



Análisis edafológico y morfométrico de poblaciones de frijol silvestre (*Phaseolus vulgaris* L.) en Durango, México

Iliana Ivette Lozano-Montelongo; Liliana Wallander-Compeán*; Norma Almaraz-Abaraca; Shaila Nayeli Pérez-Salinas; Rene Torres-Ricario; Marcela Verónica Gutiérrez-Velázquez

Instituto Politécnico Nacional CIIDIR. Unidad Durango, Av. Sigma 119, Fraccionamiento 20 de noviembre núm. 11, Durango, Durango, C. P. 34220. México.

Resumen

El conocimiento de las poblaciones silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y su relación con la calidad del suelo es esencial para la conservación de la biodiversidad y la mejora de cultivos. La identificación de suelos con altos contenidos de nutrientes como calcio, magnesio, potasio y otros elementos traza, pueden ser clave para el desarrollo de variedades de frijol más resistentes a condiciones adversas. En este entendido, el objetivo de esta investigación fue establecer un diagnóstico integrado de nutrientes en suelos donde crecen algunas poblaciones silvestres de frijol común en el estado de Durango y correlacionarlo con las características morfométricas de vainas y semillas. Se recolectaron muestras de suelo en cinco municipios del estado de Durango (El Mezquital, Súchil, Nombre de Dios, Canatlán y Nuevo Ideal), se tomó una muestra de suelo a una profundidad de 20 cm, se evaluó el contenido de materia orgánica, Ca, Mg, K, P, S, Zn, Cu, Fe, Mn. Se encontró que existe una gran variabilidad en suelos muestreados donde crecen las poblaciones silvestres de frijol común, siendo el municipio de Canatlán, en el que se encontró el mayor contenido de elementos benéficos para las plantas. En cuanto al análisis morfométrico de vainas y semillas las poblaciones colectadas en Nombre de Dios y El Mezquital fueron las que tuvieron mayor longitud, anchura y espesor. Las variaciones en las características morfológicas en relación con la calidad del suelo podrían permitir establecer estrategias para la recuperación y el mejoramiento del recurso genético en un contexto de cambio climático y seguridad alimentaria.

► **Palabras clave:** Nutrientes del suelo, variabilidad morfométrica, fluorescencia de rayos X, especies silvestres de *Phaseolus*.

Introducción

Las especies silvestres representan un recurso genético que puede utilizarse como fuente de variabilidad para mejorar la calidad de los cultivos actuales. Sus características adaptativas, como la resistencia a condiciones adversas tales como temperaturas extremas, sequías y ataques de insectos, son cruciales para el desarrollo de las plantas y la calidad de la semilla cosechada (Andelković et al., 2020; Arroyo-Peña et al., 2015); además, se ha reconocido su potencial para mejorar la calidad nutricional de las variantes domesticadas (Salgotra et al., 2021). Este beneficio potencial justifica la necesidad de realizar estudios detallados que respalden el uso de frijoles

silvestres y su vasta diversidad genética, permitiendo así la definición y evaluación de la estabilidad de sus características fenológicas, morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y biofísicas en relación con su calidad agronómica, culinaria y nutricional (Tomlekova, 2012).

En el ámbito del análisis de suelos, la espectroscopia de infrarrojo cercano (near-infrared spectroscopy [NIRS] por sus siglas en inglés) ha demostrado ser altamente eficaz para analizar simultáneamente diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Este método se utiliza en el rango de longitud de onda de 400 a 2 500 nm (600 – 4 000 cm^{-1}) y permite estimar propiedades como el carbono

total, el nitrógeno, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), así como la presencia de calcio, magnesio y otros elementos fundamentales para comprender la salud del suelo y su productividad (Shin et al., 2025; Mukherjee & Laskar, 2019; Nocita et al., 2015).

Por otro lado, la fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica para determinar la composición elemental de diversos materiales, incluidos los suelos (Jenkins et al., 2024). En los últimos años, la FRX ha adquirido numerosas aplicaciones edafológicas, ambientales y agronómicas, principalmente tras la aparición de equipos portátiles (pFRX) (Jenkins et al., 2024). Esta técnica se ha adoptado recientemente y se utiliza con éxito para la caracterización de suelos en todo el mundo, especialmente en suelos de países en desarrollo. La caracterización del suelo incluye la determinación completa de su composición elemental (nutrientes, elementos traza y elementos lantánidos) y permite estimar algunas de sus propiedades físicas y químicas (Hart & Siebecker, 2024). El objetivo de este estudio fue analizar las variaciones morfológicas de las vainas y semillas de formas silvestres de frijol común en relación con la calidad del suelo.

Materiales y Métodos

Área de estudio, muestras de suelo y procesamiento

Se recolectaron muestras de suelo donde crece el frijol silvestre común, así como vainas, en seis localidades representativas de las zonas sur, centro y norte del estado de Durango, México, entre septiembre y noviembre de 2020, durante la temporada de lluvias (junio-agosto), época en la que esta especie se desarrolla plenamente. En cada localidad se recolectó aproximadamente un kilogramo de suelo y entre 50 y 100 vainas. El Cuadro 1 muestra los datos geográficos de los sitios de muestreo. Las semillas de cada especie silvestre se depositaron en el herbario del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), donde fueron identificadas taxonómicamente.

Los suelos de Durango presentan características diversas influenciadas por varios factores ambientales y prácticas de uso de suelo (Cuadro 2). El regosol, es el tipo de suelo predominante en este Estado y específicamente en la cuenca hidrográfica de la zona de estudio, se asocia principalmente a la presencia de matorral seco y presenta pendientes promedio de 7.8 %. (Hurtado et al., 2013)

Análisis de suelo

Se recolectaron muestras de suelo de 1 000 g en cada sitio a una profundidad de 20 cm. Para el análisis, se agruparon dos muestras del mismo sitio. Las muestras se combinaron y almacenaron en bolsas de plástico para su posterior análisis. Los parámetros de suelo analizados fueron: sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), potasio (K), calcio (Ca), estroncio (Sr), magnesio (Mg), titanio (Ti), manganeso (Mn), zinc (Zn), sodio (Na), fósforo (P), azufre (S), rubidio (Rb), bario (Ba), circonio (Zr), arsénico (As), molibdeno (Mo), cobre (Cu), cloro (Cl) y cromo (Cr).

Las muestras de suelo recolectadas se secaron al aire libre, se homogeneizaron y se tamizaron para su análisis en laboratorio (Figura 1). La distribución del tamaño de las partículas del suelo se redujo mediante el método de la pipeta. (Remillard, 2022). Las muestras se prepararon para el análisis por el método de identificación de bandas principales. El análisis de las muestras se realizó según los parámetros indicados: Muestra: sólida, gas utilizado: He, tiempo de análisis: 7 min, tipo de análisis: análisis completo.

Datos morfométricos *in situ*

La recolección de datos *in situ* se realizó en siete plantas por localidad, muestreando tres hojas trifoliadas por planta, para un total de veintiún hojas trifoliadas por población colectada. En cuanto a las estructuras reproductivas (vainas y semillas), se colectaron 100 vainas y 100 semillas por colecta. Las dimensiones de las hojas, vainas y semillas se midieron con un calibrador digital (Surtek, 0-150 mm; modelo 122200). El peso de las semillas se determinó con una balanza analítica

Cuadro 1. Origen y coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de las poblaciones de frijol utilizadas en el análisis del suelo.

Municipio	Latitud N*	Longitud O*	Altitud (m)	Temperatura Max/Min °C**	Precipitación (mm)**
El Mezquital	23° 26' 48.1''	104° 21' 49.5''	1400	42.1/-0.2	391.8
Súchil 1	23° 39' 24.7''	104° 02' 20.9''	1963	35.7/-6.4	511.0
Súchil 2	23° 39' 02.4''	104° 02' 26.7''	1964	35.7/-6.4	511.0
Nombre de Dios	24° 04' 71''	104° 14' 23''	1877	36.7/-3.5	446.6
Canatlán	24° 51' 03.4''	104° 51' 44.8''	2039	35.1/-7.3	525.6
Nuevo Ideal	24° 45' 11.9''	105° 00' 05.6''	2037	36.2/-5.0	692.5

* Los datos se tomaron con coordenadas WGS84

** Datos obtenidos de CONAGUA, promedio para el año 2018.

Cuadro 2. Tipo de suelo según el libro Vegetación y ecorregiones de Durango (Elizondo *et al.*, 2007).

Municipio	Tipo de suelo	Características	Región	Referencias
El Mezquital	Leptosol	El suelo tiene bajo contenido de materia orgánica y nutrientes, lo cual puede verse influenciado por factores locales como el material parental y la vegetación.	Climas secos o templados	Warren, 2022; Kimeklis <i>et al.</i> , 2021
Canatlán				
Súchil 1	Regosol	Tienen bajo contenido de materia orgánica y nutrientes, lo que los hace menos adecuados para la agricultura, ya que no hay fertilizantes que permitan incorporar materia orgánica.	Laderas y regiones con actividad volcánica	Pedron <i>et al.</i> , 2024
Súchil 2				
Nombre de Dios	Kastañozem	Estos suelos muestran una alta movilidad de elementos químicos (EQ) como Ca, Mn y K, que están débilmente unidos por compuestos solubles en ácido.	Semiárido	Kimeklis <i>et al.</i> , 2021
Nuevo Ideal	Pheozem	Estos suelos suelen tener una textura que favorece la producción agrícola, lo que los hace aptos para diversos cultivos.	Templado	Hu <i>et al.</i> , 2021

Fuente: Información edafológica tomada de INEGI 2020.

**Figura 1. Tipos de suelo en donde crecen poblaciones silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris*).**

(Velab, modelo Ve204, con capacidad máxima de 220 g y mínima de 0.1 g, con una precisión de 0.0001 g).

Espectroscopia por transformada de Fourier

Las muestras se analizaron mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR), se utilizó un espectrómetro FTIR (Vertex 70, Bruker) en modo de reflectancia total atenuada (ATR) para obtener información sobre los grupos funcionales y las estructuras químicas presentes. El procesamiento de la señal, el ajuste de picos y de superficies, el análisis estadístico y el procesamiento de señales se realizaron con el software Origin. Los espectros se registraron entre 4 000 y 600 cm⁻¹, con una resoluciónpectral de 4 cm⁻¹. Las muestras se almacenaron en bolsas de papel y se transportaron al laboratorio para su posterior análisis. El Cuadro 1 muestra la información

geográfica de las localidades a las que pertenecían las muestras de frijol silvestre común. Las muestras no requirieron ningún procedimiento de preparación para el análisis en el espectro infrarrojo; simplemente se molieron en un mortero y se colocaron sobre la superficie del vidrio ATR.

Tratamiento espectral

Una vez obtenidos los espectros FTIR (espectros en bruto), se aplicó una normalización mediante variables aleatorias normales estandarizadas (SNV) utilizando el programa Unscrambler X versión 10.3 (CAMO Software AS). Posteriormente, se calculó la segunda derivada de cada espectro mediante el algoritmo de Savitzky-Golay, que aplica un ajuste sucesivo de subconjuntos adyacentes de puntos de datos con un polinomio de bajo grado por mínimos cuadrados a la aproximación lineal.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza con los datos morfométricos y una prueba de comparación de medias mediante la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$), utilizando XLSTAT 2021.2.1 (Addinsoft, 2025). Para evaluar la contribución de cada variable (en cada tipo de dato) y establecer las diferencias entre las colectas de frijol común silvestre. Se construyeron matrices y se sometieron a un análisis de componentes principales (PCA) utilizando el programa Past 3.0, y para establecer la similitud entre las colectas de frijol silvestre, se analizaron las mismas matrices y se sometieron a un análisis de conglomerados, utilizando el mismo programa (Hammer et al., 2001).

Resultados y Discusión

Propiedades fisicoquímicas del suelo

Los resultados del análisis fisicoquímico de suelo de cada sitio de muestreo se presentan en el Cuadro 3. Se obtuvieron diferencias significativas entre las poblaciones. Los suelos presentaron bajas concentraciones de P y Na, pero altas de K, Si y Al. En cuanto al Mg, el suelo del municipio de Canatlán tuvo un mejor nivel que resto de los suelos evaluados.

El Cuadro 3 muestra los resultados del análisis de difracción de Rayos X, el suelo donde crece el frijol silvestre en Canatlán obtuvo los elementos más benéficos (Si, Al, Ca,

Mg, K, P, S, Zn, Cu, Fe, Mn) necesarios para un óptimo crecimiento de la planta, y el municipio de El Mezquital tuvo la menor cantidad de elementos en el suelo.

Los suelos de Durango presentan una variabilidad significativa en el contenido de materia orgánica y niveles de nutrientes, influenciados por factores locales como el tipo de vegetación y el material parental. Las investigaciones indican que los diferentes tipos de suelo, incluidos los leptosoles, luvisoles y vertisoles, muestran características distintas en el almacenamiento de carbono orgánico y la disponibilidad de nutrientes (Kimeklis et al., 2021; Kalinichenko et al., 2019). Los suelos con mayor contenido de materia orgánica fueron los de Súchil (Regosol) y Nombre de Dios (Kastañozem), y los de menor contenido fueron El Mezquital y Canatlán (Leptosoles). Se encontró arsénico (As) en el suelo de Nuevo Ideal, en concentraciones relativamente altas (0.0162 %), y en menor concentración en el suelo de Súchil (0.0136 %). En general, los suelos donde crecen las formas de frijol común silvestre tienden a ser de baja fertilidad (Beaver et al., 2021; Romanyà & Casals, 2020).

Según la guía de Yang et al. (2024) para la regeneración de germoplasma, el contenido de bases intercambiables (Ca, Mg y K) define en gran medida el grado de fertilidad del suelo. Los suelos fértiles se caracterizan por tener un alto contenido de Ca y Mg. De los suelos evaluados, el de Súchil obtuvo el mayor porcentaje de Ca (6.58 %), mientras que el mayor contenido de Mg se encontró en

Cuadro 3. Elementos encontrados en el suelo expresados en porcentaje (%).

Parámetro	El Mezquital	Súchil 1	Súchil 2	Nombre de Dios	Canatlán	Nuevo Ideal
Si	54.00 ± 1.55 b	59.50 ± 0.56 a	62.5 ± 2.89 a	44 ± 0.21 c	62.00 ± 0.21 a	52.00 ± 0.77 b
Al	15.00 ± 1.27 b	12.05 ± 0.49 c	10.6 ± 0.63 c	17.95 ± 0.91 a	11.95 ± 0.92 c	16.45 ± 0.63 ab
Fe	13.80 ± 0.98 b	7.75 ± 0.74 c	7.63 ± 0.65 c	24.78 ± 0.55 a	8.50 ± 0.56 c	13.20 ± 0.14 b
K	8.63 ± 0.79 c	9.86 ± 0.61 b	10.72 ± 0.11 a	2.38 ± 0.41 d	9.57 ± 0.41 b	6.44 ± 0.29 c
Ca	3.17 ± 1.06 c	6.38 ± 0.28 a	4.32 ± 0.21 bc	5.81 ± 0.01 ab	3.65 ± 0.01 c	7.62 ± 0.41 a
Sr	0.05 ± 0.043 bc	0.04 ± 0.005 b	0.004 ± 0.004 c	0.05 ± 0.01 bc	0.07 ± 0.01 b	0.27 ± 0.03 a
Mg	1.26 ± 0.13 b	0.57 ± 0.09 cd	0.45 ± 0.03 d	0.85 ± 0.14 c	1.69 ± 0.14 a	1.62 ± 0.23 a
Ti	0.84 ± 0.14 c	0.75 ± 0.01 c	0.643 ± 0.15 a	2.18 ± 0.06 a	0.89 ± 0.06 c	1.74 ± 0.32 b
Mn	0.25 ± 0.02 a	0.25 ± 0.01 a	0.25 ± 0.11 a	0.28 ± 0.06 a	0.23 ± 0.06 a	0.23 ± 0.007 a
Zn	0.08 ± 0.003 a	0.05 ± 0.007 b	0.05 ± 0.005 b	0.07 ± 0.004 a	0.05 ± 0.004 b	0.05 ± 0.01 b
Na	1.42 ± 0.21 a	1.29 ± 0.05 ab	1.45 ± 0.13 a	0.41 ± 0.18 d	0.64 ± 0.18 cd	0.97 ± 0.14 bc
P	0.148 ± 0.03 cd	0.26 ± 0.01 a	0.002 ± 0.03 e	0.12 ± 0.01 d	0.19 ± 0.01 bc	0.20 ± 0.006 bc
S	0.15 ± 0.005 bc	0.15 ± 0.03 abc	0.13 ± 0.01 c	0.23 ± 0.06 ab	0.23 ± 0.06 a	0.11 ± 0.02 c
Rb	0.07 ± 0.00 a	0.07 ± 0.002 a	0.08 ± 0.007 a	0.03 ± 0.00 c	0.07 ± 0.00 a	0.05 ± 0.006 c
Ba	0.47 ± 0.05 c	0.32 ± 0.005 cd	0.54 ± 0.02 a	0.14 ± 0.05 b	0.25 ± 0.05 cd	1.11E-16 ± 0.00 c
Zr	0.55 ± 0.03 a	0.16 ± 0.004 b	0.16 ± 0.005 b	0.09 ± 0.006 c	0.13 ± 0.006 b	0.2 ± 0.006 b

*Unidades en porcentajes (%). Parámetros fisicoquímicos: silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), potasio (K), calcio (Ca), estroncio (Sr), magnesio (Mg), titanio (Ti), manganeso (Mn), zinc (Zn), sodio (Na), fósforo (P), azufre (S), rubidio (Rb), bario (Ba), circonio (Zr), arsénico (As), molibdeno (Mo), cobre (Cu), cloro (Cl), cromo (Cr). Análisis de comparación medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Solo en el caso del manganeso (Mn) no se observó diferencia significativa ($P = 0.776$), para los demás parámetros, la diferencia fue significativa.

Canatlán (1.59 %). Los suelos muy ácidos generalmente presentan bajo contenido de Ca y Mg, como en los suelos de Nuevo Ideal donde se encontró el menor contenido de Ca (1.92 %), mientras que El Mezquital tuvo el menor contenido de Mg (0.359 %).

En los resultados de esta investigación el suelo de Nombre de Dios tuvo el mayor porcentaje de fósforo (0.388 %), en comparación con el resto de los suelos evaluados. El fósforo es un elemento de gran importancia para la nutrición vegetal y frecuentemente presenta limitaciones en la fertilidad del suelo (Kaur *et al.*, 2017). Los suelos muy ácidos, como los Acrisoles rojos, y los suelos de origen volcánico como los Andosoles, tienen una alta capacidad de fijación de P, lo que disminuye aún más su disponibilidad para las plantas (Alakeh *et al.*, 2022).

Morfometría de las estructuras reproductivas

La comparación entre las características morfométricas de las vainas *in situ* de las seis formas silvestres de frijoles silvestres analizadas reveló que existen diferencias significativas en las características de la vaina (longitud, anchura y grosor) y de semilla (longitud, anchura y grosor). (Figura 2).

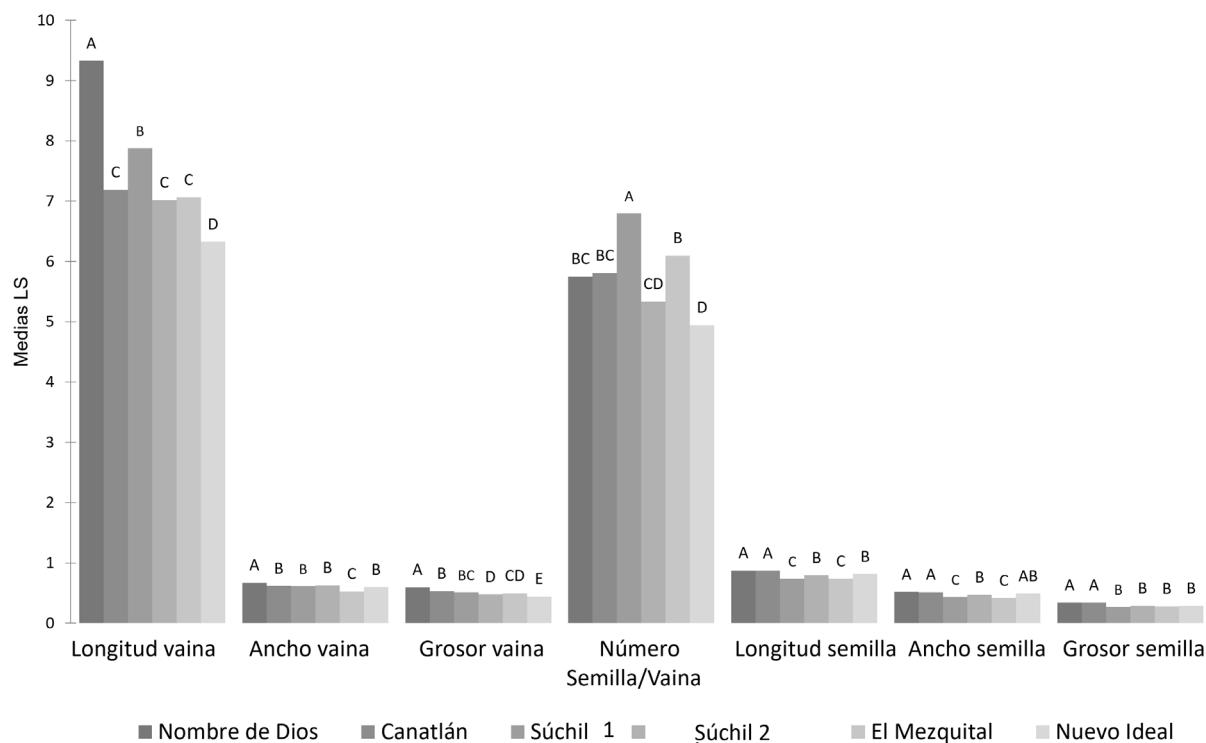
Las diferencias en los tipos de suelo de los lugares donde se colectaron las formas silvestres de frijol común se observan en el Cuadro 1. En el municipio de Nombre de Dios, el tipo de suelo es Kastañozem (tierra color café),

es un suelo alcalino propio de zonas semiáridas, mientras que en el municipio de Canatlán predomina el Leptosol, suelo muy pedregoso con una profundidad menor a 10 cm, que requiere abundante agua. El suelo de Canatlán posee altas concentraciones de elementos benéficos para las plantas, lo que da como resultado semillas con características excepcionales.

Se observaron características diferentes en las formas silvestres analizadas. El tamaño de los folíolos coincide con lo reportado por Meza-Vázquez *et al.* (2015), Wallander *et al.* (2022) y Morales-Santos *et al.* (2017), en cuanto a la longitud esta varía de 3.1 a 8.5 cm y el ancho entre 0.5 a 6 cm.

Se encontró una amplia variación en la longitud de las vainas (Figura 2) esta fue mayor a la reportada por Lépiz & Ramírez (2010), que va de 1.2 a 6.3 cm. También se observaron diferencias en longitud, ancho y grosor de las semillas, lo que coincide con los resultados obtenidos por Freytag & Debouck (2002) y Lépiz *et al.* (2010), estos autores reportan que la morfometría de las formas de frijol silvestre común, son más pequeñas, con longitudes que varían de 0.30 a 0.79 cm y 0.30 a 0.54 cm de ancho.

La morfometría de las hojas trifoliadas se muestra en la Figura 3. Estudios previos han demostrado que el folíolo central es más grande que los folíolos izquierdo y derecho, lo cual coincide con los resultados de esta investigación. Las colectas de El Mezquital y Súchil tienen un tamaño de



Letras diferentes indican diferencias significativas entre poblaciones, según el análisis de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

Figura 2. Datos morfométricos de vainas y semillas de seis formas silvestres de frijol cultivadas *in situ* en Durango.

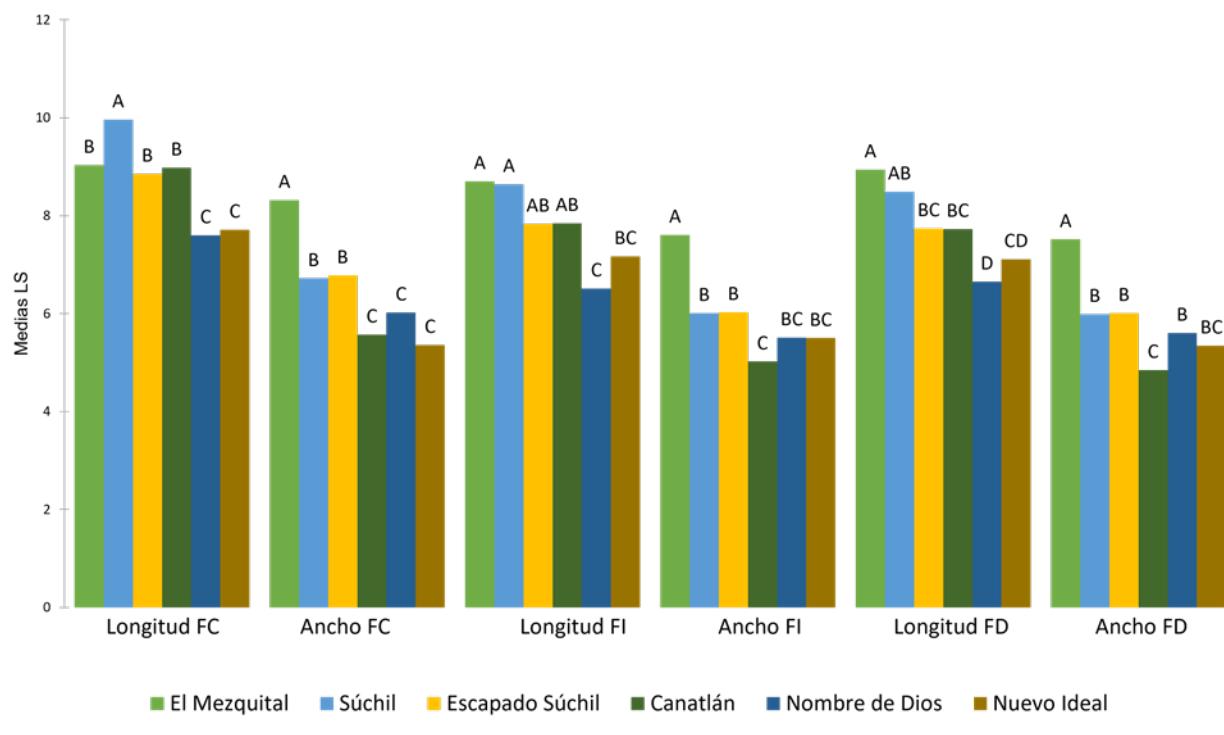


Figura 3. Datos morfométricos de hoja, foliolo central (FC), foliolo izquierdo (FI) y foliolo derecho (FD) de seis poblaciones de frijol silvestre establecidas *in situ* en Durango, México.

hojas más grandes, mientras que las de Canatlán fueron las más pequeñas. Esta información resulta útil, ya que hay especies de *Phaseolus* spp. que se utilizan generalmente como forraje para ganado.

Análisis de componentes principales y agrupación.

La variación química global entre las poblaciones analizadas se evaluó mediante un análisis de componentes principales (PCA) (Figura 4A). El PCA se graficó en dos dimensiones, basándose en las características morfométricas de vaina y semilla. Los componentes principales PC1 y PC2 explicaron el 86.80 % de la varianza total (61.32 % y 25.48 %, respectivamente).

El PC1 agrupó a las poblaciones colectadas en dos subgrupos y el PC2 en otro grupo con dos subgrupos. Se observa que dentro del grupo PC1 claramente separó a Súchil 1, y a Súchil 2 y El Mezquital, en el grupo 2 PC2 se separó a Nombre de Dios, Canatlán y Nuevo Ideal. El PC1 se correlacionó con las características morfométricas de hoja y número de semillas por vaina, y tuvo un mayor poder discriminador (4.82). El PC2 se correlacionó con las características morfométricas de la vaina (longitud, ancho y grosor) y de semilla (longitud, ancho y grosor), y tuvo un menor poder discriminador (3.43). Los resultados del análisis de conglomerados, se muestran en la Figura 4B. Estos resultados confirman la discriminación entre las

poblaciones silvestres, mostrando al mismo tiempo que existe una mayor similitud entre las poblaciones colectadas en Súchil 1, Súchil 2, Canatlán y Nuevo Ideal, diferentes de las formas silvestres que se colectaron en El Mezquital y Nombre de Dios.

Correlación entre variables fisicoquímicas y ambientales.

Se realizó un análisis de correspondencia múltiple (MCA) para determinar la relación entre estas variables.

El CCA mostró que los ejes CCA1 y CCA2 explicaron el 94.70% de la varianza total (Figura 5). El eje CCA1 se asoció principalmente con parámetros fisicoquímicos del suelo. Las variables con correlación significativa ($P \leq 0.05$) fueron Mn ($r = 0.73$), Al ($r = 0.96$), Si ($r = 0.44$) y Fe ($r = 0.11$).

En el análisis de agrupamiento, se observaron principalmente tres grupos, según la correlación de las variables morfométricas, la población de Nombre de Dios se encuentra separada del resto de las demás poblaciones, ya que obtuvo valores muy variables en los elementos encontrados en el análisis de suelo, alto contenido de Si (63.2 %), K (11.7 %), Na (1.27 %), y también se encontró un bajo contenido de Al (12.1 %), Fe (7.11 %), Sr (0.0256 %), Mg (0.359 %) y Mn (0.172 %), entre otros, las variables morfométricas asociadas fueron: mayor tamaño de semillas y vainas en comparación con las demás poblaciones

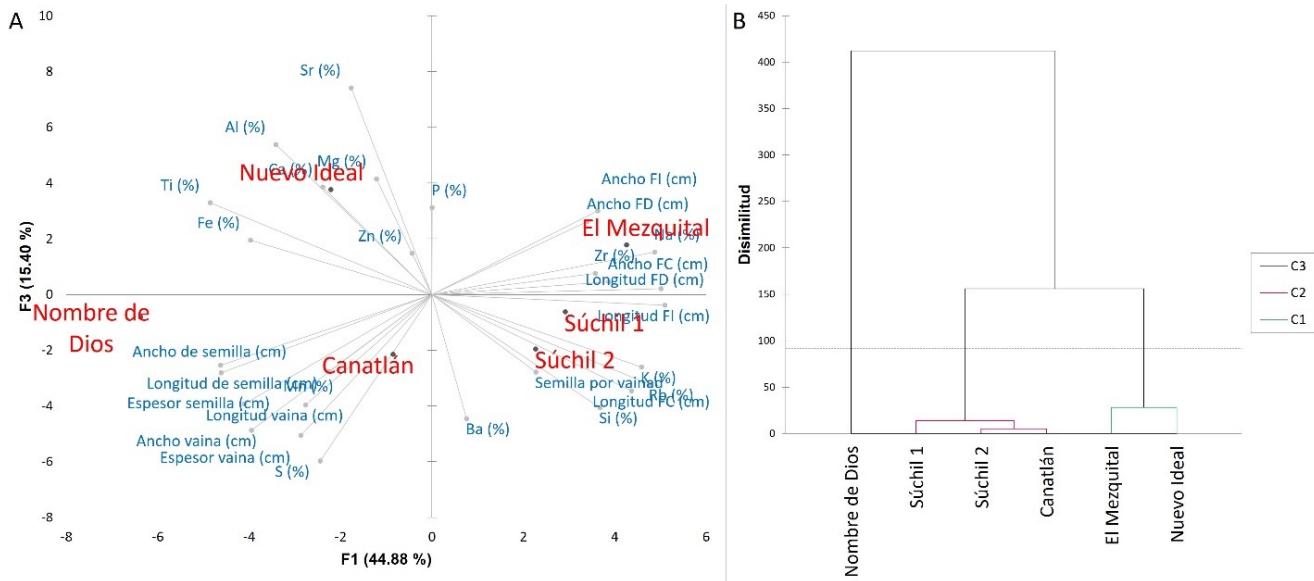


Figura 4. A) Resultados del análisis de componentes principales y B) Dendrograma del análisis de conglomerados del análisis de suelo, hojas, morfología de vainas y semillas de seis poblaciones silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) en Durango, México.

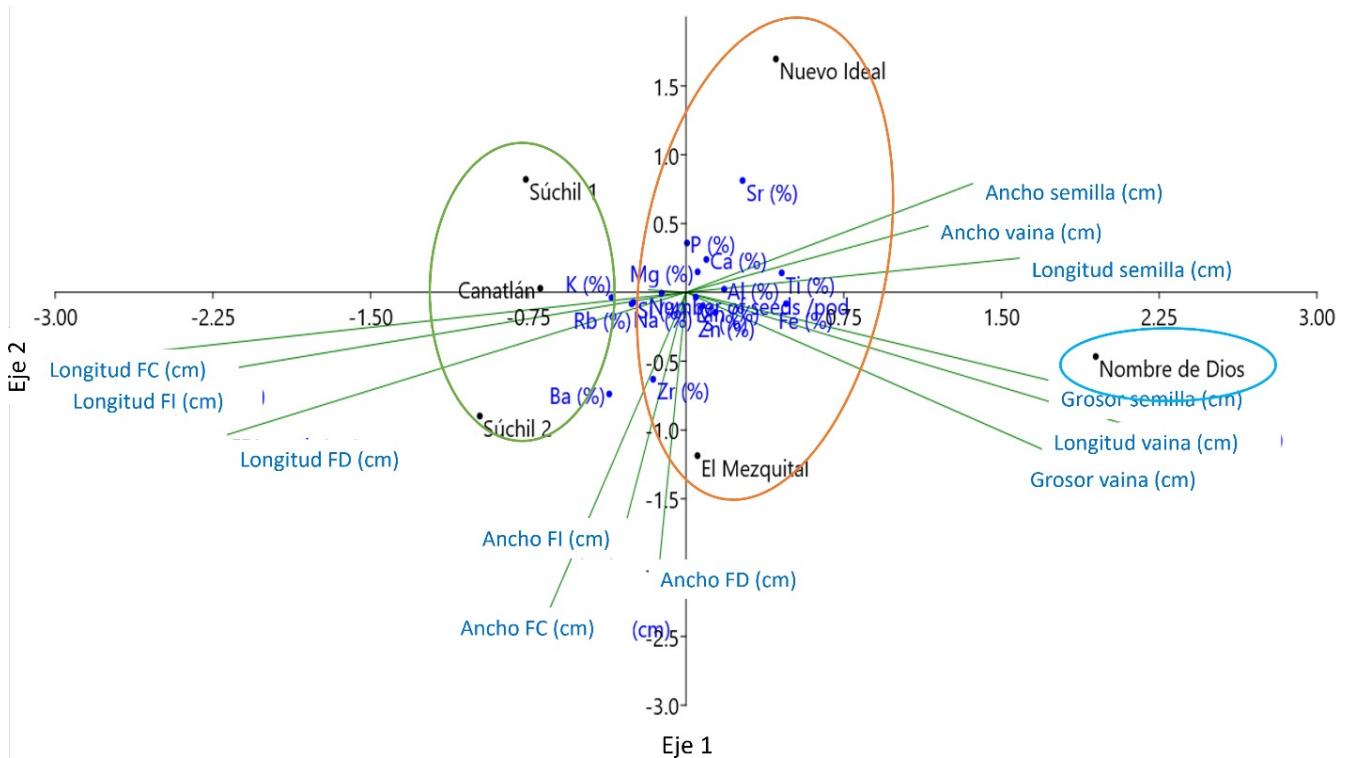


Figura 5. Resultados del Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de características morfométricas y fisicoquímicas del suelo de seis poblaciones silvestres de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) de Durango, México.

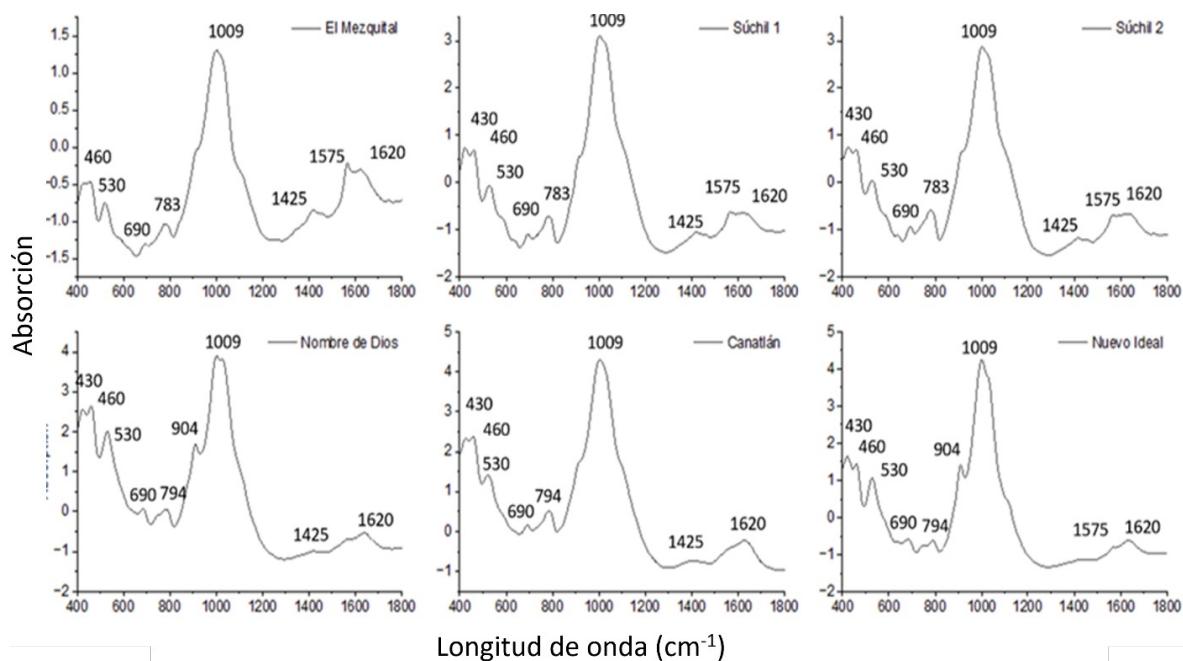


Figura 6. Espectros FTIR de semillas de frijol silvestre representados en la región de huella dactilar biológica (1 800-400 cm⁻¹) de diferentes lugares en Durango.

Cuadro 4. Bandas vibracionales correspondientes al análisis de la longitud de onda de 1800 a 400 en el suelo analizado.

Número de onda (cm ⁻¹)	Banda vibratoria	Molécula	Modo de vibración	Referencia
1 1620	(C=C)	Amida I (Proteína)	extensión	Kumari & Ramakrishnan, 2023; Dovbeshko <i>et al.</i> , 2023
2 1575	N-H	Amida II (Proteína) Absorción de la proteína amida II 3 - predominantemente Hoja b de la amida II	extensión	Chatterley <i>et al.</i> , 2022
3 1425	C-H (-CH ₃)	compuestos alifáticos, particularmente en metil	vibraciones de flexión	Bakshi <i>et al.</i> , 2014
4 1029	indicative of C-O and C-OH	ácidos carboxílicos	extensión	Duan <i>et al.</i> , 2024
5 1009	C-OH	enlaces en oligosacáridos como la manosa y la galactosa	extensión	Schindler <i>et al.</i> , 2017
6 904	C-H d (monosustituido)	Alqueno	flexión	Dovbeshko <i>et al.</i> , 2023
7 794	C-H d (meta)	Doblamiento fuera del plano del CH aromático; aumentar el número de onda con el aumento grado de sustitución	flexión	Sharma & Kumar, 2023
8 690	Vs Fe-O	Fe-O-(H)	flexión	Margenot <i>et al.</i> , 2017
9 530	C=C, C-Br t	Torsión y torsión anular del fenilo (1), Haluros de alquilo	estiramiento	Siddique, 2024
10 460	BrCN	Se centra principalmente en el análisis rovibracional de los isotopómeros de BrCN y sus datos espectrales.	estiramiento	Siddique, 2024; Fayt <i>et al.</i> , 2002
11 430	C-OH,δs (O-P-O)	Grupo metoxi de tosión, PO4 3- en fosfatos	flexión	Siddique, 2024

silvestres analizadas. Los subgrupos formados agrupan a los de la misma localidad, Súchil 1 y 2.

Espectroscopía por transformada de Fourier

Los espectros FTIR de suelo evaluados mostraron diferentes picos. Estos se encontraron en todos los suelos analizados a 1 004, 785, 694, 521, 459, y 426 cm⁻¹ (Figura 6). En Nombre de Dios y Nuevo Ideal se identificaron nueve picos, uno más que en el resto de los suelos analizados. Los espectros se agruparon en tres categorías basándose en el número y la distribución de los picos: Grupo 1, compuesto por Súchil 1, Súchil 2 y Canatlán; Grupo 2, incluye a Nombre de Dios y Nuevo Ideal; y Grupo 3, representado por El Mezquital, cuyo espectro presenta picos distintivos.

Los grupos funcionales encontrados en las muestras después de la extracción se muestran en el Cuadro 4. Los distintos picos observados en las muestras de suelo corresponden a diferentes vibraciones moleculares, cada uno característico de enlaces específicos en la molécula. Los resultados indicaron que muchos de los grupos funcionales estaban asociados.

La banda observada entre 1 632 y 1 621 cm⁻¹ puede servir como un indicador de suelo resistente al agua, lo cual se relaciona directamente con la capacidad de retención de humedad (Margenot *et al.*, 2017). La relación de las bandas de absorción del C=C aromático a 1 632 y 1 621 cm⁻¹ han sido utilizadas como índice de humificación (Serafimova & Dedelyanova, 2023). Los filosilicatos son la clase más abundante de minerales en el suelo. Están constituidos por aluminio coordinado con oxígeno unido a grupos hidroxilo, acoplado con películas de silicio en coordinación tetraédrica con el oxígeno. (Margenot *et al.*, 2017). Esto se debe a que los silicatos de capa 2:1 presentan un único pico de amplia absorción entre 1 029–1 009 cm⁻¹.

Conclusión

La población de frijol silvestre común con mayor tamaño de hojas trifoliadas, semillas y vainas fue la de El Mezquital, mientras que la población silvestre con vainas y semillas más pequeñas correspondió a la colectada en Nuevo Ideal. En este último sitio, el análisis de suelo reveló una de las mayores deficiencias de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.

Se compararon las características morfométricas de vainas y semillas de *Phaseolus vulgaris* silvestre en relación con el tipo de suelo en el que se desarrollan. Las poblaciones colectadas en suelos con mayor contenido de nutrientes produjeron vainas y semillas de mayor tamaño, en comparación con las provenientes de suelos con mayor deficiencia de elementos benéficos, las cuales obtuvieron valores morfométricos inferiores.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI y al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo en la realización de este trabajo.

Referencias

- Addinsoft (2025). XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA. <https://www.xlstat.com/es>
- Alakeh, M. N., Tamungang, N. E. B., & Alongifor, F. J. (2022). Phosphorus Adsorption and Its Correlation with Physicochemical Properties of Volcanic-Influenced Soils of Meupi-Awing in Northwest Cameroon. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/6890503>
- Andelković, V., Jovović, Z., & Przulj, N. (2020). Significance of wild relatives' genetic variability in cultivated plants breeding. <https://doi.org/10.7251/eoru2001091a>
- Arroyo P, Peña V. C B, Sánchez, U. A B. (2015). Efecto del potencial de agua en la germinación de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre y domesticado. *Rev. Multidisciplinaria del Consejo de Investigación*. v17: 237-239.
- Bakshi, K., Liyanage, M. R., Volkin, D. B., & Middaugh, C. R. (2014). Fourier Transform Infrared Spectroscopy of Peptides (Vol. 1088, pp. 255–269). Humana Press, Totowa, NJ. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-673-3_18
- Beaver, J. S., González-Vélez, A., Lorenzo-Vázquez, G., Macchiavelli, R., Porch, T. G., & Estevez-de-Jensen, C. (2021). Performance of Mesoamerican bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines in an unfertilized oxisol. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 701–718. <https://doi.org/10.15517/AM.V32I3.44498>
- Chatterley, A. S., Laity, P. R., Holland, C., Weidner, T., Woutersen, S., & Giubertoni, G. (2022). Broadband Multidimensional Spectroscopy Identifies the Amide II Vibrations in Silkworm Films. *Molecules*, 27(19), 6275. <https://doi.org/10.3390/molecules27196275>
- Dovbeshko, G. I., Afonina, U. K., Olenchuk, M. V., Kupchak, I. M., Gnatyuk, O. P., Monastyrskyi, G. P., ... & Morozovska, A. N. (2023). Effect of 2D-WS2 Nanoparticles on a Local Electrical Field at a Membrane Vicinity: Vibrational Spectroscopy Data. *The Journal of Physical Chemistry C*, 128(3), 1131–1138.
- Duan, J., Sontarp, E. J., & Myneni, S. (2024). Detecting Structural Environments of Carboxyl Groups in Dissolved Natural Organic Molecules. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00609>
- Elizondo, M. S. G., Elizondo, M. G., & Linares, M. A. M. (2007). Vegetación y ecorregiones de Durango. Durango, México: Plaza y Valdés.
- Freytag, G. F., & Debouck, D. G. (2002). Taxonomy, distribution, and ecology of the genus *Phaseolus* (*Leguminosae-Papilionoideae*) in North America, Mexico and Central America (Sida Botanical Miscellany 23). Botanical Research Institute of Texas.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. (2001). Past: paleontological statistical software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1–9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Hart, E. J., & Siebecker, M. G. (2024). Portable X ray fluorescence spectrometry accurately measures metal concentrations in

- aqueous Mehlich III soil extraction solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 88(6), 2336-2342.
- Hu, N., Zhao, L., Li, Q., Jiang, Y.-M., Sui, B., & Wang, H. (2021). Changes in carbon fractions with corn straw incorporation and comparison of carbon sequestration efficiency in Phaeozem derived from two parent materials in China. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(14), 1-10. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-07587-1>
- Hurtado, P. B., Cohen, I. S., Arriaga, G. E., Valle, M. Á. V., & Ibarra, M. A. I. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. 13(2), 125-132. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5714655>
- Jenkins, E., Galbraith, J., & Paltseva, A. (2024). Portable X-Ray Fluorescence as a Tool for Urban Soil Contamination Analysis: Accuracy, Precision, and Practicality. *EGUphere*, 2024, 1-26.
- Kalinichenko, V. P., Glinushkin, A. P., Sokolov, M. S., Zinchenko, V. E., Minkina, T. M., Mandzhieva, S. S., ... & Il'ina, L. P. (2019). Impact of soil organic matter on calcium carbonate equilibrium and forms of Pb in water extracts from Kastanozem complex. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 2717-2728.
- Kaur, G., Prabhavathi, V., Barnel, K., & Sarwat, M. (2017). Phosphate Signaling in Plants: Biochemical and Molecular Approach (pp. 83-110). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42183-4_4
- Kimeklis, A. K., Gladkov, G., Zverev, A., Kichko, A., Andronov, E. E., Ergina, E. I., Kostenko, I. V., & Abakumov, E. (2021). Microbiomes of different ages in Rendzic Leptosols in the Crimean Peninsula. *PeerJ*, 9. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.10871>
- Kumari, K., & Ramakrishnan, V. (2023). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (pp. 51-54). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3405-9_7
- Lépiz, I.R., López, A.J.J., Sánchez, G.J.J., Santacruz, R.F., Nuño, R.R., Rodríguez, G.E. (2010). Características morfológicas de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común de hábito trepador. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1), 21-28.
- Margenot, A. J., Calderón, F. J., Goyne, K. W., Mukome, F. N. D., & Parikh, S. J. (2017). IR spectroscopy, soil analysis applications (pp. 448-454). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.12170-5>
- Meza-Vázquez, K. E., Lépiz-Ildefonso, R., López-Alcocer, J. de J., & Morales-Rivera, M. M. (2015). Caracterización morfológica y fenológica de especies silvestres de frijol (*Phaseolus*) morphological and phenological characterization of wild bean (*Phaseolus*) species. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n1/v38n1a4.pdf>
- Morales-Santos, M. E., Peña-Valdivia, C. B., García-Esteve, A., Aguilar-Benítez, G., & Kohashi-Shibata, J. (2017). CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y DE GERMINACIÓN EN SEMILLAS Y PLÁNTULAS DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) SILVESTRE, DOMESTICADO Y SU PROGENIE. *Agrociencia*, 51(1), 43-62. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n1/1405-3195-agro-51-01-00043.pdf>
- Mukherjee, S., Laskar, S. (2019). Vis-NIR-based optical sensor system for estimation of primary nutrients in soil. *J Opt* 48, 87-103. <https://doi.org/10.1007/s12596-019-00517-1>
- Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D. J., Clairotte, M., Csorba, Á., Dardenne, P., Demattè, J. A. M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Wetterlind, J. (2015). Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring (Vol. 132, pp. 139-159). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2015.02.002>
- Pedron, F. de A., Deobald, G. A., Gubiani, P. I., Santos, L. A. C. dos, Azevedo, A. C. de, Reichert, J. M., & Dambroz, A. (2024). Soil hydraulic properties, mineralogical alteration and pore formation in Regosols from southern Brazil. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 48. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240013>
- Remillard, C. (2022). An investigation in laser diffraction soil particle size distribution analysis to obtain compatible results with sieve and pipette method. *Soil & Tillage Research*, 223, 105450. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105450>
- Romanyà, J., & Casals, P. (2020). Biological Nitrogen Fixation Response to Soil Fertility Is Species-Dependent in Annual Legumes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 546-556. <https://doi.org/10.1007/S42729-019-00144-6>
- Salgotra, R. K., Thompson, M., & Chauhan, B. S. (2021). Unravelling the genetic potential of untapped crop wild genetic resources for crop improvement. *Conservation Genetics Resources*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/S12686-021-01242-3>
- Schindler, B., Barnes, L., Renois, G. P., Gray, C. J., Chambert, S., Chambert, S., Fort, S., Fort, S., Flitsch, S. L., Loison, C., Allouche, A.-R., & Compagnon, I. (2017). Anomeric memory of the glycosidic bond upon fragmentation and its consequences for carbohydrate sequencing. *Nature Communications*, 8(1), 973. <https://doi.org/10.1038/S41467-017-01179-Y>
- Serafimova, E., & Dedelyanova, K. (2023). Fourier transform infrared spectroscopic analysis of mine remediation soil. review of the Bulgarian Geological Society, 84(part 3), 253-256.
- Sharma, R., & Kumar, S. (2023). Rapid Prediction of ANFO Based Explosives through ATR-FTIR Analysis – Use of ATR-FTIR in Explosives. *BrJAC Brazilian Journal of Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.30744/brjac.2179-3425.tn-68-2023>
- Shin, S. K., Lee, S. J., & Park, J. H. (2025). Prediction of Soil Properties Using Vis-NIR Spectroscopy Combined with Machine Learning: A Review. *Sensors*, 25(16), 5045. <https://doi.org/10.3390/s25165045>
- Siddique, I. M. (2024). Exploring Functional Groups and Molecular Structures: A Comprehensive Analysis using FTIR Spectroscopy. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4886526>
- Tomlekova, N. B. (2012). Genetic Diversity of Bulgarian *Phaseolus vulgaris* L. Germplasm Collection Through Phaseolin and Isozyme Markers. *InTech*. <https://doi.org/10.5772/36200>
- Wallander-Compean, L., Almaraz-Abarca, N., Alejandro-Iturbide, G., Uribe-Soto, J. N., Ávila-Reyes, J. A., Ricario, R. T., Herrera-Arrieta, Y., & Delgado-Alvarado, E. A. (2022). Variación fenológica y morfométrica de *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) de cinco poblaciones silvestres de Durango, México. *Botanical Sciences*, 100(3), 563-578. <https://doi.org/10.17129/botsci.2981>
- Warren, C. R. (2022). D₂O labelling reveals synthesis of small, water-soluble metabolites in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108543.
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Lv, H., Jia, H., & Zhao, G. (2024). Effects of Balancing Exchangeable Cations Ca, Mg, and K on the Growth of Tomato Seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) Based on Increased Soil Cation Exchange Capacity. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>