

## Producción, proteína y lípidos del grano de variedades de soya bajo temporal a altitudes elevadas

### Yield, protein and lipids of soybean grain varieties under rainfed conditions at high altitudes

Argelia Ortega-Zárate<sup>1</sup> , Juan de Dios Guerrero-Rodríguez<sup>1\*</sup> , Abel Gil-Muñoz<sup>1</sup> , Higinio López-Sánchez<sup>1</sup> , Fredy Mera-Zúñiga<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Km 125.5 Carretera Federal México-Puebla (actualmente Boulevard Forjadores de Puebla, 205, CP. 72760. Puebla, Puebla, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Tecomatlán. Carretera Palomas – Tlapa Km 19. 5, CP. 7840. Tecomatlán, Puebla, México.

\*Autor de correspondencia: rjuan@colpos.mx

#### Artículo científico

Recibido: 17 de octubre 2024

Aceptado: 28 de noviembre 2025

**RESUMEN.** La soya (*Glycine max* (L.) Merrill) es la principal fuente de proteína en concentrados para alimentación animal y diversos productos para alimentación humana. Sin embargo, su producción se ha concentrado en zonas de clima tropical y poco se ha investigado en otros ambientes, por lo cual, el objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial productivo y calidad de grano en ambientes de alta altitud. Bajo un diseño de bloques completos al azar en cinco localidades con gradiente altitudinal de 1 900 a 2 700 m, se evaluó el comportamiento agronómico de ocho variedades en temporal. Se cuantificaron días a floración, producción de biomasa; proteína cruda y lípidos en grano. El rendimiento promedio a 2 040 msnm, fue de 1.1 t ha<sup>-1</sup>, el contenido de lípidos y proteína fue de 18 y 31%, respectivamente. A 2 526 msnm, todas las variedades completaron su ciclo, con rendimiento promedio de 0.1 t ha<sup>-1</sup>, 15% de aceite y 31% de proteína cruda. A 2 079 msnm, únicamente la variedad más precoz completó su ciclo, las otras atrasaron su floración, provocando que esta etapa y el periodo de formación de grano fueran afectados por heladas. La producción de biomasa también disminuyó con la altitud. Se concluye que la soya tiene mayor potencial productivo hasta altitudes de 2 000 m, debido a que a más altitud es afectada por heladas y granizadas que disminuyen el rendimiento de grano, aunque, el contenido de proteína se mantiene constante y el de lípidos varía poco.

**Palabras clave:** *Glycine max* L. (Merrill), proteína cruda, aceite, rendimiento, zonas templadas.

**ABSTRACT.** Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is the main source of protein in animal feed concentrates and various products for human consumption. However, its production has been focused in tropical climate zones and little research has been done in different environments. Therefore, the objective of this research was to evaluate the productive potential and grain quality of soybean crop in high altitude environments. To do this, under a randomized complete block design in five locations that covered an altitudinal gradient of 1 900 to 2 700 masl, the agronomic performance of eight varieties was evaluated under rainfed conditions. Days to flowering, biomass production; crude protein and lipids of the grain were quantified. The average yield in the environment at 2040 m was 1.1 t ha<sup>-1</sup>, the oil and protein content was 18 and 31%, respectively. At an altitude of 2526 m, all varieties completed their cycle, with an average yield of 0.1 t ha<sup>-1</sup>, 15% oil and 31% crude protein. At an altitude of 2 079 m, only the earliest variety completed its cycle; the other varieties delayed their flowering, causing this stage and the grain formation period to be affected by frosts. Biomass production also decreased with altitude. It is concluded that soybeans have greater productive potential up to altitudes of 2,000 m, because at higher altitudes they are affected by frost and hailstorms that decrease grain yield, although the protein content remains constant and the lipid content varies little.

**Keywords:** *Glycine max* L. (Merrill), crude protein, oil, yield, temperate zones.

## INTRODUCCIÓN

La soya (*Glycine max* (L.) Merrill) es la oleaginosa con más superficie cultivada a nivel mundial, debido a que, además del uso de su aceite en la industria, es la principal fuente de proteína y aminoácidos esenciales en los concentrados para alimentación animal y uno de los principales complementos proteicos para la alimentación humana (Torres y Tovar-Palacio 2009, Ibáñez *et al.* 2020). A nivel mundial los principales países productores son Brasil, Estados Unidos de Norteamérica y Argentina (FAO 2022). México, por su parte, siembra poco de esta oleaginosa, concentrándose las áreas productoras en la zona tropical húmeda y subhúmeda, y es por ello que se ha convertido en uno de los cinco países con mayor importación de este grano. Para revertir esta tendencia, se requiere aumentar la superficie sembrada y ampliar el cultivo a otras zonas, en la cual, la región templada es una de las que se puede explorar.

Diversos estudios han determinado la medida en la que el ambiente, el genotipo y su interacción influyen en el potencial productivo del cultivo de soya (Bhartiya *et al.* 2018, Dinsa y Balcha 2022, Anggoro *et al.* 2023). Se ha demostrado que la interacción genotipo x ambiente influye tanto en características morfológicas de la planta como en la composición química del grano, siendo la temperatura, la radiación solar y la disponibilidad hídrica los factores que más afectan su desarrollo (Borges *et al.* 2006). Cuando la temperatura ambiental a la que es sometido el cultivo disminuye, tienden a disminuir características de la planta como altura, número de vainas por planta y rendimiento; sin embargo, pueden aumentar otras características como vigor, acumulación de biomasa y longitud de raíz (Chirchir *et al.* 2017, Poudel *et al.* 2023). En cuanto a composición química del grano, al aumentar la altitud tiende a aumentar el contenido de proteína y disminuir el de ácidos grasos (Capelin *et al.* 2022). La interacción entre ambiente y genotipo en soya es una relación compleja, en la cual la temperatura es un factor determinante (Song *et al.* 2016, Tang *et al.* 2023).

Los estudios sobre la respuesta del potencial productivo y de calidad de grano a diferentes ambientes se han enfocado a zonas de clima cálido, con un reducido gradiente de temperatura ambiental y altitudes no mayores a los 1 000 m (Borges *et al.* 2006, Arslanoglu y Aytac 2010, Capelin *et al.* 2022, Anggoro *et al.* 2023). En consecuencia, existe muy poca información sobre el potencial del cultivo a altitudes mayores a 1 000 m. En zonas altas se ha observado que es posible obtener rendimientos aceptables a altitudes de hasta 2 200 m (Thagana *et al.* 2013, Hernández-Tecol *et al.* 2022). Sin embargo, no se han realizado estudios sobre el impacto en la calidad química del grano y no existe información sobre la producción a alturas superiores. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial productivo y calidad de grano del cultivo de soya en ambientes de alta altitud, para lo cual, se sometió el cultivo a las diferentes condiciones ambientales asociadas a un gradiente altitudinal de 1 900 a 2 700 m, con el fin de cuantificar y comparar los cambios que se presentan al aumentar la altitud y, a partir de ello, inferir una altitud límite para la expresión de su potencial.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del área de estudio

Las parcelas experimentales fueron establecidas en cinco localidades pertenecientes a municipios de los estados de Puebla y Tlaxcala, México, abarcando un gradiente altitudinal de 1 900 a 2 709 m (Tabla 1).

**Tabla 1.** Localización y características ambientales de las cinco localidades del área de estudio.

Localidad	Coordenadas geográficas	Altitud (m)	Tipo de clima
Ixcaquixtla, Puebla	18° 27' 34.0" N, 97° 50' 00" W	1900	C(w1)
Axocopan, Atlixco, Puebla	18° 55' 32.3" N, 98° 29' 23.4 W	2040	C(w2)
Atzompa, Puebla	19° 12' 7.4" N, 98° 30' 18.5" W	2526	Cb(w1)
San Pedro, Atlangatepec, Tlaxcala	19° 31' 56.3" N, 98° 9' 36.6" W	2541	C(w2)
Moxolahuac, Tlahuapan, Puebla	19° 25' 55" N, 98° 32' 54.6" W	2709	C(w2)

### Registro de variables ambientales

En cada sitio experimental se colocó un registrador de temperatura del aire y humedad relativa (Extech instruments, modelo RHT10, EUA) durante todo el ciclo del cultivo. En el caso de Axocopan e Ixcaquixtla se instaló un pluviómetro de plástico (TFA Dostmann, modelo 47.1008, México) con el cual se monitoreó la precipitación diaria en milímetros. En las tres localidades restantes se recurrió a los registros de precipitación mensual acumulada reportados por las estaciones meteorológicas más cercanas al área del experimento CONAGUA (2023), cabe hacer mención que en Atzompa, a inicios de septiembre ocurrió una granizada severa. El suelo se muestreó en cada lugar donde se ubicaron los experimentos de cada localidad. A cada suelo se le analizaron las características físico-químicas, principalmente textura, materia orgánica (MO), pH, conductividad eléctrica (CE) y macronutrientes (nitrógeno inorgánico por espectrometría, fósforo por el método de Olsen y potasio por espectrofotometría de llama) por un laboratorio certificado.

### Material vegetal y diseño experimental

En cada sitio fueron evaluadas seis variedades experimentales de soya BM2V, HSO, HV, HSVA, RGYN y VARITA, las cuales se encuentran en proceso de desarrollo por el Colegio de Postgraduados, *Campus* Puebla, y dos variedades comerciales Huasteca 500 (Tamesí) proporcionada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, y, BM2 proporcionada el Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero, ambas usadas como testigos.

### Manejo agronómico

Las siembras fueron realizadas durante el ciclo agrícola primavera-verano 2022, en condiciones de temporal estricto, por lo que se realizaron una vez que hubo humedad suficiente en el suelo en cada sitio. Así, en San Pedro la siembra se realizó el 2 de junio, en Atzompa el 6 de junio, en Axocopan el 18 de junio, en Moxolahuac el 20 de junio y en Ixcaquixtla el 24 de julio. La preparación del suelo fue con tractor, pasando arado, rastra y surcadora. La siembra se realizó manualmente, en surcos separados a 80 cm, colocando una semilla en el fondo cada 10 cm que dio una densidad

de siembra de 12 5000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ . En cada localidad se tuvo una superficie sembrada de 384  $\text{m}^2$ , correspondiendo a cada variedad 48  $\text{m}^2$  y a cada repetición respectiva 12  $\text{m}^2$ . A la siembra se aplicó la fórmula general de fertilización 40-120-80 kg  $\text{ha}^{-1}$  de NPK en todos los sitios usando como fuentes urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio. El control de arvenses fue manual. La cosecha se llevó a cabo entre noviembre de 2022 y enero de 2023. En las localidades de Axocopan y Atzompa se realizó cuando las vainas alcanzaron una coloración marrón. En Ixcaquixtla, San Pedro y Moxolahuac no hubo cosecha debido a que las plantas se vieron afectadas por heladas, por lo que únicamente se colectó datos de la biomasa aérea.

### VARIABLES DE ESTUDIO

En todos los sitios fueron determinados los días a floración por variedad, contabilizando para ello el número de días transcurridos desde la emergencia de la plántula hasta que el 50% de los individuos presentaron flor. En cada unidad experimental para la medición de altura y ancho de planta, se tomaron tres individuos como muestra, número resultado del análisis previo de la variación de dichas variables por el método de promedio corrido (Mostacedo y Fredericksen 2000) que resultó suficiente por la homogeneidad de las variedades. Durante el periodo de llenado de grano y antes de la senescencia, a cada una de las plantas muestradas se le colocó una bolsa de malla de tela transparente con el fin de colectar toda la biomasa aérea producida; posteriormente, a la cosecha, se separó en los componentes de hoja y tallo y se secó a 80 °C durante 24 h en un horno de aire forzado Shel Lab® (E.U.A.) para determinar la materia seca. El peso de grano correspondió al peso en seco de 100 semillas tomadas al azar de cada planta muestra. El peso volumétrico se calculó dividiendo el peso seco de las 100 semillas entre el volumen de agua desplazado por ellas en una probeta de 50 mL. El rendimiento por variedad fue determinado considerando la densidad promedio final de plantas por unidad experimental que fue de 52 000 plantas  $\text{ha}^{-1}$  y el peso de grano obtenido después del trillado, con lo cual se calculó el rendimiento por planta y se extrapoló a t  $\text{ha}^{-1}$ . El contenido de lípidos totales se determinó mediante un equipo de Soxhlet por extracción con hexano (Bhagya y Srinivas 1992), utilizando un gramo de muestra y cinco horas de extracción, por repetición de cada variedad y de manera triplicada. El contenido de proteína cruda (PC) se determinó por cada repetición de cada variedad de manera triplicada mediante el método de Micro Kjeldahl, con un factor de conversión de 6.25 para el N (AOAC 1975).

### DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Por gradiente de pendiente de los terrenos para siembra, las variedades fueron establecidas en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental estuvo constituida por tres surcos de 0.8 m de ancho y 5 m de largo. Las variables de días a floración, altura de planta, ancho de planta, peso de tallos y hojas fueron analizadas mediante un análisis de varianza combinado de las cinco localidades. El análisis de las variables relacionadas con rendimiento y calidad de grano tomó en cuenta únicamente las localidades de Axocopan y San Agustín Atzompa, que fue donde hubo cosecha de grano, también en un análisis de varianza combinado. El análisis estadístico se realizó mediante el procedimiento PROC GLM del software estadístico SAS On Demand for Academics® (SAS 2024), para determinar los efectos de variedad, localidad y de interacción. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ( $\alpha =$

0.05). Asimismo, se realizó un análisis de correlación de Pearson para las variables PC, lípidos totales y rendimiento.

## RESULTADOS

### Condiciones ambientales

En la Figura 1 se muestran las condiciones ambientales de temperatura diaria y precipitación mensual acumulada durante las etapas fenológicas del cultivo. Las localidades con mayor precipitación durante todo el ciclo fueron Atzompa y Moxolahuac, con 673 y 656 mm, respectivamente, mientras que, en Ixcaquixtla y San Pedro la precipitación fue menor (312 y 433 mm, respectivamente) y se concentró en la etapa de periodo vegetativo. Axocapan tuvo un valor intermedio de precipitación de 592 mm. Moxolahuac fue la localidad que registró la temperatura mínima promedio más fría (9 °C), mientras que la temperatura promedio mayor se registró en Ixcaquixtla (34 °C). Como se observa, la temperatura mínima promedio disminuyó con la altitud; sin embargo, la temperatura máxima promedio y, por tanto, la temperatura media no siguió dicha tendencia. La localidad con las condiciones más homogéneas de temperatura fue Axocapan, al variar 11 °C la temperatura máxima promedio con la mínima. En Atzompa la caída de granizo en septiembre, ocasionó una severa defoliación de plantas en la etapa de floración y desarrollo de vaina. También, en esta localidad se registró en diciembre una temperatura mínima de 0 °C durante la etapa de llenado de grano, lo cual afectó la formación de semilla de las variedades más tardías. En San Pedro, Moxolahuac e Ixcaquixtla se registró en diciembre una temperatura mínima por debajo de los 4 °C durante la etapa de llenado de grano que ocasionó la muerte de las plantas.

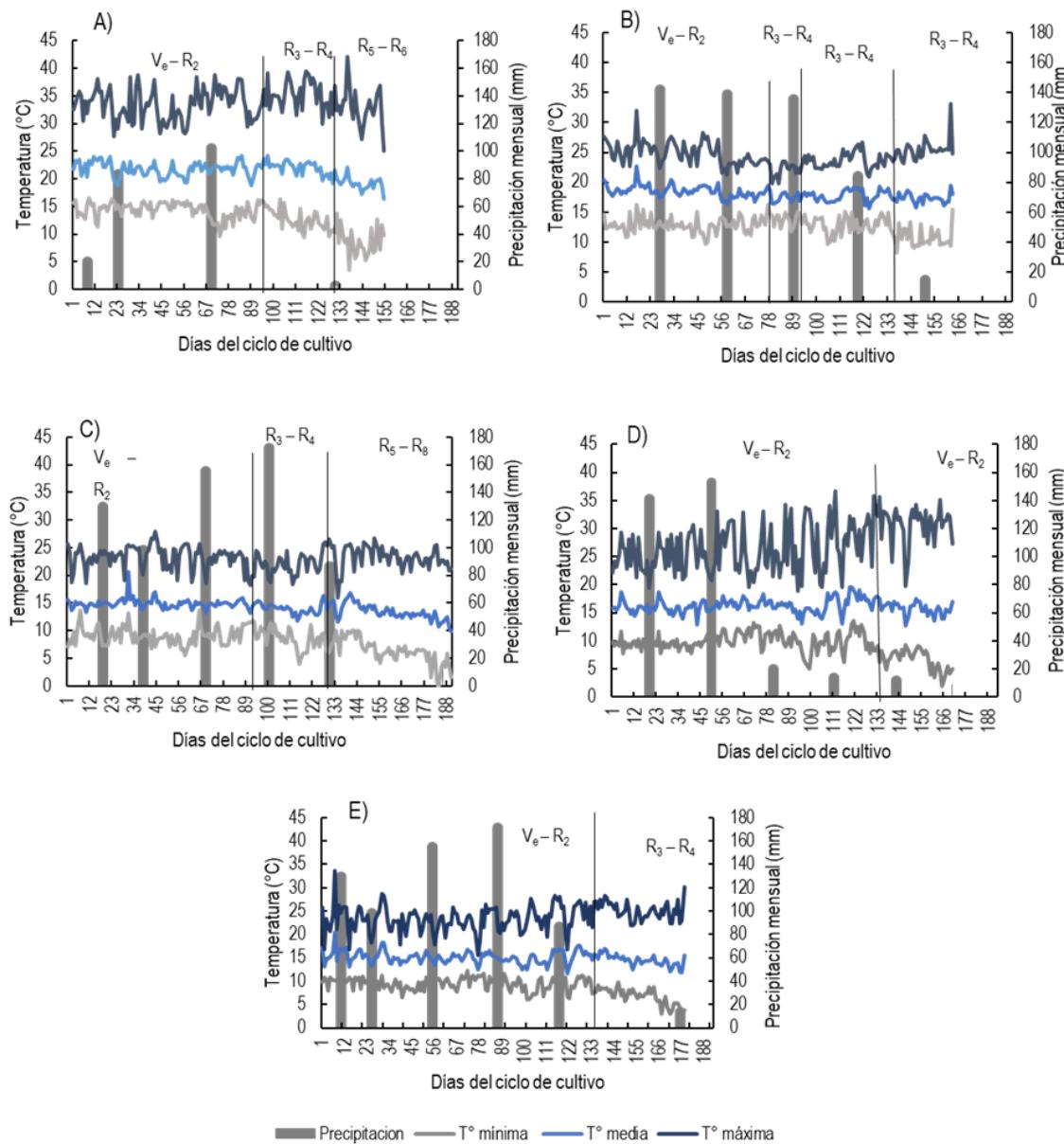
En la Tabla 2 se muestran las propiedades físico-químicas del suelo en cada localidad. La disponibilidad de nutrientes fue heterogénea entre ellas, y en ningún sitio se presentaron las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo. Aunque Ixcaquixtla presentó el mayor porcentaje de materia orgánica, también fue el de menor disponibilidad de nitrógeno y el único suelo con pH alcalino. Atzompa presentó el nivel menor de fósforo y, Axocapan el nivel menor de potasio. La textura predominante del suelo fue franco-arenosa y solamente el suelo de Ixcaquixtla tuvo textura arcillosa.

### Días a floración y producción de biomasa

En la Tabla 3 se presenta el análisis de varianza combinado para la variable días a floración y producción de biomasa en las cinco localidades. Los factores de localidad, variedad, y su interacción generaron diferencias significativas en las tres fuentes. No obstante, dependiendo de la variable, el factor localidad explicó entre 86 al 95% de la variación total, la variedad entre el 3 al 11%, mientras que la interacción Variedad\*Localidad entre el 0.5 al 3.5%.

En la Tabla 4 se presenta la comparación de medias de las variedades y su comportamiento en cada localidad. A excepción de Ixcaquixtla, la floración se retrasó al aumentar la altitud; las variedades se mostraron más precoces en Axocapan que en San Pedro y Moxolahuac. Así mismo, las plantas fueron más altas y anchas en Axocapan y tendieron a ser más bajas y angostas al aumentar la altitud de la localidad. La producción de materia seca de tallos por planta fue mayor en Axocapan. La producción de materia seca de hojas se diferenció entre San Pedro, Atzompa e Ixcaquixtla, siendo

esta última la de menor valor. En general, la altitud tendió a afectar negativamente las variables evaluadas.



**Figura 1.** Temperatura ( $T^{\circ}$ ) y precipitación (mm) durante el ciclo de cultivo en A) Ixcaquixtla, B) Axocapan, C) Atzompa, D) San Pedro, y E) Moxolahuac. V y R son las etapas fenológicas de estado vegetativo y reproductivo de soya con diferentes variedades.

Las diferencias de floración entre variedades a través de ambientes se mantuvieron, siendo la variedad HSO la más precoz y la H500 la más tardía en todos los casos, por lo que hubo consistencia en su respuesta a la variación ambiental. En cuanto a tamaño y producción de biomasa hubo ciertas diferencias, la variedad HSO tuvo menor altura, menor anchura y, por tanto, menor producción de biomasa en todas las localidades. Por el contrario, en la medida en que las variedades fueron más tardías, tuvieron mayores dimensiones y producción de materia seca.

**Tabla 2.** Propiedades fisicoquímicas del suelo en cada localidad de evaluación.

Propiedad	Localidad				
	Ixcaquixtla	Axocapan	Atzompa	San Pedro	Moxolahuac
pH	8.06	5.48	5.70	6.23	6.13
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0.35	0.05	0.27	0.17	0.09
P (mg kg <sup>-1</sup> )	26.40	44.32	8.92	10.82	70.82
K (mg kg <sup>-1</sup> )	276.00	80.00	460.0	230.00	268.00
N inorgánico (mg kg <sup>-1</sup> )	15.93	19.99	54.19	34.69	22.89
MO (mg kg <sup>-1</sup> )	5.74	0.72	2.90	1.60	1.20
Arena (%)	32.00	72.00	50.00	52.00	66.00
Arcilla (%)	50.00	8.00	20.00	22.00	12.00
Limo (%)	18.00	20.00	30.00	26.00	22.00
Textura	Arcilloso	Franco arenosa	Franco	Franco arcillo arenosa	Franco arenosa

CE: conductividad eléctrica, N: nitrógeno, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica.

**Tabla 3.** Parámetros del análisis de varianza para la variable de días a floración y producción de biomasa del cultivo de soya en cinco localidades de alta altitud.

Variable	Cuadrados medios					
	Localidad	Variedad	Loc*var	Error	R <sup>2</sup>	C.V.
Días a floración	25119.1 (p < 0.001)	3070.1 (p < 0.001)	146.8 (p < 0.001)	23.6	0.98	4.2
Altura de planta	10816.4 (p < 0.001)	663.6 (p < 0.001)	122.5 (p < 0.001)	17.0	0.97	7.9
Ancho de planta	5986.1 (p < 0.001)	216.1 (p < 0.001)	50.9 (p < 0.001)	8.4	0.97	8.8
Peso de tallos	3410.9 (p < 0.001)	328.0 (p < 0.001)	134.5 (p < 0.001)	48.0	0.81	35.5
Peso de hojas	2219.9 (p < 0.001)	195.3 (p < 0.001)	88.5 (p = 0.0006)	36.0	0.79	35.6

C.V: coeficiente de variación. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación.

### Rendimiento y calidad de grano

El factor localidad influyó en mayor medida en la mayoría de las variables (65.2 a 98.8%) excepto en el contenido de proteína cruda (Tabla 5) donde la variedad (51.6%) fue determinante. Las interacciones significativas estuvieron en 0.3 a 2.6% de variación explicada.

En la Tabla 6 se muestra la comparación de medias de rendimiento y calidad de grano de las variedades de soya para las dos localidades donde se tuvo producción. El peso volumétrico disminuyó en un 2.1% y el rendimiento fue once veces menor en Atzompa. El contenido de proteína cruda se mantuvo constante, pero el contenido de aceite bajó 3%. Las variedades HSO, RGYNA y VARITA formaron el grupo estadísticamente superior respecto al contenido de lípidos ( $p < 0.05$ ) y fueron también las que alcanzaron floración en un tiempo más corto. Sin embargo, la HSO se diferenció por ser también la de menor rendimiento. El contenido de lípidos en las demás variedades fue estadísticamente menor al de las variedades mencionadas. En cuanto a contenido de proteína cruda, las variedades H500 y BM2V fueron las que mostraron los valores más distantes entre sí: 33.4 y 28.4%, respectivamente, con una variación de cinco unidades porcentuales entre ellas, las demás variedades tuvieron valores que quedaron en ese intervalo. El contenido de lípidos totales se correlacionó únicamente con el rendimiento de grano ( $r = 0.552$ ;  $P < 0.0001$ ). No hubo correlación de rendimiento de grano con PC ( $r = 0.01$ ,  $P = 0.94$ ), ni de lípidos totales con PC ( $r = -0.134$ ,  $P = 0.291$ ).

**Tabla 4.** Medias del comportamiento variables días a floración y producción de biomasa de ocho variedades del cultivo de soya en cinco localidades de clima templado, de Puebla, México.

Variedad	Localidad	Días a floración	Altura de planta	Ancho de planta	Peso de tallos	Peso de hojas
BM2	Ixcaquixtla	105.00 ± (2.00)	20.13 ± (1.23)	11.43 ± (0.87)	2.0 ± (0.27)	2.50 ± (0.19)
	Axocopan	76.00 ± (0.00)	65.85 ± (1.14)	50.17 ± (1.05)	26.65 ± (2.39)	18.57 ± (3.33)
	Atzompa	113.00 ± (0.00)	61.30 ± (2.80)	38.05 ± (1.25)	24.57 ± (8.36)	18.62 ± (6.55)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	64.05 ± (0.26)	31.85 ± (1.52)	23.9 ± (2.29)	23.45 ± (1.51)
	Moxolahuac	159.67 ± (9.33)	51.80 ± (2.87)	32.02 ± (1.89)	26.40 ± (2.81)	25.00 ± (5.03)
BM2V	Ixcaquixtla	110.50 ± (2.90)	18.63 ± (2.60)	11.17 ± (1.37)	2.15 ± (0.22)	2.45 ± (0.15)
	Axocopan	69.00 ± (7.00)	67.82 ± (0.95)	51.50 ± (1.05)	31.07 ± (4.40)	20.72 ± (2.75)
	Atzompa	113.00 ± (0.00)	62.50 ± (2.49)	36.67 ± (3.06)	19.57 ± (3.89)	18.77 ± (2.59)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	61.72 ± (3.43)	33.90 ± (1.17)	27.80 ± (4.96)	30.77 ± (5.08)
	Moxolahuac	153.250 ± (6.00)	49.15 ± (2.99)	34.72 ± (1.74)	22.45 ± (3.10)	19.27 ± (1.56)
H500	Ixcaquixtla	113.50 ± (1.50)	18.00 ± (1.80)	9.40 ± (1.01)	2.60 ± (0.25)	2.17 ± (0.33)
	Axocopan	98.00 ± (0.00)	76.97 ± (1.43)	56.07 ± (0.78)	49.17 ± (8.60)	27.17 ± (0.86)
	Atzompa	129.00 ± (0.00)	60.50 ± (3.36)	40.72 ± (2.11)	23.17 ± (5.83)	23.17 ± (5.83)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	62.65 ± (3.77)	34.00 ± (2.01)	27.25 ± (2.03)	26.07 ± (1.66)
	Moxolahuac	152.670 ± (8.40)	42.87 ± (1.74)	28.53 ± (1.16)	12.77 ± (2.31)	10.60 ± (2.28)
HSVA	Ixcaquixtla	107.50 ± (2.90)	21.53 ± (2.47)	12.87 ± (0.10)	2.47 ± (0.18)	2.40 ± (0.25)
	Axocopan	74.50 ± (1.50)	78.07 ± (1.19)	57.32 ± (0.86)	33.90 ± (1.55)	25.77 ± (2.06)
	Atzompa	113.00 ± (0.0)	67.37 ± (1.28)	33.10 ± (3.88)	24.67 ± (5.17)	21.12 ± (5.65)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	65.07 ± (1.47)	29.70 ± (1.78)	22.87 ± (3.07)	23.67 ± (2.30)
	Moxolahuac	144.50 ± (4.50)	52.05 ± (2.66)	30.97 ± (1.47)	19.52 ± (3.05)	17.22 ± (2.88)
HSO	Ixcaquixtla	70.00 ± (0.00)	20.75 ± (2.17)	9.35 ± (0.50)	1.35 ± (0.16)	1.72 ± (0.16)
	Axocopan	61.00 ± (0.00)	43.20 ± (1.69)	32.25 ± (1.18)	14.60 ± (2.14)	10.72 ± (1.21)
	Atzompa	77.00 ± (0.00)	43.00 ± (2.38)	27.22 ± (0.87)	8.27 ± (1.68)	7.35 ± (1.33)
	San Pedro	117.00 ± (0.00)	48.72 ± (1.64)	27.77 ± (1.34)	10.17 ± (1.23)	11.15 ± (0.76)
	Moxolahuac	104.25 ± (4.4)	41.33 ± (1.53)	27.27 ± (0.89)	14.75 ± (1.15)	13.15 ± (3.15)
HV	Ixcaquixtla	110.50 ± (1.50)	18.90 ± (1.29)	9.82 ± (0.70)	1.87 ± (0.17)	1.87 ± (0.17)
	Axocopan	83.00 ± (0.00)	71.80 ± (1.72)	51.87 ± (0.73)	31.82 ± (3.96)	22.30 ± (1.89)
	Atzompa	112.00 ± (1.00)	63.10 ± (2.32)	36.77 ± (1.62)	23.75 ± (4.39)	21.45 ± (4.66)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	64.40 ± (2.01)	34.52 ± (1.10)	24.47 ± (0.71)	23.47 ± (0.93)
	Moxolahuac	146.20 ± (1.70)	48.50 ± (4.20)	31.23 ± (3.48)	20.22 ± (4.52)	16.65 ± (2.60)
RGYNA	Ixcaquixtla	104.50 ± (1.50)	17.27 ± (1.50)	10.30 ± (0.69)	1.30 ± (0.07)	2.15 ± (0.29)
	Axocopan	71.50 ± (1.50)	65.85 ± (2.58)	48.02 ± (1.91)	22.40 ± (0.41)	15.30 ± (1.32)
	Atzompa	110.00 ± (1.00)	47.75 ± (1.19)	31.75 ± (2.01)	13.37 ± (4.20)	10.57 ± (5.28)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	64.85 ± (1.83)	34.62 ± (1.51)	22.22 ± (1.04)	27.95 ± (2.32)
	Moxolahuac	134.00 ± (4.04)	46.83 ± (1.82)	35.55 ± (2.75)	25.77 ± (1.13)	23.40 ± (1.13)
VARITA	Ixcaquixtla	104.5 ± (1.5)	22.50 ± (2.28)	11.30 ± (0.62)	1.67 ± (0.11)	2.22 ± (0.22)
	Axocopan	74.50 ± (1.50)	76.07 ± (2.52)	56.87 ± (1.51)	26.32 ± (3.96)	19.90 ± (5.15)
	Atzompa	113.00 ± (0.00)	78.95 ± (2.87)	42.72 ± (1.38)	31.17 ± (6.25)	29.25 ± (6.06)
	San Pedro	147.00 ± (0.00)	64.97 ± (3.51)	35.07 ± (1.51)	23.02 ± (4.11)	21.82 ± (2.27)
	Moxolahuac	141.00 ± (2.85)	50.55 ± (2.89)	35.27 ± (4.12)	33.80 ± (3.91)	26.62 ± (3.40)
DSH Variedad		4.80	4.1	2.9	6.8	5.9
DSH localidad		3.40	2.9	2.1	4.8	4.2
DSH Var*Loc		17.4	15.2	11.2	23.5	20.7
P variedad		<0.0001	0.0005	0.06	0.044	0.06
P localidad		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
P var* loc		<.0001	<.001	<.001	<.001	0.0006

DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, P ≤ 0.05).

**Tabla 5.** Parámetros del análisis de varianza combinado para las variables de rendimiento y calidad de grano del cultivo de soya.

Cuadrados medios								
Variable	Localidad	Variedad	Localidad*variedad	Error	R <sup>2</sup>	CV	Media	
P100	621.9 (p < 0.0001)	7.6 (p < 0.0001)	4.3 (p = 0.0003)	0.8	0.9	7.1	13.0	
PV	2868.9 (p = 0.0107)	539.2 (p = 0.2556) ns	590.3 (p = 0.2050) ns	402.1	0.4	3.2	632.3	
RTO	13.7 (p < 0.0001)	0.10 (p = 0.0003)	0.05 (p = 0.0266)	0.02	0.9	22.9	0.6	
LP	10764.1 (p < 0.0001)	995.8 (p < 0.0001)	312.1 (p = 0.0291)	123.5	0.8	6.7	166.5	
PC	3.5 (p = 0.4055) ns	18.8 (p = 0.0026)	9.2 (p = 0.0989) ns	4.9	0.5	7.2	30.9	

P100: peso de 100 semillas, PV: peso volumétrico, LP: lípidos totales, PC: proteína cruda. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación. C.V: coeficiente de variación. ns: no significativo.

**Tabla 6.** Rendimiento medio y calidad de grano por variedad y localidad para el cultivo de soya de clima templado con diferente altitud.

Variedad	Localidad	Rendimiento	P100	PV	LP	PC
BM2	Axocopan	1.20 ± (0.18)	16.15 ± (0.35)	625.20 ± (10.16)	171.75 ± (9.30)	30.88 ± (1.81)
	Atzompa	0.13 ± (0.03)	8.90 ± (0.32)	631.25 ± (12.14)	143.00 ± (5.07)	29.75 ± (0.90)
BM2V	Axocopan	0.88 ± (0.08)	15.10 ± (0.24)	627.98 ± (5.61)	173.50 ± (8.11)	29.15 ± (0.93)
	Atzompa	0.13 ± (0.03)	9.05 ± (0.53)	640.78 ± (2.55)	137.50 ± (5.97)	27.70 ± (0.72)
H500	Axocopan	1.00 ± (0.07)	16.73 ± (0.51)	620.08 ± (5.23)	162.00 ± (4.92)	33.88 ± (0.94)
	Atzompa	0.10 ± (0.00)	8.15 ± (0.25)	652.58 ± (11.34)	154.50 ± (2.90)	32.98 ± (0.64)
HSVA	Axocopan	1.10 ± (0.00)	15.15 ± (0.71)	648.38 ± (11.31)	178.75 ± (2.50)	31.58 ± (1.09)
	Atzompa	0.17 ± (0.03)	8.85 ± (0.33)	631.20 ± (13.78)	144.75 ± (9.76)	31.60 ± (1.94)
HSO	Axocopan	0.75 ± (0.10)	16.40 ± (0.36)	619.33 ± (4.42)	193.50 ± (5.33)	32.53 ± (0.39)
	Atzompa	0.05 ± (0.03)	12.35 ± (0.26)	621.15 ± (5.60)	176.25 ± (4.01)	29.13 ± (0.35)
HV	Axocopan	1.35 ± (0.09)	16.33 ± (0.75)	638.88 ± (9.93)	176.75 ± (5.28)	31.30 ± (1.48)
	Atzompa	0.20 ± (0.04)	9.85 ± (0.50)	652.00 ± (18.80)	146.25 ± (4.11)	29.88 ± (1.16)
RGYNA	Axocopan	1.20 ± (0.11)	17.90 ± (0.34)	614.90 ± (6.29)	184.75 ± (2.14)	29.55 ± (0.72)
	Atzompa	0.10 ± (0.04)	11.13 ± (0.66)	637.15 ± (8.31)	173.50 ± (4.13)	30.13 ± (0.65)
VARITA	Axocopan	1.15 ± (0.06)	15.55 ± (0.63)	609.83 ± (5.66)	195.00 ± (3.44)	30.30 ± (0.92)
	Atzompa	0.18 ± (0.05)	11.15 ± (0.27)	645.58 ± (14.58)	152.75 ± (3.92)	34.28 ± (1.57)
DSH Variedad		0.23	1.5	31.97	17.72	3.53
DSH localidad		0.07	0.47	10.11	5.6	1.12
DHS Var*Loc		0.47	2.90	62.35	33.07	6.83
Pr variedad		<.0001	<.0001	0.2556	<.0001	0.0026
Pr localidad		<.0001	<.0001	0.0107	<.0001	0.4055
Pr var* loc		0.0266	0.0003	0.2050	0.0291	0.0989

P100: Peso de 100 semillas. PV: peso volumétrico. LP: lípidos totales DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, P ≤ 0.05).

## DISCUSIÓN

### Condiciones ambientales

La localidad con mejores condiciones para el cultivo fue Axocopan, ya que, aunque en esta localidad la precipitación fue menor que en Atzompa y Moxolahuac, las temperaturas mínimo

promedio se mantuvieron arriba de los 10 °C, el cual ha mostrado ser un límite inferior de temperatura para evitar afectaciones en el rendimiento (Pedersen 2004, Ohnishi *et al.* 2010). En cuando a condiciones edáficas ningún sitio presentó los niveles de NPK adecuados para el cultivo de soya, aunque Moxolahuac fue el sitio con las mejores condiciones (Sucunza *et al.* 2018, IPNI 2023). El pH el Ixcaquixtla estuvo por encima de lo recomendado, lo que se ha demostrado afecta el desarrollo del cultivo (Rogovska *et al.* 2007, Ruíz *et al.* 2013).

### Días a floración y producción de biomasa

De acuerdo a Câmara *et al.* (1997), la floración de la soya es sensible al fotoperiodo y a la temperatura. Se ha demostrado que, el periodo vegetativo se alarga conforme aumenta el fotoperiodo o decrece la temperatura. En este caso, la floración se retrasó hasta en 67 días al comparar la localidad de Axocopan con la San Pedro Ecatepec (cambio altitudinal de 501 m y una disminución de temperatura promedio de 2 °C). Aunque Ixcaquixtla fue la localidad ubicada a menor altitud y con mayor temperatura promedio (21.5 °C) y de máxima promedio (34 °C), el tiempo a floración fue mayor que en Axocopan, lo que podría explicarse a las temperaturas mayores registradas en Ixcaquixtla, ya que se ha demostrado que temperaturas por encima de 35 °C retrasan la floración de soya (Tang *et al.* 2023). Por otro lado, a pesar de que San Agustín Atzompa presentó temperaturas mínimo promedio similares a San Pedro Ecatepec, que están a la misma altitud, su tiempo a floración fue menor. En este caso, la disponibilidad de humedad durante el periodo vegetativo fue un factor diferencial (362 vs 300 mm), como lo consignan Ortiz *et al.* (2000). En el caso de las variedades comerciales utilizadas como testigo, se ha demostrado que en condiciones ambientales asociadas al trópico la variedad BM2 tiene un intervalo de días a floración de 39 a 69 días, mientras que la H500 presenta un periodo vegetativo de alrededor de 46 días (Banafunzi *et al.* 1981, Maldonado *et al.* 2010); por lo que, en este caso, la floración de ambas se retrasó hasta 100 días en condiciones ambientales asociadas a una altitud de 2 700 m.

Los efectos que tiene el factor localidad en altura de planta, ancho del dosel de la planta y producción de biomasa, han sido documentados también por varios autores (Nascimento *et al.* 2010, Bhartiya *et al.* 2018, Dinsa y Balcha 2022), lo que refleja el efecto de condiciones ambientales contrastantes en el comportamiento de dichas variables. La similitud en cuanto a la acumulación de biomasa aérea tanto en Axocopan como en Santa Cruz Moxolahuac concuerda con lo encontrado por Rajasekaran *et al.* (2009) quienes mencionan que, aunque la longitud del tallo y raíces decrece con la altitud, la biomasa aérea se mantiene. La altura de las plantas en Ixcaquixtla fue tres veces menor que la observada en Axocopan, Atzompa y San Pedro y la mitad de lo registrado en Moxolahuac, que fue la localidad de mayor altitud. Esto muestra que las temperaturas mayores y la poca disponibilidad hídrica afectan el desarrollo del cultivo, ya que tienden a generar una disminución en la altura de planta con disminución en la longitud de los nuevos brotes (Mishra *et al.* 2021). Además, en Ixcaquixtla el suelo tuvo un pH de 8, lo que se ha demostrado que tiende a provocar problemas de clorosis férrica, generando defoliaciones severas y, por tanto, impidiendo el desarrollo óptimo de la planta (Rogovska *et al.* 2007).

### Rendimiento y calidad de grano

Los valores menores de rendimiento en San Agustín Atzompa pueden deberse a diversos factores, entre ellos la temperatura, debido a que en esta localidad se registraron valores de hasta -1°C

durante la etapa de llenado y maduración del grano. Se ha encontrado que el rendimiento disminuye hasta 20% cuando el cultivo es sometido a temperaturas por debajo de 20°C durante el día y 12°C durante la noche (Alsajri *et al.* 2020, Staniak *et al.* 2021). La caída de granizo en Atzompa durante la etapa de desarrollo de vaina también afectó gravemente al rendimiento, ya que, aunque las plantas lograron recuperarse, la disminución y daño del follaje fue considerable, lo cual afectó negativamente el número de vainas y el llenado de grano. Por otro lado, la precipitación en San Agustín Atzompa durante la etapa de llenado de grano fue menor que en el caso de Atlixco, lo que se ha demostrado influye negativamente en el rendimiento (Meckel *et al.* 1984, Popović *et al.* 2015).

En cuanto al contenido de aceite, se ha determinado que aumenta al incrementar la temperatura, y en condiciones hídricas y nutrimentales óptimas se correlaciona negativamente con el contenido de proteína (Alsajri *et al.* 2020) pues se compite por nutrientes y energía. También se ha encontrado que el contenido de aceite está positivamente relacionado con incrementos en el rendimiento, mientras que el de proteína lo está inversamente con él (Wilcox y Shibles, 2001). En esta investigación, en Axocopan (localidad con temperatura mayor) se encontró mayor contenido de lípidos totales (3% más) comparado con Atzompa (que tuvo temperaturas menores) al aumentar la altitud 500 m. Se ha reportado que el contenido de aceite tiende a estar positivamente relacionado con aumentos en la temperatura principalmente durante la etapa de maduración de grano (Shin *et al.* 2009, Popović *et al.* 2015, Capelin 2022), aunque también se ha mostrado que puede disminuir a temperaturas extremas por arriba de los 25°C (Alsajri *et al.* 2020). Respecto de la relación de que los lípidos totales indujeran cambios en la concentración de proteína cruda, al menos en las dos localidades para las que se tuvo información no se encontró asociación significativa. Lo anterior podría estar relacionado a que el contenido de proteína en soya no solo depende de la concentración de aceite sino también de factores como contenido de carbohidratos, nodulación, metabolitos secundarios y factores ambientales como temperatura y salinidad del suelo (Wang *et al.* 2019, Zhong *et al.* 2024). Por su parte, la asociación positiva de lípidos totales con rendimiento de grano, se debió a que la concentración de aceites es dependiente de la fotosíntesis en la última mitad del llenado de grano, la cual, si se da en mayor medida y no hay situaciones estresantes de sequía o temperatura, se logran mayores concentraciones (Llebaria *et al.* 2024) situaciones que fueron más favorables en la localidad de Axocopan, donde se tuvo mayor rendimiento.

En el caso del contenido de proteína se ha determinado que aumenta con valores extremos de temperatura diurna (Alsajri *et al.* 2020) tanto mínimos (menores a 21 °C) o como máximos (mayores a 37 °C). En esta investigación, no se encontró variación significativa del contenido de proteína a pesar del gradiente altitudinal, lo cual concuerda con lo encontrado por Shin *et al.* (2009) respecto a que el contenido de proteína no mostró diferencias significativas al someter al cultivo a variaciones en la altitud ni fecha de siembra, mientras que el contenido de lípidos sí lo hizo. La explicación que se ha dado es que el contenido de proteína no sólo depende de la temperatura, sino también, de factores como disponibilidad hídrica, consumo de nitrógeno, fotoperiodo, concentración de aceite y temperaturas mayores a 25°C durante el periodo de llenado de grano (Piper y Boote 1999, Alsajri *et al.* 2020). Los valores promedio de las características de calidad de grano registrados en ambas localidades fueron inferiores a los valores reportados para variedades relacionadas con el testigo H500, ya que estos oscilan entre 19.25% de aceite y 35.3% de proteína con un peso de 100 semillas de 16.1 g y rendimiento de 2.4 t ha<sup>-1</sup>, situación que podría deberse a

que esta variedad fue probada en condiciones de temperatura y humedad en clima cálido subhúmedo (Maldonado y Ascencio 2010, Maldonado y Ascencio 2012, Maldonado *et al.* 2021).

En cuanto a contenido de proteína las variedades H500 y BM2V fueron las que mostraron los valores más distantes 33.4 y 28.4%, respectivamente, con una variación de cinco unidades porcentuales entre ellas, las demás variedades tuvieron valores que quedaron contenidos en ese intervalo (Tabla 8). Los resultados anteriores sugieren que, en este caso, el nivel de precocidad influyó mayormente en el contenido de lípidos que en el de proteína cruda, contrastando con estudios que han sugerido que los grupos de maduración precoces tienden a mostrar un mayor rendimiento de proteína (Sobko *et al.* 2020); esto puede ser explicado con base en estudios que han demostrado que el contenido de aceite y proteína en soya están determinado principalmente por el genotipo (Liu *et al.* 2022). Sin embargo, la concentración de aceite también puede ser modificada por la biosíntesis de carbohidratos y factores ambientales como grado de nodulación de raíz con organismos simbióticos (Kambhampati *et al.* 2019, Zhong *et al.* 2024).

## CONCLUSIONES

El potencial productivo de soya disminuyó conforme se incrementó la altitud, ya que el rendimiento de grano se afectó por factores climáticos adversos como bajas temperaturas, granizadas, heladas y estrés hídrico. El contenido de lípidos disminuyó conforme la altitud aumentó, sin embargo, el contenido de proteína se mantuvo constante. De las variedades estudiadas, únicamente la más precoz (HSO) logró completar su ciclo en ambientes asociados a un gradiente altitudinal de 1 900 a 2 700 m, por lo que ésta se presenta como una opción productiva para su introducción y fitomejoramiento en dichas condiciones.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## LITERATURA CITADA

- Alsajri FA, Wijewardana C, Irby J, Bellaloui N, Krutz L, Golden B, Gao W, Reddy K (2020) Developing functional relationships between temperature and soybean yield and seed quality. *Agronomy Journal* 12: 194-204. <https://doi.org/10.1002/agj2.20034>.
- Anggoro G, Maulana H, Hakwi P, Dyah R, Atma A, Anggara B, Karuniawan A (2023) Stability analysis to select the stable and high yielding black soybean (*Glycine max* (L) Merrill) in Indonesia. *International Journal of Agronomy* 23. <https://doi.org/10.1155/2023/7255444>.
- AOAC (1975) Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis*. 12th edition. A.O.A.C. Washington, DC. USA. 1094p.
- Arslanoglu F, Aytac S (2010) Determination of stability and genotype x environment interactions of some agronomic properties in the different soybean (*Glycine max*. (L) Merrill) cultivars. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 16 (2): 181-195.

- Banafunzi NMS, Mena A, Rangel I, Mastache AA, Molina ML, Gantes VMH, Marquez SR (1981) A new soybean for human consumption in the tropics. American Oil Chemists' Society 58: 143-147. <https://doi.org/10.1007/bf02582322>
- Bhagya S, Srinivas H (1992) Extraction of soybean (*Glycine max*) with hexane-acetic acid: Effect on oil quality. Food Chemistry 44: 123-125. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(92\)90323-T](https://doi.org/10.1016/0308-8146(92)90323-T)
- Bhartiya A, Aditya JP, Kumari V, Kishore N, Purwar JP, Agrawal A, Kant L, Pattanayak A (2018) Stability analysis of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] genotypes under multi-environments rainfed condition of North Western Himalayan hills. Indian Journal of Genetics 78(3): 342-347. <https://doi.org/10.31742/IJGPB.78.3.6>.
- Borges A, Batista J, José L, Alves M (2006) Environmental and genotypic factors associated with genotype by environment interactions in soybean. Crop Breeding and Applied Biotechnology 6: 79-86. <https://doi:10.12702/1984-7033.v06n01a11>.
- Câmara GMS, Sediyama T, Dourado-Neto D, Bernardes MS (1997) Influence of photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). Scientia Agricola 54: 149-154.
- Capelin M, Madella L, Panho M, Meira D, Fernandes R, Colonelli L, Menegazzi C, Rosa A, Contreiras A, Benin G (2022) Impact of altitudes in grain yield, oil, and protein content of soybean. Australian Journal of Crop Sciences 16(02): 273-279. <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.02.3439>.
- Chirchir G, Mwangi M, Nyamongo DO, Gweyi-Onyango J (2017) Effects of genotype and agro-ecological conditions on storability of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] seed. Tropical Plant Research 4(1): 126-133 <https://doi.org/10.22271/tpr.2017.v4.i1.019>.
- CONAGUA (2023) Resúmenes Mensuales de Lluvia y Temperatura. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Fecha de consulta: 11 de junio de 2024.
- Dinsa T, Balcha U (2022) Adaptation study of improved soya bean (*Glycine max* (L.) varieties in East Shewa Zone, Oramia, Ethiopia. Science Research 10(5): 108-113. <https://doi:10.11648/j.sr.20221005.11>.
- FAO (2022) Food and agriculture data. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Fecha de consulta: 11 de julio de 2022.
- Hernández-Tecol K, Guerrero-Rodríguez J, Aceves-Ruiz E, Olvera-Hernández J, Martínez-Trejo G, Díaz-Ruiz R (2022) Potencial de producción de grano del cultivo de soya en el Valle de Puebla. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 13(5): 853-862. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.3229>.
- Ibáñez MA, De Blas C, Cámara L, Mateos GG (2020) Chemical composition, protein quality and nutritive value of commercial soybean meals produced from beans from different countries: A meta-analytical study. Animal Feed Science and Technology 267. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114531>.
- IPNI (2023) Requerimientos nutricionales del cultivo de soja. International Plant Nutrition Institute. [http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/49c7194c60bccd4a05257e0e0068a297/\\$FILE/AA%20-%20Mayo-2014.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/49c7194c60bccd4a05257e0e0068a297/$FILE/AA%20-%20Mayo-2014.pdf). Fecha de consulta: 11 de julio de 2022.
- Kambhampati S, Aznar-Moreno J, Hostetler C, Caso T, Bailey S, Hubbard A, Durrett T, Allen D (2019) On the inverse correlation of protein and oil: Examining the effects of altered central carbon metabolism on seed composition using soybean fast neutron mutants. Metabolites 10(1): 1-15. <https://doi.org/10.3390/metabo10010018>.
- Liu A, Cheng S, Yung W, Li M, Lam H (2022) Genetic regulations of the oil and protein contents in soybean seeds and strategies for improvement. In Hon-Ming L, Man-Wah L (eds) Advances in botanical research. Academic Press. USA. pp. 259-293. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2022.03.002>.
- Llebaria MJ, Cerrudo A, Izquierdo N (2024) Impacto de las variables ambientales en la proteína de soja. Nexo Agropecuario Edición Especial 2024.: 26-34.

- Maldonado N, Ascencio G, Gill H (2010) Huasteca 400, nueva variedad de soya para el sur de Tamaulipas, oriente de San Luis Potosí y norte de Veracruz. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 1(5): 687-692.
- Maldonado N, Ascencio G (2012) Tamesí, nueva variedad de soya para el trópico húmedo de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3(8): 1671-1677. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i8.1332>.
- Maldonado N, Alcalá J, Ascencio G, García J (2021) Rendimiento y estabilidad de genotipos de soya para el trópico de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 12(8): 1351-1362. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2267>.
- Meckel L, Egli D, Phillips R, Radcliffe D, Leggett J (1984) Effect of moisture stress on seed growth in soybeans. Agronomy Journal 76(4): 647-650. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.0002196200760004003x>.
- Mishra N, Tripathi M, Tiwari S, Tripathi N, Gupta N, Sharma, A (2021) Morphological and physiological performance of Indian soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] genotypes in respect to drought. Legume Research 1-9. <https://doi.org/10.18805/LR-4550>.
- Mostacedo B, Frederickson T S (2000) Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. BOLFOR, Santa Cruz Bolivia. 87p.
- Nascimento M, Finoto E, Sediyyama T, Cruz C (2010) Adaptability and stability of soybean in terms of oil and protein content. Crop Breeding and Applied Biotechnology 15(2): 48-54. <https://doaj.org/article/9745a508a22049359633c7c965c9d6b1>.
- Ohnishi S, Miyoshi T, Shirai S (2010) Low temperature stress at different flower developmental stages affects pollen development, pollination, and pod set in soybean. Environmental and Experimental Botany 69: 56-62.
- Ortiz R, Ponce M, Caballero A, de la Fé C (2000) Evaluación de una colección de germoplasma de soya (*Glycine max*(L.) Merrill) en condiciones abioticas estresantes. Cultivos Tropicales 21(1): 67-72.
- Pedersen P (2004) Soybean growth and development. Iowa State University. Extension Distribution Center. USA. 27p.
- Piper E, Boote K (1999) Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. Journal of the American Oil Chemists' Society 76: 1233-1241. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0099-y>.
- Popović V, Miladinović J, Vidić M, Vučković S, Dražić G, Ikanović J, Đekić V, Filipović V (2015) Determining genetic potential and quality components of ns soybean cultivars under different agroecological conditions. Romanian Agricultural Research 32: 35-42.
- Poudel S, Adhikari B, Dhillon J, Reddy K, Stetina S, Bheemanahalli R (2023) Quantifying the physiological, yield, and quality plasticity of Southern USA soybeans under heat stress. Plant Stress: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100195>.
- Rajasekaran C, Kalaivani T, Jayakumararaj R, Singh A, Pusalkar V, Marimuthu R (2009) Studies on the impact of altitudinal gradient on ammonium assimilatory metabolism in *Glycine max* L. (Fabaceae). Ethnobotanical Leaflets 13: 301-309.
- Rogovska N, Blackmer A, Mallarino A (2007) Relationships between soybean yield, soil pH, and soil carbonate concentration. Soil Science Society of America Journal 71(4): 1251-1256 <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0235>.
- Ruiz J, Medina G, González I, Flores H, Ramírez G, Ortiz C, Byerly K, Martínez R (2013) Requerimientos agroecológicos de cultivos. 2º ed. Libro técnico número 3. INIFAP. México. 578p.
- SAS (2024) SAS On Demand for Academics. SAS Institute Inc USA. <https://welcome.oda.sas.com/>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2024.
- Shin SO, Shin SH, Ha TJ, Lim SG, Choi KJ, Baek IY, Lee SC, Park KY (2009) Soybean ecological response and seed quality according to altitude and seeding dates. Korean Journal of Crop Science 54(2): 143-158.

- Sobko O, Stahl A, Hahn V, Zikeli S, Claupein W, Gruber S (2020) Environmental effects on soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) production in Central and South Germany. *Agronomy* 10 (1847). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121847>.
- Song W, Yang R, Wu T, Wu C, Sun S, Zhang S, Jiang B, Tian S, Liu X, Han T (2016). Analyzing the effects of climate factors on soybean protein, oil contents, and composition by extensive and high-density sampling in China. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 64: 4121–4130. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00008>.
- Staniak M, Czopek K, Stepień-Warda A, Kocira, A, Przyby's M (2021) Cold stress during flowering alters plant structure, yield and seed quality of different soybean genotypes. *Agronomy* 11(2059). <https://doi.org/10.3390/agronomy11102059>.
- Sucunza F, Gutiérrez F, García F, Boxler M, Rubio G (2018) Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy* 96: 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.004>.
- Tang Y, Lu S, Fang C, Liu H, Dong L, Li H, Su T, Li S, Wang L, Cheng Q, Liu B, Lin X, Kong F (2023). Diverse flowering responses subjecting to ambient high temperature in soybean under short-day conditions. *Plant Biotechnology Journal* 21: 782-791. <https://doi.org/10.1111/pbi.13996>.
- Thagana W, Gethi M, Riungu, Kamundia J, Mbehero P (2013) Seed abortion and numerical components of seed yield of soyabean (*Glycine max* L. Merr.) in three contrasting agroecologies. *Journal of Agricultural Sciences* 4(1): 1-5. <https://doi.org/10.1080/09766898.2013.11884694>.
- Torres N, Tovar-Palacio A (2009) La historia del uso de la soya en México, su valor nutricional y su efecto en la salud. *Salud Pública de México* 51(3): 346-254.
- Wang J, Zhou P, Shi X, Yang N, Yan L, Zhao Q, Yang C, Guan Y (2019) Primary metabolite contents are correlated with seed protein and oil traits in near-isogenic lines of soybean. *The Crop Journal* 7 (5): 651-659. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.04.002>.
- Wilcox J, Shibles R (2001) Interrelationships among seed quality attributes in soybean. *Crop Breeding, Genetics & Cytology* 41(1): 11-14. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41111x>.
- Zhong X, Wang J, Shi X, Bai M, Yuan C, Cai C, Wang N, Zhu X, Kuang H, Wang X, Su J, He X, Liu X, Yang W, Yang C, Kong F, Wang E, Guan Y (2024). Genetically optimizing soybean nodulation improves yield and protein content. *Nature Plants* 10: 736-742 <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01696-x>.