APLICACIÓN DE VINAZA AL SUELO

Virginia Harumi TAKATA VIDAL

Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias del Suelo

Diciembre 2020

Tesis aprobada por el tribunal integrado por: Ing. Agr. (PhD) Ariel Szogi, Ing. Agr. (MSc) Marcelo Ferrando y Dra. Natalia Bajsa, el 14 de diciembre de 2020. Autor/a: Virginia Harumi Takata Vidal. Directora: Ing. Agr. (PhD) Amabelia del Pino, Co-director: Ing. Agr. (PhD) Jorge Hernández.

Dedico este trabajo a Gonzalo, Susana y Valeria.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Gonza, Mamá, Vale, Alicia e Inés por el apoyo constante y la motivación.

A mis tutores Amabelia y Jorge, por todas sus enseñanzas y consejos, porque sin ellos este trabajo no hubiera sido posible.

Al equipo de ALUR y especialmente a Germán Panissa.

A mis compañeros y amigos del trabajo.

Al Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía por brindarme las instalaciones para los experimentos y análisis de la tesis.

Y a todos aquellos que han colaborado en mi formación personal y como investigadora.

TABLA DE CONTENIDO

página

PÁGINA DE APROBACIÓN II

AGRADECIMIENTOS IV

RESUMEN VIII

SUMMARY IX

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR 1

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA VINAZA.....4

1.3. INTERACCIÓN SUELO-VINAZA.....5

1.4. INFLUENCIA DEL MATERIAL PARENTAL Y MINERALOGÍA DEL SUELO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE POTASIO.....6

1.5. MINERALIZACIÓN DE LA VINAZA.....9

1.6. PLANTEO DEL PROBLEMA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.....10

2. UTILIZACIÓN DE LA VINAZA COMO FUENTE DE K PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.....12

2.1. RESUMEN 12

2.2. SUMMARY 13

2.3. RESUMO 13

2.4. INTRODUCCIÓN.....14

2.5. MATERIALES Y MÉTODOS.....17

2.5.1. Caracterización de la vinaza 17

2.5.2. Suelos utilizados.....17

2.5.3. Instalación del experimento.....18

2.5.4. Muestreo de suelos y análisis.....20

2.5.5. Diseño experimental y análisis estadístico.....20

2.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....21

2.6.1. Características de la vinaza.....21

2.6.2. Características de los suelos.....21

2.6.3. Efectos de la aplicación de vinaza sobre el contenido de cationes Ca, Mg y Na en forma intercambiable y en la solución del suelo……22
2.6.4. Formas de K en el suelo y relación con la dosis de vinaza aplicada……..26
2.6.5. Relaciones catiónicas……..35
2.7. CONCLUSIONES……..36
Agradecimientos……...37
2.8. BIBLIOGRAFÍA ……....37

3. DESCOMPOSICIÓN Y LIBERACIÓN DE NITRÓGENO DE LA VINAZA EN DIFERENTES DOSIS Y SUELOS DEL URUGUAY……42
3.1. RESUMEN ...…….....42
3.2. SUMMARY .....…….....42
3.3. RESUMO .....…….....43
3.4. INTRODUCCIÓN……...……...43
3.5. MATERIALES Y MÉTODOS…….....45
3.5.1. Suelos……45
3.5.2. Vinaza……46
3.5.3. Instalación del experimento de incubación……46
3.5.4. Muestreo de suelos y análisis…….....47
3.5.5. Respiración microbiana……...47
3.5.6. Diseño experimental y análisis estadístico……48
3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN……49
3.6.1. Evolución de pH, CE, y P disponible en suelos con aplicación de vinaza……...50
3.6.2. Mineralización de C y N……...53
3.6.2.1. Respiración microbiana y evolución del C en el suelo……53
3.6.2.2. Evolución del N en el suelo……..59
3.7. CONCLUSIONES……..61
Agradecimientos……...61
3.8. BIBLIOGRAFÍA……..62
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ……66

5. CONCLUSIONES ……..**72**
6. BIBLIOGRAFÍA ……..**73**

RESUMEN

La vinaza es un residuo líquido obtenido en la producción de etanol a partir de la fermentación del jugo de caña de azúcar. Se generan en Uruguay aproximadamente 7 L de vinaza por L de etanol. La aplicación de vinaza al suelo aporta MO y nutrientes, principalmente K, seguido por N, Ca, Mg y P. Tiene pH ácido y no contiene elementos tóxicos ni metales pesados. Los objetivos del trabajo fueron: i) caracterizar los cambios en los contenidos de distintas formas de K en el suelo (solución, intercambiable y no intercambiable) con el agregado de vinaza y su relación con el contenido y tipo de mineral arcilloso; ii) caracterizar el efecto de la aplicación de vinaza sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo; iii) establecer si existen cambios en las relaciones catiónicas y iv) establecer tasas de descomposición de vinaza en distintos suelos. Se estudió en condiciones controladas de laboratorio (humedad y temperatura), el efecto de la aplicación de vinaza en cinco suelos representativos del área de producción de caña de azúcar. Se incubó el suelo con dosis de vinaza equivalentes a 125, 250 y 375 m^3 ha^{-1} y un testigo sin agregado, en un diseño completamente aleatorizado con 3 repeticiones. Se realizaron muestreos de suelo, a los 14 y 180 días de iniciado el experimento, evaluándose pH, CE, N mineral, P disponible, cationes intercambiables, K en solución y K no intercambiable. Se midió la tasa de respiración microbiana, determinando la producción de CO_2. La aplicación de vinaza aumentó la concentración de K intercambiable en el suelo y de Ca, Mg, K y Na en solución. Se establecieron relaciones lineales entre la dosis de K agregado con la vinaza y las distintas fracciones de K. La relación entre el K intercambiable y en solución siguió un modelo exponencial, con mayor proporción de K en solución en los suelos arenosos. No se observó efecto de la vinaza sobre pH y P disponible. Para $N\text{-}NO_3$ y CE el efecto se observó al final del experimento. La aplicación de vinaza contrarrestó el desbalance catiónico en aquellos suelos con predominio de Ca intercambiable. La tasa de respiración microbiana mostró aumentos significativos con el agregado de vinaza hasta los 20 días de iniciado el experimento, luego solo se observaron diferencias entre suelos. Estos resultados indican: que el sustrato es muy lábil y se mineralizó rápidamente, y que su aporte principal de nutrientes se relaciona con la disponibilidad de K, y en segundo término N, con escasos efectos sobre las propiedades del suelo.

Palabras clave: potasio, caña de azúcar, K no intercambiable, respiración microbiana

SUMMARY

Vinasse is a liquid residue resulting from ethanol production during the distillation of sugarcane juice. Approximately 7 L of vinasse per L of ethanol are generated in Uruguay. The land application of vinasse provides a significant content of organic matter and nutrients, mainly K, followed by N, Ca, Mg and P. Vinasse has an acid pH. I It does not contain toxic elements or heavy metals. The objectives of this work were, i) to characterize the changes in the content of different forms of K in the soil (solution, exchangeable and nonexchangeable) due to the addition of vinasse and its relationship with the clay content and clay type; ii) characterize the effect of vinasse application on soil nutrients; iii) establish if there are changes in cationic relationships and iv) establish mineralization rates in different soils. The effect of vinasse application in five representative soils of the sugarcane production area was studied under controlled conditions (humidity and temperature). Soil-vinasse incubations were carried out with doses equivalent to 125, 250 and 375 m^3 ha^{-1} and a control without vinasse, in a completely randomized design with three repetitions. Soil samples were taken 14 and 180 days after starting the experiment. The pH, EC, mineral N, available P, exchangeable cations (Ca, Mg, K and Na), K in solution and non-exchangeable K were determined. Furthermore, the microbial respiration rate was determined by measuring CO2 production. Vinasse increased soil concentration of exchangeable K and Ca, Mg, K and Na in soil solution content. Linear relationships were established between the dose of K added with vinasse and the different K fractions. The relationship between exchangeable K and K in the soil solution was fitted to an exponential model. A higher proportion of K in the soil solution was found in sandy soils. No effect of vinasse in pH or available P were observed. For N-NO3 and CE, the effect was observed at the end of the experiment. Vinasse application enhanced the cationic imbalance in those soils with a predominance of exchangeable Ca. Significative differences were observed in respiration rates between soils, which increased with vinasse application until 20 days after the experiment's start, then differences were observed between soils. Those results indicate that: vinasse is highly labile and mineralization was quick in the soil. The supply of nutrients is related to the availability of K, and secondly N, has scarcely any effect on soil properties.

Keywords: potassium, sugar cane, non exchangeable K, microbial respiration

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos y subproductos agroindustriales ha aumentado en las últimas décadas, acompasando el crecimiento de la población mundial. La gestión de estos residuos se torna cada vez más compleja al tratarse de grandes volúmenes, por lo tanto una de las alternativas mayormente utilizadas a nivel mundial, es la reutilización de los residuos como enmiendas orgánicas mejoradoras del suelo (Dar, 1997).

Las enmiendas orgánicas en general son ricas en materia orgánica (MO), que al aplicarse al suelo pueden proveer de nutrientes a las plantas incrementando la fertilidad natural, mejorando las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del suelo, como el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, mejorar la retención de agua en el perfil y fomentar la actividad microbiana entre otros, pudiendo sustituir parcial o totalmente a la fertilización mineral. Sin embargo, la entrada de MO al sistema suelo-planta puede provocar efectos negativos, como una disminución temporal del oxígeno disuelto y desnitrificación e inmovilización de nitrógeno en el suelo, enriquecimiento del suelo con sales o una desincronización entre la disponibilidad de nutrientes y la absorción por los cultivos (Grigatti et al., 2010; Bernal et al., 1998). Una de las mayores preocupaciones de la utilización de materiales orgánicos se manifiesta en los efectos adversos en la calidad de los cuerpos de agua. La llegada de MO y nutrientes a los recursos hídricos, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P), supone consecuencias negativas en la vida acuática, reducción potencial de su uso y aumento en los gastos de potabilización entre otros (González, 2007). En este trabajo se estudió la descomposición y aporte de nutrientes en suelos de producción de caña de azúcar que son regados con vinaza.

1.1. CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Si bien la plantación de caña de azúcar en el Uruguay data de al menos 40 años, a partir del 2006 se multiplicó su producción. En el año 2007 en Uruguay se promulgó la ley de Agrocombustibles (N° 18.195) que tiene por objeto en su artículo 1, el fomento y la regulación de la producción, comercialización y utilización de agrocombustibles, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los términos del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, contribuyendo al desarrollo sostenible del país. Por otra parte, presenta como objetivo el fomento de un equilibrio entre la producción y el

cuidado del medio ambiente asociados a criterios del ordenamiento territorial. En este sentido la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP) por medio Alcoholes de Uruguay (ALUR), comenzaron en el año 2006 un plan de producción de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) como materia prima para la generación de bioetanol.

La caña de azúcar es una gramínea C4, que produce gran cantidad de biomasa con valores de hasta 100 Mg ha^{-1} en base fresca con la capacidad de remover entre 40 y 350 kg ha^{-1} de K_2O dependiendo de la variedad y el rendimiento (Bolio-López et al., 2008; Bokhtiar et al., 2001; Lazcano, 1999). La gran producción anual de esta especie agrícola provoca una gran movilización de nutrientes desde el suelo, requiriendo grandes cantidades de macro y micronutrientes, por lo tanto su cultivo debe producirse bajo programas de fertilización debido a los altos requerimientos nutricionales (Dotaniya et al., 2016; Pérez, 2014).

En el mundo, la caña de azúcar ocupa 27 millones de hectáreas en más de 109 países, con un rendimiento estimado en 1,91 mil millones de toneladas de caña cosechada anualmente. El principal productor de caña es Brasil, le siguen India, China, Tailandia, Pakistán y México, siendo Brasil e India los que concentran el 50% de la producción mundial (Dotaniya et al., 2016).

En el Uruguay, la caña de azúcar ocupa un área acotada de aproximadamente 11.500 hectáreas en Bella Unión (Dpto. de Artigas). En la zafra 2015 la producción fue de 450.000 toneladas, lo que representa un promedio de 39 t ha^{-1} en base fresca. En general esta especie extrae gran cantidad nutrientes como N y potasio (K) y en menor cantidad P. Si bien la fertilización nitrogenada es la base de la fertilización en caña de azúcar, la extracción de K por parte del cultivo es mayor que cualquier otro nutriente (Pérez, 2014). La cantidad de K extraído, depende del tipo de suelo, la variedad cultivada y del contenido inicial de K en el suelo. La extracción de K en suelos ricos en este nutriente oscila entre 1,6 y 1,8 kg t^{-1} de tallo. Sin embargo, en suelos más pobres el intervalo se encuentra entre 1,1 y 1,2 kg t^{-1} de tallo (Pérez et al., 2013). Las aplicaciones de grandes dosis de fertilizantes potásicos por prolongados períodos de tiempo incrementan la extracción de K del suelo ya que la caña de azúcar puede extraer más K del que necesita para su crecimiento y nutrición, este fenómeno se conoce como "consumo de lujo" y representa una utilización ineficiente de dicho elemento (Pérez, 2014; Pérez et al., 2013).

Dentro de la planta de caña de azúcar, el K y N son los nutrientes que se encuentran en mayor proporción, seguidos por Ca, S, P y Mg (Chaves, 1999). Estos presentan alta variabilidad, debido a las características de la especie, ya que las plantas monocotiledóneas como la caña de azúcar presentan más afinidad por cationes univalentes como el K que las dicotiledóneas.

El K tiene múltiples funciones en la caña, tiene una importancia decisiva en la fotosíntesis y en la acumulación de sacarosa, síntesis de proteínas y formación de almidón, en la apertura y cierre de estomas, en la respiración, acumulación y translocación de azúcares y proteínas, formación de la estructura celular y asimilación de carbono (C). Se lo considera vital para la economía hídrica, por limitar el grado de transpiración e incrementar la absorción de agua o crear condiciones internas de resistencia a la sequía. La buena nutrición potásica evita el vuelco de las cañas, al aumentar el grosor de la pared celular, neutraliza los ácidos orgánicos y desarrolla un equilibrio entre estos y los azúcares. El K estimula el buen desarrollo de la raíz y aumenta la resistencia a las enfermedades, rasgos fundamentales para la producción de caña de azúcar (Pérez, 2014; Lazcano, 1999). Si bien la caña de azúcar puede consumir más K del que necesita para su desarrollo, el exceso de K en la planta produce un efecto negativo en el contenido de azúcar recuperable, ya que dificulta el proceso de cristalización del azúcar (Pérez, 2014).

La cosecha de los tallos de caña de azúcar en el Uruguay se realiza de forma manual, posterior a la quema de hojas. Luego de la cosecha, la caña se procesa físicamente para la obtención de jugo de caña. Dicho jugo puede ser la materia prima para la producción de azúcar o, puede fermentarse para la producción de etanol anhidro. En este último proceso se genera un residuo llamado vinaza. A nivel mundial se generan entre 10 y 18 litros de vinaza por litro de alcohol producido (España-Gamboa et al., 2012; Gómez, 2011; Lezcano y Mora, 2006; Chaves, 1985). Sin embargo, en el Ingenio Azucarero de Bella Unión la relación vinaza-alcohol ronda los 6-7 litros (Germán Panissa, comunicación personal, 10 de abril de 2018). La capacidad productiva del ingenio azucarero de ALUR-Bella Unión (Uruguay) es de 120 m^3 $día^{-1}$ de etanol, lo que implica que se generen grandes volúmenes de vinaza, que deben tener una gestión y disposición final adecuadas.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA VINAZA

La vinaza es un residuo líquido con relativamente altos contenidos de MO, N, K, Ca y Mg y bajos contenidos de P (Christofoletti et al., 2013; España-Gamboa et al., 2012; Lezcano y Mora, 2006). El pH se encuentra entre 3,5 y 5, aunque datos preliminares obtenidos en Uruguay presentan un pH en el orden de 6 unidades (Del Pino et al., 2017). El contenido de nutrientes presentes en la vinaza depende del cultivo que le da origen y del ambiente (asociado al tipo de suelo, clima, variedad, etc.) y no contiene elementos tóxicos ni metales pesados (García y Rojas, 2006). En la vinaza se encuentran sustancias inorgánicas solubles en donde predomina el ión K^{+}, seguido por Ca^{+2}, Mg^{+2} y SO_4^{-2} (García y Rojas, 2006). El contenido de K en la vinaza es variable, observándose rangos entre 960 y 3100 mg L^{-1} (Prado et al., 2013). Para el caso de Ca, los valores observados varían entre 0,53 y 3,16 mg L^{-1}, Mg entre 0,48 y 162 mg L^{-1} y SO_4 entre 44 y 366 mg L^{-1} (Del Pino et al., 2017; Rodrigues y Hu, 2017; Gómez, 2011). En cuanto al N y P, los rangos varían entre 0,60 y 1,34 mg L^{-1} para N y para P entre 0,06 y 0,19 mg L^{-1} (Ortegon et al., 2016; Da Silva et al., 2013; España-Gamboa et al., 2012; De Resende et al., 2006).

Según España-Gamboa et al. (2012), la vinaza presenta altos tenores de materia orgánica y en consecuencia alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que varía entre 50000 y 150000 mg O_2 L^{-1}. Este valor de DBO es muy superior a los estipulados en el decreto 253/79 de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) que propone que para desagües de efluentes directos a los cursos de agua no se deben superar los 60 mg O_2 L^{-1}. Por esta razón es indispensable evitar que la vinaza alcance cursos de agua, donde podría afectar el recurso. Adicionalmente su color oscuro, impide el paso de la luz a través de los cuerpos de agua, generando una disminución de la actividad fotosintética y del O_2 disuelto en el agua, provocando peligrosas condiciones para la vida acuática (Christofoletti et al., 2013).

A nivel mundial, la vinaza tiene múltiples usos como la fermentación aeróbica para la producción de proteínas unicelulares, producción de gas metano a partir de fermentación anaeróbica, concentración o evaporación para uso en raciones animales, producción de levaduras, medio de cultivo, incineración por su alto poder calorífico, como sustrato para compost y fertiirrigación de vinaza como biofertilizante (García y Rojas, 2006; Lezcano y Mora, 2006; Chaves, 1985).

Dado que la variabilidad en la composición de los residuos agroindustriales y particularmente de la vinaza depende de la planta que le dio origen y las condiciones tanto de tipo de suelo como climáticas en donde se cultivó, del proceso industrial que la generó y de las condiciones de almacenamiento, es necesario caracterizar física y químicamente la vinaza para definir el aporte de nutrientes y su utilización en el suelo (Barbazán et al., 2011; Oliveira et al., 2010).

1.3. INTERACCIÓN SUELO-VINAZA

La aplicación de vinaza en el suelo produce efectos variables, según el tipo de suelo y/o las condiciones climáticas. La fertilización con vinaza puede causar efectos negativos, como la salinización, lixiviación de nutrientes, deterioro de la calidad del suelo por desbalance de nutrientes, reducción de la alcalinidad y aumento de la fitotoxicidad (De Resende et al., 2006). En contraste, se reportan efectos beneficiosos como aumento en el rendimiento de los cultivos y mejoras en las propiedades fisicoquímicas del suelo como incremento de pH, aumento de la disponibilidad de nutrientes y retención de cationes por el suelo, incremento de la capacidad de retención de humedad, mejoramiento de la estructura física del suelo y proliferación intensa de la población y actividad microbiana (Christofoletti et al., 2013). Por su parte, España-Gamboa et al. (2012), manifiestan que la vinaza posee compuestos como fenoles y polifenoles que pueden causar efectos negativos en los microorganismos del suelo. Desde el punto de vista ambiental el N y el P aportados por la vinaza podrían causar eutrofización de aguas superficiales. En cambio el K no causa problemas de contaminación cuando es erosionado de los suelos, no es tóxico y no causa eutrofización en los sistemas acuáticos (Rabuffetti, 2017). Por tales razones, es necesario caracterizar los residuos orgánicos como la vinaza a fin de evaluar la contribución de este residuo al suelo, observando los diferentes efectos que puede producir en el ambiente y en la producción (Barbazán et al., 2011).

Existen diversas formas de aplicar la vinaza en el suelo. En Uruguay la vinaza se utiliza pura, siendo aplicada mediante cisternas o regadores (cañones). Para esta práctica se toma en cuenta la humedad inicial de suelo para que el líquido infiltre en el terreno y así evitar el escurrimiento a cursos de agua.

Al mineralizarse los compuestos orgánicos de la vinaza mediante un proceso microbiano, los nutrientes siguen distintas dinámicas en el suelo. En el caso de P, tiene una movilidad

relativamente baja en los suelos y con el paso de tiempo se retrograda a formas cada vez menos solubles formando compuestos de alta estabilidad química (Dodd et al., 2013). Sin embargo, el N orgánico es mineralizado formando NH_4^+ y luego NO_3^- como producto final, el cual no se acumula en el suelo ya que su carga negativa impide asociarse al complejo humus-arcilla del suelo. A diferencia del N, el K está asociado esencialmente a la fracción mineral del suelo bajo formas inorgánicas y su dinámica responde a equilibrios químicos entre las distintas fracciones presentes, por esta razón el K se encuentra inmediatamente disponible para las plantas ya que su liberación no depende de la mineralización de la vinaza. Sin embargo, es de importancia conocer aspectos de la dinámica del K en los suelos, como la incidencia de la mineralogía de la fracción arcilla en su disponibilidad para las plantas, a los efectos de interpretar los resultados del agregado de K al suelo proveniente de la aplicación de vinaza.

1.4. INFUENCIA DEL MATERIAL PARENTAL Y MINERALOGÍA DEL SUELO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE POTASIO

En el suelo coexisten diferentes formas químicas de K que se encuentran en equilibrio dinámico, el cual puede ser modificado por las entradas de K al sistema suelo-planta mediante fertilizaciones potásicas (comerciales y/o biofertilizantes) y residuos de cosechas, y por las salidas de K por la absorción por parte de los cultivos. Las formas más rápidamente asimilables son el K en solución y K intercambiable que representan una proporción pequeña (1-2%). El K no intercambiable es lentamente asimilable para las plantas, y representa 1-10% del total. El K mineral o estructural se encuentra en los minerales primarios y representa entre 90 y 98% del K total (Rabuffetti, 2017). Las plantas absorben el K de la solución del suelo que se encuentra como ión K^+, el cual está en equilibrio con el K intercambiable que es la fracción de reserva de respuesta rápida, retenido electrostáticamente por las cargas negativas de las arcillas y la MO, reponiendo el K a la solución del suelo una vez que éste fue absorbido (desorción). El K no intercambiable puede pasar a formas intercambiables y a la solución cuando estas formas son agotadas por los cultivos, es retenido en sitios específicos de la estructura de las arcillas y es un proceso más lento que la desorción del K intercambiable (Bolio-López et al., 2008). De forma inversa, cuando los suelos son fertilizados con K o con materiales ricos en K como la vinaza,

el K será retenido en sitios de intercambio (adsorción) o fijados en sitios no intercambiables cuando los suelos son muy fijadores en este elemento (Gómez, 2011).

En suelos con predominio de arcillas de tipo 1:1 como la caolinita, el K es adsorbido en los bordes de la arcilla, siendo esta retención muy débil. La mayor capacidad de retención de K se da cuando las arcillas dominantes son de tipo 2:1 como la montmorillonita o la illita (mica). En tal caso el K es retenido electrostáticamente en los bordes y en la intercapa, con menor energía en las montmorillonitas que en las illitas. Esta diferencia es adjudicada a que, el radio iónico del K es similar al espacio que posee la illita en la intercapa, por esta razón una vez que el K entra en la misma (sin hidratar) queda físicamente encapsulado, generando un colapso de las estructuras cristalinas. La fuerza de retención es tan fuerte que la arcilla no puede expandirse y liberar al K, pudiendo éste solo volver a la solución del suelo cuando la arcilla es meteorizada (Ford, 1998). En general los suelos poseen una mezcla variable de tipos de arcilla relacionadas directamente con el tipo de material parental. En suelos de textura gruesa, desarrollados sobre areniscas o materiales cuarzosos con bajos contenidos de arcillas, el contenido de K es menor que en suelos de textura fina formados a partir de materiales ricos en K (Hernández et al., 1988).

El aporte de K del suelo a la planta puede estimarse mediante análisis químicos que generan información acerca de la dinámica de K en los suelos. Para ello es necesario cuantificar los cambios en los equilibrios de los distintos pools de K que se producen en el tiempo con el aporte de fertilizantes potásicos o enmiendas como la vinaza (Bolio-López et al., 2008).

En un suelo de textura gruesa, existe una mayor proporción de K en solución con respecto al K intercambiable en relación con un suelo de textura fina, es decir que el equilibrio está menos desplazado de la fase sólida, ya que los suelos arenosos poseen posiciones de intercambio reducidas lo que está asociado en muchos casos a bajos tenores de materia orgánica y minerales arcillosos. En otro extremo, suelos arcillosos poseen mecanismos de retención de cationes y poseen mayores contenidos de K intercambiable y relativamente menores contenidos de K solución (Gómez, 2011; Hipp y Thomas, 1967). Estos autores, relacionaron la textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), K intercambiable, K solución y la mineralogía de la fracción arcilla y observaron que, en un suelo de textura arcillosa (CIC de 48 $cmol_c\ kg^{-1}$), con un contenido de K intercambiable de 0,55 $cmol_c\ kg^{-1}$, el K solución fue bajo (0,15 $cmol_c\ kg^{-}$

[1]) en relación con otro suelo de textura franco-arenosa, con una CIC de 4,5 $cmol_c\ kg^{-1}$, K intercambiable de 0,18 $cmol_c\ kg^{-1}$ en que el K solución fue de 0,43 $cmol_c\ kg^{-1}$. La diferencia entre ambos suelos radica en que el suelo arcilloso presenta mayor densidad de cargas para retener al K debido a un mayor contenido de arcilla y minerales arcillosos de alta CIC en forma dominante (montmorillonita, mica y caolinita en orden de dominancia) que hacen que el equilibrio se desplace hacia la fase sólida (K intercambiable), mientras que el suelo de textura franco-arenosa dominan caolinita y mica y se observa el efecto contrario. Para suelos del Uruguay de diferentes texturas se encontraron similares relaciones (Hernández et al., 1988).

Debido a que la concentración de K en solución es generalmente muy baja, las pérdidas de K por lavado son en general de escasa magnitud y dependen de la presencia o ausencia de cultivos, la capacidad del suelo de retener K y la frecuencia e intensidad de las precipitaciones. Suelos con textura franco-arcillosa o arcillosa en el horizonte A y/o presencia de horizonte B textural, presentan reducidas pérdidas de K por lavado. En contraposición, suelos de textura arenosa con baja CIC, si son además muy ácidos, en donde predominan los cationes intercambiables Al^{+3} y H^{+}, aumentan las pérdidas de K por lavado (Rabuffetti, 2017; Hernández et al., 1988).

Por esta razón, los suelos en donde con mayor frecuencia se notan deficiencias de K para las plantas son aquellos que están muy meteorizados y presentan una baja CIC, son de texturas arenosas y sus materiales parentales presentan naturalmente bajos contenidos de K y/o poseen bajos contenidos de minerales arcillosos de tipo 2:1 (expansibles o fijadores de K) que le confieren una baja capacidad restitutiva y almacenadora de K. También suelos con altos contenidos de Ca y Mg pueden inducir a desbalances con respecto al K, afectando su disponibilidad (Bertsch, 1987). Este autor ha encontrado que altos contenidos de Ca limitan la disponibilidad de K y propone una interpretación de las relaciones catiónicas. Si las relaciones Mg/K (>15), Ca/K (>25) y Ca+Mg/K (>40) son sobrepasadas se produciría un desbalance catiónico afectando el desarrollo del cultivo. Por otro lado, el exceso de K en la zona de exploración radicular puede causar problemas de salinidad por la formación de sales potásicas y a su vez inducir un desbalance nutricional ya que se limita la absorción de otros nutrientes (Gómez, 2011). Adicionalmente este autor, reporta que el exceso de K en la caña aumentaría

el contenido de cenizas en el jugo de caña, lo que conlleva a una reducción del rendimiento industrial.

1.5. MINERALIZACIÓN DE LA VINAZA

La tasa de mineralización de los residuos orgánicos en el suelo depende en gran medida de su composición, siendo extremadamente lenta para materiales fibrosos y lignificados y muy rápida para formas de C simples (Dar, 1997). Cuando los suelos reciben aportes de materiales orgánicos, las condiciones físicas, químicas y biológicas son favorecidas, reflejándose en un mayor consumo de oxígeno por los microorganismos. Asimismo la aplicación de fertilizantes orgánicos puede afectar indirectamente a los microorganismos del suelo al aumentar la disponibilidad de N mineral, disminuir el pH del suelo o acelerar el ciclo de los nutrientes a través de la absorción de nutrientes por las plantas (Sattolo et al., 2017; Crisostomo et al., 1992). Una forma de medir los efectos de la mineralización en la actividad microbiana es mediante la tasa de respiración microbiana midiendo la producción de CO_2. Otra manera de obtener información sobre la tasa de descomposición de los residuos es mediante incubaciones de suelo con enmiendas en condiciones controladas de temperatura y humedad, estudiando la descomposición a través de la liberación de formas iónicas de nutrientes. En este sentido, los microorganismos tienen una función esencial en el ciclaje de los nutrientes a través del proceso de mineralización (Grigatti et al., 2010; Parnaudeau et al., 2008; Dar, 1997). La degradación de residuos de alto contenido de materia orgánica fácilmente degradable como la vinaza, conduce a un aumento en la actividad de los microorganismos del suelo lo que se manifiesta en una mayor tasa de respiración microbiana observada inmediatamente después de su agregado al suelo. Aunque generalmente se considera positivo el incremento de la actividad biológica del suelo, esta fuerte actividad de los microorganismos podría promover la degradación de la materia orgánica estabilizada del suelo, conocida como efecto priming (Mazzilli et al., 2014; Marstorp, 1996). Otro aspecto a tener en cuenta es que una proliferación intensa de la población y actividad microbiana podría reducir la disponibilidad de N en el suelo debido a una inmovilización pronunciada en función del crecimiento acelerado de los microorganismos (Crisostomo et al., 1992; Chaves, 1985).

El uso sostenible de la vinaza aplicada al suelo debe considerar la cinética de mineralización del C y N. Para determinar la mineralización de vinaza se deben tener en cuenta las características químicas y físicas del material (C lábil, disponibilidad de N para el metabolismo microbiano y la baja relación C:N) y del suelo que jugarán un rol importante en la mineralización del C y N (Bengtsson et al., 2003). Sin embargo, es muy difícil predecir cual será la liberación real de N de acuerdo con las dosis aplicadas y la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, debido a la multiplicidad de factores que operan en el sistema (Fortuna et al., 2003; Bernal et al., 1998). Por tales razones, al evaluar la contribución de este residuo al suelo, es necesario examinar el proceso de mineralización de la vinaza, especialmente en lo referido a la descomposición de C y N para cada situación en particular, tipo de suelo, dosis, etc. Por lo tanto, es necesario estimar la tasa de mineralización para conocer la disponibilidad de nutrientes en el corto plazo y así evaluar la viabilidad de la vinaza para la nutrición del cultivo.

1.6. PLANTEO DEL PROBLEMA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El uso de estos residuos o subproductos agroindustriales tiene como finalidad, convertir un material ambientalmente peligroso por su alta carga de nutrientes y materia orgánica, en un producto con valor económico, y así colaborar en mantener la sostenibilidad del recurso suelo y agua. Contar con datos nacionales de las características nutricionales de la vinaza contribuye a un manejo óptimo de este residuo y a garantizar la inocuidad de los alimentos producidos bajo estos sistemas, minimizando su impacto y promoviendo su uso racional. Por otra parte, el agregado de nutrientes con la vinaza -como el K- permitirá sustituir del uso de insumos importados, como los fertilizantes potásicos, asegurando un reciclaje y uso más eficiente de este nutriente dentro del sistema.

El objetivo general de este estudio fue caracterizar el efecto de la aplicación de vinaza sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo para el cultivo de caña de azúcar. Como objetivos específicos y mediante incubaciones en condiciones controladas de laboratorio se plantearon: a) Caracterizar los cambios en las diferentes formas de K en los suelos (solución, intercambiable y no intercambiable) con el agregado de vinaza y su relación con el contenido y tipo de mineral arcilloso; b) Establecer si existen cambios entre las relaciones catiónicas con

diferentes dosis de vinaza y; c) Establecer la tasa de descomposición de la vinaza mediante el seguimiento de la mineralización de N y la tasa de respiración microbiana en cinco suelos representativos del área cañera del Uruguay.

Esta tesis se presenta en forma de dos artículos científicos, los cuales serán enviados para su publicación a la revista Agrociencia Uruguay. Finalmente se realizará una discusión general de los resultados al final del documento.

Artículo 1: Utilización de vinaza como fuente de K para el cultivo de caña de azúcar.

Artículo 2: Descomposición y liberación de nitrógeno de la vinaza en diferentes dosis y suelos del Uruguay.

2. UTILIZACIÓN DE VINAZA COMO FUENTE DE K PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Takata Virginia[1], del Pino Amabelia, Hernández Jorge

[1]Departamento de Suelos y Aguas. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Av. Garzón 780. CP12900. Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: virginiatakata@gmail.com

2.1. RESUMEN

La vinaza es un residuo líquido de la producción de etanol a partir de la fermentación del jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), presenta importantes contenidos de materia orgánica y nutrientes. Los objetivos del trabajo fueron, caracterizar los cambios en los contenidos de las distintas formas de K en el suelo con el agregado de vinaza y su relación con el contenido y tipo de mineral arcilloso; caracterizar el efecto de la aplicación de vinaza sobre la disponibilidad de cationes en el suelo y establecer si ocurren cambios en las relaciones catiónicas. Se estudió en condiciones controladas, el efecto de la aplicación de vinaza en 5 suelos del área de producción de caña azucarera. Se realizaron incubaciones de suelo-vinaza con dosis equivalentes a 0, 125, 250 y 375 m^3 ha^{-1} y se muestreó el suelo a los 14 y 180 días, evaluándose cationes en solución e intercambiables y K no intercambiable. Hubo un aumento en la concentración de K intercambiable y no intercambiable en el suelo a medida que aumentó la dosis de vinaza, con diferencias significativas entre suelos y tratamientos. Para los cationes en solución, se encontraron diferencias significativas entre suelos y entre tratamientos en Ca, Mg y K, estableciéndose relaciones lineales con las dosis de vinaza agregadas. La relación entre el K intercambiable y en solución siguió un modelo exponencial, con mayor proporción de K en solución en los suelos arenosos. La aplicación de vinaza contrarrestó el desbalance catiónico en aquellos suelos con predominio de Ca intercambiable.

Palabras clave: mineralogía, reserva de potasio, incubación

2.2. SUMMARY

Vinasse is the final by-product of the biomass distillation of sugarcane (*Saccharum officinarum*), mainly for the production of ethanol, which has a significant content of organic matter and nutrients. The objectives of this work were to characterize the changes in the content of different forms of K in the soil due to the addition of vinasse and its relationship with the content and clay type, and characterize the effect of vinasse application on soil exchangeable cations contents, and establish if there are changes in cationic relationships. The effect of the vinasse application in five representative soils of the sugarcane production area was studied under controlled conditions. Soil-vinasse incubations were carried out with equivalent doses to 0, 125, 250, and 375 m^3 ha^{-1}. Soil samples were taken 14 and 180 days after starting the experiment. The content of exchangeable cations in the soil solution and the exchangeable and non-exchangeable K were determined. There was an increase in soil concentration of exchangeable and non-exchangeable K as the dose of vinasse increased, with significant differences between soils and treatments. Significant differences were found between soils and between treatments in Ca, Mg, and K soil solution content, establishing linear relationships with the added vinasse doses. The relationship between exchangeable K and K in the soil solution was fitted to an exponential model. A higher proportion of K in the soil solution was found in sandy soils. Vinasse application enhanced the cationic imbalance in those soils with a predominance of exchangeable Ca.

Key words: mineralogy, potassium reserve, incubation

2.3. RESUMO

A vinhaça é um resíduo da produção de etanol a partir da fermentação do suco de cana de açúcar (*Saccharum officinarum*), apresentando importantes conteúdos de matéria orgânica e nutrientes. Os objetivos do trabalho foram: a) caracterizar as mudanças nos conteúdos das diferentes formas de K no solo com o agregado de vinhaça e a sua relação com o conteúdo e tipo de mineral argiloso; b) caracterizar o efeito da aplicação de vinhaça na disponibilidade de cátions no solo e estabelecer a ocorrência de mudanças nas relações catiônicas. O trabalho foi feito em condições controladas, através da aplicação de vinhaça em 5 solos provenientes

da área de produção de cana de açúcar. Foram feitas incubações de solo com doses de vinhaça equivalentes a 0, 125, 250 e 375 m^3 ha^{-1}, amostrándose o solo aos 14 e 180 dias, e avaliando-se os cátions trocáveis e na solução, e o K não trocável. Ouve um aumento na concentração de K trocável e não trocável no solo na medida do aumento na aplicação de vinhaça, com diferenças significativas entre solos e tratamentos. Para os cátions na solução, encontraram-se diferenças significativas entre solos e tratamentos em Ca, Mg e K, estabelecendo relações lineais com a dose de vinhaça. A relação entre o K trocável e o correspondente a solução ajustou-se a um modelo exponencial, com uma maior proporção de K na solução em solos arenosos. A aplicação de vinhaça contrabalanceou o desequilíbrio catiônico em aqueles solos com predomínio de Ca trocável.

Palavras-chave: mineralogía, reserva de potássio, incubação

2.4. INTRODUCCIÓN

La utilización de vinaza como biofertilizante tiene como finalidad convertir un residuo de la industria azucarera, en un producto con cierto valor agronómico y económico, y así colaborar en mantener la sostenibilidad de los recursos suelo, agua y aire. La vinaza es un residuo líquido obtenido de la elaboración de etanol, que contiene materia orgánica (MO), potasio (K), nitrógeno (N), calcio (Ca), magnesio (Mg) y fósforo (P) (1). Según datos preliminares obtenidos en Uruguay su pH se encuentra en el orden de 6 unidades (2). La cantidad de nutrientes presentes en la vinaza depende de la planta que le dio origen y no contiene elementos tóxicos ni metales pesados (3). Dentro de las plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) los nutrientes que se encuentran en mayor proporción son K y N, seguidos por Ca, S, P y Mg, manteniéndose esta proporción y orden en la vinaza (4). El contenido de nutrientes y especialmente K en la vinaza es variable, observándose rangos de K entre 960 y 3100 mg L^{-1} (2, 5-8).

Trabajos realizados en diferentes partes del mundo indican que se generan entre 10 y 18 litros de vinaza por litro de alcohol producido (9-12). Sin embargo, para las condiciones del Uruguay la relación vinaza-alcohol ronda por los 6-7 litros de vinaza por litro de alcohol producido. En Uruguay, la aplicación de vinaza en la producción de caña se realiza de forma directa y pura

sobre el suelo, en donde los nutrientes pueden ser reciclados a través del sistema suelo-planta (13).

Por su alto contenido de K, cuando se riega el suelo con vinaza, el contenido de K intercambiable aumenta, habiéndose encontrado una alta correlación entre la disponibilidad de K y la producción de caña de azúcar (9). Por otra parte el exceso de K disponible para las plantas en los primeros 20 cm del perfil puede provocar un aumento de cenizas en el jugo de caña, y como consecuencia una disminución del rendimiento industrial, lo que se asocia al consumo de lujo de este macronutriente. También una aplicación excesiva puede ocasionar problemas de salinidad en la raíz por la precipitación de sales potásicas y un desbalance nutricional provocado por el impedimento de absorción de otros iones (9).

La capacidad de reposición del K absorbido por las plantas de la solución del suelo, depende de la capacidad tampón del suelo y está dada principalmente por la capacidad de intercambio catiónico y el mantenimiento de las relaciones con otros cationes (14). Es por ello, que altos contenidos de Ca y Mg intercambiable en el suelo limitan la disponibilidad de K para las plantas, aunque también se han observado deficiencias de Mg inducidas por altas fertilizaciones con Ca y K (15, 16). Para poder inferir dichas deficiencias, se propone una interpretación de las relaciones catiónicas dónde Ca/K>25, Mg/K>15 o Ca+Mg/K>40 indicarían una deficiencia en la absorción de K por las plantas (17). Otro factor que incide sobre la reposición de K a la solución del suelo es la cantidad y tipo de mineral arcilloso, así como del contenido de K intercambiable del suelo. Estos factores inciden sobre la dinámica de K, determinando la afinidad con la cual la arcilla retiene a los cationes y por tanto condiciona el desplazamiento del equilibrio del K en solución-K intercambiable (18). El equilibrio entre las formas intercambiables y en solución es de gran importancia para la nutrición de vegetal durante la estación de crecimiento, sin embargo, para mantener los niveles de absorción de nutrientes en el largo plazo, el equilibrio más importante se refiere a la relación entre el K intercambiable-K no intercambiable. En un estudio en Valle del Río Turbio (Venezuela) (9) se demostró que el incremento de K intercambiable producido por la aplicación de vinaza fue menor en un suelo que presentaba en la fracción mineral: illita-muscovita, el cual tiene alto poder de fijación de K hacia formas no intercambiables, comparado con suelos que no presentan esas arcillas. Por el contrario, cuando un suelo presenta texturas gruesas, existe una mayor proporción de K en

solución con respecto al K intercambiable que cuando los suelos presentan texturas finas (9, 19). En el mismo sentido, suelos con caolinita como mineral dominante del tipo 1:1, presentarán mayores concentraciones de K en solución que aquellos suelos con minerales del tipo 2:1, ya que estas arcillas poseen menor carga reticular para retener el K y por tanto menor energía de retención en los sitios de intercambio (20).

Para cuantificar las diferentes formas de K, el K intercambiable es extraído con una solución de acetato de amonio normal neutro (K-AA). Este tipo de extracción cuantifica en forma conjunta el K intercambiable y el K en la solución del suelo. Para estimar el contenido de K intercambiable es necesario sustraer el contenido de K en solución (Ksol). El K no intercambiable es determinado mediante una extracción con una solución de tetrafenilborato sódico (K-TPhB). Con esta solución se extrae una parte del K fijado en la intercapa de las arcillas, el K intercambiable y el K en solución. Para estimar el K no intercambiable es necesario restar el K intercambiable extraído con AA. En un estudio realizado en suelos agrícolas del Uruguay (21) se estableció que la solución de TPhB para suelos de textura gruesa extrae 1,36 más K que con AA y para suelos de textura fina la relación es de 1,65. Esta relación puede predecir la capacidad de reposición de K a las formas intercambiables en suelos con diferentes texturas.

Los suelos en donde se cultiva caña de azúcar en Uruguay presentan diferentes mineralogías de su fracción arcilla, en virtud de haberse desarrollado a partir de diferentes materiales parentales de suelo. Este hecho puede determinar particularidades en la dinámica del K en estos suelos. Se desconoce si existe un comportamiento diferencial de dichos suelos frente al agregado de un material con altas concentraciones de K como es la vinaza, y su afectación en el complejo de intercambio catiónico. El objetivo de este estudio fue caracterizar la dinámica del K en distintos suelos (material parental, textura) con aplicación de vinaza, mediante incubaciones en condiciones controladas de laboratorio y establecer los cambios producidos en las relaciones catiónicas.

2.5. MATERIALES Y MÉTODOS

Experimentalmente se realizó la incubación en condiciones controladas de laboratorio de muestras de cinco suelos representativos de la región donde se cultiva caña de azúcar en el Uruguay con tres dosis de vinaza y un tratamiento testigo sin vinaza.

2.5.1. Caracterización de la Vinaza

La vinaza utilizada en el experimento de incubación fue recolectada de la laguna de sedimentación ubicada en el ingenio azucarero Alfredo Mones Quintela, cercano a la ciudad de Bella Unión (Uruguay) y conservada en heladera a una temperatura de 4 ºC hasta su análisis. Para su caracterización los parámetros determinados fueron: Sólidos totales (MS) por método gravimétrico; pH y conductividad eléctrica (CE) por medio de electrodos de actividad específica; nitrógeno total (NT) mediante digestión por vía húmeda con H_2SO_4 y destilación del N por el método Kjeldahl; el fósforo total (PT) se determinó luego de la mineralización por vía seca (5 horas a 550°C), disolución de las cenizas con HCl y posterior colorimetría con ácido ascórbico (22). El carbono orgánico (CO) se determinó por oxidación con K_2CrO_7 en H_2SO_4 a 150°C durante 30 minutos y posterior determinación colorimétrica (23). Los cationes (Ca, Mg) y microelementos (Fe, Mn, Cu y Zn) fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica, mientras que K y Na fueron determinados por espectrofotometría de emisión en el mismo extracto utilizado para el análisis de PT (24). Los resultados obtenidos en dicha caracterización fueron utilizados para definir las dosis de vinaza a utilizar en el experimento de incubación.

2.5.2. Suelos utilizados

Los suelos se clasifican como: Brunosol Eútrico Típico formado a partir de sedimentos limosos de la formación Fray Bentos (V11), Vertisol Háplico formado a partir de sedimentos cuaternarios limo arcillosos con influencia de la alteración de Basalto (Grupo Arapey) (BV3), Argisol Dístrico Ócrico formado a partir de areniscas de la formación Salto (C3) y Brunosol Subeútrico, formado también a partir de sedimentos de la formación Fray Bentos (S3 y S4), según el relevamiento de suelos de CALNU (25). Estos suelos son dominantes en la zona de cultivo y sobre ellos se está aplicando vinaza y fertilizaciones químicas hace varios años y en distintas dosis. Los

suelos S3 y S4, similares en sus características, se encuentran bajo un monitoreo de largo plazo en donde el suelo S3 recibe vinaza, mientras que el S4 es fertilizado exclusivamente con fertilizantes comerciales. De aquí en adelante se nombrarán como V11, BV3, S3, S4 y C3. Según la clasificación internacional del USDA, los suelos V11, S3, S4 se clasifican como Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Vertic Argiudoll, el suelo BV3 se clasifica como Fine, smectitic, thermic Typic Hapludert y el suelo C3 se clasifica como Fine, mixed, active, thermic Hapludalf (26).

Para la caracterización de los suelos, se colectaron los primeros 20 cm del horizonte A. Se analizó la textura por el método de la pipeta (27). La mineralogía de la fracción arcilla se realizó mediante difracción de rayos X en un difractómetro Modelo Empyrean mediante una técnica adaptada (28) en donde se elimina materia orgánica, carbonatos y yeso de la muestra, luego se deflocula y se separa la fracción arcilla. Las lecturas se realizaron al natural (sin procesamiento), glicolado (saturación de etilenglicol) durante 24 horas, y por último calcinado a 550ºC por 2 horas, procediendo a la lectura a continuación. La composición mineralógica de las arcillas fue determinada usando la intensidad y posición de los picos obtenidos en el difractograma de rayos X, mientras que la proporción de los minerales arcillosos fue estimada midiendo el área debajo de los picos de montmorillonita, illita y caolinita, dividiendo el valor de las áreas por un factor empírico (29). Se determinó pH en agua y conductividad eléctrica (CE) en una relación 1:1 (suelo-agua) por medio de electrodos de actividad específica, P disponible por el método Bray N°1 y posterior determinación colorimétrica (30), carbono orgánico (CO) por oxidación con $K_2Cr_2O_7$ en H_2SO_4 (31). Se determinó el contenido de cationes de intercambio (Ca, Mg, K y Na) mediante extracción con acetato de amonio 1M neutro y posterior determinación por absorción atómica (Ca y Mg) y espectrofotometría por emisión (K y Na), de la misma manera que fue mencionado para la vinaza (24).

2.5.3. Instalación del experimento

El suelo fue tamizado a través de una malla de 1 cm para eliminar restos vegetales y elementos inertes (cantos rodados). Posteriormente, se mezcló el suelo con tres diferentes dosis de vinaza, correspondientes a 0,05; 0,10 y 0,15 L kg^{-1} suelo (Cuadro 1), definidas a partir de la caracterización química, siendo equivalentes a 125, 250 y 375 m^3 ha^{-1}, respectivamente

(calculadas a partir de un horizonte de 20 cm y una DAP de 1,25 g cm^{-3}). De aquí en adelante se referirán como DB (dosis baja), DM (dosis media) y DA (dosis alta). El suelo (equivalente a 1 kg de suelo seco), se colocó en contenedores con pequeños orificios en la tapa para permitir el intercambio gaseoso. Se incubó a 25°C por 180 días con una humedad correspondiente a capacidad de campo que se corrigió semanalmente mediante el agregado del agua perdida por evaporación. En el experimento, los tratamientos se realizaron por triplicado al igual que el testigo sin agregado de vinaza, totalizando 60 bandejas de incubación.

Cuadro 1: Composición de la vinaza y cantidad de nutrientes agregados con las distintas dosis de vinaza.

	Composición de la vinaza	Cantidad de nutrientes (mg kg^{-1} de suelo) (**)		
		DB	DM	DA
MS (%)	1,15	-	-	-
pH	4,8	-	-	-
CE (dS m^{-1})	7,75	-	-	-
N (kg m^{-3})	0,73	33	66	99
P (kg m^{-3})	0,06	2,7	5,4	8,1
P_2O_5 (kg m^{-3}) (*)	0,14	6,2	12,3	18,5
Ca (kg m^{-3})	0,51	23	46	69
Mg (kg m^{-3})	0,21	10	19	29
K (kg m^{-3})	1,37	62	123	185
K_2O (kg m^{-3}) (*)	1,64	74	148	222
Na (kg m^{-3})	0,05	2	5	7
Cu (g m^{-3})	0,16	-	-	-
Fe (g m^{-3})	11,42	-	-	-
Mn (g m^{-3})	5,13	-	-	-
Zn (g m^{-3})	0,42	-	-	-

Nota: (*) Forma química de expresión de los nutrientes P y K en los fertilizantes.
DB: dosis baja; DM: dosis media y DA: dosis alta (corresponden a un agregado de vinaza de 0,05; 0,10 y 0,15 L kg^{-1} de suelo respectivamente).
(**) El coeficiente de conversión para cantidad de nutrientes (kg ha^{-1}) es de 2,5 tomando en cuenta la profundidad de muestreo (20cm) y un DAP de 1,25 g cm^{-3}

2.5.4. Muestreo de suelos y análisis

Se tomó una muestra homogénea de suelo de 200 g de cada bandeja de incubación a los 14 y 180 días luego de iniciado en experimento. Las muestras de suelo se secaron con aire forzado a 40° C durante 48 horas y se molieron a un tamaño menor a 2 mm.

En las muestras de suelo de ambos muestreos, se determinó el contenido de cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na) según fue descripto y el contenido de cationes en solución (Ca, Mg, K y Na) extraídos a través de sondas de vacío, en una suspensión suelo-agua con una relación 1:1. También se determinó el contenido de K no intercambiable mediante la utilización de una solución de tetrafenilborato sódico (TPhB) en una incubación de 5 minutos (32-34) (Cuadro 2).

Cuadro 2: Análisis de suelos realizados para evaluar la disponibilidad de K.

Análisis	Abreviatura	Extracción	Pool de K extraído
K en solución	Ksol	Suspensión suelo-agua con una relación 1:1	K en solución
K intercambiable	K-AA	Extracción con acetato de amonio 1M neutro	K intercambiable + K en solución
K no intercambiable	K-TPhB	Extracción con solución de tetrafenilborato sódico (TPhB) en una incubación de 5 minutos	Parte de K no intercambiable + K intercambiable + K en solución

2.5.5. Diseño experimental y análisis estadístico

El efecto de los tratamientos con aplicación de la vinaza se testeó mediante análisis de varianza en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, siendo los suelos los bloques. Se evaluó el efecto de la dosis de vinaza según modelo lineal y cuadrático. Se ajustaron regresiones lineales y análisis de correlación entre las variables dosis de K/Ksol, dosis de K/K-AA y dosis de K/K-TPhB (Ksol/ K-AA/ K-TPhB = a + b dosis de K). Para describir la relación entre el contenido de K en solución respecto al contendido de K-AA se ajustó un

modelo exponencial (Ksol = a e $^{b\ K\text{-}AA}$). En cambio, para la relación K-AA respecto al K-TPhB se planteó un modelo lineal (K-TPhB = a + b (K-AA)). Se realizó el análisis de contrastes para determinar el efecto de la vinaza sobre el testigo sin aplicación. La herramienta informática utilizada para los análisis estadísticos fue el programa SAS (35).

2.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.6.1. Características de la vinaza

La vinaza utilizada presentó un muy bajo contenido de sólidos, pH ligeramente ácido y alta CE. Posee alta concentración de nutrientes, especialmente K y N, estando sus concentraciones dentro del rango presentado por varios autores (2, 5, 10, 11, 36-38). El contenido de P total es relativamente bajo si se compara con K o N, aunque su aporte no es despreciable cuando se aplican grandes volúmenes de vinaza. La concentración de Na es relativamente baja por lo que no se espera que se presenten problemas de sodicidad al ser aplicada al suelo en dosis moderadas. El aporte de cationes de la vinaza es similar a lo que se reporta en la bibliografía, aunque los rangos presentados son muy amplios, siendo para Ca de 0,33 a 0,88 y para Mg se citan contenidos de 0,13 a 1,27 kg m^{-3} (2, 3, 7, 36-38).

2.6.2. Características de los suelos

Para este estudio se eligieron suelos contrastantes en sus características fisicoquímicas (Cuadro 3). Los suelos V11 y BV3 presentan textura fina, en donde la fracción arcilla supera el 30%. En cambio, los suelos S3 y S4 son de textura intermedia en tanto que C3 es mayormente arenoso. Todos los suelos del experimento presentan en su composición mineralógica como mineral arcilloso dominante montmorillonita, sin embargo, el suelo V11 también presentó un pico de illita y el suelo C3 un pico de caolinita. Estos suelos con excepción de BV3 presentan un pH ácido, con presencia de acidez intercambiable, lo que puede estar asociado a su historia agrícola de más de 40 años, con sucesivos laboreos que favorecen la mineralización de la materia orgánica. También puede influir en su acidificación, la aplicación de grandes dosis de fertilizantes con N amoniacal y gran extracción de cationes por las plantas. En referencia a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), como es de esperar a medida que aumenta en contenido de arcilla aumenta la CIC, siendo esta es máxima en el suelo BV3 con el mayor

contenido de arcilla (370 g kg^{-1}), en tanto que es mínima en el suelo C3 con 160 g kg^{-1} de arcilla. En coincidencia, el contenido inicial de K intercambiable fue alto para los suelos con mayor contendido de arcilla (V11 y BV3), medio para los suelos de intermedio contenido de arcilla (S3 y S4) y bajo para el suelo de textura gruesa (C3).

Cuadro 3: Características físicas y químicas de los suelos utilizados en el experimento.

	Suelo				
	V11	BV3	S3	S4	C3
Arena total (g kg^{-1})	310	240	560	430	800
Limo total (g kg^{-1})	370	390	180	300	40
Arcilla total (g kg^{-1})	320	370	260	270	160
Clase textural	FAc	FAc	FAcAr	FAc-F	FAr
Carbono orgánico (g kg^{-1})	18	20	14	16	7
pH H_2O	4,6	5,6	4,5	5	4,3
Ca^{+2} ($cmol_c$ kg^{-1})	10,95	21,03	12,38	12,09	4,13
Mg^{+2} ($cmol_c$ kg^{-11})	3,18	5,29	2,49	1,98	1,47
K^{+} ($cmol_c$ kg^{-1})	0,59	0,80	0,32	0,38	0,23
Na^{+} ($cmol_c$ kg^{-1})	0,44	0,64	0,47	0,39	0,38
Acidez interc. ($cmol_c$ kg^{-1})	0,89	0,06	0,35	0,47	0,64
BT ($cmol_c$ kg^{-1})	16,1	27,8	16,0	15,3	6,9
K/BT (%)	3,7	2,9	2,0	2,5	3,4
CIC pH 7 ($cmol_c$ kg^{-1})	21,6	33,8	21,6	20,7	10,6
SB pH 7 (%)	70,1	77,6	72,6	71,5	58,6
Mineralogía de la fracción arcilla	Montmorillonita-Illita	Montmorillonita	Montmorillonita	Montmorillonita	Montmorillonita-Caolinita

2.6.3. <u>Efectos de la aplicación de vinaza sobre el contenido de cationes Ca, Mg y Na en forma intercambiable y en la solución del suelo</u>

Se observaron diferencias significativas tanto para Ca, Mg y Na en solución al inicio y al final de experimento. Estas diferencias se encontraron entre suelos y entre dosis de vinaza. Sin embargo, en los cationes intercambiables Ca, Mg y Na se observaron diferencias significativas entre suelos, pero no fueron afectados por la dosis de vinaza aplicada. Estos resultados pueden ser atribuidos a la diferencia en la magnitud de las concentraciones de los cationes en forma

intercambiable respecto a los cationes en solución, siendo las concentraciones en la solución del suelo más sensibles a los cambios con el agregado de vinaza (Cuadro 4).

Cuadro 4: Análisis estadístico de la aplicación de vinaza sobre los cationes Ca, Mg y Na en solución e intercambiables a los 14 y 180 días de iniciado el experimento.

	14 días			180 días		
	Suelo	Tratamiento	CV %	Suelo	Tratamiento	CV %
Ca^{+2} solución	<0,0001	<0,0001	12,9	<0,0001	<0,0001	16,3
Mg^{+2} solución	<0,0001	<0,0001	22,9	<0,0001	<0,0001	18,4
Na^{+} solución	<0,0001	<0,0001	17,8	<0,0001	<0,0001	21,9
Ca^{+2} intercambiable	<0,0001	NS	12,5	<0,0001	NS	5,8
Mg^{+2} intercambiable	<0,0001	NS	11,5	<0,0001	NS	8,6
Na^{+} intercambiable	0,0004	NS	20,9	<0,0001	NS	19,3

El Cuadro 5 presenta para el muestreo realizado a los 14 días, los contenidos de cationes en solución e intercambiables promedios. En la solución del suelo, las mayores concentraciones de Ca se observaron en los suelos S3 y S4 en ambos muestreos. En el caso del Mg en solución, los suelos con mayores concentraciones fueron los mismos. Las menores concentraciones de Ca en solución se presentaron en el suelo C3, mientras que en el caso de Mg al inicio del experimento las menores concentraciones se observaron en el suelo C3 y al final del experimento en el suelo BV3.

Aunque no se encontraron efectos significativos de la aplicación de vinaza en las formas intercambiables, se observa una tendencia al alza de los cationes Ca, Mg y Na en la mayoría de los suelos, en comparación con el testigo sin vinaza. Los niveles iniciales de cationes intercambiables en el suelo sin agregado de vinaza fueron diferente para los cinco suelos.

Los mayores valores de Ca y Mg intercambiable se observaron en el suelo BV3 en ambos muestreos. Estos resultados concuerdan con la literatura (39, 40) encontrándose una relación entre los suelos desarrollados sobre minerales máficos como el suelo BV3 con influencia de Basalto como material parental, con mayores contenidos de piroxenos, anfiboles y plagioclasas

como fuente primaria de Ca y Mg en el suelo. Los suelos V11, S3 y S4 desarrollados sobre sedimentos limosos, presentaron valores intermedios de Ca y Mg, mientras que el suelo C3 desarrollado sobre areniscas fue quien presentó los menores valores de dichos elementos (Cuadro 5). Las concentraciones de Na intercambiable no mostraron diferencias estadísticas según el tratamiento con vinaza. De todas maneras, los valores obtenidos se encuentran por debajo de los reportados para una afectación de las propiedades del suelo como dispersión de coloides o deterioro físico. El porcentaje de Na intercambiable en relación a la CIC se encontró entre 1,9 y 6,1% muy por debajo de lo que se considera un horizonte nátrico (>15%) (41).

Cuadro 5: Contenido de cationes Ca, Mg y Na en solución e intercambiable promedio según tratamiento y suelo a los 14 días de iniciado el experimento.

Tratamiento	Ca^{+2}				Mg^{+2}				Na^{+}			
	Solución		Intercambiable		Solución		Intercambiable		Solución		Intercambiable	
	$cmol_c\ kg^{-1}$	CV %	$cmol_c\ kg^{-1}$	CV %	$cmol_c\ kg^{-1}$	CV %	$cmol_c\ kg^{-1}$	CV %	$cmol_c\ kg^{-1}$	CV %	$cmol_c\ kg^{-1}$	CV %
V11 (n=3)												
T	0,26	15,3	10,9	9,1	0,07	13,9	3,2	8,1	0,05	11,9	0,44	24,1
DB	0,27	7,7	11,8	6,8	0,10	9,5	3,5	6,5	0,05	18	0,44	4,8
DM	0,31	14,0	11,8	1,3	0,12	24,5	3,5	0,4	0,07	33,9	0,45	4,7
DA	0,4	4,8	11,3	3,7	0,16	6,5	3,5	2,7	0,07	25,2	0,4	8,7
BV3 (n=3)												
T	0,12	25,2	21,0	3,4	0,06	66,5	5,3	3,2	0,05	3,2	0,64	31,9
DB	0,2	15,4	21,5	1,4	0,07	10,9	5,5	1,5	0,06	6,5	0,54	0
DM	0,33	12,4	20,1	6,1	0,12	11,1	5,2	7,9	0,08	5,4	0,54	15,7
DA	0,45	7,2	19,2	11,1	0,16	7,4	5,2	9,8	0,09	14,9	0,54	2,8
S3 (n=3)												
T	0,7	5,3	12,4	9,6	0,17	5,5	2,5	7,1	0,03	13,9	0,47	38,9
DB	0,68	4,1	12,2	4,8	0,17	3,4	2,5	4,0	0,03	0	0,35	10,1
DM	0,79	11,6	13,6	3,4	0,22	11,2	3,0	4,0	0,05	9,7	0,44	3,4
DA	0,83	6,1	11,8	12,1	0,24	6,4	2,6	13,3	0,05	9,3	0,35	14,8
S4 (n=3)												
T	0,91	4,4	12,1	4,8	0,19	4,6	2,0	3,2	0,04	5,3	0,38	14,5
DB	0,95	9,5	12,2	3,6	0,2	9,7	2,1	4,7	0,04	9,2	0,39	4,0
DM	0,91	8,6	11,4	5,5	0,21	5,5	2,1	5,5	0,05	8,0	0,41	6,5
DA	0,91	4,8	12,2	10,6	0,23	3,4	2,4	10	0,05	5,0	0,56	36,2
C3 (n=3)												
T	0,07	22,3	4,1	2,9	0,03	12	1,5	3,2	0,02	3,8	0,38	13,7
DB	0,17	7,9	4,4	4,4	0,07	3,2	1,7	4,4	0,03	12,9	0,42	2,7
DM	0,23	4,6	3,7	10,1	0,11	5,7	1,3	15,3	0,04	4,8	0,34	7,3
DA	0,29	13,1	4,1	3,5	0,15	15,6	1,5	2,8	0,05	7,8	0,38	8,0

2.6.4. Formas de K en el suelo y relación con la dosis de vinaza aplicada

Tanto en el muestreo inicial como final de la incubación suelo-vinaza, las tres formas de K estudiadas (Ksol, K-AA y K-TPhB) respondieron de forma lineal a la dosis de K agregada con la vinaza (Cuadro 6).

El análisis de varianza para Ksol, K-AA y K-TPhB para los 5 suelos con tres dosis de vinaza a los 14, y 180 días de iniciado el experimento mostró diferencias significativas en todos los casos, tanto entre suelos como entre dosis de vinaza. Estos resultados indican que el K proveniente de la vinaza produce un aporte importante de K al suelo, aumentando de forma significativa las fracciones de K.

Cuadro 6: Análisis de contrastes para K en solución, intercambiable y no intercambiable a los 14 y 180 días.

		14 días	180 días
Parámetro	Contraste	Pr>F	
Ksol	Testigo vs Resto	<0,0001	<0,0001
	Dosis lineal	<0,0001	<0,0001
K-AA	Testigo vs Resto	<0,0001	<0,0001
	Dosis lineal	<0,0001	<0,0001
K-TPhB	Testigo vs Resto	<0,0001	<0,0001
	Dosis lineal	<0,0001	<0,0001
Nota: Testigo corresponde al suelo sin agregado de vinaza, Resto corresponde al suelo con vinaza (tres tratamientos), Dosis lineal se refiere al modelo lineal utilizado para el ajuste.			

En el Cuadro 7 se presenta el contenido de las fracciones de K al inicio y al final del experimento. A los 180 días de incubación, se observa un aumento de Ksol para todos los suelos utilizados en el experimento con respecto al muestreo inicial y un mayor efecto de los tratamientos. El suelo C3 mostró el mayor efecto de la aplicación de vinaza sobre el contenido de Ksol respecto a los demás suelos, con un coeficiente del modelo lineal de 3,07 con respecto al suelo BV3 (arcilloso) con un coeficiente de 1,59 (Figura 1a, 1b y Cuadro 8). El suelo arenoso C3, mostró además mayor concentración de Ksol en relación a la dosis de vinaza aplicada. Este resultado concuerda con la literatura y se debe probablemente a que este suelo presenta

textura arenosa (80% de arena) que disminuye la capacidad de intercambio de cationes (42). En contraposición, el suelo con mayor contenido de arcilla (BV3) mostró menores efectos del agregado de vinaza sobre la concentración de Ksol (Cuadro 8).

Tanto en el muestreo inicial a los 14 días como en el realizado a los 180 días de incubación suelo-vinaza, el aumento del K-AA respondió de forma lineal a la dosis de K agregada (Figura 1c, 1d y Cuadro 8). Los suelos BV3 y V11 presentaron mayores niveles de K-AA para todas las dosis a lo largo de la incubación con respecto a los demás suelos y son los que contienen mayor proporción de arcilla, lo que podría justificar este hecho (19) (Cuadro 7). El suelo C3 con un contenido de arcilla menor, presentó menores niveles de K-AA con respecto a los demás suelos, pero mayor incremento en el Ksol. Los suelos S3 y S4 se comportaron de forma intermedia. Sin embargo, a los 180 días se observó una disminución del efecto de la vinaza sobre el K-AA en el suelo V11 con respecto al inicio de la incubación (14 días), lo cual determinó una menor pendiente del modelo lineal ajustado (1,46 a 1,06). El efecto opuesto fue observado en el suelo BV3 en donde a los 180 días por cada $cmol_c\ kg^{-1}$ de K agregado con la vinaza el K-AA aumenta 1,09 mientras que en muestreo temprano la relación es de 0,79 $cmol_c\ kg^{-1}$ de suelo (Cuadro 8).

Con relación al contenido de K-AA de los suelos, se observó una disminución en el período, especialmente en los suelos V11, BV3, en cambio los suelos restantes presentaron escasas variaciones. Esta disminución del K-AA podría ser atribuible a la fijación en los minerales arcillosos, aunque el K-TPhB presentó la misma tendencia que el K intercambiable, disminuyendo la concentración en el período evaluado. No se puede descartar no obstante la posibilidad de que el K aplicado con la vinaza retrogradara hacia formas no intercambiables que no fueron extractadas con el TPhB, aunque estos suelos no presentan minerales de tipo Illita en su composición mineralógica (excepto el suelo V11), la fijación de K puede darse en minerales interestratificados que no son posibles de detectar con el tipo de técnica de difracción de rayos X utilizada.

Al igual que en las formas de K mencionadas anteriormente, el K-TPhB respondió de forma lineal al agregado de vinaza tanto a los 14 días como a los 180 días de iniciado el experimento (Figura 1e y 1f). Todos los suelos presentaron mayores concentraciones de K extraído con

TPhB en relación al extractante AA, esto se debe a que la extracción con TPhB extrae el K intercambiable y una parte del K no intercambiable. Los suelos BV3 y V11 presentaron mayores concentraciones de K extractado con TPhB para todas las dosis tanto en el muestreo inicial como en el final con respecto a los demás suelos. Estos resultados indicarían una mayor capacidad de retención de K en estos suelos con mayor contenido de arcilla con respecto a los suelos de textura gruesa. Por dicha razón, el suelo C3 mostró los menores tenores de K extractado con TPhB. Los suelos S3 y S4 de comportaron de manera intermedia.

Cuadro 7: Contenido de Ksol, K-AA y K-TPhB al inicio y al final del experimento.

Tratamiento	Ksol				K-AA				K-TPhB			
	14 días		180 días		14 días		180 días		14 días		180 días	
	mmol L^{-1}	CV %	mmol L^{-1}	CV %	$cmol_c$ kg^{-1}	CV %	$cmol_c$ kg_{-1}	CV %	$cmol_c$ kg^{-1}	CV %	$cmol_c$ kg^{-1}	CV %
V11 (n=3)												
T	0,20	24,0	0,28	9,1	0,55	12,1	0,53	7,8	0,82	8,0	0,73	8,0
DB	0,47	4,4	0,72	7,7	0,93	5,1	0,79	4,8	1,12	1,1	1,0	4,5
DM	0,70	16,5	1,02	12,8	1,14	6,6	0,91	7,9	1,33	2,9	1,13	1,6
DA	1,07	8,6	1,51	3,4	1,26	3,6	1,05	2,8	1,53	6,4	1,32	2,0
BV3 (n=3)												
T	0,16	32,1	0,22	7,9	0, 80	1,9	0,62	5,3	0,97	3,5	0,82	3,0
DB	0,30	8,8	0,40	3,9	1,03	5,3	0,86	2,4	1,19	4,8	1,0	2,0
DM	0,65	16,2	0,76	10,4	1,06	9,6	0,99	7,9	1,43	2,7	1,27	2,8
DA	0,88	6,7	1,07	17,2	1,21	12,4	1,16	4,9	1,64	4,5	1,41	2,8
S3 (n=3)												
T	0,10	10,0	0,16	19,7	0,32	7,9	0,31	11,2	0,46	1,5	0,47	3,6
DB	0,36	8,6	0,46	3,3	0,50	6,9	0,52	9,0	0,69	4,2	0,61	4,5
DM	0,73	9,2	0,89	6,8	0,67	9,2	0,66	1,5	0,91	3,9	0,82	1,5
DA	1,09	8,2	1,38	8,0	0,79	13,5	0,81	1,4	1,07	2,8	1,0	1,9
S4 (n=3)												
T	0,28	3,6	0,31	13,6	0,38	4,1	0,30	8,1	0,52	5,5	0,47	0,9
DB	0,63	8,4	0,72	1,4	0,61	3,3	0,47	7,4	0,73	3,4	0,67	3,9
DM	1,03	9,7	1,30	10,7	0,77	10,1	0,66	9,2	0,93	4,1	1,0	8,2
DA	1,63	7,2	1,53	2,0	0,91	12,9	0,82	3,8	1,17	1,7	1,17	1,8
C3 (n=3)												
T	0,13	49,9	0,17	0	0,23	6,7	0,17	16	0,32	14,5	0,35	1,6
DB	0,44	6,0	0,77	33,5	0,48	5,2	0,49	4,2	0,56	8,5	0,67	2,5
DM	0,99	3,8	1,13	31,9	0,55	6,3	0,58	11,0	0,71	8,9	0,73	2,5
DA	1,57	9,2	2,13	11,2	0,79	5,7	0,75	5,1	1,02	10,5	0,96	16,5

Cuadro 8: Parámetros del modelo lineal ajustado para la regresión del contenido de Ksol, K-AA y K-TPhB respecto al K agregado con la vinaza, determinado a los 14 y 180 días de iniciado el experimento.

	14 días			180 días		
Suelo	a	b	R^2	a	b	R^2
Ksol (mmol L^{-1}) = a + (b * dosis K ($cmol_c$ L^{-1}))						
V11	0,18	1,80	0,95	0,28	2,52	0,97
BV3	0,12	1,59	0,94	0,17	1,85	0,92
S3	0,07	2,12	0,98	0,11	2,58	0,98
S4	0,22	2,83	0,97	0,33	2,70	0,96
C3	0,05	3,07	0,97	0,11	3,96	0,89
K-AA ($cmol_c$ L^{-1}) = a + (b * dosis K ($cmol_c$ L^{-1}))						
V11	0,62	1,47	0,92	0,57	1,06	0,93
BV3	0,84	0,79	0,87	0,65	1,09	0,97
S3	0,33	1,01	0,97	0,33	1,04	0,97
S4	0,40	1,12	0,97	0,30	1,11	0,99
C3	0,25	1,12	0,94	0,22	1,17	0,88
K-TPhB ($cmol_c$ L^{-1}) = a + (b * dosis K ($cmol_c$ L^{-1}))						
V11	0,85	1,48	0,95	0,76	1,20	0,96
BV3	0,97	1,43	0,97	0,82	1,28	0,98
S3	0,47	1,30	0,98	0,45	1,15	0,99
S4	0,52	1,35	0,99	0,47	1,53	0,97
C3	0,31	1,43	0,94	0,39	1,21	0,87

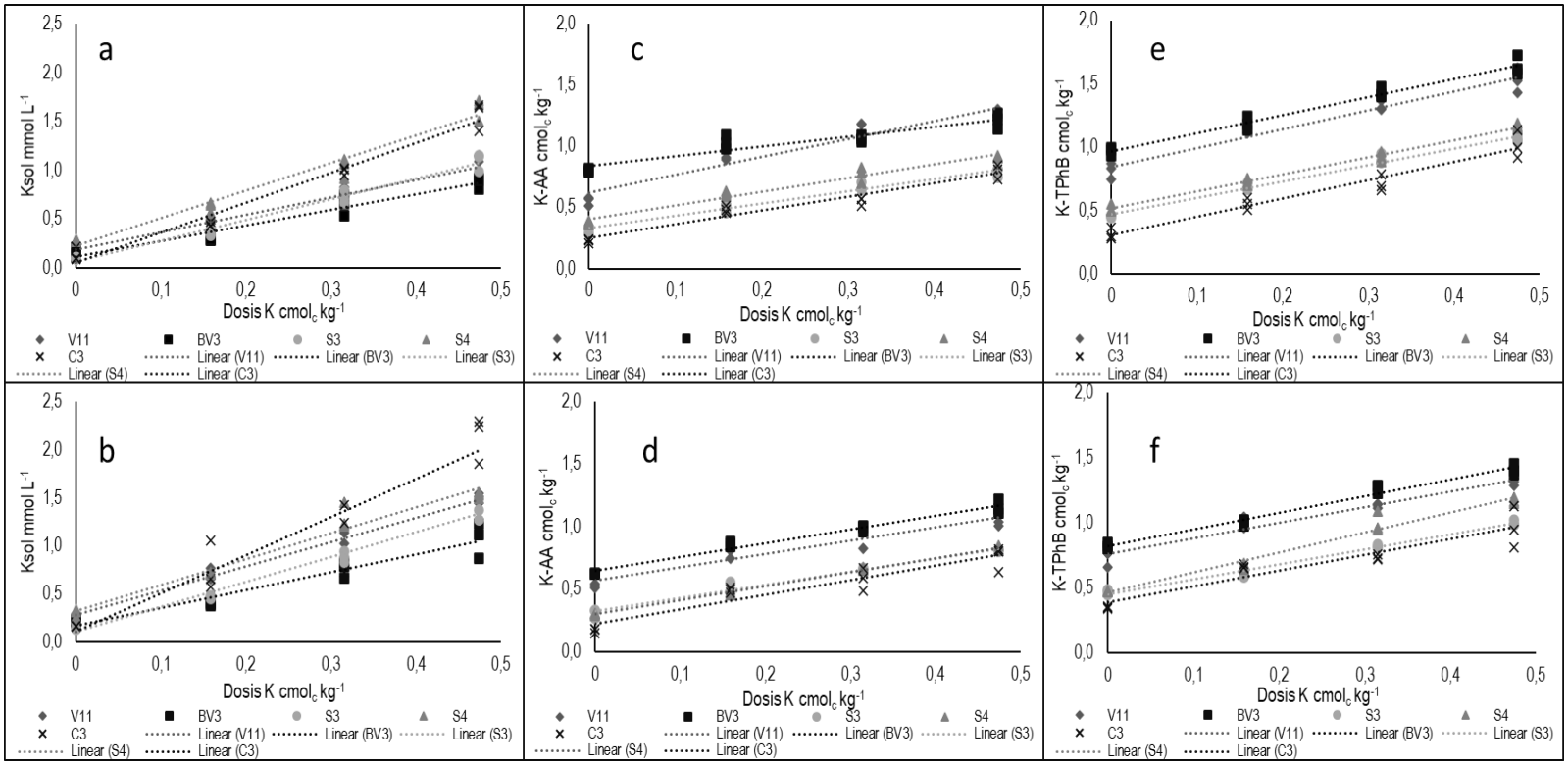

Figura 1. a) Relación entre el Ksol y la dosis de K agregada con la vinaza a los 14 días b) Relación entre el Ksol y la dosis de K agregada con la vinaza a los 180 días c) Relación entre el K-AA y la dosis de K agregada con la vinaza a los 14 días d) Relación entre el K-AA y la dosis de K agregada con la vinaza a los 180 días e) Relación entre el K-TPhB y la dosis de K agregada con la vinaza a los 14 días f) Relación entre el K-TPhB y la dosis de K agregada con la vinaza a los 180 días.

La relación entre el K-TPhB y el K-AA, mostró una tendencia lineal (Figura 2). Este resultado indica que ambos extractantes extraen cantidades proporcionales de ambas formas de K en los distintos suelos. El intercepto positivo y el coeficiente de 1,18 para el muestreo a los 14 días y de 1,11 para el muestreo a los 180 días del modelo lineal, indican que el extractante TPhB logra disolver solo una porción pequeña del K no intercambiable, por lo tanto, para estos suelos el TPhB extrae principalmente el K intercambiable, similar al extraído con acetato de amonio. Estos resultados muestran una menor extracción de K-TPhB con respecto a investigaciones realizadas en Uruguay (21) en un grupo de 721 muestras de suelos de uso agrícola de composición y mineralogía variada. Estos autores encontraron que para suelos de textura gruesa la relación es de 1,36 y para suelos de textura fina es de 1,65.

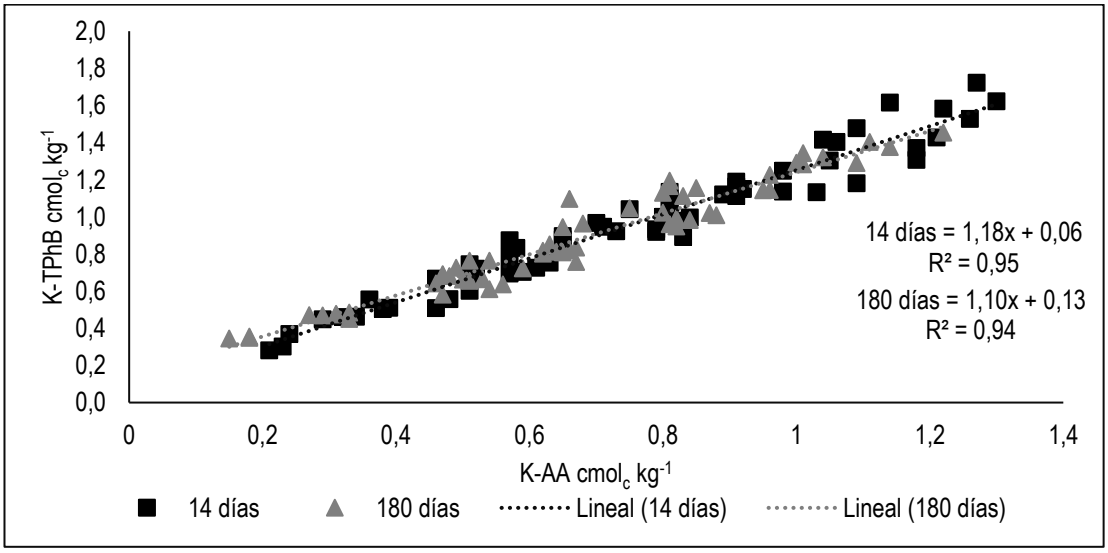

Figura 2. Relación entre K-AA y K K-TPhB a los 14 días y 180 días de iniciado el experimento.

Sin embargo, cuando se estudian los suelos por separado se puede observar que las relaciones entre el K-AA y K-TPhB difiere entre suelos y cambian con el tiempo de incubación (Cuadro 9). Los suelos V11 y S4 aumentaron el K-TPhB, lo que se puede ver en las pendientes del ajuste lineal. Este resultado indica que en estos suelos al final de la incubación, la extracción de K con TPhB, extrajo más K que al inicio del experimento, lo que podría tratarse de K fijado en los minerales arcillosos. Por el contrario, en los suelos BV3, S3 y C3 la concentración de K-TPhB

es menor a los 180 días que a los 14 días, estos resultados indican que no hubo fijación de K y que el K que se había fijado en un principio fue liberado.

Cuadro 9: Parámetros del modelo lineal ajustado para la regresión del contenido de K-TPhB respecto al K-AA a los 14 y 180 días de iniciado el experimento.

	14 días				180 días			
Suelo	a	b	R^2	p	a	b	R^2	p
K-TPhB ($cmol_c\ kg^{-1}$) = a + (b * K-AA ($cmol_c\ kg^{-1}$))								
V11	0,26	0,97	0,96	<0,0001	0,17	1,07	0,92	<0,0001
BV3	-0,30	1,57	0,85	<0,0001	0,09	1,14	0,96	<0,0001
S3	0,05	1,28	0,99	<0,0001	0,11	1,07	0,96	<0,0001
S4	0,07	1,31	0,93	<0,0001	0,05	1,38	0,97	<0,0001
C3	0,01	1,25	0,96	<0,0001	0,17	1,01	0,93	<0,0001

La relación entre el K-AA y el Ksol en ambos muestreos se ajustó con un modelo exponencial (Cuadro 10). La relación entre la disponibilidad de K inmediata (K en solución) y la capacidad del suelo para reponerlo a partir de formas intercambiables fue diferente para los distintos suelos, pero se observó la misma secuencia, en donde a medida que aumentó la cantidad de vinaza aplicada aumentaron en forma más pronunciada las concentraciones de Ksol con respecto a las de K-AA. Estas diferencias entre suelos se deben al contenido de arcilla y a la fuerza con que es retenido el K, desplazando el equilibrio hacia la solución cuando el contenido de arcilla es bajo y hacia formas intercambiables cuando el contenido de arcillas es mayor (Figura 3). En los suelos que presentan mayores contenidos de arcilla, el Ksol presentó menores aumentos en comparación con los suelos donde el contenido de arcilla es menor. Este tipo de comportamiento se ha observado en diferentes suelos y sistemas de producción (14, 18, 19, 43). Desde el punto de vista agronómico, los suelos con mayores contenidos de arcilla (que presentan mayor capacidad de reponer K a la solución del suelo) mantendrán mayores niveles de K-AA, es decir que podrán mantener la oferta de K para las plantas por un período más largo, que suelos que presenten texturas gruesas, ya que en este caso la oferta de K será a corto plazo (Cuadro 11). Conocer el comportamiento de los suelos puede favorecer la toma de decisiones en cuanto a dosis y número de aplicaciones.

Cuadro 10: Parámetros del modelo exponencial ajustado para la relación entre Ksol y K-AA determinado a los 14 y 180 días de iniciado el experimento

	14 días			180 días		
Suelo	a	b	R^2	a	b	R^2
	Ksol (mmol L^{-1}) = a $e^{b * K\text{-}AA\ cmol_c\ kg\text{-}1}$					
V11	0,06	2,29	0,93	0,06	3,15	0,94
BV3	0,01	4,17	0,80	0,03	3,01	0,93
S3	0,03	4,89	0,94	0,05	4,23	0,95
S4	0,09	3,19	0,96	0,14	3,11	0,92
C3	0,05	4,49	0,87	0,09	4,11	0,91

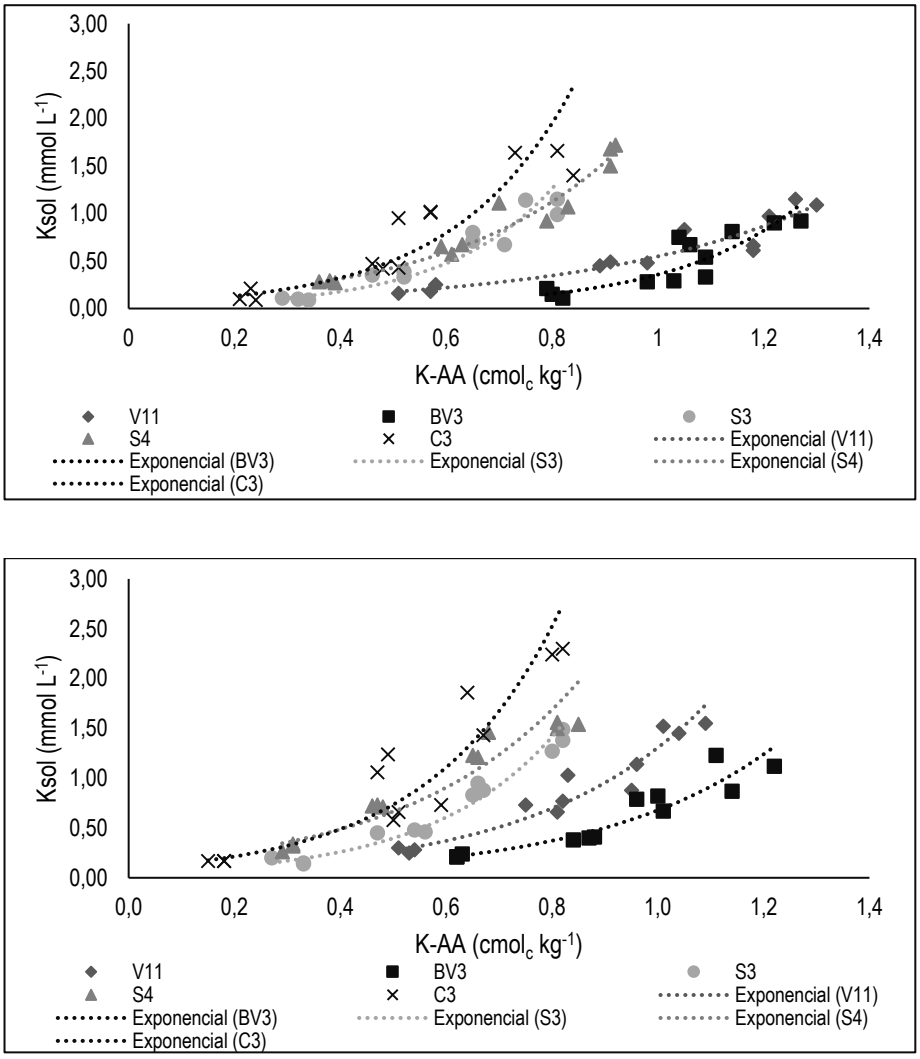

Figura 3: Relación entre el K-AA y el Ksol, para los cinco suelos a los 14 días (gráfico superior) y 180 días de iniciado el experimento (gráfico inferior).

Cuadro 11: Relación entre las diferentes fracciones de K con respecto a la dosis de vinaza y el tiempo.

Tratamiento	Ksol respecto al K-AA		K-AA respecto al K-TPhB	
	14 días	180 días	14 días	180 días
	%			
V11 (n=3)				
T	3,6	5,3	67,7	72,2
DB	5,1	9,1	82,6	79,7
DM	6,2	11,1	85,7	80,6
DA	8,5	14,4	82,4	79,5
BV3 (n=3)				
T	2,0	3,5	82,8	75,7
DB	2,9	4,6	87,1	86,1
DM	6,1	7,7	74,3	78,2
DA	7,2	9,3	73,8	82
S3 (n=3)				
T	3,2	5,3	69,4	66,3
DB	7,1	8,9	72,8	86
DM	10,8	13,4	73,9	80,5
DA	13,8	17	73,9	81,3
S4 (n=3)				
T	7,4	10,1	72,1	64,1
DB	10,3	15,3	83,9	70
DM	13,4	19,6	83,6	66,2
DA	17,9	18,6	78,2	70,3
C3 (n=3)				
T	5,9	10	71,4	48,7
DB	9,1	15,5	87,1	73,9
DM	18,1	19,4	77,1	79,4
DA	19,7	28,3	78	78,3

La sumatoria de las fracciones de K (solución, intercambiable y no intercambiable) fue para los testigos 1,03 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 0,5 a 1,8), para los suelos que recibieron la dosis baja 1,54 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 1,1 a 2,3), para la dosis media 1,92 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 1,4 a 2,6) y para la dosis alta 2,32 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 1,9 a 2,9), encontrándose diferencias entre suelos siendo el suelo C3 el que presentó la menor cantidad de K y el suelo BV3 el que presentó la mayor. Sin embargo, cuando se analiza el aumento promedio de la sumatoria de fracciones de K con respecto al testigo, se observa que los suelos con dosis baja aumentaron 0,51 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 0,4 a 0,7), la dosis media 0,88 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 0,8 a 1,1) y la dosis alta 1,29 $cmol_c\ kg^{-1}$ (rango 1,1 a 1,5), no encontrándose diferencias entre suelos ni entre muestreos. Estos resultados indican que los pools de K aumentan proporcionalmente a la aplicación de vinaza y que en suelos arenosos (C3) el equilibrio Ksol/K-AA es el que presenta mayor proporción del Ksol con respecto al K-AA

(28,3%), mientras que en suelos arcillosos el equilibrio se desplaza hacia las formas K-AA/K-TPhB (Cuadro 11).

2.6.5. Relaciones catiónicas

Al analizar las relaciones entre los cationes, se observó que estas se vieron afectadas por la aplicación vinaza (Cuadro 12). Los testigos de los suelos BV3, S3 y S4 presentaron relaciones Ca/K superiores al límite propuesto por (17) para situaciones de limitación de la disponibilidad de K por competencia con Ca (Ca/K>25), determinando un desbalance desfavorable a la disponibilidad de K en los tratamientos sin vinaza. Sin embargo, cuando el suelo fue mezclado con vinaza, dichas relaciones se mostraron en el rango considerado adecuado para el suministro de K a las plantas. Esto se debe a que la vinaza, rica en K aumentó los niveles de K intercambiable en el suelo, pero no tuvo un efecto importante sobre los niveles de Ca. En cuanto a los límites sugeridos en la literatura (17) para la sumatoria de los otros cationes respecto a K (Ca+Mg/K>40), solamente el suelo S3 testigo presentó un valor por encima del límite sugerido tanto para el muestreo a los 14 días como para el muestreo a los 180 días. Este desbalance está dado por un contenido elevado del Ca en el suelo, ya que la relación Mg/K no excedió el límite de 15 considerado detrimento de la disponibilidad de K. Para todos los suelos y en los dos muestreos realizados, a medida que aumentó la dosis de vinaza aplicada al suelo, las relaciones Ca+Mg/K disminuyeron. En el caso de los suelos S4 y C3 cuando se aplicaron dosis medias y altas de vinaza la relación Mg/K estuvo por debajo del límite propuesto por Bertsch (17), en el cual la abundancia de K puede ser negativa para la absorción de Mg (Mg/K < 2,5).

Cuadro 12: Efecto de la aplicación de vinaza sobre las relaciones catiónicas en los distintos suelos.

		14 días			180 días		
	Límites Bertsch	<2,5	>25	>40	<2,5	>25	>40
Suelo	Tratamiento	Mg/K	Ca/K	Ca + Mg / K	Mg/K	Ca/K	Ca + Mg / K
V11	T	5	19	24	5	16	21
	DB	4	13	16	4	12	15
	DM	3	10	14	3	10	14
	DA	3	9	12	3	9	12
BV3	T	7	26	33	7	23	30
	DB	5	21	26	6	19	24
	DM	4	17	21	5	15	20
	DA	4	14	17	4	12	17
S3	T	8	39	47	7	33	40
	DB	5	24	29	5	20	25
	DM	4	18	21	4	15	19
	DA	3	15	18	3	12	15
S4	T	5	32	37	6	26	32
	DB	4	20	24	4	18	22
	DM	3	15	18	3	13	16
	DA	2	12	14	2	11	14
C3	T	6	18	25	6	14	20
	DB	3	9	13	3	8	11
	DM	2	7	9	2	6	8
	DA	2	5	7	2	5	7

2.7. CONCLUSIONES

Se concluye que la aplicación de vinaza en los suelos produjo cambios significativos en cuanto a la disponibilidad de K, directamente relacionado con la dosis de vinaza, cuyo efecto es apreciable a los 14 días de aplicación. No se registraron diferencias significativas en los demás cationes intercambiables (Ca, Mg y Na) según el tratamiento con vinaza, aunque hubo diferencias entre suelos.

Todas las formas de K evaluadas (solución, intercambiable y no intercambiable) presentaron una relación lineal con el aumento en la dosis de vinaza. Las relaciones entre las formas de K intercambiable y no intercambiable fueron lineales, mostrando que los extractantes AA y TPhB extraen en promedio cantidades similares de K para los distintos suelos. Por otra parte, las

relaciones entre el K intercambiable y el K en solución se ajustaron con un modelo exponencial en donde se observa que los suelos mayormente arenosos presentan mayores concentraciones de K en solución respecto a los que contienen mayores tenores de arcilla.

Desde el punto de vista agronómico, los suelos con mayores contenidos de arcilla (mayor capacidad buffer) mantendrán mayores niveles de K intercambiable, es decir que podrán mantener la oferta de K para las plantas por un período más largo.

Algunos suelos presentaron relaciones catiónicas desfavorables naturalmente para la absorción de K y por consecuencia para la nutrición vegetal. Sin embargo, la aplicación de vinaza contrarresta dicho efecto, favoreciendo el balance nutricional.

Sería conveniente evaluar en un experimento con el cultivo de caña, el efecto de la aplicación de vinaza sobre la absorción de K, teniendo en cuenta el riesgo de consumo de lujo de K particularmente con dosis altas, contemplando posibles efectos en el proceso de industrialización.

Agradecimientos

Los autores agradecen a ALUR por la financiación del presente trabajo, a su personal técnico y de campo.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

1. Christofoletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JF, Fontanetti CS. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. Waste Manag. 2013;33(12):2752-61.

2. del Pino A, Casanova O, Hernández J, Takata V, Panissa G. Efecto de la aplicación de vinaza en suelos bajo cultivo de caña de azucar. Cien Agron. 2017;(30):30-36.

3. García A, Rojas C. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Nota Técnica Tecnicaña. 2006;10(17):3-13.

4. Chaves M. El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar, San José (Costa Rica); 1999.

5. Prado RM, Caione G, Campos CN. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. App Environ Soil Sci. 2013;(2013):1-8.

6. Yin J, Deng C-B, Wang XF, Chen GI, Mihucz VG, Xu GP. Effects of Long-Term Application of Vinasse on Physicochemical Properties, Heavy Metals Content and Microbial Diversity in Sugarcane Field Soil. Sugar Tech. 2018;21(1):62-70.

7. Ortegon GP, Arboleda FM, Candela L, Tamoh K, Valdes-Abellan J. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). Sci Total Environ. 2016;539:410-9.

8. da Silva A, Rossetto R, Bonnecine J, Piemonte M, Muraoka T. Net and Potential Nitrogen Mineralization in Soil with Sugarcane Vinasse. Sugar Tech. 2012;15(2):159-64.

9. Gómez JM. Efecto de la vinaza sobre el contenido de potasio intercambiable en un suelo representativo del área cañera del Valle del Río Turbio. Venesuelos. 2011;3(2):69-72.

10. España-Gamboa EI, Mijangos-Cortes JO, Hernandez-Zarate G, Maldonado JA, Alzate-Gaviria LM. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. Biotechnol Biofuels. 2012;5(1):82.

11. Chaves M. Las vinazas en la fertilización de la caña de azúcar. El Agricultor Costarricense. 1985;43:59-61.

12. Lezcano P, Mora P. Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para evitarlo. Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba. Editorial Científico Técnica,. 2006;15:02-17.

13. Grigatti M, Barbanti L, Ciavatta C. Soil respiration and nitrogen mineralization kinetics of compost and vinasse fertilized soil in an aerobic liquid-based incubation. Environ Eng Sci. 2010;27(1):65-73.

14. Hernández J, Casanova O, Zamalvide JP. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay: Facultad de Agronomía; 1988. 1 - 20.

15. Wood R, Meyer J. Factors affecting potassium nutrition of sugarcane in South Africa. Proc South Af Sugar Tech Assoc. 1986;60:198-204.

16. Marschner H. Function of Macronutrinets: Potassium. In: Academic press. Marschner's mineral nutrition of higher plants; Australia; 2011. 178-190.

17. Bertsch F. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica; 1987.

18. Hipp B, Thomas G. Influence of soil clay type on potassium availability. Texas, Texas Agricultural Experiment Station Bulletin MP-829 College Station. 1967.

19. Rabuffetti A. Potasio. La fertilidad del suelo y su manejo. 2. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur; 2017. p. 515-71.

20. Aguado-Lara G, Etchevers-Barra JD, Hidalgo-Moreno C, Galvis-Spínola A, Aguirre-Gómez A. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. Agrociencia. 2002;36(1):11-21.

21. Ferrando MG, Barbazán MM, García FO, Mallarino AP. Comparison of the ammonium acetate, Mehlich 3, and sodium tetraphenylboron as extractants to evaluate crop available potassium. Com Soil Sci Plant Anal. 2020;51(8):997-1005.

22. Murphy J, Riley JP. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta. 1962;27:31-6.

23. Mebius L. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. Anal Chim Acta. 1960;22:120-4.

24. Isaac RA, Kerber JD. Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. Inst met anal soils plant tissue. 1971:17-37.

25. Lugo-López M, Carnelli JP, Acevedo G, Rivera L. Major soils of Bella Unión area in Northwestern Uruguay. Journ Agric Univ Puerto Rico. 1984;68(2):199-218.

26. USDA. Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff. 2014.

27. Kilmer VJ, Alexander LT. Methods of making mechanical analyses of soils. Soil Sci. 1949;68(1):15-24.

28. Carroll D. Clay minerals: a guide to their X-ray identification: Geo Soc Am; 1970.

29. Biscaye PE. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geo Soc Am Bull. 1965;76(7):803-32.

30. Bray RH, Kurtz L. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 1945;59(1):39-46.

31. Walkley A, Black IA. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 1934;37(1):29-38.

32. Smith S, Scott A. Extractable potassium in grundite illite: I. Method of extraction. Soil Sci. 1966;102(2):115-22.

33. Cox A, Joern B, Roth C. Nonexchangeable ammonium and potassium determination in soils with a modified sodium tetraphenylboron method. Soil Sci Soc Am J. 1996;60(1):114-20.

34. Cox A, Joern B, Brouder S, Gao D. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. Soil Sci Soc Am J. 1999;63(4):902-11.

35. SAS I. Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc. 2013.

36. de Resende AS, Santos A, Xavier RP, Coelho CH, Gondim A, Oliveira OC. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. Rev Bra Cien Solo. 2006;30(6):937-41.

37. Armengol J, Lorenzo R, Fernández N. Utilización de la vinaza como enmienda orgánica y su influencia en las propiedades químicas de vertisoles y en los rendimientos de la caña de azúcar. Inst Cul Trop. 2003;24(3):67-71.

38. da Silva MA, Kliemann HJ, De-Campos AB, Madari BE, Borges JD, Gonçalves JM. Effects of vinasse irrigation on effluent ionic concentration in Brazilian Oxisols. Afr J Agric Res. 2013;8(45):5663-5671.

39. Anda M, Sarwani M. Mineralogy, chemical composition, and dissolution of fresh ash eruption: new potential source of nutrients. Soil Sci Soc Am J. 2012;76(2):733-47.

40. Salazar LA, Valencia NR, Khalajabadi SS. Disponibilidad de Ca2+, Mg2+ y K+ en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia. Rec Ind Assoc Am. 2015;6(1):29-42.

41. Staff USSL. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Dep Agricu, Agricu Hand N° 60; 1954.

42. Melo VdF, Alleoni LR. Química e mineralogia do solo. Parte I, Viçosa MG. 2009;529.

43. Sharpley AN. Relationship between soil potassium forms and mineralogy. Soil Sci Soc Am J. 1989;53(4):1023-8.

3. DESCOMPOSICIÓN Y LIBERACIÓN DE NITRÓGENO DE LA VINAZA EN DIFERENTES DOSIS Y SUELOS DE URUGUAY

Takata Virginia[1], del Pino Amabelia, Hernández Jorge

[1]Departamento de Suelos y Aguas. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Av. Garzón 780. CP12900. Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: virginiatakata@gmail.com

3.1. RESUMEN

En condiciones controladas de laboratorio (humedad y temperatura) se realizó una incubación de suelo con agregado de vinaza con el fin de estudiar la descomposición de la vinaza en cinco suelos representativos del área cultivada con caña de azúcar en el Uruguay. Se utilizaron tres dosis de vinaza, equivalentes a 125, 250 y 375 m^3 ha^{-1} y un testigo sin vinaza, para evaluar la evolución de los parámetros químicos pH, CE, P disponible y N mineral. Los muestreos de suelo se realizaron a los 14 y 180 días de iniciado el experimento. Además, se determinó la tasa de respiración microbiana midiendo la producción de CO_2 durante 140 días. La vinaza no produjo cambios significativos en el pH ni en el P disponible luego de 180 días de incubación. En las tasas de respiración se observaron diferencias significativas entre suelos y se incrementaron con la aplicación de vinaza, hasta 20 días desde el inicio del experimento. En cuanto a la mineralización de N, su tasa fue variable en los suelos del experimento y en la mayoría de los casos, la vinaza fue insuficiente en su aporte de N como sustrato para la actividad microbiana.

Palabras clave: actividad microbiana, mineralización, producción de etanol

3.2. SUMMARY

Under controlled laboratory conditions (humidity and temperature), an incubation was carried out to study the decomposition of vinasse added to five representative soils of Uruguay's sugarcane production zone. Three doses of vinasse were used, equivalent to 125, 250, and 375 m^3 ha^{-1}, and a control treatment without vinasse, to evaluate the evolution of pH, EC, available

P, and mineral N. Soil samples were taken 14 and 180 days after starting the experiment. Furthermore, the microbial respiration rate was determined by measuring CO_2 production for 140 days. No changes in pH or available P were observed after 180 days of incubation. Significative differences were observed in respiration rates between soils, which increased with vinasse application until 20 days after the start of the experiment. The N mineralization rate was variable in all soils of the experiment. N contribution of the vinasse was insufficient as a substrate for microbial activity.

Key words: microbial activity, mineralization, ethanol production

3.3. RESUMO

Em condições controladas de laboratório (humidade e temperatura) realizou-se uma incubação de amostras de solo com a adição de vinhaça, com a finalidade de estudar a decomposição da vinhaça em cinco solos representativos da área cultivada com cana de açúcar no Uruguai. Aplicaram-se três doses de vinhaça, equivalentes a 125, 250 e 375 m^3 ha^{-1}, e uma testemunha sem vinhaça, para avaliar a evolução dos parâmetros químicos pH, CE, P disponível e N mineral. A amostragem de solo realizou-se aos 14 e 180 dias do começo do experimento. Além disso, determinou-se a taxa de respiração microbiana, avaliando-se a produção de CO_2 durante 140 dias. A vinhaça não determinou mudanças significativas no pH nem o P disponível após 180 dias de incubação. Houve diferenças significativas nas taxas de respiração entre solos e incrementaram-se com a aplicação de vinhaça, embora a partir do dia 20 não foram observadas diferenças significativas entre solos. com vinhaça.

Palavras-chave: atividade microbiana, mineralização, produção de etanol

3.4. INTRODUCCIÓN

La vinaza es un residuo líquido derivado del proceso de fermentación de la caña de azúcar para la producción de etanol (1). En la zafra 2015 en Uruguay, la generación de vinaza fue estimada en 228.550 m^3 los cuales representan 32.650 m^3 de bioetanol anhidro (generándose 7 litros de vinaza por litro de alcohol). En general, la vinaza contiene materia orgánica (MO) y nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), por lo que su disposición inadecuada

representa un potencial problema ambiental. Su utilización en Uruguay consiste en la aplicación directa sobre el suelo en donde los nutrientes pueden ser reciclados a través del sistema suelo-planta, enriqueciendo la fertilidad natural de los suelos agrícolas (2). Para determinar el aporte y la disponibilidad de nutrientes, y en consecuencia las dosis a aplicar de vinaza, es necesario contemplar la cinética de la mineralización del C y N. La relación C/N brinda información sobre la capacidad de mineralización de la vinaza, e indica si los microrganismos tienen suficiente N para satisfacer sus necesidades (3).

En términos generales, se considera que cuanto mayor es la actividad microbiana del suelo, más productivo es el mismo y una forma indirecta de cuantificar la fertilidad global, es midiendo la actividad microbiana (4). El agregado de vinaza favorece el consumo de oxígeno por los microrganismos además de mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos (3, 5). Si bien el aumento de la actividad microbiana es positivo para la fertilidad de los suelos, un aumento considerable de las poblaciones microbianas podría promover un efecto priming sobre la MO estabilizada (6). Asimismo, el crecimiento acelerado de los microrganismos podría reducir la disponibilidad de N por inmovilización (4, 5). Para estimar la actividad microbiana, uno de los métodos propuestos es medir la producción de CO_2 por parte de los microorganismos, aunque esta actividad varía en función de múltiples factores como el uso del suelo, mineralogía, cobertura vegetal, prácticas de manejo, características de la vinaza y factores ambientales entre otros (3). Si bien existe una correlación directa entre la cantidad de microorganismos presentes y el consumo de oxígeno, también influye el contenido de la MO en el suelo (4).

Para predecir la disponibilidad de N en función de las dosis aplicadas, se deben tener en cuenta los múltiples componentes del sistema suelo (7) y las características de la vinaza (8). Por lo tanto, para cada sistema productivo (tipo de suelo, dosis, etc.) se debe evaluar la contribución de la vinaza y su mineralización. Para ello es necesario conocer la cantidad de N mineralizado y la tasa de mineralización. La tasa de mineralización de N indica la velocidad con la que se degrada el material orgánico y se expresa como el porcentaje del N presente en el sistema que se mineraliza. Esta tasa permite conocer cuanto N es liberado en formas disponibles en un periodo de tiempo determinado (9). El N mineralizado se establece a partir de la mineralización acumulada, la cual se calcula a partir del N liberado en un período de tiempo específico y

expresa cuánto N fue liberado de un material orgánico como la vinaza, al descomponerse por la actividad microbiana (10).

El objetivo de este estudio fue evaluar mediante incubaciones en condiciones controladas, el proceso de descomposición de la vinaza a través del seguimiento de la mineralización de N y la tasa de respiración microbiana en cinco suelos representativos del área cañera del Uruguay.

3.5. MATERIALES Y MÉTODOS

En condiciones controladas de humedad y temperatura en laboratorio, se realizó un experimento de incubación de suelo con agregados de diferentes cantidades de vinaza. Se compararon tres dosis, a partir de un equivalente agronómico (125; 250 y 375 m^3 ha^{-1}), y un suelo testigo control sin vinaza.

3.5.1. Suelos

Se seleccionaron cinco suelos representativos del área de producción de caña de azúcar en el Uruguay. Los suelos utilizados en el experimento se clasifican según (11) como: Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Vertic Argiudoll (V11, S3, S4), Fine, smectitic, thermic Typic Hapludert (BV3) y Fine, mixed, active, thermic Hapludalf (C3). Estos suelos son predominantes en la zona de cultivo y sobre ellos se está aplicando vinaza y fertilizaciones químicas desde hace varios años. Los suelos S3 y S4, presentan similares características fisicoquímicas y se encuentran bajo un monitoreo de largo plazo en donde el suelo S3 recibe vinaza periódicamente, mientras que el S4 es fertilizado exclusivamente con fertilizantes comerciales. De aquí en adelante se nombrarán como V11, BV3, S3, S4 y C3.

Para el experimento se tomó suelo de los primeros 20 cm del horizonte A de cada suelo. Para la caracterización inicial de los suelos, se analizó textura por el método de la pipeta (12). Además, se evaluaron parámetros como P disponible por el método Bray Nº1 y determinación colorimétrica (13), carbono orgánico (CO) por oxidación con $K_2Cr_2O_7$ en H_2SO_4 (14), contenido de cationes de intercambio por extracción con acetato de amonio 1M neutro y posterior determinación por absorción atómica (Ca^{+2} y Mg^{+2}) y espectrofotometría por emisión (K^+ y Na^+) (15), pH en agua y CE en relación 1:1 (suelo-agua) por medio de electrodos de actividad

específica y N mineral extraído con una solución de KCl 2M determinándose el NH_4^+ según el método de Berthelot (16) y el NO_3^- según la reacción de Griess-Ilosvay (17). En el cuadro 1 se presentan las características físicas y químicas de los cinco suelos.

3.5.2. Vinaza

La vinaza utilizada en el experimento fue suministrada por la empresa ALUR, recolectada de sus piletas de almacenamiento en el ingenio azucarero Mones Quintela (Bella Unión-Uruguay). Se trata de un material similar al utilizado en la aplicación sobre las chacras de producción de caña de azúcar. El material se conservó en heladera a 4°C hasta su análisis. El contenido de materia seca (MS) de la vinaza fue determinado por método gravimétrico (secado de muestras a 60ºC hasta peso constante). El nitrógeno total (NT) se determinó por vía húmeda mediante digestión con H_2SO_4 por el método Kjeldahl. El fósforo total (PT) se analizó por calcinación de la muestras, disolución con HCl y posterior análisis del extracto por colorimetría con ácido ascórbico (18). El carbono orgánico (CO) por oxidación con $K_2CR_2O_7$ en H_2SO_4 con calor externo (150ºC) y posterior determinación colorimétrica (19). El pH y conductividad eléctrica (CE) por medio de electrodos de actividad específica. Los cationes (Ca, Mg, K y Na) y microelementos (Fe, Mn, Cu y Zn) fueron determinados por absorción atómica y espectrofotometría de absorción atómica (Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn) y espectrometría de emisión (K y Na) (15) en el extracto en el que se determinó contenido total de P. La información recabada en la caracterización de la vinaza fue utilizada para calcular el contenido de nutrientes aplicados en el experimento de incubación. Las dosis se definieron en base al manejo actual de la aplicación de vinaza en el cultivo de caña de azúcar en el Uruguay. En el Cuadro 2 se presenta la composición química de la vinaza.

3.5.3. Instalación del experimento de incubación

El suelo fue tamizado a través de una malla de 1 cm para eliminar restos vegetales y otros elementos. Se mezcló 1 kg de suelo con vinaza en dosis de 0,05; 0,10 y 0,15 L kg^{-1} suelo, que equivalen a 125, 250 y 375 m^3 ha^{-1} (cálculos realizados a partir de una profundidad de horizonte de 20 cm y una DAP de 1,25 g cm^{-3}) y un testigo control de cada suelo sin el agregado de vinaza. Se realizaron tres repeticiones por tratamiento. La incubación se realizó a 25°C y con

una humedad equivalente a 90% de capacidad de campo (vinaza más agua desionizada) que se corrigió semanalmente mediante el agregado del agua perdida por evaporación. La mezcla de suelo y vinaza se incubó en bandejas con tapa y pequeños orificios en la superficie para permitir el intercambio gaseoso. Para las dosis del 125, 350 y 375 m^3 ha^{-1} de vinaza, el agregado de nutrientes corresponde a: 83, 166 y 249 kg ha^{-1} de N, 15, 30 y 45 kg ha^{-1} de P_2O_5 y 185, 370 y 555 kg ha^{-1} de K_2O respectivamente (Cuadro 2).

3.5.4. Muestreo de suelos y análisis

Los muestreos de suelo se hicieron al inicio y al final del experimento (14 y 180 días). Se tomaron muestras representativas de aproximadamente 200 g de suelo húmedo, se secaron a 40°C por 48 horas y se molieron hasta obtener una fracción menor a 2 mm. Se analizó: pH en agua y CE (relación 1:1 suelo-agua), P disponible (Bray N°1), cationes intercambiables (Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^+ y Na^+) y N mineral: nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) y amonio ($N\text{-}NH_4^+$) según fue descripto anteriormente. El N mineralizado corresponde a la sumatoria de las fracciones $N\text{-}NH_4^+$ y $N\text{-}NO_3^-$ a los 180 días. El porcentaje de N mineralizado agregado con la vinaza se estimó como la diferencia entre el N mineral de los tratamientos con vinaza al final de experimento menos el N mineral del testigo, y se relacionó con la dosis de N agregada con la vinaza.

3.5.5. Respiración microbiana

Paralelamente se realizó un experimento en donde se evaluó la tasa de respiración microbiana. Para ello se tomaron 50 g de suelo de las bandejas de incubación (inicial) y se colocaron en un recipiente hermético, en donde se midió la producción de $C\text{-}CO_2$ recogido en NaOH 0,25M, cuantificando el CO_2 desprendido por retrotitulación con HCl 0,1M (20). Se realizaron 10 medidas de producción de CO_2 a los 5, 12, 20, 34, 49, 63, 79, 93, 108 y 140 días de iniciado el experimento. A partir del resultado de cada medición se calculó la tasa de respiración diaria dividiendo el total de $C\text{-}CO_2$ por el número de días entre mediciones y el total acumulado de C desprendido. Se realizaron tres repeticiones por tratamiento y un testigo sin agregado de vinaza de cada suelo.

3.5.6. Diseño experimental y análisis estadístico

En ambos experimentos se evaluó el efecto de los tratamientos sobre los diferentes parámetros mediante análisis de varianza en un diseño con tres repeticiones en donde los bloques correspondieron a los suelos. Se realizaron análisis de contrastes entre el testigo y los tratamientos para mineralización de N proveniente de la vinaza y se evaluó el efecto de la dosis de vinaza según modelo lineal y cuadrático. Se realizaron análisis de contrastes entre el testigo y los tratamientos para la respiración microbiana y se evaluó el efecto de la dosis de vinaza según un modelo lineal y cuadrático. La herramienta informática utilizada para los análisis estadísticos fue el programa SAS (21).

Cuadro 1: Datos analíticos del horizonte A de los suelos utilizados en el experimento de incubación.

Suelo	Arena	Limo	Arcilla	pH H_2O	C orgánico	P asim	N-NO_3^-	N-NH_4^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	K^+	Na^+	Al*
		g kg-1			g kg^{-1}		mg kg^{-1}				$cmol_c$ kg^{-1}		
V11	310	370	320	4,6	18	33,5	24,6	16,1	10,9	3,2	0,59	0,44	0,89
BV3	240	390	370	5,6	20	15,0	9,0	13,3	21,0	5,3	0,80	0,64	0,06
S3	560	180	260	4,5	14	73,0	107	14,7	12,4	2,5	0,32	0,47	0,35
S4	430	300	270	4,3	16	12,5	128,5	36,1	12,1	2,0	0,38	0,39	0,47
C3	800	40	160	5,0	7	8,2	11,9	8,8	4,1	1,5	0,23	0,38	0,64

Cuadro 2: Composición química de la vinaza utilizada en el experimento y nutrientes agregados según dosis (Contenido total de C y nutrientes en base fresca).

		Composición de la vinaza	Nutrientes agregados		
			DB	DM	DA
			mg kg^{-1}		
MS	%	1,15			
pH		4,6			
CE	dS m^{-1}	7,75			
C	kg m^{-3}	11,26	507	1013	1520
N	kg m^{-3}	0,73	33	66	99
C/N	kg m^{-3}	15			
P	kg m^{-3}	0,06	2,7	5,4	8,1
Ca	kg m^{-3}	0,51	23	46	69
Mg	kg m^{-3}	0,21	10	19	29
K	kg m^{-3}	1,37	62	123	185
Na	kg m^{-3}	0,05	2	5	7
Fe	mg m^{-3}	11420	0,51	1,03	1,54
Mn	mg m^{-3}	5129	0,23	0,46	0,69
Cu	mg m^{-3}	150	0,01	0,01	0,02
Zn	mg m^{-3}	414	0,02	0,04	0,06
DB: dosis baja; DM: dosis media y DA: dosis alta (corresponden a un agregado de vinaza de 0,05; 0,10 y 0,15 L kg-1 de suelo respectivamente).					

3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos utilizados en el experimento presentan una historia agrícola importante, con sucesivos laboreos que han favorecido la mineralización de la materia orgánica y han recibido fertilizaciones con NPK con el fin de satisfacer la demanda de nutrientes. Adicionalmente, el cultivo de caña de azúcar es regado con vinaza complementando a las fertilizaciones químicas. El extenso uso agrícola se ve reflejado en las características de los suelos utilizados, los cuales distan mucho de su condición original. Los suelos, con excepción de BV3, presentan signos de acidificación (bajo pH y presencia de acidez intercambiable). En el suelo S3 se observan altos niveles de P asimilable (73 mg kg^{-1}), y de igual manera, para los suelos S3 y S4 las concentraciones de $N\text{-}NO_3^-$ se encuentran en un alto nivel, por encima de 100 mg N Kg^{-1} de suelo.

3.6.1. Evolución de pH, CE, P y N disponible en suelos con aplicación de vinaza

La evolución de los parámetros analizados como pH, CE y contenido de P disponible y N mineral ($N\text{-}NH_4^+$ y $N\text{-}NO_3^-$) dependieron del proceso de mineralización de la vinaza. El Cuadro 3 presenta los resultados de los análisis estadísticos para estos parámetros.

Cuadro 3: Resultado del análisis de varianza para determinar el efecto del tipo de suelo y de la aplicación de vinaza sobre el pH, la CE, P disponible y N mineral en los distintos muestreos.

			P>F	
Parámetro	Muestreo	CV	Suelo	Tratamiento Vinaza
		%		
pH	14 días	3,0	<0,0001	NS
	180 días	4,8	<0,0001	NS
CE	14 días	24,2	<0,0001	0,0014
	180 días	27,9	<0,0001	<0,0001
P Bray	14 días	15,4	<0,0001	NS
	180 días	15,8	<0,0001	NS
$N\text{-}NO3^-$	14 días	17,9	<0,0001	NS
	180 días	18,3	<0,0001	0,0001
$N\text{-}NH4^+$	14 días	12,8	<0,0001	<0,0001
	180 días	16,9	<0,0001	0,004
N Mineral	14 días	12,9	<0,0001	NS
	180 días	16,8	<0,0001	0,0003
NS: No sigificativo				

La composición química de la vinaza utilizada en el experimento coincide con los resultados de otros autores (22-26). El pH de este material es ligeramente ácido (pH 4,6) debido a los ácidos orgánicos presentes en la misma, los cuales generalmente son rápidamente descompuestos en el suelo (25). Probablemente es por esta razón que la utilización de vinaza no acidificó los suelos del experimento (Cuadro 3). En el pH se observaron efectos del tipo de suelo, pero no se observaron diferencias significativas en los tratamientos con vinaza con respecto al testigo a los 14 ni a los 180 días.

Si bien la aplicación de distintas dosis de vinaza no produjo cambios significativos en el pH del suelo, se observó un aumento temporario del pH al inicio del experimento en los suelos que recibieron vinaza, que pudo deberse a la oxidación de la materia orgánica del suelo en condiciones reductoras debido a la actividad microbiana, que al descomponer a la materia

orgánica disuelta forma CO_2, CH_4 y aumento de los iones OH^- (27). Luego se produce un descenso del pH hasta los valores iniciales debido a la ionización de H^+ de grupos carboxilos, ácidos fenólicos, alcoholes de la materia orgánica y a la nitrificación que es un proceso que acidifica el suelo (28). Aunque el efecto de la vinaza en el pH del suelo para las condiciones del experimento no fue significativo, es necesario realizar un seguimiento de este parámetro si se utiliza vinaza por mucho tiempo, ya que es probable que los efectos acumulados tengan mayor importancia que después de una aplicación como en este caso (27, 29).

La alta conductividad eléctrica de la vinaza implica que tiene una alta concentración de sales. Tanto a los 14 como a los 180 días de la incubación se observó un efecto significativo de la aplicación de vinaza sobre la CE con respecto al suelo testigo. Este mayor nivel de CE en el suelo al final de la incubación se explica por la acumulación de sales, ya que en las bandejas de incubación no se produjo lixiviación ni absorción de iones por parte de cultivos (Cuadro 4). Se observaron diferencias significativas al contrastar el testigo con los tratamientos con vinaza y se ajustó una relación lineal (<0,0001). Según (30) la interacción de materiales con alto riesgo de salinización como la vinaza, al interactuar con el suelo neutralizan los iones H^+ y OH^- junto con K, Ca, Mg y materia orgánica disuelta. Por esta razón la vinaza no ocasionó problemas de salinidad en estos suelos. Las diferencias observadas entre suelos se deben a capacidad amortiguadora de los mismos. En los suelos BV3, S3 y S4 hubo un escaso aumento de CE con respecto al testigo, mientras que en los suelos V11 y C3 presentaron aumentos de 4 y 6 veces más con el agregado de vinaza. De acuerdo con estos resultados relativos a la CE, los suelos BV3, S3 y S4 podrían recibir mayores dosis de vinaza y con más frecuencia que los suelos V11 y C3.

Si bien concentraciones altas en sales en el suelo, mayores a 1 dS m-1 medidas en relación 1:1 suelo-agua son consideradas negativas para el crecimiento vegetal (31), en un monitoreo en condiciones de producción de caña de azúcar en el Uruguay, se observó que la aplicación de vinaza no tuvo efecto sobre la CE, posiblemente por la absorción de nutrientes por el cultivo de caña y la lixiviación de iones en profundidad (22, 32). Este hecho se limita a suelos con texturas livianas, por el contrario, suelos que presenten un horizonte B textural, con alto contenido de arcilla, la lixiviación de iones en profundidad puede verse impedida, provocando

un aumento considerable de las sales en solución, lo cual podría ser perjudicial para el crecimiento vegetal.

En cuanto al P disponible en el suelo, no hubo efecto de la aplicación de vinaza con respecto al testigo ni entre tratamientos, en ninguno de los muestreos. Entre suelos se observaron diferencias significativas que se debieron al P inicial de cada suelo. Cuando se aplica al suelo P en forma soluble como en el caso de la vinaza, éste nutriente queda rápidamente disponible para las plantas. Si la absorción no supera la oferta, el P como PO_4^- se adsorbe en la superficie de los coloides del suelo cargados positivamente como los óxidos e hidróxidos de Fe y Al. Este mecanismo de retención, retrograda al P a formas cada vez más insolubles y no disponibles para las plantas. Aunque el aporte de P de la vinaza es bajo en relación con otros nutrientes, los grandes volúmenes aplicados periódicamente de este material podrían elevar la concentración de P en el suelo lo que representa una potencial fuente de contaminación de cursos de agua. La recomendación de fertilización con P como P_2O_5 propuesta por (33) oscila entre 60 y 200 kg P_2O_5 ha^{-1}, sin embargo el aporte de P_2O_5 proveniente de la vinaza según las dosis utilizadas en el experimento es de 15, 30 y 45 kg de P_2O_5 ha^{-1}, lo que se considera insuficiente para el desarrollo de la caña. Cabe destacar que el contenido de P de la vinaza utilizada en el experimento es inferior a otras vinazas consultadas en la literatura, en donde se observó un amplio rango de entre 0,06 y 0,40 kg m^3 (5, 24-26, 34, 35). Aunque no se detectó un efecto de la vinaza sobre el P disponible, se observó una leve tendencia a aumentar el P con el agregado de vinaza, que no se relaciona al contenido inicial de P ni al tipo de suelo. Es necesario un monitoreo de suelo para evaluar el aporte de P en este tipo de sistemas productivos con aplicación continua de vinaza.

No se encontraron diferencias significativas en Ca, Mg y Na intercambiables como consecuencia de la aplicación de vinaza, sin embargo, K intercambiable presentó efecto de la vinaza con una relación lineal con la dosis (36[1]).

[1] Los resultados se encuentran disponibles en el artículo: Utilización de la vinaza como fuente de K para el cultivo de caña de azúcar (pp 23 y 26).

Cuadro 4: pH, CE y P disponible en los suelos del experimento de incubación con aplicación de vinaza (muestreo realizado a los 180 días de incubación).

Suelo	Dosis de vinaza m^3 ha^{-1}	pH H_2O	CE	P disponible
			dS m^{-1}	mg P kg^{-1} suelo
V11	0	4,4	0,30	35,8
	125	4,6	1,03	40,9
	250	4,6	1,34	40,9
	375	4,8	1,31	39,3
BV3	0	5,4	0,63	14,8
	125	5,6	0,98	16,2
	250	5,4	0,97	17,7
	375	5,3	1,03	18,5
S3	0	4,7	1,36	69
	125	4,7	1,26	70,2
	250	4,7	1,66	69,3
	375	4,6	1,71	66,2
S4	0	4,2	1,69	14,9
	125	4,5	1,58	13,5
	250	4,4	1,98	14,7
	375	4,6	1,70	14,8
C3	0	4,5	0,21	11,2
	125	4,6	0,83	12,3
	250	4,7	0,85	12,7
	375	4,8	1,41	13,2

3.6.2. Mineralización de C y N

3.6.2.1. Respiración microbiana y evolución del C en el suelo

Para el caso de los tratamientos testigo de los cinco suelos, al comienzo de la incubación (5 días), las tasas de respiración mostraron un amplio rango con valores de 7,7; 6,6; 1,5; 0,5 y 2,1 mg C-CO_2 kg^{-1} $día^{-1}$, para los suelos V11, BV3, S3, S4 y C3 respectivamente. Es remarcable que los suelos S3, S4 y C3 manifestaron tasas de respiración diarias muy por debajo de los suelos V11 y BV3. Las causas de este comportamiento podrían relacionarse a un deterioro de la calidad del suelo, que se manifiesta en una mineralización basal menor, con menor productividad y actividad microbiana (4), así como en el caso de suelo C3 a un bajo nivel de MO inicial.

En el Cuadro 5 se presentan los resultados del análisis estadístico de la tasa de liberación de $C\text{-}CO_2$. En todos los suelos, entre los días 5 y 12, la tasa de respiración microbiana de los suelos con vinaza estuvo por encima del testigo correspondiente, con un claro efecto de la dosis de vinaza para todos los suelos (5, 37). Hasta el día 20, se observan diferencias significativas (<0,0001) en la tasa de liberación de $C\text{-}CO_2$ de los suelos, con un efecto lineal de la dosis de vinaza. Este hecho fue corroborado en un experimento realizado en Tlaxcala, México en donde la respiración microbiana aumentó con la aplicación de vinaza al suelo, respecto al suelo sin agregado de vinaza, en el cual la respiración fue muy baja (4). Por su parte (5) reporta que, durante los primeros 30 días de aplicación de vinaza al suelo se observó una proliferación intensa de la población y actividad de los microorganismos, la cual decreció posteriormente, además de una reducción de la disponibilidad de N en el suelo.

Luego del día 20, aunque continúan registrándose diferencias en la tasa de respiración de los distintos suelos, no es significativo el efecto de la aplicación de vinaza. Para todos los suelos y las dosis de vinaza, la tasa de respiración microbiana hasta los 108 días de iniciado el experimento fue similar. La diferencia se encuentra en la fecha en la cual las tasas de respiración de cada suelo comienzan a tener la misma tendencia, lo que se ve reflejado en la figura 1 (a, b, c, d y e). A los 140 días, la tasa de respiración no presentó diferencias entre tratamientos y suelos.

Cuadro 5: Resultados del análisis de varianza para determinar el efecto del suelo y la aplicación de vinaza sobre la liberación de C-CO_2 en los distintos muestreos. Se evaluaron mediante contrastes el efecto de los tratamientos respecto al testigo y el modelo lineal para el efecto de la dosis.

				Contrastes Pr>F	
Día	CV (%)	Pr>F	Suelo	Testigo vs resto	Dosis lineal
5	9,9	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
12	22,2	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
20	32,3	<0,0001	<0,0001	NS	<0,0001
34	29,8	<0,0001	<0,0001	NS	NS
49	30,8	<0,0001	<0,0001	NS	NS
63	35,5	<0,0001	<0,0001	NS	NS
79	44,8	<0,0001	<0,0001	NS	NS
93	40,5	<0,0001	<0,0001	NS	NS
108	53,4	<0,0001	<0,0001	NS	NS
140	55,0	NS	NS	NS	NS
NS: No significativo					

En todos los suelos y tratamientos la producción acumulada de C-CO_2 al final del experimento para todas las dosis de vinaza y en todos los suelos fue mayor que en el testigo (Cuadro 6). Se observó que la mineralización de C proveniente de la vinaza, estimada como la diferencia entre los tratamientos y el testigo, osciló entre 3 y 44% del C agregado. Estos resultados indican que, para todos los suelos utilizados, la mineralización de la vinaza en 180 días no fue completa.

La producción neta de C-CO_2 de las dosis altas vinaza de todos los suelos en comparación con el testigo, fue superior en el suelo S4, mientras que en los demás suelos mostraron un efecto neto menor (Cuadro 6). Este hecho puede deberse al manejo en el caso del suelo S4 que nunca había recibido vinaza y esto pudo haber fomentado el crecimiento y la actividad microbiana. O a algunas características de los suelos, en el caso del suelo C3, éste presenta textura liviana con bajo contenido de cationes, menor poder buffer que los otros suelos, bajo pH y presenta aluminio intercambiable. La vinaza produce un efecto catalítico sobre la oxidación química y microbiológica de la MO y la menor capacidad de los coloides para proteger

física y químicamente la MO de la biodegradación microbiana hacen que la vinaza se mineralice más rápido en este tipo de suelo (38). Por el contrario, en suelos de mejor calidad agrícola como el V11, BV3 y S3, la vinaza puede alterar químicamente a las arcillas y provocar cambios en los minerales del suelo por su acidez y poder ligante pero no tiene efecto sobre la mineralización (39).

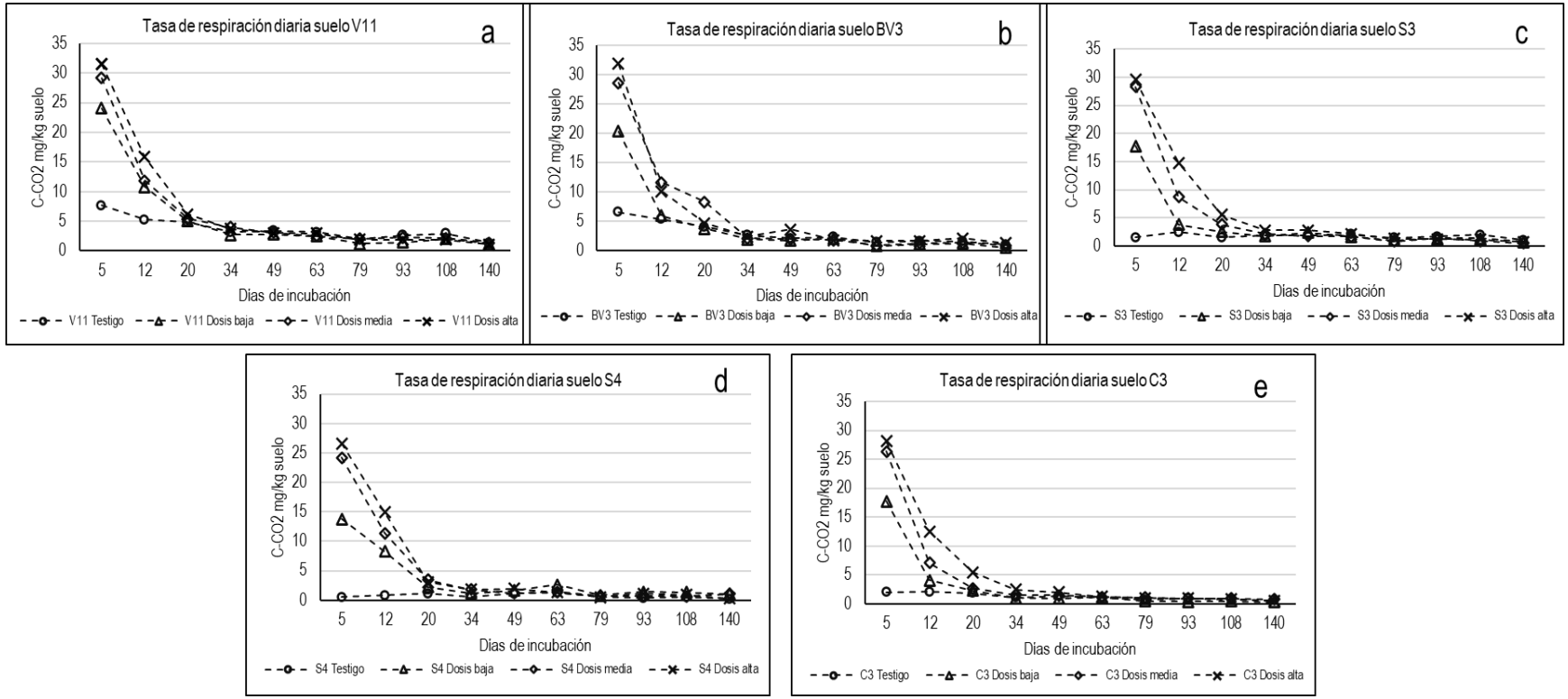

Figura 1: a) Evolución de la tasa de respiración diaria para el suelo V11; b) Evolución de la tasa de respiración diaria para el suelo BV3; c) Evolución de la tasa de respiración diaria para el suelo S3; d) Evolución de la tasa de respiración diaria para el suelo S4; e) Evolución de la tasa de respiración diaria para el suelo C3.

Cuadro 6: Cambios en la disponibilidad de C y N mineral durante la incubación de los suelos con agregado de vinaza.

Suelo	Dosis mg C kg^{-1} suelo	C min en 140 días mg C kg^{-1} suelo	% C min agregado con vinaza	Dosis mg N kg^{-1} suelo	N mineralizado en 180 días mg N kg^{-1} suelo	% N min agregado con vinaza	Remanente mg C kg-1 suelo	Remanente mg N kg^{-1} suelo	Rel C/N	Tasa min N mg N kg^{-1} suelo $día^{-1}$
V11	0	371	---	0	90	---	---	---	---	0,50
	507	459	17	33	111	64	419	12	35	0,62
	1013	549	17	66	102	19	836	53	16	0,57
	1520	576	13	99	138	49	1315	50	26	0,77
BV3	0	312	---	0	54	---				0,30
	507	327	3	33	64	30	492	23	21	0,36
	1013	462	15	66	74	30	863	46	19	0,41
	1520	498	12	99	71	17	1334	82	16	0,39
S3	0	230	---	0	185	---	---	---	---	1,03
	507	298	13	33	189	14	439	28	16	1,05
	1013	374	14	66	167	0	869	66	13	0,93
	1520	482	17	99	174	0	1268	99	13	0,97
S4	0	89	---	0	177	---	---	---	---	0,98
	507	311	44	33	220	128	285	0	---	1,22
	1013	358	27	66	198	32	744	45	16	1,10
	1520	385	19	99	259	83	1224	17	72	1,44
C3	0	147	---	0	59	---	---	---	---	0,33
	507	211	13	33	77	55	443	15	30	0,43
	1013	331	18	66	69	14	829	57	15	0,38
	1520	414	18	99	91	32	1253	68	19	0,50

3.6.2.2. Evolución del N en el suelo

De acuerdo con el análisis estadístico, para $N\text{-}NH_4^+$ y $N\text{-}NO_3^-$, hubo un efecto de la dosis de vinaza incrementando los contenidos de $N\text{-}NH_4^+$ a los 14 y 180 días de iniciado el experimento, mientras que en $N\text{-}NO_3^-$ el efecto solo se observó a los 180 días (Cuadro 3). Se observó que el N aplicado con la vinaza al inicio del experimento se encontraba en formas amoniacales pasando luego a formas nítricas a lo largo de la incubación (Figura 2). Este hecho demuestra la presencia de N fácilmente disponible que, al ser aplicado al suelo, probablemente tendrá un efecto inmediato para la nutrición del cultivo.

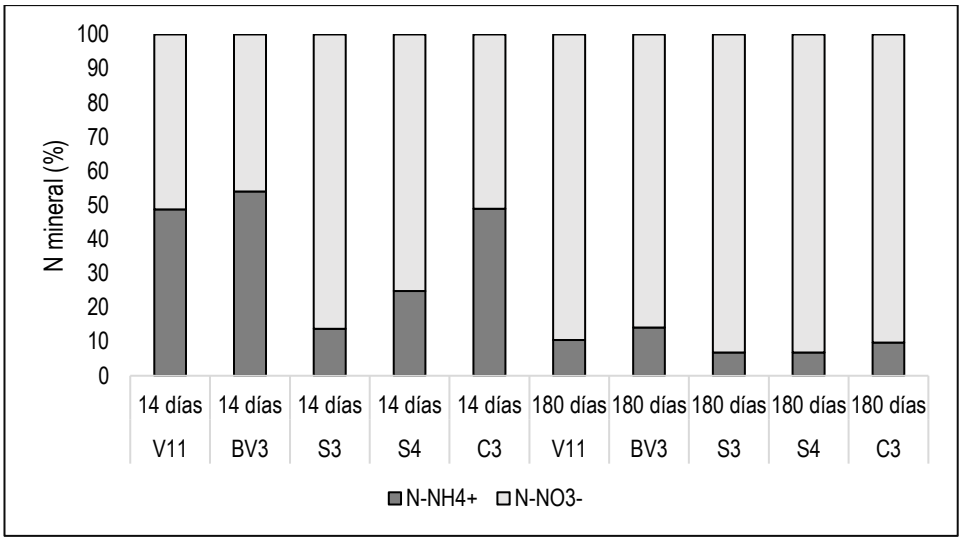

Figura 2: Evolución la proporción de la forma amoniacal y nítrica del N mineral de los tratamientos con vinaza en los diferentes suelos.

En todos los suelos hubo aumentos en el contenido de N mineral en el período del experimento (Cuadro 6). El N mineralizado en los suelos testigos se atribuye a la mineralización de la MO del suelo. Por su parte, el N mineralizado en el suelo con agregado de vinaza se relaciona además con la mineralización de la MO proveniente de la vinaza. Con excepción del suelo S3 (DM y DA), en todos los tratamientos se observó que el N aportado con la vinaza fue mineralizado en un rango variable. Para los suelos V11, BV3 y C3 la variación fue de entre 14 y 64%. Para el suelo S3 se observó una baja mineralización de la vinaza siendo apenas un 14% en la DB, mientras que las DM y DA presentaron menor mineralización que el testigo, lo

que supone una inmovilización de N por los microorganismos del suelo en función de su crecimiento acelerado. En cambio, en el suelo S4 la mineralización fue muy alta en comparación con los demás suelos, observándose en la DB una mineralización por encima del 100%. Este resultado indicaría que en este tratamiento hubo un efecto priming, en donde los microorganismos consumieron todo el N aportado con la vinaza y parte de N de la MO estabilizada del suelo, además en este suelo se observó el mayor porcentaje de mineralización de C aportado por la vinaza. El suelo S3 y S4 presentaron contenidos iniciales de N mineral superiores a 100 mg kg^{-1} (S3 121,7 y S4 164,6 mg N kg^{-1}) y fueron los que presentaron mayores valores de mineralización acumulada en el período. Sin embargo, se observó que el comportamiento de estos suelos fue diferente en relación al N mineralizado. Estos resultados pueden están relacionados al hecho de que el suelo S3 recibe vinaza en condiciones de producción mientras que el suelo S4 nunca recibió vinaza y es probable que la adecuación de la microflora a las nuevas condiciones produjo un crecimiento acelerado de los microorganismos fomentando el consumo de la vinaza, lo que permitió la liberación del N fácilmente mineralizable en el período evaluado (3). El hecho de que las dosis bajas de vinaza mostraran un mayor porcentaje de N mineralizado en todos los suelos podría estar relacionado con que en estas incubaciones no hubo lixiviación, a diferencia con lo que sucede en situaciones comerciales, el efecto salino de la vinaza produce una disminución en la actividad de las enzimas (40, 41), lo cual puede estar afectando la mineralización. Otra posibilidad sería que con las dosis bajas de vinaza se haya llegado a la máxima capacidad de mineralización, lo cual se podría considerar como el óptimo biológico.

Una hipótesis en relación a los bajos valores de mineralización de la vinaza en el suelo S3 en 180 días de incubación es en función del pH ácido de este suelo. En esta situación, podrían predominar los hongos como degradadores de la materia orgánica por sobre las bacterias, quienes son menos eficientes en la descomposición (42). Según lo reportado por (3), el pH no afecta a la producción de CO_2 pero se encontraron diferencias significativas en relación a la actividad de la deshidrogenasa que mide el metabolismo degradativo del suelo y es un buen indicador de la actividad microbiana total.

Las relaciones del C y N remanentes de la vinaza en el suelo estimadas a partir del C y N que no se consumió (Cuadro 6), muestran que en las situaciones donde el N agregado con la vinaza

fue mineralizado en mayor proporción, la relación C/N remanente aumentó, indicando que el sustrato es cada vez menos lábil. El hecho de que se mineralice más N que C y las bajas tasas de respiración microbiana observadas a partir del día 20, coinciden con lo reportado por varios autores que indican que la vinaza aplicada al suelo eleva el contenido de MO a largo plazo lo cual se evidencia por el bajo desprendimiento de $C\text{-}CO_2$ (43). Por otra parte, el N aportado por la vinaza es insuficiente para cubrir las necesidades del cultivo dado que la mineralización al final de experimento no fue completa, por tan motivo, en situaciones de producción debe complementarse la aplicación de vinaza con fertilizantes nitrogenados.

3.7. CONCLUSIONES

La vinaza como otros materiales orgánicos, aporta nutrientes y aumenta la actividad biológica de los suelos agrícolas.

En cuanto a las propiedades químicas, el pH ácido de la vinaza no produjo cambios significativos en el pH de los suelos en los 180 días de incubación. Tampoco hubo efecto de la vinaza en el P disponible. Aunque es necesario tener en cuenta el P inicial del suelo para definir dosis de vinaza.

Se observaron aumentos lineales con la dosis de vinaza en las tasas de respiración, pero esta rápida descomposición estuvo restringida al periodo inicial, y a partir del día 20 estas diferencias se hacen mínimas entre los tratamientos.

La mineralización de N en condiciones controladas, tomando en cuenta el acumulado de N y la dosis de vinaza utilizada, demostró que 180 días de incubación no fueron suficientes para su total mineralización, especialmente cuando se aplicaron altas dosis de vinaza. Se debería estudiar el efecto de la mineralización en condiciones de producción.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a ALUR por la financiación del trabajo y especialmente al Ing. Agr. Germán Panissa y a Dra. Natalia Bajsa (IIBCE).

3.8. BIBLIOGRAFÍA

1. da Silva A, Rossetto R, Bonnecine J, Piemonte M, Muraoka T. Net and Potential Nitrogen Mineralization in Soil with Sugarcane Vinasse. Sugar Tech. 2012;15(2):159-64.

2. Grigatti M, Barbanti L, Ciavatta C. Soil respiration and nitrogen mineralization kinetics of compost and vinasse fertilized soil in an aerobic liquid-based incubation. Environ Eng Sci. 2010;27(1):65-73.

3. Ramos E, Zúñiga D. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. Eco Apl. 2008;7(1-2):123-30.

4. Crisostomo S, Ferrera R, Zebrowski C. Respiración microbiana como un indicador de la fertilidad de los suelos agrícolas y tepetates en el estado de Tlaxcala. Terra. 1992;10:425-9.

5. Chaves M. Las vinazas en la fertilización de la caña de azúcar. El Agricultor Costarricense. 1985;(43):59-61.

6. Mazzilli SR, Kemanian AR, Ernst OR, Jackson RB, Piñeiro G. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. Soil Bio Bioch. 2014;(75):273-81.

7. Fortuna A, Harwood R, Kizilkaya K, Paul E. Optimizing nutrient availability and potential carbon sequestration in an agroecosystem. Soil Bio Bioch. 2003;35(8):1005-13.

8. Bengtsson G, Bengtson P, Månsson KF. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. Soil Bio Bioch. 2003;35(1):143-54.

9. Cerrato M, Leblanc H, Kameko C. Potencial de mineralización de nitrógeno de Bokashi, compost y lombricompost producidos en la Universidad Earth. Tierra Trop. 2007;3(2):183-97.

10. Figueroa A, Álvarez JG, Forero AF, Salamanca C, Pinzón LP. Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. Temas Agrarios. 2012;17:(1):32-43.

11. USDA. Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff. 2014.

12. Kilmer VJ, Alexander LT. Methods of making mechanical analyses of soils. Soil Sci. 1949;68(1):15-24.

13. Bray RH, Kurtz L. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 1945;59(1):39-46.

14. Walkley A, Black IA. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 1934;37(1):29-38.

15. Isaac RA, Kerber JD. Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. Inst met anal soils plant tissue. 1971:17-37.

16. Rhine E, Mulvaney R, Pratt E, Sims G. Improving the Berthelot reaction for determining ammonium in soil extracts and water. Soil Sci Soc Am J. 1998;62(2):473-80.

17. Mulvaney R. Nitrogen-inorganic forms. Met soil anal Part. 1996;3:1123-84.

18. Murphy J, Riley JP. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta. 1962;27:31-6.

19. Mebius L. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. Anal Chim Acta. 1960;22:120-4.

20. Anderson JP. Soil respiration. Chemical and microbiological properties. Met soil anal Part 2. 1982:831-71.

21. SAS I. Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc. 2013.

22. del Pino A, Casanova O, Hernández J, Takata V, Panissa G. Efecto de la aplicación de vinaza en suelos bajo cultivo de caña de azucar. Cien Agron. 2017;(30):30-36.

23. Prado RM, Caione G, Campos CN. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. App Environ Soil Sci. 2013;(2013):1-8.

24. España-Gamboa EI, Mijangos-Cortes JO, Hernandez-Zarate G, Maldonado JA, Alzate-Gaviria LM. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. Biotechnol Biofuels. 2012;5(1):82.

25. de Resende AS, Santos A, Xavier RP, Coelho CH, Gondim A, Oliveira OC. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. Rev Bras Cien Solo. 2006;30(6):937-41.

26. García A, Rojas C. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Tecnicaña. 2006;10(17):3-13.

27. Bautista-Zúniga F, Durán-De Bazúa C, Lozano R. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. Rev Intern Cont Am. 2000;16(3):89-101.

28. da Silva A, Rossetto R, Bombecini J, Piemonte M, Muraoka T. Nitrogen Mineralization from Sugarcane Vinasse. J Plant Nut. 2014;37(8):1227-36.

29. Christofoletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JF, Fontanetti CS. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. Waste Manag. 2013;33(12):2752-61.

30. Chang R. Fisicoquímica; con aplicaciones a sistemas biológicos. México, Compañía Editorial Continental; 1986.

31. Doran D. Guía para la evaluación de calidad y salud del suelo. EUA: USDA; 1999.

32. del Pino Machado A, Hernández Legnazzi J, Casanova O, Takata V, Cejas V, Panissa G. Efecto de la vinaza sobre las propiedades del suelo y la nutrición del cultivo de caña de azúcar. En: Congreso Lationoamericano de Ciencias del Suelo; 2019 Octubre 7-11; Montevideo, Uruguay.

33. Chaves M. El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. San José, Costa Rica. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar; 1999.

34. Lezcano P, Mora P. Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para evitarlo. La Habana, Cuba. Instituto de Ciencia Animal, Editorial Científico Técnica, 2006;(15):02-17.

35. Armengol J, Lorenzo R, Fernández N. Utilización de la vinaza como enmienda orgánica y su influencia en las propiedades químicas de vertisoles y en los rendimientos de la caña de azúcar. Cult Trop. 2003;24(3):67-71.

36. Takata V, del Pino A, Hernández J. Utilización de la vinaza como fuente de K para el cueltivo de caña de azúcar (sin publicar).

37. Marstorp H. Influence of soluble carbohydrates, free amino acids, and protein content on the decomposition of Lolium multiflorum shoots. Bio Fert Soils. 1996;21(4):257-63.

38. Oades JM. An introduction to organic matter in mineral soils. Min Soil Environ. 1989:89-159.

39. Huang PM, Wang MK, Chiu CY. Soil mineral–organic matter–microbe interactions: impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. Pedobiologia. 2005;49(6):609-35.

40. Lavelle P, Blanchart E, Martin A, Martin S, Spain A. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. Biotropica. 1993:130-50.

41. Kruse JS, Kissel DE, Cabrera ML. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues. Nut Cyc Agroeco. 2004;69(3):247-56.

42. Frioni L. Microbiología básica, ambiental y agrícola. Universidad de la República-Facultad de Agronomía; 2006.

43. Fuess LT, Garcia ML. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. J Environ Manag. 2014;145:210-29.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los experimentos realizados para llevar a cabo esta tesis, se utilizaron suelos con una historia agrícola relevante con más de 40 años de agricultura continua y sucesivos laboreos que comprometen la estructura del suelo, fomentan la mineralización de materia orgánica y la pérdida de nutrientes por extracción del cultivo. La caña de azúcar es un monocultivo, semi perene que produce gran cantidad de biomasa aérea, con un potencial de producción de hasta 100 t ha^{-1} en base fresca según el tipo de suelo (Pérez, 2014). Para su óptimo desarrollo y debido a su fisiología, ésta especie debe generar una gran movilización de agua y nutrientes desde el suelo (Coale et al., 1993). La extracción de nutrientes por parte de la caña depende de factores internos y externos que están asociados a la producción de biomasa. En términos generales, la planta extrae en grandes proporciones N, K y en menor medida P (Chaves, 1999; Lazcano, 1999). Para satisfacer esta demanda nutricional, el cultivo es fertilizado con fertilizantes comerciales y/o regado con vinaza. Las características fisicoquímicas de la vinaza como bajo contenido de sólidos, pH ligeramente ácido, alta CE, alto contenido de N y cationes (Ca, Mg y especialmente K) y su baja concentración de P en relación con N y K, hacen que sea un material apropiado para su utilización como biofertilizante (Christofoletti et al., 2013; España-Gamboa et al., 2012; Oliveira et al., 2010). La relación C/N de la vinaza es 15 lo que indica que es un residuo lábil y que su mineralización será rápida.

Durante los primeros meses de brotación, la caña de azúcar absorbe más N del que utilizará para su crecimiento. El N absorbido, es almacenado para cumplir con las exigencias en la fase de crecimiento. En dicha etapa, cuando la capacidad de absorber N del suelo es limitada, la planta remueve N de los puntos de activo crecimiento, lo cual colabora en no comprometer el crecimiento de la caña (Pérez, 2014). En este sentido y para los suelos utilizados en el experimento, en función del N aportado por la aplicación de vinaza como biofertilizante, se observó que en todos los suelos hubo mineralización en el período evaluado (180 días). La mineralización para los suelos V11, BV3 y C3 varió entre 14 y 64%, para el suelo S3 la mineralización fue baja con un máximo de 14%, mientras que en el suelo S4 la mineralización fue muy alta (más de 100%) en comparación con los demás suelos lo que se atribuye a un efecto priming debido a un crecimiento acelerado de los microorganismos del suelo que consumieron el N aportado por la vinaza y parte de N de la MO estabilizada del suelo. Aunque

para la mayor parte de los suelos y tratamientos utilizados en el experimento, la mineralización de la vinaza no fue completa, estos resultados muestran que la vinaza tiene un potencial aporte de N en la primera etapa de crecimiento. Los resultados preliminares observados en el suelo S4, que nunca había recibido vinaza y mostró un comportamiento diferente a los demás, promoviendo un efecto priming, sugiere la necesidad de estudiar más a fondo el efecto de la vinaza en suelos que no presentan la microbiota adaptada para la degradación de este material.

Por otra parte, el N aplicado con la vinaza al inicio del experimento se encontraba en formas amoniacales pasando luego a formas nítricas a lo largo de la incubación. Este hecho demuestra la presencia de N fácilmente disponible que, al ser aplicado al suelo, probablemente tendrá un efecto inmediato para la nutrición del cultivo. Sin embargo, dadas las dosis de N aplicadas con la vinaza equivalentes a 83, 166 y 249 kg N ha^{-1} y los resultados obtenidos, se concluye que debe complementarse la aplicación de vinaza con fertilizaciones químicas que cubran las necesidades del cultivo ya que la mineralización en 180 días no fue completa.

Debido a la intensa actividad microbiana (elevadas tasas de respiración) observada en los primeros días de incubación, la vinaza demostró ser un sustrato muy lábil. Hasta el día 20, se observaron diferencias significativas en la tasa de liberación de C-CO_2 de los suelos, con un efecto lineal de la dosis de vinaza. Luego, el desprendimiento de C-CO_2 disminuyó, esto coincide con lo reportado por (Fuess y Garcia, 2014). Estos autores reportan una acumulación de MO a largo plazo en suelos que recibieron vinaza. Estos resultados se relacionan con la calidad de los suelos en relación con el contenido de MO inicial y al agregado de vinaza. Los suelos V11 y BV3 presentaron mayor mineralización basal y mayor actividad microbiana.

Aunque el N es importante para la nutrición de la caña, el K es el nutriente que se extrae en mayor cantidad, en donde se han registrado extracciones superando los 800 kg K ha^{-1}. Dado que el K cumple un rol fundamental en la fotosíntesis, en la acumulación de sacarosa, en la apertura y cierre estomático, en la respiración y en la translocación de azucares (Dotaniya et al., 2016)., las plantas que presentan insuficiencia de K se ven afectadas no solo en su rendimiento, sino en la calidad del producto final. En otro extremo, el consumo de lujo de K puede producir efectos negativos a nivel industrial, ya que afecta el proceso de cristalización del azúcar (De Resende et al., 2006).

Por sus características químicas, en el pool de K en el suelo coexisten distintas formas químicas que se encuentran en equilibrio dinámico, el cual es modificado por las entradas y salidas de K del sistema suelo planta. Las formas más rápidamente asimilables por las plantas componen las fracciones K en solución y K intercambiable. En cambio, el K no intercambiable es lentamente liberado hacia las formas antes mencionadas. La caña absorbe K de forma iónica de la solución del suelo, la reposición de éste depende de la mineralogía de la fracción arcilla. En este sentido, la influencia del material parental y la textura del suelo cumple un rol determinante sobre la disponibilidad de K para los cultivos (Trolove y North, 2010). Los suelos utilizados en el experimento son contrastantes en sus características fisicoquímicas, los suelos V11 y BV3 presentan textura fina con más de 30% de arcilla, mientras que los suelos S3 y S4 presentan textura intermedia, siendo el suelo C3 arenoso (80% arena). Los suelos BV3, S3 y S4 contienen montmorillonita como mineral dominante, mientras que el suelo V11 en su composición mineralógica contiene como minerales dominantes montmorillonita-illita y el suelo C3 montmorillonita-caolinita.

Para todos los suelos, tanto a los 14 días como a los 180 días de incubación, el K en solución, intercambiable y no intercambiable mostraron un comportamiento lineal en relación con la dosis de K agregado con la vinaza. Estos resultados indican un aporte importante de K proveniente de la vinaza al suelo. Para todos los suelos, el aumento en las distintas fracciones de K fue proporcional a la dosis de vinaza. Para el resto de los cationes evaluados Ca, Mg y Na, solo se observaron aumentos en la fracción en solución no así en la intercambiable.

El suelo arenoso C3, mostró mayor concentración de K en solución en relación con la dosis de vinaza. Este resultado concuerda con la literatura y se relaciona con la textura arenosa del suelo. Mientras el suelo BV3 con mayor contenido de arcilla fue el que presentó menores concentraciones de K en solución. Estos resultados muestran que los suelos con mayor disponibilidad inmediata de K son los de texturas gruesas.

En relación con el K intercambiable, los suelos BV3 y V11 presentaron los mayores niveles con respecto a los demás suelos, en todas las dosis y en ambos momentos de muestreo. Estos resultados coindicen con el alto contenido de arcilla de estos suelos. En contraposición, el suelo C3 con menor contenido de arcilla fue el que presentó los menores niveles de K intercambiable.

Los suelos S3 y S4 con contenidos medios de arcilla se comportaron de forma intermedia. A los 180 días, en los suelos V11, BV3 y S4 se observó una disminución del K intercambiable con respecto al inicio de la incubación. En el caso del suelo V11, aunque presentó aumentos en el K en solución, la disminución del K intercambiable en el periodo podría atribuirse a la fijación en minerales arcillosos por presentar como minerales dominantes montmorillonita-illita. Sin embargo, el K no intercambiable mostró la misma tendencia que el K intercambiable en donde se observó una disminución del K no intercambiable en el periodo. Este hecho indicaría que no hubo fijación de K en los minerales arcillosos, o bien que el K que se fijó inicialmente fue liberado.

La relación entre el K no intercambiable (TPhB) y el K intercambiable (AA) fue lineal para ambos momentos de muestreo con un buen ajuste (R^2 > 0,94). Los coeficientes del modelo lineal ajustado (todos los suelos) fueron de 1,18 y 1,14 para el inicio y final de la incubación. Estos resultados indican que el extractante utilizado para determinar el K no intercambiable (TPhB) solo extrae una pequeña porción del mismo, estos resultados muestran una menor extracción con lo reportado para suelos agrícolas del Uruguay (Ferrando et al., 2020). Los suelos que presentaron las mayores concentraciones de K no intercambiable fueron el BV3 y V11, para todas las dosis y en ambos momentos de muestreo, con respecto a los demás suelos, lo que indica una mayor capacidad de retención de K debido a su composición mineralógica. Sin embargo, al ajustarse las relaciones K no intercambiable y K intercambiable para cada suelo, se observó que los suelos V11 y S4 aumentaron la disponibilidad de K no intercambiable al final de la incubación, esto podría tratarse de K fijado en minerales arcillosos interestratificados o en illita para el caso del suelo V11.

La relación entre el K intercambiable y el K en solución en ambos muestreos se ajustó con un modelo exponencial. La relación entre la disponibilidad de K inmediata (K en solución) y la capacidad del suelo para reponerlo a partir de formas intercambiables fue diferente para los distintos suelos, aunque para todos los suelos la dosis de K aplicado con la vinaza influyó en el aumento en la concentración de K en solución. Las diferencias entre suelos se deben al contenido de arcilla de estos y a la fuerza de retención del K. Cuando el contenido de arcillas es bajo como en el suelo C3, el equilibrio se desplaza hacia la solución mientras que cuando el contenido de arcillas es mayor como en el suelo BV3 el equilibrio se desplaza hacia formas

intercambiables. Agronómicamente, los suelos con mayor capacidad buffer, es decir mayor contenido de arcilla, serán los que mantendrán mayores niveles de K intercambiable y por tanto mantendrán la oferta de K para los cultivos por un periodo más prolongado que los suelos de texturas arenosas (Rabuffetti, 2017).

En cuanto al P disponible en el suelo, no hubo efecto de vinaza con respecto al testigo entre tratamientos en ninguno de los muestreos, mientras que entre suelos se observaron diferencias significativas que se debieron al P inicial de los mismos. Aunque el aporte de P de la vinaza es muy bajo en relación con otros nutrientes, los grandes volúmenes aplicados de vinaza podrían elevar la concentración de P en el suelo a lo largo del tiempo, que puede ser pasible de perderse y conformar una potencial fuente de contaminación de los cursos de agua. Desde el punto de vista agronómico, este nutriente debe ser particularmente monitoreado para evitar o disminuir salida del sistema como fuente de contaminación hídrica.

Aunque el pH de la vinaza es ligeramente ácido, su utilización no produjo cambios en el pH de los suelos. La vinaza presenta una alta concentración de sales que se puede observar en la elevada CE (7,75 dS m^{-1}). Es por ello que en las incubaciones se observó un efecto de la vinaza sobre la CE de los suelos del experimento que se puede explicar por la acumulación de sales en las bandejas de incubación que no permitían el lavado de las mismas, ni la absorción por cultivos. Las diferencias observadas entre los suelos se deben a la capacidad buffer de los mismos. Los suelos BV3, S3 y S4 presentaron un escaso aumento de CE con respecto al testigo, mientras que en los suelos V11 y C3 presentaron aumentos de 4 y 6 veces más con el agregado de vinaza. De acuerdo con estos resultados relacionados a la CE, los suelos BV3, S3 y S4 podrían recibir mayores dosis de vinaza y con más frecuencia que los suelos V11 y C3. De todas maneras, debe evaluarse la CE en condiciones comerciales en donde se puedan expresar las condiciones de lixiviación y/o absorción por el cultivo y tener en cuenta el tipo de suelo, contenido de arcilla y presencia o ausencia de un horizonte textural.

Si bien no hubo efecto de la vinaza en los cationes intercambiables Ca, Mg y Na, se observó un leve aumento de los mismos con el agregado de este material. Esto fue evidenciado en los suelos BV3, S3 y S4 que presentaban relaciones Ca/K por encima del límite de 25 propuesto por (Bertsch, 1987). Esta relación limita la disponibilidad de K por competencia con Ca. Sin

embargo, cuando el suelo fue mezclado con vinaza y debido al gran aporte de K presente en la misma, las relaciones se mostraron en el rango considerado adecuado para el suministro de K a las plantas. La vinaza aumentó los niveles de K intercambiable pero no tuvo efecto importante en los niveles de Ca. Este hecho indica que el uso de vinaza corrige y favorece a las relaciones catiónicas. Sin embargo, este es un aspecto que debe monitorearse ya que el uso prolongado de vinaza como enmienda puede provocar un desbalance nutricional por exceso de K, impidiendo la absorción otros nutrientes.

Como consideraciones finales, la vinaza es un material que presenta remarcables condiciones para utilizarse como enmienda orgánica. Aporta nutrientes, esencialmente N y K, fomenta la acumulación de MO a largo plazo y no afecta el pH del suelo. Sin embargo, aunque el aporte de P de la vinaza es bajo, un inadecuado manejo de este residuo provocaría una afectación de los recursos hídricos. El área óptima para el cultivo de caña está restringida al norte de país. Actualmente, la vinaza producida en el Ingenio Azucarero es utilizada casi exclusivamente en caña de azúcar, pero dadas las bondades de dicha enmienda y considerando que la producción de etanol puede aumentar y por ende la de vinaza, sería necesario continuar la investigación en otros suelos y con otros cultivos, además de profundizar los estudios en condiciones de producción de caña, ya que conocer el comportamiento de los suelos y cultivos puede favorecer la toma de decisiones en cuanto a dosis, momento y número de aplicaciones a utilizar. Por otra parte, se debe poner énfasis en futuras investigaciones en los cambios a largo plazo de la aplicación de vinaza al suelo dados los resultados contrastantes entre los suelos S3 y S4 que son similares en sus características fisicoquímicas pero que arrojaron resultados opuestos.

Este trabajo pretende colaborar en la generación de investigación y conocimientos a nivel local, aportando información para los programas de fertilización con vinaza con un manejo sostenible de los recursos naturales, promoviendo el uso racional de subproductos agroindustriales.

5. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones particulares de incubación de suelo con vinaza a temperatura y humedad controladas, y ausencia de plantas, se concluye que la aplicación de vinaza en los suelos del experimento produjo aumentos significativos en cuanto a la disponibilidad de K, directamente relacionado con la dosis de vinaza, cuyo efecto es apreciable a los 14 días de aplicación. No se registraron diferencias significativas en los demás cationes intercambiables (Ca, Mg y Na) según el tratamiento con vinaza, aunque sí hubo diferencias entre suelos. Tampoco hubo cambios en otras propiedades del suelo como pH y P disponible.

Todas las formas de K evaluadas (solución, intercambiable y no intercambiable) presentaron una relación lineal con la dosis de vinaza. Mientras que la relación entre el K intercambiable y el K en solución se ajustaron con un modelo exponencial en donde se observa que los suelos mayormente arenosos presentan mayores concentraciones de K en solución respecto a los que contienen mayores tenores de arcilla. Sería conveniente realizar experimentos con caña, y evaluar el efecto del consumo de lujo de K contemplando posibles efectos en el proceso de industrialización.

La vinaza como otros materiales orgánicos, aporta nutrientes y aumenta la actividad biológica de los suelos agrícolas. Se observaron aumentos lineales con la dosis de vinaza en las tasas de respiración. A partir del día 20 estas diferencias se hacen mínimas entre los tratamientos, indicando que el material es de fácil descomposición.

La mineralización de N, tomando en cuenta el acumulado de N y la dosis de vinaza utilizada, demostró que 180 días de incubación no fueron suficientes para la liberación total de este elemento contenido en la vinaza.

6. BIBLIOGRAFÍA

Barbazán M, del Pino A, Moltini C, Hernández J, Rodríguez J. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. Agrociencia Uruguay 15: 82 - 92.

Bengtsson G, Bengtson P, Månsson KF. 2003. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. Soil Biology and Biochemistry 35: 143 - 154.

Bernal M, Navarro A, Sanchez-Monedero M, Roig A, Cegarra J. 1998. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. Soil Biology and Biochemistry 30: 305 - 313.

Bertsch F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica.

Bokhtiar S, Paul G, Rashid M, Mafizur Rahman A. 2001. Effect of press mud and inorganic nitrogen on soil fertility and yield of sugarcane grown in High Ganges River Floodplain soils of Bangladesh. Indian Sugar 51: 235 - 241.

Bolio-López GI, Salgado-García S, Palma-López DJ, Lagunes-Espinoza LdC, Castelán-Estrada M, Etchevers-Barra JD. 2008. Dinámica del potasio en vertisoles y fluvisoles cultivados con caña de azúcar. Terra Latinoamericana 26: 253 - 263.

Chaves M. 1999. El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. En: Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. San José, Costa Rica. Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar.

Chaves M. 1985. Las vinazas en la fertilización de la caña de azúcar. El Agricultor Costarricense 43: 59 - 61.

Christofoletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JF, Fontanetti CS. 2013. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. Waste Management 33: 2752 - 2761.

Coale F, Sanchez C, Izuno F, Bottcher A. 1993. Nutrient accumulation and removal by sugarcane grown on Everglades Histosols. Agronomy Journal 85: 310 - 315.

Crisostomo S, Ferrera R, Zebrowski C. 1992. Respiración microbiana como un indicador de la fertilidad de los suelos agrícolas y tepetates en el estado de Tlaxcala. Terra 10: 425 - 429.

da Silva MAS, Kliemann HJ, De-Campos AB, Madari BE, Borges JD, Gonçalves JM. 2013. Effects of vinasse irrigation on effluent ionic concentration in Brazilian Oxisols. African Journal of Agricultural Research 8(45): 5663-5671.

Dar G. 1997. Impact of lead and sewage sludge on soil microbial biomass and carbon and nitrogen mineralization. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 58: 234 - 240.

de Resende AS, Santos A, Xavier RP, Coelho CH, Gondim A, Oliveira OC, Alves BJR, Boddey RM, Urquiaga S. 2006. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. Revista Brasileira de Ciência do Solo 30: 937 - 941.

del Pino A, Casanova O, Hernández J, Takata V, Panissa G. 2017. Efecto de la aplicación de vinaza en suelos bajo cultivo de caña de azucar. Ciencias Agronómicas 30: 30 - 36.

Dodd R, McDowell R, Condron L. 2013. Changes in soil phosphorus availability and potential phosphorus loss following cessation of phosphorus fertiliser inputs. Soil Research 51: 427 - 436.

Dotaniya ML, Datta SC, Biswas DR, Dotaniya CK, Meena BL, Rajendiran S, Regar KL, Lata M. 2016. Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture 5: 185 - 194.

España-Gamboa EI, Mijangos-Cortes JO, Hernandez-Zarate G, Maldonado JA, Alzate-Gaviria LM. 2012. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. Biotechnol Biofuels 5: 82 - 91.

Ferrando MG, Barbazán MM, García FO, Mallarino AP. 2020. Comparison of the ammonium acetate, Mehlich 3, and sodium tetraphenylboron as extractants to evaluate crop available potassium. Communications in Soil Science and Plant Analysis 51: 997 - 1005.

Ford I. 1998. Introducción a la argilología. Montevideo - Uruguay. Facultad de Agronomía. 155.

Fortuna A, Harwood R, Kizilkaya K, Paul E. 2003. Optimizing nutrient availability and potential carbon sequestration in an agroecosystem. Soil Biology and Biochemistry 35: 1005 - 1013.

Fuess LT, Garcia ML. 2014. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. Journal of Environmental Management 145: 210 - 229.

García A, Rojas C. 2006. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Nota Técnica Tecnicaña 10: 3 - 13.

Gómez JM. 2011. Efecto de la vinaza sobre el contenido de potasio intercambiable en un suelo representativo del área cañera del Valle del Río Turbio. Venesuelos 3: 69 - 72.

González S. 2007. Contaminación difusa de las aguas continentales. Uso de Biofiltros para mejorar la calidad del agua de riego. Santiago de Chile. En: Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 10 - 17.

Grigatti M, Barbanti L, Ciavatta C. 2010. Soil respiration and nitrogen mineralization kinetics of compost and vinasse fertilized soil in an aerobic liquid-based incubation. Environmental Engineering Science 27: 65 - 73.

Hernández J, Casanova O, Zamalvide JP. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. Boletín de investigación N° 19. 20.

Hipp B, Thomas G. 1967. Influence of soil clay type on potassium availability. Texas, Estados Unidos. Texas Agricultural Experiment Station Bulletin MP - 829.

Lazcano I. 1999. El potasio... escencial para un buen rendimiento en la cańa de azúcar. Instituto de la potasa y el fósforo. Informaciones Agronómicas N° 35.

Lezcano P, Mora P. 2006. Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para evitarlo. La Habana, Cuba. Instituto de Ciencia Animal, Editorial Científico Técnica 15: 02 - 17.

Marstorp H. 1996. Influence of soluble carbohydrates, free amino acids, and protein content on the decomposition of Lolium multiflorum shoots. Biology and Fertility of Soils 21: 257 - 263.

Mazzilli SR, Kemanian AR, Ernst OR, Jackson RB, Piñeiro G. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. Soil Biology and Biochemistry 75: 273 - 281.

Oliveira E, Freire FJ, Oliveira R, Freire M, Simões Neto DE, Silva S. 2010. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. Revista Brasileira de Ciência do Solo 34: 1343 - 1352.

Ortegon GP, Arboleda FM, Candela L, Tamoh K, Valdes-Abellan J. 2016. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). Science of the Total Environment 539: 410 - 419.

Parnaudeau V, Condom N, Oliver R, Cazevieille P, Recous S. 2008. Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. Bioresource Technology 99: 1553 - 1562.

Pérez F. 2014. Caña de azúcar. En: Echeverría HE, García FO. 2005. Fertilidad de suelo y fertilización de cultivos. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. 609 - 630.

Pérez H, Santana I, Rodríguez I. 2013. Manejo sostenible de tierras en la producción de caña de azúcar. Machala, Ecuador. Edición: Grupo azucarero AZCUBA Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar.

Prado RM, Caione G, Campos CNS. 2013. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. Applied and Environmental Soil Science 2013: 1 - 8.

Rabuffetti A. 2017. Potasio. En: La fertilidad del suelo y su manejo. Montevideo, Uruguay. Editorial Hemisferio Sur. Tomo 2: 515 - 571.

Rodrigues CE, Hu B. 2017. Vinasse from sugarcane ethanol production: better treatment or better utilization?. Frontiers in Energy Research 5: 7.

Sattolo TM, Mariano E, Boschiero BN, Otto R. 2017. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by land use change and successive nitrogen fertilization of sugarcane. Agriculture, Ecosystems & Environment 247: 63-74.

Trolove S, North H. 2010. Predicting the potassium requirements of crops. Agronomy New Zealand 40: 65 - 79.

Uruguay. Poder Legislativo. 2007. Ley N° 18195. Fomento y Regulación de la Producción, Comercialización y Utilización de Agrocombustibles [En línea]. Consultado 1 de setiembre de 2020. Disponible en: https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18195-2007/19

Uruguay. Poder Legislativo. 1979. Decreto N° 253/979. Medio Ambiente. Ecología. Recursos Naturales. Recursos Hídricos. Prevención de Contaminación de las Agua [En línea]. Consultado 1 de setiembre de 2020. Disponible en: https://www.impo.com.uy/bases/decretos/253-1979/19