

Caracterización Físico-Química de Suelo en Dos Zonas de Producción de Mezcal, en el Distrito de Miahuatlán, Oaxaca Physical-Chemical Characterization of Soil in Two Mezcal Production Areas, in the District of Miahuatlán, Oaxaca

Graciela Ávila-Uribe¹ , Artemio Pérez-López^{2†} ,
Patricio Sánchez-Guzmán³ y Joel Pineda-Pineda⁴

¹ Estancia Posdoctoral Académica de la SECIHTI en el Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria; (G.A.U.). ² Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo; (A.P.L.). ⁴ Departamento de Suelos, Laboratorio de Nutrición Vegetal, Universidad Autónoma Chapingo; (J.P.P.). Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[†] Autor para correspondencia: aperezl.dia@gmail.com

³ Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Edafología, Laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230, Texcoco Estado de México, México; (P.S.G.).

RESUMEN

En el establecimiento de cualquier cultivo es indispensable conocer las propiedades del suelo, ya que el desconocimiento de la calidad del suelo y sus deficiencias en reservas orgánicas y nutrientes minerales se convierte en factor limitante para obtener el rendimiento y la calidad deseada en el cultivo. En el presente trabajo se hizo la caracterización físico-química del suelo con producción de maguey de los municipios de Sitio Xitlapehua y San Luis Amatlán, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, para la elaboración de mezcal bajo proceso artesanal. Los resultados de los parámetros físico-químicos fueron: pH (7.3 - 7.5), materia orgánica (0.26% - 3.86%), nitrógeno total (0.063% - 0.463%), conductividad eléctrica (0.25 dS m⁻¹ - 0.40 dS m⁻¹), capacidad de intercambio catiónico (17.05 cmol(+) kg⁻¹ - 41.93 cmol(+) kg⁻¹), calcio (15.67 cmol(+) kg⁻¹ - 48.90 cmol(+) kg⁻¹) y magnesio (1.43 cmol(+) kg⁻¹ - 11.21 cmol(+) kg⁻¹) intercambiable, fósforo disponible (0.3 mg kg⁻¹ - 8.0 mg kg⁻¹) carbonato de calcio (1.4% - 32.2%), densidad aparente (1.0 g cm⁻³ - 1.88 g cm⁻³), textura (franco, franco arcilloso y franco arcillo arenoso) y color (gris claro, gris, negro y rojo). El análisis de correlación de Spearman permitió determinar la relación entre las variables físico-químicas, y el análisis de componentes principales a identificar las variables que caracterizan cada parcela. La comparación de los parámetros analizados con la norma NOM-021-SEMARNAT-2000, mostró que los suelos tienen pH neutro, con bajo contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, pero con alto contenido de calcio, magnesio, carbonato de calcio y capacidad de intercambio catiónico. Estos parámetros permitieron identificar los factores limitantes en la nutrición del maguey silvestre. Con base en esta información, se plantearán estrategias de nutrición que conduzcan a elevar la acumulación de azúcares en el maguey maduro y, consecuentemente, elevar el rendimiento en la producción de mezcal.

Palabras clave: análisis de suelos, maguey silvestre, nutrición del maguey.

SUMMARY

For the establishment of any crop, it is essential to know the properties of the soil since a lack of knowledge of the quality of the soil and its deficiencies in organic reserves and mineral nutrients becomes a limiting factor to obtain the desired yield and quality in the crop. In the present work, the physical-chemical characterization of the soil with maguey production in the municipalities of Sitio Xitlapehua and San Luis Amatlán, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, was carried out to produce mezcal under an artisanal process. The results of the physical-chemical parameters



Cita recomendada:

Ávila-Uribe, G., Pérez-López, A., Sánchez-Guzmán, P., & Pineda-Pineda, J. (2025). Caracterización Físico-Química de Suelo en Dos Zonas de Producción de Mezcal, en el Distrito de Miahuatlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-12. e1985. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1985>

Recibido: 2 de septiembre de 2024.

Aceptado: 21 de marzo de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Julio de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Luis G. Hernandez Montiel

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

were: pH (7.3 - 7.5), organic matter (0.26% - 3.86%), total nitrogen (0.063% - 0.463%), electrical conductivity (0.25-0.40 dS m⁻¹), exchange capacity cationic (17.05-41.93 cmol(+) kg⁻¹), calcium (15.67 cmol(+) kg⁻¹ - 48.90 cmol(+) kg⁻¹) and magnesium (1.43 cmol(+) kg⁻¹ - 11.21 cmol(+) kg⁻¹) exchangeable, available phosphorus (0.3 mg kg⁻¹ - 8.0 mg kg⁻¹) calcium carbonate (1.4% - 32.2%), bulk density (1.0 g cm⁻³ - 1.88 g cm⁻³), texture (loam, clay loam and sandy clay loam) and color (light gray, gray, black and red). Spearman correlation analysis allowed to determine the relationship between the physical-chemical variables, and the principal components analysis to identify the variables that characterize each plot. The comparison of the analyzed parameters with the NOM-021-SEMARNAT-2000 standard showed that the soils have a neutral pH, with low content of organic matter, nitrogen and phosphorus, but with high content of calcium, magnesium, calcium carbonate and capacity cation exchange. These parameters allowed us to identify the limiting factors in the nutrition of wild maguey. Based on this information, nutrition strategies will be proposed that lead to increasing the accumulation of sugars in the mature maguey and, consequently, increasing the yield in the production of mezcal.

Index words: soil analysis, wild maguey, maguey nutrition.

INTRODUCCIÓN

En México, más del 50% de su superficie se compone de zonas áridas y semiáridas, las cuales se caracterizan por tener muy baja precipitación pluvial, suelos con baja fertilidad, alta pedregosidad y pendientes pronunciadas (INEGI, 2023), donde proliferan especies de plantas como el maguey. Esta especie es de importancia en nuestro país, debido a la gran variedad de usos que se le da como fuente de extracción de materias primas para obtención de fibra, combustible, medicina, alimento y bebida como el mezcal (Morales *et al.*, 2017).

El estado de Oaxaca concentra la mayor diversidad de especies de magueyes de las 159 que se han registrado en nuestro país (García-Mendoza, 2018) y es el principal productor de mezcal a nivel nacional (COMERCAM, 2023). Debido a la alta demanda de esta bebida, a nivel internacional, los sitios de destilación han tenido que complementar la producción con otras especies silvestres, apreciadas por las características organolépticas que le confieren al mezcal (Vera-Guzmán, Guzmán y López, 2010). Estas especies se reproducen de manera natural en suelos pobres en nutrientes y con alta pedregosidad; es decir, suelos de baja calidad desde el punto de vista agrícola. Debido a su importancia comercial y de conservación de la diversidad de esta especie, es necesario establecerlo como cultivo.

Para el establecimiento de cualquier cultivo, es indispensable el conocimiento de las características del suelo para tener buenos resultados (Hernández-Rodríguez *et al.*, 2021). La calidad del suelo, en general consiste en medir un grupo mínimo de sus características (físicas, químicas o biológicas); para estimar la capacidad del suelo de realizar funciones básicas (USDA, 1999). Sin embargo, los agricultores desconocen las características del suelo y sus requerimientos de nutrientes minerales para que el cultivo de maguey alcance el rendimiento estimado.

El objetivo de este trabajo fue analizar las propiedades fisico-químicas del suelo en dos municipios, Sitio Xitlapehua y San Luis Amatlán, en Miahuatlán, Oaxaca, con cultivo de maguey para la producción de mezcal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Experimento

Los sitios de muestreo de suelos fueron tres parcelas, una con plantación de maguey en el municipio de Sitio Xitlapehua, cuyas coordenadas son 16° 21' 3" N, 96° 31' 58" O. Dos parcelas en San Luis Amatlán, una con plantación de maguey y la otra sin plantación, con coordenadas 16° 23' 14" N, 96° 29' 50" O y 16° 23' 19" N, 96° 28' 59" O, ambos municipios pertenecientes al distrito de Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca.

Muestreo de Suelo

Las parcelas se eligieron de acuerdo con la disponibilidad de los productores para participar en el presente trabajo. En cada parcela, se realizó un recorrido para identificar el grado de homogeneidad en cuanto a características físicas del suelo como color, pendiente y pedregosidad para establecer los puntos de obtención de las submuestras, distribuidas dentro de cada una de las áreas homogéneas contrastantes entre éstas.

En la parcela llamada "La Hacienda" ubicada en sitio Xitlapehua (2 hectáreas), se identificaron tres áreas relativamente homogéneas, en donde se encontraron magueyes de las especies *Agave angustifolia* Haw, *Agave potatorum* y *Agave americana var oaxacensis* Gentry; la segunda parcela, llamada "De la Cruz", que se localiza en San Luis Amatlán (1.5 hectáreas), se identificaron dos áreas relativamente homogéneas, las cuales contenían, especies de magueyes como *Agave angustifolia* Haw, *A. karwinskii* Zucc., *A. americana var oaxacensis* y *A. americana*. En las dos parcelas anteriores, las especies se encontraban dispuestas en surcos, con condiciones de manejo agronómico mínimas, una vez por año aplicación de estiércol de borrego, control manual de malezas, plagas y enfermedades, en condiciones de temporal. La tercera parcela, se ubica en la Escuela Secundaria Técnica No. 154 (1.7 hectáreas), solo se identificó un área relativamente homogénea, la cual no tenía establecido ningún cultivo al momento del muestreo. El método para obtener las muestras de suelo en cada punto fue el descrito por Uvalle-Bueno, Vélez y Ramírez (2007) en forma de zigzag, se excavó con una pala a 30 cm de profundidad y se obtuvieron 15 submuestras dentro de cada área relativamente homogénea; las cuales se homogenizaron y por el método de cuarteos diagonales, se obtuvo una porción de "muestra compuesta" de 2.5 kg para su análisis en laboratorio. Tanto en el Sitio Xitlapehua, como en San Luis Amatlán se obtuvieron tres muestras compuestas que corresponden a tres parcelas diferentes.

Preparación de las Muestras

Las muestras fueron sometidas a análisis en el Laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, en el Estado de México en el mes de mayo de 2023. La preparación de las muestras se llevó a cabo conforme lo describe la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), en donde, una vez que las muestras estuvieron totalmente secas, se deshicieron los terrones en un mortero y se hicieron pasar a través de malla de 2 milímetros.

Análisis Físico-Químicos

Los parámetros físico-químicos como pH, materia orgánica, nitrógeno, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, fósforo, carbonato de calcio, densidad aparente y textura, se hicieron de acuerdo con la metodología descrita por la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

El pH se determinó en relación suelo-agua 1:2. Se midió este parámetro en un potenciómetro previamente calibrado (Corning Scientific Instruments, Model 7. Medfield, Mass. USA).

La materia orgánica (MO%), se evaluó a través del contenido de carbono orgánico con el método Walldey y Black (1934). El contenido de nitrógeno total (N%) se determinó mediante procedimientos de digestado (Kjeldahl).

La conductividad eléctrica (CE), se determinó en pasta de saturación. Se midió en milisiemens por centímetro (mS cm^{-1}) en conductímetro (Conductronic, modelo CL35, Pue, Mex.) previamente calibrado a 1.41 mS cm^{-1} con solución estándar de cloruro de potasio (KCl). El resultado se reportó en decisiemens por metro (dS m^{-1}), en el cual, se tomó en cuenta para su cálculo el factor de corrección por temperatura.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó mediante el método con acetato de amonio. La concentración se reportó en centimoles de catión por kilogramo de suelo ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$).

La determinación de bases intercambiables (Ca y Mg) se llevó a cabo derivado del proceso de determinación de CIC, en el primer filtrado del suelo con acetato de amonio. La concentración de las bases se calculó en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$.

La medición del contenido de fósforo (P) extraíble se obtuvo siguiendo el método de Bray y Kurtz (1945) para suelos neutros y ácidos. La concentración de fósforo se calculó en miligramos por kilogramo de suelo (mg kg^{-1}).

El contenido de carbonato de calcio ($\text{CaCO}_3\%$) se desarrolló de acuerdo con el método de Horton y Newson (1953). La densidad aparente (Da) se determinó de acuerdo con el método de la parafina. El resultado se expresó en gramos por centímetro cúbico (g cm^{-3}).

La textura del suelo se obtuvo con el procedimiento de la pipeta, que consiste en determinar en el suelo la proporción de 3 fracciones de partículas (arena, limo y arcilla).

Para la determinación de la clase textural del suelo, se ubicaron los resultados de las tres partículas en el triángulo de textura de suelos del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS-USDA por sus siglas en inglés).

La medición de color se llevó a cabo siguiendo el método de la carta de Munsell de colores de suelos. Una vez ubicado el color, se registró el valor del Hue (matiz), Value (brillo) y Chroma (intensidad).

Los resultados de los parámetros físico-químicos (excepto textura y color) fueron comparados con la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002) para interpretar su significado y determinar la calidad de las muestras de suelo.

Análisis Estadístico

Se realizó análisis de correlación de Spearman, debido a que el supuesto de la distribución normal de las variables respuesta no fue sostenible, y se usó la matriz de correlaciones en el análisis para garantizar que todos los datos tengan el mismo peso; posteriormente se hizo la prueba de esfericidad de Bartlett para determinar significancia en la matriz de correlación y finalmente, análisis de componentes principales para determinar las variables más representativas de cada parcela analizada. Los análisis se realizaron en el lenguaje de programación R versión 4.3.0 (R Core Team, 2023) en el ambiente integrado de desarrollo Rstudio versión 2023.06.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH de los suelos varió entre los 7.3 y 7.5, de acuerdo con la norma 021-2000 de la SEMARNAT (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002), se trata de suelos medianamente alcalinos (7.4 - 8.5). En un estudio de caracterización de tierras productoras de maguey mezcalero en La Soledad Salinas, Oaxaca, el pH con valores semejantes a los encontrados (7.3 - 7.5) se observó en tierras sueltas, con poca pedregosidad, con presencia de piedrillas y gravilla (Mariles-Flores, Ortiz, Gutiérrez, Sánchez y Cano, 2016). Un suelo ideal, para la mayoría de los cultivos, es aquel que contiene pH entre 6.0 y 7.0, porque indica equilibrio en los nutrientes del suelo (Mariles-Flores *et al.*, 2016).

El contenido de materia orgánica (MO) presentó mínimo de 0.26% y máximo de 3.86%. De acuerdo con la norma para suelos no volcánicos, aquellos con valor menor a 0.5% se consideran en nivel muy bajo, mientras que los superiores a 3.6% contienen altos niveles de MO. Las muestras de los sitios 3 y 5, obtuvieron los valores menores y fueron semejantes a los observados en suelos a profundidades de 0 cm a 20 cm (Torres-Zambrano *et al.*, 2021).

La MO se refiere a los componentes orgánicos presentes en el suelo. Esta se forma a partir de la acumulación y descomposición de residuos de plantas y animales. En los sitios 2 y 4, se observa porcentaje de materia orgánica mayor al mínimo (0.5%), resultado de la aplicación anual de estiércol de borrego a los magueyes establecidos, aunque no en cantidades adecuadas. En contraste, el sitio 6 presentó alto contenido de materia orgánica (3.86%), a pesar de contar con ningún cultivo establecido al momento del muestreo, lo que indica que el suelo del lugar fue trabajado anteriormente y se le incorporó alguna fuente de materia orgánica no especificada. Estos residuos se integran de manera natural al suelo o mediante la adición de materiales vegetales u orgánicos. Este parámetro mejora la capacidad amortiguadora del suelo porque ayuda a equilibrar la producción de iones H^+ y la adición de iones básicos generados en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes (Reyes-Castillo *et al.*, 2023).

En el caso contrario, un nivel bajo de materia orgánica en el suelo resulta en la disminución de la actividad biológica y la formación de costras (Manna, Ghosh y Acharya, 2003). Además, el suelo se vuelve más susceptible a la compactación, lo que provoca drenaje deficiente y capacidad reducida para retener agua, limitando así el rendimiento potencial de los cultivos (Holland, 2004). En los sitios donde se obtuvieron las muestras de suelo, y se encontraron especies de maguey cultivados (sitios 1 al 5), la aplicación de materia orgánica es escasa e insuficiente, debido a que solo lo realizan una vez por año; lo anterior se observa en los resultados de MO de los sitios 1, 2 y 5 (Cuadro 1), los cuales, al contener materia orgánica deficiente, el suelo no tiene la capacidad de retención de agua; esto coincide con los valores obtenidos de densidad aparente (D_a), los cuales son susceptibles de presentar problemas de compactación (valor de D_a superior a 1.5 g cm^{-3}).

Los porcentajes de nitrógeno presente en las muestras oscilaron de 0.06 a 0.46%. Estos valores indican (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002) que el contenido de nitrógeno es bajo en las muestras 1 al 5 y muy alto para la muestra 6. El nitrógeno es fundamental en los procesos de crecimiento, desarrollo radicular y foliar en plantas de maguey (Fregoso-Zamorano *et al.*, 2023); sin embargo, los resultados obtenidos muestran que los suelos analizados de Sitio Xitlapehua y San Luis Amatlán tienen deficiencias significativas, esto implicaría que no se obtendrían los mejores rendimientos en la cosecha, por lo que sería necesario implementar un plan de fertilización.

La conductividad eléctrica (CE) en todas las muestras fue menor a 0.5 dS m^{-1} . En la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), se indica que una conductividad menor a 1.0 dS m^{-1} , implica efectos despreciables de salinidad, esto significa que los suelos de los sitios 1 al 6, no presentan salinidad. Este dato es muy importante en suelos magueyeros porque, para la fertilización se tiene mayor facilidad en la formulación de dosis de fertilizante (Huang, Li y Sumner, 2012). Aunque los magueyes tienden a tolerar la salinidad, es recomendable que la CE del suelo sea baja, idealmente inferior de 1.0 dS m^{-1} , debido a que al agregar fuente de fertilización la CE del suelo, tiende a aumentar por tres razones principales: 1) la presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, 2) la aplicación de cantidad de fertilizante mayor que la absorbida o lixiviada y 3) cuando el suelo posee alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Bárbaro, Karlanian y Mata, 2018).

Cuadro 1. Resultados de los análisis físico-químicos de los suelos de seis sitios en dos municipios de Miahuatlán, Oaxaca.
Table 1. Results of the physical-chemical analyzes of soils from six sites in two municipalities of Miahuatlán, Oaxaca.

Parámetro	SITIOS					
	1	2	3	4	5	6
	SLA(DC)	SLA(DC)	XIT(LH)	XIT(LH)	XIT(LH)	SLA(EST)
pH	7.5	7.5	7.4	7.3	7.5	7.3
MO (%)	0.39	0.90	0.26	0.77	0.26	3.86
N total (%)	0.07	0.13	0.06	0.09	0.07	0.46
CE (dS m ⁻¹)	0.33	0.25	0.26	0.40	0.32	0.35
CIC (cmol(+) kg ⁻¹)	20.66	26.68	23.07	29.89	17.05	41.93
Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	15.67	26.33	28.60	23.32	48.90	30.39
Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	10.83	8.37	1.75	6.09	1.43	11.21
P (mg kg ⁻¹)	1.20	0.30	0.30	0.60	8.00	1.30
CaCO ₃ (%)	32.20	26.80	15.10	23.20	1.40	23.60
Da (g cm ⁻³)	1.88	1.62	1.25	1.32	1.64	1.00
Arena (%)	32.80	29.50	43.10	39.30	52.90	40.40
Limo (%)	35.20	34.80	29.90	35.70	18.20	28.30
Arcilla (%)	32.10	35.80	27.00	25.00	29.00	31.30
Clase textural	FR	FR	F	F	FRA	FR
Color seco	5YR 7/1 GC	5YR 5/1 G	5YR 6/1 G	5YR 7/1GC	2.5YR 4/6 R	7.5YR 2.5/1 N
Color húmedo	2.5Y 6/3 PA	2.5Y 4/1 GO	2.5Y 5/2 PG	2.5Y 6/1 G	2.5YR 4/8 R	N 2.5/1 N

[†] SLA; San Luis Amatlán; XIT = sitio xitlapehua. DC = parcela “De la Cruz”; LH = parcela “La Hacienda”; EST = parcela en la Escuela Secundaria Técnica No. 154 de San Luis Amatlán. pH = potencial de hidrógeno; MO = materia orgánica; N total = nitrógeno total; CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; CA = calcio intercambiable; MG = magnesio intercambiable; P = fósforo disponible; CaCO₃ = carbonato de calcio; Da = densidad aparente. FR = franco arcilloso; F = franco; FRA = franco arcillo arenoso; GC = gris claro; G = gris; PA = pardo amarillento; GO = gris oscuro; PG = pardo grisáceo; R = rojo; N = Negro.
[†] SLA; San Luis Amatlán; XIT = xitlapehua site. DC = “De la Cruz” plot; LH = “La Hacienda” plot; EST = plot at Technical Secondary School No. 154 of San Luis Amatlán. pH = hydrogen potential; OM = organic matter; Total N = total nitrogen; EC = electrical conductivity; CEC = cation exchange capacity; CA = exchangeable calcium; MG = exchangeable magnesium; P = available phosphorus; CaCO₃ = calcium carbonate; Da = apparent density. FR = clay loam; F = frank; FRA = sandy clay loam; GC = light gray; G = gray; PA = yellowish brown; GO = dark gray; PG = grayish brown; A = red; N = Black.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es indicador de la cantidad de MO, del contenido y tipo de arcilla presentes en el suelo. La norma de referencia, indica que tienen CIC entre 10 cmol(+) kg⁻¹ y 40 cmol(+) kg⁻¹, lo que indica que el tipo de arcilla presente se relaciona con el tipo 2:1. La CIC también indica el grado de intemperismo del suelo, de acuerdo con los valores encontrados, el nivel va de media (15 cmol(+) kg⁻¹ -25 cmol(+) kg⁻¹) a muy alta (mayor a 40 cmol(+) kg⁻¹) de acuerdo con la norma. Particularmente en suelos para la producción de maguey mezcalero, un valor alto de este parámetro implica mayor capacidad del suelo para retener y liberar cationes esenciales para el crecimiento de las plantas. Mayor disponibilidad de nutrientes se traduce en mayor absorción de agua y equilibrio químico en el suelo (Huang *et al.*, 2012). Bajo contenido de CIC sugiere que los suelos tienen capacidad limitada para retener cationes (nutrientes) debido a su textura arenosa y bajo contenido de materia orgánica (López *et al.*, 2019), esto se confirma con los valores altos obtenidos en el porcentaje de arena en los sitios 1, 3 y 5, los cuales presentaron los valores más bajos de CIC y de MO (Cuadro 1).

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), los suelos presentaron alta concentración de calcio (valor mayor de 10 cmol(+) kg⁻¹). Los suelos calcáreos se forman a partir de material parental rico en carbonato de calcio en áreas áridas o semiáridas; estos suelos pueden originarse tanto de la erosión de rocas sedimentarias calcáreas como de depósitos recientes en lagos que se están secando; generalmente, tienen textura con alto contenido de fracción limosa; en algunos casos, pueden contener considerable cantidad de partículas rocosas de gran tamaño (Lifeder, 2023). El calcio forma parte de la pared celular y colabora en la división celular en las plantas (Huang *et al.*, 2012). Un adecuado suministro de calcio puede contribuir a mayor densidad de las fibras y al contenido de azúcares en el maguey, lo que es esencial para la producción de mezcal de alta calidad (Mariles-Flores *et al.*, 2016). Los niveles de magnesio encontrados en los suelos corresponden a niveles medio (1.3 cmol(+) kg⁻¹ - 3.0 cmol(+) kg⁻¹) a alto (mayor de 3.0 cmol(+) kg⁻¹) de acuerdo con la norma de referencia.

Los valores de los suelos de los sitios 3 y 5 son similares a los reportados en suelos con alta pedregosidad que guardan mucha humedad (Mariles-Flores *et al.*, 2016). Estos sitios se tratan de suelos que guardan la humedad que ocasionalmente logran captar, ya sea por medio de riego que aplica el agricultor a las plantas de maguey, y de las lluvias que escasamente llegan a precipitar. La relación Ca/Mg es de suma importancia, debido a que, al tener una relación mayor, se tendrá un bloqueo en el desempeño del otro, se indica que una relación equilibrada entre estos dos nutrientes, es de 2 a 6 (Sánchez-García, 2009). Dividiendo el resultado del contenido de calcio entre el contenido de magnesio de cada sitio de análisis, se observa que los sitios 3 y 5 (15.9 y 34.9 respectivamente), sobrepasan las 6 unidades, lo que coincide con sus resultados más bajos en contenido de magnesio y altos en contenido de calcio (Cuadro 1). El magnesio es activador de reacciones enzimáticas, está asociado a la transferencia de energía (adenosín trifosfato ATP) y es componente de la clorofila (Sánchez-García, 2009). Por lo tanto, si se tienen suelos con deficiencias de magnesio, y no se realizan aplicaciones de este mineral, se corre el peligro de obtener plantas débiles, con poca producción de azúcares, los cuales son esenciales para la producción de mezcal.

La presencia de fósforo fue bajo en todos los suelos, debido a que presentaron niveles menores a 15 mg kg^{-1} conforme lo indica la norma. Se ha encontrado que altos niveles de carbonato de calcio en los suelos, puede causar deficiencias de fósforo (Costa *et al.*, 2014). Los suelos de los sitios 1, 2, 3, 4 y 6 presentan altos niveles de carbonato de calcio, lo que coincide con el bajo contenido de fósforo (Cuadro 1). Sin embargo, en el sitio 5, se observó el contenido más bajo de carbonato de calcio, pero fue el de mayor contenido de fósforo de todos los sitios analizados. Este mineral es poco móvil en el suelo y no es poco común encontrarlo en altas concentraciones en la superficie, sobre todo en sistemas donde se realizan labores agrícolas (Aguirre, Piraneque y Díaz, 2019), lo que indica que en el sitio 5 se realizan labores al cultivo de maguey. Este nutriente es indispensable en el crecimiento de las raíces, la fotosíntesis y la respiración. La deficiencia de este elemento se manifiesta en el color púrpura del tallo y las hojas inferiores de la planta (Huang *et al.*, 2012). Las plantaciones de agaves establecidas en suelos con concentraciones óptimas de fósforo han presentado mayor altura de planta, así como diámetro de roseta, mejor desarrollo de hojas y producción de biomasa seca (Fregoso-Zamorano *et al.*, 2023).

El contenido de carbonato de calcio, en los suelos 1, 2, 4 y 6 fue alto de acuerdo con la norma (valores entre 16 y 40%), mientras que en el suelo 3 fue medio y en el suelo 5 fue bajo. Los valores fueron similares a los que se encontró en suelos de color blanco, con profundidades de 16 cm hasta 60 cm (Mariles-Flores *et al.*, 2016). Los carbonatos presentes en cantidades significativas en el suelo provienen principalmente de la calcita CaCO_3 y la dolomita $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$. En regiones áridas y semiáridas, debido a la escasa precipitación, estos carbonatos suelen estar integrados en la fase sólida del suelo. Es importante conocer el contenido de carbonatos con relación a la fertilidad del suelo, ya que altos niveles de estos pueden causar deficiencias de fósforo en las plantas cultivadas (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Esto se corrobora con la relación que se observó entre los resultados de los sitios 1 al 6 (Cuadro 1), en donde aquellos con mayor porcentaje de CaCO_3 tuvieron menor contenido de P (sitios 1, 2, 3, 4 y 6). La misma tendencia se observó por Aguirre *et al.* (2019) en suelos poco profundos (0 cm - 10 cm), en donde a mayor porcentaje de CaCO_3 , menor contenido de P (22%, 0.90 mg kg^{-1} , respectivamente). En suelo alcalino, con alto porcentaje de CaCO_3 , se recomienda utilizar fertilizante de reacción ácida que permita reducir el pH del suelo a más neutro, entre los fertilizantes que cumplen este propósito están la urea, fosfato monoamónico, fosfato monopotásico, sulfato de potasio, sulfato de magnesio (Sánchez-García, 2009). De acuerdo con lo anterior, se infiere que los suelos de los 6 sitios han recibido la aplicación de fertilizantes de reacción ácida que permiten regular el pH alcalino, hacia más neutro (7.3 a 7.5) (Cuadro 1).

Respecto a la densidad aparente, los suelos 1, 2 y 5 presentaron los valores más altos, superando los 1.5 g cm^{-3} , mientras que los suelos 3, 4 y 6 presentaron valores adecuados (1 g cm^{-3} a 1.32 g cm^{-3}). Este parámetro es indicador del grado de compactación del suelo, valores superiores a 1.5 g cm^{-3} , implica problemas de compactación y como resultado, afecta el crecimiento de las raíces de las plantas (Reynolds Bowman, Drury, Tan y Lu, 2002). Los mismos autores, encontraron que en suelos franco arcillosos, con presencia de cultivo de largo plazo sin labranza, tienden a contener mayor densidad aparente y menor porosidad del suelo, esto por influencia del bajo contenido de carbono orgánico contenido en la materia orgánica; estos resultados coinciden con los bajos porcentajes de MO en la mayoría de los sitios y con los resultados de clase textural de los sitios 1, 2 y 5 (Cuadro 1). Si a este respecto, se considera que los cultivos de maguey establecidos en los sitios no son regularmente labrados, y con adición de escasa o nula fertilización (muchas veces por motivos económicos), se tienen plantas con problemas para desarrollar sistema radical vigoroso y con menor eficiencia en la absorción de nutrientes.

En lo referente a la textura, el valor obtenido del suelo de los sitios 1, 2 y 6 corresponde a franco arcilloso, el suelo del sitio 5 tiene textura franco arcillo arenosa, mientras que los sitios 3 y 4 son suelos francos. Estos resultados son similares a los obtenidos en suelos a profundidades de 0 cm - 50 cm, en colores y texturas similares

a las muestras analizadas por Mariles-Flores *et al.* (2016) y Torres-Zambrano *et al.* (2021), destacando los suelos franco arcillosos en suelos calcáreos de color blanco (1 y 2) y tierras de color negro con baja pedregosidad (6); la textura franco arcillo arenosa en suelos de color rojo (5) y francos en suelos con poca retención de humedad y en riesgo de marchitamiento en época de sequía.

Respecto al color, 67% de las muestras (1, 2, 3 y 4) presentó color gris y grisáceo, y 33% color rojo y negro (muestras 5 y 6 respectivamente). En cuanto más oscuro sea un suelo, tiene mayor contenido de materia orgánica (Lu *et al.*, 2023). El color rojo indica presencia de óxidos de hierro, que es el más común de los minerales en el suelo (Su *et al.*, 2021).

La prueba de esfericidad de Bartlett arrojó valor de p cercano a cero ($P < 0.05$), esto significa que las correlaciones entre las variables físico-químicas fueron significativas. Las correlaciones que se encontraron (Figura 1) fueron: pH con Da ($r = 0.83$) y con CIC ($r = -0.8$); MO con N ($r = 0.96$), con CIC ($r = 0.84$) y Mg ($r = 0.81$). La variable Ca se correlacionó con Color seco ($r = 0.91$) y con L ($r = -0.94$); Mg con $CaCO_3$ ($r = 0.83$) y $CaCO_3$ con A ($r = -0.89$). Color seco se correlacionó con Color húmedo ($r = 0.85$) y con L ($r = -0.91$).

La Da del suelo está relacionada de forma inversa con su porosidad y contenido MO, y de forma directa con el pH. Esto significa que, a mayor densidad del suelo, menor será la cantidad de poros o espacios disponibles para el desarrollo de las raíces. Los suelos con bajo contenido de MO suelen tener esta característica (INTAGRI, 2017). Además, en los lugares con pH alto (7.5) se observaron mayores valores de Da, entre 1.62 g cm^{-3} y 1.88 g cm^{-3} (Cuadro 1). Esta correlación de variables coincide con los valores altos obtenidos de densidad aparente de los sitios 1, 2 y 5, con probables problemas de compactación del suelo (baja porosidad) influenciados por bajo contenido de materia orgánica y mínima labranza del suelo.

La CIC es indicador de la cantidad de MO y del contenido de arcilla del suelo (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). El nivel de CIC refleja la capacidad de los suelos para retener cationes, lo cual influye significativamente en la disponibilidad y cantidad de nutrientes para las plantas. Estas correlaciones se confirman con los resultados obtenidos de los sitios 1, 3 y 5 (Cuadro 1), los cuales contienen los valores más bajos de materia orgánica y CIC. Este parámetro también se relaciona con el contenido de arcilla en el suelo, aquellos con textura franco arenosa contienen CIC de $6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ a $12 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ y los franco arcillosos de $14 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ a $30 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Reyes-Castillo *et al.*, 2023), estos se asemejan a los valores del sitio 5 para textura franco arcillo arenosa y los sitios 1, 2 y 6 para textura franco arcillosa.

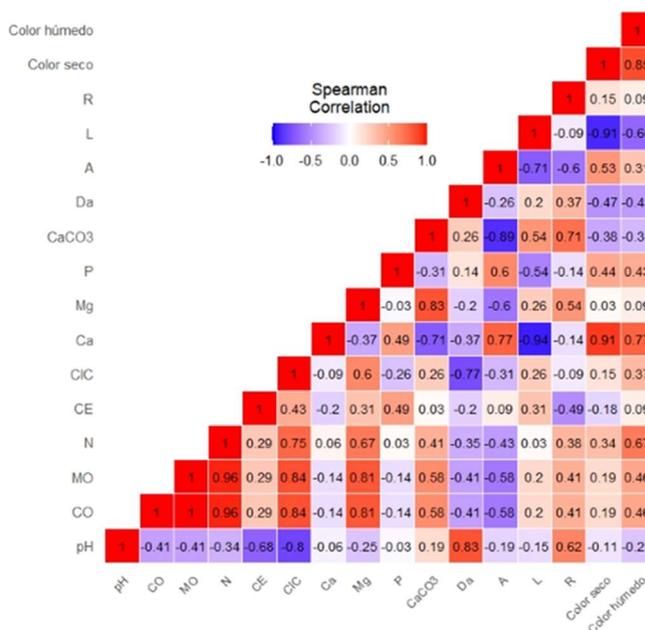


Figura 1. Diagrama de correlación de Spearman de las variables físico-químicas en las tres parcelas analizadas.
Figure 1. Spearman's correlation diagram of the physical-chemical variables in the three analyzed plots.

Los colores claros de los suelos de los sitios 1, 2, 3 y 4, presentaron valores altos en el contenido de calcio (Cuadro 1). En las regiones áridas, los suelos de colores claros tienden a presentar sales de calcio, son de espesor delgado y presentan baja actividad biológica (Soil Survey Staff, 2006). El color del suelo, puede ser indicador del contenido de nutrientes y de la presencia de minerales (Su *et al.*, 2021). Se ha encontrado que la presencia de calcio, se relaciona con el color blanco de los suelos (Mariles-Flores *et al.*, 2016).

Respecto al análisis de componentes principales (ACP), se observó que con dos componentes o dimensiones se cubrió más de 50% de la variabilidad de los datos, es decir, el componente 1, explicó 39.3% y el segundo 36.3%. Las variables que explican el primer componente son: CO, MO, N y CIC; mientras que para el componente 2, las variables fueron: Ca, P, CaCO₃, A, L, Color seco y Color húmedo (Cuadro 2).

Las tres parcelas a las que se les analizó los suelos, muestran diferenciación muy marcada en cuanto a su ubicación en el análisis multivariado (Figura 2). La parcela LH, perteneciente al municipio Xitlapehua (XIT), se observa bien separada del resto (triángulo sombreado de azul), mientras que las parcelas DC (rombo color rojo) y EST (triángulo color verde), aunque se ubican en el mismo municipio de San Luis Amatlán (SLA), se encuentran lejos una de la otra; de hecho, la parcela DC se ubica más cerca de LH que de EST.

La diferencia entre las parcelas se debe, primeramente, que se ubican en municipios diferentes, y en segunda que, las condiciones que se tomaron en cuenta para el establecimiento de los sitios de muestreo, como la pendiente, pedregosidad y color de suelo, tales condiciones edáficas son factores importantes que definen las características de cada área. En tercer lugar, las tres parcelas difirieron en el manejo y establecimiento de especies de magueyes, por ejemplo, la parcela LH y DC, que son en las que se encontró plantaciones de maguey, de acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 1, en LH se aplica muy poca materia orgánica, se aplican fertilizantes de reacción ácida, para tener pH cercano a la neutralidad y se labra el suelo de manera moderada, debido a los valores de Da ligeramente altos; en DC, se aplica más cantidad de materia orgánica que en LH, se aplica menos cantidad de fertilizante de reacción ácida debido a que tiene los valores de pH más altos, y el suelo se labra muy poco, debido a que en esta parcela se encontraron los valores más altos de densidad aparente. En contraste, el suelo de la parcela EST, aunque no se encontró plantaciones de maguey en el momento del muestreo, se observó que ha sido área trabajada anteriormente, por el alto contenido de MO; en comparación con las parcelas LH y DC, aplicaron fertilizante para regular el pH a más neutro (presentó el valor más bajo) y la

Cuadro 2. Análisis de componentes principales de los parámetros físico-químicos de suelos de tres parcelas.
Table 2. Analysis of principal components of the physical-chemical parameters of soils from three plots.

Variable	PC1	PC2	PC3
pH	-0.279	0.080	-0.434
CO	0.371	-0.125	-0.096
MO	0.371	-0.125	-0.096
N	0.361	-0.142	-0.124
CE	0.137	-0.056	0.355
CIC	0.389	-0.042	0.064
Ca	-0.127	-0.381	-0.109
Mg	0.286	0.196	-0.218
P	-0.196	-0.308	-0.140
CaCO ₃	0.205	0.349	-0.058
Da	-0.266	0.178	-0.276
Arena	-0.138	-0.363	0.180
Limo	0.127	0.377	0.123
Arcilla	0.075	0.118	-0.597
Color seco	0.150	-0.350	-0.223
Color húmedo	0.173	-0.303	-0.180

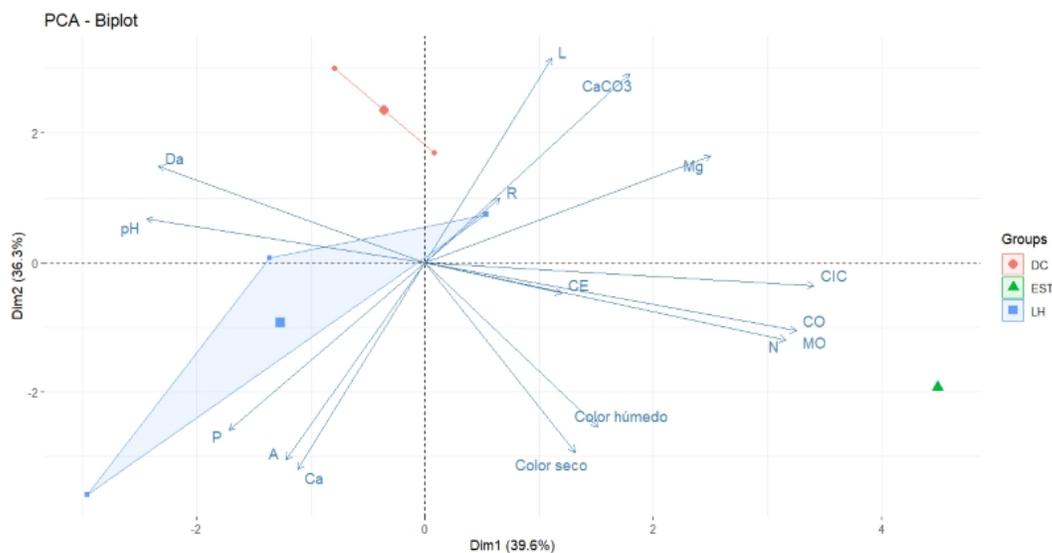


Figura 2. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables físico-químicas por grupos (parcelas).
Figure 2. Principal component analysis (PCA) of the physical-chemical variables by groups (plots).

tierra ha sido la más labrada, debido a que el valor de Da es adecuado conforme a la norma. A este respecto, se ha encontrado efecto significativo del manejo del suelo sobre las características físico-químicas de éste, el primer efecto se da en el aspecto físico y posteriormente, tiene efecto en el aspecto químico (Rodríguez-Rivera, Zaragoza, Clark y Ramírez, 2023); esto quiere decir que al intervenir en la textura, aireación del suelo y aplicación de fertilizantes, estos cambios físicos repercuten en cambios químicos, que se manifiestan en descomposición de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes, regulación del pH del suelo, disposición de poros para permitir el desarrollo radicular y el acceso de las plantas a los nutrientes y agua.

La diferencia de las características del suelo entre las parcelas se reafirma con las variables más representativas de cada parcela, las cuales se resaltan en elipses de cada color (verde para la parcela LH, rosa para DC y morado para EST) (Figura 3). Al comparar estos resultados y los obtenidos en el Cuadro 1, coinciden en que la parcela LH se caracteriza por tener suelos con altos valores en el contenido de Ca, los valores más altos de P, aunque de manera insuficiente y predominancia de la fracción arenosa en la textura del suelo; en la parcela DC los suelos contienen alto contenido de Mg, CaCO_3 y predominancia de la fracción limosa, y en EST el suelo tiene alto contenido de MO, CO, N y los suelos con la mayor CIC.

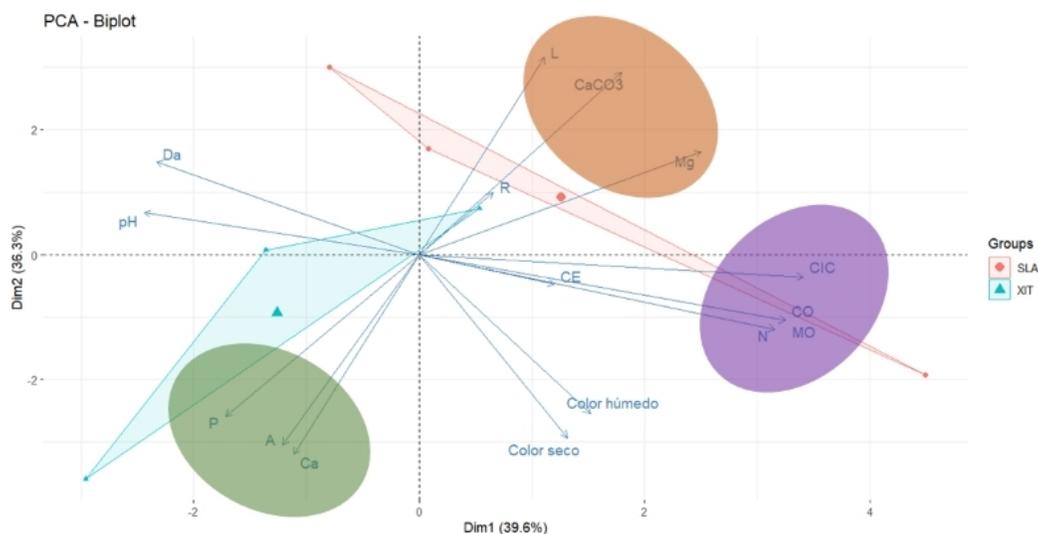


Figura 3. Análisis de componentes principales ACP de las variables físico-químicas por municipio.
Figure 3. Principal component analysis PCA of the physical-chemical variables by municipality.

De acuerdo con los resultados de la caracterización físico-química de las muestras de suelo, y comparándolos con la calidad de suelos en donde se produce el maguey silvestre para mezcal en la Soledad Salinas (Mariles-Flores *et al.*, 2016), concuerdan en que este cultivo está adaptado a condiciones de alta pedregosidad, alto contenido de calcio y magnesio, suelos neutros a ligeramente alcalinos, con bajos contenidos de materia orgánica y nitrógeno, sin problemas de salinidad; lo que explica por qué algunas especies silvestres sobreviven, pero con crecimiento y desarrollo limitado y rendimiento bajo, lo que permite identificar áreas de oportunidad en nutrición y textura del suelo para obtener ejemplares de maguey silvestre con mejores características para la producción de mezcal.

El ACP es herramienta de apoyo para explicar la interrelación existente entre las variables físico-químicas y con otros aspectos como el tipo de parcela y municipio, permitiendo encontrar información relevante que permite caracterizar los suelos de cada sitio de muestreo, con solo pocas variables.

CONCLUSIONES

Los suelos de la zona de estudio mostraron características físico-químicas no favorables desde el punto de vista agrícola, puesto que tuvieron bajos contenidos de materia orgánica, de nitrógeno y de fósforo, y altos niveles de calcio, magnesio, carbonato de calcio y capacidad de intercambio catiónico, sin embargo, los magueyes se han adaptado a estas condiciones. La caracterización físico-química de los suelos permitió identificar áreas de oportunidad en nutrición y recuperación de suelos mediante la adición de materiales orgánicos como: estiércol, compostas, abonos verdes, con la finalidad de favorecer el pH, densidad aparente, retención de humedad y disponibilidad nutrimental. Los análisis de suelos son una herramienta valiosa para evaluar la calidad del suelo y las necesidades nutricionales al establecer cultivos de maguey silvestre destinados a la producción de mezcal. Dado que no se encuentra en la literatura recomendaciones nutricionales específicas para el cultivo de maguey mezcalero en la zona de estudio, es imperativo llevar a cabo comparaciones exhaustivas con investigaciones relacionadas para determinar la idoneidad de los suelos para este propósito. El ACP permitió determinar la correlación entre las variables físico-químicas, así como identificar las variables que caracterizan cada parcela.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio actual están en disponibilidad del autor a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio (DGIPS) de la Universidad Autónoma Chapingo, financiamiento del proyecto de Desarrollo y Transferencia de Tecnología 23005-DTT-62 y 24012-DTT-62.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Metodología, investigación, escritura y preparación del borrador original: G.A.U. Conceptualización, escritura, revisión del borrador final y adquisición de fondos: A.P.L. Análisis formal, curación de datos y revisión y edición: P.S.G. y J.P.P.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo de beca de Estancia Posdoctoral Académica, a la Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio (DGIPS), por el financiamiento del proyecto de Desarrollo y Transferencia de Tecnología 23005-DTT-62 y 24012-DTT-62 de las cuales se obtuvieron recursos para llevar a cabo esta investigación. A los maestros mezcaleros Sr. Osvaldo García García y Jaime Favían Díaz por compartir sus conocimientos y su valiosa guía para la toma de muestras en la zona de estudio.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., & Díaz, C. J. (2019). Valoración del estado del suelo en zona de bosque seco tropical mediante técnicas analíticas y cromatogramas. *Información Tecnológica*, 30(6), 337-350. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600337>
- Bárbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (2018). *Importancia del pH y la conductividad eléctrica en los sustratos de las plantas*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-918-2
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total organic and available phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-45.
- COMERCAM (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal). (2023). *Informe estadístico 2023*. Consultado el 15 de marzo, 2024, desde https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-2023_PUBLICO.pdf
- Costa, S. E. V. G. A., Souza, E. D., Anghinoni, I., Carvalho, P. C. F., Martins, A. P., Kunrath, T. R., ... & Balerini, F. (2014). Impact of an integrated no-till crop-livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 43-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.001>
- Fregoso-Zamorano, B. E., Mancilla-Villa, O. R., Guevara-Gutiérrez, R. D., Moreno-Hernández, A., Figueroa-Bautista, P., Can-Chulim, Á., ... & Villalvazo-López, V. M. (2023). Caracterización edafológica con cultivo de agave azul (Agave tequilana Weber) en Tonaya y Tuxcacuesco, Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1592>
- García-Mendoza, A. J. (2018). México cuenta con 159 especies de agave; investigadores de la UNAM encontraron cuatro nuevas. Consultada el 24 de julio, 2023, desde https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_045.html
- Hernández-Rodríguez, A., Ochoa-Rodríguez, B., Ojeda-Barrios, D., Jiménez-Castro, J., Sánchez-Rosales, R., Rodríguez-Roque, M. J., & Sánchez-Chávez, E. (2021). Patrones para estimar la fertilidad del suelo mediante la técnica de cromatografía de Pfeiffer. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.844>
- Holland, J. M. (2004). The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.018>
- Horton, J. H., & Newson, D. W. (1953). A rapid gas evolution for calcium carbonate equivalent in liming materials. *Soil Science Society of America Proceedings*, 17, 414-415.
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (Eds.). (2012). *Handbook of soil sciences properties and processes*. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN: 978-0367412586
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2023). *Extensión territorial*. Consultada el 15 agosto, 2023, desde <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T/#>
- INTAGRI (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura). (2017). Fijación de potasio en el suelo. Consultada el 15 agosto, 2023, desde <https://www.intagri.com/articulos/suelos/fijacion-de-potasio-en-el-suelo>
- López-Báez, W., Reynoso-Santos, R., López-López, J., Villar-Martínez, R., Camas-Hernández, F., & García-Martínez, L. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Ciencias Agrícolas*, 50(4), 897-909.
- Lifeder (2023). Suelo calizo. Consultada el 15 agosto, 2023, desde <https://www.lifeder.com/suelo-calizo/>
- Lu, Y., Wang, X., Wang, M., Zhu, B., Zheng, M., Li, S., & Song, K. (2023). Soil color mapping based on Munsell system in the northeast of China. *Geoderma*, 439, 116669. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116669>
- Manna, M. C., Ghosh, P. K., & Acharya, C. L. (2003). Sustainable crop production through management of soil organic carbon in semiarid and tropical India. *Journal of Sustainable Agriculture*, 21(3), 85-114. https://doi.org/10.1300/J064v21n03_07
- Mariles-Flores, V., Ortiz-Solorio, C. A., Gutiérrez-Castorena, M. D. C., Sánchez-Guzmán, P., & Cano-García, M. Á. (2016). Las clases de tierras productoras de maguey mezcalero en la Soledad Salinas, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1199-1210.
- Morales, I., Martínez-Gutiérrez, G. A., Cortés-Martínez, C. I., Aquino-Bolaños, T., Escamirosa-Tinoco, C., & Hernández-Tolentino, M. (2017). Crecimiento de Agave *potatorum* cultivado en ambientes contrastantes y fertirrigación. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 18-27.
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2002). Antes NOM-021-RECNAT- 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. D. F.: SEGOB.
- R Core Team (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Reyes-Castillo, A., García-Silva, R., Zetina-Lezama, R., Espinoza-Ramírez, M., Reveles-Hernández, M., Aguado-Santacruz, G. A., ... & Patishtan-Pérez, J. (2023). Producción y uso de bioinsumos para la nutrición vegetal y conservación de la fertilidad del suelo (Libro Técnico No. 3, 494 p.). Tecomán, Colima, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Pacífico-Centro, Campo Experimental Tecomán. ISBN 978-607-37-1591-1
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S., & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1-2), 131-146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)
- Rodríguez-Rivera, V., Zaragoza-López, K., Clark-Tapia, R., & Ramírez-Santiago, R. (2023). Efecto del manejo forestal en las propiedades físico-químicas del suelo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico. *Madera y Bosques*, 29(1), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912476>
- Sánchez-García, P. (2009). *Nutrición de zarzamora* (1ª ed.). Texcoco, Estado de México, México: Colegio de Postgraduados.
- Soil Survey Staff (2006). *Keys to soil taxonomy* (10th ed.). Washington, D.C., USA: United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- Su, M., Meng, L., Zhao, L., Tang, Y., Qiu, J., Tian, D., & Li, Z. (2021). Phosphorus deficiency in soils with red color: Insights from the interactions between minerals and microorganisms. *Geoderma*, 404, 115311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115311>

-
- Torres-Zambrano, J. P., Cortés-Flores, J. I., Fernández, A. T., Volke-Haller, V. H., Ortiz-Solorio, C. A., & Jiménez-López, A. (2021). Caracterización físico-química y clasificación del suelo de ladera manejado bajo el sistema Milpa Intercalada con árboles frutales. *Teknos Revista Científica*, 21(2), 35-45. <https://doi.org/10.25044/25392190.1031>
- Uvalle-Bueno, J. X., Vélez-Gutiérrez, C., & Ramírez-Figueroa, A. (2007). Muestreo y análisis de suelo en plantaciones de agave. En F. O. Rulfo-Vilchis, J. F. Pérez-Domínguez, J. I. del Real-Laborde, & K. F. Byerly-Murphy (Eds.), *Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en la zona de denominación de origen del tequila* (pp. 37-55). Guadalajara, Jalisco, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.
- USDA (United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service). (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*. Washington, DC, USA: U.S. Department of Agriculture.
- Vera-Guzmán, A. M., Guzmán-Gerónimo, R. I., & López, M. G. (2010). Major and minor compounds in a Mexican spirit, young mezcal coming from two agave species. *Czech Journal of Food Sciences*, 28(2), 127-132.
- Walldey, A., & Black, I. A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.