

CAMBIOS QUÍMICOS EN EL SUELO POR APLICACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE TIPO VINAZAS

Francisco BAUTISTA-ZÚNIGA^{1,2} Carmen DURÁN-DE-BAZÚA³ y Rufino LOZANO⁴

¹Facultad de Ciencias, UNAM; ²Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales, FMVZ, UADY km 15.5 carretera Mérida-Xmatkuil, Mérida, Yucatán, México. Correo electrónico, bzuniga@tunku.uady.mx
³PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM; ⁴Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F., México

(Recibido junio 1998, aceptado mayo 2000)

Palabras clave: mineralización, caña de azúcar, Fluvisol, Acrisol, retención de carbono orgánico

RESUMEN

Bajo condiciones de invernadero se estudiaron los cambios químicos del suelo por la aplicación de vinazas crudas (VC), vinazas tratadas anaerobiamente (VA) y vinazas tratadas anaerobia-aerobiamente (VAA) y un testigo con agua destilada. Se utilizaron dos suelos, Acrisol y Fluvisol, de la zona cañera de Córdoba, Veracruz, México, se obtuvieron con cuatro muestras por tratamiento y se hicieron análisis químicos durante cuatro semanas. En el Acrisol, la aplicación de vinaza cruda constituyó un riesgo de salinización y de contaminación por Zn y Mn. La halloysita presentó una ligera pérdida de la cristalinidad. Sin embargo, la vinaza cruda proporciona varios beneficios potenciales, como aumentos en el valor de pH, Fe y P. En el Fluvisol, la aplicación de vinaza cruda provoca riesgo de salinización y aumento de Mn. El beneficio de la aplicación es el aumento de P. Las VA y VAA no presentan riesgos de salinización en ambos suelos.

Key words: mineralization, sugarcane, Fluvisol, Acrisol, organic carbon retention

ABSTRACT

A research to evaluate the chemical changes on soil caused by the addition of vinasses was carried out. The soil types studied were Acrisol and Fluvisol of a sugarcane zone of Cordoba, Veracruz, México. The experiments were conducted with soil pots under greenhouse conditions. Three types of vinasses were used: Crude vinasses (CV), anaerobically treated vinasses (AV), anaerobic-aerobically treated vinasses (AAV), and a control with distilled water. Four replicates were conducted for each treatment, and the samples were analyzed during four weeks. In Acrisol, the application of vinasses represented a salinization risk, as well as an increase in concentrations of Zn and Mn, and alterations of halloysita cristallinity risks. However, the addition of crude vinasses had direct benefits, shown as an increase in pH, Fe y P. In Fluvisol, the crude vinasses application represented salinization and Mn pollution risks. The observed benefits of crude vinasses applications is that P concentration increases. The AV and AAV application did not represent the same salinization risk shown by crude vinasses.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas en la producción de azúcar y alcohol de caña en México es la utilización de enormes cantidades de agua, que superan el millón de

metros cúbicos al día. Además, la industria azucarera-alcoholera contamina fuertemente las cuencas, que es donde generalmente arroja sus efluentes (Durán-de-Bazúa *et al.* 1991a). Las vinazas son las aguas residuales, generadas en los ingenios, que más contaminan, debido a

la carga orgánica que, medida como demanda química de oxígeno soluble (DQO), es de 150 g L⁻¹ (Durán-de-Bazúa *et al.* 1991b, Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa 1998). Esta carga orgánica puede ocasionar problemas de eutroficación en los cuerpos de agua.

La legislación actual prohíbe la descarga en ríos pero la permite en suelos agrícolas (CNA 1997), sin embargo, en algunos ingenios las vinazas son vertidas a los ríos y/o a la red de drenaje para su posterior utilización como agua de riego en el cultivo de la caña de azúcar. Ante esta restricción legal, la opción es el tratamiento de la vinaza *in situ* para su posterior aplicación al suelo.

El tratamiento de las vinazas ha sido motivo de varias investigaciones, en las cuales se ha llegado a reducir la materia orgánica disuelta, en plantas piloto, hasta en 90%, vía tratamientos anaerobio, aerobio y anaerobio-aerobio (Durán-de-Bazúa *et al.* 1988, 1991a, 1994, Olvera-Rubio *et al.* 1992). El 10% restante es material no biodegradable (humus) por los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, por lo que es necesaria la aplicación de un tratamiento terciario o la disposición en suelos (Bautista-Zúñiga *et al.* 2000).

Existen estudios preliminares de evaluación sobre el uso de los lodos anaerobios producidos a partir del tratamiento de las aguas residuales de las destilerías como «biofertilizantes», encontrando una alta calidad como abono debido a sus contenidos de materia orgánica, N, P y K (Otero y González 1991, Valdés *et al.* 1991a); sin embargo, también se han encontrado metales pesados en la vinaza (Valdés *et al.* 1991a; Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa 1998) y en la biomasa microbiana producida durante los tratamientos aerobio (Castro y Villegas 1989) y anaerobio (Valdés *et al.* 1991b, Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa 1998), lo que dificulta el manejo de la vinaza.

No se han encontrado cambios en las propiedades de los vertisoles como resultado de la aplicación de vinaza cruda (Subirós y Molina 1992) probablemente por su capacidad amortiguadora alta y las dosis bajas de vinaza utilizadas. Sin embargo, es probable que en suelos ácidos donde predominan coloides del tipo de los oxohidroxos de Fe, Al y Mn, la aplicación de vinazas crudas y tratadas se mineralicen más rápido y sean una mejor enmienda, debido a su efecto catalítico sobre la oxidación química y microbiológica de la materia orgánica y por la menor capacidad de los coloides inorgánicos para proteger física y químicamente a la materia orgánica de la biodegradación microbiana (Coleman *et al.* 1989, Oades 1989, Lavelle *et al.* 1993).

Por el contrario, en suelos de mejor calidad agrícola como en los Fluvisoles y en Vertisoles, las vinazas pueden alterar químicamente las arcillas y ocasionar importantes cambios en los minerales del suelo por su acidez y poder ligante, respectivamente (Huang y Keller 1972, Huang 1993, Dahlgren 1994, Huang 1994).

Con la idea de agregar las vinazas al suelo, se ha intenta-

do oxidar de manera natural (sin un gasto energético adicional) los compuestos orgánicos solubles presentes en las vinazas utilizando al suelo como reactor (Bautista-Zúñiga *et al.* 1995). Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa (1998), consideran que las vinazas tratadas son una mejor enmienda que las crudas, principalmente por las formas químicas del carbono, elemento que se encuentra formando moléculas de mayor tamaño y peso molecular con propiedades coloidales.

Los objetivos de este trabajo son identificar los beneficios y riesgos de la aplicación de las vinazas en suelo de las unidades Acrisol y Fluvisol, así como conocer la velocidad de descomposición de las vinazas en ambos suelos y los cambios químicos que se presentan.

Localización del sitio de estudio

El municipio de Atoyac se encuentra a 20 km al noreste de la ciudad de Córdoba en el estado de Veracruz, México y se localiza entre los 18° 55' y 18° 45' de latitud norte y los 96° 40' y 96° 52' longitud oeste (INEGI 1984a). Alrededor de 30000 ha se dedican al cultivo de caña de azúcar. En la zona de influencia de los ingenios localizados en el municipio de Atoyac, hay varios suelos, de las unidades Acrisol, Lixisol, Fluvisol y Cambisol (Bautista-Zúñiga *et al.* 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

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

TABLA I. CARACTERIZACIÓN DE LAS VINAZAS (Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa, 1998)

Parámetros	Unidades	Vinazas		
		VC	VA	VAA
pH		4.44	8.73	8.93
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	29.3	19.5	19.1
Ca ²⁺	mol ⁽⁺⁾ L ⁻¹	45.7	9.6	1.7
Mg ²⁺	mol ⁽⁺⁾ L ⁻¹	46.0	46.0	29.5
Na ⁺	mol ⁽⁺⁾ L ⁻¹	0.44	0.70	0.60
K ⁺	mol ⁽⁺⁾ L ⁻¹	10.1	3.9	3.8
Cl ⁻	mol ⁽⁻⁾ L ⁻¹	112.8	nm	27
SO ₄ ⁼	mol ⁽⁻⁾ L ⁻¹	31.2	nm	nm
CO ₃ ⁼	mol ⁽⁻⁾ L ⁻¹	nd	0.6	0.6
HCO ₃ ⁻	mol ⁽⁻⁾ L ⁻¹	nd	2.5	7.3
Zn	mg L ⁻¹	60.0	62.4	49.6
COT	g L ⁻¹	89	28	27

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

TABLA II. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS (Bautista-Zúñiga *et al.* 1998)

Unidad	Profundidad cm	pH	SB %	CC %	Limos %	Arcilla %	Textura
Acrisol	0 - 20	4.48	35	41	27	44	Arcilla
	20 - 28	4.88	35	38	32	45	Arcilla
Fluvisol	0 - 30	6.16	80	32	28	46	Arcilla
	30 - 44	6.45	80	36	44	32	Franco arcilloso

SB= saturación de bases; CC= capacidad de campo

Se usó el suelo de la superficie (0 a 20 cm de profundidad) de la capa arable de Acrisol y Fluvisol (Tabla II). Se utilizaron macetas (sin drenaje) con 500 g de suelo que se colocó 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. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero. Se les adicionó continuamente agua a las macetas con el fin de que permanecieran cerca de la capacidad de campo (Blake 1976), determinada previamente por Bautista-Zúñiga *et al.* (1998), con el fin de proveer condiciones adecuadas para la actividad microbiana.

Los tratamientos fueron: aplicación de VC, VA y VAA, más un testigo con agua destilada (T), se realizaron por cuadruplicado y se evaluaron semanalmente a lo largo de un mes. Se midió el pH en relación suelo: agua de 1:2.5; conductividad eléctrica del extracto 1:2.5 con un puente de conductividad, carbono orgánico total y carbono hidrosoluble realizando una extracción 1:2.5 de suelo:agua (Nelson y Sommers 1975 en Okalebo *et al.* 1993). Los cambios a lo largo del tiempo (cuatro semanas) se ajustaron a los modelos lineal y exponencial, según el caso.

Los micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) fueron extraídos con la mezcla Mehlich II y analizados por espectrofotometría de absorción atómica.

El P se analizó utilizando la técnica diseñada por Olsen (Houba *et al.* 1988).

En el Acrisol, se analizó el contenido de Fe y Al “activos” extraíbles con oxalato de amonio (Fe_o y Al_o) (Houba *et al.* 1988). Se realizaron análisis de varianza con el fin de conocer el efecto de los tratamientos.

Se estudiaron los cambios en los minerales secundarios mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro Philips PW-1050. Con una modificación del método desarrollado por Biscaye (1965), se midió el área bajo la curva para el pico más intenso de cada mineral, obteniendo una estimación de la concentración del mineral en la muestra, para hacer la comparación entre tratamientos. Se midió el contenido total de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O y P_2O_5 por espectroscopía de fluorescencia de rayos X con un espectrómetro secuencial Siemens SRS 3000 automatizado.

RESULTADOS

Potencial de hidrógeno

Los tres tipos de vinaza ocasionaron el aumento del valor de pH en el Acrisol (Tabla III).

TABLA III. VALOR DE pH EN EL ACRISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	AT $\bar{X} \pm s$	AVC $\bar{X} \pm s$	AVA $\bar{X} \pm s$	AVAA $\bar{X} \pm s$
1	4.86±0.04a	5.74±0.06c	5.53±0.02b	5.62±0.06b
2	4.84±0.05a	6.00±0.07c	5.5 ±0.07b	5.61±0.08b
3	4.71±0.11a	6.13±0.11c	5.24±0.05b	6.23±0.07c
4	4.8 ±0.00a	6.57±0.50c	5.1 ±0.00b	7.21±0.14c
r ² (p)	0.36 (0.40) NS	0.95 (0.025)	0.93 (0.040)	0.85 (0.08) 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 ($P = 0.05$) según la prueba de Tukey, r^2 = índice de regresión con valor de $P < 0.05$, NS= no significativo

En el Acrisol tratado con vinaza cruda, el pH aumentó 1.8 unidades con respecto al testigo, desde la primera semana y mostró una tendencia de incremento constante durante el período de estudio, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$y = -0.26x + 5.4 \text{ para AVC}$$

En el Acrisol tratado con las vinazas anaerobias, en un principio el valor del pH aumentó 0.5 unidades y con el paso del tiempo disminuyó hasta muy cerca del valor inicial, con lo cual se observó que el cambio del valor del pH fue temporal, posiblemente debido a la descomposición de la materia orgánica adicionada (Figura 1). La dinámica del valor de pH se describe con el siguiente modelo:

$$y = -0.16x + 5.73 \text{ para AVA}$$

En el Acrisol, el valor de pH aumentó con el tiempo

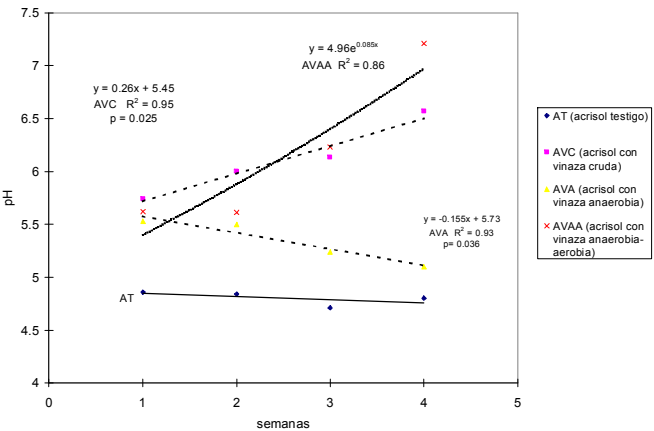


Fig. 1. Cambios de los valores de pH en suelos de la unidad Acrisol por la aplicación de vinazas

por la aplicación de las vinazas anaerobias-aerobias, presentó una tendencia exponencial y llegó a incrementos arriba de 2.3 unidades de pH (**Figura 2**), según el modelo siguiente:

$y = 4.96e^{0.085x}$ para AVAA ($r^2 = 0.88$)

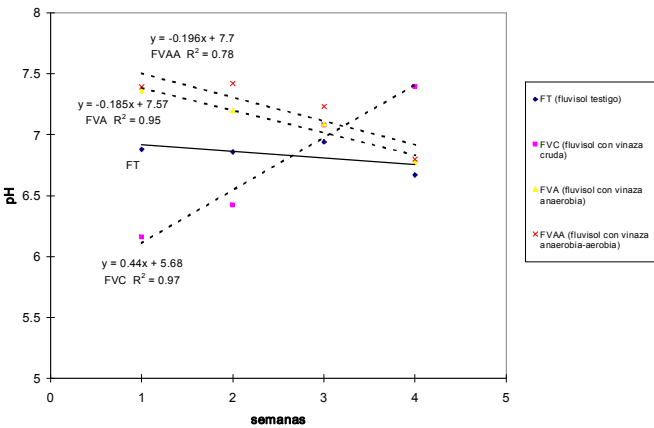


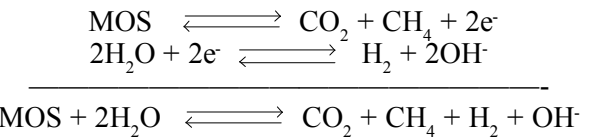
Fig. 2. Cambios en los valores de pH en suelos de la unidad Fluvisol por la aplicación de vinazas

En el inicio (primera semana), en los tres tipos de vinaza se encontraron valores de pH más altos que en el testigo; sin embargo, con el paso del tiempo solamente el tratamiento con vinaza anaerobia tendió a regresar a las condiciones iniciales de pH. Los tratamientos con vinaza cruda y vinaza anaerobia-aerobia hicieron suponer que el cambio en el valor de pH no fue de tiempo corto.

El aumento del pH en el Acrisol por la aplicación de las vinazas crudas y tratadas puede deberse a las siguientes causas:

1. Oxidación de la materia orgánica en condiciones

reductoras, debido a la actividad microbiana, que al descomponer la materia orgánica disuelta forma dióxido de carbono, metano y aumento de los iones OH⁻. Teóricamente, la reacción de redox que se presenta cuando el agua es la aceptora de electrones, es la siguiente (Doménech 1995):



- donde: MOS= materia orgánica soluble
2. Es posible que la complejación de las fuentes de acidez del suelo (oxo-hidróxidos de Fe y Al «activos») por la materia orgánica (Mc Bride 1989, Hayes y Bolt 1991) contenida en las vinazas ocasionó el aumento del pH desde la primera semana.
 3. En el caso de las vinazas tratadas que poseen un pH alcalino, el cambio del valor de pH en el Acrisol es posible que se deba también a los cambios químicos de los óxidos de Fe y Al “activos”, ya que sus especies químicas son dependientes del pH (Oades 1989). En el Fluvisol, los tratamientos con vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias elevaron el valor de pH 0.5 unidades desde la primera semana, pero con el paso del tiempo, el valor de pH del suelo llegó a sus niveles originales (**Tabla IV**).

$y = -0.20x + 7.7$ para FVAA
 $y = -0.18x + 7.57$ para FVA

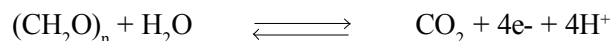
TABLAIV. VALOR DE pH EN EL FLUVISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	FT	FVC	FVA	FVAA
	$\bar{X} \pm s$	$\bar{X} \pm s$	$\bar{X} \pm s$	$\bar{X} \pm s$
1	6.88±0.07b	6.16±0.04 a	7.36±0.04 c	7.39±0.09c
2	6.86±0.04 b	6.42±0.04a	7.2 ±0.1c	7.42±0.08d
3	6.94±0.05a	7.08±0.12a	7.09±0.13a	7.23±0.05a
4	6.67±0.05a	7.39±0.12c	6.78±0.04b	6.8 ±0b
r ² (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 (P= 0.05) según la prueba de Tukey, r²= índice de regresión valor de P< 0.05, NS= no significativo

El aumento del valor de pH durante la primera semana pudo deberse a las razones arriba mencionadas. Posteriormente, las reacciones de acidificación que se presentaron por la descomposición de la materia orgánica en los

tratamientos FVA y FVAA, de acuerdo con Bohn *et al.* (1993), fueron posiblemente producto de la oxidación de los compuestos orgánicos en condiciones aerobias, según reacciones del tipo:



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

El valor de pH en el Fluvisol tratado con vinaza cruda, presentó un comportamiento directamente proporcional al tiempo transcurrido y después de cuatro semanas no alcanzó el equilibrio (**Figura 2**). La ecuación que describe la cinética del comportamiento del valor de pH fue de orden cero:

$$y = 0.44x + 5.68 \text{ para FVC}$$

Es importante resaltar que el valor de pH del Fluvisol, en todos los tratamientos, tendió a llegar al valor de pH original. Esto ocurrió después de la cuarta semana que duró el experimento en FVA y FVAA y a la tercera semana en el FVC. El Fluvisol amortiguó más los cambios de pH que el Acrisol.

Conductividad eléctrica

La aplicación de vinazas crudas aumentó más de cinco veces el valor de la conductividad eléctrica (CE) del Acrisol. Esta característica del suelo disminuyó un poco ($400 \mu\text{S cm}^{-1}$) con el paso del tiempo. Sin embargo, después de la cuarta semana de duración del experimento, la CE del suelo se encontró muy por arriba del valor inicial (**Tabla V**).

TABLA V. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S cm}^{-1}$) EN EL ACRISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	AT $\bar{X} \pm s$	AVC $\bar{X} \pm s$	AVA $\bar{X} \pm s$	AVAA $\bar{X} \pm s$
1	302 $\pm$ 9.61a	1763 $\pm$ 76c	493 $\pm$ 14b	471 $\pm$ 23b
2	321 $\pm$ 29.21a	1395 $\pm$ 132c	416 $\pm$ 34b	487 $\pm$ 57b
3	315 $\pm$ 40.65a	1392 $\pm$ 101c	425 $\pm$ 22b	417 $\pm$ 20b
4	348 $\pm$ 45a	1384 $\pm$ 88c	492 $\pm$ 20b	488 $\pm$ 51b
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 ($P=0.05$) según la prueba de Tukey, r^2 = índice de regresión con valor de $P < 0.05$, NS= no significativo

En el Fluvisol, la CE presentó mayor incremento que

en el Acrisol y llegó a niveles casi nueve veces mayores que el valor inicial (**Tabla VI**).

TABLA VI. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S cm}^{-1}$) EN EL FLUVISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	FT $\bar{X} \pm s$	FVC $\bar{X} \pm s$	FVA $\bar{X} \pm s$	FVAA $\bar{X} \pm s$
1	345 $\pm$ 28a	3048 $\pm$ 577c	462 $\pm$ 17b	445 $\pm$ 3b
2	292 $\pm$ 18a	3196 $\pm$ 264c	391 $\pm$ 13b	411 $\pm$ 17b
3	266 $\pm$ 33a	2302 $\pm$ 565c	428 $\pm$ 29b	446 $\pm$ 41b
4	329 $\pm$ 37a	1649 $\pm$ 299c	486 $\pm$ 29b	461 $\pm$ 33b
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 ($P=0.05$) según la prueba de Tukey, r^2 = índice de regresión con valor de $P < 0.05$, NS= no significativo

En ambos suelos, las vinazas tratadas (VA y VAA) no ocasionaron problemas de salinidad.

Las VC presentaron valores elevados de CE (15.08 dS m^{-1}) y por ello fueron consideradas como de alto riesgo de salinización, sin embargo, al interactuar con el suelo se neutralizaron los iones H^+ y OH^- que participaron (Chang 1987), junto con K, Ca, Mg, otros iones y materia orgánica disuelta, en los valores de la CE de las vinazas crudas y tratadas. De acuerdo con los resultados de la CE, el Acrisol puede recibir mayores dosis de VC y con más frecuencia que el Fluvisol.

Carbono orgánico

En el Acrisol, los tratamientos con vinaza cruda y vinaza anaerobia presentaron tasas de descomposición constantes que pudieron ser descritas con las siguientes ecuaciones (**Figura 3**):

$$y = -0.093x + 3.68 \text{ para AVC}$$

$$y = -0.034x + 2.99 \text{ para AVA}$$

La tasa de descomposición en el AVC fue tres veces mayor que en el AVA, posiblemente por el menor contenido de sustancias húmicas en las vinazas crudas. El contenido de carbono orgánico en AVAA disminuyó conforme aumentó el tiempo, sin embargo, los datos no se ajustaron al modelo de mineralización lineal a una $P=0.05$ (**Tabla VII**). En la comparación entre tratamientos por semana, únicamente en el AVC los valores de la primera semana fueron diferentes a los de la cuarta.

El Fluvisol con vinaza cruda fue diferente a los tratamientos con vinazas anaerobias, anaerobias-aerobias y con el testigo, durante las cuatro semanas (**Tabla VIII**). En el

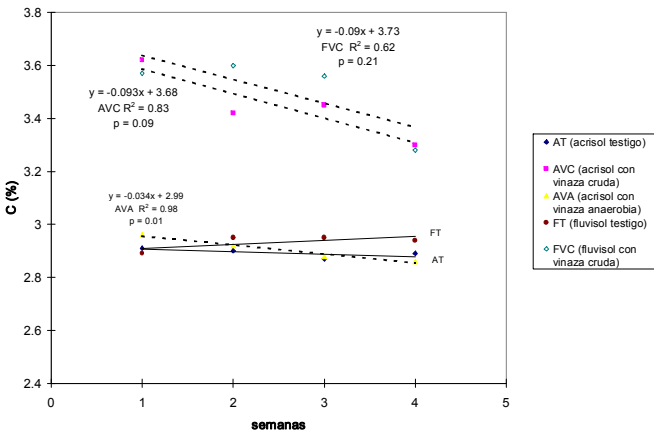


Fig. 3. Tendencias de cambio en el contenido de carbono orgánico total en suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol por la aplicación de vinazas

tratamiento FVC se detectó una tendencia lineal de disminución del carbono con respecto al tiempo; sin embargo, la correlación no fue significativa como lo muestra la **figura 4** y la siguiente ecuación:

$$y = -0.091x + 3.73 \text{ para FVC}$$

TABLA VII. PORCENTAJE DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL EN EL ACRISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	AT $\bar{X} \pm s$	AVC $\bar{X} \pm s$	AVA $\bar{X} \pm s$	AVAA $\bar{X} \pm s$
1	2.91±0.22a	3.62±0.24b	2.96±0.15a	2.89±0.07a
2	2.9 ±0.29a	3.42±0.08b	2.92±0.19a	2.89±0.11a
3	2.87±0.18a	3.45±0.15b	2.88±0.10a	2.84±0.17a
4	2.89±0.15a	3.3 ±0.08b	2.86±0.06a	2.86±0.11a
r² (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 (P= 0.05) según la prueba de Tukey, r²= índice de regresión con valor de P< 0.05, NS= no significativo

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

$$y = -0.08x + 3.14 \text{ para FVAA}$$

La tasa de descomposición del Fluvisol tratado con vinaza cruda de -0.09 equivalente a una descomposición de 0.9 g C kg⁻¹ de suelo por semana fue mayor al trata-

TABLA VIII. PORCENTAJE DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL EN EL FLUVISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	FT $\bar{X} \pm s$	FVC $\bar{X} \pm s$	FVA $\bar{X} \pm s$	FVAA $\bar{X} \pm s$
1	2.89±0.13a	3.57±0.25b	3.01±0.16a	3.11±0.26a
2	2.95±0.13a	3.6 ±0.13b	3.05	2.89±0.13a
3	2.95±0.03a	3.56±0.04b	2.95±0.12a	2.91±0.09a
4	2.94±0.11a	3.28±0.17b	2.95±0.07a	2.84±0.06a
r² (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 (P= 0.05) según la prueba de Tukey, r²= índice de regresión con valor de P< 0.05, NS= no significativo

miento con vinazas anaerobias aerobias (0.8 g C kg⁻¹ de suelo por semana) .

Los tratamientos con vinazas anaerobias mostraron una tendencia a la disminución con el paso del tiempo.

En la comparación entre suelos, la diferencia entre la tasa de descomposición del Acrisol tratado con vinaza cruda y del Fluvisol con el mismo tratamiento fue de k= 0.002, siendo el Acrisol el que presentó mayor mineralización de carbono. Si se compara la disminución de carbono entre la primera y cuarta semanas, en el tratamiento con vinaza cruda, en el Acrisol el valor fue de 0.32% y en el Fluvisol es de 0.29%, equivalentes a 3.2 y 2.9 g de C kg de suelo⁻¹ por mes, respectivamente.

Carbono orgánico soluble

La descomposición de la materia orgánica soluble en el Acrisol tratado con vinaza cruda mostró una dinámica de orden cero (tasa de descomposición constante), descrita por la siguiente ecuación:

$$y = -22.7x + 124.5 \text{ para AVC}$$

Después de cuatro semanas el suelo alcanzó los niveles originales de carbono orgánico soluble (**Tabla IX**).

La cantidad de carbono orgánico extraído con agua en los tratamientos con vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias disminuyó hasta niveles no detectables con la técnica utilizada.

El Fluvisol tratado con vinaza cruda presentó una tendencia de cinética de descomposición de orden cero para el contenido de carbono orgánico extraído con agua (**Fig. 4**), pero el modelo matemático que describe este fenómeno no es significativo a una P= 0.05 (**Tabla X**), la ecuación es la siguiente:

$$y = -6.4x + 157.5 \text{ para FVC}$$

En el Fluvisol, la utilización de vinazas anaerobias y

TABLA IX. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EXTRAÍDO CON AGUA (mg C kg suelo⁻¹) EN EL ACRISOL TRATADO CON VINAZAS

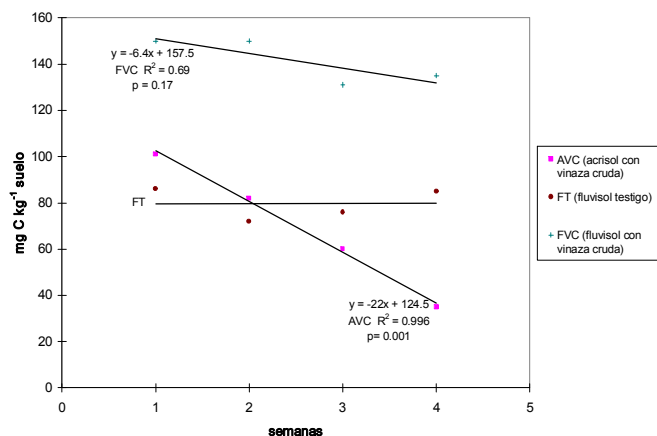
Semanas	AT $\bar{X} \pm s$	AVC $\bar{X} \pm s$	AVA $\bar{X} \pm s$	AVAA $\bar{X} \pm s$
1	22 ± 0a	101 ± 3.53b	52 ± 7.8a	26 ± 0a
2	67 ± 0a	82 ± 10.6b	ND	ND
3	33 ± 0a	60 ± 10.6b	ND	ND
4	35 ± 0a	35 ± 15.56a	ND	ND
r ² (p)	0.001 (0.97)	0.996 (0.002)		

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 (P= 0.05) según la prueba de Tukey, r²= índice de regresión con valor de P< 0.05.

anaerobias-aerobias ocasionaron una cinética de primer orden en la mineralización del carbono orgánico soluble, siendo la tasa de mineralización en FVAA (k = - 0.504) y en FVA (k = - 0.49). Las ecuaciones son:

$$y = 97.2e^{-0.49x} \text{ para FVA } (r^2 = 0.63)$$

$$y = 172e^{-0.504x} \text{ para FVAA } (r^2 = 0.86)$$

**Fig. 4.** Tendencias de cambio en el contenido de carbono orgánico extraído en agua de los suelos de las unidades Acrisol y Fluvisol

El valor de la ordenada al origen, de los suelos tratados con VC, permitió dilucidar el potencial de retención (adsorción y absorción) de los compuestos orgánicos solubles contenidos en las vinazas; siendo menor el valor en el Acrisol como consecuencia de su mayor retención. En este sentido, se confirmó la mayor retención de compuestos orgánicos en el Acrisol (124.5 mg C kg⁻¹ de suelo) en comparación con el Fluvisol (157.5 mg C kg⁻¹ de suelo).

TABLA X. CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EXTRAÍDO CON AGUA (mg C kg suelo⁻¹) EN EL FLUVISOL TRATADO CON VINAZAS

Semanas	FT $\bar{X} \pm s$	FVC $\bar{X} \pm s$	FVA $\bar{X} \pm s$	FVAA $\bar{X} \pm s$
1	86 ± 26a	150 ± 24b	74 ± 2.8a	113 ± 0a
2	72 ± 0c	150 ± 15.6d	24 ± 2.8a	45 ± 7.8b
3	76 ± 0b	131 ± 3.5c	28 ± 7.8a	38 ± 11.3a
4	85 ± 0a	135 ± 9.2b	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. Letras diferentes por renglón indican diferencias significativas (P= 0.05) según la prueba de Tukey, r²= índice de regresión con valor de P< 0.05, ND= no detectado, NS= no significativo

Análisis elemental

El Acrisol se consideró un suelo más intemperizado que el Fluvisol debido a las siguientes evidencias: menores valores Si/Al y mayores cantidades de Fe y Mn.

En cuanto a la fertilidad, el Fluvisol presentó mayores cantidades de metales alcalinos, alcalinotérreos y P₂O₅ en comparación con el Acrisol (Tabla XI).

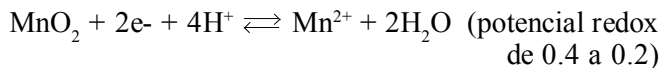
En ambos suelos se detectó la disminución relativa de SiO₂ y Al₂O₃ por la adición de vinaza cruda; siendo de 1.04 % y 0.4 % en el Fluvisol y de 0.4 %, 0.3 % en el Acrisol, respectivamente.

En el Fluvisol también se detectó la disminución del orden del 0.3 al 0.1 % de Fe₂O₃ en los tratamientos con vinazas.

La adición de vinaza cruda aumentó los contenidos de K₂O, CaO y MgO en ambos suelos. Las vinazas tratadas (VA y VAA) ocasionaron aumentos en el contenido de K₂O y Na₂O.

Cambios en algunos micronutrientos

Es muy conocida la participación del Mn, como aceptor de electrones, en la descomposición de la materia orgánica bajo condiciones reductoras, mediante la siguiente ecuación:



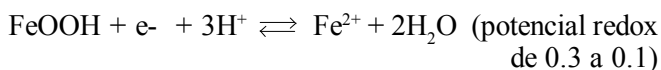
Por los contenidos de Mn encontrados es posible que se pudiera llegar a niveles peligrosos que ocasionen toxicidad a los cultivos (Tabla XII). De la misma manera, el contenido de hierro aumentó de manera importante con la aplicación de vinaza cruda en ambos suelos, debido posiblemente a las condiciones reductoras que se presentaron por la descomposición anaerobia de la VC (Sommers y Linsay 1979). De hecho, el aumento en hierro y manganeso extraídos

TABLA XI. CONTENIDOS TOTALES DE ELEMENTOS EN LOS SUELOS TRATADOS CON VINAZAS

	FT	FVC	FVA	FVAA %	AT	AVC	AVA	AVAA
SiO ₂	49.1	48.14	48.6	48.3	39.9	39.5	39.7	39.6
Al ₂ O ₃	20.1	19.7	20.2	20.0	27.8	27.5	27.8	27.5
Fe ₂ O ₃ t	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 ₂ O	0.30	0.54	0.34	0.34	0.28	0.50	0.31	0.32
Na ₂ O	0.63	0.64	0.67	0.67	0.50	0.51	0.54	0.55
P ₂ O ₅	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

fue una evidencia de la presencia de condiciones reductoras.



Al considerar ambos suelos, el aumento de P presentó una relación directamente proporcional con la concentración del Fe ($r=0.998$). Por esto, es posible que el aumento del P se debió al efecto combinado del aumento del pH [disminución de la formación de compuestos entre el Al (III) y el ion PO_4^{3-}], a las condiciones reductoras [disminución de la formación de compuestos entre el Fe (III) y el ion PO_4^{3-} , por el cambio de estado de oxidación de Fe (III) a Fe (II)] y a la formación de quelatos de Fe.

Aún cuando el Acrisol contiene más Fe total, al aplicarle la VC se presentó mayor cantidad de Fe (II) en el

Fluvisol. En el Acrisol prácticamente todo el Mn (IV) se convirtió en Mn (II) bajo las condiciones reductoras generadas por la VC.

El contenido de Zn extraído aumentó en el Acrisol, por aplicación de vinaza cruda. Las vinazas anaerobias y anaerobias-aerobias no ocasionaron cambios. En el Fluvisol no se presentaron cambios en el contenido de Zn por la aplicación de vinazas crudas y tratadas. El aumento de Zn en el Acrisol por la aplicación de VC constituyó un riesgo de contaminación del suelo y de toxicidad para la caña de azúcar.

En ambos suelos, el contenido de Cu no se modificó por la aplicación de ningún tipo de vinaza. Se tuvieron mayores cantidades de Cu en el Fluvisol que en el Acrisol [9 y 2 mg de Cu kg⁻¹ de suelo, respectivamente].

Cambios en el fósforo asimilable y en Fe y Al extraídos con oxalato de amonio

En ambos suelos, los contenidos de P aumentaron con la aplicación de los tres tipos de vinaza. Sin embargo, al aplicar vinaza cruda, el aumento fue mayor en el Fluvisol (incremento de 53 mg kg⁻¹) que en el Acrisol (incremento de 8 mg kg⁻¹). El Al_o no cambia en el Acrisol por la aplicación de los tres tipos de vinaza.

La aplicación de VC no ocasionó cambios en la cantidad de Fe_o, pero la aplicación de vinazas tratadas (VA y VAA) sí generó el aumento (Tabla XIII), debido posiblemente a la inhibición de la cristalización del Fe soluble por la presencia de sustancias húmicas, como lo describe Dahlgren (1994).

Es muy conocido que los compuestos fenólicos reducen el Fe (III) de los minerales del suelo a Fe (II), ocasionando la liberación de este último a la solución del suelo (Huang 1994), aumentando el Fe_o. También las condiciones reductoras, provocadas por la aplicación de vinazas, bajo las cuales las bacterias forman reductasas, favorecen la transformación del Fe (III) a Fe (II) (Huang 1994). De la misma manera, es posible

TABLA XII. CAMBIOS EN LA DISPONIBILIDAD DE ALGUNOS MICRONUTRIENTES POR LA APLICACIÓN DE VINAZAS

Tratamientos	Hierro	Manganeso mg kg ⁻¹	Zinc	Cobre
AT	51 ± 22	775 ± 199	119 ± 23	2 ± 0
AVC	93 ± 6	2721 ± 234	278 ± 62	3 ± 0
AVA	55 ± 2	742 ± 57	289 ± 181	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

TABLA XIII. CAMBIOS EN EL HIERRO Y ALUMINIO EXTRAÍBLES CON OXALATO DE AMONIO Y EN EL FÓSFORO OCASIONADOS POR LA APLICACIÓN DE VINAZAS

Tratamientos	Fósforo	Fe _o mg kg ⁻¹	Al _o
Acrisol			
AT	9 ± 1	503.1 ± 15.3b	3.20 ± 0.14a
AVC	17 ± 1	492.8 ± 15.9b	2.80 ± 0.08a
AVA	11 ± 1	590.0 ± 22.6a	2.87 ± 0.11a
AVAA	9 ± 1	619.4 ± 26.1a	2.83 ± 0.13a
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

que los ácidos orgánicos presentaran una afinidad alta (electrostática y como ligantes) con los óxidos de hierro (Oades 1989).

Cambios en los minerales

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

En el Acrisol, los minerales identificados por DRX no mostraron cambios substanciales excepto en la halloysita, cuyo cambio se debe atribuir a dos causas, 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 (**Tabla XIV**).

En el Fluvisol por el contrario, el cuarzo, la cristobalita y la hematita parecieron aumentar su intensidad relativa y

TABLA XIV. MINERALES SECUNDARIOS EN EL ACRISOL TRATADO CON VINAZAS

Tratamientos	Halloysita (0.736 nm)	Cuarzo	Hematita	Cristobalita
área de la señal en cm ²				
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)	4.20	0.44	presencia
AVAA	4.32 (0.736 nm)	2.05	0.48	SPC

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 posición angular de la familia de planos en angstroms, SPC= señal poco clara

el área de sus picos, lo que sugiere que las vinazas pudieron estar lixiviando y/o disolviendo minerales amorfos presentes en la matriz (**Tabla XV**).

Los cambios en la halloysita pudieran deberse más probablemente a que la familia de planos cercana a 0.72 nm aceptó el material agregado con las vinazas y eso refleja una pequeña pérdida de la cristalinidad del mineral, lo que también puede estar asociado al área bajo el pico (Brindley y Brown 1980).

Al comparar el análisis de difracción de rayos X reveló que el Fluvisol contiene relativamente más cuarzo, feldespatos, cristobalita y halloysita que el Acrisol. 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.

TABLA XV. 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 ²					
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	SPC
FVAA	6.25 (0.724 nm)	3.98	1.56	0.6	SPC

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 posición angular de la familia de planos en nm, SPC= señal poco clara

DISCUSIÓN

El aumento del pH en el Acrisol resultó importante debido a la relación que tiene con el incremento en la disponibilidad de los nutrientes (Lindsay 1988, Oades 1989, Hayes y Bolt 1991, Doménech 1995), principalmente con el P. El cambio en el pH no es momentáneo ya que permaneció durante las cuatro semanas que duró el experimento.

En los suelos ácidos, sobre los que se realizan actividades agrícolas, es común la aplicación periódica de cantidades importantes de carbonato de calcio con el objeto de aumentar el pH, disminuir la fijación de P, aumentar Ca y Mg, disminuir la toxicidad por Al, aumentar la capacidad de intercambio catiónico, y mejorar las propiedades físicas y microbiológicas (Arzola *et al.* 1994, Chávez y Alvarado 1994, Orlando 1994). Esta práctica puede ser substituida con la aplicación de vinaza cruda, ya que además de cubrir los objetivos de la aplicación de cal, se le adicionan K, N, S, Ca, Mg, P y Zn y otros nutrientes, siendo con ello una enmienda mejor y más barata.

La caña de azúcar, cultivo que tiene gran capacidad de adaptación a una variedad amplia de suelos (en la zona de estudio hay al menos siete unidades) es, sin embargo, un cultivo sensible a la salinidad, que presenta disminución en su rendimiento a valores mayores de 2 dS m⁻¹ (Aguirre 1993). Por ello es de suma importancia darle seguimiento a esta característica edáfica.

Las VA y VAA, que contienen compuestos húmicos, pueden mejorar los suelos en las propiedades arriba mencionadas, además la CE no aumenta y los enlaces con los óxidos de Fe y Al son más estables.

Es necesario realizar estudios de campo para encontrar las cantidades adecuadas de vinazas que mejoren las condiciones edáficas y eleven la producción de caña, ya que se ha encontrado que cuando son altas, la cantidad y la calidad de la caña de azúcar disminuye (Orlando 1985, 1994), así como la germinación y el crecimiento de *Pisum sativum* y *Helianthus annuus* (Faruk y Kadioglu 1992).

En cuanto a la mineralización del carbono orgánico soluble, la tasa de descomposición (k) fue considerablemente mayor en el Acrisol (k = - 22.7 mg C kg⁻¹ de suelo por semana) que en el Fluvisol (k = - 6.4 mg C kg⁻¹ de suelo por semana), cerca de 4 veces más. La explicación a este hecho se fundamentó en el comportamiento de los coloides minerales de los suelos.

En el Fluvisol, donde se tiene más halloysita que óxidos, la salinidad puede llegar a inhibir la acción de las enzimas extracelulares secretadas por los hongos (Swift *et al.* 1977, Tate 1992, Lavelle *et al.* 1993). También es ya conocido el efecto negativo de la salinidad en la actividad de las enzimas (Tate 1992) y como el Fluvisol resultó más salino que el Acrisol, es posible que este hecho contribuyera a disminuir la tasa de mineralización de la materia orgánica.

En lo concerniente al Acrisol, se encontraron, principalmente coloides minerales del tipo de los oxohidroxos de Fe, Al y Mn que no inhibieron a las enzimas extracelulares. Por el contrario, Fe y Mn pueden catalizar la oxidación de la materia orgánica en condiciones de baja aireación (Mc Bride 1989, Oades 1989).

En ambos suelos, la cinética de la mineralización de las VC fue de orden cero, lo cual teóricamente se debe a que el sustrato es mucho mayor que la tasa media de mineralización, por esto se deduce 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.

La aplicación de vinaza cruda produce beneficios, sobre todo en el Acrisol que es el suelo más intemperizado y con menores contenidos de cationes intercambiables. Además las concentraciones de Fe, Mn y Zn también aumentan en ambos suelos, siendo en el Acrisol de 134, 251, 82 y 11 % en Zn, Mn, Fe y P, respectivamente y en el Fluvisol de 146, 15 y 16 % en Mn, Fe y P, respectivamente. La cantidad elevada de Mn puede ser tóxica para la caña de azúcar, principalmente en el Acrisol.

Con respecto a los cambios en los minerales, se encontró que el Acrisol tratado con VC no se acidificó de manera drástica y es menor el riesgo de destrucción de halloysita, por esta vía. Por el contrario, la acidificación 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, según lo indica 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 esto se encuentra únicamente en función del ion H⁺ (Bohn *et al.* 1993).

Las aplicaciones continuas de VC en los suelos puede ocasionar la meteorización excesiva de los minerales primarios y secundarios en el Fluvisol por varias razones, como su condición ácida, su actividad como ligante y la generación de ácidos inorgánicos como HNO₃ y H₂SO₄, productos de la descomposición (Huang y Keller 1972, Huang 1993). A largo plazo, la meteorización de los suelos puede ocasionar la disminución de la fertilidad del suelo debido a que la mayoría de los suelos de la región son arcillosos, es decir, contienen más minerales secundarios que primarios, por lo que son suelos con bajos contenidos de minerales primarios que contengan nutrientes en su estructura cristalina.

Es posible, que por aplicaciones continuas de VC, a largo plazo se produzcan condiciones de “pseudopodsolización” lo que constituye un problema de manejo debido a la formación de horizontes endurecidos y por la acumulación y toxicidad de los quelatos de Fe y Al.

Se recomienda estudiar la formación de compuestos organominerales ya que éstos 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).

CONCLUSIONES

En el Acrisol, la aplicación de vinaza cruda constituye un riesgo de salinización y de contaminación por Zn y Mn. La halloysita presentó una pérdida ligera de la cristalinidad. Sin embargo, la vinaza cruda representa varios beneficios potenciales, como aumentos del valor de pH, Fe y P.

Los riesgos de la aplicación de vinazas anaerobias en el Acrisol son la toxicidad por Zn y la pérdida de la cristalinidad de la halloysita. Los beneficios son los incrementos en el valor del pH y en el P y la disminución del riesgo de contaminación de los cuerpos de agua.

El uso de la vinaza anaerobia-aerobia en el Acrisol presentó el beneficio potencial del aumento del valor de pH y la disminución del riesgo de contaminación de los cuerpos de agua.

En el Fluvisol, la aplicación de vinaza cruda presenta los riesgos de salinización y de toxicidad por Mn. Los beneficios de la aplicación son incrementos de Fe y P.

En el Fluvisol no se detectaron riesgos por la vinazas anaerobia y anaerobia-aerobia. El beneficio se debe a la retención de la materia orgánica y su consecuente disminución del riesgo de contaminación de los cuerpos de agua.

Al comparar entre suelos, en el Acrisol es mayor la descomposición de la materia orgánica y la retención del carbono orgánico soluble que en el Fluvisol. Por ello, el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua alejados a los sitios de aplicación aumenta en el Fluvisol.

AGRADECIMENTOS

Se agradece el apoyo económico de la UNAM, así como la colaboración técnica del Biól. Jorge Villatoro y la asesoría de las Dras. Teresa Reyna Trujillo y Lourdes Villers Ruiz. Asimismo, se agradece a uno de los árbitros que de manera especial y anónima realizó valiosos comentarios sobre el mecanoscrito.

REFERENCIAS

- Aguirre A. (1993). *Química de los suelos salinos y sódicos*. FES-Cuautitlán, UNAM. México D.F.
- Alexander M. y Scow K. (1987). Kinetic of biodegradation in soils. En: *Reactions and movement of organic chemicals in soils*. Soil Science Society of America. Wisconsin.
- Arzola N., Pérez H. y Yera B. (1994). Utilization of conventional and non-conventional nutrient source in the sugarcane crop. Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agriculture. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, pp. 406-414.
- Bautista-Zúñiga F., Luna-Pabello V. y Durán-de-Bazúa C. (1995). El suelo un reactor químico muy interesante. *Educación Química* 6, 226-230.
- Bautista-Zúñiga F. y Durán-de-Bazúa C. (1998). Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinaza crudas y tratadas biológicamente. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 14, 11-17.
- Bautista-Zúñiga F., Rivas H., Durán-de-Bazúa C. y Palacio G. (1998). Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas* 36, 21-33.
- Bautista-Zúñiga F., Reyna-Trujillo T., Villers-Ruiz L., Durán-de-Bazúa C., Rivas-Solorzano H., Villatoro-Resendiz J. y Krishnan R. (2000). Mejoramiento de suelos agrícolas usando aguas residuales agroindustriales. Caso: Vinazas crudas y tratadas. Publicaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Biscaye P.I. (1965). Mineralogy and sedimentation on recent deep sea clay in the Atlantic ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.* 76, 803-832.
- Blake G. (1976). *Methods of soil analysis*. Agronomy, No 9. Part I. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin.
- Brindley G. W. y Brown G. (1980). Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification. The Mineralogical Society Monograph No. 5. Londres.
- Bohn H., Mcneal B. y O'Connor G. (1993). *Química del suelo*. Limusa, D.F, México.
- Castro J. y Villegas R. (1989). Obtención de proteína microbiana empleando como sustrato 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*. CECSA, D.F., México.
- Chávez M. y Alvarado A. (1994). Manejo de la fertilización en plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum* spp) en andisoles de ladera de Costa Rica. Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agriculture. 15th World Congress of Soil Science., Acapulco, México, pp. 353-372.
- Coleman D., Oades J. y Uehara G. (1989). Introduction: soil organic matter: tropical vs temperate. En: *Dynamics of soil*

- organic matter in tropical ecosystems*. (D. Coleman, J. Oades y G. Uehara, Eds.) Niftal Project. University of Hawaii, Honolulu.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). (1997). *Ley federal de derechos en materia de agua*. D.F., México, pp. 96.
- Dahlgren R.A. (1994). Weathering environments and the formation of non crystalline materials in volcanic ash soils. Symposium VIIb. Weathering and the formation of soils minerals. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, pp. 106-115.
- Doménech X. (1995). *Química del suelo: el impacto de los contaminantes*. Miraguano, Madrid.
- 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. *Tecnol. Ciencia Educ.* 3, 33-43.
- Durán-de-Bazúa C., Zámamo-Pérez A.H. y Zedillo-Ponce-de-León L.E. (1991a). *Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria alcohólica*. Informe Técnico VIN-01-91. Facultad de Química, UNAM. México D.F.
- Durán-de-Bazúa C., Noyola A., Poggi-Varaldo H. y Zedillo L. (1991b). *Biodegradation of process industry wastewater. Case problem: sugarcane industry*. En: *Biological process of wastes*. (A. M. Martín, Ed.) Elsevier, Londres.
- 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, 42-47.
- Faruk O. y Kadioglu A. (1992). The effects of vinasses on the growth, biomass and primary productivity in pea (*Pisum sativum*) and sunflower (*Helianthus annuus*). *Agricul. Ecosyst. Environ.* 39, 139-144.
- 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 Fertiliz.* 28, 521-532.
- Hayes M.H. y Bolt G.H. (1991). Soil colloids and the soil solution. En: *Interactions at the soil colloids-soil solution interface*. Kluwer Academic Pub., Amsterdam.
- 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.
- Huang W. y Keller W. (1972). Organic acids as agents of chemical weathering of silicate minerals. *Nature Phys. Sci.* 293, 149-151.
- Huang W. (1993). Impact of interactions among soil minerals, organics and microbes on agroecosystems. En: *Agroecología, sostenibilidad y educación* (R. Ferrera y R. Quintero, Eds.), Edo. de México, México, pp. 79-97.
- Huang P.M. (1994). Role of organics and microbes in mineral transformations. Symposium VIIb. Weathering and the formation of soils minerals. 15th World Congress of Soil Science. 8a, 68-84. D.F., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (1984a). Carta Topográfica. Córdoba E14-3. Escala 1:50,000. Aguascalientes, México.
- 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 Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM, D.F., México.
- Lavelle P., Blanchart E., Martin A. y Martin S. (1993). A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25, 130-150.
- Lehninger A., Nelson D. y Cox M. (1993). *Principles of biochemistry*. 2a ed. Woth Pub., Nueva York.
- Lindsay W. (1988). *Chemical equilibria in soils*. Wiley, Nueva York.
- Mc Bride M.B. (1989). Surface chemistry of soil minerals. En: *Minerals in soil environment*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Oades M.J. (1989). An introduction to organic matter in mineral soils. En: *Minerals in soil environments* (J.B. Dixon y S.B. Weed, Eds.). Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- 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), Kenia.
- Olvera-Rubio A.P., Brindis-Olvera F.N., Gil B.E. y Durán-de-Bazúa C. (1992). Generación de biomasa microbiana en un reactor de biodiscos de un tren anaerobio-aerobio de tratamiento de vinazas de caña de azúcar. Informe técnico de trabajo VIN-01-92. UNAM-AZÚCAR-IMPA-UASLP (Huastecas)-IPN. pp. 93. Pub. Facultad de Química, UNAM, México D.F.
- Orlando F. (1985). Potassium nutrition in sugarcane. En: *Potassium in agriculture*. (R. Munson, Ed.). American Society of Agronomy, pp. 1045-1062.
- Orlando F. (1994). Alternatives for an efficient use of mineral fertilizers and sugar factory residues with low soil degradation and environment contamination risks. Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agriculture. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México, pp. 395-405.
- Otero M.A. y González J. (1991). Análisis de la fracción metálica de las mieles del CAI-Guatemala. *ICIDCA* 25, 11-14.
- Paul E. y Clark F. (1989). *Soil microbial and biochemistry*. Academic Press, California.
- Sommers L. y Lindsay W. (1979). Effect of pH and redox on predicted heavy metal-chelate equilibria in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43, 39-46.
- 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. *Agro-nomía Costarricense* 16, 55-60.
- Swift M., Heal O. y Anderson J. (1977). *Decomposition in terrestrial ecosystems. Studies in Ecology*. Volume 5. University of California Press, California.

Tate R. (1992). Soil Organic Matter. En: *Biological and Ecological Effects*. (D. Krieger, Ed.), Florida.

Valdés E., González P. y Obaya M. (1991a). Evaluación preliminar de lodos “anaeróbicos” como complemen-

to en la dieta animal. ICIDCA 25, 1-4.

Valdés E., Obaya M. y León O. (1991b). Evaluación preliminar de lodos “anaeróbicos” como “biofertilizantes”. ICIDCA 25, 15-18.