

Implicaciones ambientales de la disposición de vinaza en el suelo

Environmental implications of the disposal of vinasse on the soil

Jhoan Sebastian Marín Agudelo¹
sebas8893@gmail.com

Mauro Sebastian Ochoa Hermida¹
maseohe@gmail.com

Jorge Antonio Silva Leal²
Jorge.silva04@usc.edu.co

(1) Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de [Especialización en Control de la Contaminación Ambiental]

(2) Profesor titular, director de trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Santiago de Cali

Resumen

Una de las estrategias para hacer frente al cambio climático consiste en disminuir la dependencia hacia los combustibles fósiles, siendo el bioetanol una alternativa usada para reducir este consumo. La creciente demanda por este alcohol carburante motivó a la industria cañera a producir bioetanol a base de caña de azúcar. Con el aumento en la producción de bioetanol también se incrementó la generación de vinaza, que es un residuo líquido asociado al proceso de destilación de caña de azúcar. El alto contenido de materia orgánica presente en la vinaza ha motivado que la industria cañera la use como fertilizante. Este artículo de revisión bibliográfica describe las características fisicoquímicas y biológicas de la vinaza, los impactos ambientales derivados de la disposición de ésta en el suelo y los esfuerzos realizados por algunos países para regular su uso. Se identificó que el uso de vinaza en la industria cañera aumenta el rendimiento de los cultivos de caña de azúcar; sin embargo, la disposición inadecuada de vinaza puede generar acidificación, salinización y sodificación del suelo, aumento de las concentraciones de DBO, DQO y SST en el agua y disminución del oxígeno disuelto en cuerpos de agua superficial. Se observó que existen normas internacionales que regulan las características fisicoquímicas de la vinaza, siendo Cuba el país que regula un mayor número de parámetros; en Colombia el marco regulatorio es más flexible.

Palabras Clave: vinaza, fertirrigación, impactos ambientales.

Abstract

One of the strategies to deal with climate change is to reduce dependence on fossil fuels, bioethanol being an alternative used to reduce this consumption. The growing demand for this fuel alcohol motivated the sugarcane industry to produce sugarcane-based bioethanol. With the increase in the production of bioethanol, the generation of vinasse also increased, which is a liquid residue associated with the sugarcane distillation process. The high content of organic matter present in vinasse has motivated the sugarcane industry to use it as a fertilizer. This bibliographic review article describes the physicochemical and biological characteristics of vinasse, the environmental impacts derived from its disposal in the soil, and the efforts made by some countries for its regular use. It was identified that the use of vinasse in the sugarcane industry increases the yield of sugarcane crops; however, the inadequate disposal of vinasse can generate acidification, salinization and sodification of the soil, increase in the concentrations of BOD, COD and TSS in the water and decrease in dissolved oxygen in bodies of surface water. It is ruled out that there are international standards that regulate the physicochemical characteristics of vinasse, with Cuba being the country that regulates a greater number of parameters; in Colombia the regulatory framework is more flexible.

Keywords: vinasse, fertirrigation, environmental impacts.

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por los efectos del cambio climático y consecuente degradación ambiental han instado a la industria automotriz a reducir su dependencia hacia los combustibles fósiles, por esta razón se ha fomentado el uso de bioetanol como fuente de combustible. En consecuencia, la creciente demanda de bioetanol ha impulsado a otras industrias a incursionar en la producción de este alcohol carburante, como lo es el caso de la industria cañera (González et al., 2019).

En la industria cañera se obtiene bioetanol a partir de la destilación de caña de azúcar, bagazo y otros residuos de cosecha (Christofolletti et al., 2013; González et al., 2019; Marinho et al., 2014). De este proceso se obtiene subproducto denominado vinaza, que es un residuo líquido de color oscuro compuesto en un 93% de agua y un 7% de sólidos orgánicos y minerales (Christofolletti et al., 2013).

La vinaza se caracteriza por su alto contenido de materia orgánica, lo que la constituye en un interesante insumo para la industria agrícola (González et al., 2019). De hecho, la fertirrigación con vinaza de caña de azúcar es una práctica difundida en la industria cañera, ya que permite reducir la dependencia hacia la fertilización mineral, a la vez que se aumentan los rendimientos de los cultivos (Christofolletti et al., 2013).

Frente a lo anterior, se han demostrado que la práctica de disponer vinaza en el suelo para mejorar los rendimientos de los cultivos puede modificar negativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los recursos suelo y agua. (Valeiro & Portocarrero, 2017). Por esta razón, países como Cuba, Colombia, Brasil Argentina, México Estados Unidos ha legislado entorno las industrias generadoras de vinaza.

Teniendo en cuenta el progresivo uso de vinaza como fertilizante y la importancia de identificar sus beneficios e impactos negativos, en este artículo de revisión bibliográfica se describieron las características fisicoquímicas y biológicas de las vinazas, los impactos ambientales derivados de la disposición de éstas en el suelo y los esfuerzos realizados por algunos países para su regulación

2. CARACTERÍSTICAS Y USOS DE LA VINAZA

2.1. Producción de bioetanol y vinaza

En la industria cañera se obtiene bioetanol a partir de la destilación de caña de azúcar, bagazo y otros residuos de cosecha (Christofolletti et al., 2013; González et al., 2019; Marinho et al., 2014). Del proceso de destilado también se genera un subproducto denominado vinaza, que es un residuo líquido de color oscuro compuesto en un 93% de agua y un 7% de sólidos orgánicos y minerales (Christofolletti et al., 2013). Algunas investigaciones concluyen que por cada litro de bioetanol se pueden producir entre 1 y 15 litros de vinaza (Fuess & Garcia, 2014; González et al., 2019; Hoarau et al., 2018; Ibarra Camacho et al., 2019; Ortegón et al., 2016).

En el año 2021 se produjeron aproximadamente 126 Mm³ de bioetanol a nivel mundial. Los principales países productores de bioetanol aportaron cerca del 92,2%; Estados Unidos ocupó el primer lugar con el 46,7 % del total de la producción, seguido por Brasil con el 26,3%, China con el 8,4%, la Unión Europea con el 4,9%, India con el 2,9%, Canadá con el 1,6% y Tailandia con el 1,4%. El 8,8 % restante fue producido por países como Argentina, Paraguay indonesia y Colombia, entre otros (ODCE - FAO, 2022). En el mismo informe se estableció que para el año 2031 la producción mundial de bioetanol ascendería hasta los 140Mm³. En el caso de Colombia, la producción de bioetanol inició en el año 2005 con un total de 0,027 Mm³, y en el año 2021 aumentó a 0,39 Mm³. Finalmente, hasta el mes de agosto de año 2022 se registró una producción total de bioetanol de 0,29 Mm³ (ASOCAÑA, 2022).

Con respecto a la producción de vinaza, a nivel mundial se estimó que para el año 2021 se produjeron 1.890 Mm³, y se espera que para el año 2031 este valor alcance los 2.100 Mm³. Para Colombia se generaron 0,4Mm³ de vinaza en el año 2005 y 5,9 -Mm³ en el año 2021; y a al mes de agosto de 2022 se han producido 3,4 Mm³.

2.2. Características de la vinaza

La vinaza presenta valores ácidos de pH (entre 3,9 y 5,1) y altas concentraciones de DQO (13.380 mg/L - 601.832mg/L), Demanda Biológica de Oxígeno - DBO (5.046 mg/L – 96.000 mg/L), materia orgánica (17.000 mg/L) y sólidos totales (en promedio de 50.000 mg/L). En la vinaza también se encuentran metales pesados como: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb), níquel (Ni), bario (Ba), zinc (Zn), además de otros compuestos como: fósforo (P), nitrógeno (N), carbono (C) y potasio (K) (Cerón et al., 2013; Christofolletti et al., 2013a; Fuess et al., 2021a; González et al., 2019; Hernández et al., 2008; Hoarau et al., 2018a; Marinho et al., 2014a; Moran-Salazar et al., 2016; Ortegón et al., 2016a). La Tabla 1 resume la composición fisicoquímica de la vinaza reportadas en diferentes estudios científicos.

Tabla 1. Características fisicoquímicas de la vinaza de caña de azúcar

Caracterización fisicoquímica de la vinaza de caña de azúcar							
Parámetros	Unidades	A	B	C	D	E	F
pH	UND	4,3	3,9	3,9	3,98 - 5,1	3,9 - 4,3	4,38
Kjeldahl N	mg/kg	600	-	267	39 - 10247	1660 - 4200	153,4
P	mg/L	60	190	1,3	87 - 297	220 - 330	-
K	mg/L	4000	2056	2056	4698 - 46950	9600 - 17470	2010,6
DBO	mg/L	-	5046	5046	-	46100 - 9600	3070
DQO	mg O/L	-	13380	13380	170757 - 601832	104000 - 134400	7368
Materia Orgánica	mg/L	17000	-	-	-	-	-
Conductividad Eléctrica	Us/cm	2800	-	13540	14350 - 64099	-	-
S	mg/L	-	710	710	8901 - 35670	324000 - 342000	1087
Ca	mg/L	1200	719	719	879 - 10133	-	439,8
Dureza	mg CaCo3/L	-	2493	2493	7498 - 50667	-	-
As	mg/L	-	-	< 0,04	-	-	-
Ba	mg/L	-	0,41	0,41	-	0,41	-
Cd	mg/L	-	-	< 0,003	-	-	-
Cr	mg/L	-	0,04	0,04	50,6	0,04	-
Cu	mg/L	-	0,35	0,35	-	0,35	-
Pb	mg/L	-	-	< 0,03	-	-	-
Hg	mg/L	-	0,0019	0,0019	-	0,0019	-
Ni	mg/L	-	0,03	0,03	-	0,03	-
Na	mg/L	-	50,2	50,2	90,7 - 1671	-	10,6
Zn	mg/L	-	1,66	1,66	-	1,66	-

Fuente: A: Adaptado de (Hernandez et al., 2008); B: Adaptado de (Christofolletti et al., 2013); C: Adaptado de (Marinho et al., 2014); D: Adaptado de (Ortegón et al., 2016); E: Adaptado de (Hoarau et al., 2018); F: Adaptado de (Fuess et al., 2021).

Como se observa en la tabla anterior las vinazas presentan altos niveles de materia orgánica representada en altos niveles de DQO y DBO. Adicionalmente, se observa que su potencial para la agricultura es importante dado que presenta niveles de nutriente como N, P y K altos. Sin embargo, la presencia de minerales y metales pesados puede limitar su aprovechamiento.

2.3. Usos de la vinaza

La vinaza es un residuo con el potencial de ser aprovechado. Por sus características fisicoquímicas y biológicas puede ser empleada para fertilizar el suelo, para producir energía e incluso alimentos para animales domésticos. A continuación, se exponen los principales usos de la vinaza:

Fertirrigación: de las posibles alternativas para el aprovechamiento de vinaza, la fertirrigación se ha posicionado como la elección más recurrente. La fertirrigación consiste en la disposición directa de vinaza en el suelo con el fin de mejorar las características fisicoquímicas y biológicas del suelo donde se siembra la caña de azúcar y de este modo aumentar la productividad del cultivo, además de evitar la disposición directa de este residuo en cuerpos de aguas superficiales (Christofoletti et al., 2013; Higuera Vásquez et al., 2020).

Concentración por evaporación: consiste en la remoción de hasta el 97% de la humedad presente en la vinaza (Higuera Vásquez et al., 2020). El material resultante es empleado como insumo en la fabricación de piensos para el ganado y para mejorar la calidad de la vinaza como fertilizante (Christofoletti et al., 2013; Higuera Vásquez et al., 2020). Este material también puede ser incinerado en calderas especiales para obtener energía (Christofoletti et al., 2013).

Alimento para animales: por sus características fisicoquímicas y biológicas, sumado a su abundante disponibilidad, la vinaza se ha perfilado como un potencial alimento para animales. Se ha demostrado que la vinaza contiene aminoácidos esenciales de alto valor nutricional (Scull et al., 2012), también ayuda proteger la mucosa y la flora intestinal en equilibrio, evitando la propagación de patógenos intestinales (Higuera Vásquez et al., 2020).

Producción de energía: al someter la vinaza a un tratamiento de digestión anaerobia se disminuye su carga orgánica y se genera biogás. Este biogás puede emplearse para la producción de energía a bajo costo; se constituye, además, en una alternativa al uso de gas natural dado que posee un poder calorífico similar (después de que el biogás sea depurado). Por lo anterior, utilizar la vinaza para producir energía se ha convertido en una interesante estrategia para la industria, en tanto que permite reducir los costos de operación a la vez que se aprovecha un residuo (Christofoletti et al., 2013).

3. IMPLICACIONES AMBIENTALES DE LA DISPOSICIÓN DE VINAZA EN EL SUELO

La comunidad científica está de acuerdo en que la fertirrigación con vinaza puede modificar positiva o negativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Dichas modificaciones dependen de factores como el volumen de vinaza aplicada, la composición fisicoquímica del suelo y el tipo de cultivo (Valeiro & Portocarrero, 2017).

3.1. Beneficios de la vinaza en la industria cañera

En los últimos años la fertirrigación con vinazas se ha convertido en una práctica recurrente en la industria cañera; y mediante esta práctica se podría prescindir de la fertilización mineral (González et al., 2019). En Brasil desde la década de los 80 se ha difundido la práctica de fertirrigación en los cultivos de caña, permitiendo que los ingenios cañeros reduzcan los costos de inversión inicial y de mantenimiento de los cultivos, a la vez que se aumentan los rendimientos de sus cosechas (Christofoletti et al., 2013). Un estudio realizado en Chiapas – México se evidenció que el uso de vinaza y cachaza en suelos cultivados con caña de azúcar mejoró los niveles de materia orgánica, potasio y fósforo del suelo (Hernández et al., 2008).

La fertirrigación con vinaza permitió a la industria cañera reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento de las tecnologías y procesos asociados a la gestión de este residuo. Por otro lado, contribuyó a disminuir la compra y aplicación de fertilizantes e incrementó la productividad de los cultivos, lo que se tradujo en mayores ingresos para este sector económico (Christofoletti et al., 2013; Fuess & García, 2014).

En un estudio sobre la productividad de los cultivos de caña de azúcar sometidos a fertirrigación con vinaza, se determinó que aplicar dosis de entre 350 m³/ha y 450 m³/ha de vinaza incrementó el rendimiento por hectárea de cultivo en un 25%, la producción de azúcar en un 42,86% y la producción de bioetanol en un 55,55% (Paulino et al., 2002). En la Tabla 2 se resumen los rendimientos de la producción de los cultivos de caña de azúcar a los cuales se les aplicó vinaza.

Tabla 2. Beneficios de la aplicación de vinaza en cultivos de caña de azúcar
Beneficios asociados a la aplicación de vinazas en cultivos de caña de azúcar
(Paulino et al., 2002)

Aspecto evaluado	Con vinaza	Sin vinaza	Mejora
Rendimiento del cultivo	80 T/ha	100 T/ha	25%
Producción de azúcar	14 T/ha	20 T/ha	42,86%
Producción de bioetanol	9 m ³ /ha	14 m ³ /ha	55,55%

Fuente: Adaptado de (Paulino et al., 2002)

En la industria cañera la fertirrigación ha ayudado a reducir la dependencia hacia la fertilización mineral. Se ha determinado que mediante la aplicación de vinaza se disminuye entre un 50% y 80% la adición de potasio y fósforo y hasta en un 25% para nitrógeno (Fuess & Garcia, 2014).

La fertirrigación con vinaza ha permitido disminuir el consumo de agua destinada al riego de cultivos de caña de azúcar. Algunos estudios han evidenciado que por cada hectárea de cultivo donde se aplica vinaza se ahorran hasta 150 m³/año de agua, ya sea superficial o subterránea, lo que contribuye a reducir la presión por demanda hacia este recurso (W. P. da Silva et al., 2014; Fuess & Garcia, 2014) (Silva et al., 2014; Fuess & Garcia, 2014)

3.2. Impactos ambientales de la disposición de vinaza en el suelo

Como impactos positivos en el suelo derivados de la aplicación de vinaza, autores como (da Silva et al., 2007; Fuess & Garcia, 2014; Jiang et al., 2012; Valeiro & Portocarrero, 2017) enumeran los siguientes: 1) un aumento en la capacidad de retención de agua; 2) la potenciación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que mejora la retención y liberación de nutrientes para las plantas, especialmente potasio, calcio y magnesio; 3) mejoramiento de la estructura física de los agregados; 4) el incremento de la actividad biológica.

Por otro lado, la literatura científica referencia algunas alteraciones negativas en las características fisicoquímicas y biológicas del suelo como consecuencia del uso de vinaza. Además, se ha comprobado que también impacta negativamente a los cuerpos de aguas subterráneas y superficiales, además de la fauna y flora presentes en estos (Christofolletti et al., 2013a; Fuess & Garcia, 2014; Gómez & Rodríguez, 2000; Gunkel et al., 2007; Hoarau et al., 2018; Marinho et al., 2014a).

Según Fuess & Garcia (2014), los principales impactos negativos de la disposición de vinaza en el suelo son: 1) la salinización y sodificación, lo que produce inestabilidad del suelo y lixiviación de sales hacia los cuerpos de aguas subterráneas; 2) la sobre carga orgánica, lo que provoca modificaciones en la estructura del suelo (taponamiento de los poros) y la disminución del oxígeno disuelto y consecuente reducción de la actividad biológica, sumado a la generación de malos olores asociados a los procesos de putrefacción; 3) la sobre fertilización del suelo, que está asociada a los procesos de eutrofización en los cuerpos de aguas superficiales; 4) la liberación de metales pesados en el suelo; 5) acidificación del suelo y cuerpos de aguas subterráneas y superficiales; 6) Interferencia en el proceso de fotosíntesis de la flora acuática.

En un estudio realizado en Sevilla – España se destacó un incremento de 7,6% a 15,1% en la salinización y sodificación del suelo (Tejada & Gonzalez, 2006). Por otro lado, en el estado de Uttar Pradesh – India, se encontró un incremento de sodio en el agua subterránea de 36,8 mg/L a 68,8 mg/L (Jain et al., 2005). Adicionalmente, se ha reportado un aumento de 37,8 mg/L a 1.888 mg/L de materia orgánica en el agua subterránea, debido probablemente al exceso de nutrientes en la vinaza que pueden infiltrarse a través del suelo (Mariano et al., 2009).

3.2.1. Impactos ambientales en las propiedades químicas y biológicas del suelo debido a la disposición de vinaza en el suelo

Las poblaciones de microorganismos que habitan el suelo resultan alteradas cuando se les incorpora vinaza en su medio, dado que esta afecta sus procesos de respiración y actividades enzimáticas (Tejada et al., 2007). En ese orden de ideas, la alteración de las poblaciones de microorganismos (disminución de la biomasa microbiana de 57×10^5 a $20,5 \times 10^5$ bacterias en un estudio realizado en Haryana, India) provoca cambios en el suelo asociados con los procesos de descomposición de materia orgánica, nitrificación y desnitrificación, fijación de N_2 disponible en el aire y aumento del pH (Kaushik et al., 2005).

Si bien las plantas se benefician de la vinaza porque contiene metales como el zinc, cobre, magnesio y níquel que son considerados macronutrientes esenciales para sus funciones biológicas, existen otros metales como el mercurio y arsénico que no aportan a dichas funciones; en cambio generan toxicidad en el ambiente. Por ejemplo, se ha evidenciado que los metales pesados presentes en la vinaza pueden acumularse en el suelo hasta el punto de alcanzar concentraciones tóxicas capaces de interferir en las funciones naturales de los ecosistemas (Carpanez et al., 2022).

3.2.2. Impactos ambientales en las propiedades químicas y biológicas del agua debido a la disposición de vinaza en el suelo

La vinaza tiene un alto potencial contaminante (Christofoletti et al., 2013; Gómez & Rodríguez, 2000), es aproximadamente cien veces mayor al de las aguas residuales domésticas. La vinaza contiene una elevada concentración de materia orgánica, esto contribuye a que en las aguas superficiales se reduzcan los niveles de oxígeno disuelto, baje el pH y se incremente la DBO (Christofoletti et al., 2013).

También se ha evidenciado que algunos elementos contenidos en la vinaza pueden lixiviarse e infiltrarse en el suelo hasta alcanzar los cuerpos de aguas subterráneas. En un estudio adelantado por (Cruz et al., 1991) se encontraron trazas de nitrógeno en concentraciones de 0,9 mg/L, valor inferior al límite máximo establecido por la (OMS, 2011) para el agua para consumo humano (50 mg/L).

La vinaza es precursora de procesos de degradación ambiental en ecosistemas acuáticos. En ese orden de ideas, (Christofoletti et al., 2013; Fuess & Garcia, 2014) establecen que la vinaza está directamente relacionada con la eutrofización de cuerpos de aguas superficiales. El alto contenido de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio promueven el crecimiento desmesurado de plantas y microorganismos que al crecer sus poblaciones agotan el oxígeno disuelto en el agua. Como consecuencia, se incrementa la mortalidad de la fauna y flora acuática, aparecen malos olores y se imposibilita la utilización de estos cuerpos de agua como fuentes de abastecimiento para consumo humano (Christofoletti et al., 2013).

Se determinó que la fertirrigación con vinaza en plantaciones de caña de azúcar cercanas al río Ipojuca, al noreste de Brasil, provocó en este afluente un aumento de la temperatura de 29 °C a 31 °C y una disminución del pH de 6,7 a 6, además de un incremento en la turbidez de 40 a 60 UNT y un descenso del oxígeno disuelto de 5,5 mg/L a 2,8 mg/L (Gunkel et al., 2007).

Por otro lado, de acuerdo con (Fuess & Garcia, 2014), los cuerpos de aguas receptores de vinaza se caracterizan por tener un color oscuro y elevada turbidez. Estas características físicas generan interferencias en el proceso de fotosíntesis realizado por las plantas acuáticas, dado que se crea un efecto barrera que impide una óptima penetración de la luz solar.

3.2.3. Impactos a la salud humana como consecuencia de la disposición de vinaza en el suelo

Los metales pesados y algunos compuestos orgánicos como fenoles, hidrocarburos, alcoholes, ácidos y aminoácidos capaces de desencadenar procesos cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos; sin embargo, a pesar de que estos contaminantes están presentes en la vinaza no superan los límites máximos considerados tóxicos para la salud humana

(Carpanez et al., 2022). Pese a esto, (Rebelato et al., 2019) sostiene que es necesario realizar más estudios que permitan correlacionen el potencial tóxico de la vinaza con el deterioro de la salud humana.

4. REGULACIÓN ASOCIADA AL USO DE VINAZA

Dado que la vinaza puede alterar las características fisicoquímicas y biológicas del suelo y de los cuerpos de aguas subterráneas y superficiales, países como Cuba, Colombia, Brasil, Argentina, México y Estados Unidos han optado por regular su uso. En la tabla 3 se presentan los valores máximos permisibles para efluentes industriales relacionados con las industrias de caña de azúcar y de producción de bioetanol y se mencionan los contaminantes más relevantes presentes en la vinaza de acuerdo con las normas establecidas en los países mencionados.

Tabla 3. Legislación aplicable a la disposición de efluentes de industrias generadoras de vinaza

Parámetro	Unidades	Cuba ¹	Colombia ²	Brasil ³	Argentina ⁴	México ⁵	USA ⁶
pH	UND	5,5 - 9	6,0 - 9	5,0 - 9	6,5 - 9	5,0 - 10	6,0 - 9
Temperatura	°C	40	N.A	40	45	N.A	<3
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	30	200	1	35	N.A	50
Sólidos Sedimentables	mg/L	5	2	1	1	N.A	N.A
Grasas y Aceites	mg/L	15	20	N.A	10	15	10
Hidrocarburos Totales	mg/L	5	10	N.A	N.A	N.A	N.A
DBO ₅	mg/L O ₂	30	500	60	30	N.A	50
DQO	mg/L O ₂	75	900	N.A	125	N.A	250
Nitrógeno Total	mg/L	10	Análisis y Reporte	N.A	35	N.A	10
Fosforo Total	mg/L	5	Análisis y Reporte	N.A	5	N.A	2
Coliformes Fecales	mg/L	200	N.A	N.A	1000	N.A	N.A
Aluminio	mg/L	1	N.A	N.A	2	N.A	N.A
Arsénico	mg/L	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	N.A
Cadmio	mg/L	0,05	0,05	0,2	0,1	0,1	N.A
Cianuro Total	mg/L	0,5	N.A	0,2	1	2	N.A
Cobre	mg/L	1	N.A	1	1	4	N.A
Cromo	mg/L	2,5	N.A	5	2	0,5	N.A
Mercurio	mg/L	0,005	N.A	0,01	0,005	0,005	N.A
Plomo	mg/L	0,1	0,2	0,5	0,1	5	N.A
Níquel	mg/L	2	0,5	N.A	2	N.A	N.A
Zinc	mg/L	4	N.A	5	2	10	N.A
Cloruros	mg/L	N.A	500	N.A	N.A	N.A	N.A
Sulfatos	mg/L	N.A	500	N.A	N.A	N.A	N.A

Fuente:

¹ Adaptado de Norma Cubana NC 521 de 2007 de la Oficina Nacional de Normalización. Vertimiento de Aguas Residuales a la zona costera y aguas marinas – especificaciones.

² Adaptado de Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones: producción de caña y derivados a partir de caña de azúcar.

³ Adaptado de Ley 997 de 1976 de la Asamblea Legislativa del Estado de Sao Paulo. Prevé el control de la contaminación ambiental. Decreto 8.468 de 1976 Aprueba el Reglamento de la Ley No. 997, de 31 de mayo de 1976, que dispone para la prevención y control de la contaminación ambiental.

⁴ Adaptado de Resolución 283 de 2019 de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo Argentina. Resolución Presidencia ACUMAR No. 46 de 2017.

⁵ Adaptado de Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

⁶ Adaptado de Clean Water and Cane Sugar Industry. United States Environmental Protection Agency. 1977.

En términos generales, Cuba es el único país que legisla en torno a la disposición de aguas residuales (provenientes de industrias generadoras de vinaza) en zonas costeras y aguas marinas. En comparación a las demás restricciones impuestas por los otros países, Cuba se posiciona como el más restrictivo en lo que respecta a parámetros como la DBO, DQO, coliformes fecales y metales pesados. En contraposición a Cuba, es de resaltar que Estados Unidos no genera ninguna limitación al contenido de metales pesados en los efluentes industriales cañeros.

Se identifica que para cloruros y sulfatos únicamente Colombia genera una restricción a las concentraciones de estos parámetros hacia las industrias que generan efluentes asociados a los procesos de producción de caña de azúcar y derivados. Es de anotar que para los metales pesado solo impone límites máximos permisibles para el arsénico, cadmio, plomo y níquel.

La legislación ambiental de países como Brasil, Argentina y México, al igual que en el caso de Cuba, generan restricciones a la mayoría de los metales pesados que se pueden encontrar en efluentes provenientes de la industria cañera. Por otro lado, México, Brasil y Colombia no reportan restricciones para el nitrógeno y fósforo.

Para países como Argentina, Colombia y Brasil, la normatividad posee una categoría de sui generis, ya que, se especializa en restringir y prohibir, zonas para la fertirrigación, almacenamiento y disposición final de la vinaza proveniente de la caña de azúcar en el proceso de producción de bioetanol, como se relaciona a continuación:

- Para Argentina se referencia la Resolución 30/12 – Embalse Río Hondo, Resolución 28/12 – Aprobación de protocolo de proyecto de obras de disposición de: Vinaza, cachaza, cenizas y agua de lavado de caña de azúcar, Decreto 574/18 – Gestión integral y sustentable de la Vinaza Biocombustible, Resolución 232/19 – Generación de Vinaza Sucro – Alcoholera (Anexos I, II, III).

- Para Brasil, existe la norma técnica P4.321/2005, punto de partida donde se plasman los criterios para la almacenamiento, transporte y aplicación de vinaza, se describen las zonas de prohibición para la aplicación de la vinaza sacro-alcoholera proveniente del procesamiento de la caña de azúcar para el estado de Sao Paulo, estableciendo planos de zonas de aplicación, caracterización de las vinazas, caracterización de la calidad del suelo, determinación de la fertilidad química del suelo, determinación de la dosis de aplicación en función del potasio. (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SAO PAULO, 2015).

- Para Colombia, en el departamento del Valle del Cauca, con la expedición de la resolución 0100 – No. 0630 – 0081 de 2012, por la cual se reglamenta el uso, manejo, aplicación, almacenamiento de las vinazas, y los productos que de ellas se deriven, en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. Cabe destacar que es la única norma que fue expedida por autoridades ambientales que dicte disposiciones específicas para este tipo de subproducto, aunque se cultive caña de azúcar y se utilice fertirriego en diferentes departamentos del país.

5. CONCLUSIONES

- A nivel mundial la industria cañera produce 1.890.000.000 m³ de vinaza, que por su alto contenido de materia orgánica se viene utilizando como fertilizante. Sin embargo, esa misma característica que potencia la productividad agrícola, tiene la capacidad de impactar negativamente las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los recursos suelo y agua. Por tal motivo, países como Cuba, Colombia, Brasil, Argentina, México y Estados Unidos han establecido un marco regulatorio, siendo Cuba el país que regula un mayor número de parámetros fisicoquímicos; se destaca que en Colombia el marco regulatorio es más flexible.

- El uso de la vinaza impacta positivamente algunas características fisicoquímicas y biológicas del suelo como la humedad, capacidad de retención y liberación de nutrientes (potasio, calcio y magnesio), mejora de la estructura de los agregados e incrementa la actividad biológica. Sin embargo, cuando los suelos no tienen características propicias para asimilar el alto contenido de carga orgánica presente en la vinaza o cuando los volúmenes de vinaza vertidos al suelo son elevados, se generan impactos negativos como la salinización, sodificación, acidificación y disminución de la actividad biológica en el suelo. Adicionalmente, por procesos de escorrentía o infiltración la vinaza puede llegar afectar el recurso

hídrico disminuyendo el pH y el oxígeno disuelto, aumentando la temperatura, los sólidos suspendidos, DBO y DQO, restringiendo la actividad fotosintética de las plantas subacuáticas.

- En el caso de Colombia, se considera pertinente que la normativa ambiental de vertimientos para efluentes de la industria cañera considere incorporar elementos con características de peligrosidad para el ambiente, como son el Mercurio (Hg), Cromo (Cr), Cobre (Cu), y Zinc (Zn), ya que se ha documentado que la vinaza contiene metales pesados que son bioacumulables y se ha demostrado que impactan negativamente la salud de los seres vivos.

6. REFERENCIAS

- ASOCAÑA. (2022). Sector Agroindustrial del La Caña. Recuperado el 20 de 7 de 2022, de <http://www.asocana.org/modules/documentos/5528.aspx>
- Carpanez, T. G., Moreira, V. R., Assis, I. R., & Amaral, M. C. S. (2022). Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. *science of the total environment*, 832, 154998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998>
- Cerón, V. Z., Andrés, M., & Ayerbe, G. (2013). Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol environmental characterization of stillage from sugar cane waste from the production Of ethanol. *80*, 124–131.
- Christofolletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
- Christofolletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013b). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
- Cruz, R. L., Righetto, A. M., & Nogueira, M. A. (1991). Experimental investigation of soil and groundwater impacts caused by vinasse disposal. In *Wat. Sci. Tech* (Vol. 24, Issue 11). <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/24/11/77/101911/77.pdf>
- da Silva, M., Griebeler, N., & Borges, L. (2007). vxTJ6yw3YP7bsCx7qC3Qcdj. *Revist Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11.
- da Silva, W. P., de Almeida, C. D. G. C., Rolim, M. M., De, Ê. F., Silva, F. E., Pedrosa, E. M. R., & Silva, V. G. F. (2014). Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 394–401. <http://www.agriambi.com.br>
- Fuess, L. T., Altoé, M. E., Felipe, M. C., & Garcia, M. L. (2021). Pros and cons of fertirrigation with in natura sugarcane vinasse: Do improvements in soil fertility offset environmental and bioenergy losses? *Journal of Cleaner Production*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128684>
- Fuess, L. T., & Garcia, M. L. (2014). Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of

- fertigation. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 145, pp. 210–229). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.003>
- Gómez, J., & Rodríguez, O. (2000). Effects of vinasse on sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity 1. In *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* (Vol. 17).
 - González, J. A., Buedo, S. E., & Prado, F. (2019). Sugarcane vinasse fertirrigation negatively affects leaf photosynthetic rates in soybean (*Glycine max*, Leguminosae). *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 54(2), 215–224. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v54.n2.24366>
 - Gunkel, G., Kosmol, J., Sobral, M., Rohn, H., Montenegro, S., & Aureliano, J. (2007). Sugar cane industry as a source of water pollution - Case study on the situation in Ipojuca river, Pernambuco, Brazil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 180(1–4), 261–269. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9268-x>
 - Hernandez, G. (2008). Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de chiapas, méxico. *Interciencia*, 33, 860–855.
 - Hernández, G., Salgado, S., Palma, D., Lagunes, L., & Ruiz, O. (2008). Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(22), 855–860. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008001100016
 - Higueta Vásquez, J. C., Rojas Gonzalez, A. F., & Pineda Pineda, S. (2020). Alternativas convencionales y no convencionales para el tratamiento de vinazas a través de tecnologías fisicoquímicas y biológicas: revisión. *dyna energia y sostenibilidad*, 9(1), [11 p.]-[11 p.]. <https://doi.org/10.6036/es9355>
 - Hoarau, J., Caro, Y., Grondin, I., & Petit, T. (2018). Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 24, pp. 11–25). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.05.003>
 - Ibarra Camacho, R., Duharte, L. L., & Osoria Leyva, A. (2019). Caracterización fisico-química de vinazas de destilerías Physicochemical characterization of distillery vinasse.
 - Jain, N., Bhatia, A., Kaushik, R., Kumar, S., Joshi, H. C., & Pathak, H. (2005). Impact of post-methanation distillery effluent irrigation on groundwater quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110(1–3), 243–255. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-7695-6>
 - Jiang, Z. P., Li, Y. R., Wei, G. P., Liao, Q., Su, T. M., Meng, Y. C., Zhang, H. Y., & Lu, C. Y. (2012). Effect of Long-Term Vinasse Application on Physico-chemical Properties of Sugarcane Field Soils. *Sugar Tech*, 14(4), 412–417. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0174-9>
 - Kaushik, A., Nisha, R., Jagjeeta, K., & Kaushik, C. P. (2005). Impact of long and short term irrigation of a sodic soil with distillery effluent in combination with bioamendments. *Bioresource Technology*, 96(17), 1860–1866. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.031>
 - Mariano, A., Henrique, S., de Franciechi, D., & Bonotto, D. (2009). BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY The use of Vinasse as an Amendment to Ex-Situ Bioremediation of Soil and Groundwater Contaminated with Diesel Oil. *Arch. Biol. Technol.* v, 52, 1043–1055.

- Marinho, J. F. U., Correia, J. E., Marcato, A. C. de C., Pedro-Escher, J., & Fontanetti, C. S. (2014). Sugar cane vinasse in water bodies: Impact assessed by liver histopathology in tilapia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 110, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.010>
- Moran-Salazar, R. G., Sanchez-Lizarraga, A. L., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo, E. N., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. In SpringerPlus (Vol. 5, Issue 1). SpringerOpen. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>
- Ortigón, G. P., Arboleda, F. M., Candela, L., Tamoh, K., & Valdes-Abellan, J. (2016a). 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.153>
- Paulino, A. F., Medina, C. D. C., Robaina, C. R. P., & Laurani, R. A. (2002). Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. *Semina: Ciências Agrárias*, 23(2), 145. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2002v23n2p145>
- Rebelato, M. G., Rodrigues, A. M., Thomaz, A. G. de B., Saran, L. M., Madaleno, L. L., & Oliveira, O. J. de. (2019). Developing an index to assess human toxicity potential of sugarcane industry. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1274–1284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.302>
- Scull, I., Savón, L., Gutiérrez, O., Valiño, E., Orta, I., Mora, P. O., Orta, H., Ramos, Y., Molidena, A., Coto, G., & Noda, A. (2012). Physic-chemical composition of concentrated vinasse for their assessment in animal diets. In *Cuban Journal of Agricultural Science* (Vol. 46, Issue 4).
- Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2006). Effects of two beet vinasse forms on soil physical properties and soil loss. *Catena*, 68(1), 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.025>
- Tejada, M., Moreno, J. L., Hernandez, M. T., & Garcia, C. (2007). Application of two beet vinasse forms in soil restoration: Effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119(3–4), 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.019>
- Valeiro, A., & Portocarrero, R. (2017). *Gestión de las Vinazas Sacro-Alcoholeras en Brasil Serie: Gestión de residuos de la industria sacro-energética argentina*.
- Norma Cubana NC 521 de 2007 de la Oficina Nacional de Normalización. Vertimiento de Aguas Residuales a la zona costera y aguas marinas – especificaciones.
- Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. producción de caña y derivados a partir de caña de azúcar.
- Ley 997 de 1976 de la Asamblea Legislativa del Estado de Sao Paulo. Prevé el control de la contaminación ambiental. Decreto 8.468 de 1976 Aprueba el Reglamento de la Ley No. 997, de 31 de mayo de 1976, que dispone para la prevención y control de la contaminación ambiental.
- Resolución 283 de 2019 de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo Argentina. Resolución Presidencia ACUMAR No. 46 de 2017.

- Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Clean Water and Cane Sugar Industry. United States Environmental Protection Agency. 1977.
- OCDE. (2022). Biocombustibles | OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2022-2031 | OECD iLibrary. <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/820ef1bb-es/1/3/9/index.html?itemId=/content/publication/820ef1bb-es&csp=19e391c99e08029d89c388b1e89345bf&itemIGO=oecd&itemContentType=book#wrapper>
- OMS - World Health Organization. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda (World Health Organization, Ed.; 4 Edición). World Health Organization. <http://apps.who.int/>