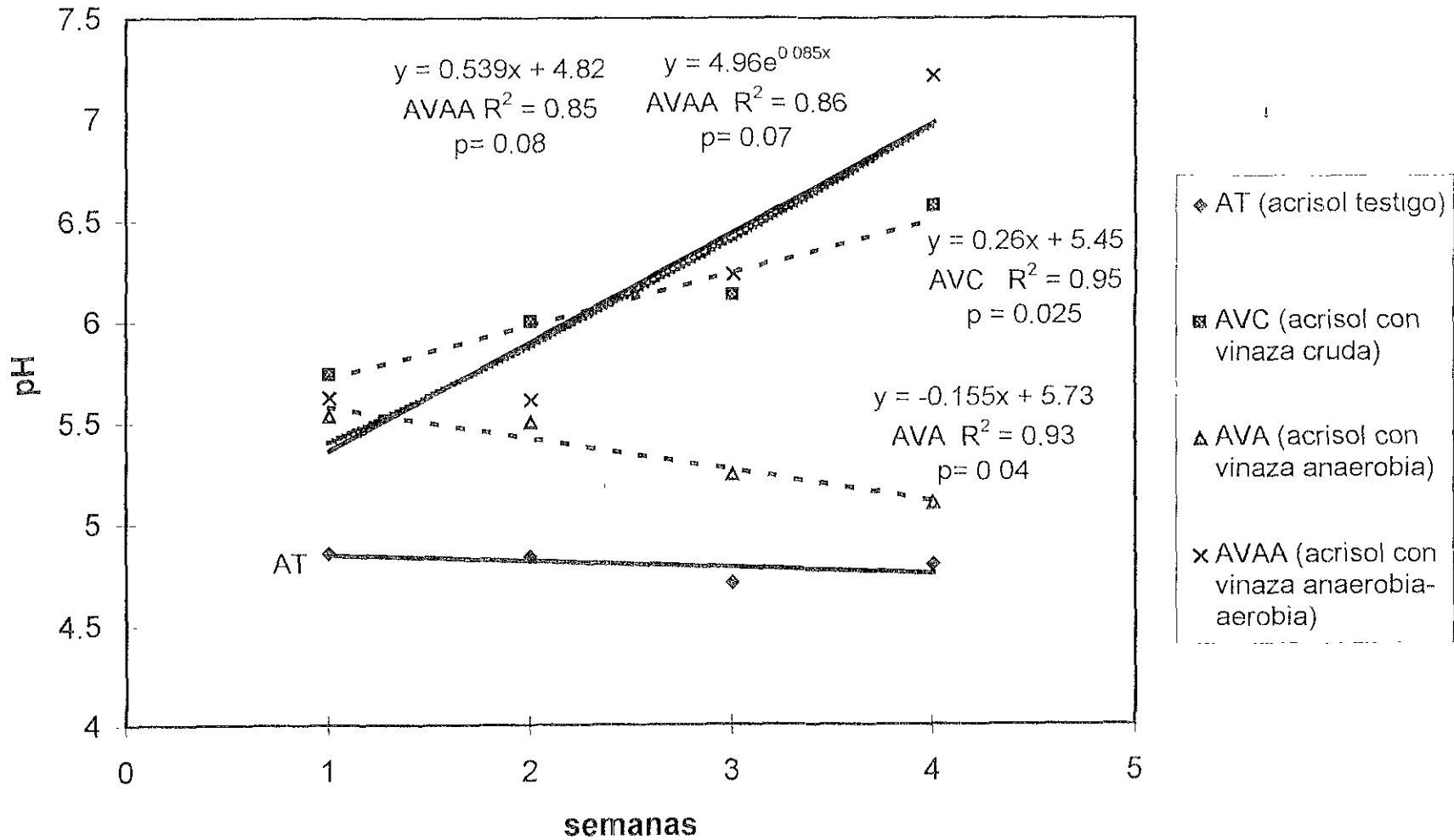


Figura 4.4-1. Cambios de los valores de pH en suelos de la unidad Acrisol por la aplicación de vinazas

Los datos del tratamiento con vinaza anaerobia-aerobia ajustados al modelo lineal, puede describirse con la siguiente ecuación:

$$y = 0.54x + 4.82 \text{ AVAA } (r^2=0.85, \quad p= 0.076)$$

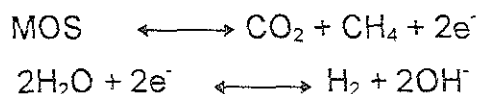
En un inicio (primera semana) los tres tipos de vinaza se encuentran con valores de pH más altos que el testigo (Figura 4.4-1); sin embargo, con el paso del tiempo solamente el tratamiento con vinaza anaerobia tiende a regresar a las condiciones iniciales de pH.

Los tratamientos con vinaza cruda y vinaza anaerobia-aerobia hacen suponer que el cambio en el valor de pH no será de corto tiempo debido a que en los ensayos previos los cambios en el pH duraron más de los cuatro meses (Figura 4.4-1).

La explicación al aumento del pH en el Acrisol por la aplicación de las vinazas crudas y tratadas de manera biológica se encuentra en los siguientes puntos:

- 1) Teóricamente se sabe que la oxidación de la materia orgánica, en condiciones reductoras y debido a la actividad microbiana, forma bióxido de carbono, metano y un aumento de iones  $\text{OH}^-$  (Bohn *et al.*, 1993 Domenéch, 1995).

Por ello, es posible que la reacción de óxido-reducción que se presenta cuando el agua es el aceptor de electrones, sea la siguiente (Doménech, 1995):



donde: MOS= materia orgánica soluble

En campo pueden llegar a presentarse las condiciones reductoras por el uso de la vinaza y por la compactación de los suelos.

- 2) Es posible que la complejación de las fuentes de acidez del suelo (oxo-hidróxidos de hierro y aluminio "activos" y en las superficies de los coloides minerales) por la materia orgánica (Stum, 1986; Mc Bride, 1989; Hayes y Bolt, 1991) contenida en las vinazas crudas ocasione el aumento del pH desde la primera semana, tal como sucede con la adsorción de oxalato y la liberación de  $\text{OH}^-$  (Bhatti *et al.*, 1998).
- 3) En el caso de las vinazas tratadas que poseen un valor de pH alcalino, el cambio del valor de pH en el Acrisol es posible que también se deba a los cambios químicos (precipitación) de los óxidos de Fe y Al "activos" ya que sus especies químicas son dependientes del pH (Oades, 1989).

### Fluvisol

En el Fluvisol, los tratamientos con vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias elevan el valor de pH 0.5 unidades desde la primera semana; pero, con el paso del tiempo, el valor de pH del suelo se reduce hasta llegar a sus niveles originales (Cuadro 4.4.1-2).

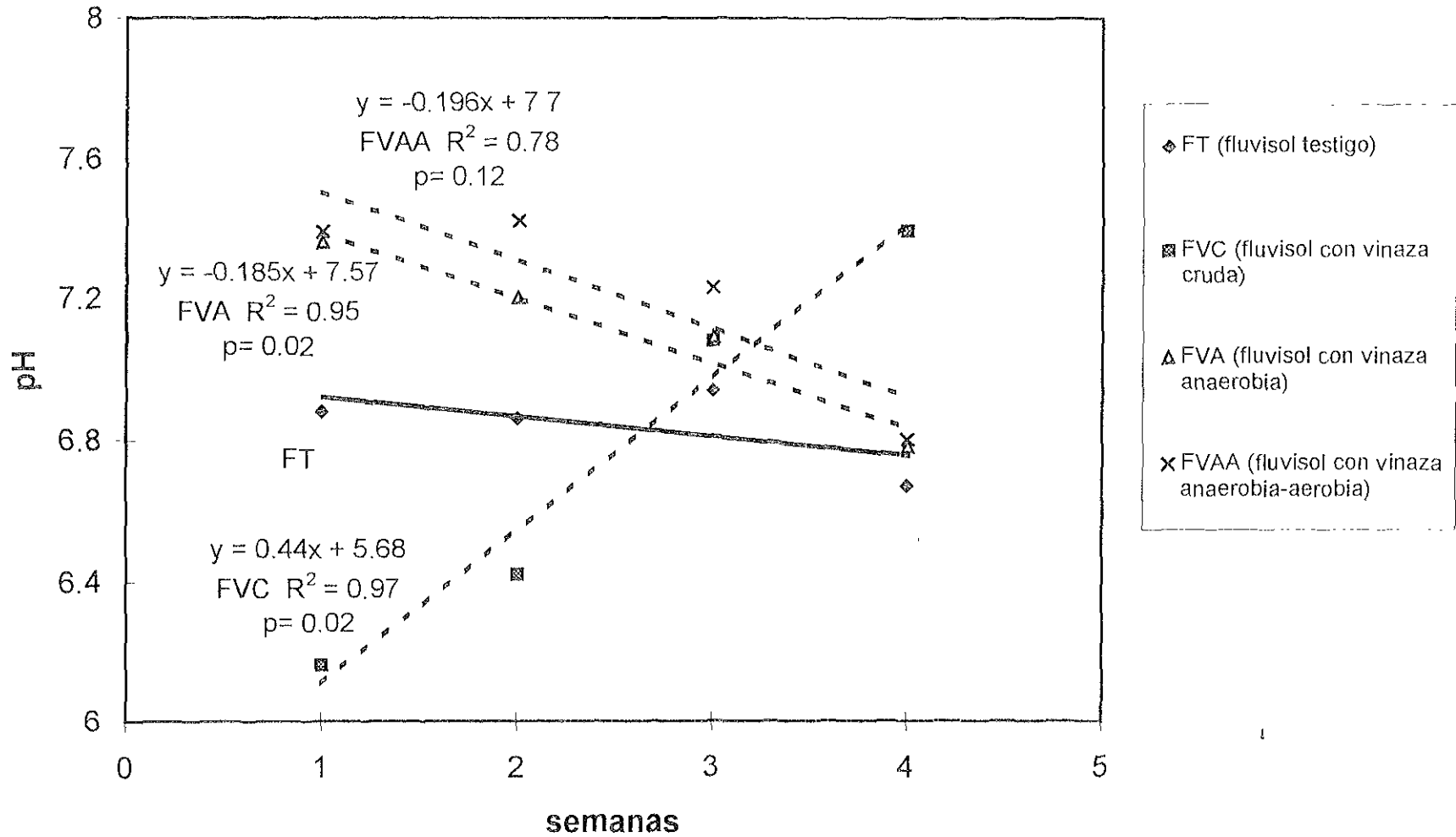


Figura 4.4-2. Cambios en los valores de pH en suelos de la unidad Fluvisol por la aplicación de vinazas

Cuadro 4.4.1-2. Valor de pH del Fluvisol tratado con vinazas

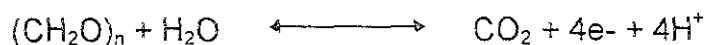
semanas	FT	FVC	FVA	FVAA
	X ± s	X ± s	X ± s	X ± s
1	6.88 ± 0.07 b	6.16 ± 0.04 a	7.36 ± 0.04 c	7.39 ± 0.09 c
2	6.86 ± 0.04 b	6.42 ± 0.04 a	7.2 ± 0.1 c	7.42 ± 0.08 d
3	6.94 ± 0.05 a	7.08 ± 0.12 a	7.09 ± 0.13 a	7.23 ± 0.05 a
4	6.67 ± 0.05 a	7.39 ± 0.12 c	6.78 ± 0.04 b	6.8 ± 0 b
r <sup>2</sup> (p)	0.37 (0.39) NS	0.97 (0.02)	0.95 (0.02)	0.78 (0.12) (NS)

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha = 0.05$ . NS= no significativo

$$y = -0.20x + 7.7 \quad \text{FVAA} \quad (r^2 = 0.78 \quad p = 0.115)$$

$$y = -0.18x + 7.57 \quad \text{FVA} \quad (r^2 = 0.95 \quad p = 0.025)$$

El aumento del valor de pH durante la primera semana puede deberse a las razones arriba mencionadas. Posteriormente, las reacciones de acidificación que se presentan, por la descomposición de la materia orgánica en los tratamientos FVA y FVAA, son, posiblemente de acuerdo con Bohn y colaboradores (1993), producto de la oxidación de los compuestos orgánicos en condiciones aerobias, del tipo:



El Fluvisol tratado con vinaza cruda (FVC) presentó una disminución de 0.7 unidades de pH en las primeras dos semanas, como consecuencia de la acidez de la vinaza cruda. En la tercera y cuarta semanas el valor de pH del FVC aumentó, rebasando los valores del control.

El valor de pH en el Fluvisol tratado con vinaza cruda, se ajusta al modelo de orden cero, y al parecer, después de cuatro semanas aún no ha llegado al equilibrio (Figura 4.4-2). La ecuación que describe la cinética del valor de pH es:

$$y = 0.44x + 5.68 \quad \text{FVC} \quad (r^2 = 0.97 \quad p = 0.015)$$

Es importante resaltar que el valor de pH del Fluvisol, en los tratamientos con vinaza anaerobia y con vinaza anaerobia-aerobia, tiende al equilibrio, es decir, a llegar al valor de pH de suelo testigo. El caso contrario es el tratamiento con vinaza cruda ya que en este suelo, el valor de pH va en aumento aún después de la tercera y cuarta semana de incubación.

#### 4.4.2 Conductividad eléctrica

La aplicación de vinazas crudas aumentó más de cinco veces el valor de la CE (de 302 a 1763  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) del Acrisol. Esta característica del suelo disminuye un poco de 1763 a 1384  $\mu\text{S cm}^{-1}$  con el paso del tiempo, en el Acrisol tratado con vinaza cruda; sin embargo, después de las cuatro semanas de duración del experimento, la CE del suelo se encuentra muy lejos del valor inicial (Cuadro 4.4.2-1).

Cuadro 4.4.2-1. Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) en el Acrisol tratado con vinazas

semanas	AT	AVC	AVA	AVAA
	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$
1	$302 \pm 9.61$ a	$1763 \pm 76$ c	$493 \pm 14$ b	$471 \pm 23$ b
2	$321 \pm 29.21$ a	$1395 \pm 132$ c	$416 \pm 34$ b	$487 \pm 57$ b
3	$315 \pm 40.65$ a	$1392 \pm 101$ c	$425 \pm 22$ b	$417 \pm 20$ b
4	$348 \pm 45$ a	$1384 \pm 88$ c	$492 \pm 20$ b	$488 \pm 51$ b
$r^2$	NS	NS	NS	NS

AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia; AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha= 0.05$ . NS= no significativo

En el Fluvisol, la conductividad eléctrica presenta un mayor aumento que en el Acrisol, llegando a niveles de casi nueve veces mayores al valor inicial, de 345 a  $3048 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Cuadro 4.4.2-2). Estos niveles de conductividad eléctrica son muy cercanos a los  $4000 \mu\text{S cm}^{-1}$  que son tomados como valor índice, arriba por el cual el suelo es calificado como salino (Richards, 1985, Aguirre, 1993). Pizarro (1978) reporta que valores de conductividad eléctrica de  $3000 \mu\text{S cm}^{-1}$  reducen en alrededor del 10% la producción en la caña de azúcar.

De acuerdo con los resultados de la conductividad eléctrica, el Acrisol puede soportar mayores dosis de vinaza cruda y con más frecuencia que el Fluvisol (Cuadro 4.4.2-1 y 4.4.2-1).

En ambos suelos, las vinazas tratadas (VA y VAA) prácticamente no tienen efecto en esta característica del suelo, por lo que no ocasionan problemas de salinidad con la dosis utilizada en este experimento.

Las VC, VA y VAA presentan altos valores de conductividad eléctrica, que son 29.3 19.5 y 19.1  $\text{mS cm}^{-1}$  (Cuadro 4.2-2), respectivamente. Son consideradas como de alto riesgo de salinización; sin embargo, al interactuar con el suelo no se obtienen valores altos.

Cuadro 4.4.2-2. Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) en el Fluvisol tratado con vinazas

semanas	FT	FVC	FVA	FVAA
	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$
1	$345 \pm 28$ a	$3048 \pm 577$ c	$462 \pm 17$ b	$445 \pm 3$ b
2	$292 \pm 18$ a	$3196 \pm 264$ c	$391 \pm 13$ b	$411 \pm 17$ b
3	$266 \pm 33$ a	$2302 \pm 565$ c	$428 \pm 29$ b	$446 \pm 41$ b
4	$329 \pm 37$ a	$1649 \pm 299$ c	$486 \pm 29$ b	$461 \pm 33$ b
$r^2$	NS	NS	NS	NS

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha= 0.05$ . NS= no significativo

Cuadro 4.4.3-1. Porcentaje de carbono orgánico total en Acrisol tratado con vinaza

semanas	AT	AVC	AVA	AVAA
	X ± s	X ± s	X ± s	X ± s
1	2.91 ± 0.22 a	3.62 ± 0.24 b	2.96 ± 0.15 a	2.89 ± 0.07 a
2	2.9 ± 0.29 a	3.42 ± 0.08 b	2.92 ± 0.19 a	2.89 ± 0.11 a
3	2.87 ± 0.18 a	3.45 ± 0.15 b	2.88 ± 0.10 a	2.84 ± 0.17 a
4	2.89 ± 0.15 a	3.3 ± 0.08 b	2.86 ± 0.06 a	2.86 ± 0.11 a
r <sup>2</sup> (p)	0.46 (0.32) NS	0.83 (0.09) NS	0.98 (0.01)	0.54 (0.26) NS

AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia; AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha = 0.05$ . NS= no significativo

La materia orgánica disuelta<sup>9</sup>, también participa en la conductividad eléctrica de las vinazas, que al adsorberse en el suelo, pierde la capacidad para conducir la electricidad, por ello, el valor de la conductividad eléctrica del suelo no llega a valores mayores a 4 dS m<sup>-1</sup>, a pesar de los 19 dS m<sup>-1</sup> que presentan las vinazas.

Tal vez los valores de la conductividad eléctrica de las vinazas se encuentran en esos niveles debido a los iones H<sup>+</sup> de la vinaza cruda y OH<sup>-</sup> de las vinazas tratadas (VA y VAA) (Chang, 1987) y que su efecto se amortigüe en el suelo (Anexo 1).

#### 4.4.3. Carbono orgánico total

En el Acrisol, los tratamientos con vinaza cruda y vinaza anaerobia presentan una tasa de descomposición constante que puede ser descrita matemáticamente con las siguientes ecuaciones (Figura 4.4-3):

$$y = -0.093x + 3.68 \quad \text{AVC} \quad (r^2 = 0.83, \quad p = 0.09)$$

$$y = -0.034x + 2.99 \quad \text{AVA} \quad (r^2 = 0.98, \quad p = 0.01)$$

Cuadro 4.4.3-2. Porcentaje de carbono orgánico total en Fluvisol tratado con vinaza

semanas	FT	FVC	FVA	FVAA
	X ± s	X ± s	X ± s	X ± s
1	2.89 ± 0.13 a	3.57 ± 0.25 b	3.01 ± 0.16 a	3.11 ± 0.26 a
2	2.95 ± 0.13 a	3.6 ± 0.13 b	3.05	2.89 ± 0.13 a
3	2.95 ± 0.03 a	3.56 ± 0.04 b	2.95 ± 0.12 a	2.91 ± 0.09 a
4	2.94 ± 0.11 a	3.28 ± 0.17 b	2.95 ± 0.07 a	2.84 ± 0.06 a
r <sup>2</sup> (p)	0.45 (0.32) NS	0.62 (0.21) NS	0.54 (0.26) NS	0.74 (0.14) NS

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha = 0.05$ . NS= no significativo

<sup>9</sup> Se realizó un ensayo con azúcar y agua destilada a concentraciones de 0, 1, 2, 3, 4 y 5% para medir la CE y se observó una relación directamente proporcional (Anexo 2).

La tasa de descomposición en el Acrisol con vinaza cruda es 2.74 veces mayor a la del Acrisol tratado con vinaza anaerobia, posiblemente por el mayor contenido de sustancias orgánicas de bajo peso molecular en las vinazas crudas.

El porcentaje de carbono orgánico disminuye en el Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia conforme aumenta el tiempo de incubación, sin embargo, los datos no se ajustan al modelo de mineralización lineal a una  $\alpha = 0.05$  (Cuadro 4.4.3-1). Comparando entre tratamientos por semana, únicamente en el Acrisol tratado con vinaza cruda los valores de la primera semana son diferentes a los de la cuarta.

El Fluvisol con vinaza cruda es diferente a los tratamientos con vinaza anaerobia, anaerobia-aerobia y testigo, durante las cuatro semanas (Cuadro 4.4.3-2). En el tratamiento FVC se detecta una tendencia lineal de disminución del carbono con respecto al tiempo; sin embargo, la correlación no es significativa como se muestra en la figura 4.4.3-1 y en la siguiente ecuación:

$$y = -0.091x + 3.73 \quad \text{FVC} \quad (r^2 = 0.62 \quad p = 0.21)$$

Los datos del contenido de carbono orgánico total, del tratamiento con vinazas anaerobias-aerobias, ajustados al modelo de regresión lineal se describen con la siguiente ecuación:

$$y = -0.08x + 3.14 \quad \text{FVAA} \quad (r^2 = 0.74 \quad p = 0.14)$$

La tasa de descomposición del Fluvisol tratado con vinaza cruda de  $-0.09$  equivalente a una descomposición de  $0.9 \text{ g C kg}^{-1}$  de suelo por semana es mayor al tratamiento con vinazas anaerobias aerobias ( $0.8 \text{ g C kg}^{-1}$  de suelo por semana).

Los tratamientos con vinazas anaerobias muestran una tendencia a la disminución con el paso del tiempo, pero los valores no se ajustan al modelo lineal ni al exponencial; sin embargo la tendencia es clara, tal vez con un tiempo mayor de estudio pudieran ajustarse los datos al modelo lineal de mineralización.

El tratamiento testigo (con agua), tal como se esperaba, no muestran ninguna tendencia de cambio.

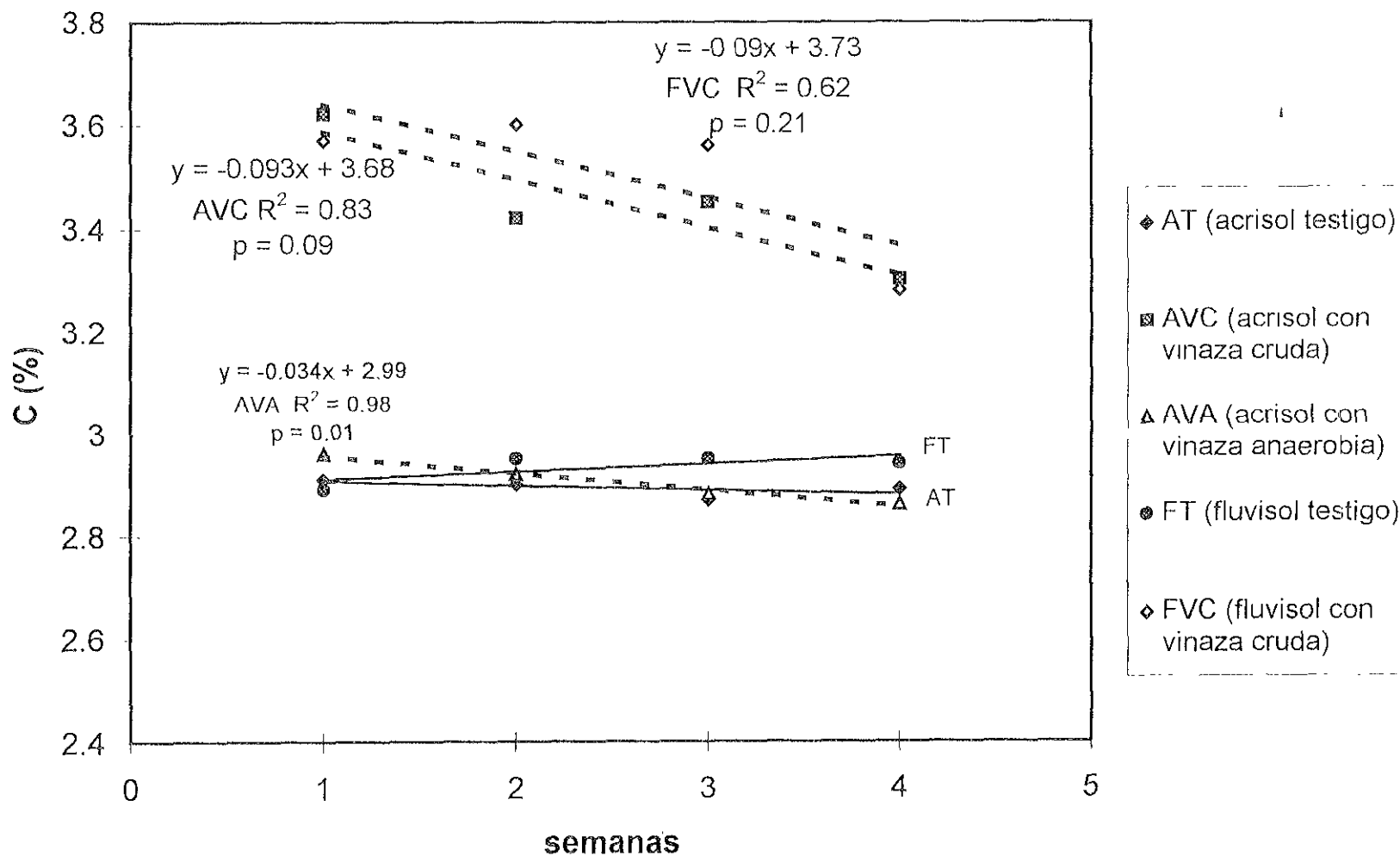
Comparando entre suelos, la diferencia entre la tasa de descomposición del Acrisol tratado con vinaza cruda y el Fluvisol del mismo tratamiento fue de  $k = 0.002$ , siendo el Acrisol el que se presenta una mayor mineralización de carbono. Si se compara la disminución del carbono entre la primera y cuarta semana, en el Acrisol tratado con vinaza cruda el valor es de  $0.32\%$  y en el Fluvisol con vinaza cruda es de  $0.29\%$ , equivalentes a  $3.2$  y  $2.9 \text{ g de C kg de suelo}^{-1}$  por mes, respectivamente.

#### 4.4.4 Carbono orgánico soluble

El comportamiento del carbono orgánico soluble en el Acrisol tratado con vinaza cruda muestra una dinámica de orden cero (tasa de descomposición constante), descrita por la siguiente ecuación:

$$y = -22.7x + 124.5 \quad \text{AVC} \quad (r^2 = 0.996 \quad p = 0.001)$$





**Figura 4.4-3. Tendencias de cambio del carbono orgánico total en suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol por la aplicación de vinazas**

Cuadro 4.4.4-1. Contenido de carbono orgánico extraíble con agua en el Acrisol tratado con vinazas ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

semanas	AT	AVC	AVA	AVAA
	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$
1	$22 \pm 9$ a	$101 \pm 3.5$ b	$52 \pm 7.8$ a	$26 \pm 6$ a
2	$46 \pm 15$ a	$82 \pm 10.6$ b	ND	ND
3	$33 \pm 8$ a	$60 \pm 10.6$ b	ND	ND
4	$35 \pm 9$ a	$35 \pm 15.6$ a	ND	ND
$r^2$ (p)	0.001 (0.97)	0.996 (0.002)		

AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia; AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia. ND= no detectado. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha= 0.05$

Después de cuatro semanas el suelo alcanza los niveles originales de carbono orgánico soluble, alrededor de los  $35 \text{ mg C kg}^{-1}$  de suelo (Cuadro 4.4.4-1). La cantidad de carbono orgánico extraíble con agua en los tratamientos con vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias disminuye hasta niveles no detectables con la técnica utilizada (extracción 1:2.5 de suelo:agua).

En el Fluvisol tratado con vinaza cruda, el carbono orgánico soluble presenta una cinética de orden cero, pero el modelo matemático que describe este fenómeno no es significativo a una  $\alpha= 0.05$ , la ecuación es la siguiente:

$$y = -6.4x + 157.5 \text{ FVC} \quad (r^2 = 0.69 \quad p = 0.17)$$

Después de cuatro semanas, el nivel de carbono orgánico del Fluvisol tratado con vinaza cruda sigue estando muy por arriba del testigo, por lo que se deduce que aún no llega al equilibrio y continuará descendiendo.

En el Fluvisol, los tratamientos con vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias presentan una cinética de primer orden en relación con la cantidad del carbono orgánico soluble, teniendo una tasa en el Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia  $k = -0.54$  y en el Fluvisol con vinaza anaerobia de  $k = -0.49$ .

Las ecuaciones son:

$$y = 97.2e^{-0.49x} \text{ FVA} \quad (r^2 = 0.63, \quad p = 0.41)$$

$$y = 172e^{-0.504x} \text{ FVAA} \quad (r^2 = 0.86, \quad p = 0.24)$$

El valor de la ordenada al origen, de los suelos tratados con vinaza cruda es de 124.5 en el Acrisol y 157.5 en el Fluvisol, permite dilucidar el potencial de retención (adsorción y absorción) de los compuestos orgánicos solubles contenidos en las vinazas; siendo menor el valor en el Acrisol que en el Fluvisol, como consecuencia de su mayor retención (Figura 4.4-4). En este sentido, estos datos y los valores de la conductividad eléctrica que presentan la misma tendencia apoyan la hipótesis de la mayor retención de compuestos orgánicos en el Acrisol en comparación con el Fluvisol. Bhatti y colaboradores (1998) han encontrado una relación lineal ( $r^2 = 0.99$ ) entre la cantidad de carbono orgánico soluble adsorbido en el suelo con el pH,

siendo menor el C adsorbido con el aumento del valor de pH. En este estudio se encontró que el suelo que presenta un valor de pH más bajo, como el Acrisol, es también el de mayor retención.

En cuanto a la disminución del carbono orgánico soluble, la tasa (k) es considerablemente mayor, cerca de 4 veces más en el Acrisol ( $k = -22 \text{ mg C kg}^{-1}$  de suelo por semana) que en el Fluvisol ( $k = -6.4 \text{ mg C kg}^{-1}$  de suelo por semana). La explicación a este hecho puede explicarse por los coloides minerales de los suelos. En el Fluvisol se tiene más halloysita que óxidos, lo cual puede llegar a ocasionar la inhibición de la acción de las enzimas extracelulares secretadas por los organismos desintegradores (hongos) como lo mencionan Swift y colaboradores (1979), Tate (1992) y Lavelle y colaboradores (1993).

También es conocido el efecto negativo de la salinidad en la actividad de las enzimas (Tate, 1992) y, como el Fluvisol es más salino que el Acrisol, es posible que este hecho contribuya a disminuir la tasa de mineralización de la materia orgánica.

En lo concerniente al Acrisol, se encuentran principalmente, coloides minerales del tipo de los oxohidroxos de hierro, aluminio y manganeso que no inhiben a las enzimas extracelulares. Por el contrario, los óxidos de Fe y el Mn catalizan la oxidación de la materia orgánica en condiciones de baja aireación (Mc Bride, 1989, Oades, 1989).

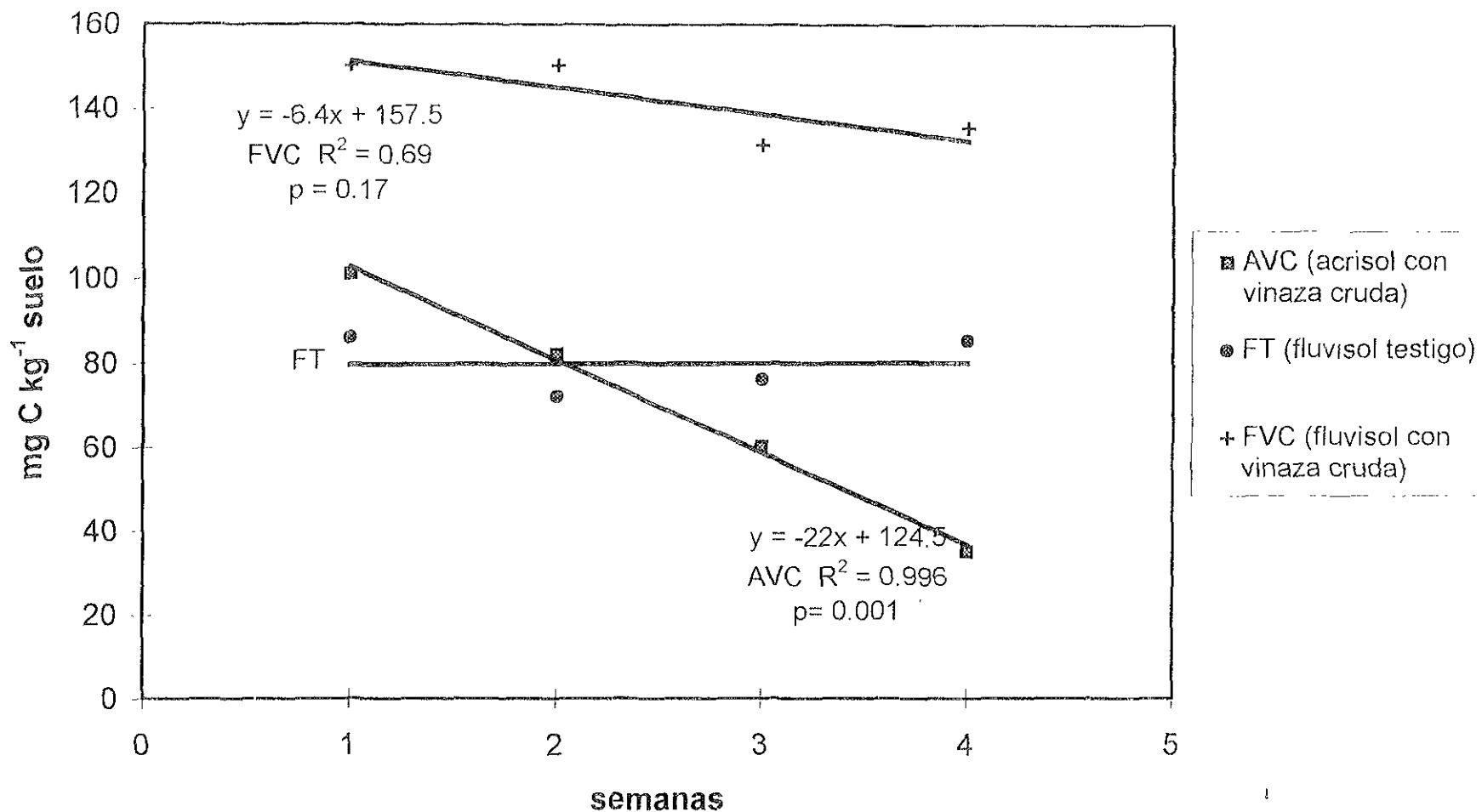
En ambos suelos, la cinética de la disminución del carbono orgánico soluble en los suelos tratados con vinazas es de orden cero, es decir, cuando el sustrato es mucho mayor que la  $k_m^{10}$ , lo cual haría suponer que este modelo de descomposición es independiente del crecimiento microbiano (Alexander y Scow, 1987; Paul y Clark, 1989; Lehninger *et al.*, 1993). Esto apoya la hipótesis de la participación de los minerales en la oxidación de la materia orgánica.

Cuadro 4.4.4-2. Contenido de carbono orgánico extraíble en agua en el Fluvisol tratado con vinazas ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

semanas	FT	FVC	FVA	FVAA
	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$	$X \pm s$
1	$86 \pm 26$	$150 \pm 24 \text{ b}$	$74 \pm 2.8 \text{ a}$	$113 \pm 0 \text{ a}$
2	$72 \pm 10$	$150 \pm 15.6 \text{ d}$	$24 \pm 2.8 \text{ a}$	$45 \pm 7.8 \text{ b}$
3	$76 \pm 9$	$131 \pm 3.5 \text{ c}$	$28 \pm 7.8 \text{ a}$	$38 \pm 11.3 \text{ a}$
4	$85 \pm 8$	$135 \pm 9.2 \text{ c}$	ND	ND
$r^2$ (p)	NS	0.69 (0.17)	NS	NS

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia. NS= no significativo. ND= no detectado. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según la prueba de Tukey.  $r^2$ = índice de regresión con un valor de p a una  $\alpha = 0.05$

<sup>10</sup> Constante de la cinética de reacción enzima-sustrato de Michaelis-Menten. Cantidad de sustrato en la cual se alcanza una velocidad de reacción media.



**Figura 4.4-4. Tendencias de cambio del carbono orgánico extraíble en agua de los suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol tratados con vinazas**

En cuanto a las cantidades de carbono orgánico soluble en ambos suelos testigos, en el Acrisol de 35 y en el Fluvisol de 85, lo cual es un indicio de la mayor retención natural del Acrisol. En un Typic Quartzipsamment y en un Lithic Rendol que son suelos jóvenes y someros respectivamente, Kaiser y Zech (1998) encontraron concentraciones medias de  $25 \pm 6.4$  mg de carbono orgánico soluble por kilogramo de suelo, cantidades ligeramente menores a las encontradas en el Acrisol (35 mg C kg<sup>-1</sup>) y 3.4 veces menos que el Fluvisol.

#### *4.4.5 Producción de CO<sub>2</sub>*

En el Acrisol, durante la segunda semana, el tratamiento con vinaza cruda presenta un aumento de CO<sub>2</sub> de 11.31 veces con respecto al control, por su parte, las vinazas tratadas aumentan la producción de CO<sub>2</sub> entre cuatro y cinco veces más que el testigo (Figura 4.4.5-1). En la cuarta semana se observa una reducción en la producción de CO<sub>2</sub> en los todos tratamientos del Acrisol, presentando el Acrisol con vinaza cruda el valor mayor (65.74 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> por día) que aún es 6.3 veces mayor al control. Los tratamientos con vinazas tratadas no muestran diferencias entre sí, pero aún generan el doble de CO<sub>2</sub> que el testigo.

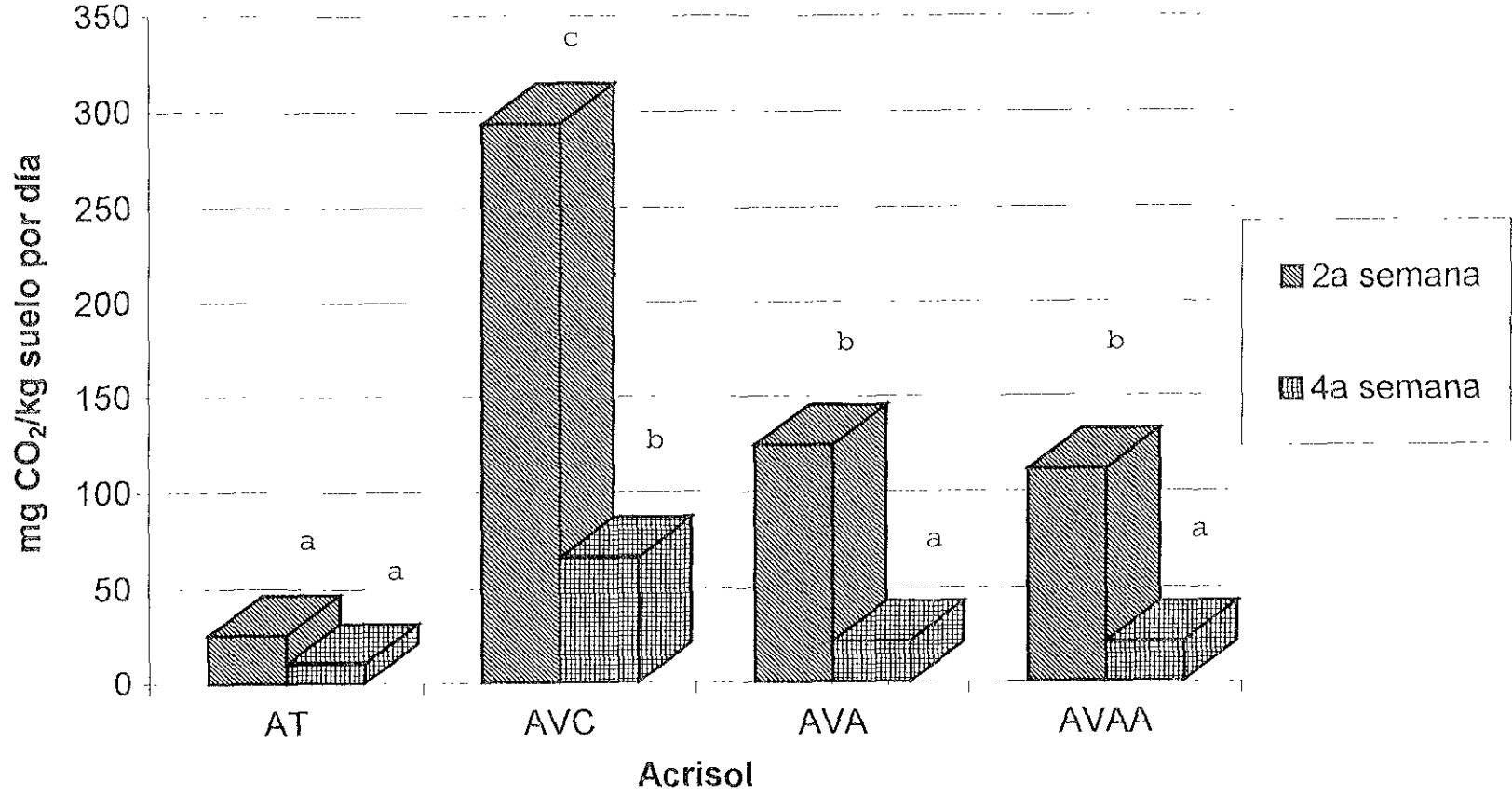
En la segunda semana, en el Fluvisol con vinaza cruda se presenta un aumento en la producción de CO<sub>2</sub> de 14.7 veces con respecto al control y de entre 6.5 y 7.3 con los tratamientos de VAA y VA respectivamente. El tratamiento con VA es mayor al tratamiento con VAA con 15.2 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> por día (Figura 4.4.5-1).

En la cuarta semana, al igual que el Acrisol, la producción de CO<sub>2</sub> disminuye en todos los tratamientos con respecto a la segunda semana. El tratamiento con vinaza cruda es cinco veces mayor al control. No hay diferencias entre los tratamientos con vinazas tratadas. En el tratamiento con vinaza anaerobia se obtuvo una producción de 17.37 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> por día, mayor al testigo. En el tratamiento con vinaza anaerobia-aerobia la diferencia con el testigo fue mayor de 14.23 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> por día, en comparación con el testigo.

Comparando entre suelos, se observa que en la segunda semana, en los tratamientos sin vinaza, no se obtuvieron diferencias significativas. En la cuarta semana, la producción del CO<sub>2</sub> del Acrisol testigo disminuye al 40%, disminución que no se obtienen en el Fluvisol.

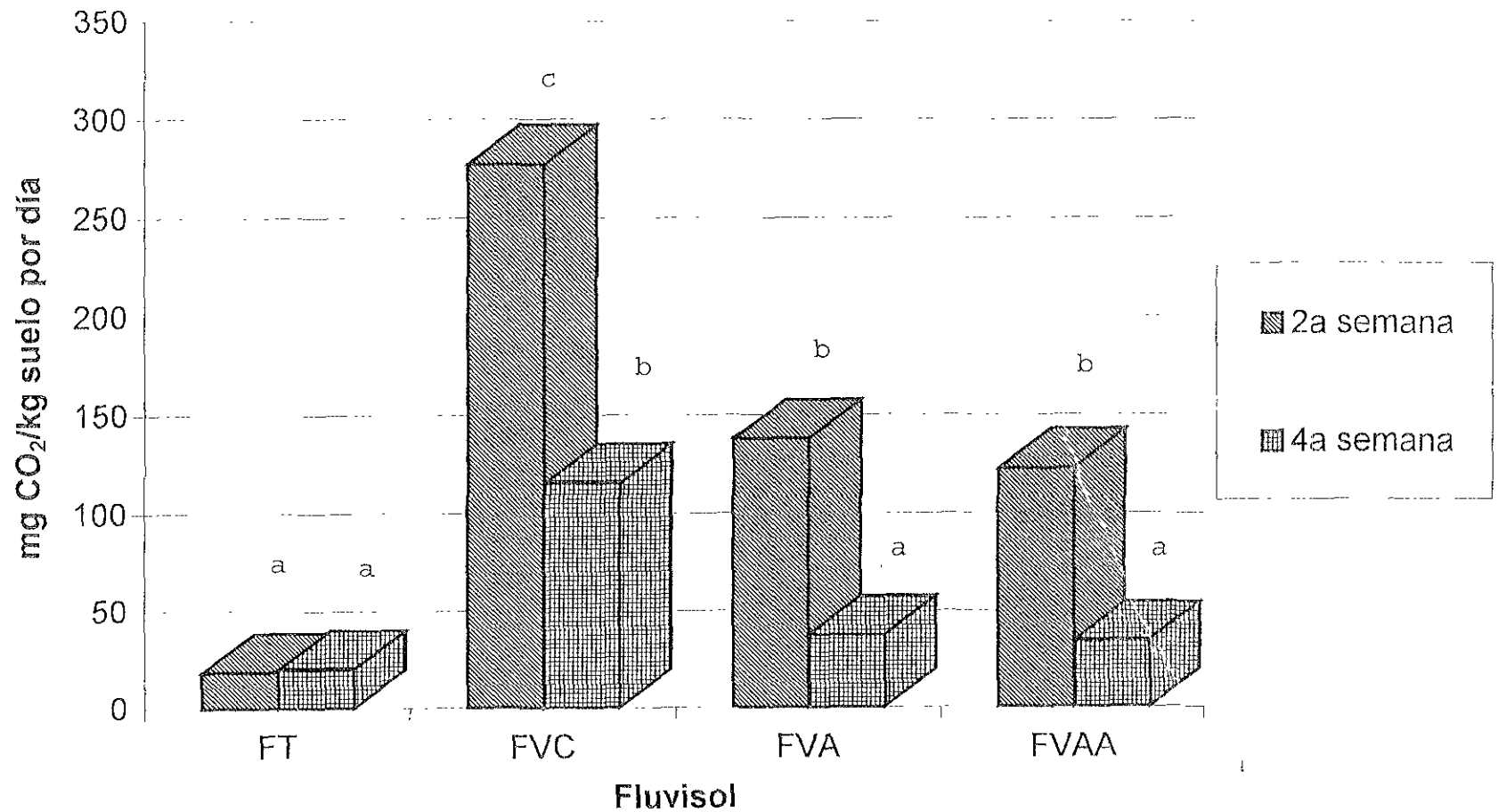
En el Acrisol con vinaza cruda la disminución en la producción de CO<sub>2</sub> de la segunda (100%) a la cuarta semana es de 22% y en el Fluvisol con vinaza cruda es de 41%.

La producción de CO<sub>2</sub> es muy alta en los tratamientos con vinaza cruda en ambos suelos, de 293.33 a 65.74 mg de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo en Acrisol y de 277.1 a 115 mg de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo en el Fluvisol. De mantenerse constante a lo largo del mes se producirían 8.79 g de CO<sub>2</sub> por kg de suelo en el Acrisol para el nivel más alto o visto de otro modo considerando la dosis de vinaza, serían 29.3 g de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo por litro de vinaza en el Acrisol, equivalente al 32.66% de C adicionado con la vinaza cruda. Sin embargo, es claro que la producción de CO<sub>2</sub> varía a lo largo del tiempo, como se muestra en las figuras.



Vinaza cruda (VC), Vinaza anaerobia (VA) y Vinaza anaerobia-aerobia (VAA)

**Figura 4.4-5. Producción de CO<sub>2</sub> en un suelo de la unidad Acrisol tratado con vinazas**



Vinaza cruda (VC), Vinaza anaerobia (VA) y Vinaza anaerobia-aerobia (VAA)

**Figura 4.4-6. Producción de CO<sub>2</sub> en un suelo de la unidad Fluvisol tratado con vinazas**

En otro tipo de estudios la producción (evolución) de CO<sub>2</sub> no logra las concentraciones que se obtuvieron en este experimento, por ejemplo, investigaciones realizadas con residuos de cosechas realizadas por Recous y colaboradores (1998) lograron valores máximos de 16 mg de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo en un alfisol, lo cual es una muestra de la mayor facilidad de descomposición de las vinazas y, posiblemente, del mayor poder catalítico de los suelos de estudio.

#### 4.4.6 Análisis elemental

El Acrisol es un suelo más intemperizado que el Fluvisol debido a las siguientes evidencias: menores tasas Si/Al; mayores cantidades de Fe y menor cantidad de calcio.

En cuanto a la fertilidad, el Fluvisol presenta mayores cantidades de metales alcalinos, alcalinotérreos y P en comparación con el Acrisol (Cuadro 4.4.6-1).

En ambos suelos se detecta una tendencia a la disminución relativa de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por la adición de vinaza cruda; siendo de 0.96% y 0.4% en el Fluvisol y de 0.4% y 0.3% en el Acrisol, respectivamente. Sin embargo, se hace necesario confirmar esta aseveración con trabajo de campo.

En el Fluvisol con vinaza cruda se detecta una tendencia a la disminución relativa de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del orden del 0.3%.

La adición de VC aumenta los contenidos de K<sub>2</sub>O, CaO y MgO tanto en el Acrisol como en el Fluvisol.

Las vinazas tratadas (VA y VAA) ocasionan aumentos relativos en el contenido de K<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O.

Cuadro 4.4.6-1. Análisis químico elemental de los suelos tratados con vinazas analizados por espectroscopía de fluorescencia de rayos X

	FT	FVC	FVA	FVAA	AT	AVC	AVA	AVAA
	%							
SiO <sub>2</sub>	49.1	48.14	48.6	48.3	39.9	39.5	39.7	39.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.1	19.7	20.2	20.0	27.8	27.5	27.8	27.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	10.9	10.6	10.7	10.8	12.7	12.8	12.7	12.8
MnO	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3
CaO	2.8	3.1	2.9	2.8	0.4	0.6	0.4	0.4
MgO	0.45	0.47	0.45	0.45	0.35	0.40	0.36	0.37
K <sub>2</sub> O	0.30	0.54	0.34	0.34	0.28	0.50	0.31	0.32
Na <sub>2</sub> O	0.63	0.64	0.67	0.67	0.50	0.51	0.54	0.55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.07	1.04	1.08	1.00	0.36	0.38	0.35	0.37

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia; AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia y AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia



#### 4.4.7 Cambios en los cationes intercambiables y en la CIC por la aplicación de las vinazas

El contenido de calcio intercambiable (extraíble con acetato de amonio) aumenta 7.3 y 3.3  $\text{c}+\text{mol kg}^{-1}$  por la adición de vinaza cruda en el Acrisol y Fluvisol respectivamente. En los tratamientos con vinaza anaerobias y anaerobias-aerobias no se presentan cambios.

El contenido de magnesio intercambiable también presenta el mismo comportamiento que el calcio intercambiable al aumentar, en ambos suelos, en el tratamiento con vinazas crudas, siendo mayor en el Acrisol (6.8  $\text{c}+\text{mol kg}^{-1}$ ) que en el Fluvisol (4.6  $\text{c}+\text{mol kg}^{-1}$ ).

El análisis de fluorescencia de rayos X revela el aumento de calcio y magnesio totales en los suelos que recibieron VC; pero en el Acrisol, se presenta un aumento del calcio y magnesio intercambiables y en el Fluvisol en menor grado.

Es posible que en el Fluvisol, el Ca y Mg intercambiables y otros iones se encuentren fuertemente retenidos entre la halloysita y la materia orgánica de la VC, lo cual ocasionaría, además la disminución de la CIC, como también lo indican los resultados de Varadachari y colaboradores (1994) y Theng (1982). En el Acrisol este fenómeno no se presenta por el contenido menor de halloysita y por el contenido mayor de óxidos de hierro y aluminio en los que preferentemente se adsorben los compuestos orgánicos (Mc Bride, 1989).

La aplicación de vinaza cruda no modifica el contenido de sodio intercambiable en ambos suelos. Por el contrario, la aplicación de vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias, en ambos suelos, presenta un aumento de entre 7.4 y 8.6  $\text{c}+\text{mol kg}^{-1}$  que con el paso del tiempo puede acumularse y ocasionar problemas. Es decir, el contenido de sodio intercambiable es un factor de riesgo de sodificación del suelo por la utilización de vinazas tratadas anaerobia y anaerobia-aerobiamente.

El contenido de potasio intercambiable, en ambos suelos, aumenta por la aplicación de los tres tipos de vinazas, siendo mucho mayor con la aplicación de vinaza cruda como consecuencia de su concentración de potasio más elevada (Cuadro 4.4.7-1).

El aumento de la capacidad de intercambio de cationes del Acrisol por la aplicación de la vinaza cruda, sugiere que el aumento se debe al desplazamiento del Fe y Al adsorbidos en los coloides del suelo por la adición de materia orgánica soluble. Las diferencias tan pequeñas (2  $\text{c}+\text{mol kg}^{-1}$ ) de los cambios en la CIC en el Acrisol, aún cuando son significativas estadísticamente, ocasionan que el fenómeno no sea del todo claro.

En el Fluvisol tratado con VC y con VA la CIC disminuye (diferencias de 3.1 y 6.0  $\text{c}+\text{mol kg}^{-1}$  respectivamente), probablemente por la formación de compuestos organominerales que obstruyen los sitios de intercambio tanto orgánicos como minerales (Theng, 1982; Varadachari *et al.*, 1994). Esta afirmación es soportada por la interacción entre la halloysita y la materia orgánica reflejada en el análisis de difracción de rayos X.

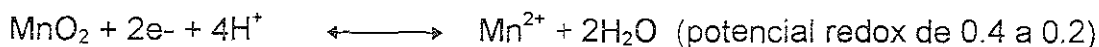
Cuadro 4.4.7-1. Cationes intercambiables y capacidad de intercambio de cationes en los suelos tratados con vinazas

Tratamiento	Ca	Mg	Na	K	CIC
	c mol(+) kg <sup>-1</sup>				
AT	32.0 ± 0.8	11.4 ± 0.2	3.4 ± 0.2	7.8 ± 0.11	13.2 ± 0.45 b
AVC	39.3 ± 1.6	18.2 ± 0.5	3.3 ± 0.9	32.7 ± 0.52	15.3 ± 0.12 a
AVA	30.2 ± 0.7	11.3 ± 2.9	11.6 ± 1.2	11.1 ± 0.13	12.2 ± 0.17 b
AVAA	31.6 ± 0.6	12.4 ± 0.2	11.6 ± 0.5	11.6 ± 0.15	12.2 ± 0.38 b
FT	84.6 ± 0.8	8.6 ± 0.1	3.2 ± 0.3	2.6 ± 0.14	18.0 ± 0.43 a
FVC	87.9 ± 2.3	13.2 ± 0.4	4.3 ± 0.6	30.5 ± 0.80	14.1 ± 0.58 b
FVA	79.6 ± 3.7	8.5 ± 0.5	10.6 ± 0.8	5.7 ± 0.31	12.3 ± 0.38 b
FVAA	81.4 ± 1.5	8.6 ± 0.1	11.8 ± 0.4	6.2 ± 0.12	16.1 ± 0.73 ab

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia; AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia y AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia

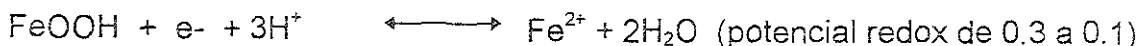
#### 4.4.8 Cambios en algunos micronutrientos

Es ampliamente conocida la participación de los óxidos de manganeso (MnO<sub>2</sub>)<sup>11</sup>, como aceptor de electrones, en la descomposición de la materia orgánica bajo condiciones reductoras, de acuerdo con la siguiente ecuación.



Por los contenidos de Mn asimilable en los suelos tratados con vinaza cruda que van de 2721 mg kg<sup>-1</sup> en el Acrisol a 1831 mg kg<sup>-1</sup> en Fluvisol, es posible que se pudiera llegar a niveles peligrosos mayores en los cuales la caña de azúcar pudiera llegar a los 400 mg kg<sup>-1</sup> en el tejido, niveles en los cuales pudiera ocasionar toxicidad según Anderson y Bowen (1994).

De la misma manera, el contenido de hierro extraíble aumenta de manera importante con la aplicación de vinaza cruda en ambos suelos (42 mg kg<sup>-1</sup> en Acrisol y 144 mg kg<sup>-1</sup> en Fluvisol), debido posiblemente a las condiciones reductoras que se presentan por las descomposición anaerobia de la VC como lo sugieren Sommers y Linsay (1979). De hecho el aumento de hierro y manganeso extraíbles es una evidencia de la presencia de condiciones reductoras.



Considerando ambos suelos, el aumento del fósforo presenta una relación directamente proporcional con la concentración del hierro (r= 0.998). Por esto, es posible que el aumento del fósforo se deba al efecto combinado del aumento del pH (disminución de la formación de compuestos entre el Al (III) y el ion PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>),

<sup>11</sup> El Acrisol localizado en Ojo de Agua presenta motas negras indicadoras de la presencia de MnO<sub>2</sub>, ver fotografía del apéndice 1-3.

condiciones reductoras (disminución de la formación de compuestos entre el Fe (III) y el ion  $\text{PO}_4^{3-}$ , por el cambio de estado de oxidación de Fe (III) a Fe (II)) y la formación de quelatos de hierro.

Cuadro 4.4.8-1. Cambios en la disponibilidad de algunos micronutrientes por la aplicación de vinazas (Villatoro, 1997)

	Hierro	Manganeso	Zinc	Cobre
Tratamientos	mg kg <sup>-1</sup>			
AT	51 ± 22	775 ± 199	119 ± 23	2 ± 0
AVC	93 ± 6	2721 ± 234		3 ± 0
AVA	55 ± 2	742 ± 57		2 ± 0
AVAA	53 ± 6	835 ± 48	118 ± 18	2 ± 0
FT	958 ± 104	744 ± 53		9 ± 0
FVC	1102 ± 255	1831 ± 134	75 ± 21	10 ± 1
FVA	1093 ± 283	931 ± 215	79 ± 27	10 ± 1
FVAA	1031 ± 189	994 ± 130	76 ± 6	10 ± 0

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia; AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia y AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia

El Acrisol contiene mayor cantidad relativa de hierro total (1.8%) que el Fluvisol (Cuadro 4.4.8-1). La aplicación de vinaza cruda genera una tendencia al aumento del hierro extraíble que es al parecer es mayor en el Fluvisol (de 958 a 1102 mg kg<sup>-1</sup>) que en el Acrisol (de 51 a 93 mg kg<sup>-1</sup>). Sin embargo, en el Acrisol el aumento de 42 mg kg<sup>-1</sup> de Fe extraíbles es importante porque se han detectado deficiencias de Fe en la caña cultivada en estos suelos y con estos resultados se presume que podría disminuirse este problema por la aplicación de la vinaza cruda.

En el Acrisol tratado con vinaza cruda el contenido de Mn asimilable (2721 mg kg<sup>-1</sup>) alcanza las cantidades del manganeso total de 2000 a 3000 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 4.4.5-1), es decir, prácticamente todo el Mn se convierte en Mn extraíble bajo las condiciones generadas por la aplicación de la vinaza cruda. El aumento de Mn extraíble es del 351% en el Acrisol y de 246% en el Fluvisol.

El contenido de zinc extraíble no presentan cambios en el tratamiento con las vinazas anaerobias-aerobias. En el Fluvisol no hay cambios entre las vinazas crudas y las tratadas.

En ambos suelos, el contenido de cobre extraíble no se modifica por la aplicación de ningún tipo de vinaza. Se tienen mayores cantidades (7 mg de Cu kg<sup>-1</sup> de suelo) de cobre en el Fluvisol que en el Acrisol.

#### 4.4.9 Cambios en el fósforo asimilable y en el hierro y Al extraíbles con oxalato de amonio ( $\text{Fe}_{ox}$ y $\text{Al}_{ox}$ )

En ambos suelos, los contenidos de fósforo aumentan con la aplicación de los tres tipos de vinaza. Sin embargo, por la aplicación de vinaza cruda, el aumento es

mayor en el Fluvisol donde alcanza un incremento de 53 mg kg<sup>-1</sup>, en comparación con el Acrisol, en donde el incremento es de 8 mg kg<sup>-1</sup>.

Es ampliamente conocido que los ligantes orgánicos como el oxalato, citrato y acetado y otros ácidos orgánicos juegan un papel importante en el aumento del fósforo disponible en los suelos (Cajuste *et al.*, 1996).

Los ligantes orgánicos (como los que se presume que contiene las vinazas) han sido reportados como liberadores de fósforo por tres razones: 1) reemplazan al P adsorbido en las superficies de hierro y aluminio; 2) disuelven las superficies de los óxidos metálicos y liberan el P adsorbido; 3) Complejan al hierro y aluminio en disolución y con esto previenen la reprecipitación de los compuestos metal-P (Stumm, 1986; Bhatii *et al.*, 1998).

El aluminio extraíble con oxalato de amonio (Al<sub>ox</sub>) no cambia en el Acrisol por la aplicación de los tres tipos de vinaza.

La aplicación de VC no ocasiona cambios en la cantidad de Fe<sub>ox</sub>, pero la aplicación de vinazas tratadas (VA y VA) sí genera el aumento (Cuadro 4.4.9-1), debido, probablemente a la inhibición de la cristalización del hierro soluble por la presencia de sustancias húmicas como lo describe Dahlgren (1994). Es bien conocido que los compuestos fenólicos reducen el Fe (III) de los minerales del suelo a Fe (II), ocasionando una liberación de este elemento a la solución del suelo (Huang, 1994) y aumentando el Fe<sub>ox</sub>.

Cuadro 4.4.9-1. Cambios en el hierro y aluminio extraíbles con oxalato de amonio y en el fósforo ocasionados por la aplicación de vinazas

Tratamientos	Fósforo	Fe <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>
Acrisol	mg kg <sup>-1</sup>		
AT	9 ± 1	503.1 ± 15.3 b	3.2 ± 0.14 a
AVC	17 ± 1	492.8 ± 15.9 b	2.8 ± 0.08 a
AVA	11 ± 1	590.0 ± 22.6 a	2.87 ± 0.11 a
AVAA	9 ± 1	619.4 ± 26.1 a	2.83 ± 0.13 a
Fluvisol			
FT	337 ± 18	na	na
FVC	390 ± 6	na	na
FVA	351 ± 1	na	na
FVAA	359 ± 7	na	na

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia; AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia y AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p < 0.001). na= no analizado

Cuadro 4.4.10-1. Minerales secundarios en el Acrisol tratado con vinazas

Tratamientos	Halloysita (0.736 nm)	Cuarzo	Hematita	Cristobalita
	área de la señal en cm <sup>2</sup>			
AT	4.46 (0.701 nm)	2.05	0.46	presencia
AVC	3.82 (0.724 nm)	2.08	0.52	presencia
AVA	3.52 (0.728 nm)	4.2	0.44	presencia
AVAA	4.32 (0.736 nm)	2.05	0.48	?

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia; AT= Acrisol testigo, AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia y AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia. El número entre paréntesis corresponde a la distancia interplanar. ? = señal poco clara

También las condiciones reductoras ocasionadas por la aplicación de las vinazas bajo las cuales las bacterias forman reductasas, se favorece la transformación del Fe (III) a Fe (II) (Huang, 1994). De la misma manera, los ácidos orgánicos presentan alta afinidad (electrostática y como ligantes) con los óxidos de hierro (Oades, 1989).

#### 4.4.10 Cambios en los minerales

La identificación de la halloysita por difracción de rayos X (DRX) se realiza por la posición angular de la familia de planos en 0.446 nm, sin embargo, como se detecta material amorfo y como por ello se obscurece la señal, se decidió utilizar el segundo pico localizado a los 0.736 nm.

Cuadro 4.4.10-2. Minerales secundarios en el Fluvisol tratado con vinazas

Tratamientos	Halloysita (0.718 nm)	Cuarzo	Cristobalita	Hematita	Boehmita (0.61 nm)
	área de la señal en cm <sup>2</sup>				
FT	5.06 (0.718 nm)	2.75	0.96	0.56	Presencia
FVC	5.25 (0.736 nm)	3.15	1.38	0.96	Presencia
FVA	5.28 (0.724 nm)	3.32	1.61	0.9	???
FVAA	6.25 (0.724 nm)	3.98	1.56	0.6	???

FT= Fluvisol testigo; FVC= Fluvisol con vinaza cruda; FVA= Fluvisol con vinaza anaerobia; FVAA= Fluvisol con vinaza anaerobia-aerobia; AT= Acrisol testigo; AVC= Acrisol con vinaza cruda; AVA= Acrisol con vinaza anaerobia y AVAA= Acrisol con vinaza anaerobia-aerobia. El número entre paréntesis corresponde a la distancia interplanar de la familia de planos en nm. ? = señal poco clara

En el Acrisol los minerales identificados por DRX no muestran cambios substanciales excepto en la halloysita, cuyo cambio se puede atribuir a dos causas: a la pérdida de la cristalinidad del mineral por el cambio de pH del suelo (hacia alcalino) y/o a la interacción de las vinazas con las láminas de Al y Si de la halloysita (Cuadro 4.4.10-1 ) (Brindley y Brown, 1980). En el Fluvisol, por el contrario, cuarzo, cristobalita y hematita parecen aumentar su intensidad relativa y el área de sus picos, lo que sugiere que las vinazas están lixiviando y/o disolviendo minerales amorfos presentes en la matriz (Cuadro 4.4.10-2).

El aumento de la hematita en el Fluvisol, pudiera estar asociada al mejoramiento de las condiciones para la cristalización del Fe amorfo en las FVC y FVA.

Comparando entre Acrisol y Fluvisol, el análisis de difracción de rayos X revela que el Fluvisol contiene relativamente más cuarzo, feldespatos, cristobalita y halloysita. Estos resultados concuerdan con la mayor cantidad de Si y Ca en el Fluvisol y los mayores contenidos de Fe y Al en el Acrisol encontrados en el análisis de fluorescencia de rayos X.

#### **4.4.11 Experimentos con plantas**

Las semillas de maíz y frijol no germinaron en el tratamiento con vinaza cruda utilizando un substrato inerte, lo cual podría ser explicado por la conductividad eléctrica de las vinazas. Recordando que los valores obtenidos con el puente de conductividad fueron: 29.3, 19.5 y 19.1 dS m<sup>-1</sup> para vinaza cruda, vinaza anaerobia y vinaza anaerobia-aerobia, respectivamente. La conductividad eléctrica calculada con la suma de cationes (Ca, Mg, Na y K) para las vinazas es: 10.22 dS m<sup>-1</sup> (VC); 6.02 dS m<sup>-1</sup> (VA); y 3.56 dS m<sup>-1</sup> (VAA). Estos valores ayudan a explicar de manera más clara las diferencias en la germinación de las semillas entre los tratamientos

Otra posible explicación a este fenómeno radica en generación de productos intermedios de la fermentación de las vinazas crudas, que teóricamente pueden llegar a inhibir la germinación de las semillas (García *et al.*, 1991a; b), entre dichos compuestos se han identificado al ácido propiónico, ácido butírico y ácido acético (Ilangoan y Noyola, 1993; Rosas *et al.*, 1993; Jiménez y Martínez, 1995). Hammond (1949) citado por Algur y Kadioglu (1992) reporta que la excesiva producción de CO<sub>2</sub> puede inhibir la germinación de las semillas.

Con respecto al crecimiento de las plantas, en el Acrisol, los tratamientos con vinaza cruda y vinaza anaerobia-aerobia lograron las mayores alturas. Por el contrario, las vinazas anaerobias presentan un crecimiento tan bajo como el testigo.

La toxicidad por aluminio es una de las principales limitaciones para el crecimiento de las plantas en suelos ácidos. En ese sentido, se ha probado que la formación de complejos orgánicos del aluminio no son fitotóxicos y que las aplicaciones de materia orgánica aumentan el crecimiento de las plantas por la reducción de las cantidades de aluminio tóxico en la solución del suelo (Hargrovè y Thomas, 1981; Ahmad y Tan, 1986; Tan y Binger, 1986; Hue y Amien, 1989; citados por Bell y Bessho, 1993).

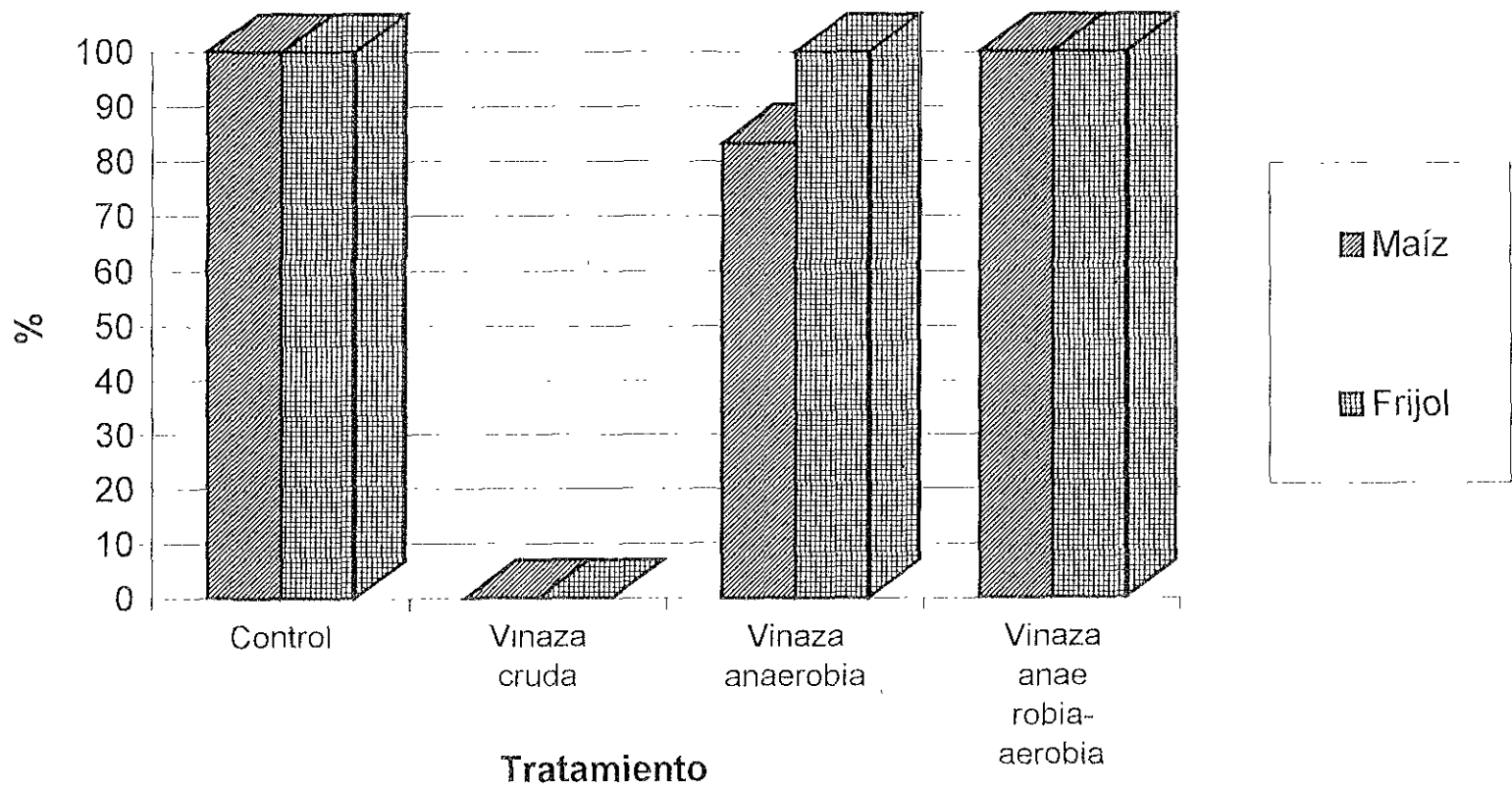
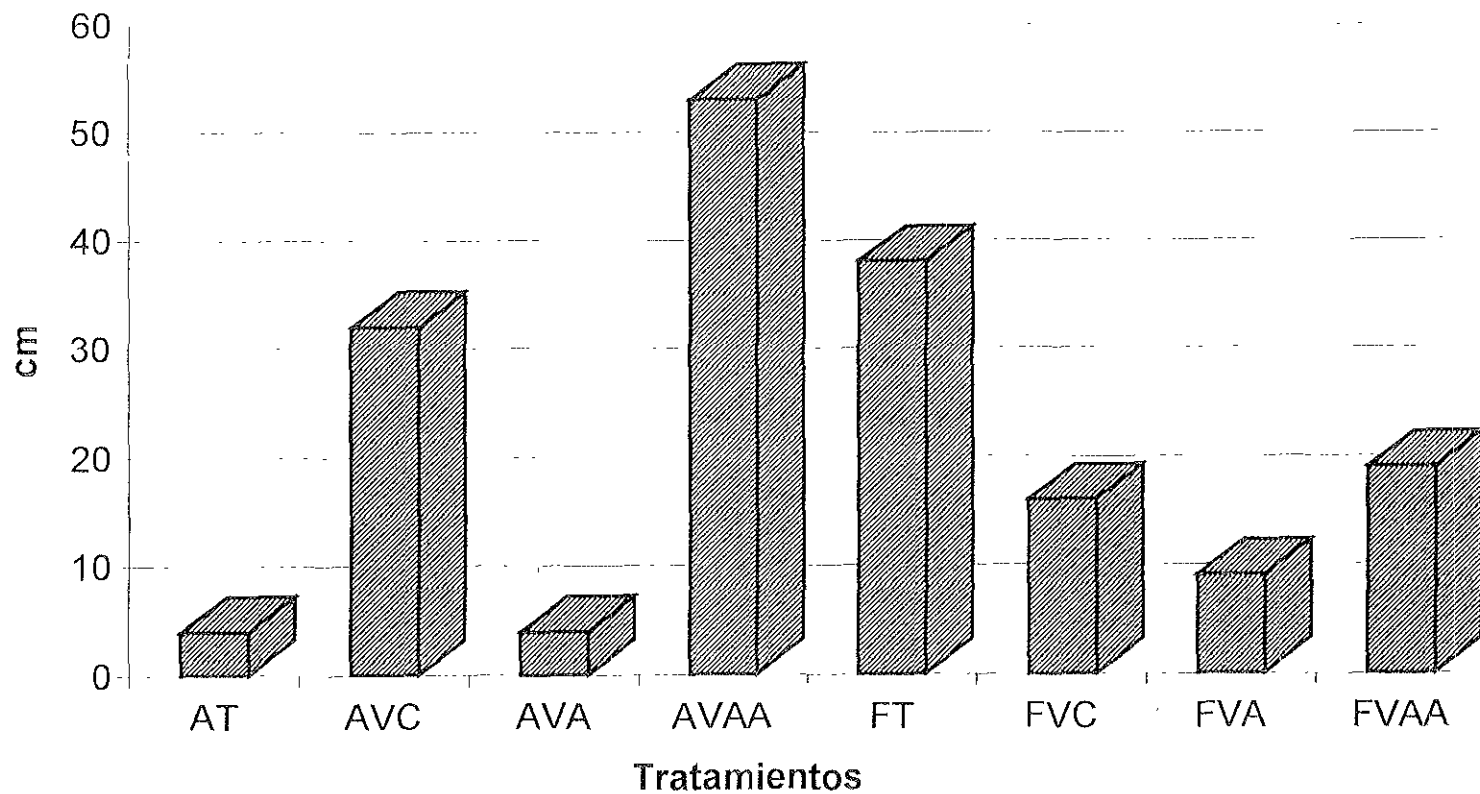


Figura 4.4-7. Germinación de semillas de maíz y frijol utilizando vinazas y papel absorbente como substrato (Villatoro, 1997)



VA= Vinaza cruda, VA= vinaza anaerobia, VAA= Vinaza anaerobia-aerobia

**Figura 4.4-8. Altura de plantulas de maíz en suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol tratados con vinazas (Villatoro, 1997)**



En el Fluvisol, los tres tipos de vinazas influyen negativamente en el crecimiento de las plantas de maíz. En el caso de tratamiento con vinaza cruda, la conductividad eléctrica del suelo es un factor que puede influir en la disminución del crecimiento del maíz.

En ambos suelos, en el tratamiento con las vinazas anaerobias sólo germinaron dos de las tres semillas y en el Fluvisol tratado con vinazas anaerobias-aerobias sólo germinó una de las tres semillas.

Los ácidos orgánicos como el acético, propiónico, isobutírico y butírico también han sido reportados como causantes de diversos problemas de toxicidad, entre ellos, el retraso en el desarrollo y crecimiento de las plantas (García *et al.*, 1991a; b).

Es posible que los ácidos orgánicos volátiles pudieran estar presentes y participar en la disminución del crecimiento de las plantas de maíz en el Fluvisol principalmente, ya que se sabe que la producción de ácido propiónico y ácido acético, son tóxicos para la biota microbiana y para las plantas, respectivamente y disminuyen su toxicidad con la presencia de Fe (II) y (III) por la formación de complejos (Pandiyani *et al.*, 1993). Esto puede explicar la mayor mineralización de la materia orgánica y el mayor crecimiento de las plantas de maíz en el Acrisol, ya que este suelo contiene mayor cantidad de Fe y Al capaz de formar complejos con los ácidos orgánicos. Sin embargo, se requiere realizar investigación tendiente a dilucidar este problema.

## CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Suelos

En la zona de influencia de los ingenios localizados en el municipio Miguel Alemán, se encuentran varios suelos que no habían sido ubicados espacialmente y solo se reportan como asociaciones de las unidades: Vertisol pélico, Vertisol crómico, Cambisol y Fluvisol éutrico (INEGI, 1984a); sin embargo, no se habían identificado las unidades: Acrisol y Lixisol, tal vez porque se localizan en la planicie de piedemonte cercana a la serranía.

En el Acrisol y Lixisol el cultivo de la caña es de temporal, por su localización en las partes más altas, como la localidad "Ojo de Agua" o muy alejadas de la zona de riego como "La Loma". Por esta situación no han sido regados con agua residual aún cuando han recibido aplicaciones de cachaza. Estos suelos son los de menor calidad agrícola por la toxicidad por aluminio, acidez, baja capacidad de retención de nutrimentos y la compactación que presentan. Otras característica de estos suelos ácidos son la presencia de altos contenidos de arcilla, altos contenidos de Fe y Al y bajos contenidos de silicio.

El análisis de ordenación y clasificación numérica de los sitios permitió identificar las propiedades clave con las cuales podrían realizarse mapas de los epipedones de mayor detalle y de utilidad agrícola, con el que podrían identificarse las limitantes químicas y físicas más importantes, así como la identificación de las parcelas en las que puedan aplicarse los desechos orgánicos del ingenio.

Las propiedades clave de los sitios son: valor de pH, capacidad de intercambio de cationes, capacidad de campo, densidad real, arcilla y precipitación. De ellas, la capacidad de intercambio de cationes y la capacidad de campo por ser de mayor detalle podrían estimarse, la capacidad de intercambio de cationes con la densidad real y la capacidad de campo mediante la calibración de métodos de campo con resultados de la olla de presión. Otras propiedades, como drenaje interno, riesgo de erosión y reservas minerales podrían estimarse con textura; fijación de fósforo con pH; entre otras.

La realización de mapas a nivel de parcela que fueran rápidos y baratos podrían realizarse con datos de: valor de pH, densidad real y textura. En términos de manejo, la realización de mapas con las características antes mencionadas servirían para: 1) Aplicación de enmiendas y estimación de las cantidades a aplicar, por ejemplo cal, vinaza, cachaza y otras; 2) Fertilización; y 3) Siembra de distintas variedades o cultivares, entre otras.

La selección de las propiedades de los suelos utilizadas en el ordenamiento y clasificación numérica de los sitios debe realizarse tratando de incluir las propiedades distintivas más importantes. En este estudio se clasificaron dentro del mismo grupo y con un nivel de similitud alto (83%) a dos suelos con morfología diferente: "El Potrero" (Fluvisol) y "Ejido Cuitláhuac" (Cambisol) debido a que en el análisis de componentes principales no se incluyeron propiedades como

profundidad total del suelo, compactación y pedregosidad que se consideran importantes desde el punto de vista agrícola. Dentro de ese mismo grupo se incorpora al perfil "San Joaquín" (Lixisol); los suelos se encuentran localizados entre las isoyetas 1200 y 1400 mm de pp. Este grupo de suelos son de menor acidez, la capacidad de intercambio de cationes es mayor y presentan mayor contenido de bases. Los pozos 1 y 2 se unen a este grupo. Sin embargo, el porcentaje de similitud es muy bajo. Ambos pozos se localizan casi sobre las isoyetas de 1700 y 1400 mm de precipitación pluvial en el pozo 1 y 2, respectivamente.

El análisis de clasificación numérica por conglomerados concuerda con las isoyetas del mapa de efectos climáticos mayo-octubre; en las cuales los perfiles Ojo de Agua, San José de Abajo y La Providencia se encuentran en un grupo localizado entre las isoyetas de 1700 y 2000 mm de precipitación pluvial (Figura 3-1). A este grupo se le une el perfil "La Loma" localizado entre los 1400 y 1700 mm de precipitación pluvial. Este grupo se caracteriza por ser el de menor calidad agrícola por la toxicidad por aluminio, acidez, baja capacidad de retención de nutrimentos, compactación y altos contenidos de arcilla.

La descripción del perfil y la realización de análisis de las muestras a lo largo del perfil permiten identificar procesos que en el análisis del epipedón, no se observan; por ejemplo, las condiciones reductoras en la parte baja del perfil y la compactación de los horizontes subsuperficiales. Es por esto que, en la medida de lo posible, debe estudiarse el perfil, al menos con análisis rápidos de campo y observaciones visuales de los procesos, como por ejemplo, la presencia de condiciones reductoras por las motas negras y rojas de los óxidos de manganeso y hierro respectivamente.

Por la clasificación FAO de los suelos pueden formarse tres grupos: 1) suelos ácidos de la unidad Acrisol que son los de menor calidad agrícola por la toxicidad por aluminio soluble, acidez, baja capacidad de retención de nutrimentos, compactación y altos contenidos de arcilla. 2) Los suelos de la unidad Lixisol, con valores de pH entre 5 y 6 que se encuentran en las localidades "La Providencia" y "San Joaquín", presentan CIC con valores entre 14 y 17 c(+)mol kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap y texturas medias. 3) El grupo de los suelos menos ácidos se encuentra en las localidades "Ejido Cuitláhuac" y "El Potrero", donde la CIC es mayor, alcanzando valores de 25 c(+)mol kg<sup>-1</sup>.

La formación de los grupos de suelos, con base en la nomenclatura FAO, indica que el clima y la cercanía a las serranías son los factores formadores de suelo que influyen, de manera determinante, en la morfología del perfil.

Por la naturaleza de la agrupación numérica de los sitios, donde únicamente es considerado el epipedón, es difícil la comparación con los otros grupos formados con base en la nomenclatura FAO como también lo encuentran Martínez y Ortíz (1992).

La información proporcionada por los campesinos no coincidió con la encontrada técnicamente, debido a que se esperaba un mayor número de diferencias entre suelos; sin embargo, es posible que por la escala no se reflejen las diferencias que los productores observan o que las propiedades de los suelos que fueron utilizadas

en el diagnóstico no sean lo suficientemente sensibles para detectar las diferencias (López-Hernández et al., 1992).

Se recomienda considerar propiedades, como por ejemplo, la profundidad, compactación y pedregosidad, en la comparación de clasificaciones numéricas, campesinas y técnicas.

En el diagnóstico de suelos a escala pequeña son de primordial importancia los mapas geomorfológicos para trazar los límites, muy por encima del análisis fisiográfico (Tricart y Kilian, 1982). En ese sentido este trabajo es un acercamiento al conocimiento de los suelos del municipio de Atoyac; sin embargo, cuando el objetivo del levantamiento de suelos radica en el conocimiento detallado, a nivel parcela, es de suma importancia reconocer e incorporar el conocimiento campesino de los suelos (Licona-Vargas et al., 1992) pero a la vez, es necesario identificar las propiedades del suelo que pudieran ser distintivas, como en este caso. En este estudio, al igual que en los de López-Hernández y colaboradores (1992); Rangel y García (1994); Theocharopoulos y colaboradores (1997), los métodos multivariados han sido una herramienta de gran utilidad en el conocimiento de las propiedades distintivas de los suelos.

## **5.2. Vinazas**

La salinidad es el mayor riesgo para el suelo por la aplicación de VC, la cual debe reconocerse y dársele un seguimiento, analizando la suma de cationes o aniones debido a que con el puente de conductividad se registran valores más altos por la influencia del  $H^+$  y  $OH^-$ , así como por la materia orgánica soluble.

Los tres tipos de vinaza rebasan los  $0.750 \text{ dS m}^{-1}$  que son considerados como de alto riesgo de salinidad en agua de riego (Aguirre, 1993; Bohn et al., 1993) de manera convencional; sin embargo, si se consideran únicamente las cantidades de iones en disolución, el riesgo de salinización disminuye considerablemente.

En condiciones de baja infiltración y suponiendo que los iones en disolución contenidos en las vinazas fueran retenidos totalmente en el suelo, podría recibir 196 mL de VC; 332 mL de VA; y 562 mL de VAA por kilogramo de suelo. Estas dosis de vinazas contienen una concentración de cationes de  $0.02 \text{ mol}^{(+)} \text{ L}^{-1}$ , con lo que se esperaría un valor de conductividad eléctrica alrededor de  $2 \text{ dS m}^{-1}$ . Por ello se recomienda que las vinazas sean aplicadas en concentraciones menores a las mencionadas para evitar problemas de salinidad del suelo. Por ejemplo, para los suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol de la zona cañera de Córdoba Veracruz, se recomiendan las siguientes cantidades de vinazas:  $564 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de VC;  $956 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de VA y  $1618 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de VAA para el Acrisol; y  $611 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de VC,  $1036 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de VA y  $1753 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de VAA para el Fluvisol.

Se recomienda que las cantidades de vinazas calculadas se apliquen en dos o más partes anuales, con el fin de evitar la formación de compuestos fitotóxicos como los ácidos orgánicos producidos bajo condiciones reductoras. Se recomienda realizar un seguimiento de la CE del suelo que reciba cualquier tipo de vinaza.

En las vinazas crudas, los aniones más importantes son los cloruros ( $4098 \text{ mg L}^{-1}$ ) y sulfatos ( $1618 \text{ mg L}^{-1}$ ). Los cationes dominantes son calcio, magnesio y potasio. En consecuencia, no existe riesgo de sodificación.

Las vinazas tratadas (VA y VAA) contienen menores cantidades de nutrimentos (K, Ca y Mg) que las vinazas crudas así como alta conductividad eléctrica y pH. En este sentido, por las bajas cantidades de cationes y aniones no presentan riesgo de salinización.

El alto contenido de magnesio en las VAA debe evaluarse si se aplican al suelo, con el fin de evitar la dispersión de las arcillas (Szabolcs, 1989).

En la búsqueda de fuentes de nutrimentos alternos en el cultivo de la caña (Berrocal, 1988; Dematté, 1992; Arzola *et al.*, 1994), la vinaza cruda es una importante fuente de potasio que pudiera ser utilizada en la disminución de las dosis de fertilizantes potásicos aplicadas a los suelos cañeros (Oriando, 1985; 1994).

La presencia de las altas concentraciones de Zn en las vinazas ( $49.66$  a  $62.2 \text{ mg L}^{-1}$ ) no es una novedad. En ingenios de otras regiones, las vinazas llegan a contener mayores cantidades de Zn y otros metales pesados (Otero y González, 1991; Vaidés *et al.*, 1991 a, b). Jiménez y Martínez (1995) reportan concentraciones de  $47 \text{ mg L}^{-1}$  de Cu en vinazas crudas; sin embargo, en este estudio el Cu no fue detectado. Pudiera ser porque el lote evaluado no hubiera solubilizado el cobre de los tubos de intercambiadores de calor o porque usando una metodología con una digestión de la muestra no se tienen interferencias en el análisis. El Cu y Zn pueden llegar a ser tóxicos en condiciones ácidas; sin embargo, el aumento del pH por la aplicación de las vinazas ocasiona que las concentraciones de estos metales disminuyan (Lindsay, 1988).

Las vinazas crudas contienen grandes concentraciones de carbono orgánico total y sustancias húmicas. Las vinazas anaerobias y las Vinazas anaerobias-aerobias contienen materia orgánica en formas químicas estables de alto peso molecular (humus) difícilmente biodegradable por los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Esto indica que, a lo largo del tratamiento de las VC se generan compuestos orgánicos de alto peso molecular que no pueden eliminarse por métodos biológicos, por lo que es necesaria la aplicación de un tratamiento terciario o la disposición en suelos agrícolas o degradados (Fuller y Warrick, 1985; Page *et al.*, 1986; Bautista *et al.*, 1995).

En algunos estudios en los que las vinazas crudas se aplican al suelo, no se han encontrado resultados que demuestren las bondades esperadas (Subirós y Molina, 1992), probablemente por el empleo de aplicaciones aisladas que no alcanzan a ejercer efectos favorables. Además, dichas investigaciones se han realizado en suelos agrícolas de buena calidad como los Vertisoles, los cuales tienen una gran capacidad amortiguadora. Es por ello que se piensa que los suelos degradados son los más adecuados para la aplicación de las vinazas, ya sean crudas o tratadas.

Shindo y Huang (1984), demostraron los efectos catalíticos de los óxidos de hierro y aluminio en la formación de compuestos orgánicos del tipo de los polímeros

fenólicos, lo cual hace suponer que la aplicación de las vinazas en suelos ácidos ricos en óxidos pudieran funcionar como una buena enmienda.

Se considera que las vinazas tratadas serán una mejor enmienda que las crudas, principalmente por las formas químicas del carbono, que son moléculas de mayor tamaño y peso molecular con propiedades coloidales y, por lo tanto, más estables.

Las vinazas son un recurso que podría usarse como enmienda en el suelo para aumentar su calidad agrícola, dependiendo de las propiedades del suelo. La aplicación de la VC al suelo debe realizarse en el siguiente orden de prioridad: 1) suelos ácidos, 2) suelos degradados de baja calidad agrícola (erosionados, compactados, etc) y 3) suelos agrícolas sin problemas.

Actualmente las vinazas se analizan y estudian para utilizarse como complemento dietético para animales y se han logrado resultados alentadores aunque no definitivos (Valdés et al., 1991a). También existen estudios preliminares sobre la evaluación de los lodos anaerobios producidos a partir del tratamiento de las aguas residuales de las destilerías como "biofertilizantes" (Valdés et al., 1991b) encontrando una buena calidad como abono debido al alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio (Otero y González, 1991).

El efluente del tratamiento de la vinaza cruda en reactores de tipo anaerobio y tratadas en un tren anaerobio-aerobio aún rebasa los límites permitidos por la normatividad oficial para ser descargados a los ríos y demás cuerpos de agua, quedando dos opciones viables: 1) Un tratamiento terciario que a su vez generaría un desecho y constituiría un gasto que debe estimarse; y 2) La aplicación al suelo que no produciría ningún desecho pero que también constituye un gasto de transporte y aplicación que debe estimarse y compararse con los beneficios económicos generados por la vinaza en la producción de la caña de azúcar.

Se sugiere dirigir la normatividad ambiental hacia el establecimiento de los lineamientos para la adecuada aplicación de las VC en los distintos tipos de suelos en los que se cultiva la caña de azúcar, con el fin de proteger, tanto al suelo como al acuífero y a los cuerpos de agua y corrientes superficiales (EPA, 1990 a, b; 1993).

### **5.3. Ensayo en columnas**

Los experimentos en columnas de suelo no se han popularizado por la dificultad de poder reconstruir las condiciones naturales del suelo, principalmente las referentes a la estructura. Además, generalmente la velocidad de infiltración se sobreestima por el paso del agua por las paredes de las columnas o se subestima cuando la muestra de suelo se toma con el tubo y sufre compactación; sin embargo, en este caso, utilizando suelo tamizado y seco la infiltración fue muy lenta, tanto en el Fluvisol como en el Acrisol, lo cual impidió que los experimentos arrojaran resultados que permitieran estimar la retención de los compuestos orgánicos a lo largo del perfil.

La gran cantidad de arcillas y la retención de los compuestos orgánicos en las capas superficiales de las columnas fueron los factores que disminuyeron la infiltración.

Subirós y Molina (1992), con aplicaciones de 50, 100 y 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de VC en un *Ustropept*<sup>12</sup> no encontraron diferencias significativas de ningún parámetro químico del suelo a lo largo del perfil tomando muestras a los 0-50, 50-100, 100-150 cm. Es posible que los efectos de los compuestos orgánicos de las VC a lo largo del perfil se encuentren entre los primeros 15 cm, como ocurrió en este estudio. Los compuestos inorgánicos pueden cambiar algunas propiedades a mayor profundidad, dependiendo de la textura, estructura y velocidad de infiltración del suelo.

De lo anterior se deduce que tanto la velocidad de infiltración como la forma de aplicación de la vinaza son dos factores que se deben tener en cuenta al aplicar la vinazas en el campo ya que es muy probable que en condiciones de campo domine la escorrentía sobre la infiltración vertical, con el consecuente riesgo de contaminación de los cuerpos de agua superficiales.

Por la misma razón, la aplicación de grandes dosis de vinazas al suelo, aumentarían las condiciones reductoras en los suelos, con su consecuente efecto en el desarrollo de la caña. De la misma manera, aumenta el riesgo de salinización del suelo, principalmente del Fluvisol.

Se sugiere realizar estudios de campo con la finalidad de estimar la velocidad de infiltración y escorrentía con el objeto de modelar el movimiento de la materia orgánica en diferentes tipos de suelo.

#### **5.4 Ensayo en macetas**

La aplicación de la vinaza cruda en el Acrisol ocasiona un aumento del pH. Este hecho es importante por la relación que tiene con la disponibilidad de algunos micronutrientes, así como en la complejación de elementos tóxicos y/o fijadores de fósforo como el hierro y aluminio (Lindsay, 1988; Doménech, 1995). El efecto en el valor de pH no es puntual ya que permaneció durante los cuatro meses que duró el experimento.

El Acrisol funciona mejor que el Fluvisol en la mineralización del carbono y nitrógeno orgánicos. También en estos suelos los beneficios son mayores.

El cambio más importante se presentó en la disminución de la dispersión del Acrisol, tanto por la complejación de los oxo-hidroxos de hierro y aluminio como por la formación de sustancias húmicas. Estos dos hechos ocasionan un mejoramiento

---

<sup>12</sup> Pertenecientes al orden Inceptisol, es decir, suelos inmaduros que tienen rasgos de perfiles expresados débilmente, en comparación con los suelos maduros, y que conservan cierta semejanza con el material original. Saturación de bases mayor al 50%, horizonte cámbico y con más de 90 días secos al año (Buold et al, 1991)

físico del suelo que se muestra en la disminución de la dispersión de las partículas, lo cual hace suponer que la pérdida de suelo por erosión disminuirá.

El resultado de la interacción entre el Acrisol y la vinaza, a nivel físico es como sigue:

En el Acrisol:

Acrisol + Vinaza  $\longrightarrow$  Retención  $\longrightarrow$  Agregación

Debido a:

Coloides (óxidos de baja CIC) + Materia orgánica (soluble)  $\longrightarrow$  Agregación

En el Fluvisol:

Fluvisol + Vinaza  $\longrightarrow$  Retención + Vinaza

Coloides (llita de mediana CIC) + Materia orgánica (soluble)  $\longrightarrow$  Retención + Materia orgánica (soluble)

En la actualidad existen diversos métodos que permiten estudiar el efecto de los contaminantes y prácticas de manejo del suelo en la función de la comunidad de microorganismos como: biomasa microbiana, respiración y enzimas; sin embargo, en el estudio de la estructura de la comunidad las técnicas no se realizan de manera rutinaria en los centros de investigación de todo el mundo debido, entre otras cosas, a la complejidad taxonómica.

La presencia de protozoarios en los cuerpos de agua o en el tratamiento de aguas residuales son un parámetro biológico asociado con el restablecimiento de la calidad del agua ya que dichos microorganismos se encuentran en ambientes con suficiente oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica soluble (MOD) en concentraciones relativamente bajas, por el contrario una explosión demográfica en las poblaciones de bacterias se encuentran relacionadas con un aumento de la MOD y disminución del OD (Luna-Pabello et al., 1994; Peavy et al., 1985). En este sentido las estimaciones de las poblaciones de bacterias y protozoarios realizadas sirven para conocer cualitativamente el efecto de las vinazas en la comunidad de microorganismos, sobre todo porque se puede contar con un control y con la función de la comunidad microbiana a través de la cuantificación de carbono mineralizado.

Como los protozoarios aumentan la nitrificación en los suelos (Ingham, 1994) es posible que ésta sea la causa de la disminución del nitrógeno orgánico en el Acrisol. De la misma manera, las mayores cantidades de protozoarios en el Acrisol, concuerdan con la mayor tasa de mineralización del carbono. Los protozoarios, en especial los flagelados, podrían utilizarse como indicadores de la cantidad de materia orgánica soluble.

Para este análisis, se considera que las bacterias son los organismos más activos en la descomposición de los compuestos orgánicos (Alexander, 1980) bajo condiciones de baja aireación (suelos arcillosos húmedos); que los protozoarios son organismos principalmente bacterívoros (Alexander, 1980; Ingham, 1994); y que la



presencia de ciliados son muestra de las bajas concentraciones de materia orgánica soluble. El seguimiento de estos organismos en el estudio del impacto por la adición de compuestos como las vinazas es necesario para conocer con mayor certeza los procesos estudiados, sobre todo si se acompañan de mediciones de su actividad como microorganismos nitrificantes, desintegradores, sulfato reductores, desnitrificantes, inmovilizadores de nutrientes, etc.

### **5.5. Experimento en macetas para observar los cambios químicos en el suelo**

El aumento del pH en el Acrisol es importante por la relación que tiene con el aumento en la disponibilidad de los nutrientes (Lindsay, 1988; Oades, 1989; Hayes y Bolt, 1991; Doménech, 1995). El efecto en el pH aparentemente no es puntual ya que permaneció por las cuatro semanas que duró el experimento.

En los suelos ácidos sobre los cuales se realizan actividades agrícolas, es común aplicar periódicamente cantidades importantes de carbonatos de calcio con el objeto de aumentar los valores de pH, disminuir la fijación de fósforo, aumentar calcio y magnesio, disminuir la toxicidad por aluminio, aumentar la CIC y mejorar las propiedades físicas y microbiológicas (Chaves y Alvarado, 1994; Orlando, 1994; Arzola et al., 1994). Esta práctica puede substituirse por la aplicación de vinaza cruda, porque cubre los objetivos de la aplicación de cal pero, además, se adicionan K, N, S, Ca, Mg, P y Zn y otros nutrientes, siendo con ello una mejor y más barata enmienda.

La caña de azúcar es un cultivo que tiene una gran capacidad de adaptación a una amplia variedad de suelos. En la zona de estudio hay al menos siete unidades de suelos diferentes; sin embargo, es un cultivo sensible a la salinidad, presentando disminución de su rendimiento a valores mayores de  $2 \text{ dS m}^{-1}$  (Aguirre, 1993). Por ello es de suma importancia darle seguimiento a esta característica edáfica.

Por otro lado, las vinazas anaerobias y las vinazas anaerobias-aerobias contienen compuestos húmicos que pueden mejorar los suelos en las propiedades arriba mencionadas. Además, la conductividad eléctrica no aumenta y los enlaces con los óxidos de Fe, Al y Si son más estables.

La conductividad eléctrica, en el Acrisol tratado con vinaza cruda, presentó una regresión lineal ( $r = 0.74$ ) con el contenido de carbono orgánico soluble. Este resultado sugiere la participación del materia orgánica soluble en la CE del suelo ya que ambas características disminuyen conforme avanza el tiempo. Los altos valores de la CE de los tres tipos de vinaza y ensayos realizados con glucosa a diferentes concentraciones revelan la participación de los compuestos orgánicos solubles en la CE. Por ello, esta característica de las vinazas no puede ser utilizada como indicador de la calidad de los efluentes con el objetivo de su utilización como enmiendas edáficas y mucho menos como caracterización de aguas de riego<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> En la caracterización de las aguas de riego, la CE es un indicador del peligro potencial de salinización del suelo, a menudo se encuentra correlacionada con la cantidades de cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y aniones como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ .

En cuanto a la mineralización de la materia orgánica, comparando entre suelos, el Acrisol tratado con vinaza cruda funcionó, ligeramente mejor como reactor que el Fluvisol, presentando una  $K = -0.093$ , equivalente a una pérdida de carbono orgánico de  $0.93 \text{ g kg de suelo}^{-1}$  por semana. La mineralización del carbono orgánico soluble en el Acrisol tratado con vinaza cruda presentó una tasa casi cuatro veces superior al Fluvisol.

La tasa de mineralización de los suelos tratados con vinazas anaerobias y vinazas anaerobias-aerobias, también fue mayor en el Acrisol en comparación con el Fluvisol, pero sin llegar a las grandes diferencias encontradas con los suelos tratados con VC.

La explicación de las mayores tasas de mineralización encontradas en el Acrisol, como antes se mencionó, radica en las diferencias en el tipo de coloides minerales que ambos suelos presentan, predominancia de óxidos en Acrisol y predominancia de aluminosilicatos en el Fluvisol. Los aluminosilicatos adsorben e inhiben a las enzimas extracelulares (Swift et al., 1979; Tate, 1992; Lavelle et al., 1993) y los óxidos de Fe y Mn catalizan la oxidación de la materia orgánica en condiciones de baja aireación (Mc Bride, 1989; Oades, 1989).

Son escasos estudios de mineralización de carbono de tan corto plazo debido a que la materia orgánica del suelo es estable y los cambios que pudieran darse con las prácticas de manejo son puntuales y de difícil medición. Sin embargo, en este caso se adicionó materia orgánica soluble y se pensó que sería factible la detección de los cambios en el carbono orgánico. Además es importante identificar al suelo en el que se mineralice la materia orgánica más rápidamente, debido a que puede ser un contaminante en los cuerpos de agua, al promover la eutroficación de los cuerpos de agua.

Se recomienda para futuros estudios tener en cuenta las diversas fracciones de la materia orgánica y los métodos recientemente diseñados como son: fraccionamiento físico por tamaño y/o por densidad (Elliot Cambardella 1991; Cambardella y Elliot 1992; Gavineli, 1995; Barrios et al., 1996; Bautista et al., 1998), fraccionamiento según sus características hidrófilas e hidrófobas (Kaiser et al., 1996; Kaiser y Zech, 1997; Kaiser y Zech, 1998) y los métodos tradicionales de fraccionamiento químico en sustancias húmicas (Chent et al., 1977; Stevenson, 1982).

Por los resultados en los experimentos con plantas, mayor crecimiento de las plantas de maíz en el Acrisol que en el Fluvisol (con excepción del tratamiento con vinazas anaerobias), se recomienda que la siembra de la caña se realice después de al menos una semana de la aplicación de cualquier tipo de vinaza, con la finalidad de permitir que pase la fase de mineralización más intensa que se presenta en las primeras horas y que ésta no interfiera con el cultivo, tanto por la posible producción de sustancias fitotóxicas, como los ácidos orgánicos volátiles (García et al., 1991a; b; Keeling et al., 1994); y el  $\text{CO}_2$  (Algour y Kadioglu, 1992), como por la posible inmovilización del nitrógeno y la conductividad eléctrica.

Con respecto a los cambios en los minerales, en ensayos previos se observó que el Acrisol tratado con vinaza cruda se acidifica solo por algunas horas (Apéndice 6) y

no se acidifica por tanto tiempo (15 días) como el Fluvisol, por lo cual el riesgo de destrucción de halloysita es menor, por esta vía. Por el contrario, la acidez del Fluvisol en los primeros días, producto de la adición de vinazas crudas, puede ocasionar la descomposición de las arcillas tipo 1:1 (Bohn et al., 1993) aún cuando se encuentre en función de su concentración y de la acidez, como se indica en la siguiente ecuación:

$$-\Delta(\text{halloysita}) / \Delta t = k(\text{halloysita})(\text{H}^+)$$

donde: t = tiempo

k = constante

En suelos con smectita el riesgo de destrucción de estos minerales secundarios es mayor debido a que se encuentra únicamente en función de los iones  $\text{H}^+$  (Bohn et al., 1993).

En el Acrisol tratado con vinaza cruda y vinaza anaerobia se observa una pequeña disminución relativa de halloysita que puede estar asociada a aceptación del material agregado (vinazas) en la familia de planos a 7.2 angstroms y esto refleja una pequeña pérdida de la cristalinidad (Brindley y Brown, 1980).

Las aplicaciones continuas de vinaza cruda en los suelos puede ocasionar una excesiva meteorización de los minerales primarios y secundarios en el Fluvisol por varias razones, entre ellas: su condición ácida, su actividad como ligante y por la generación de ácidos inorgánicos como  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , producto de la descomposición (Huang y Keller, 1972; Huang, 1993). En el largo plazo, la meteorización de los suelos puede llegar a ocasionar la disminución de su fertilidad debido a que la mayoría de los suelos de la región son arcillosos, es decir, contienen más minerales secundarios que primarios. Esto indica que son suelos con bajos contenidos de minerales primarios que contengan nutrientes en su estructura cristalina, por lo que se requiere la instrumentación de medidas de seguimiento.

Se recomienda estudiar la formación de compuestos organominerales ya que estos disminuyen la erosión del suelo, principalmente por la formación de complejos multidentados entre los iones de los metales de transición y las sustancias húmicas (Greenland, 1965; Doménech, 1995). Esto sería de gran importancia en los Acrisoles de piedemonte (Figuras 4.1-1 y 4.1.-2)

En resumen, el análisis de los cambios en los minerales del suelo indica lo siguiente: a) en ambos suelos, las vinazas participan en la pérdida de la cristalinidad de la halloysita; b) en el Fluvisol, las vinazas participan lavando al cuarzo y cristobalita con lo que aumenta la cantidad relativa de la halloysita; c) en el Fluvisol y en Acrisol con vinaza cruda el aumento del valor de pH parece provocar la formación de hematita.

Aún cuando el mejoramiento de las condiciones del suelo no son tan espectaculares en el Fluvisol, estudios realizados en Vertisoles (Berrocal, 1988) han mostrado que la adición de vinaza cruda trae consigo beneficios económicos por el aumento de la producción de caña de azúcar.

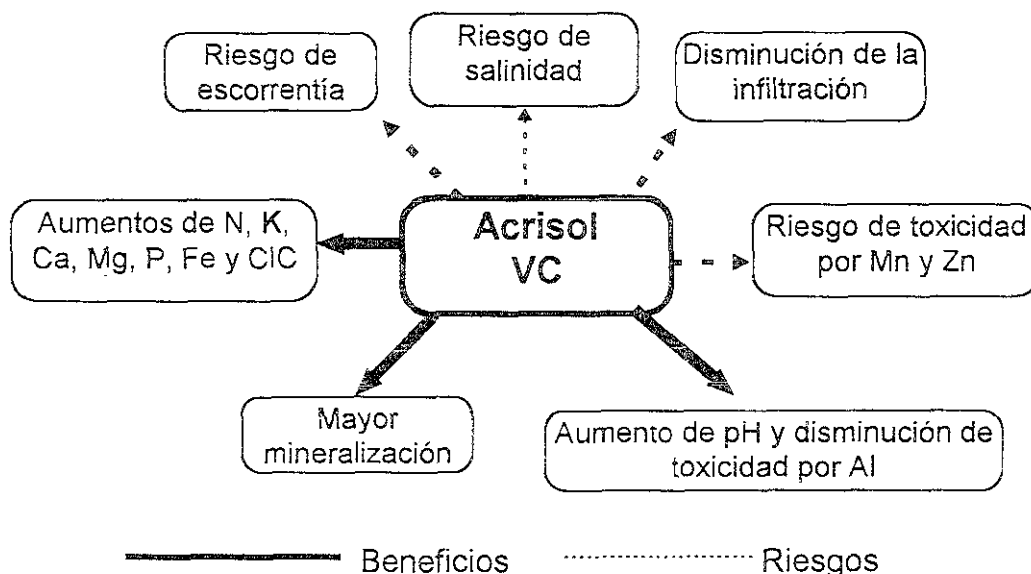


Figura 5.5-1. Modelo conceptual de la interacción entre los compuestos orgánicos de las vinazas crudas y el Acrisol

El problema de inversión en la instalación y operación de las plantas de tratamiento no es insalvable como lo demuestran Durán-de-Bazúa y colaboradores (1994); además, deben considerarse como beneficios económicos, el mejoramiento del suelo en el mediano y largo plazos, así como la disminución de riesgos ambientales ocasionados por la falta de tratamiento.

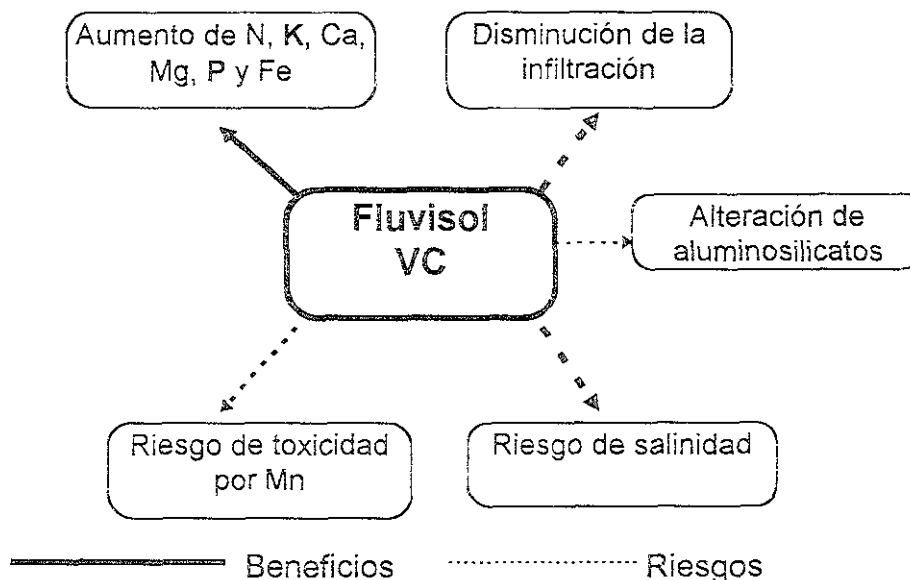


Figura 5.5-2. Modelo conceptual de la interacción entre los compuestos orgánicos de la vinaza cruda y el Fluvisol

Ambos suelos podrían recibir mayores cantidades de vinazas tratadas (VA y VAA) debido a que el mayor riesgo de deterioro es la salinización que con estas vinazas no se presenta, además se mejorarían fuertemente las condiciones de los suelos

por la adición de materia orgánica coloidal que aumentaría la agregación, pH y el contenido de algunos nutrimentos.

Los suelos ácidos son los más adecuados, desde el punto de vista químico, para la disposición de las vinazas en comparación con los suelos de la unidad Fluvisol (Figuras 5.5-1 y 5.5-2). Dichos suelos ácidos se localizan, principalmente en la zona de mayor precipitación que es la más alejada de la zona de riego, por lo que el cultivo es de temporal.

En estas zonas se realiza aplicación de cachaza pero de acuerdo con este trabajo, sería más recomendable aplicar vinaza, siendo tal vez más barato. Además, es posible que en el campo, los procesos de secado y humedecimiento acelerarían el proceso de adsorción de la materia orgánica con los aluminosilicatos y óxidos de hierro y aluminio, así como la oxidación química y biológica.

La opción de uso de las vinazas crudas diluidas aplicadas al suelo es la que se practica en la zona de estudio pero, por las altas cantidades de vinaza producida, en algunas ocasiones se vierte al río.

En la zona de estudio no se han realizado experimentos tendientes a encontrar la disolución y dosis más adecuadas para el crecimiento de la caña de azúcar. Tampoco se ha estudiado el destino de los metales pesados vertidos con la vinaza.

El ingenio "El Potrero" se localiza dentro de la zona del mejor suelo, desde el punto de vista agrícola, como es el Fluvisol. En este suelo la aplicación de vinazas crudas es más común pero desafortunadamente también es el suelo en el que el beneficio de la aplicación no alcanza resultados espectaculares como en el Acrisol y, por lo contrario, se aumentan los riesgos tanto de salinización como de destrucción de los aluminosilicatos.

La zona de mayor degradación edáfica (Acrisol y Lixisol) se localiza en las partes más altas y alejadas de los ingenios, pero es allí donde la aplicación de la vinaza será de mayor beneficio, tanto por la mayor mineralización de la VC, como por la retención y efecto en las propiedades de los suelos (aumento de pH y nutrimentos como Ca, Mg, y K principalmente).

Se recomienda estudiar los cambios físicos en el suelo por la adición de vinaza cruda, con énfasis en la floculación y en el tamaño y estabilidad de los agregados.

Es necesario realizar estudios de campo para encontrar las dosis adecuadas de vinazas que mejoren las condiciones edáficas y eleven la producción de caña ya que se ha encontrado que en cantidades altas, la cantidad y calidad de la caña de azúcar disminuye (Orlando, 1985; Orlando, 1994), así como la germinación y crecimiento de *Pisum sativum* (Chícharo) y *Helianthus annuus* (girasol) (Algur y Kadioglu, 1992). En Brasil, para oxisoles se recomiendan de 60 a 300 m<sup>3</sup>/ha (Dematté, 1992). En este experimento, se utilizó el equivalente a 400 m<sup>3</sup> de vinazas por ha, por lo que si se utilizara esta dosis para las 30,000 ha se podrían utilizar 12 millones de m<sup>3</sup> cada mes, con lo cual cubrirían las necesidades de los ingenios.

## 5.6. Discusión general

En los ingenios azucareros-alcoholeros, la producción de residuos sólidos y líquidos que afectan al ambiente y al mismo proceso agroindustrial, ocasionan que cada vez sea más urgente la generación de opciones de tratamiento, reuso y confinamiento, ya que los grandes volúmenes constituyen un serio problema de manejo. Ante esta problemática y con base en las investigaciones de: Larson y Hufnal (1980); McBride (1982); Yokoi y colaboradores (1991); Durán-de-Bazúa (1994); Klomp et al (1995), se plantean algunas opciones de manejo (Figura 5.6-1).

En el caso de la vinaza cruda, motivo de este estudio, las opciones de manejo son:

- Aplicación al suelo (riesgo de salinización, destrucción de arcillas y contaminación por metales pesados)
- Tratamiento anaerobio-aerobio (inversión que se paga entre dos y cinco años)
- Reducción de volumen (proceso caro).
- Utilización de ríos (es un delito ambiental) y canales para transportarlas (no se tienen)
- Desección (proceso caro)
- Utilización de coagulantes para reducir la carga orgánica (no se ha probado y se debe estudiar la estabilización de los sólidos generados)

El conocimiento de la composición de la vinaza es de suma importancia en la toma de decisiones sobre la selección de las opciones de manejo y/o tratamiento. La composición de la vinaza varía entre ingenios debido a las condiciones de operación y también a la acidificación del mosto, ya que en algunos ingenios se utiliza ácido clorhídrico y en otros ácido sulfúrico. Es por esto que, con base en los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere que en el análisis de la composición química de la vinaza se consideren los siguientes criterios, establecidos con base en su utilización y en los riesgos de uso:

- 1) Para su uso en el aumento de la fertilidad del suelo debe medirse el contenido de N, P y K. Además del contenido de Ca y Mg.
- 2) Por el riesgo de salinidad del suelo deben conocerse los contenidos de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Estos iones tienen su origen en el ácido utilizado en la preparación del mosto (acidificación a pH menor de 4) que puede ser  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{HCl}$ , además de los iones que la melaza contiene y los que se producen durante los tratamientos anaerobios y aerobios como  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{OH}^-$ . El  $\text{H}^+$  también participa en la CE por lo que debe considerarse.

Desde el punto de vista edáfico es mejor utilizar ácido sulfúrico que ácido clorhídrico en la preparación del mosto, ya que el primero contiene azufre que también es un nutrimento, por el contrario, el segundo contiene el ion cloro que es un elemento que aumenta el riesgo de salinización del suelo.

- 3) La acidez de la vinaza cruda conlleva el riesgo de destrucción de las arcillas del suelo (Bohn et al., 1993), por lo que debe considerarse la posibilidad de su neutralización. La acidez tiene el fin de evitar la proliferación de hongos diferentes a *Saccharomyces cerevisiae*, con esto se induce al mejor

aprovechamiento del mosto para obtener una mejor calidad y cantidad de alcohol etílico (Jiménez y Martínez, 1995).

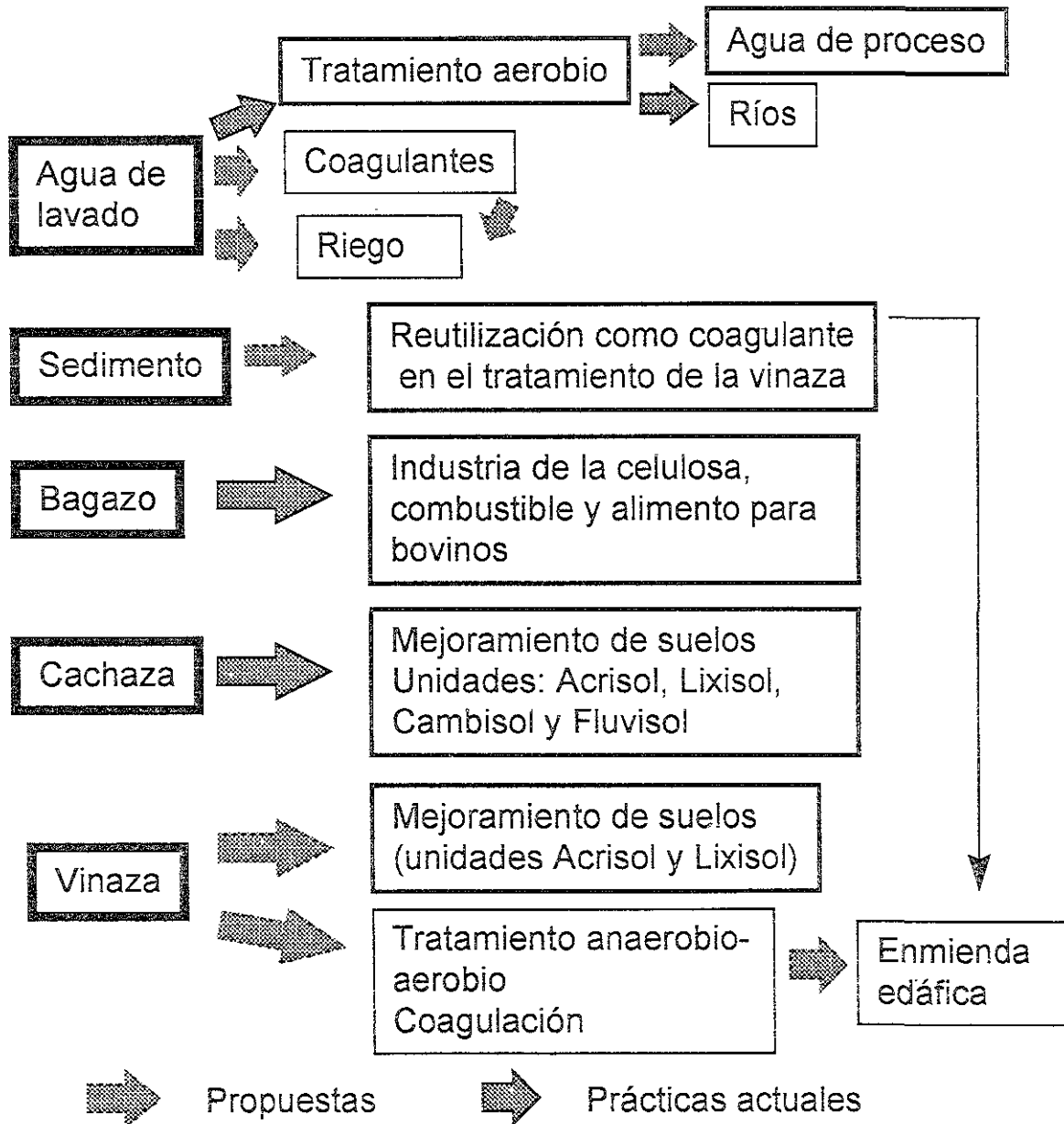
- 4) Riesgo de contaminación por metales pesados, como Zn, Cu, Pb, Mn y otros (Bautista, 1998). Estos iones se incorporan a la vinaza durante la preparación de la melaza para la posterior fermentación y obtención de alcohol etílico. Es posible que su origen se encuentre en el material con el que fue fabricada la maquinaria y equipo. Es necesario identificar y eliminar la o las fuentes de metales pesados ya que además de aumentar los riesgos de contaminación, se evita la utilización de la biomasa microbiana producida durante el tratamiento aerobio que podría ser alimento para animales ya que contienen cantidades importantes de proteína (Castro y Villegas, 1989).
- 5) La medición del contenido de materia orgánica se realiza mediante los parámetros genéricos del tipo: DBO, DQO, ST y SV; Sin embargo, con el fin de conocer la dinámica de la mineralización de la vinaza en el suelo, se hace necesaria la identificación de los principales compuestos orgánicos de las fracciones solubles e insolubles contenidas en las vinazas.

Para conocer los compuestos orgánicos presentes en las vinazas, se recomienda hacer uso de las siguientes técnicas: análisis elemental de C, N, S, H y O de las fracciones solubles y suspendidas; análisis de infrarrojo (identificación de grupos funcionales); pirólisis en la identificación de compuestos como fenoles, mono y polisacáridos, monómeros de lignina, ácidos grasos y otros (*pyrolysis-field ionization mass spectrometry*); y cuantificación de los grupos de carbono por resonancia magnética nuclear del  $^{13}\text{C}$  (Niemeyer et al., 1992; Liang et al., 1996; van Bochove et al., 1996). En el entendimiento de los mecanismos de retención de la vinaza en el suelo, se hace necesario estudiar (identificar y medir) las fracciones hidrófilas e hidrófobas de la materia orgánica soluble contenida en las vinazas ya que se ha demostrado que la fracción hidrófoba y la de mayor tamaño son las de mayor retención en el suelo (Kaiser y Zech, 1997; 1998).

La aplicación directa al suelo presenta las siguientes dificultades técnicas de manejo: 1) Acuosa; 2) Ácida; 3) Salina; 4) Muy contaminante de los cuerpos de agua; y 5) Grandes volúmenes. Sin embargo, por este estudio se sabe que la aplicación de la vinaza cruda, de manera directa al suelo, debe realizarse preferentemente, en suelos de las unidades Acrisol y Lixisol debido a que son los que más retienen y descomponen la materia orgánica. Además, en ellos los beneficios de la aplicación son superiores a los riesgos.

El tratamiento de las vinazas crudas combinado, propuesto en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente seguido de un aerobio de biodiscos es económicamente viable, dando un costo unitario por metro cúbico de vinaza tratada de \$ 1.53 ó \$ 0.50 US (Durán-de-Bazúa et al., 1994). En estos cálculos no se consideran los beneficios que a nivel de suelo y ambiente se producen por el tratamiento y reúso de las vinazas tratadas, además del aumento de la producción caña en los suelos que reciben dichas enmiendas, todo lo cual ocasionaría una mayor rentabilidad a la calculada por Durán-de-Bazúa et al (1994).

Figura 5-1. Subproductos de la industria azucarera-alcoholera y sus opciones de manejo en el municipio de Atoyac (Veracruz, México)



Fuentes: Yokoi *et al.*, 1991; Durán-de-Bazúa, 1994; Klomp *et al.*, 1995; Fundación Produce Tabasco, 1997



Es por esto que se hace necesario otorgar estímulos económicos y legales a los ingenios, con la finalidad de que instalen sistemas de tratamiento para las VC así como las medidas para realizar una disposición adecuada en los suelos de mayor potencial para la mineralización de la VC y el mejoramiento del suelo.

La reducción de volumen y el desecamiento de la vinaza, técnicamente son opciones de solución muy difíciles de implementar debido a los grandes volúmenes de vinazas producida. Además debe corroborarse el uso posterior de la vinaza concentrada y/o seca ya que las concentraciones de metales aumentan por unidad de masa.

La conducción y transporte de la vinaza utilizando el río es un delito ambiental, por lo que esta opción no viable. La conducción de la VC utilizando canales diseñados *ex profeso* implicaría que la parte alta (localidades Ojo de Agua y aledañas) no recibirían la VC y es, precisamente, una de las zonas más adecuadas para la disposición de la vinaza.

La utilización de coagulantes es una opción de tratamiento "in situ" que pudiera ser atractiva desde el punto de vista financiero y técnico. En ese sentido, los suelos ácidos pueden utilizarse, en columnas de adsorción, para tales fines ya que contienen altos porcentajes de coloides inorgánicos del tipo de los óxidos de hierro y aluminio que forman complejos con los compuestos orgánicos y flocculan (Oades, 1989; Varadachari et al., 1994). Habría también que corroborar el uso de las sustancias coaguladas para evitar su disposición no controlada.

Otra fuente de coloides inorgánicos se tiene en los sedimentos (suelo) del área de lavado de caña que ya han sido transportados al ingenio y que muy probablemente las arcillas son el componente principal. Desafortunadamente, por el costo del agua, la operación de lavado de caña ha desaparecido ya en muchos ingenios.

Por este estudio y otros (Kaiser et al., 1996; Kaiser y Zech, 1997; Kaiser y Zech, 1998) se sabe que la adición de coloides inorgánicos del suelo, preferentemente ácidos del tipo de los óxidos de aluminio y hierro, ocasionarían la flocculación del material orgánico soluble en alta proporción y neutralizarían la vinaza, teniendo de esta manera, una agua residual menos contaminante, menos corrosiva y, por lo tanto, de un manejo más sencillo. Nuevamente se hace énfasis de buscar opciones de uso para estos coloides resultantes antes de plantear esta posible solución.

Se recomienda realizar isoterms de retención de la materia orgánica contenida en las vinazas con suelo de los diferentes horizontes ya que se ha detectado que la mayor absorción/adsorción se presenta en los horizontes subsuperficiales, siendo, por el contrario, la mayor mineralización en la superficie.

El residuo sólido (lodo) puede secarse al sol y ser utilizado como enmienda en los suelos degradados.

Se recomienda darle seguimiento a la materia orgánica del suelo que reciba residuos orgánicos ya que se ha detectado en otros estudios que las adiciones de materia orgánica modifican profundamente a la materia orgánica original

cambiando las cantidades de ácidos húmicos y fúlvico, así como el proceso de humificación (Alianello y Trinchera, 1998; Canali et al., 1998).

Las recomendaciones arriba mencionadas son respuestas técnicas a problemas puntuales; sin embargo, se hace necesaria la elaboración de un programa de manejo para asegurar el suministro (y calidad del agua) al ingenio y la población. Los puntos a considerar son:

- Prevenir la contaminación de las fuentes de agua
- Analizar los flujos y calidad de agua generados, utilizado y que salen de la cuenca
- Dar recomendaciones prácticas de manejo de la tierra con base en consideraciones económicas, sociales y ecológicas
- Tener en cuenta que el problema de contaminación en zonas agrícolas es específico para cada sitio
- Atender el problema con base en el manejo de la cuenca o unidad hidrológica
- Tener en cuenta que los problemas de la cantidad y calidad de las aguas y aguas residuales a menudo se encuentran interconectados
- Tener en cuenta el uso y cobertura vegetal de la tierra de la cuenca
- Elaborar bases de datos conteniendo información sobre cantidades y calidades del agua de suministro y de las aguas residuales
- Elaborar programas educativos dirigidos a la sociedad con información precisa sobre estos rubros ya que hay grandes problemas de desinformación que tienden a "malutilizar" las aguas residuales como aguas de riego.

Por otro lado, el manejo eficiente de la vinaza, cachaza, fertilizantes, riego y demás prácticas agrícolas requiere del conocimiento de las propiedades y procesos edáficos. Dicho conocimiento debe ser de gran escala y, en la medida de lo posible, a nivel de parcela.

Para poder alcanzar ese nivel de detalle, el conocimiento de los productores es de suma importancia (Ortiz et al., 1990; López-Hernández et al., 1992; Licon-Vargas et al., 1992), así como para conocer la historia de uso del suelo, información que ayudará a entender las tendencias de mejoramiento de la tierra o del ritmo de su degradación. Es así como se pueden llegar a seleccionar los indicadores de la calidad del suelo y las propiedades distintivas de las tierras, sin la erogación de cantidades importantes de dinero por el pago de estudios técnicos.

Los indicadores de la calidad del suelo son aquellas propiedades edáficas que pueden considerarse "claves" y que ofrecen información sobre la identificación y seguimiento de las tendencias en la calidad del suelo; evaluación de las prácticas de manejo, la conservación, mejoramiento de las condiciones edáficas; y el aporte de elementos para la toma de decisiones (Papendick y Paar, 1992; Habern, 1992; Parr et al., 1992; Parr y Cousin, 1995).

Por otro lado, el conocimiento de las propiedades distintivas de los suelos sirve para identificar de manera fácil, rápida y barata, los diferentes tipos de tierras y elaborar mapas de mayor detalle, por ejemplo a nivel de parcela y ejido.

Se recomienda la elaboración de una base de datos sobre los suelos (historia de manejo, extensión, propiedades químicas, físicas y biológicas, rendimientos, variedades y prácticas agrícolas en general, información que es de gran valía en la toma de decisiones del ámbito agrícola y ambiental; sin embargo, en el manejo del agroecosistema cañero, es de suma importancia tener o adquirir una visión global del manejo del ecosistema, para lo cual se requiere información de los procesos industriales, ecológicos, económicos y sociales que permitan una toma de decisiones con mayor conocimiento de causa y convertir en una actividad sustentable la producción de caña y alcohol etílico.

En ese sentido, es recomendable diseñar, instalar y operar un sistemas de información geográfica (SIG) que permita, el manejo eficiente de una gran cantidad de información.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

### **6.1 Suelos**

En esta investigación se propone una nueva metodología de levantamiento (inventario) de suelos que consiste en la identificación de las propiedades y procesos distintivos de los suelos (nomenclatura FAO y numérica) a una escala de reconocimiento (1:250,000) y de recomendaciones para el levantamiento a nivel de parcela donde se conjugarían los conocimientos técnico y campesino para pasar a un nivel de detalle, siendo esta última de gran importancia a nivel de producción agrícola.

La importancia de los mapas de suelo a nivel de parcela radica en la posibilidad de realizar un tipo de agricultura denominada "de precisión" debido a que las enmiendas edáficas se realizan solamente en los "parches" que lo necesiten, evitando con esto contaminación del ambiente y el manejo poco adecuado de recursos en enmiendas y fertilizantes. Además, dicha estrategia de estudio disminuye los costos y el tiempo de los levantamientos clásicos de suelo.

Los principales aspectos derivados de este estudio son tres:

1. En la región se encuentran suelos de la unidad Acrisol, Lixisol, Fluvisol y Cambisol. Los dos primeros no habían sido reportados en la cartas edafológica del INEGI en escala 1:250 000.
2. Los principales procesos edáficos detectados son: alto intemperismo (Acrisol y Lixisol), reducción fuerte en la parte baja de casi todos los perfiles (Acrisol, Lixisol y Cambisol); inversión del perfil en el Fluvisol vértico; compactación (Acrisol, Lixisol y Cambisol) y fijación de fósforo en el Acrisol.
3. Las propiedades distintivas de los sitios son: el valor de pH, capacidad de intercambio de cationes, capacidad de campo, densidad real, contenido de arcilla y cantidad de precipitación pluvial.

### **6.2 Vinazas**

1. Los análisis de las vinazas crudas indican que, al ser aplicadas, podrían representar un alto riesgo de salinidad, característica de suma importancia en el cultivo de la caña de azúcar.

Cuando se realiza una caracterización de un efluente con fines de riego agrícola, se determina la conductividad eléctrica y el contenido de cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio) y aniones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos), sin embargo, el análisis detallado de las vinazas permitió detectar que la conductividad eléctrica no es una propiedad importante en la caracterización del efluente ya que no tienen relación con los contenidos de cationes y/o aniones. Es por esto que la conductividad eléctrica no debe considerarse "indicadora de la calidad" de los efluentes con alto contenido de materia orgánica disuelta, cuando dicha caracterización es con fines de aplicación al suelo.

2. Los contenidos de Zn de la VC constituyen un riesgo de contaminación del suelo.
3. La actividad de los microorganismos durante su tratamiento anaerobio y anaerobio-aerobio, modifica considerablemente las características de la vinaza cruda, disminuyendo su carga orgánica, el contenido de carbono soluble y los iones solubles, aumentando el contenido de sustancias húmicas y valor de pH. Dichos cambios podrían favorecer a los suelos en los cuales se apliquen.
4. Los tres tipos de vinazas contienen sustancias húmicas, lo cual puede ocasionar un mejoramiento de las propiedades físicas del suelo como agregación, retención de humedad, densidad aparente y compactación, entre otras. Sin embargo, dichas enmiendas requieren ser evaluadas en los campos de cultivo de caña.  
  
La identificación de sustancias húmicas en un efluente orgánico industrial, proveniente de un proceso biológico de fermentación de corto plazo indica que las teorías de formación de sustancias húmicas deben ser revisadas, debido a que bajo condiciones de anaerobiosis, acidez y de corto tiempo también es posible su formación.
5. Las vinazas crudas no constituyen un peligro de sodicidad.

### **6.3 Experimentos con dos tipos de suelo (Fluvisol y Acrisol)**

En el Acrisol, la aplicación de vinaza cruda constituye un riesgo de salinización y de contaminación por Zinc. El aumento del contenido de manganeso asimilable por las condiciones reductoras generadas por la aplicación de vinaza cruda puede constituir un riesgo de toxicidad para las plantas. Sin embargo, la vinaza cruda presenta varios beneficios potenciales, como: aumento del pH, de calcio, magnesio, potasio, CIC, Fe y fósforo.

La aplicación de vinazas anaerobias en el Acrisol no presenta el riesgo de salinización, ni de contaminación por manganeso. Pero tampoco aumenta el calcio, ni la CIC, ni el Fe. Los riesgos de su aplicación son: aumento mayor del 100% en el contenido de Zn y aumento del sodio intercambiable. Los beneficios son el aumento del valor del pH, los aumentos de fósforo y potasio y la disminución del riesgo de contaminación de los cuerpos de agua aledaños a los sitios de aplicación.

La aplicación de la vinaza anaerobia aerobia en el Acrisol presenta el riesgo de sodificación. Los beneficios potenciales son: aumento del valor de pH, aumento de potasio y disminución del riesgo de contaminación de los cuerpos de agua aledaños a los sitios de aplicación.

El Acrisol se ve muy favorecido por la aplicación de los tres tipos de vinaza debido al aumento del pH. En este suelo se observa una ligera pérdida de la cristalinidad de la halloysita con las VC y VA, lo cual disminuiría la CIC y demás procesos relacionados con la reactividad de los coloides minerales.

En el Fluvisol, la aplicación de vinaza cruda presenta los siguientes riesgos: salinización, aumento de manganeso (II). Los beneficios de la aplicación son: aumento de calcio, magnesio y potasio intercambiables, hierro y fósforo.

La acidez provocada por las VC en el Fluvisol podría ocasionar la destrucción de los aluminosilicatos, motivo por el cual se sugiere aplicarla en otros suelos o realizar el tratamiento anaerobio y, preferentemente, anaerobio-aerobio.

La aplicación de vinazas anaerobias en el Fluvisol, no ocasiona los riesgos generados por la vinaza cruda, el único riesgo detectado se debe al aumento de sodio intercambiable. El beneficio se debe al aumento de potasio intercambiable y a la disminución de la contaminación de los cuerpos de agua aledaños a los sitios de aplicación, en comparación con la aplicación de vinaza cruda.

En el Fluvisol, la aplicación de vinaza anaerobia-aerobia ocasiona un aumento del potasio intercambiable y del fósforo. Al igual que con la vinaza anaerobia, se detecta un aumento del sodio intercambiable.

Comparando entre suelos, en el Acrisol la descomposición de la materia orgánica es mayor cuando se aplican vinazas crudas, también es mayor la retención del carbono orgánico soluble. Por ello, el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua aledaños a los sitios de aplicación es mayor en el Fluvisol que en el Acrisol.

En el Fluvisol, los cambios en los minerales secundarios sugieren la posibilidad de intemperismo de los minerales primarios. Esto ocasionaría, en el largo plazo, un proceso de podzodlización, es decir, de acumulación de compuestos organominerales formados con los óxidos de hierro y aluminio en los horizontes subsuperficiales que podrían ocasionar problemas de toxicidad en la caña de azúcar y la formación de horizontes endurecidos.

La vinaza cruda disminuye la infiltración del agua en ambos suelos.

La aplicación de la vinaza cruda en el suelo puede constituir un riesgo de salinización; sin embargo, este riesgo depende de la dosis aplicada y la unidad de suelo.

Como se esperaba, la mineralización de la materia orgánica soluble se realizó de manera más intensa en el Acrisol que en el Fluvisol. La importancia de la identificación de los suelos con las mejores cualidades de funcionamiento como reactor natural radica en la posibilidad de utilizarlos principalmente en la mineralización del desecho en cuestión (vinazas) sin realizar un gasto energético y económico adicionales. Además, la aplicación de las vinazas debe mejorar las propiedades químicas de estos suelos, especialmente si son caracterizados como de menor calidad agrícola, como el Acrisol y Lixisol.

En el Acrisol los cambios químicos por la aplicación de vinazas son más intensos que en el Fluvisol.

El tratamiento biológico de las vinazas mejora el efluente y a los suelos que lo reciben, aumentando el valor de pH en ambos suelos y sin aumentar la CE. Esto hace que pudieran ser aplicadas en cantidades mucho mayores a las de las vinazas crudas sin constituir un riesgo de manejo aparente.

Estos resultados podrían ser aplicables a otros ingenios azucareros que utilicen ácidos fuertes en la acidificación del mosto. Los suelos de las unidades Acrisol y

Fluvisol son dos de los que se encuentran presentes en los campos de cultivo de la caña de azúcar.

Por los cambios químicos en el suelo, encontrados en este estudio y considerando los grandes volúmenes de aguas residuales generadas en el país en las que la materia orgánica es el principal constituyente ( $105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de aguas residuales domésticas y  $32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de la industria azucarera y alimentaria), se reconoce la necesidad de establecer una línea de investigación tendiente a investigar la utilización de estas aguas residuales en el mejoramiento de los suelos agrícolas del país.

Algunos puntos relevantes para recomendar la aplicación de VC son suelos ácidos de las unidades Acrisol y Lixisol, lugares planos, lugares alejados de los ríos y canales de riego, lugares alejados de los escurrimientos temporales, lejos de las zonas de recarga de los acuíferos, aplicación preferentemente en suelos ácidos. Estas recomendaciones deben acompañar a la realización de estudios de dosificación, así como de acciones de seguimiento de la calidad del agua de los ríos y del acuífero aledaños a las áreas de aplicación.

## CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- Afifi A. y Clark W. (1990). Computer aided multivariate methods analysis. Chapman, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Aguirre A. (1993). Química de los suelos salinos y sódicos. FES-Cuautitlán, UNAM. México, D.F. México.
- Alexander M. (1980). Introducción a la microbiología del suelo. AGT editor, S.A. México, D.F., México.
- Alexander M. y Scow K. (1987). Kinetics of biodegradation in soils. En: Reactions and movement of organic chemicals in soils. Soil Science Society of America, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Alianielo F y Trinchera Alessandra. (1998). Spreading olive oil waste water on soil: effects on the organic matter dynamics. Symposium Criteria for the efficiency and innocuity of organic and mineral amendments. 16<sup>th</sup> Congres mondial de science du sol. Montpellier, Francia.
- Algour F.O. y Kadioglu A. (1992). The effects of vinasses on the growth, biomass and primary productivity in pea (*Pisum sativum*) and sunflower (*Helianthus annuus*). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 39:139-144.
- Anderson D. L. y Bowen J. E. (1994). Nutrición de la caña de azúcar. Instituto de la potasa y el fósforo. Quito, Ecuador.
- Anderson J. e Ingram J (1993). Tropical soil biology and fertility: a hand book of methods. CAB International, Wallingford, Reino Unido.
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. 18<sup>a</sup> Edición. Washington D. C. Estados Unidos de América.
- Arzola N., Pérez H. y Yera B. (1994). Utilization of conventional and non-conventional nutrient source in the sugarcane crop. En: Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agriculture. Presentado en 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. Acapulco, México
- Barrios E., Buresh R. y Sprent J. I. (1996). Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(2):185-193.
- Bautista-Zúñiga F., Luna-Pabello V. y Durán-de-Bazúa C. (1995). El suelo un reactor químico muy interesante. *Educación química*, 6(4):226-230.
- Bautista-Zúñiga F. y Estrada-Medina H. (1998). Conservación y manejo del suelo. *Ciencias*, (50):50-55.
- Bautista-Zúñiga F., Rivas-Solórzano H., Durán de Bazúa C. y Palacio G. (1998). Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas Boletín*, 36:21-33.



- Bautista-Zúñiga F. y Durán-de-Bazúa C. (1998). Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 14(1):11-17.
- Bautista-Zúñiga F. (1998). Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Pub. Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.
- Bautista-Zúñiga F., Jiménez-Osornio J., Navarro-Alberto J., Delgado-Carranza C. y Estrada-Medina H. (1998). Informe interno para el CONACyT del proyecto titulado "Efecto de las leguminosas en la materia orgánica, fauna y microclima del suelo de la milpa en la zona Henequenera de Yucatán, México. Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.
- Beese. (1994) Actividad microbiana. En: Birgham. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Begon M., Haper J. L. y Townsend C. R. (1988). Ecología: individuos, poblaciones y comunidades. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Bell L.C. y Bessho T. (1993). Assessment of aluminum detoxification by organic materials in an Ultisol, using soil solution characterization and plant response. En Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture. Edited by K. Mulongy and R. Mercks. Londres, Reino Unido.
- Berrocal M. (1988). Efecto de los residuos de la industria azúcar-alcoholera, bagazo, cachaza y vinaza, en la producción de caña y azúcar en un Vertisol de Guanacaste. *Agronomía Costarricense*, 12 (2):147-153.
- Bernal I. y Leopold A.C. (1995). Seed stability during storage: Raffinose content and see glassy state. *Seed Science Research*, 5:75-80.
- Bhatii J. S., Comerford N. B. y Johnston C.T. (1998). Influence of soil organic matter removal and pH on oxalate sorption onto a spodic horizon. *Soil Science Society of American Journal*, 62:152-158.
- Biscaye P. I. (1965). Mineralogy and sedimentation on recent deep sea clay in the Atlantic ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76:803-832.
- Blake G. (1976). Particle density. Method of soil analysis. Agronomy, No 9. Part I. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Blakemore L. y Searle P. (1981). Methods for chemical analysis of soils. New Soil Burean Scientific Report 10A. Soil Bureau, Lower Hunt, Nueva Zelanda.
- Bohn H., Mcneal B. y O'Connor G. (1993). Química del suelo. Limusa. México D.F, México.
- Brindley G. W. y Brown G. (Eds). (1980). Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification. The Mineralogical Society Monograph No. 5. Londres, Inglaterra.

- Buol S., Hole F. y McCracken R. (1991). Génesis y clasificación de suelos. Trillas. México D.F. México.
- Buckman H. y Brady N. (1991). Naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA-LIMUSA. México D.F. México.
- Cambardella C. y Elliot E. (1992). Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56:777-783.
- Cameron K. C., Smith N., McLay C., Fraser P., McPherson R., Harrison D. y Harbottle P. (1992). Lysimeters without edge flow: An improved design and sampling procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 56:1625-1628.
- Cameron K. C., MacLaren R. y Adams J. (1994). Applications of municipal sewage sludge to low fertility forest soils: The fate of nitrogen and heavy metals. En: *Soil Chemistry and Environment*. Presentado en: 15th International congress of soil science. International Soil Science Society. Acapulco, México.
- Campos T. y Ríos M. A. (1995). Tratamiento aerobio de vinazas pretratadas anaerobiamente en un reactor de biodiscos de 3 000 litros. Tesis de licenciatura en ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.
- Canalli S., Trinchera A., Pinzari F. y Benedetti A. (1998). Study of compost maturity by means of humification parameters and isoelectric focusing technique. Symposium Criteria for the efficiency and innocuity of organic and mineral amendments. 16<sup>th</sup> Congres mondial de science du sol. Montpellier, Francia.
- Castro J. y Villegas R. (1989). Obtención de proteína microbiana empleando como substrato vinazas de ingenios azucareros-alcoholeros. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Autónoma de San Luis Potosí, SLP. México.
- Chang R. (1987). Fisicoquímica con aplicaciones a sistemas biológicos. CECOSA. México D.F., México.
- Chaves M. y Alvarado A. (1994). Manejo de la fertilización en plantaciones de caña de azúcar (*Sccharum spp*) en andisoles de ladera de Costa Rica. En Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agriculture. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. 353-372. Acapulco, México.
- Chen I., Senesi N. y Schnitzer M. (1977). Information provided on humic substances by E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> ratio. *Soil Science Society of American Journal*, 41: 352-358.
- Coleman D., Oades J. y Uehara G. (1989). Introduction: Soil organic matter: Tropical vs temperate. En: *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Coleman, Oades y Uehara Eds. Niftal Project. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- CNA. (1997). Ley federal de derechos en materia de agua. Comisión Nacional del Agua. México D.F. México.

- Dahlgren R. A. (1994). Weathering environments and the formation of non crystalline materials in volcanic ash soils. En Symposium VIIb. Weathering and the formation of soils minerals. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. 106-115. Acapulco, México.
- Dematté J. L. (1992). Uso agronómico de residuos x fertilizantes na cultura da cana de acucar. Anais XX Reuniao Brasil. Fert. Do solo e nutricao de planta. Piracicaba, 213-251.
- Domenéch X. (1995). Química del suelo: El impacto de los contaminantes. Miraguano. Madrid, España.
- Durán-de-Bazúa C. (1988). Tratamiento biológico de aguas residuales. Pub. Deptac, Cuernavaca, Morelos, México.
- Durán-de-Bazúa C., Medellín P., Noyola A., Poggi-Varaldo H. y Zedillo L. (1988). Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos. Tecnología y ciencia Ed. IMIQ, 3(2):33-43.
- Durán-de-Bazúa C., Zámano-Pérez A. H. y Zedillo-Ponce-de-León L. E. (1991b). Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria alcoholera. Informe Técnico VIN-01-91. Fac. de Química, UNAM. México, D. F., México.
- Durán-de-Bazúa C., Noyola A., Poggi-Varaldo H. y Zedillo L. (1991a). Biodegradation of process industry wastewater. Case problem: sugarcane industry. En Biological degradation of wastes. A. M. Martín, editor. Cap. 17 Pp. 363-388. Elsevier Appl. Sci. Londres, Inglaterra.
- Durán-de-Bazúa C., Noyola A., Poggi H. y Zedillo L. (1994). Paquete tecnológico para tratar vinazas de ingenios azucareros-alcoholeros: Sistema anaerobio-aerobio. *Revista IMIQ*, 35(8):42-47.
- Durán-de-Bazúa C. (1994). Aplicaciones de la biotecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. *Revista IMIQ*, 35(9):18-25.
- Elliot E. y Cambardella C. (1991). Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 34:407-419.
- EPA. (1990a). The lake and reservoir restoration guidance manual. EPA, Washington D.C., Estados Unidos de América.
- EPA. (1990b). Monitoring lake and reservoir restoration. EPA, Washington D.C., Estados Unidos de América.
- EPA. (1993). Fish and fisheries management in lakes and reservoirs. EPA, Washington D.C., Estados Unidos de América.
- Ezcurra E. y Becerra J. (1987). Experimental Decomposition of Litter from the Tamaulipan Cloud Forest: A Comparison of Four Simple Models. *Biotropica*, 19(3): 290-296.
- Francioso O., Ciavatta C., Tugnoli V., Sánchez-Cortés S. y Gessa C. (1998). Spectroscopic characterization of pyrophosphate incorporation during extraction of peat humic acids. *Soil Science Society of America Journal*, 62:181-187

- Fundación Produce Tabasco. (1997). Caña de azúcar: Suplemento alimenticio para ganado. Fundación Produce Tabasco, A. C. Villahermosa, Tabasco, México.
- Fuller W. y Warrick A. (1985). Soils in waste treatment and utilization. Vol. I y II. CRC Press. Florida, Estados Unidos de América.
- García C., Hernández T. y Costa F. (1991a). The influence of composting on fertilizing value of an aerobic sewage sludge. *Plant and Soil*, 136:269-272.
- García C., Hernández T. y Costa F. (1991b). Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes. *Environmental Management*, 15(3):433-439.
- Gavinelli E., Feller C., Larré-Larrouy M., Bacye B., Djegui N. y Nzila D. (1995). A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. *Communication of Soil Science and Plant Analysis*, 26:1749-1760.
- Greenland D. (1965). Interactions between clays and organic compounds in soils. Part II. Adsorption of soil organic compounds and its effects on soil properties. *Soils and Fertilizers*, 28(6):521-532.
- Griffith S. y Schnitzer M. (1975). Analytical characteristics of humic and fulvic acids extracted from tropical volcanic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 39:861-866.
- Gutiérrez M., Siebe C. y Sommer I. (1994). Environmental aspects of land application of wastewater from Mexico City metropolitan area: A bibliographical review and analysis of implications. En Simposio ID-18 Rational use of sewage sludge and city waste material in agriculture. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. International Soil Science Society. Acapulco, México.
- Haberern J. (1992). Coming full circle: the new emphasis on soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7:3-4.
- Hayes M. H. y Bolt G. H. (1991). Soil colloids and the soil solution. En Interactions at the soil colloids-soil solution interphase. Kluwer Academic Publishers. Amsterdam, The Netherlands.
- Houba J., van der Lee J. J., Novozamsky I. y Walinga I. (1988). Soil and plants analysis, Part 5, Soil Analysis Procedures. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Huang W. y Keller W. (1972). Organic acids as agents of chemical weathering of silicate minerals. *Nature Physic Science*, 293:149-151.
- Huang W. (1993). Impact of interactions among soil minerals, organic and microbes on agroecosystems. En Agroecología, sostenibilidad y educación. R. Ferrera y R. Quintero Eds. 79-97. Colegio de Postgraduados. Edo. de México, México.
- Huang P. M. (1994). Role of organics and microbes in mineral transformations. En Simposio 8a Weathering and the formation of soil minerals. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. International Soil Science Society. Acapulco, México.

- Ilangovan K. y Noyola A. (1993). Availability of micronutrients during anaerobic digestion of molasses stillage using an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Environmental Technology*, 14:795-799.
- INEGI (1984a). Carta edafológica. Veracruz E14-3. Escala 1:250,000. México D.F. México.
- INEGI. (1984b). Carta geológica. Veracruz E14-3. Escala 1:250,000. México D.F. México.
- INEGI. (1984c). Carta de uso de suelo y vegetación. Veracruz E14-3. Escala 1:250,000. México D.F. México.
- INEGI. (1984d). Carta efectos climáticos regionales noviembre-abril. Veracruz E14-3. Escala 1:250,000. México D.F. México.
- INEGI. (1984e). Carta efectos climáticos regionales mayo-octubre. Veracruz E14-3. Escala 1:250,000. México D.F. México.
- INEGI. (1984f). Carta hidrológica de aguas subterráneas. Veracruz E14-3. Escala 1:250,000. México D.F. México.
- INEGI. (1984g). Carta topográfica. Córdoba E14-3. Escala 1:50,000. México D.F. México.
- INEGI. (1994). Estadísticas del medio ambiente: México, 1994. INEGI. Aguascalientes, Ags. México.
- Ingham E. (1994). Protozoa. En: Birgham. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Jackson M. (1970). Análisis químico de suelos. Omega. Barcelona, España.
- Jenny H., Gessel S. y Bingham F. (1949). Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science*, 68:419.
- Jiménez R. M. y Martínez M. A. (1995). Instalación y arranque de un reactor anaerobio en un tren anaerobio-aerobio de una planta piloto de tratamiento de vinazas. Tesis de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.
- Jongerman R. H., Ter-Braak C. J. y van Tongeren O. F. (1987). Data analysis in community and landscape ecology. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Kaiser K., Guggenberger G. y Zech W. (1996). Sorption of DOM and DOM fractions to forest soils. *Geoderma*, 74:281-303.
- Kaiser K. y Zech W. (1997). Competitive sorption of dissolved organic matter fractions to soils and related mineral phases. *Soil Science Society of America Journal*, 61:64-69.

- Kaiser K. y Zech W. (1998). Soil dissolved organic matter sorption as influenced by organic and sesquioxide coatings and sorbed sulfate. *Soil Science Society of America Journal*, 62:129-136.
- Kaiser K y Zech W. (1998). Mobility of dissolved organic matter in shallow soils. Symposium Geochemistry of fluids (air and water) in soils. 16<sup>th</sup> Congres mondial de science du sol. Montpellier, Francia.
- Keeling A.A., Paton I.K., y Mullett J.A. (1994). Germination and growth of plants in media containing unstable refuse-derived compost. *Soil Biology and Biochemistry* 26:767-772.
- Klomp E., Clancy J. y Durán-de-Bazúa C. (1995). Contaminación de aguas y uso de la energía en la industria azucarera. Una comparación entre México y Holanda. *Revista IMIQ*, 36:7-26.
- Kovach W. (1995). MVSP plus version 2.2. Users Manual. Warren L. Kovach. Wales, Reino Unido.
- Lacy R. (1993). La calidad del aire en el valle de México. Colegio de México. México D.F. México.
- Larson R. y Hufnal J. (1980). Oxidative polymerization of dissolved phenols by soluble and insoluble inorganic species. *Limnology and Oceanography*, 25(3):505-512.
- Lavelle P., Blanchart E., Martin A., Martin S. (1993). A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: Application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, 25(2):130-150.
- Lee N. L., El-Sayed M. y Moftah A. E. (1989). Hydrolytic transformations of organic chemicals in the environmental. En Reactions and movement of organic chemicals in soils. SSSA, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Lehninger A., Nelson D. y Cox M. (1993). Principles of biochemistry. 2a edición. Woth Pub. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Legendre L. y Legendre P. (1983). Numerical ecology. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, The Netherlands.
- Liang B., Gregorich E., Schnitzer M. y Schulten H. (1996). Characterization of water extracts of two manures and their adsorption on soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60:1758-1763.
- Licona-Vargas A., Ortiz-Solorio C. A., Pájaro-Huertas D. y Ortega-Paczka R. (1992). Utilidad de las clases de tierras campesinas en el análisis de la técnica de producción agrícola en ejidos del centro de Veracruz, México. *Agrociencias*, 3(4): 107-118.
- Lindsay W. (1988). Chemical equilibria in soils. Wiley and Sons. Nueva York, Estados Unidos de América.

- López-Hernández J. R., Ortiz-Solorio C. A., Ojeda-Trejo E. y Ramírez-Guzmán M. E. (1992). Definición de las cualidades de la tierra en el ejido San Salvador Atenco. *Agrociencia*, 3(4):69-89.
- Luna-Pabello V., Aladro A. y Durán-de-Bazúa C. (1994). Efecto del substrato sobre las poblaciones de ciliados en un reactor de biodiscos. Volumen 3, Serie Química ambiental del agua. Pub. PIQAYQA. Facultad de Química. México D. F., México.
- Martínez J. y Ortiz C. (1992). Cartografía campesina de tierras de Villa de Hidalgo, Zacatecas y su comparación con la carta edafológica de INEGI. *Terra*, 10(2):140-150.
- Mathur S. P., Dinel H., Owen G., Schnitzer M. y Dugan J. (1993). Determination of compost biomaturity. II. Optical density of water extracts of composts as a reflection of their maturity. *Biol. Agric. Hort*, 110:87-108.
- McBride M. B. (1979). Reactivity of adsorbed and structural iron in hectorita as indicated by oxidation of benzidine. *Clays and Clay Minerals*, 27:224-230.
- McBride M. B. (1982). Organic anion adsorption on aluminum hydroxides: Spine probe studies. *Clay and Clay Minerals*, 30(6):438-444.
- McBride M. B. (1989). Surface chemistry of soil minerals. En *Minerals in soil environment*. Soil Science Society of America, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Mejía G. (1994). Digestión anaerobia. Folleto técnico 1. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida Yucatán, México.
- Moreno G. (1994). Estudio ambiental del Ingenio Fomento Azucarero. Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México D.F., México.
- Munsell (1994). Munsell soil color charts. U.S. Dept. Agriculture Handbook 18- Soil survey manual. Estados Unidos de América.
- Nelson D. W. y Sommers L. E. (1987). Organic matter. En *Methods of soil analysis. Part II. Chemical and microbiological properties*. Ed. Page. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of American*. Series Agronomy # 9. Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Niemeyer J., Chen I. y Bollag J. (1992). Characterization of humic acids, compost and peat by diffuse reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 56:135-140
- Oades M. J., Gillman G. P., Ueharaet G., Hue N. V., Noordwijk M., Robertson P. y Wada K. (1989). Interactions of soils organic matter and variable charge clays. En *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystem*. University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- Oades M. J. (1989). An introduction to organic matter in mineral soils. En *Minerals in soil environments*. Eds. Dixon y Weed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América.

- Okalebo J. R., Gathua K. W. y Woomer P. L. (1993). Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual. Tropical Soil Biology and Fertility Program (TSBF). Nairobi, Kenia.
- Olvera P. (1992). Tratamiento aerobio de vinazas provenientes de un reactor anaerobio de lecho de lodos en un reactor de biodiscos. Informe técnico de trabajo VIN-01-92. UNAM-UASLP (Huastecas). México D.F. México.
- Orlando F. (1985). Potassium nutrition in sugarcane. En Potassium in agriculture. Ed. R. Munson and American Society of Agronomy. Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Orlando F. (1994). Alternatives for an efficient use of mineral fertilizers and sugar factory residues with low soil degradation and environment contamination risks. En Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agriculture. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. 395-405. Acapulco, México.
- Ortiz C., Pájaro D. y Ordaz V. (1990). Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Estado de México, México.
- Ortiz C. (1991). El concepto campesino de tierra. En: Tovar, S., J.L. y R. Quintero (Eds.) La investigación edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV congreso nacional de la ciencia del suelo. Pachuca, Hidalgo, México.
- Otero M. A. y González J. (1991). Análisis de la fracción metálica de las mieles del CAI-Guatemala. *Instituto Cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar*, 25:11-14.
- Page A., Lue-Hing C. y Chang A. (1986). Utilization, treatment, and disposal of waste on land. Soil Science Society of America. Madison. Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Pandiyani T., Ilangovan K., Rosas L., Noyola A., y Durán-de-Bazúa C. (1993). Características espectrales con <sup>13</sup>C RMN de efluentes de destilerías tratados anaerobiamente en un reactor tipo UASB (Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA) con Fe (III) y Fe (II). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 9:113.
- Papendick R. y Parr F. (1992). Soil quality: The key to a sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7:2-3.
- Parr J., Papendick R., Hornick S. y Meyer R. (1992). Soil quality: Attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7:5-11.
- Parr J. y Cousin S. (1995). Soil biological health and agroecological change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 56:137-148.
- Paul E. y Clark F. (1989). Soil microbiology and biochemistry. Academic Press. California, Estados Unidos de América.



- Peavy H., Rowe D. y Tchobanoglous G. (1985). Environmental engineering. McGraw Hill. Singapur.
- Pizarro F. (1978). Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos y sódicos. Ed. Agrícola española. Madrid, España.
- Rangel L. y García A. (1994). Multivariate prediction of values of soil properties at unsampled sites by means of matrix cokriging. En Symposium ID-15. Soil data needs for expressing land qualities at different scales 289-290. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. Acapulco, México
- Recous S., Richard G., Fruit L., Chenu C. y Angers D.A. 1998. Factors affecting the contact between soil and incorporated crop residues: short-term effects on C evolution. Symposium impact of soil mineral-organic-micro-organisms interactions on the cycling and bioavailability of elements. 16<sup>th</sup> Congres mondial de science du sol. Montpellier, Francia.
- Richards A. (1985). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México D. F., México.
- Rivas S. H., Bautista-Zúñiga F. y Durán-de-Bazúa C (1996). Estudio y evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas aledañas al ingenio azucarero "El Potrero" en Córdoba, Veracruz, México. Informe técnico del proyecto SUELO-01-96. Pub. UNAM. Facultad de Química, Programa de Ingeniería Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA). México D.F. México.
- Rivas S. H. (1997). Estudio y evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas aledaños al ingenio azucarero "El Potrero" en Córdoba, Veracruz, México. Tesis profesional de biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México D.F. México
- Rodríguez R. (1994). El cultivo de la caña de azúcar en México. Trujillo, México D. F. México.
- Rosas L., Saulés A., Espinosa A., Ilangovan K. y Noyola A. (1993). Efecto de los micronutrientes en la degradación anaerobia de ácidos grasos volátiles en un reactor UASB alimentado con vinazas. *Biotecnología*, 3:59-66.
- Saá A., García C., Cives J., Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leiros C. y Ceccanti B. (1994). Biochemical properties development and humification in mine spoils amended with cattle slurry. En Soil Chemistry and Environment. 15th International congress of soil science. Acapulco, México.
- Sawhney B. L. y Brown K. (1989). Kinetics of biodegradation in Soil. En Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soils. Ed. Soil Science Society of America y American Society of Agronomy. Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Schnitzer M. (1978) Characterization of humic constituents by spectroscopy. En: Soil organic matter. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.
- Schnitzer M. y Schuppli P. (1989). Method for sequential extraction of organic matter from soils and soil fractions. *Soil Science of America Journal*, 53:1418-1424.

- Shindo H. y Huang P. M. (1984). Catalytic effects of Mn, Fe, Al y Si oxides on the formation of phenolic polymers. *Soil Science Society of America Journal*, 48:927-934.
- Shugahara K. y Inoko A. (1981). Composition Analysis of Humus and Characterization of Humic Acid obtained from City Refuse Compost. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2:213-224.
- Sing J. S. y Gupta S. R. (1977). Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The botanical review*, 43 (4):449-528.
- Smith O. L. (1982). Soil microbiology: A model of decomposition and nutrient cycling. CRC Press. Florida, Estados Unidos de América
- Sommers L. y Lindsay W. (1979). Effect of pH and redox on predicted heavy metal-chelate equilibria in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 43:39-46.
- Spaargaren O. C. (1994). World reference base for soil resources. ISSS-ISSRIC-FAO. Roma, Italia.
- Stevenson F. J. (1982). Humus chemistry. Jonh Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Stumm W. (1986). Coordinative interactions between soil solids and water- An aquatic chemist's point of view. *Geoderma*, 38:19-30.
- Subirós J. y Molina E. (1992). Efecto de la aplicación de vinazas en la producción de caña de azúcar en las características químicas de un inceptisol de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 16 (1):55-60.
- Swift M., Heal O. y Anderson J. (1979). Decomposition in terrestrial ecosystems Studies in ecology volume 5. University of California press. California, Estados Unidos de América.
- Szabolcs I. (1989). Salt affected soil. CRC Press. Florida, Estados Unidos de América.
- Tarchitzky J., Chen I. y Banin A (1993) Humic substances and pH effects on sodium and calcium montmorillonite flocculation and dispersion. *Soil Science Society of America Journal*, 57.367-372
- Tate R. (1992). Soil Organic Matter Biological and Ecological Effects. Krieger Ed. Florida, Estados Unidos de América.
- Theng B. (1982). Clay-polymer interactions: Summary and perspectives *Clay and clay minerals*, 30(1):1-10.
- Theocharopoulos S., Petrakis P. y Trikatsoula A. (1997). Multivariate analysis of soil grid data as a soil classification and mapping tool: the case study of a homogeneous plain in Vagia, Viotia, Greece. *Geoderma*, 77(1): 63-79.
- Tiller L. y Murray B. (1982). Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in organic and mineral soil columns. *Soil Science*, 134:198-205.

- Tricart J. y Killian J. (1982). La ecogeografía y la ordenación del medio natural. Editorial Anagrama. Barcelona, España.
- Valdés E., González P. y Obaya M. (1991a). Evaluación preliminar de lodos "anaeróbicos" como complemento en la dieta animal. *Instituto Cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar*, 25:1-4.
- Valdés E., Obaya M. y León O. (1991b). Evaluación preliminar de lodos "anaeróbicos" como "biofertilizantes". *Instituto Cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar*, 25:15-18.
- van Bochove E., Couillard D., Schnitzer M. y Schulten H. (1996). Pyrolysis-field ionization mass spectrometry of the four phases of cow manure composting. *Soil Science Society of America Journal*, 60:1781-1786.
- Varadachari C., Haque A., Nayak D. y Ghosh K. (1994). Clay-humus complexation: effect of pH and the nature of bonding. *Soil Biology and Biochemistry*, 26(9):1145-1149.
- Villatoro J. (1998). Estudio de la transformación de la materia orgánica biodegradable de la vinaza cruda y tratada en los suelos Acrisol y Vertisol, del municipio Miguel Alemán en el estado de Veracruz, México. Tesis de Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México D.F. México.
- Yaron E. y Shalhevet O. (1966). A method for uniform packing of soil columns. *Soil Science*, 101:205-215.
- Yeomans J. C. y Bremner J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication in Soil Science and Plant Nutrition*, 19:1467-1476.
- Yokoi H., Tsutsui T., Mori Y. y Minati T. (1991) Selective removal of sugar from aqueous solutions by adsorption on precipitated iron (III) hydroxide. *Chemistry letters*, 2231-2232.
- Webster R. y Oliver M. A. (1990). Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press. Oxford, Inglaterra.
- Zibilske L. (1994). Carbon mineralization. En *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. Ed. Birgham. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América.

## GLOSARIO

Acrisol Suelo ácido de baja capacidad de intercambio de cationes, altamente intemperizado

Alofano. Mineral secundario derivado de ceniza volcánica con forma de espiral pero sin presentar estructura cristalina. Retiene más agua que cualquier arcilla silicatada, posee alta capacidad de intercambiar cationes y fija fuertemente al ion fosfato

Boehmita Mineral. Hidróxido de aluminio [AlOOH]

Cachaza. Residuo proveniente de la neutralización del jugo con cal dentro del procesos de clarificación de las mieles del azúcar

Cálcico. Connotativo de acumulación de carbonato de calcio

Calicata. Término técnico que se utiliza para nombrar al hoyo que se realiza para la observación y descripción del perfil del suelo

Cámbico Connotativo de cambio en color, consistencia o estructura

CE Conductividad eléctrica

CIC. Capacidad de intercambio de cationes. Sitios con carga negativa que se encuentran en la superficie de los coloides del suelo

Coloides. En el estado coloidal interaccionan dos componentes (fases). las partículas (fase dispersa) y medio en el que se encuentran (fase de dispersión). A la fase dispersa del estado coloidal se le denomina "coloide". Los coloides son partículas de tamaño muy pequeño, entre uno y 2000 nm (Mc Bride, 1989); presentan cargas eléctricas superficiales; y una gran área superficial. Tales propiedades generan una tercera fase llamada de interacción. Las interacciones entre coloides pueden ser de dos tipos. de acercamiento o de repulsión. llamadas también floculación y dispersión. respectivamente. En el suelo se encuentran coloides de dos tipos inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos pueden dividirse en dos, aluminosilicatos laminares y óxidos de hierro, aluminio y manganeso (OXI). Los orgánicos son las sustancias húmicas y los polisacáridos

Complejo Iones complejos, frase que se refiere a la combinación de un catión central con uno o más ligandos o ligantes

Cristobalita. Mineral de sílice, [polimorfo de SiO<sub>2</sub>]

Croma. Término utilizado para designar al color espectral del suelo, diferente de la pureza e intensidad del color.

Cuarzo Mineral de sílice [SiO<sub>2</sub>]

Deluvi6n Término que se refiere a los productos del intemperismo removidos y depositados en las laderas y al pie de las mismas. La remoci6n se produce por

escurrimientos de origen pluvial y nival en las laderas y por corrientes generalmente permanentes. en la base

Degradación. En microbiología es equivalente a descomposición de sustancias orgánicas

Desintegración. Descomposición de un todo por separación de sus elementos que lo integran

Descomposición La descomposición consiste de dos subprocesos, la mineralización y la humificación, los cuales se encargan de evitar la acumulación desmedida de los restos orgánicos en los ecosistemas (Swift et al. 1979; Begon et al. 1988). Para detalles ver página 15

Disturbio. Alteración, perturbación.

Escorrentía. Proceso de movimiento del agua en la superficie terrestre, a manera de un manto, que se lleva a cabo, fundamentalmente en las laderas, después de fuertes precipitaciones pluviales. En otro caso, la escorrentía consiste en una serie de corrientes menores que originan cárcavas

Eútrico. Connotativo de fértil o de alta saturación de cationes

Fluvisol. Suelo de origen aluvial

Gélico. Connotativo de frío

Gléicas. Connotativo de acumulación de agua. condiciones de reducción

Gypico. Connotativo de acumulación de yeso

Halloysita Mineral Arcilla del tipo de los aluminosilicatos 1:1, no expandible de origen volcánico  $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8 \cdot 4H_2O]$

Hematita. Mineral de hierro  $[Fe_2O_3]$

Horizonte Material edáfico que muestra organización pedológica única "Capas" horizontales del suelo que se presentan como resultado de los procesos (edafogenéticos) de acumulación, pérdida y transformación de los materiales del suelo

Humus. El conjunto de sustancias húmicas denomina humus, son compuestos poliméricos y coloidales (de algunas decenas a 1000 nm), de coloración amarilla a marrón-negruzca, tienen altos pesos moleculares, son amorfas: presentan núcleos aromáticos y cadenas alifáticas y, en general, son resistentes a la descomposición. Las SH son de tres tipos: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (Hm), siendo las dos primeras las más importantes. En promedio, los AH contienen 10% más C pero 10% menos O que los AF. En ambos tipos de ácidos, los contenidos de C y O son los más importantes. Las diferencias en contenidos de H, S y N entre AF y AH son bajas. La acidez total de los AF es mayor que en los AH y ambos contienen aproximadamente las mismas concentraciones de fenoles, cetonas y grupos  $OCH_3$  por unidad de peso. Los AF son ricos en grupos alcohólicos. En los AH

el 78% del O se localiza en los grupos funcionales, en cambio, en los AF se encuentra distribuido homogéneamente. Los AH presentan concentraciones mayores de estructuras condensadas de anillos aromático que los AF, así como una menor cantidad de cadenas alifáticas

**Ligando o ligante** Un ligando es cualquier ion o molécula presente en la esfera de coordinación del ion central, como lo es el agua en el caso de  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ . Los ligandos polidentados son comúnmente moléculas orgánicas llamadas quelatos

**Llanura.** Sinónimo de planicie

**Mineralización.** Conversión de un elemento de una forma orgánica a una inorgánica Aplicada específicamente al C y demás elementos biogénicos Para detalles ver página 15

**Mólico.** Connotativo de buena (granular o de bloques subangulares) superficial del suelo

**Nanómetro.** Unidad de longitud  $10^{-9}$  m

**Ocrico.** Horizonte con colores claros, con alta intensidad y bajos contenidos de materia orgánica

**Oxidación.** Pérdida de electrones que sufre una sustancia. Siempre que una sustancia se oxida otra se reduce

**Oxohidroxos.** Término utilizado para mencionar a los óxidos e hidróxidos de algunos metales

**pe.** Actividad del electrón definida como:  $\text{pe} = -\log(e^-)$ ;  $\text{pe} = \text{Eh}/0.059$ . Por analogía con el pH

**Perfil** Un perfil edáfico es una columna vertical del suelo suficientemente amplia en volumen y en dimensiones laterales como para evaluar e ilustrar las propiedades del suelo

**Permafrost** Horizonte o capa fría, con temperaturas de  $0^\circ\text{C}$  o menos

**Planicie de piedemonte.** Se sitúa en las base de las montañas Es una superficie inclinada de clara expresión morfológica que se extiende hacia las planicies contiguas; formada principalmente por la fusión de conos de eyecciones. lo que le da un dibujo en plano, con curvas de nivel de ondulaciones suaves

**Quelato.** Del griego que significa pinza En química, el término se refiere a los complejos o las sustancias formadas por compuestos orgánicos o agentes quelantes, solubles en agua, capaces de formar enlaces con cationes metálicos. Estos cationes se intercambian con otros cationes porque su ionización, a partir de un agente orgánico quelante, es muy débil

**Reducción.** Ganancia de electrones que sufre una sustancia. Siempre que una sustancia se reduce otra se oxida

Smectita. Mineral secundario, arcilla aluminio-silicatada del tipo 2:1 expandible con capacidad de intercambio de cationes de entre 60 y 120 meq/100 g. También llamada montmorilonita

Solonetz. Horizonte con un contenido mayor del 15% de sodio intercambiable.

Tasa. Relación, razón En inglés ratio.

Vértico. Connotativo de invertir o voltear

Vertisol. Suelo que presenta grietas de un espesor de un centímetro o más con una profundidad mayor de un metro

## Apéndice 1. Clasificación de suelos

**Apéndice 1-1. Propiedades químicas de los suelos de municipio de Atoyac, Córdoba, Veracruz México.**

Localidad	Prof	pH (H <sub>2</sub> O)	C	CIC* BaCl <sub>2</sub>	CIC** AcNH <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	K	P	Ret-P	Fe	Al	Si
	cm	1 2 5	%	c mol (+) kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>	%			
Ojo de Agua	0-20	4.48	4.37	14.0	4.09	0.69	0.37	0.08	0.29	11.08	38.76	0.28	0.66	0.03
	20-28	4.88	1.49	10.2	3.51	0.81	0.22	0.08	0.12	1.98	43.41	0.36	0.66	0.02
	28-36	5.2	2.48	4.2	9.29	2.6	0.48	0.1	0.07	0.41	42.10	0.39	0.66	0.03
	36-50	5.36	1.38	4.2	13.57	4.05	0.47	0.16	0.07	0.48	48.30	0.15	0.42	0.03
El Potrero	0-30	6.16	3.78	30.2	25.45	16.67	2.57	0.17	0.95	21.42	21.98	0.36	0.31	0.04
	30-44	6.45	3.30	31.0	24.11	16.13	2.48	0.15	0.53	9.1	23.16	0.29	0.29	0.04
	44-60	6.83	1.94	27.2	17.03	10.54	2.61	0.17	0.30	0.92	25.19	0.21	0.30	0.03
	60-110	6.95	1.31	21.8	12.9	8.76	1.11	0.18	0.27	0.61	27.52	0.25	0.27	0.04
La Loma	0-21	4.91	1.66	27.2	4.73	2.54	0.85	0.15	0.24	4.64	23.29	0.20	0.33	0.02
	22-36	4.90	3.31	13.0	4.74	2.60	0.91	0.14	14	2.75	27.16	0.18	0.32	0.02
	36-60	5.13	2.05	3.6	4.14	2.44	0.58	0.21	0.8	0.53	35.84	0.12	0.35	0.03
San Joaquín	0-36	5.76	3.75	8.6	16.79	8.79	4.22	0.27	0.15	9.76	19.75	0.25	0.20	0.02
	36-60	6.40	1.87	6.4	21.15	9.15	7.0	0.65	0.12	0.53	24.63	0.10	0.19	0.04
Cuitlahuac	0-21	6.62	3.73	20.0	17.18	10.12	5.43	0.18	0.59	22.65	12.34	0.16	0.13	0.02
	21-33	6.81	2.94	10.2	15.27	9.65	4.29	0.36	0.21	5.25	18.80	0.15	0.16	0.03
	33-64	6.99	2.1	3.0	17.83	10.25	5.82	0.71	0.16	0.53	27.84	0.16	0.25	0.05
San José de Abajo	0-20	4.50	2.66		15.12									
	20-40	4.60	0.74		9.20									
	40-60	4.50	0.38		9.83									
La Providencia	0-16	5.40	3.52		14.38									
	16-27	5.20	3.16		17.55									
	27-47	5.30												
	47-80	5.1	0.49		9.41									
Pozo 1	0-25	6.1	7.26		18.27									
Pozo 2	0-25	5.5	2.42		12.05									

Prof= profundidad, CIC= capacidad de intercambio de cationes, CC= capacidad de campo y Ret-P= retención de fosfatos

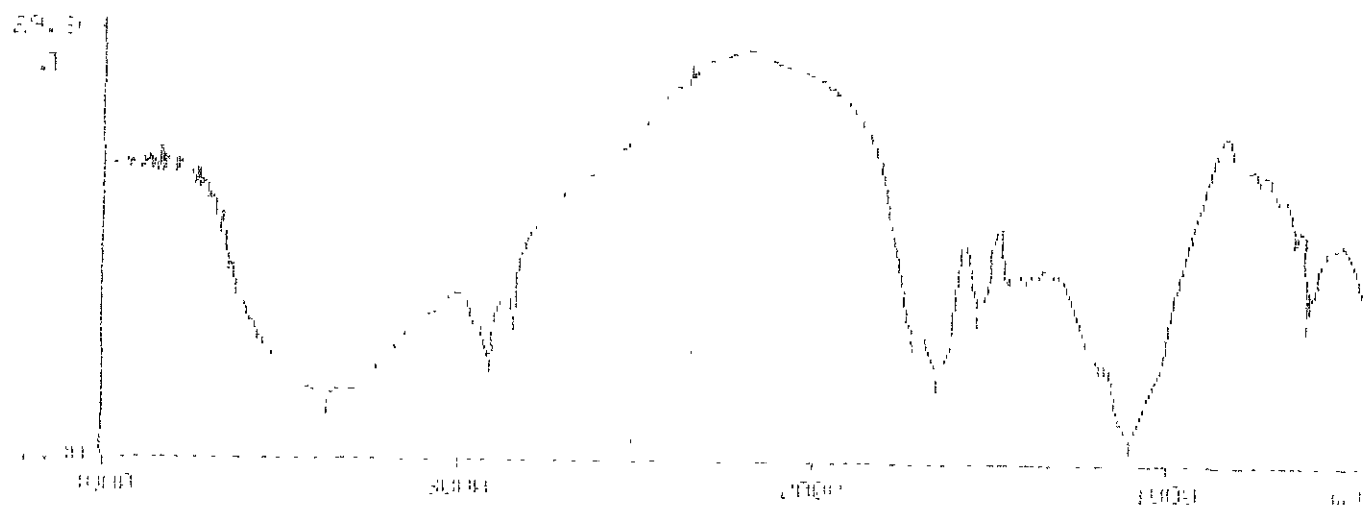


**Apéndice 1-2. Propiedades físicas y químicas de campo de los suelos de municipio de Atoyac, Córdoba, Veracruz México.**

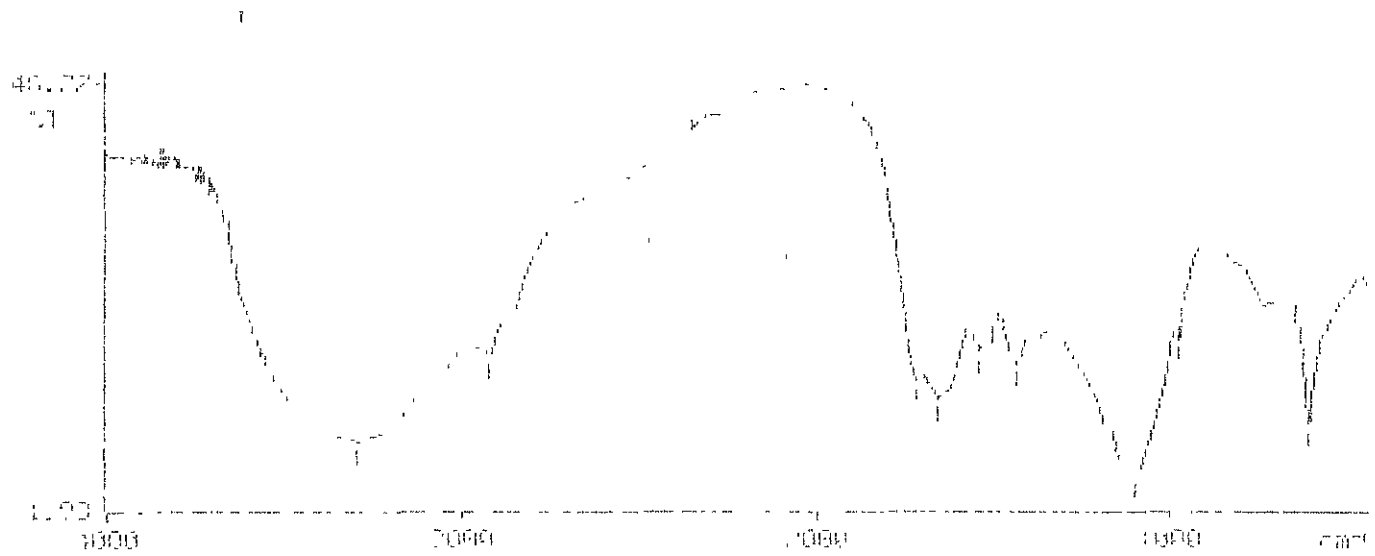
Localidad	Prof cm	DR g mL <sup>-1</sup>	DA	CC	Arcilla %	Limo	Arena	Clasificación	Color		Reacción	
									seco	húmedo	HCl	NaF
Ojo de Agua	0-20	2.69	0.96	40.75	44.33	27.4	28.2	Arcilla	10YR 3/3	10YR 2/1	no detectada	alta
	20-28	2.52	0.96	37.87	45.34	32.3	22.3	Arcilla	10YR 4/4	10YR 2/2	no detectada	alta
	28-36	2.65	0.96	34.77	50.4	19.4	30.2	Arcilla	10YR 4/4	10YR 2/2	no detectada	alta
	36-50	2.54	0.96	36.52	65	15	20	Arcilla	10YR 5/6	5YR 3/3	no detectada	alta
El Potrero	0-30	2.79	1.04	31.53	45.8	28.4	25.7	Arcilla	10YR 3/2	10YR 2/1	no detectada	baja
	30-44	2.49	1.16	35.56	31.6	44.4	23.9	Franco-arcillosos	10YR 4/3	10YR 2/1	no detectada	baja
	44-60	2.73	1.11	32.43	37.9	32.1	31.3	Franco-arcillosos	10YR 4/3	5YR 3/2	no detectada	alta
	60-110	2.64	1.02	34.39	46.7	20.5	32.7	Arcilla	7.5YR 5/4	5YR 3/3	no detectada	alta
La Loma	0-21	2.65	1.05	36.61	73.4	16.0	10.6	Arcilla	5YR 5/6	2.5YR 3/4	no detectada	baja
	22-36	2.64	1.05	37.76	77.5	18.0	4.5	Arcilla	5YR 5/6	2.5YR 3/4	no detectada	baja
	36-60	2.49	0.97	42.62	49.3	16.0	34.6	Arcilla	5YR 6/8	5YR 4/4	nd	alta
San Joaquín	0-36	2.77	1.09	33.31	35.5	28	36.5	Migajón-arcilloso	10YR 6/2	10YR 3/2	nd	baja
	36-60	2.33	1.00	36.71	41.4	20	38.5	Arcilla	7.5YR 6/6	7.5YR 4/4	nd	alta
Cuiclahuac	0-21	2.72	1.18	27.75	35.5	18	46.5	Arcillo-arenoso	10YR 5/2	10YR 2/1	nd	baja
	21-33	2.45	1.17	28.23	37.4	18.1	44.5	Migajón-arcilloso	10YR 5/3	5YR 3/1	nd	media
	33-64	2.42	1.02	35.07	35.4	26	38.5	Migajón-arcilloso	10YR 7/6	7.5YR 5/4	nd	alta
San José de abajo	0-20			39	50	20	30	Arcilla			nd	
	20-40			40	54	12	34	Arcilla			nd	
	40-60			40	56	10	34	Arcilla			nd	
La Providencia	0-16			25	22	30	48	Franco			nd	
	16-27			27	26	30	44	Franco			nd	
	27-47			37	46	30	24	Arcilla			nd	
	47-80			36	44	23	33	Arcilla			nd	
Pozo 1	0-25			15	8	22	70	Migajón arenoso			nd	
Pozo 2	0-25			22	18	28	54	Migajón arenoso			nd	

## Apéndice 2. Espectros de infrarrojo de los ácidos húmicos de las vinazas

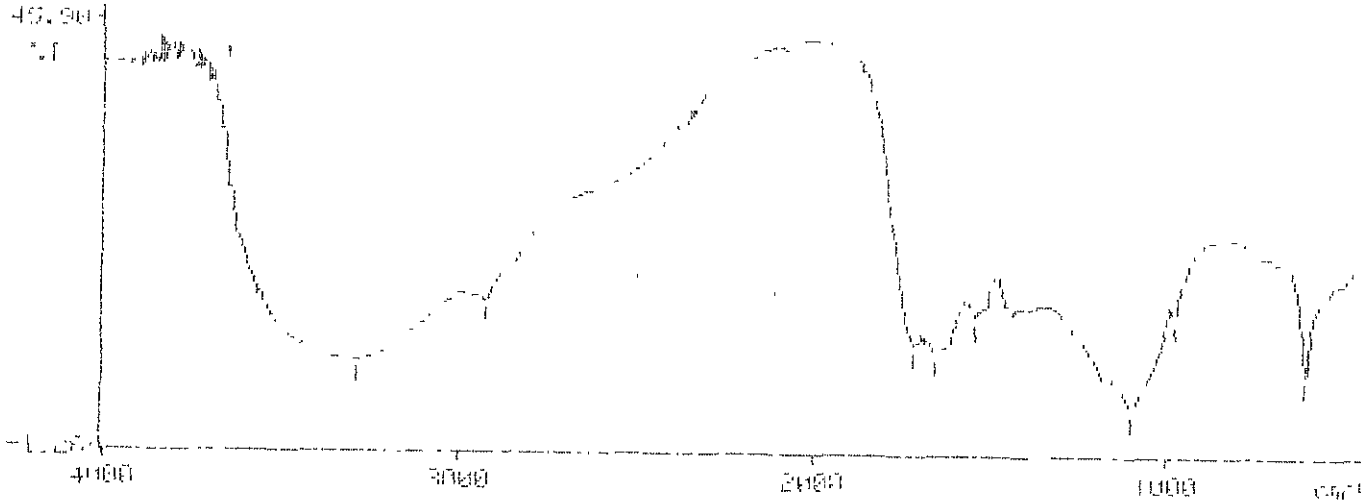
### Apéndice 2-1. Espectro de infrarrojo de la fracción precipitada a pH= 2 de la vinaza cruda



*Apéndice 2-2. Espectro de infrarrojo de la fracción precipitada a pH= 2 de la vinaza anaerobia*



*Apéndice 2-3. Espectro de infrarrojo de la fracción precipitada a pH= 2 de la vinaza anaerobia-aerobia*



**Apéndice 3. Datos del experimento en macetas con suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol tratados con vinazas crudas, tratadas anaerobiamente y anaerobia-aerobiamente**

**Apéndice 3-1. Datos de las propiedades del Acrisol tratado con vinazas**

Tratamiento	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	CE 1	CE 2	CE 3	CE 4	COT 1	COT 2	COT 3	COT 4	COS1	COS2	COS3	COS4
AT	4.8	4.8	4.9	4.8	304	334	313	374	2.72	2.66	2.87	2.74	35	50	33	37
AT	4.85	4.8	4.7	4.8	295	269	384	382	3.02	2.97	2.83	3.07	22	67	33	35
AT	4.88	4.9	4.69	4.8	314	333	284	323	3.16	2.69	2.67	2.93	22	45	37	35
AT	4.89	4.9	4.67	4.8	293	340	287	382	2.72	3.28	3.1	2.8				
AT	4.88	4.8	4.61			327	305	281								
x	4.86	4.84	4.71	4.80	302	321	315	348	2.91	2.90	2.87	2.89	26	54	34	36
s	0.04	0.05	0.11	0.00	9.61	29.21	40.65	45.00	0.22	0.29	0.18	0.15	7.51	11.53	2.31	1.15
AVC	5.81	5.9	6.28	6.21	1710	1440	1428	1250	3.52	3.44	3.24	3.37	98	74	67	46
AVC	5.66	6	6.22	6.08	1687	1513	1495	1496	3.72	3.46	3.56	3.18	103	89	52	24
AVC	5.73	6	6.09	6.89	1840	1231	1234	1397	3.34	3.3	3.57	3.32	90	80	50	35
AVC	5.79	6	6.03	7.1	1815	1281	1359	1390	3.89	3.49	3.43	3.31				
AVC	5.73	6.1	6.05			1512	1446	1389								
x	5.74	6.00	6.13	6.57	1763	1395	1392	1384	3.62	3.42	3.45	3.30	97	81	56	35
s	0.06	0.07	0.11	0.50	75.76	131.84	101.09	87.65	0.24	0.08	0.15	0.08	6.56	7.55	9.29	11.00
AVA	5.55	5.6	5.2	5.1	510	395	393	502	2.8	2.72	2.81	2.86	46	ND	ND	ND
AVA	5.52	5.5	5.24	5.1	495	401	427	492	2.89	2.93	2.78	2.8	57	ND	ND	ND
AVA	5.55	5.5	5.26	5.1	487	387	441	441	3.14	2.87	3	2.85	50			
AVA	5.5	5.4	5.3	5.1	478	425	416	525	3	3.17	2.92	2.94				
AVA	5.54	5.5	5.18			471	449	500								
x	5.53	5.50	5.24	5.10	493	416	425	492	2.96	2.92	2.88	2.86	51.00	ND	ND	ND
s	0.02	0.07	0.05	0.00	13.58	33.96	22.03	31.04	0.15	0.19	0.10	0.06	5.57			
AVAA	5.55	5.66	6.16	7.35	452	527	431	412	2.89	3.04	3.09	2.77	26	ND	ND	ND
AVAA	5.63	5.7	6.34	7.28	497	446	433	476	2.98	2.89	2.77	2.77	26	ND	ND	ND
AVAA	5.6	5.5	6.16	7.14	463		390	546	2.88	2.84	2.8	2.94	25			
AVAA	5.61	5.6	6.25	7.05			415	488	2.82	2.79	2.7	2.97				
AVAA	5.71	5.6	6.23					520								
x	5.62	5.61	6.23	7.21	470.7	486.5	417.3	488.4	2.89	2.89	2.84	2.86	25.67	ND	ND	ND
s	0.06	0.08	0.07	0.14	23.46	57.28	19.87	50.76	0.07	0.11	0.17	0.11	0.58			

**Apéndice 3-2. Datos de las propiedades del Fluvisol tratado con vinazas**

Tratamiento	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	CE 1	CE 2	CE 3	CE 4	COT 1	COT 2	COT 3	COT 4	COS 1	COS 2	COS 3	COS 4
FT	6.86	6.88	7.02		367	284	257	375	3.07	2.83	2.91	3.09	104	72	76	85
FT	6.81	6.88	6.88	6.6	367	310	263	348	2.84	2.93		2.87	67	72	76	85
FT	6.83	6.8	6.96	6.7	308	265	274	304	2.78	3.13	2.97	2.83	82	75	80	80
FT	6.95	6.86	6.93	6.7	336	297	222	339	2.87	2.9	2.96	2.95				
FT	6.95		6.93	6.67		306	313	281								
x	6.88	6.86	6.94	6.67	345	292	266	329	2.89	2.95	2.95	2.94	84	73	77	83
s	0.07	0.04	0.05	0.05	28	18	33	37	0.13	0.13	0.03	0.11	18.61	1.73	2.31	2.89
FVC	6.18	6.4	6.94	7.22	3280	3390	2770	1290	3.93	3.74	3.61	3.45	167	161	133	128
FVC	6.18	6.4	7.23	7.39	2200	2960	1927	1892	3.46	3.55	3.56	3.16	133	139	128	141
FVC	6.2	6.4	7.18	7.4	3220	2860	2840	1899	3.49	3.65	3.52	3.1				
FVC	6.12	6.5	7.03	7.56	3490	3400	2450	1360	3.39	3.44	3.55	3.4				
FVC	6.12	6.4	7.01	7.39		3370	1523	1805								
x	6.16	6.42	7.08	7.39	3048	3196	2302	1649	3.57	3.60	3.56	3.28	150	150	131	135
s	0.04	0.04	0.12	0.12	577	264	565	299	0.25	0.13	0.04	0.17	24.04	15.56	3.54	9.19
FVA	7.32	7.3	7.25	6.8	474	383	379	471	3.03	3.05	3.1	2.85	72	22	22	20
FVA	7.32	7.3	7.12	6.8	442	386	456	445	2.92		2.8	2.93	76	26	33	17
FVA	7.38	7.1	7.14	6.7	454	410	434	516	3.22		2.95	2.98				
FVA	7.35	7.1	6.94	6.8	479	386	430	511	2.85		2.93	3.02				
FVA	7.41	7.2	6.98	6.78			439	485								
x	7.36	7.20	7.09	6.78	462	391	428	486	3.01	3.05	2.95	2.95	74	24	28	19
s	0.04	0.10	0.13	0.04	17	13	29	29	0.16		0.12	0.07	2.83	2.83	7.78	2.12
FVAA	7.47	7.5	7.18	6.8	446	423	496	465	3.47		2.78	2.8	113	50	30	20
FVAA	7.42	7.5	7.19	6.8	441	399	463	459	3.06		3	2.81	113	39	46	13
FVAA	7.3	7.4	7.22	6.8	447		401	421	3	2.79	2.9	2.83				
FVAA	7.3	7.4	7.26	6.8	447		406	446	2.88	2.98	2.94	2.93				
FVAA	7.48	7.3	7.31				464	512								
x	7.39	7.42	7.23	6.80	445	411	446	461	3.10	2.89	2.91	2.84	113	45	38	17
s	0.09	0.08	0.05	0.00	3	17	41	33	0.26	0.13	0.09	0.06	0.00	7.78	11.31	4.95

### Apéndice 3-3. Producción de CO<sub>2</sub>

Producción de CO<sub>2</sub> en la segunda semana de incubación (en mg kg<sup>-1</sup> de suelo por día)

	AT	AVC	AVA	AVAA	FT	FVC	FVA	FVAA
1	37.71	296.48	137.24	117.33	33.52	283.90	137.24	133.05
2	18.86	290.19	120.48	108.95	10.48	274.48	135.14	113.14
3	22.00	296.48	113.14	107.90	12.57	278.67	139.33	122.57
4	25.14	290.19	124.67	110.00	18.86	271.33	139.33	121.52
x	25.93	293.33	123.88	111.05	18.86	277.10	137.76	122.57
s	8.27	3.63	10.10	4.28	10.41	5.44	2.01	8.16

Producción de CO<sub>2</sub> en la cuarta semana de incubación (en mg kg<sup>-1</sup> de suelo por día)

	AT	AVC	AVA	AVAA	FT	FVC	FVA	FVAA
1	8.38	70.19	23.05	19.90	19.90	113.14	45.05	38.76
2	12.57	63.90	26.19	25.14	25.14	135.14	38.76	45.05
3	10.48	76.48	15.71	18.86	17.81	112.10	35.62	29.33
4	10.48	52.38	22.00	20.95	17.46	100.57	30.38	24.10
x	10.48	65.74	21.74	21.21	20.08	115.24	37.45	34.31
s	1.71	10.28	4.39	2.76	3.54	14.44	6.13	9.38

## Apéndice 4. Resultados del análisis de regresión de los experimentos en macetas con suelos de las unidades *Acrisol* y *Fluvisol* con vinazas crudas, anaerobias y anaerobias-aerobias

### Apéndice 4-1. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el *Acrisol* testigo

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.602
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.362
R <sup>2</sup> ajustado	0.043
Error típico	0.065
Observaciones	4

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.004805	0.004805	1.13459268	0.39837007
Residuos	2	0.00847	0.004235		
Total	3	0.013275			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	4.88	0.07970257	61.2276351	0.00026664	4.53706727	5.22293273	4.53706727	5.22293273
semanas	-0.031	0.02910326		- 0.39837007	- 0.09422133	0.09422133	- 0.09422133	0.09422133
			1.06517261		0.15622133	0.15622133		



**Apéndice 4-2. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza cruda**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.975
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.951
R <sup>2</sup> ajustado	0.926
Error típico	0.0942
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.34322	0.34322	38.6074241	0.02493696
Residuos	2	0.01778	0.00889		
Total	3	0.361			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	5.455	0.11547727	47.2387334	0.00044783	4.95814106	5.95185894	4.95814106	5.95185894
semanas	0.262	0.04216634	6.21348727	0.02493696	0.08057277	0.44342723	0.08057277	0.44342723

**Apéndice 4-3. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza anaerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.964
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup> ,	0.929
R <sup>2</sup> ajustado	0.894
Error típico	0.068
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.1201	0.1201	26.2568	0.0360
Residuos	2	0.0091	0.0046		
Total	3	0.1293			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	5.73	0.08284	69.16931	0.00021	5.37357	6.08643	5.37357	6.08643
semanas	-0.155	0.03025	-5.12414	0.03604	-0.28515	-0.02485	-0.28515	-0.02485

**Apéndice 4-4a. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza anaerobia-aerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9240
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.8538
R <sup>2</sup> ajustado	0.7807
Error típico	0.3526
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1.452605	1.452605	11.683	0.076
Residuos	2	0.24867	0.124335		
Total	3	1.701275			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	4.82	0.4319	11.1610	0.0079	2.9619	6.6781	2.9619	6.6781
semanas	0.539	0.1577	3.4180	0.0760	-0.1395	1.2175	-0.1395	1.2175

**Apéndice 4-4b. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza anaerobia-aerobia con los datos transformados a ln**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.930
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.865
R <sup>2</sup> ajustado	0.797
Error típico	0.053
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.036	0.036	12.787	0.070
Residuos	2	0.006	0.003		
Total	3	0.042			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	1.601	0.065	24.527	0.002	1.320	1.882	1.320	1.882
Variable X 1	0.085	0.024	3.576	0.070	-0.017	0.188	-0.017	0.188

**Apéndice 4-5. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol testigo**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.6083
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.3700
R <sup>2</sup> ajustado	0.0550
Error típico	0.1135
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.0151	0.0151	1.1748	0.3917
Residuos	2	0.0258	0.0129		
Total	3	0.0409			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	6.975	0.139	50.191	0.000	6.377	7.573	6.377	7.573
semanas	-0.055	0.051	-1.084	0.392	-0.273	0.163	-0.273	0.163

**Apéndice 4-6. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza cruda**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9851
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9705
R <sup>2</sup> ajustado	0.9558
Error típico	0.1199
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.9461	0.9461	65.8174	0.0149
Residuos	2	0.0288	0.0144		
Total	3	0.9749			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	5.675	0.1468	38.6470	0.0007	5.0432	6.3068	5.0432	6.3068
semanas	0.435	0.0536	8.1128	0.0149	0.2043	0.6657	0.2043	0.6657

**Apéndice 4-7. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza anaerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9754
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9514
R <sup>2</sup> ajustado	0.9270
Error típico	0.0661
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.1711	0.1711	39.1143	0.0246
Residuos	2	0.0087	0.0044		
Total	3	0.1799			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	7.57	0.0810	93.4461	0.0001	7.2214	7.9186	7.2214	7.9186
semanas	-0.185	0.0296	-6.2541	0.0246	-0.3123	0.0577	-0.3123	-0.0577

**Apéndice 4-8. Análisis de regresión para los valores de pH respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza anaerobia aerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.8854
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.7840
R <sup>2</sup> ajustado	0.6760
Error típico	0.1627
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.192	0.192	7.259	0.115
Residuos	2	0.053	0.026		
Total	3	0.245			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	7.7	0.199	38.650	0.001	6.843	8.557	6.843	8.557
semanas	-0.196	0.073	-2.694	0.115	-0.509	0.117	-0.509	0.117



**Apéndice 4-9. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Acrisol testigo**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.6803
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.4629
R <sup>2</sup> ajustado	0.1943
Error típico	0.0153
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.00040	0.00040	1.72340	0.31966
Residuos	2	0.00047	0.00024		
Total	3	0.00087			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.915	0.01877	155.25979	0.00004	2.83422	2.99578	2.83422
X	-0.009	0.00686	-1.31278	0.31966	-0.03850	0.02050	-0.03850

**Apéndice 4-10. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza cruda**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9095
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.8273
R <sup>2</sup> ajustado	0.7409
Error típico	0.0672
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.0432	0.0432	9.5781	0.0905
Residuos	2	0.0090	0.0045		
Total	3	0.0523			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	3.68	0.0823	44.7171	0.0005	3.3259	4.0341	3.3259	4.0341
X	-0.093	0.0300	-3.0948	0.0905	-0.2223	0.0363	-0.2223	0.0363

**Apéndice 4-11. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza anaerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9898
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9797
R <sup>2</sup> ajustado	0.9695
Error típico	0.0077
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.00578	0.00578	96.3333	0.0102
Residuos	2	0.00012	6E-05		
Total	3	0.0059			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.99	0.0095	315.1737	0.0000	2.9492	3.0308	2.9492	3.0308
X	-0.034	0.0035	-9.8150	0.0102	-0.0489	-0.0191	-0.0489	-0.0191

**Apéndice 4-12. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza anaerobia-aerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7379
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.5444
R <sup>2</sup> ajustado	0.3167
Error típico	0.0202
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.00098	0.00098	2.3902	0.2621
Residuos	2	0.00082	0.00041		
Total	3	0.0018			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.9050	0.0248	117.1409	0.0001	2.7983	3.0117	2.7983	3.0117
X	-0.0140	0.0091	-1.5460	0.2621	-0.0530	0.0250	-0.0530	0.0250

**Apéndice 4-13. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol testigo**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.6742
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.4545
R <sup>2</sup> ajustado	0.1818
Error típico	0.0260
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.0011	0.0011	1.6667	0.3258
Residuos	2	0.0014	0.0007		
Total	3	0.0025			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.895	0.0318	90.9811	0.0001	2.7581	3.0319	2.7581
X	0.015	0.0116	1.2910	0.3258	-0.0350	0.0650	-0.0350

**Apéndice 4-14. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza cruda**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7869
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.6191
R <sup>2</sup> ajustado	0.4287
Error típico	0.1128
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.0414	0.0414	3.2513	0.2131
Residuos	2	0.0255	0.0127		
Total	3	0.0669			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	3.73	0.1382	26.9876	0.0014	3.1353	4.3247	3.1353	4.3247
X	-0.091	0.0505	-1.8031	0.2131	-0.3081	0.1261	-0.3081	0.1261

**Apéndice 4-15. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza anaerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7379
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.5444
R <sup>2</sup> ajustado	0.3167
Error típico	0.0405
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.0039	0.0039	2.3902	0.2621
Residuos	2	0.0033	0.0016		
Total	3	0.0072			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	3.06	0.0496	61.6956	0.0003	2.8466	3.2734	2.8466	3.2734
X	-0.028	0.0181	-1.5460	0.2621	-0.1059	0.0499	-0.1059	0.0499

**Apéndice 4-16. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico total respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza anaerobia-aerobia**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.8592
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.7381
R <sup>2</sup> ajustado	0.6072
Error típico	0.0744
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.0312	0.0312	5.6378	0.1408
Residuos	2	0.0111	0.0055		
Total	3	0.0423			

	Coefficiente s	Error típico	Estadístico t	Probabilidad d	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	3.135	0.0911	34.4059	0.0008	2.7430	3.5270	2.7430	3.5270
X	-0.079	0.0333	-2.3744	0.1408	-0.2222	0.0642	-0.2222	0.0642



**Apéndice 4-17. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico soluble respecto al tiempo en semanas en el Acrisol festigo**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.03334
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.00111
R <sup>2</sup> ajustado	-0.49833
Error típico	23.70127
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1.25	1.25	0.0022	0.9667
Residuos	2	1123.5	561.75		
Total	3	1124.75			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	38	29.0280	1.3091	0.3207	-86.8975	162.8975	-86.8975	162.8975
X	0.5	10.5995	0.0472	0.9667	-45.1061	46.1061	-45.1061	46.1061

**Apéndice 4-18. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico soluble respecto al tiempo en semanas en el Acrisol tratado con vinaza cruda**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9981
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9963
R <sup>2</sup> ajustado	0.9944
Error típico	2.1213
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	2420	2420	537.8	0.0019
Residuos	2	9	4.5		
Total	3	2429			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	124.5	2.5981	47.9201	0.0004	113.3214	135.6786	113.3214	135.6786
X	-22	0.9487	-23.1900	0.0019	-26.0819	-17.9181	-26.0819	-17.9181

**Apéndice 4-19. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico soluble respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol testigo**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.0188
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.0004
R <sup>2</sup> ajustado	-0.4995
Error típico	8.3875
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.05	0.05	0.0007	0.9812
Residuos	2	140.7	70.35		
Total	3	140.75			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	79.5	10.273	7.739	0.016	35.301	123.699	35.301	123.699
X	0.1	3.751	0.027	0.981	-16.039	16.239	-16.039	16.239

**Apéndice 4-20. Análisis de regresión para los valores de carbono orgánico soluble respecto al tiempo en semanas en el Fluvisol tratado con vinaza cruda**

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.8304
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.6896
R <sup>2</sup> ajustado	0.5343
Error típico	6.7897
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	204.8	204.8	4.443	0.170
Residuos	2	92.2	46.1		
Total	3	297			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	157.5	8.316	18.940	0.003	121.721	121.721	193.279
X	-6.4	3.036	-2.108	0.170	-19.465	-19.465	6.665

**Apéndice 5. Prueba de diferencias significativas de Tukey para cada uno de los parámetros por semana**  
*(Tukey honest significant difference test)*

Acrisol pH 1				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	0.0002	0.0002
AVC	0.0002		0.0003	0.0024
AVA	0.0002	0.0003		<b>0.1953</b>
AVAA	0.0002	0.0024	<b>0.1953</b>	

Acrisol pH 2				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	0.0002	0.0002
AVC	0.0002		0.0002	0.0002
AVA	0.0002	0.0002		<b>0.1536</b>
AVAA	0.0002	0.0002	<b>0.1536</b>	

Acrisol pH 3				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	0.0002	0.0002
AVC	0.0002		0.0002	<b>0.6887</b>
AVA	0.0002	0.0002		0.0002
AVAA	0.0002	<b>0.6887</b>	0.0002	

Acrisol pH 4				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	<b>0.3969</b>	0.0002
AVC	0.0002		0.0002	0.0213
AVA	<b>0.3969</b>	0.0002		0.0002
AVAA	0.0002	0.0213	0.0002	

Acrisol CE 1				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	0.0007	0.0048
AVC	0.0002		0.0002	0.0002
AVA	0.0007	0.0002		<b>0.9627</b>
AVAA	0.0048	0.0002	<b>0.9627</b>	

Acrisol CE 2				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	<b>0.4643</b>	<b>0.1208</b>
AVC	0.0002		0.0002	0.0002
AVA	<b>0.4643</b>	0.0002		<b>0.6062</b>
AVAA	<b>0.1208</b>	0.0002	<b>0.6062</b>	

Acrisol CE 3				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	<b>0.2011</b>	<b>0.2580</b>
AVC	0.0002		0.0002	0.0002
AVA	<b>0.2011</b>	0.0002		<b>0.9961</b>
AVAA	<b>0.2580</b>	0.0002	<b>0.9961</b>	

Acrisol CE 4				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0002	<b>0.0723</b>	<b>0.4956</b>
AVC	0.0002		0.0002	0.0002
AVA	<b>0.0723</b>	0.0002		<b>0.8292</b>
AVAA	<b>0.4956</b>	0.0002	<b>0.8292</b>	

Acrisol COT 1				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0008	<b>0.9759</b>	<b>0.9997</b>
AVC	0.0008		0.0014	0.0007
AVA	<b>0.9759</b>	0.0014		<b>0.9561</b>
AVAA	<b>0.9997</b>	0.0007	<b>0.9561</b>	

Acrisol COT 2				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0086	<b>0.9982</b>	<b>0.9998</b>
AVC	0.0086		0.0115	0.0075
AVA	<b>0.9982</b>	0.0115		<b>0.9944</b>
AVAA	<b>0.9998</b>	0.0075	<b>0.9944</b>	

Acrisol COT 3				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0010	<b>0.9997</b>	<b>0.9941</b>
AVC	0.0010		0.0012	0.0008
AVA	<b>0.9997</b>	0.0012		<b>0.9854</b>
AVAA	<b>0.9941</b>	0.0008	<b>0.9854</b>	

Acrisol COT 4				
	AT	AVC	AVA	AVAA
AT		0.0008	<b>0.9895</b>	<b>0.9895</b>
AVC	0.0008		0.0005	0.0005
AVA	<b>0.9895</b>	0.0005		<b>1.0000</b>
AVAA	<b>0.9895</b>	0.0005	<b>1.0000</b>	

Fluvisol pH 1				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.0002	0.0002	0.0002
FVC	0.0002		0.0002	0.0002
FVA	0.0002	0.0002		<b>0.9748</b>
FVAA	0.0002	0.0002	<b>0.9748</b>	

Fluvisol pH 2				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.0002	0.0002	0.0002
FVC	0.0002		0.0002	0.0002
FVA	0.0002	0.0002		0.0008
FVAA	0.0002	0.0002	0.0008	

Fluvisol pH 3				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		<b>0.199</b>	<b>0.167</b>	0.011
FVC	<b>0.199</b>		<b>0.999</b>	<b>0.236</b>
FVA	<b>0.167</b>	<b>0.999</b>		<b>0.281</b>
FVAA	0.011	<b>0.236</b>	<b>0.281</b>	

Fluvisol pH 4				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.0002	<b>0.2338</b>	<b>0.1383</b>
FVC	0.0002		0.0002	0.0002
FVA	<b>0.2338</b>	0.0002		<b>0.9621</b>
FVAA	<b>0.1383</b>	0.0002	<b>0.9621</b>	

Fluvisol CE 1				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.0002	<b>0.951</b>	<b>0.983</b>
FVC	0.00020		0.00021	0.00021
FVA	<b>0.951</b>	0.0002		<b>1.000</b>
FVAA	<b>0.983</b>	0.0002	<b>1.000</b>	

Fluvisol CE 2				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.00020	<b>0.79038</b>	<b>0.80260</b>
FVC	0.00020		0.00020	0.00020
FVA	<b>0.79038</b>	0.00020		<b>0.99884</b>
FVAA	<b>0.80260</b>	0.00020	<b>0.99884</b>	

Fluvisol CE 3				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.00020	<b>0.72317</b>	<b>0.67668</b>
FVC	0.00020		0.00020	0.00021
FVA	<b>0.72317</b>	0.00020		<b>0.99225</b>
FVAA	<b>0.67668</b>	0.00021	<b>0.99225</b>	

Fluvisol CE 4				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.0002	<b>0.6884</b>	<b>0.8699</b>
FVC	0.0002		0.0002	0.0003
FVA	<b>0.6884</b>	0.0002		<b>0.9988</b>
FVAA	<b>0.8699</b>	0.0003	<b>0.9988</b>	

Fluvisol COT 1				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.018	<b>0.945</b>	<b>0.998</b>
FVC	0.018		<b>0.168</b>	0.039
FVA	<b>0.945</b>	<b>0.168</b>		<b>0.981</b>
FVAA	<b>0.998</b>	0.039	<b>0.981</b>	

Fluvisol COT 2				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.0040	<b>0.9290</b>	<b>0.9473</b>
FVC	0.0040		0.0488	0.0045
FVA	<b>0.9290</b>	0.0488		<b>0.7744</b>
FVAA	<b>0.9473</b>	0.0045	<b>0.7744</b>	

Fluvisol COT 3				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.00024	0.03163	<b>0.82911</b>
FVC	0.00024		0.00029	0.00024
FVA	0.03163	0.00029		0.02026
FVAA	<b>0.82911</b>	0.00024	0.02026	



Fluvisol COT 4				
	FT	FVC	FVA	FVAA
FT		0.1012	0.9187	0.9367
FVC	0.1012		0.1379	0.0737
FVA	0.9187	0.1379		0.9982
FVAA	0.9367	0.0737	0.9982	

**Apéndice 6. Valores de pH de los suelos tratados con vinaza cruda en el corto plazo (minutos)**

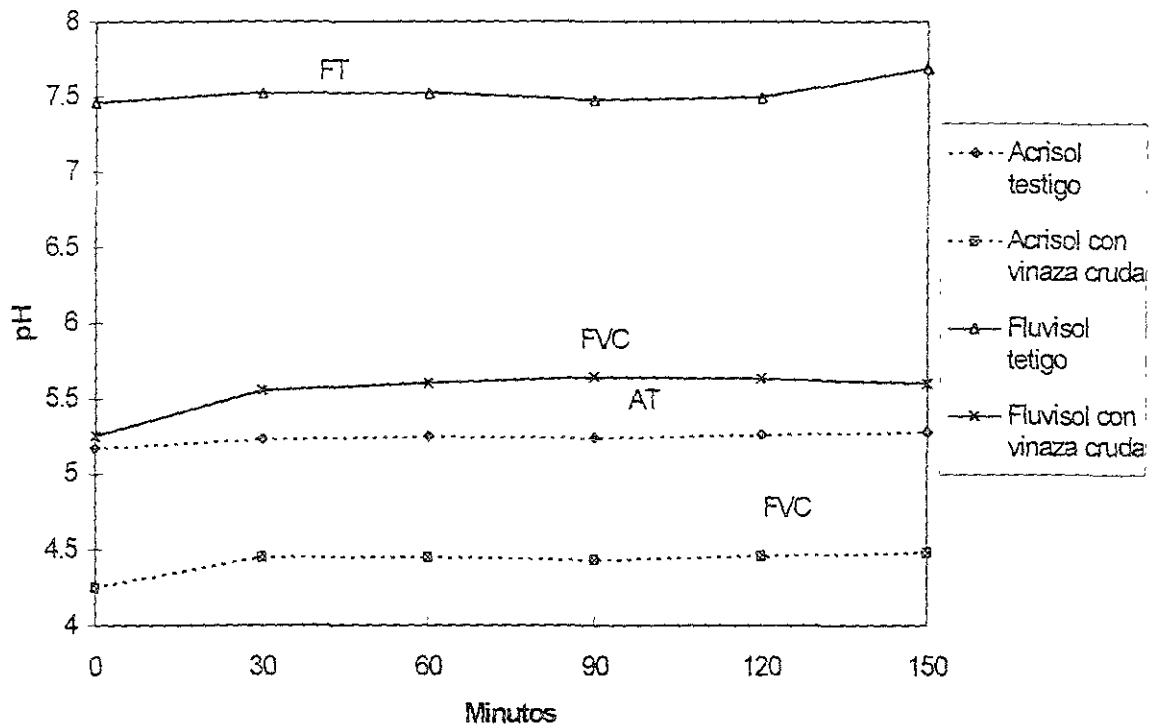


Figura A-6. Cambios en el pH del suelo por aplicación de vinaza cruda

## Anexo 7. Datos de conductividad eléctrica de disoluciones porcentuales del azúcar

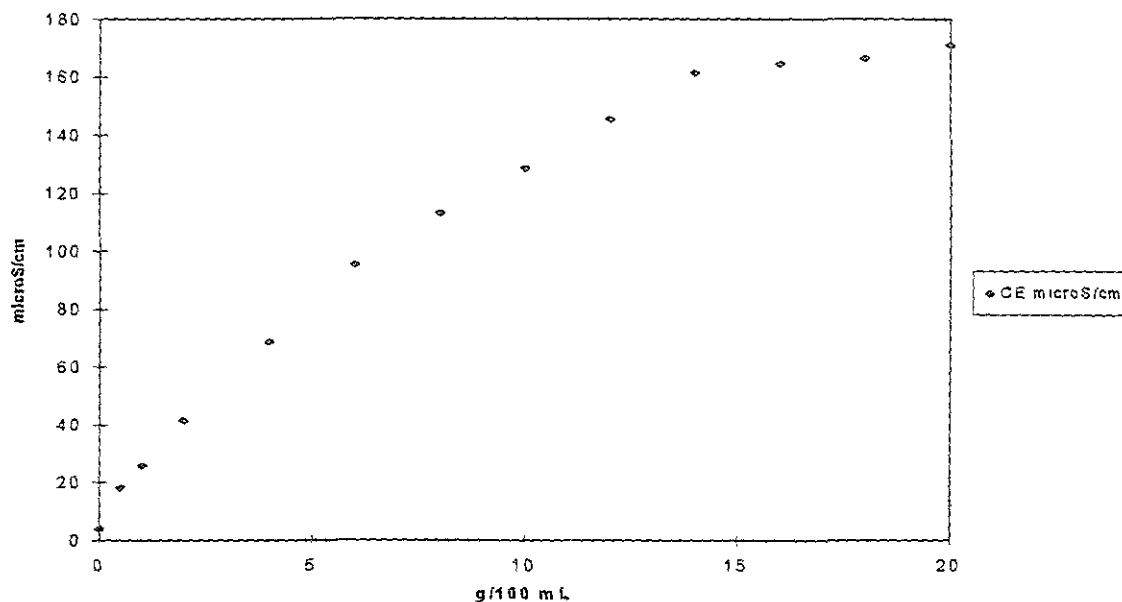


Figura A-7. Conductividad eléctrica del azúcar

## Anexo 8. Conductancia de algunos iones

Ion	Conductancia equivalente <sup>a</sup> ( $\Omega^{-1} \text{equiv}^{-1} \text{cm}^2$ )	Movilidad iónica <sup>b</sup> ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$ )	Radio iónico ( $\text{Å}^0$ )
H <sup>+</sup>	349.81	36.3	0.6
Li <sup>+</sup>	38.68	4.01	0.95
Na <sup>+</sup>	50.10	5.19	1.33
K <sup>+</sup>	73.50	7.62	1.48
Rb <sup>+</sup>	77.81	8.06	1.69
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	73.50	7.62	0.65
Mg <sup>2+</sup>	53.05	5.50	0.99
Ca <sup>2+</sup>	59.50	6.17	1.35
Ba <sup>2+</sup>	63.63	6.59	0.72
Cu <sup>2+</sup>	53.60	5.56	
OH <sup>-</sup>	198.30	20.06	1.36
F <sup>-</sup>	55.40	5.74	1.81
Cl <sup>-</sup>	76.35	7.91	1.95
I <sup>-</sup>	76.88	7.97	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71.46	7.41	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	44.50	4.61	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80.02	8.29	

<sup>a</sup> Datos tomados de Robinson y Stokes. (1959). Electrolyte solutions. Academic press. NY, EUA.

<sup>b</sup> Datos tomados de Adamson. (1973). A textbook of physical chemistry. Academic press. NY, EUA.