

Respuesta del Trigo a la Aplicación de Potasio en Dos Sitios con Propiedades Edáficas Contrastantes en el Valle de Mexicali, México Response of Wheat to Potassium Application at Two Sites With Contrasting Soil Properties in the Mexicali Valley, Mexico

Isabel Escobosa-García^{1†} , Fidel Núñez-Ramírez^{1†} , Antonio Morales-Maza² ,
Juan Carlos Vázquez-Angulo³ , Jesús del Rosario Ruelas-Islas⁴ ,
Cándido Mendoza-Pérez⁵ y Yohandri Ruisánchez-Ortega⁶

¹ Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera a Delta s/n, Ejido Nuevo León, 21705 Mexicali, Baja California, México; (I.E.G.), (F.N.R.).

[†] Autores para correspondencia: fidel.nunez@uabc.edu.mx; isabel.escobosa@uabc.edu.mx

² Campo Experimental Valle de Mexicali-INIFAP. Carretera a San Felipe, km 75. 21700 Mexicali, Baja California, México (A.M.M.).

³ Facultad de Ingeniería y Negocios San Quintín Baja California. Carretera Transpeninsular km 180.2, ejido Padre Kino. 22930 San Quintín, Baja California, México; (J.C.V.A.).

⁴ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Calle 16 y Av. Japaraquí, Juan José Ríos. 81110 Ahome, Sinaloa, México; (J.R.R.I.).

⁵ Colegio de Postgraduados, Departamento de Hidrociencias. Carretera México-Texcoco, km 36.5. Montecillo, 56230 Texcoco Edo. México, México; (C.M.P.).

⁶ Universidad Estatal de Sonora, Unidad Académica San Luis Río Colorado. Carretera San Luis Río Colorado - Sonoyta, km 6.5. Colonia Industrial. 83500 San Luis Río Colorado, Sonora, México; (Y.R.O.).

RESUMEN

Se evaluó la respuesta en crecimiento, estado nutrimental y productiva del trigo (*Triticum aestivum* L.) a la aplicación de potasio en dos sitios con propiedades edáficas contrastantes del Valle de Mexicali, Baja California, México. Los experimentos se realizaron durante el ciclo otoño-invierno 2018-2019, bajo un diseño de bloques al azar con cuatro dosis de K₂O (0, 80, 160 y 320 kg ha⁻¹). Se midió el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la concentración de NO₃⁻ y K⁺ en el extracto celular del tallo (ECT), el rendimiento, la calidad del grano (peso de 1000 granos, proteína, peso hectolítrico) y la química residual del suelo (pH, salinidad, NO₃⁻ y K⁺ en extracto de pasta saturada). En el sitio con mayor salinidad inicial (CE > 5 dS m⁻¹), no se observaron diferencias significativas en ninguna de las variables evaluadas, mientras que en el sitio de menor salinidad (CE = 2.5 dS m⁻¹), se observaron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) en la concentración de K⁺ en ECT (33 y 65 días después de la siembra). No se observaron efectos significativos en el rendimiento ni en la calidad del grano. La concentración de K⁺ en suelo y ECT sugiere disponibilidad suficiente del nutriente, lo que pudo limitar la respuesta agronómica a la fertilización con potasio. Considerando los valores de K⁺ obtenidos en suelo, se concluye que la decisión de fertilizar con K deberá basarse en el análisis de extracto de pasta saturada para evitar aplicaciones innecesarias y optimizar el manejo de los nutrientes aplicados en suelos del tipo vertisol hiposálico calcarico y vambisol calcarico hipersódico.

Palabras clave: cereales, cultivos extensivos, extracto celular, proteína, *Triticum aestivum* L.

SUMMARY

The growth, nutritional status, and yield response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to potassium fertilization were evaluated at two agricultural sites with contrasting soil properties in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico. The experiments were conducted during the 2018-2019 fall-winter season using a randomized block design with four K₂O application rates (0, 80, 160, and 320 kg ha⁻¹). The normalized difference vegetation index (NDVI), NO₃⁻ and K⁺ concentrations in stem cell extract (SCE), grain yield, grain quality traits (1000-grain weight, protein content, and hectoliter weight),



Cita recomendada:

Escobosa-García, I., Núñez-Ramírez, F., Morales-Maza, A., Vázquez-Angulo, J. C., Ruelas-Islas, J. R., Mendoza-Pérez, C., & Ruisánchez-Ortega Y. (2025). Respuesta del Trigo a la Aplicación de Potasio en Dos Sitios con Propiedades Edáficas Contrastantes en el Valle de Mexicali, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-9. e2402. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2402>

Recibido: 1 de septiembre de 2025.

Aceptado: 7 de diciembre de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Diciembre de 2025.

Editor de Sección:

Dra. Dámaris Leopoldina Ojeda-Barrios

Editor Técnico:

Dr. Fidel Nuñez Ramírez



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/>).

and residual soil chemical properties (pH, salinity, and NO_3^- and K^+ concentrations in saturated paste extract) were measured. At the site with high initial salinity ($\text{EC} > 5 \text{ dS m}^{-1}$), no significant effects were observed for any of the evaluated variables. In contrast, at the lower salinity site ($\text{EC} = 2.5 \text{ dS m}^{-1}$), statistical differences ($p < 0.05$) were detected in K^+ concentration in the SCE at 33 and 65 days after seeding. Grain yield and quality were not significantly affected by potassium fertilization. The initial K^+ concentrations in soil and SCE indicate sufficient nutrient availability, which likely limited the agronomic response to potassium fertilization. Based on soil K^+ values, it is concluded that decisions regarding potassium fertilization should be based on saturated paste extract analysis to avoid unnecessary applications in hyposalic calcaric Vertisols and hyposodic calcaric Cambisols.

Index words: cereals, extensive crops, cellular extract, protein, *Triticum aestivum* L.

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel global y regional, debido a su alto valor alimenticio y a su adaptabilidad de crecimiento a diversas condiciones edafoclimáticas (Foulkes, Molero, Griffiths, Slafer y Reynolds, 2022). En el Valle de Mexicali, Baja California, el trigo constituye un componente clave en los sistemas de producción del ciclo otoño-invierno, donde la eficiencia del uso de nutrientes es determinante para lograr altos rendimientos (Rodríguez-González *et al.*, 2014; Núñez-Ramírez *et al.*, 2022). Entre los elementos esenciales para su desarrollo, el potasio (K) destaca por su papel en funciones fisiológicas críticas como la regulación osmótica, la apertura estomática y el transporte de fotoasimilados (Oosterhuis, Loka, Kawakami y Pettigrew, 2014; Lotfi *et al.*, 2022). Sin embargo, su disponibilidad en el suelo puede verse afectada por factores edáficos específicos, limitando su aprovechamiento por el cultivo (Gurav, Datta, Ray, Choudhary y Ahmed, 2018; Raheb y Heidari, 2012).

En suelos agrícolas con diferencias en pH, y niveles de salinidad (conductividad eléctrica [CE]), la disponibilidad y movilidad del potasio pueden verse modificadas, afectando su absorción por las plantas (Shabala y Cuin, 2008; Shakeri y Abtahi, 2018). Este fenómeno es especialmente relevante en regiones áridas, donde la acumulación de sales y las propiedades físico-químicas del suelo pueden interferir con la dinámica del K (Shirazi, Enjavinezhad y Moosavi, 2024). Por ello, es necesario comprender cómo responde en el cultivo de trigo a distintas dosis de potasio bajo condiciones edáficas contrastantes, con el fin de diseñar estrategias de fertilización más eficientes y sitio-específicas. La evaluación de dicha respuesta puede también aportar información sobre la interacción entre el potasio y el ambiente edáfico en contextos de manejo real (Lotfi *et al.*, 2022).

En este estudio se evaluó el efecto de cuatro dosis de potasio sobre el cultivo de trigo en dos sitios agrícolas del Valle de Mexicali (vertisol hiposálico calcárico y cambisol calcárico hipersódico), los cuales presentaron propiedades edáficas contrastantes (pH, CE y concentración de NO_3^- y K^+ en el extracto de pasta saturada del suelo). Las variables evaluadas incluyeron la determinación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la concentración de NO_3^- y K^+ en el extracto celular del tallo, indicadores de rendimiento y calidad del grano, así como la residualidad química del suelo al final del ciclo. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta nutrimental y productiva del trigo a la aplicación de diferentes dosis de potasio en dos tipos de suelo, vertisol hiposálico calcarico y cambisol calcárico hipersódico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Estudio

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo otoño-invierno 2018-2019 (diciembre a mayo) en dos localidades agrícolas del Valle de Mexicali, Baja California, México. El primer experimento (Exp. 1) se estableció en el Campo Experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California ($32^\circ 24' 12.34'' \text{ N}$, $115^\circ 11' 47.37'' \text{ O}$; 9.0 m de altitud), sobre un suelo clasificado como vertisol hiposálico calcárico, con alta salinidad ($\text{CE} = 5.06 \text{ dS m}^{-1}$), pH alcalino (8.20), y concentraciones de 114 y 61 mg L^{-1} de NO_3^- y K^+ , respectivamente, determinadas en el extracto de pasta saturada.

El segundo experimento (Exp. 2) se realizó en una parcela comercial del Ejido Yucatán (32° 35' 14.82" N, 115° 05' 37.73" O; 14.0 m de altitud), sobre un suelo cambisol calcárico hipersódico, con salinidad clasificada como normal (CE = 2.5 dS m⁻¹), pH alcalino (8.28), y concentraciones de 32 mg L⁻¹ de NO₃⁻ y 34 mg L⁻¹ de K⁺ en el extracto de pasta saturada. Ambos suelos han sido manejados en los últimos cuatro ciclos agrícolas bajo un sistema de monocultivo de trigo. En ambos lugares se tomaron las temperaturas mínimas y máximas, así como las unidades calor acumuladas [T base 0 °C; (McMaster y Wilhelm, 1997)] durante un período de 120 días que duró el experimento.

Establecimiento y Diseño Experimental

En ambos experimentos se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Se evaluaron cuatro dosis de potasio (0, 80, 160 y 320 kg K₂O ha⁻¹), aplicadas como sulfato de potasio granulado. La fertilización potásica se realizó al momento de la siembra, incorporando el total de unidades de fertilizante a la misma profundidad de colocación de la semilla (2.50 cm). La variedad utilizada fue CIRNO sembrada a una densidad de 200 kg de semilla ha⁻¹ (Figuerola-López *et al.*, 2010). El inicio del experimento se consideró a partir del riego de germinación. Cada unidad experimental consistió en una parcela de 2.0 × 6.0 m (12 m²), separadas entre sí por calles de 1.0 m de ancho, con el fin de evitar interferencia entre tratamientos.

Riegos, Fertilización y Control de Malezas

En ambos experimentos se realizaron cinco riegos por gravedad, con una lámina de riego total estimada entre 95 y 100 cm. En el Exp. 1, el riego de germinación se efectuó el 20 de diciembre de 2018, mientras que en el Exp. 2 fue el día 21 de diciembre del mismo año. Posteriormente, se realizaron cuatro riegos de auxilio con intervalos variables entre fechas; el primer riego se aplicó entre los 35 y 40 días después de la siembra (dds), el segundo entre 65 y 70 dds, el tercero entre 80 y 85 dds y finalmente el cuarto y último riego fue a los 95 dds. En todos los casos, se procuró mantener al cultivo libre de estrés hídrico durante el ciclo.

La fertilización nitrogenada consistió en una aplicación en presembrado de 70 kg ha⁻¹ de N, utilizando urea granulada (46-00-00). Posteriormente, se aplicaron 130 kg ha⁻¹ de N en forma de amoníaco anhidro (NH₃; 82.25% N), fraccionados en dos aplicaciones iguales, realizadas durante el segundo y tercer riego de auxilio. No se aplicó fósforo en ninguno de los experimentos. Durante el desarrollo del cultivo, se presentó infestación de zacate alpiñillo (*Phalaris paradoxa* L.), el cual fue controlado mediante una aplicación de AXIAL® (Pinoxaden + Cloquintocet-Mexyl) a una dosis de 600 cm³ ha⁻¹. La presencia ocasional de quelite (*Chenopodium spp.*) se controló de forma manual. No se detectaron problemas fitosanitarios relacionados con insectos plaga.

NDVI, NO₃⁻ y K⁺ en ECT

A los 33, 65 y 85 dds, se determinó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) mediante el sensor óptico GreenSeeker® (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, USA). Las mediciones se realizaron en días soleados y sin viento, conduciendo el sensor a una altura aproximada de 80 cm sobre el dosel, en trayectorias paralelas a las hileras de siembra y con el haz de luz perpendicular al surco, siguiendo las recomendaciones de Zhang *et al.* (2019). El uso del sensor se basó en su comprobada relación que existe entre los valores NDVI y el crecimiento del cultivo de trigo (Santillano-Cázares, 2013).

En las mismas fechas, en horario de las 08:00 y 10:00 h, se recolectaron 5 a 10 plantas por parcela experimental. Se cortaron los primeros 10 cm de la base del tallo, y se extrajo el jugo celular mediante presión manual utilizando una prensa de ajos. Posteriormente, se determinaron la concentración de NO₃⁻ y K⁺ en el extracto celular del tallo. Para ello, las concentraciones de NO₃⁻ y K⁺ se determinaron in situ con sensores portátiles Horiba LAQUAtwin® (Kyoto, Japan), siguiendo el método descrito previamente por Grijalva-Contreras, Robles, Macías, Santillano y Núñez (2016).

Rendimiento y Calidad del Grano

Al llegar a la madurez comercial del cultivo (120 dds), se cuantificó el número de espigas por metro cuadrado y se cosechó la misma superficie para estimar el rendimiento de grano (Mg ha⁻¹; 14% humedad en grano). Posteriormente, se analizó una submuestra para determinar el peso hectolítrico y el contenido de proteína cruda (%) en grano, utilizando el equipo IM 9500s (Perten Instruments®, Perkin Elmer, U.S.A.).

Residualidad Química del Suelo

Posterior a la cosecha (125 dds), se muestreó el suelo a una profundidad de 0-30 cm en cada parcela experimental. Se determinó el pH, la conductividad eléctrica (CE) y las concentraciones de NO₃⁻ y K⁺ en el extracto de pasta saturada (EPS) (Allison *et al.*, 1954). El pH y la CE se midieron con un sensor multiparámetro HI 9829 (Hanna Instruments®), y los iones NO₃⁻ y K⁺ se determinaron con sensores portátiles Horiba LAQUAtwin®.

Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para evaluar el efecto de los tratamientos de potasio sobre las variables de NDVI, concentración de NO_3^- y K^+ en el extracto celular de tallo (ECT), rendimiento de grano, concentración de proteína, y química residual en el suelo. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey. Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico Minitab 14 (Minitab, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ambiente

En la Figura 1, los paneles A y B muestran la evolución diaria de la temperatura máxima y mínima en el Exp. 1 (Campo Experimental UABC) y el Exp. 2 (Ejido Yucatán), respectivamente. En ambos sitios, la temperatura máxima varió entre los 18 y 37 °C, mientras que la temperatura mínima fluctuó entre 2 y 13 °C, sin registros de heladas o estrés térmico severo. Por otro lado, los paneles C y D muestran la acumulación térmica expresada como grados día (°C día), calculados a partir de una temperatura base para trigo. Ambos sitios presentaron una acumulación térmica progresiva y casi lineal, alcanzando aproximadamente los 1800 °C al término del ciclo (120 dds). De forma general, las condiciones de temperatura y de grados día acumulados fueron muy similares y son consideradas favorables para el desarrollo fenológico del trigo (Zhang *et al.*, 2022).

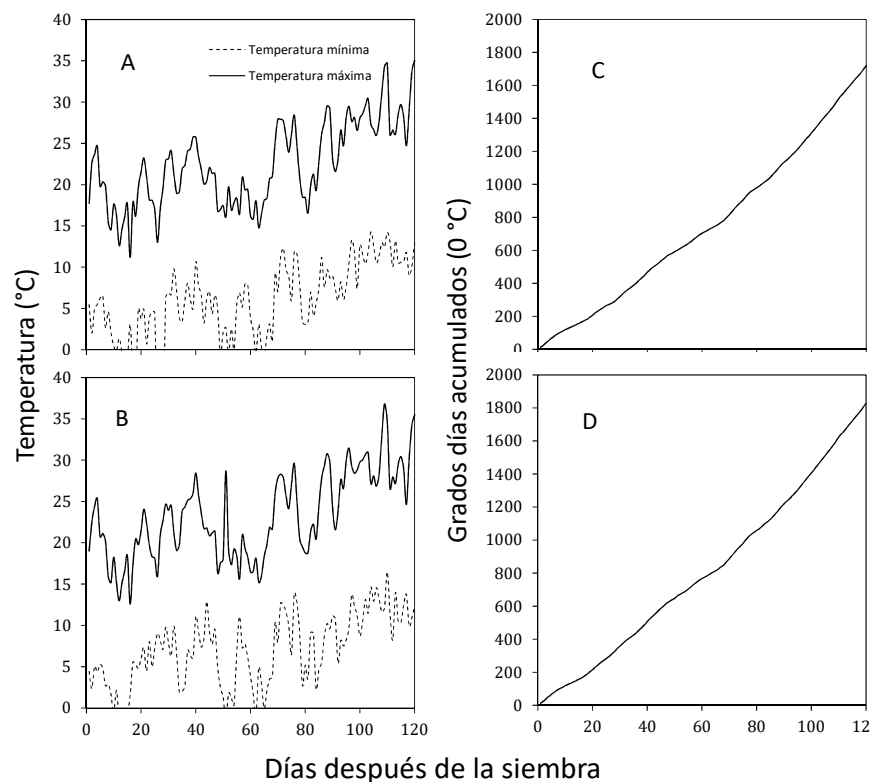


Figura 1. Comportamiento térmico durante el ciclo del cultivo de trigo en dos sitios del Valle de Mexicali. Paneles A y B: temperatura mínima (línea punteada) y máxima (línea continua) en el Exp. 1 (Campo Experimental UABC) y Exp. 2 (Ejido Yucatán), respectivamente. Paneles C y D: acumulación de grados día (°C·día) en los mismos sitios. **Figure 1. Thermal behavior during the wheat growing cycle at two sites in the Mexicali Valley.** Panels A and B: minimum (dashed line) and maximum (solid line) temperature in Exp. 1 (Experimental Station, UABC) and Exp. 2 (Ejido Yucatán), respectively. Panels C and D: accumulated growing degree days (°C·day) at the same sites.

NDVI, NO₃⁻ y K⁺ en ECT

Durante el ciclo del cultivo, los valores de NDVI no mostraron diferencias significativas entre las dosis de fertilización con potasio en ninguno de los dos experimentos (Cuadro 1). En el Exp. 1, los valores fluctuaron entre 0.53 y 0.64 unidades, mientras que en el Exp. 2 variaron entre 0.66 y 0.77. Aunque no se observaron efectos estadísticamente significativos ($p > 0.05$), los valores más altos de NDVI se registraron a los 65 dds en ambos sitios, lo cual coincide con el máximo desarrollo vegetativo del cultivo (Verhulst *et al.*, 2011).

En cuanto a la concentración de nitratos en el extracto celular del tallo (ECT), no se detectaron diferencias estadísticas significativas en ninguna de las fechas de muestreo en ambos sitios. No obstante, a los 33 dds, en el Exp. 2 se observó una tendencia a una mayor concentración de nitratos con la dosis de 80 kg K₂O ha⁻¹ (3100 mg L⁻¹), lo cual podría estar relacionado con un posible efecto indirecto del potasio en la absorción y transporte del nitrógeno (Guo *et al.*, 2019). Sin embargo, estos valores están muy por debajo a los considerados como suficientes para obtener altos rendimiento en trigo harinero (4000 - 5500 mg L⁻¹) (Grijalva-Contreras *et al.*, 2016).

Respecto a la concentración de potasio en el ECT, en el Exp. 2 se detectaron diferencias significativas a los 33 y 65 dds ($p = 0.006$ y $p = 0.001$, respectivamente). A los 33 dds se observó que, con la fertilización con K, resultó menor la concentración del elemento en el ECT. La concentración más alta se observada de 5950 mg L⁻¹. Por otro lado, a los 65 dds la mayor concentración de K resultó con el tratamiento de 80 kg ha⁻¹ de K₂O, mientras que, con dosis mayores la concentración de K en ECT disminuyó. Estos resultados sugieren una interacción compleja entre el suministro de potasio y la disponibilidad edáfica residual, particularmente en suelos con baja salinidad o de menor carga iónica, como es el caso del Exp. 2 (Hussain, Ahmad, Waraich y Nawaz, 2015).

Rendimiento y Calidad del Grano

En ambos experimentos, la fertilización potásica no tuvo efectos estadísticamente significativos ($p > 0.05$) sobre el número de espigas por metro cuadrado, el peso de 1000 granos, el peso hectolítrico, la concentración de proteína y el rendimiento (Cuadro 2). En el Exp. 1, el número de espigas varió entre 285 y 333 m², con una tendencia no significativa a una mayor densidad en la dosis de 80 kg K₂O ha⁻¹. En este mismo experimento, el rendimiento osciló entre 3.71 y 4.65 Mg ha⁻¹, siendo el valor más alto también con la dosis de 80 kg ha⁻¹, aunque sin diferencias estadísticas.

Cuadro 1. Efecto de la fertilización potásica sobre el índice NDVI, y las concentraciones de nitratos y potasio en el extracto celular del tallo de trigo.
Table 1. Effect of potassium fertilization on NDVI and the concentrations of nitrates and potassium in the stem cell extract of wheat.

		NDVI		Nitratos			Potasio		
Exp. 1 ICA-UABC		----- mg L ⁻¹ -----							
K ₂ O (kg ha ⁻¹)	33 [†]	65	85	33	65	85	33	65	85
0	0.63	0.64	0.61	1383	1525	1103	4075	4125	3625
80	0.53	0.61	0.61	1825	1500	850	3875	4300	3250
160	0.63	0.64	0.60	1650	1300	980	3675	4325	3500
320	0.59	0.64	0.61	1825	1600	933	4100	3950	3375
Probabilidad	0.633	0.920	0.984	0.245	0.346	0.690	0.651	0.903	0.944
Desv. estándar	0.110	0.050	0.020	332	232	299	529	805	918
Exp. 2 Ej. Yucatán									
0	0.69	0.76	0.68	1450	827	1110	5950 a [†]	6825 b	5225
80	0.72	0.77	0.67	3100	936	1362	4166 b	7933 a	5600
160	0.66	0.74	0.66	2300	1675	815	4250 b	6100 bc	5450
320	0.67	0.77	0.71	1800	1160	1350	3875 b	5525 c	5625
Probabilidad	0.466	0.221	0.186	0.157	0.171	0.463	0.006	0.001	0.859
Desv. estándar	0.560	0.020	0.020	993	534	537	710	474	732

[†] Días después de la siembra. [†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas.

[†] Days after seeding. [†] Different letters within the same column indicate statistically significant differences.

Cuadro 2. Efecto de la fertilización potásica sobre el número de espigas, el peso de 1000 granos, el peso hectolítrico, el contenido de proteína y el rendimiento del cultivo de trigo.**Table 2. Effect of potassium fertilization on spike density, thousand grain weight, test weight, protein content, and yield in wheat crop.**

K ₂ O (kg ha ⁻¹)	Espigas	Peso 1000 granos	Peso hectolítrico	Proteína	Rendimiento
Exp. 1 ICA-UABC		g	g L ⁻¹	%	Mg ha ⁻¹
0	296	46.25	76.74	12.06	3.86
80	333	46.35	76.75	12.00	4.65
160	310	47.60	75.45	12.23	3.71
320	285	47.35	75.86	12.00	4.01
Probabilidad	0.636	0.799	0.444	0.886	0.443
Desv. estándar	54.09	5.291	1.333	0.469	0.841
Exp. 2 Ej. Yucatán					
0	308	42.95	76.15	12.86	6.47
80	274	44.20	75.39	13.03	5.83
160	332	44.60	77.52	12.86	7.31
320	296	42.65	76.71	12.76	7.55
Probabilidad	0.651	0.414	0.368	0.915	0.414
Desv. estándar	64.28	4.242	1.646	0.627	1.555

En el Exp. 2, los rendimientos fueron superiores, con valores entre 5.83 y 7.55 Mg ha⁻¹. La mayor producción se observó con la dosis de 320 kg K₂O ha⁻¹, seguida de 160 K₂O ha⁻¹. Sin embargo, las diferencias entre tratamientos no fueron significativas ($p = 0.414$), posiblemente debido a la alta variabilidad registrada en los valores obtenidos (Desviación estándar = 1.555 Mg ha⁻¹). Es importante señalar que el Exp. 2 presentó un mayor potencial productivo que el Exp. 1, lo cual podría explicarse por la menor salinidad inicial del suelo, y la mayor cantidad de NO₃ y K⁺ que ya existía en el suelo, lo que habría favorecido una mayor eficiencia de absorción de nutrientes y una mejor respuesta fisiológica del cultivo (Hussain *et al.*, 2015).

El contenido de proteína en grano mostró una tendencia general a mantenerse estable entre tratamientos en ambos sitios, con valores de 12.00 a 12.23% en el Exp. 1 y de 12.76 a 13.03 % en el Exp. 2. De forma similar, el peso hectolítrico y el peso de 1000 granos, variaron ligeramente entre tratamientos, pero sin expresar diferencias significativas. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones de los experimentos, el potasio no limitó la calidad del grano aunque sí pudo influir en el rendimiento absoluto en función del sitio (Kumar, Ramesh, Jinger y Rajpoot, 2022).

Residualidad Química del Suelo

La aplicación de potasio no provocó efectos significativos sobre los parámetros químicos del suelo evaluados al final del ciclo del cultivo (Cuadro 3). En el Exp. 1, los valores de pH oscilaron entre 8.40 y 8.50, mientras que en el Exp. 2 variaron entre 8.29 y 8.43. En ambos casos, el pH permaneció en un rango alcalino, sin presentar cambios atribuibles a las dosis de fertilizante potásico ($p > 0.05$). Por otro lado, la salinidad, expresada como conductividad eléctrica (CE), presentó ligeras fluctuaciones entre tratamientos. En el Exp. 1, los valores oscilaron entre 2.30 y 3.25 dS m⁻¹, mientras que en el Exp. 2 se mantuvieron entre 2.21 y 2.84 dS m⁻¹. Estas variaciones no fueron estadísticamente significativas, pero reflejan la influencia del manejo del riego y del ambiente sobre la dinámica de sales en este tipo de suelos agrícolas (Pessarakli, 1991).

Respecto a la concentración de nitratos, tampoco se observaron diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los sitios (Exp. 1: $p = 0.885$ y Exp. 2: $p = 0.961$). Sin embargo, en ambos experimentos se mantuvieron niveles moderadamente altos de nitrógeno residual en el extracto de pasta saturada, lo cual sugiere un manejo poco eficiente del fertilizante nitrogenado aplicado durante el ciclo.

Cuadro 3. Efecto de la aplicación de potasio sobre el pH, la salinidad, y las concentraciones residuales de nitratos y potasio en suelos cultivados con trigo.**Table 3. Effect of potassium application on pH, salinity, and residual nitrate and potassium concentrations in soils cultivated with wheat.**

K ₂ O (kg ha ⁻¹)	pH	Salinidad	Nitratos	Potasio
Exp. 1 ICA-UABC		dS m ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----	
0	8.40	3.25	135.00	26.00
80	8.45	2.30	107.50	20.75
160	8.40	3.06	128.50	22.25
320	8.50	2.50	115.50	24.75
Probabilidad	0.685	0.701	0.885	0.472
Desv. estándar	0.119	1.24	53.81	5.019
Exp. 2 Ej. Yucatán				
0	8.35	2.30	96.50	30.25
80	8.29	2.21	104.25	26.25
160	8.43	2.36	95.00	27.25
320	8.36	2.84	106.00	25.75
Probabilidad	0.491	0.200	0.961	0.884
Desv. estándar	0.119	0.417	32.52	8.694

En el caso del potasio residual, se detectaron valores ligeramente mayores en el Exp. 2 (25.75 a 30.25 mg L⁻¹) en comparación con el Exp. 1 (20.75 a 26.00 mg L⁻¹), lo cual podría atribuirse a las diferencias en la capacidad de intercambio catiónico o en la dinámica de lixiviación entre los sitios. No obstante, las diferencias entre tratamientos, estas no fueron significativas (Exp. 1: $p = 0.472$ y Exp. 2: $p = 0.884$). Estos resultados indican que, bajo las condiciones edáficas y de manejo del presente estudio, la fertilización potásica no generó una acumulación residual importante de K en el suelo al término del ciclo.

Los resultados encontrados en este estudio demuestran la necesidad de estudiar la dinámica del K en estos dos tipos de suelos. La fijación y la liberación del K soluble e intercambiable tiene gran influencia en la disponibilidad de este elemento para las plantas (Olaniyan *et al.*, 2022). En suelos cambisoles y vertisoles, el tipo de arcillas determina la velocidad de liberación de K (Najafi-Ghiri y Abtahi, 2011). Algunas investigaciones demuestran que los suelos cambisoles pueden retener más K que los vertisoles. Así mismo, la liberación de K es mayor en los suelos vertisoles que en los cambisoles aunque en el tiempo no es constante (Awgchew, Beyene y Kifilu, 2024). Al respecto es importante considerar que en cultivos como los cereales, la demanda de total K y su extracción por la cosecha es muy superior a la que el suelo puede suplir (Wang, Xie y Tan, 2024; Das, Sahoo, Raza, Barman y Das, 2022). El conocimiento detallado de la dinámica de K ayuda a entender mejor el potencial de los suelos para suministrar K a este tipo de cultivos y a diseñar estrategias más eficientes de fertilización potásica.

CONCLUSIONES

La aplicación de potasio no tuvo efectos significativos sobre el rendimiento, la calidad del grano ni las variables fisiológicas del trigo en suelos del Valle de Mexicali, debido a la alta disponibilidad nutrimental presente en el suelo y en el cultivo. Tanto el NDVI como la concentración de K⁺ en el ECT mostraron una capacidad predictiva limitada, por lo que su interpretación debe considerar el contexto edáfico y agronómico. Bajo condiciones similares, la fertilización potásica podría no ser necesaria en suelos con más de 34 mg L⁻¹ de K⁺ en solución; sin embargo, se recomienda continuar con estudios de largo plazo y que los agricultores realicen análisis previos del suelo para evitar aplicaciones innecesarias y reducir costos de producción.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

FINANCIACIÓN

Los recursos económicos y en especie fueron provistos por parte de la asignatura de Producción de Cultivos Agrícolas, que se llevó a cabo dentro del Programa de Ingeniero Agrónomo del Instituto de Ciencias Agrícolas del a Universidad Autónomas de Baja California. Así mismo por parte del Ingeniero Ernesto García García.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: I.E.G. y F.N.R. Metodología: F.N.R. e I.E.G. Validación: A.M.M, J.C.V.A y J.R.R.I. Investigación: I.E.G y F.N.R. Recursos, A.M.M. Escritura, preparación del borrador original: F.N.R. Escritura, revisión y edición: C.M.P., J.C.V.A. y Y.R.O. Adquisición de fondos: F.N.R. y A.M.M.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece infinitamente a los Ingenieros Ernesto García García y Melisa García Esqueda, quienes contribuyeron grandemente durante este trabajo de investigación.

LITERATURA CITADA

- Allison, L. E., Bernstein, L., Bower, C. A., Brown, J. W., Fireman, M., Hatcher, J. T., ... & Wilcox, L. V. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Handbook No 60*. Washington, D.C., USA: USDA-ARS.
- Awgchew, H., Beyene, S., & Kifilu, A. (2024). Potassium adsorption capacity and desorption kinetics in soils of Qenberenaweti sub-watershed, central highlands of Ethiopia. *Heliyon*, 10(10), e31336. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31336>
- Das, D., Sahoo, J., Raza, M. B., Barman, M., & Das, R. (2022). Ongoing soil potassium depletion under intensive cropping in India and probable mitigation strategies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00728-6>
- Figuroa-López, P., Félix-Fuentes, J. L., Fuentes-Dávila, G., Valenzuela-Herrera, V., Chávez-Villalba, G., & Mendoza-Lugo, J. A. (2010). CIRNO C2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(5), 739-744.
- Foulkes, M. J., Molero, G., Griffiths, S., Slafer, G. A., & Reynolds, M. P. (2022). Yield Potential. En M. P. Reynolds & H.-J. Braun (Eds.). *Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate* (pp. 379-396). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_21
- Grijalva-Contreras, R. L., Robles-Contreras, F., Macías-Duarte, R., Santillano-Cázares, J., & Núñez-Ramírez, F. (2016). Nitrógeno en trigo y su efecto en el rendimiento y en la concentración de nitratos y potasio en el extracto celular de tallo (ECT). *Acta Universitaria*, 26(5), <https://doi.org/10.15174/au.2016.963>
- Guo, J., Jia, Y., Chen, H., Zhang, L., Yang, J., Zhang, J., ... & Zhou, Y. (2019). Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat are affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply. *Scientific Reports*, 9(1), 1248. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37838-3>
- Gurav, P. P., Datta, S. C., Ray, S. K., Choudhari, P. L., & Ahmed, N. (2018). Assessment of potassium release threshold levels of Vertisols (shrink-swell soils) in different agro-ecological regions of India. *Applied Clay Science*, 165, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.08.008>
- Hussain, R. A., Ahmad, R., Waraich, E. A., & Nawaz, F. (2015). Nutrient Uptake, Water Relations, and Yield Performance of Different Wheat Cultivars (*Triticum aestivum* L.) under Salinity Stress. *Journal of Plant Nutrition*, 38(13), 2139-2149. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.958169>
- Kumar, D., Ramesh, K., Jinger, D., & Rajpoot, S. K. (2022). Effect of potassium fertilization on water productivity, irrigation water use efficiency, and grain quality under direct seeded rice-wheat cropping system. *Journal of Plant Nutrition*, 45(13). <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046071>

- Lotfi, R., Abbasi, A., Kalaji, H. M., Eskandari, I., Sedghieh, V., Khorsandi, H., ... & Rastogi, A. (2022). The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.04.010>
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291-300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Minitab (2004). *Minitab Statistical Software User's Guide. Version 14*. State College, PA, USA: Minitab Inc.
- Najafi-Ghiri, M., & Abtahi, A. (2011). Potassium Dynamics in Calcareous Vertisols of Southern Iran. *Arid Land Research and Management*, 25(3), 257-274. <https://doi.org/10.1080/15324982.2011.565857>
- Núñez-Ramírez, F., Grijalva-Contreras, R. L., Macías-Duarte, R., Samaniego-Gámez, B. Y., Escobosa-García, I., Grimaldo-Juárez, O., & Suarez-Hernández, Á. M. (2022). Incorporación de paja al suelo, inoculación con zinc a la semilla y fertilización con nitrógeno en trigo cultivado bajo condiciones de suelo salino. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1010>
- Olanayan, F. T., Alori, E. T., Adekiya, A. O., Ayorinde, B. B., Daramola, F. Y., Osemwegie, O. O., & Babalola, O. O. (2022). The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. *Annals of Microbiology*, 72(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01701-8>
- Oosterhuis, D. M., Loka, D. A., Kawakami, E. M., & Pettigrew, W. T. (2014). The Physiology of Potassium in Crop Production. En D. L. Sparks (Ed.) *Advances in Agronomy* (pp. 203-233). Cambridge, MA, USA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00003-1>
- Pessarakli, M. (1991). Water utilization and soil salinity control in arid-zone agriculture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22(17-18), 1787-1796. <https://doi.org/10.1080/00103629109368535>
- Raheb, A., & Heidari, A. (2012). Effects of clay mineralogy and physico-chemical properties on potassium availability under soil aquic conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(4), 747-761. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000029>
- Rodríguez-González, R. E., Paz Hernández, J. J., Iñiguez Monroy, C. G., Rueda Puente, E. O., Avendaño-Reyes, L., Cruz-Villegas, M., ... & García López, A. M. (2014). Estabilidad de rendimiento en trigo en Valle de Mexicali, México. *Phyton (Buenos Aires)*, 83(1), 65-70.
- Santillano-Cázares, J. (2013). Uso de Sensores Ópticos para la Fertilización de Trigo (*Triticum aestivum* L.). *Terra Latinoamericana*, 31(2), 1-9.
- Shabala, S., & Cuin, T. A. (2008). Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 651-669. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x>
- Shakeri, S., & Abtahi, S. A. (2018). Potassium forms in calcareous soils as affected by clay minerals and soil development in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, Southwest Iran. *Journal of Arid Land*, 10(2), 217-232. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0052-8>
- Shirazi, M. P., Enjavinezhad, S. M., & Moosavi, A. A. (2024). Chemical fractions of potassium in arid region calcareous soils: The impact of microclimates and physiographic variability. *Plos One*, 19(11), e0314239. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314239>
- Verhulst, N., Govaerts, B., Nelissen, V., Sayre, K. D., Crossa, J., Raes, D., & Deckers, J. (2011). The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. *Field Crops Research*, 120(1), 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.012>
- Wang, C., Xie, Y., & Tan, Z. (2024). Soil potassium depletion in global cereal croplands and its implications. *Science of The Total Environment*, 907, 167875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167875>
- Zhang, J., Liu, X., Liang, Y., Cao, Q., Tian, Y., Zhu, Y., ... & Liu, X. (2019). Using a Portable Active Sensor to Monitor Growth Parameters and Predict Grain Yield of Winter Wheat. *Sensors*, 19(5), 1108. <https://doi.org/10.3390/s19051108>
- Zhang, Z., Zhou, N., Xing, Z., Liu, B., Tian, J., Wei, H., ... & Zhang, H. (2022). Effects of temperature and radiation on yield of spring wheat at different latitudes. *Agriculture*, 12(5), 627. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050627>