

Variabilidad de la resistencia a penetración en diferentes suelos agrícolas adicionados con abono de bagazo de agave

Variability of penetration resistance in different agricultural soils supplemented with agave bagasse fertilizer

Variabilidade da resistência à penetração em diferentes solos agrícolas suplementados com fertilizante de bagaço de agave

DOI: 10.34188/bjaerv8n4-160

Submetido: 30-08-2025

Aprovado: 15-09-2025

José C. García-Preciado

Maestro en Ciencias en Edafología

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Colima. México

Correo electrónico: garcia.concepcion@inifap.gob.mx

Arturo Galvis-Spinola¹

Doctor en Ciencias en Edafología

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México
Posgrado en Edafología. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo
Texcoco. México

Correo electrónico: galvis@colpos.mx

Teresa M. Hernández-M

Doctor en Ciencias en Edafología

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México
Universidad Autónoma Chapingo
Chapingo. México

Marianguadalupe Hernández-Arenas

Doctor en Ciencias en Fitosanidad, Fitopatología

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Morelos. México

Correo electrónico: hernandez.marian@inifap.gob.mx

RESUMEN

La resistencia a penetración es un método indirecto para cuantificar el nivel de compactación del suelo, con ello se obtiene un diagnóstico inmediato de dicha condición física en el medio edáfico. La utilización de la penetrometría ha llegado a ser poco utilizada y difundida en producciones comerciales agrícolas y pastoriles. Considerando que la compactación del suelo influye negativamente en los rendimientos de las plantas cultivadas. Se propuso evaluar la resistencia a penetración en tres suelos agrícolas, adicionados con compost de bagazo de agave, utilizando como

¹ autor para correspondencia

cultivo indicador pasto ballico (*Lolium perenne*). La resistencia a penetración se midió con un penetrómetro en tres oportunidades en el transcurso de 24 horas, esto fue, durante tres ciclos de producción del pasto ballico. Se identificó que el horario de muestreo obtuvo mayores cambios en la resistencia a penetración de los suelos, y poco menor fue el efecto de la adición del compost de bagazo de agave. Siendo el aumento en producción de biomasa aérea del pasto lo que mejoró sustancialmente conforme incrementó el contenido de arcilla y el compost de bagazo adicionado en los tratamientos.

Palabras clave: compactación, índice, compost, horarios de muestreo, biomasa.

RESUMO

A resistência à penetração é um método indireto para quantificar o nível de compactação do solo, obtendo-se assim um diagnóstico imediato dessa condição física no meio edáfico. O uso da penetrometria tornou-se pouco utilizado e difundido nas produções agrícolas e pastorais comerciais. Considerando que a compactação do solo influencia negativamente o rendimento das plantas cultivadas. Propôs-se avaliar a resistência à penetração em três solos agrícolas, adicionados com composto de bagaço de agave, utilizando como cultura indicadora o capim-baliqueiro (*Lolium perenne*). A resistência à penetração foi medida com um penetrómetro em três ocasiões ao longo de 24 horas, ou seja, durante três ciclos de produção do capim-baliqueiro. Identificou-se que o horário da amostragem obteve maiores alterações na resistência à penetração dos solos, e um pouco menor foi o efeito da adição do composto de bagaço de agave. O aumento na produção de biomassa aérea da erva foi o que melhorou substancialmente à medida que aumentou o teor de argila e o composto de bagaço adicionado nos tratamentos.

Palavras-chave: compactação, índice, composto, horários de amostragem, biomassa.

ABSTRACT

Penetration resistance is an indirect method for quantifying soil compaction levels, providing an immediate diagnosis of this physical condition in the soil. The use of penetrometry has been underutilized in commercial agricultural and livestock production, despite the fact that soil compaction negatively impacts crop yields. This study aimed to evaluate penetration resistance in three agricultural soils amended with agave bagasse compost, using perennial ryegrass (*Lolium perenne*) as an indicator crop. Penetration resistance was measured with a penetrometer on three occasions over a 24-hour period, during three ryegrass production cycles. The sampling time resulted in the greatest changes in soil penetration resistance, with the effect of agave bagasse composting being only slightly less pronounced. The increase in aboveground biomass production of the grass improved substantially with increasing clay content and the amount of bagasse compost added to the treatments.

Keywords: compaction, index, compost, sampling schedules, biomass.

1 INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es un proceso de degradación física, debido a que disminuye el tamaño del poro afectando la permeabilidad al agua, al aire y una mayor necesidad de energía para la preparación del terreno (Badalíková, 2010). Dentro de los factores de origen antrópico que provocan compactación del suelo en la agricultura, se encuentra el tráfico de maquinaria,

considerado como el de mayor incidencia (González, *et al.*, 2009). En pastizales el principal daño físico del suelo es causado por el pisoteo del ganado, a menudo restringido a profundidad de 0-150 mm de la superficie (Kurz *et al.*, 2006, Taboada, 2007). Otra causa que favorece la aparición y aumento del proceso de compactación, es el descenso en los contenidos de materia orgánica (Martínez y Zinck, 2004), existiendo fuerte relación entre la degradación física del suelo y la disminución del contenido de materiales orgánicos (Hati *et al.*, 2007). También es un problema de alcance global, ya que este fenómeno es considerado la causa principal de degradación física en suelos (González, *et al.*, 2009; Pagliai *et al.*, 2003). En México, la SEMARNAT describe a la compactación como la principal degradación de tipo física en suelo, con 68.2% de la superficie nacional afectada. Cifras tan alarmantes, conllevan a generar estrategias para la mitigación de dicho fenómeno en suelos agrícolas y de pastizales. Entre algunas alternativas, está la integración de abonos o enmiendas orgánicas al suelo (Abdul and Kaleem, 2015; Obia *et al.*, 2017); dichos materiales favorecen la porosidad y aumentan los agregados (Zaffar and Sheng-Gao, 2015), consecuentemente el incremento de rendimiento en los cultivos.

Las actividades agroindustriales en México como la producción de azúcar, café, tequila, de frutas y hortalizas representan una fuente valiosa de ingresos para las familias y empresas que intervienen en ellas (Domínguez, 2005; Morandín *et al.*, 2023; Lozano, 2024; Hernández-Cázares *et al.*, 2018). Consecuencia de la transformación del producto de interés económico por la agroindustria, se obtienen toneladas de residuos, por ejemplo, el bagazo de caña de azúcar (Vela *et al.*, 2024); este y otros residuos o subproductos al no ser reutilizados generan impactos negativos como la contaminación del ecosistema donde son depositados (Mejías *et al.*, 2016; Vargas y Pérez, 2018). En la agroindustria tequilera, se generan subproductos como las aguas residuales (conocidas como vinazas) y el bagazo de agave (consecuencia de la extracción de los azúcares fermentables de los tallos de la planta, conocidos como piñas). Aunque se da cierta reutilización a materiales como el bagazo (Iñiguez *et al.*, 2011; Ramírez *et al.*, 2012), no es suficiente para utilizar los grandes volúmenes que se producen de dicho subproducto. Por tanto, cierto volumen se desecha en campos y tiraderos clandestinos (Rodríguez *et al.*, 2010; Kestur *et al.*, 2013), con la consecuente problemática ambiental. De acuerdo con el Consejo Regulador del Tequila (CRT, 2021) se produjeron 527,000,000 L de esta bebida, procesándose 2,019 mil toneladas de agave, lo cual derivó en 807,500 toneladas de bagazo. Por tal motivo resulta crucial obtener información de los efectos del uso del bagazo de agave en suelos agrícolas, para su posterior incorporación al sistema de producción. En este sentido el compostaje del bagazo de agave es un método eficaz para el aprovechamiento en la agricultura (Iñiguez *et al.*, 2005). Pero es necesario conocer los efectos en la fertilidad de suelos agrícolas con el uso del compost de bagazo de agave, e incluso tipos de bagazo

sin compostar (Acosta *et al.*, 2023). Ello mediante la obtención de diagnósticos a través de mediciones físicas como: la textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, tamaño de partícula y contenido de agua; siendo estos, indicadores o propiedades de salud del suelo (Norris *et al.*, 2020). Sin embargo, el fenómeno de compactación no se describe como un indicador directo de la salud del suelo. Aunque dicha variable presenta alta relación con densidad aparente, textura, tamaño de partícula y humedad del suelo (Blanco-Sepúlveda, 2009); por tanto, dichas variables muestran propiedades inherentes. La compactación puede determinarse de manera indirecta a través de la medición de la resistencia a penetración (Merrington *et al.*, 2006; Mueller *et al.*, 2009). Siendo la penetrometría en suelo, una herramienta que determina de manera sencilla y barata la compactación, teniendo el potencial de proporcionar información con relativa facilidad (Johnson and Bailey, 2002; Newell *et al.*, 2013). Por ello se generó la propuesta de analizar la variabilidad de la resistencia a penetración (RP), en tres suelos agrícolas con distintas proporciones de arcilla y de abono de bagazo de agave, usando como cultivo indicador el pasto ballico (*Lolium perenne*).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se extrajeron muestras de suelo en seis sitios a una profundidad de 0-20 centímetros, esto, en el campo experimental Montecillos propiedad de la Universidad Autónoma Chapingo; a las cuales se les determinó la textura. Lo anterior para encontrar proporciones contrastantes de arcilla, limo y arena, ya que dichas variables tienen relación con la compactación del suelo. Una vez identificados, los suelos se clasificaron mediante el cálculo de un índice, que fue el resultado de dividir el porcentaje de arcilla y de la arena. Quedando finalmente tres tipos de suelos con índices contrastantes, de los cuales se extrajo un volumen aproximado de 0.5 m³ por sitio de muestreo. Cada tipo de suelo se secó por separado bajo sombra durante 28 días, después se pasaron por un cernidor o criba metálica (8x8 mm de abertura), para retirar piedras y otros restos superiores a dicha longitud. Paralelamente se elaboró compost de bagazo de agave (CBA), de siete meses de procesamiento, el cual fue cernido utilizando la misma criba metálica que en suelo.

La materia prima para el compost fue bagazo de agave, seleccionado por ser un subproducto de insuficiente reutilización por los grandes volúmenes generados anualmente (Iñiguez *et al.*, 2005). El bagazo se genera a partir de la extracción de los jugos y azúcares fermentables de las piñas de agave, durante la producción del tequila. El CBA se obtuvo y fue procesado en la ciudad de Tequila, Jalisco, México; gracias a la colaboración del Instituto Tecnológico de Jalisco José Mario Molina Pasquel y Enríquez, Campus Tequila.

2.1 TRATAMIENTOS.

Cada tipo de suelo se homogenizó utilizando una revoladora mecánica, posteriormente, fueron depositados en la unidad experimental (UE) que fueron bolsas de polietileno con capacidad para cinco litros. Obteniendo finalmente tres repeticiones por tipo de suelo de acuerdo al índice contrastante (tratamiento uno =T1). Como cultivo indicador se utilizó pasto ballico, para la siembra se partió de la dosificación de 35 kg ha⁻¹ de semillas (Velasco *et al.*, 2005); equivalente a 1.68 g. por UE. Las cuales se distribuyeron homogéneamente sobre la superficie y fueron cubiertas con una capa de un centímetro de espesor del suelo correspondiente. Se propuso un segundo tratamiento (T2), el cual consistió en la combinación del CBA con cada tipo de suelo. La cantidad de compost para el T2 se estableció con base a la recomendación de nitrógeno (N) para el pasto ballico (Muñoz *et al.*, 2016; ATAEM, 2017; ATAT, 2017; Sierra-Alarcón *et al.*, 2019); la cual se encuentra en 40, 46, 50, hasta 80 kg de N ha⁻¹. Se utilizó la dosis de 43 kg que es la media entre 40 y 46 kg de N ha⁻¹, que son las recomendaciones para después de realizado el corte del pasto. El contenido de nitrógeno total (NT) del CBA se referenció para un compost de más de 60 días, que fue de 0.83% (Rodríguez *et al.*, 2010). Con base a dicho valor de NT se estimó la dosis de 5.3 t ha⁻¹ de CBA, lo equivalente a la dosis en unidades de nitrógeno requeridas. Trasladando dicha recomendación a la UE, se utilizaron para el T2 28.5 g del CBA (Cuadro 1). En el tratamiento tres (T3) se triplicó la dosificación de NT, por tanto, la cantidad del CBA aumentó a 94.1 g por UE por tipo de suelo empleado. Se establecieron un cuarto (T4) y quinto (T5) tratamientos, los cuales consideraron incrementos de cinco y seis veces el NT respectivamente. Como tratamiento testigo (T6) se utilizó fertilizante sulfato de amonio ((NH₄)₂ SO₄), partiendo de la dosificación inicialmente establecida de 43 kg de N ha⁻¹. Trasladando dicha recomendación a la unidad experimental, la dosis para el T6 fue de 1.1 g de sulfato de amonio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos por cada tipo de suelo.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Nitrógeno total calculado por tratamiento (kg ha ⁻¹)	0	44.0	146.1	219.1	364.4	43.0
Proporción del compost (g UE ⁻¹)	0	28.5	94.1	141.9	236.0	0

Elaborado por los autores (2025).

Cada tratamiento fue replicado tres veces, asignándolos en un espacio de 40 m² dentro de un invernadero tipo Capilla. Posteriormente, por cada unidad experimental se tomaron submuestras de suelo y sus combinaciones con el CBA, para obtener una muestra compuesta de 1.5 L por tratamiento. Las muestras se analizaron y se determinaron variables físicas como el contenido de arena, arcilla y limo (Bouyoucos), índice arcilla/arena (división entre el porcentaje de arcilla y arena); variables químicas como el pH (relación 1:2 en agua), conductividad eléctrica (CE; relación

1:2 en agua), materia orgánica (MO; Walkley y Black) y carbono orgánico (CO; factor Van Benmelen) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características físicas y químicas de los suelos, combinaciones de suelos con el CBA, y suelos más un fertilizante mineral.

Tratamientos	Arena	Arcilla	Limo	Índice	Clasificación textural	pH	CE	MO	CO
	%	%	%				dS m ⁻¹	%	%
T1	44	30	26	0.7	Franco arcillo arenoso	7.14	0.42	1.82	1.06
T2						7.36	0.39	1.96	1.14
T3						7.41	0.48	2.37	1.37
T4						7.46	0.49	2.57	1.49
T5						7.49	0.54	3.16	1.83
T6						7.22	0.38	1.95	1.13
T1	30	40	30	1.3	Arcilloso franco	7.07	0.45	2.95	1.71
T2						7.17	0.53	3.12	1.81
T3						7.23	0.60	3.44	2.00
T4						7.30	0.61	3.83	2.22
T5						7.27	0.63	4.96	2.88
T6						7.13	0.50	2.83	1.64
T1	14	56	30	4.0	Arcilloso	6.86	0.44	2.82	1.64
T2						6.99	0.51	3.22	1.87
T3						7.03	0.64	3.26	1.89
T4						7.14	0.65	4.35	2.52
T5						7.16	0.68	5.12	2.97
T6						6.90	0.53	3.00	1.74
CBA						8.09	0.82	23.26	13.49

Tratamientos: T1= suelos (0.7, 1.3 y 4.0); T2= suelos más 28 g de CBA; T3= suelos más 94.1 g de CBA; T4= suelos más 141.9 g de CBA; T5= suelos más 236.0 g de CBA; T6= suelos más (NH₄)₂ SO₄. CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, CO= carbono orgánico. Elaborado por los autores (2025).

2.2 VARIABLES DE RESPUESTA

Los datos de campo se colectaron durante el verano del año 2015 (abril-julio), considerándose tres ciclos productivos que comprendieron los siguientes periodos: Ciclo 3, del 9 de abril al 10 de mayo; Ciclo 4, del 10 de mayo al 31 de mayo y Ciclo 5 del 31 de mayo al 26 de junio. Cada ciclo se determinó conforme a la observación de dos y tres hojas totalmente elongadas en el pasto (Villalobos y Sánchez, 2010); en la totalidad de las unidades experimentales. Las variables evaluadas fueron la resistencia a penetración (RP) y el rendimiento del pasto mediante la obtención

de biomasa aérea (BA) por ciclo. La RP se registró por cada tratamiento en la superficie del suelo de 0 a 15 mm, seleccionando al azar los puntos donde se realizaron dichas mediciones. La RP se obtuvo con un penetrómetro de bolsillo (Geosistemas[®]), durante los siguientes horarios: de 06:30 a 09:00 am (H1, horario uno); de 12:30 a 02:00 pm (H2, horario dos); de 06:30 a 08:00 pm (H3, horario tres). Esto fue en tres ocasiones durante un ciclo de producción del ballico: después del rebrote, etapa intermedia de desarrollo y un día antes de cosechar. La cosecha del pasto se realizó al observarse dos y tres hojas totalmente elongadas, para asegurar mayor disponibilidad, persistencia y calidad productiva del ballico (Villalobos y Sánchez, 2010). La BA se determinó por UE, utilizando una estufa de circulación forzada de aire a 60 °C durante 72 horas, o hasta obtener el peso constante.

Los riegos se efectuaron después de las 8 p.m., procurando que la humedad se mantuviese por encima del 50% respecto al punto de marchitez permanente, basándose en la propuesta de intervalo de agua óptimo (Paiva *et al.*, 2005). Para confirmar dicha propuesta se registró el contenido de humedad en cada unidad experimental utilizando un sensor portátil de suelo (Decagon Devices[®]). También se registraron temperaturas cada media hora en el interior del invernadero durante el periodo de la investigación, esto, utilizando un Data Logger (WatchDog[®] 400).

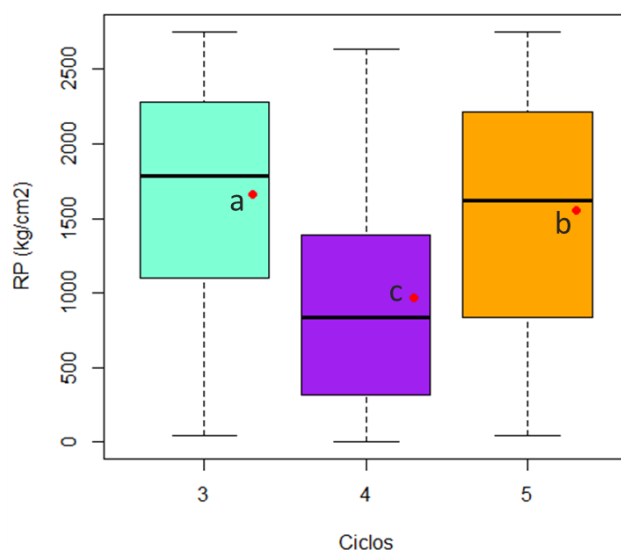
El ensayo se estableció bajo un diseño completamente al azar, analizando la variable RP y su interacción con los siguientes factores: tres ciclos productivos (Ciclo 3, Ciclo 4, Ciclo 5); tres tipos de suelo de acuerdo a su índice (0.7, 1.3 y 4.0); tres horarios de muestreo (H1, H2, H3); seis tratamientos por tipo de suelo (T1, T2, T3, T4, T5 y T6). Para el análisis estadístico se trabajó con la transformación a “rangos” de la variable RP. Esta transformación es equivalente a la prueba de Kruskal Wallis del análisis no paramétrico. La utilización de los rangos para la variable RP se propuso porque en su escala original no cumple con los supuestos de normalidad e independencia. También, se realizó una comparación de medias (Tukey, $\alpha=0.05$) para la RP sin la transformación a rangos; se analizó el efecto de los tratamientos sobre la variable BA utilizando la misma prueba estadística. Para dichos análisis se utilizó el software estadístico R (R Core Team, 2017).

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Al analizar la resistencia a penetración (RP) durante los ciclos de producción se presentó lo siguiente: se obtuvieron menores diferenciaciones en los percentiles que contienen del 25 al 75% de los datos durante el periodo correspondiente al Ciclo 4 (Figura 1). El Ciclo 4 registró la mediana más baja, siendo diferente al tres y cinco, este último obtuvo mayor variación entre lecturas de RP. El Ciclo 3 y cinco presentaron valores parecidos con respecto a la mediana, media y los percentiles (Figura 1). De modo que existió relación entre la RP y los ciclos productivos usando la

transformación a rangos. Lo que puede ser atribuible a las interacciones entre condiciones climáticas, de suelos, la planta y del manejo prevaleciente (Caple *et al.*, 2012; Straw *et al.*, 2016). Por ejemplo, se registraron mayor número de temperaturas superiores a los 40 °C, e inferiores a los 14 °C durante el Ciclo 4. Dicha condición climática explica mayor variación de la mediana y la media con respecto a los percentiles que contienen del 10 al 90% de los datos; además, el Ciclo 4 fue más corto de acuerdo a la aparición de las tres hojas totalmente elongadas. Para corroborar el argumento anterior, se realizó una prueba de comparación de medias conformándose tres grupos estadísticamente diferentes (Cuadro 3). El Ciclo 4 registró mayor grado de resistencia a penetración en la capa superior de los tratamientos. Como ya se observó dicha agrupación está relacionada con las temperaturas ambientales superiores a 40 °C, las cuales se registraron al interior del invernadero durante dicho ciclo de producción. Asimismo, en ese periodo se manifestaron daños mínimos por pulgón amarillo (*Melanaphis spp*) en todos los tratamientos. Lo cual provocó cierta marchitez en algunas hojas, favoreciendo indirectamente el secamiento rápido del suelo, debido a una menor cobertura foliar observada en los tratamientos. Gracias a que protege el suelo de los rayos directos del sol, la cobertura vegetal salvaguarda este de la sequía y la compactación (Guamán *et al.*, 2023). Sin embargo, el promedio de riego aplicado durante el Ciclo 4 fue 10% menor respecto al resto de ciclos. A pesar de ello, el Ciclo 5 fue el que generó menor producción de biomasa aérea, debido al decline productivo natural del cultivo y el agotamiento de los nutrientes en las UC. Aun cuando fueron registradas más recurrentes las temperaturas óptimas para el cultivo (14 a 25 °C) durante dicho periodo.

Figura 1. Diagrama de cajas de la resistencia a penetración en tres ciclos de cultivo de pasto ballico, usando la transformación a rangos.



— = mediana; ● = media; □ = cajas que contienen percentiles 25% y 75%; ⊢ ⊥ = extremos verticales representan los percentiles 10% y 90%. Ciclos: 3= de abril a mayo; 4= mayo; 5= mayo a junio. Tukey agrupación $\alpha=0.05$. Elaborado por los autores (2025).

3.1 CAMBIO DE LA RESISTENCIA A PENETRACIÓN DURANTE EL DÍA

La diferenciación entre lecturas de resistencia a penetración (RP) durante los horarios muestreados fue contrastante. Para corroborar dicha hipótesis, se realizó una prueba de comparación de medias de las lecturas directas de RP y de las medias usando la transformación a rangos; para lo cual se establecieron tres grupos estadísticamente diferenciados (Cuadro 4). Conforme transcurrió el día se observó que la RP o compactación de suelo en los tratamientos, tiende a incrementar sin importar la adición del compost, el tipo de suelo, o que se encuentre con la cobertura del pasto ballico. Dicha diferenciación posee una alta magnitud espaciotemporal en los suelos establecidos con pastos; ello, atribuido esencialmente a la dinámica de la humedad del suelo (Straw and Henry, 2017). Además, se observó que la información de RP registrada durante H1 y H2 fue más heterogénea debido a los coeficientes de variación, sobre todo en el suelo con índice 4.0. Contrariamente, durante el H3 datos de RP fueron más homogéneos y la superficie del suelo se encontró visualmente seca en los tratamientos.

Cuadro 3. Comparación de medias de la resistencia a penetración durante distintos horarios de muestreo.

Horarios	Medias de RP (kg/cm ²)	MR (kg/cm ²)	TA	CV
H3	1.88	1978.68	a	0.30
H2	1.25	1256.71	b	0.52
H1	0.97	784.40	c	0.77

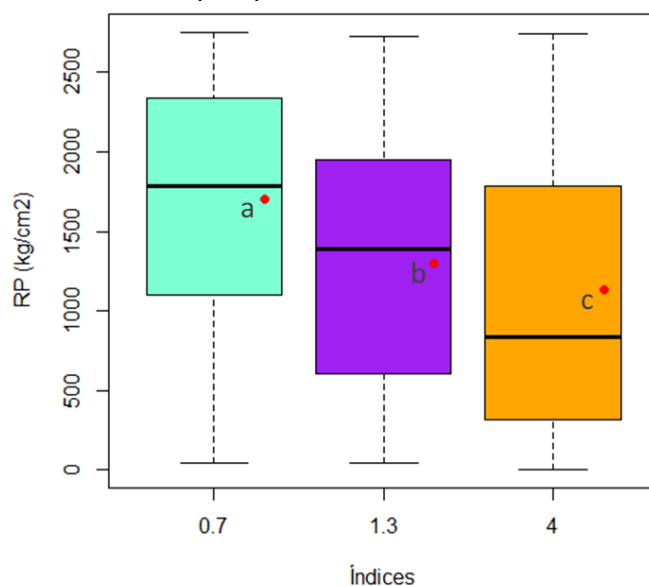
H1= de 06:30 a 09:00 de la mañana (am); H2= de 12:30 a 02:00 pm; H3= de 06:30 a 08:00 pm. RP= resistencia a penetración, MR= medias de los rangos, TA= Tukey agrupación ($\alpha=0.05$), CV= coeficiente de variación. Elaborado por los autores (2025).

3.2 EFECTO DEL TIPO DE SUELO SOBRE LA VARIABLE RESISTENCIA A PENETRACIÓN

Los diagramas de cajas de la Figura 2, muestran que la RP presenta variabilidad en los tres tipos de suelos categorizados por su índice. Ya que la mediana, media y los percentiles son diferentes en cada suelo. Dichos efectos se deben al contenido de arcilla más que la materia orgánica (Hernández-Sánchez *et al.*, 2019). Suelos con índices de 1.3 y 4.0 se observó mayor viscosidad y plasticidad en el H1, al igual que secado lento durante H2 y H3. Los suelos con mayor porcentaje de arcilla son más dinámicos en sus procesos de humedecimiento; ya que poseen mayor capilaridad en sus suspensiones coloidales, sumando mayor superficie específica, por tanto, aumento entre el intercambio de sustancias y cationes (Barver *et al.*, 1980; Hillel, 2004). Suelos agrícolas con contenidos de 33, 38 y 41% en arcilla, aumentaron continuamente la resistencia a penetración a

medida que estos se secaron, pero con mayor variabilidad entre lecturas (J. To. and Kay B.D., 2005). Al realizar las comparaciones múltiples con la prueba de Tukey por tipo de suelo considerando ciclos y tratamientos, se conformaron tres grupos estadísticamente diferentes (Figura 2). Siendo el suelo con índice 4.0, el que obtuvo valores más bajos en RP. Lo cual es atribuible a una mayor plasticidad e hinchazón de las partículas de arcilla al estar humedecido (Narro-Farías, 2004; Hillel, 2004).

Figura 2. Lecturas de RP por tipo de suelo, utilizando la transformación a rangos.

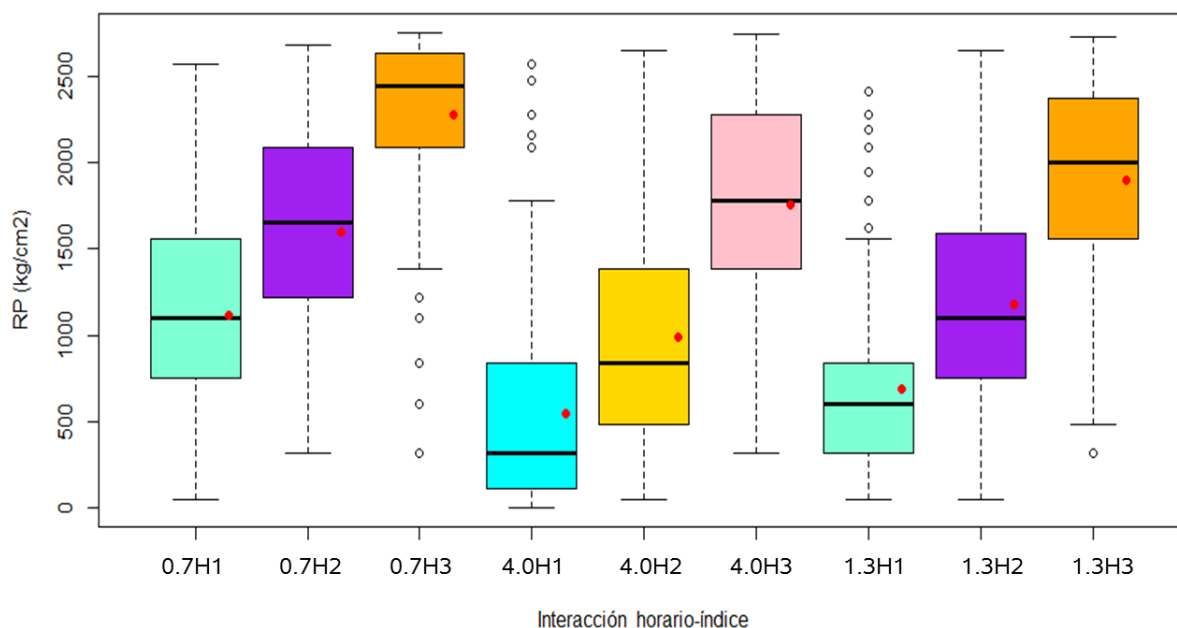


Suelo franco arcillo arenoso= 0.7; suelo arcilloso franco= 1.3; suelo arcilloso= 4.0. — = mediana los rangos, ● = media de los rangos, □ = cajas que contienen percentiles 25% y 75%, ⊢ y ⊥ = extremos verticales representan los percentiles 10% y 90%. Elaborado por los autores (2025).

3.3 INTERACCIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A PENETRACIÓN, ÍNDICE Y LOS HORARIOS DE MUESTREO

Se observó que conforme transcurre el día, suelos con el mayor e intermedio índice arcilla-arena manifestaron menores valores de RP, pero una mayor amplitud o variabilidad entre sus lecturas (Figura 3). Al respecto, Hamza y Anderson, 2005 mencionan que los suelos arcillosos son más susceptibles a los ciclos de humedecimiento y secado que los demás. El suelo con índice de 0.7 presentó menor variabilidad entre sus resultados durante el horario tres, pero en los horarios H1 y H2 la amplitud de los percentiles se asemeja a los otros tipos de suelo. Con el aumento del contenido de humedad, valores de RP disminuyen drásticamente en suelos con menor contenido de arcilla (J. To. and Kay B.D., 2005).

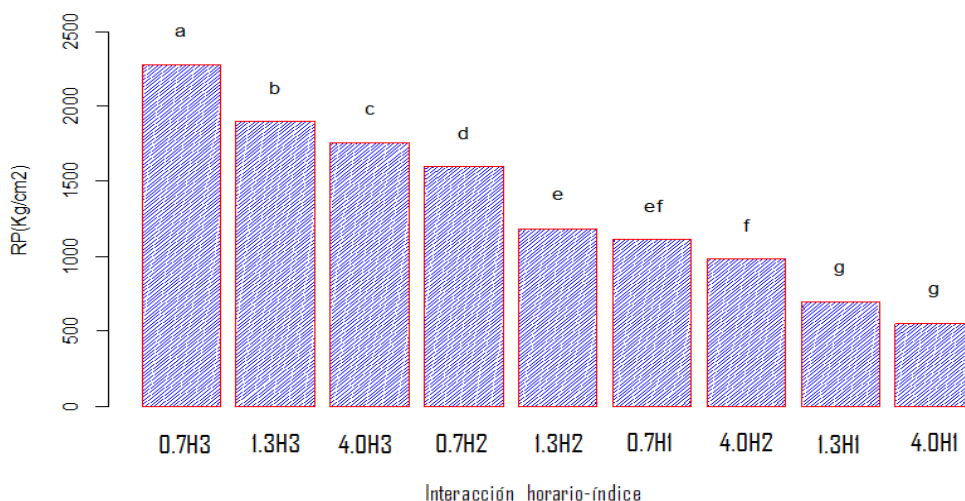
Figura 3. Lecturas de resistencia a penetración considerando la interacción del tipo de suelo y el horario de muestreo.



Suelo franco arcillo arenoso= 0.7; suelo arcilloso franco= 1.3; suelo arcilloso= 4.0. — = mediana los rangos, ● = media de los rangos, □ = cajas que contienen percentiles 25% y 75%, ⊢ y ⊥ = extremos verticales representan los percentiles 10% y 90%. Elaborado por los autores (2025).

La RP vario sustancialmente durante el transcurso del día, ya que los datos de dicha variable fueron mayores en H3 respecto a los otros horarios, esto, sin distinción entre tratamientos y tipos de suelos. Al realizar comparaciones múltiples con las lecturas de resistencia a penetración, se establecieron cinco grupos estadísticamente opuestos (Figura 4). Donde el suelo con índice 0.7 fue el que mayor grado de compactación obtuvo al final del día. Además, se confirmó el efecto que ejerce la arcilla en la disminución de la resistencia a penetración cuando se pierde humedad en el suelo. La resistencia mecánica a la penetración varía en el tiempo y el espacio, y está fuertemente influenciada por el contenido de agua o potencial de esta en el suelo (J. To and Kay B.D. 2005). Blanco (2009), sugiere que es necesario muestrear en condiciones homogéneas de humedad para reducir la dispersión en los resultados de resistencia mecánica en suelos con pastos. De modo que la compactación del suelo claramente está influenciada por las características de retención de agua del mismo (Głab, 2014).

Figura 4. Interacción entre el tipo de suelo y horarios de muestreo (considerando ciclos y tratamientos).



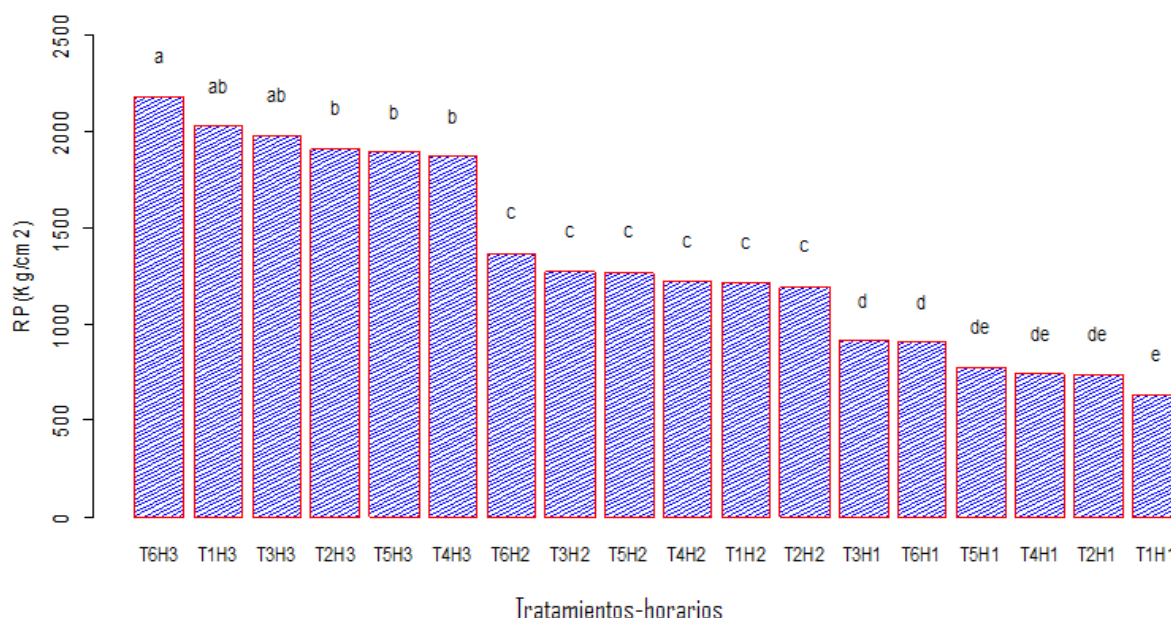
Suelo franco arcillo arenoso= 0.7; suelo arcilloso franco= 1.3; suelo arcilloso= 4.0. H1= de 06:30 a 09:00 am; H2= de 12:30 a 02:00 pm; H3= de 06:30 a 08:00 pm. Elaborado por los autores (2025).

3.4 LA RP Y SU INTERACCIÓN CON LOS TRATAMIENTOS DE ABONO ORGÁNICO Y HORARIOS DE MUESTREO

La aplicación del compost de bagazo de agave (CBA) sobre la RP fue poco contundente, dicho fenómeno se observó con mayor claridad al observar la RP durante los horarios de muestreo establecidos. Por ejemplo, tratamientos donde no se adicionó CBA (T1 y T6), se agruparon estadísticamente entre los que se les incorporó el abono durante H1 y H2 (Figura 5). Además, el T1 en el H1 fue el que registró la menor media aritmética en la conformación de los cinco grupos. No obstante, durante el H3 se observa que los tratamientos que contienen solo suelo, presentan valores elevados de RP. Y los tratamientos con la aplicación del CBA presentan datos menores de RP durante el H3, aunque sin diferencias estadísticas entre estos (Figura 5). En similitud, no se tuvieron impactos significativos en la disminución de la compactación con aplicación de estiércol y sin la aplicación del mismo en suelos con textura franco limoso y franco arcillo limoso, al igual que en un tratamiento donde se propició la compactación (Sanford *et al.* 2008). La compactación del suelo es un fenómeno que no solo está influenciado por el contenido de materia orgánica, sino por el tipo y calidad del compuesto orgánico; por ejemplo, materiales parcialmente descompuestos y altamente humidificados incrementan la tenacidad del suelo a no compactarse (González *et al.*, 2009; Taboada, 2007). Sin embargo, el CBA utilizado no presenta materiales humidificados, pero si parcialmente descompuestos. La composición del compost del bagazo de agave presenta elevados contenidos de celulosa y lignina (Iñiguez *et al.*, 2011), que son compuestos de lenta descomposición. De acuerdo a la prueba estadística la disminución de la RP en tratamientos adicionados con el CBA, no fue contrastante respecto a los tratamientos con solo suelo; pero estos últimos perdieron humedad hasta quedar visiblemente secos, lo cual fue más evidente durante el H3. Contrariamente en el H1

tratamientos sin el compuesto orgánico (T1 y T6), fueron más plásticos debido al aumento de humedad por la mañana; propiciada por bajas temperaturas nocturnas y la ejecución del riego en la noche del día anterior. Experimentos en campo y en laboratorio demuestran el aumento de humedad en suelos con la incorporación de la materia orgánica, debido a la formación y estabilización de los poros en suelo (Oorts *et al.*, 2007; Grosbellet *et al.*, 2011). En el H2 valores mayores en RP los presentó el T6, de modo que desde medio día dicho tratamiento fue compactándose más rápido que el resto. Parcelas de suelos arcillosos que recibieron fertilización mineral a una profundidad de 0-10 cm, se encuentran más altas en la variable de resistencia a la penetración, que parcelas adicionadas con compost, estiércol y micorrizas (Celik *et al.*, 2010). Por tanto, la adición del CBA logró incrementar la humedad en los tratamientos correspondientes, aunque sin efecto contrastante en disminución de RP. Por otro lado, el uso del sulfato de amonio favoreció la compactación de suelo en la capa superficial, ya que durante el H2 y H3 el T1 presentó lecturas mayores de RP (Figura 5). Se ha descrito que el uso excesivo de fertilizantes en monocultivos promueve la compactación del suelo, provocado por la formación y concentración de sales minerales; consecuentemente, aumento de la densidad aparente y reducción del espacio poroso, obstaculizando el paso de raíces y la permeabilidad del suelo (Gła, 2014; Jafar & Behzad, 2016).

Figura 5. Resistencia a penetración con la interacción entre los tratamientos de abono orgánico y horarios de muestreo.



Tratamientos: T1= suelos (0.7, 1.3 y 4.0); T2= suelos más 28 g de CBA; T3= suelos más 94.1 g de CBA; T4= suelos más 141.9 g de CBA; T5= suelos más 236.0 g de CBA; T6= suelos más (NH₄)₂ SO₄. H1= 06:30 a 09:00 am; H2= 12:30 a 02:00 pm; H3= 06:30 a 08:00 pm. Elaborado por los autores (2025).

3.5 PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA DE LOS TRATAMIENTOS

Después de analizar el efecto de los suelos, horarios, los ciclos y la aplicación del CBA, se obtiene que la RP tiene interacción con dichas variables. Pero es importante obtener el efecto de dichas interacciones sobre la producción de biomasa aérea (BA). Por ello, se analizó la producción de la BA en los tratamientos y tipos de suelos durante el periodo de evaluación. Al adicionar el CBA el BA fue mayor respecto a los tratamientos donde no se adicionó el compuesto orgánico (Cuadro 5). Tratamientos con mayor cantidad de CBA muestran diferencias estadísticas respecto al T1 y T6, siendo más evidente el incremento productivo en el suelo con mayor contenido de arena (0.7 de índice). Sanford *et al.* (2008), encontraron diferencias estadísticas significativas en rendimientos de grano de maíz (kg m^{-1}), en suelos francos compactados con la aplicación de estiércol, respecto a la no aplicación en el mismo. En plántulas de agave obtuvieron mejor respuesta en crecimiento al utilizar compost de bagazo de agave como sustrato respecto a polvo de coco y turba (Crespo *et al.*, 2013). Por tanto, la utilización del CBA más polvo de coco posee buenos estándares químicos y físicos para ser utilizado como sustrato en la producción en contenedor (Crespo *et al.*, 2018). Anteriores propuestas no consideran el uso del CBA para mejorar suelos agrícolas, y con ello elevar la productividad de cultivos. En el presente, a mayor incorporación del CBA se obtiene más BA para los suelos evaluados. Por el contrario, al utilizar acolchados o mantillo de bagazo de caña de azúcar, no se mejora significativamente el rendimiento de zanahoria, la retención de humedad y la temperatura del suelo (Yakubu *et al.*, 2021).

Cuadro 5. Rendimientos de biomasa aérea en los tratamientos y tipos de suelos.

Cuadro 3. Rendimiento de biomasa aérea en los tratamientos y tipos de suelo.						
Tratamientos	0.7		1.3		4.0	
	g UE ⁻¹					
T1	0.98	e	1.35	c	1.27	c
T2	1.31	d	1.83	bc	1.93	b
T3	1.74	c	2.20	ab	2.49	a
T4	2.02	b	2.34	ab	2.47	a
T5	2.50	a	2.61	a	2.77	a
T6	0.94	e	1.43	c	1.48	c

Tratamientos: T1= suelos (índices: 0.7, 1.3 y 4.0); T2= suelos más 28 g de CBA; T3= suelos más 94.1 g de CBA; T4= suelos más 141.9 g de CBA; T5= suelos más 236.0 g de CBA; T6= suelos más $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$. Tukey $\alpha=0.05$. Elaborado por los autores (2025).

4 CONCLUSIÓN

La resistencia a penetración (RP) varió conforme al horario en el cual fue tomada la lectura, independientemente del tipo de suelo y del abono orgánico utilizado. La adición del compost de bagazo de agave logró disminuir la RP respecto a los tratamientos sin dicho compuesto orgánico, aunque sin diferencias estadísticas entre estos. Al conjugarse alta humedad ambiental, así como la

disminución de las temperaturas la RP fue menor. Contrariamente, cuando los suelos estuvieron visiblemente secos se obtuvo mayor RP, esto, durante las 6:30 a 8:00 pm. Al aumentar la dosificación del compost de bagazo en los suelos utilizados, se incrementó sustancialmente la producción de biomasa aérea del pasto ballico.

Para corroborar la efectividad del compost de bagazo de agave, es necesario seguir evaluando dicho subproducto en otros cultivos como hortalizas y frutales. Igualmente, conocer los efectos en la mejora física del suelo y otras variables de fertilidad, evaluando bagazo de agave compostado y el fresco o directo de la agroindustria.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONACyT, por la beca de manutención durante mi estancia de posgrado. Al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP), por ofrecerme la oportunidad de superarme académicamente. A la Universidad Autónoma Chapingo y al Colegio de Posgraduados por las herramientas y facilidades para la obtención de la presente investigación.

REFERENCIAS

Abdul K, M., and Kaleem A., 2015. Improvements in the physical and chemical characteristics of degraded soils supplemented with organic–inorganic amendments in the Himalayan region of Kashmir, Pakistan. *Catena* 126, 209–219.

Acosta Sotelo, Laura Liliana; Zamora Natera, Juan Francisco; Rodríguez Macías, Ramón; González Eguiarte, Diego Raymundo; Gallardo Lancho, Juan Fernando; & Salcedo Pérez, Eduardo. (2023). Bagazo y composta de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: 1. Dinámica de degradación. *Biotecnia*, 25(2), 90-96. Epub 25 de agosto de 2023. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i2.1801>

ATAEM (2017). Agenda Técnica Agrícola de Estado de México. In: Pasto ballico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Delegación Coyoacán, Ciudad de México. 324-326 p. https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content?%2f%2f=AT

ATAT (2017). Agenda Técnica Agrícola de Tamaulipas. In: Zacate Rye Grass. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Delegación Coyoacán, Ciudad de México. 359-360 p. https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content?%2f%2f=AT

Badalíková B., 2010. Influence of Soil Tillage on Soil Compaction Chapter 2.

Barver L.D., Gardner W., Gardner W. 1980. Viscosidad e hinchazón de los coloides del suelo; In *Física de suelos*. 4ta. ed. Cap. 2. UTEHA, México. pp. 56-65.

Blanco R., (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, vol. 43, núm. 3, abril-mayo, 2009, pp. 231-239.

Blanco-Sepúlveda, Rafael. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239. Recuperado en 11 de mayo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000300002&lng=es&tlng=es.

Caple, M., James, I., & Bartlett, M. (2012). Spatial analysis of the mechanical behaviour of natural turf sports pitches. *Sports Engineering*, 15(3), 143–157.

Celik I., Gunal H., Budak M., and Akpinar C., (2010). Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. *Geoderma* 160, 236–243.

Crespo González, Marcos Rafael, González Eguiarte, Diego Raymundo, Rodríguez Macías, Ramón, Ruiz Corral, José Ariel, & Durán Puga, Noé. (2018). Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(3), 373-382. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.03.01>

Crespo, G. M. R., González, E. D. R., Rodríguez, M. R., Rendón S. L. A., del Real, L. J. I., Torres M. J. P. 2013. Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 4, (8), pp 1161-1173.

CRT (Consejo Regulador del Tequila). 2021. <https://old.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>

Domínguez Ruvalcaba, L., (2005). Desarrollo regional y competitividad: la agroindustria azucarera en México. *NÓESIS. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 15(27), 227-250.

Głab T., (2014). Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward. *Soil & Tillage Research* 144, 8–19.

González O., Iglesias C., y Herrera M., (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 18(2), 57-63.

Grosbellet, C., Vidal-Beaudet, L., Caubel, V. and Charpentier, S. 2011. Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma*. 162: 27-38.

Guamán, P., Basante, C., & Mármol, J. L. (2023). Ventajas de la aplicación de cobertura vegetal en los cultivos agroecológicos: Advantages of the application of vegetation cover in agroecological crops. *LATAM Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades*, 4(2), 6037–6043. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.1032>

Hamza, M. A.; W. K. Anderson (2005). “Soil compaction in cropping system”, *Soil and tillage research*, 82: 121-145, 2005.

Hati K., Swarup A., Dwivedi A., Misra A., Bandyopadhyay K., (2007). Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119, 127–134.

Hernández-Cázares, A.S. Real-Luna, N. Delgado-Blancas, M.I. Bautista-Hernández, L. Velasco-Velasco, J. (2018). Residuos agroindustriales con potencial de compostaje. *Agro Productividad*, 9(8). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/795>

Hernández-Sánchez, Jazmín María de los Dolores, Figueroa-Sandoval, Benjamín, & Martínez Menes, Mario R. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(spe22), 53-61 pp. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1858>

Hillel D., 2004. Clay, the colloidal component; In *Introduction to Environmental Soil Physics*, (ed.) Hillel D., (Ed.) ELSEVIER, China. pp 58-71.

Íñiguez, G., Acosta, N., Martínez, L., Parra, J., & González, O. (2005). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 7. Compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(1), 37-50.

ÍÑIGUEZ, Gilberto, MARTÍNEZ, Gabino A., FLORES, Paulina A., & VIRGEN, Gil. (2011). Utilización de subproductos de la industria tequilera: Parte 9. Monitoreo de la evolución del compostaje de dos fuentes distintas de bagazo de agave para la obtención de un sustrato para jitomate. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(1), 47-59. Recuperado en 07 de mayo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000100005&lng=es&tlng=es.

J. To., and Kay B.D. (2005). Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126, 261–276.

Jafar, M.S., & Behzad, A. (2016). Effect of Chemical Fertilizers on Soil Compaction and Degradation. *Agricultural and Food Sciences, Environmental Science*. 44-50 pp.

Johnson, C. E., Bailey A. C. (2002): "Soil compaction. In *Advances in Soil Dynamics*", Volume 2 155-178, ASAE, St Joseph, Mich, USA, 2002.

Kestur G. Satyanarayana, Flores-Sahagun T.H.S., Dos Santos L.P., Dos Santos J., Mazzaro I., Mikowski A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico, *Composites Part A. Appl. Sci. Manuf* 45 153–161, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>

Kurz, I., O'Reilly, C.D., Tunney, H., (2006). Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 378–390.

Lozano Arias, C. J. (2024). El El Tequila Como Fuente Económica en México. *Revista de Investigación Académica Sin Frontera: Facultad Interdisciplinaria de Ciencias Económicas Administrativas - Departamento de Ciencias Económico Administrativas-Campus Navojoa*, (41). <https://doi.org/10.46589/riasf.vi41.661>

Martínez L., y Zinck J., (2004). Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil & Tillage Research* 75, 3–17.

MEJÍAS-BRIZUELA, Nildia, OROZCO-GUILLEN, Eber, y GALÁAN-HERNÁNDEZ, Néstor. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2-6: 27-41

Merrington, G., Fishwick, S., Barraclough, D., Morris, J., Preedy, N., Boucard, T., Reeve, M.J., Smith, P., Fang, C., (2006). The Development and Use of Soil Quality Indicators for Assessing the Role of Soil in Environmental Interactions. *Environment Agency Science Report SC030265*, 241 pp.

Morandín Ahuerma, Indra, Contreras Hernández, Armando, Ayala Ortiz, Dante Ariel, & Pérez Maqueo, Octavio. (2023). La sustentabilidad y la cultura cafetalera mexicana. *Madera y bosques*, 29(1), e2912132. Epub 24 de noviembre de 2023. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912132>

Mueller, L., Bev, D., Kay, B.D., Hu, C., Li, Y., Schindler, U., Behrendt, A., Shepherd, T.G., Ball, B.C., (2009). Visual assessment of soil structure: evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany. Part I: comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil Tillage Res.* 103, 178–187.

Muñoz Jácome, E. A., Coello, M. J., Moreno, F., & Cruz, C. (2016). Metodología para la evaluación del nivel tecnológico del cultivo de Rye grass en los Andes ecuatorianos, microcuenca del río Chimborazo / Technological Level Evaluation Methodology of Rye grass cultivation in Ecuadorian Andes, the Chimborazo River watershed. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias*, 4(8), 88-117. Recuperado a partir de <https://ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/36>

Narro-Farías E., 2004. Composición del Suelo; In *Física de suelos con enfoque agrícola*. 1ta. ed. Cap. 2. Trillas, México. pp. 21 y 22.

Newell J.P., Whittingham M.J., Chambers B.J., and Peel S., (2013). Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil & Tillage Research* 12, 65–73.

Norris Charlotte E., Bean G. Mac, Cappellazzi Shannon B., Cope Michael, Greub Kelsey L.H., Liptzin Daniel, Rieke Elizabeth L., Tracy Paul W., Morgan Cristine L.S., Honeycutt C. Wayne. (2020). Introducing the North American project to evaluate soil health measurements. *Agronomy Journal*. Volume 112, Issue 4. pp 3195–3215. <https://doi.org/10.1002/agj2.20234>

Obia Al., Børresen T., Martinsen V., Cornelissen G., Mulder J., (2017). Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. *Soil & Tillage Research* 170, 114-121.

Oorts, K., Bossuyt, H., Labreuche, J., Merckx, R. and Nicolardot, B. 2007. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *Eur. J. Soil Sci.* 58: 248-259.

Pagliai M., Marsili A., Servadio P., Vignozzi N., and Pellegrini S., (2003). Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil & Tillage Research*, 73(2003), 119–129.

Paiva T., Pires A., Perfect E., y Tormena C., (2005). An Algorithm for Calculating the Least Limiting Water Range of Soils. *American Society of Agronomy*. Published in *Agron. J.* 97:1210–1215.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Ramírez-Cortina, Clementina R., Alonso-Gutiérrez, María S., & Rigal, Luc. (2012). Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 449-457. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.059>

Rodríguez Macías Ramón, Ernesto G. Alcantar González, Gilberto Iñiguez Covarrubias, Francisco Zamora Natera, Pedro M. García López, Mario A. Ruiz López, Eduardo Salcedo Pérez. (2010). Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia. Revista de ciencia y tecnología de América* Vol. 35 Núm. 7 Pág. 515-520.

Sanford G., Posner J., Schuler R., and Baldock J., (2008). Effect of dairy slurry application on soil compaction and corn (*Zea mays* L.) yield in Southern Wisconsin. *Soil & Tillage Research*, 100(2008), 42–53.

SEMARNAT (2008). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Cap. 3. Suelos.

Sierra-Alarcón, Andrea, Moreno-Oviedo, Yesenia, Mancipe-Muñoz, Edgar A., Avellaneda-Avellaneda, Yesid, & Vargas-Martínez, Juan de J.. (2019). Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en raigrases perennes y tréboles rojos. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 841-854. <https://dx.doi.org/10.15517/am.v30i3.35170>

Straw, C. M., Grubbs, R. A., Tucker, K. A., & Henry, G. M. (2016). Handheld versus mobile data acquisitions for spatial analysis of natural turfgrass sports fields. *HortScience*, 51(9), 1176–1183.

Straw, C. M., Henry G. M. (2017). Spatiotemporal variation of site-specific management units on natural turfgrass sports fields during dry down. *Precision Agric.* DOI 10.1007/s11119-017-9526-5.

Taboada M., (2007). Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. 4 Simposio de Ganadería en Siembra Directa. Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Fac. de Agronomía UBA.

Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 14(1), 59–72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>

Velasco E., Hernández A., y González V., (2005). Rendimiento y valor nutritivo del ballico perenne (*Lolium perenne* L.) en respuesta a la frecuencia de corte. *Técnica Pecuaria en México*, vol. 43(2), pp. 247-258.

Vela, J. D., Romero, B. C., Cortes, M. F. M., Rodríguez, A. V., Martínez, N. M., Hernández, J. L. S., & López-Escobar, L. A. (2024). Revalorización de residuos agroindustriales para la reproducción de esporas de *Trichoderma* spp. en sistemas a pequeña escala: Avaliação de resíduos agroindustriais para reprodução de esporos de *Trichoderma* spp. em sistemas de pequena escala. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(1), 621–632. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n1-047>

Villalobos L., y Sánchez J., (2010). Evaluación agronómica y nutricional del pasto Ryegrass perenne tetraploide (*Lolium perenne*) producido en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, vol. 34(1), pp. 43-52.

Yakubu Adam, Edward Benjamin Sabi, Siaw Onwona-Agyeman, Hideshige Takada, Hirozumi Watanabe. (2021). Impact of sugarcane bagasse mulching boards on soil erosion and carrot productivity. *CATENA*. Volume 206. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105575>.

Zaffar M., and Sheng-Gao L., (2015). Pore Size Distribution of Clayey Soils and Its Correlation with Soil Organic Matter. *Pedosphere* 25(2): 240-249.