

Diagnóstico nutrimental del suelo y foliar en el cultivo de maíz

Fresia Pacheco-Sangerman
Víctor Prado-Hernández
Ranferi Maldonado-Torres[§]
Edmundo Robledo-Santoyo

¹Departamento de Suelos-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, México. CP. 56230. (pacheco-sangerman29@hotmail.com; vpradohdez@gmail.com; erobledos@chapingo.mx).

Autor para correspondencia: ranferimt@yahoo.com.mx.

Resumen

Es importante definir dosis óptimas de fertilización para un manejo adecuado de la nutrición de los cultivos y mejora significativa del rendimiento y calidad de cosecha. El presente trabajo fue realizado en el año 2019 en el municipio de Texcoco, Estado de México. Con el objetivo de evaluar cinco dosis de fertilización tomando como base el diagnóstico de la fertilidad de suelos para que mediante tres metodologías de diagnóstico foliar determinar el balance nutrimental. Los tratamientos evaluados fueron (T₀: testigo absoluto, T₁: dosis del productor, T₂: 0.5 de la dosis óptima, T₃: dosis óptima, T₄: 1+0.5 de la dosis óptima) en dos variedades de maíz (estrella y celeste). Los resultados obtenidos mostraron que el suelo es arcilloso, con un pH neutro, muy bajo en Cu, bajo en Fe y Mn y medio en N, Zn y CIC, alto de materia orgánica y muy alto de P, K, Ca, Mg y B. El diagnóstico realizado con las tres metodologías de interpretación demostró que los nutrimentos N y Zn fueron los más deficientes mientras que el Ca y B se presentaron en niveles altos. La concentración de nutrientes del suelo y el diagnóstico foliar Kenworthy presentó correlación directa para los elementos Cu y Mn, mientras que el P, K Ca, Mg y B fueron determinados como medios y altos tanto en el suelo como en la planta. Para el diagnóstico DRIS se determinó de medios o suficientes a altos niveles de Ca, Mg y B tanto en el suelo como en la planta. Por último, la concentración de Cu en el suelo y de la planta resultó baja; mientras que, la de B fue alta.

Palabras clave: diagnóstico nutrimental, nutrición vegetal, rendimiento de grano.

Recibido: junio de 2022

Aceptado: agosto de 2022

Introducción

Los fertilizantes son usados en la producción de cultivos ya que aportan nutrientes como son nitrógeno, fósforo y potasio que permiten un mayor crecimiento, desarrollo y producción de éstos (Sedlacek *et al.*, 2020). Considerar el uso de dosis eficientes de fertilizantes es vital para la obtención de altos rendimientos. El uso equilibrado de los fertilizantes y la reducción de los costos de producción son objetivos de la agricultura moderna (Yousaf *et al.*, 2016). La importancia de un buen diagnóstico para elaborar recomendaciones adecuadas de fertilizantes promueve un aumento en la calidad y productividad sin deterioro del ambiente. Además, es importante hacer un uso eficiente de los fertilizantes para evitar gastos innecesarios e incrementos en los costos de producción y reducir el deterioro del ambiente (Marschner, 2012).

La aplicación de nutrientes a través de la fertilización es una práctica común en el cultivo del maíz, de manera que una deficiencia nutrimental puede reducir entre 10 y hasta 30% el rendimiento, antes de que aparezcan los síntomas característicos de la deficiencia (Morejon *et al.*, 2017). La extracción de nutrientes se relaciona con el índice de cosecha nutrimental, el cual es alto para N y P, intermedio para S y muy bajo para Ca y Mg (Fontanetto *et al.*, 2006). El diagnóstico de la fertilidad y del estado nutrimental de las plantas se basa en el supuesto de que la tasa de crecimiento de las plantas se ve afectada por la concentración de nutrientes en el suelo y en la materia seca o fresca del brote. En general, el estatus nutrimental del tejido foliar refleja mejor el estado de balance de la planta y determina que nutrimentos están deficientes, suficientes o en exceso (Marschner, 2012).

Actualmente, existen variadas herramientas para determinar el estado nutricional de las plantas. Entre ellos el análisis de plantas resulta eficiente ya que se analiza el tejido como extractor de nutrientes. De esta manera, se complementa con el análisis químico del suelo y permite predecir los trastornos nutricionales antes de aparezcan los síntomas visuales (Prado y Caione *et al.*, 2012). El análisis de tejidos vegetales tiene la función de mejorar los rendimientos y calidad de las cosechas dependiendo del tipo de cultivo (Imakumbili *et al.*, 2020). A través de este análisis se pueden determinar las necesidades y exportación de nutrientes del cultivo, identificar deficiencias nutrimentales, evaluar el estado nutrimental, evaluar la respuesta a la aplicación de fertilizantes y diagnosticar niveles de nutrientes en diversos órganos vegetales.

Los resultados se interpretan comparando los valores de concentración de cada elemento de la muestra con el estándar respectivo o un valor considerado óptimo (Prado y Caione *et al.*, 2012). La aplicación de fertilizantes a los cultivos debe realizarse usando herramientas científicas como los análisis de suelos, agua y de tejido vegetal con el objetivo de evitar pérdidas por lixiviación, volatilización y desnitrificación de estos insumos los cuales afectan directamente el medio ambiente, además de aumentar los costos de producción.

Materiales y métodos

El experimento se desarrolló en el campo experimental ‘El Ranchito’, en el lote X-11, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. Se realizó un muestreo de suelos previo al cultivo usando el método en zig zag. Se colectaron 15 submuestras de manera aleatoria representativas del terreno, posteriormente se formó una muestra compuesta que fue enviada al laboratorio de análisis químico de suelos para la determinación de su fertilidad, mediante los métodos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2022). Después de obtener los resultados del análisis de fertilidad de suelos se estimó la dosis óptima de fertilización mediante el método de restitución (Conde *et al.*, 2018).

El diseño de tratamientos utilizado fue un diseño de tratamientos factorial 2×5. El primer factor consistió en dos variedades de maíz (Estrella y Celeste). El segundo factor estuvo compuesto por cinco dosis de fertilización (T₀: testigo absoluto, T₁: dosis del productor, T₂: 0.5 de la dosis óptima, T₃: dosis óptima, T₄: 1+0.5 de la dosis óptima). Al T₀ no se le aplicó fertilizante al suelo o a la planta, el T₁ consistió en aplicar la dosis que usan los productores de la región al cultivo de maíz. La dosis óptima se estimó, como se indicó previamente, con el método de restitución tomando en cuenta los resultados del análisis de suelo y a partir de esta se generaron los tratamientos T₂ y T₄. El método de restitución se usó para calcular la dosis óptima de todos los nutrimentos.

El cultivo se desarrolló bajo condiciones de temporal y le fueron suministrados riegos de auxilio cada 15 días. Los tratamientos se dispusieron en un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones cada una. El muestreo foliar se realizó en cada unidad experimental a los tres meses de desarrollo del cultivo de maíz y consistió en coleccionar de 25 plantas seleccionadas de manera aleatoria, hojas ubicadas de manera opuesta y debajo de la mazorca, fotosintéticamente activas, sanas, soleadas, limpias y sin daños físicos. Las hojas fueron lavadas para retirar las impurezas, secadas en una estufa con aire forzado a 70 °C hasta peso constante.

Posteriormente, fueron molidas usando un molino de acero inoxidable, de cada muestra se pesaron 0.5 g de materia seca, las cuales se transfirieron a un matraz Kjeldahl y se adicionaron 4 ml de mezcla diácida (H₂SO₄:HClO₄) en proporción 4:1 y 2 ml de H₂O₂, y se colocaron en una plancha de digestión a 230 °C durante 6 h. Después las muestras se retiraron y se dejaron enfriar (Jones, 2001). Cada muestra digerida se aforó a 50 ml, utilizando un matraz volumétrico y se transfirió a un recipiente de plástico previamente etiquetado. Las muestras finales se guardaron en condiciones de oscuridad y temperatura ambiente.

En el digestado se determinó mediante el método Kjeldahl la concentración de N total. El P fue medido a través del método vanadato-molibdato y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro de luz ultravioleta a 420 nm. El K y el Na se determinaron con un espectrofotómetro de emisión de flama (flamómetro) y el Ca, Mg, Fe, Cu y Zn con un espectrofotómetro de absorción atómica. El B se determinó mediante el método de la azometina-H y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro de luz ultravioleta a 620 nm (Jones, 2001).

Diagnóstico foliar. Para la interpretación del estado nutricional de la planta se utilizaron los métodos índice balance Kenworthy (Kenworthy (1967), sistema integrado de diagnóstico y recomendación Lucena (2002) y desviación óptima porcentual (Montañes *et al.*, 1991). Para realizar el diagnóstico con cada método se buscaron valores de referencia óptimos para el cultivo de maíz. Las operaciones de índices de balance Kenworthy se calcularon mediante las siguientes fórmulas. Si $X < S$, entonces: $P = (X/S) * 100$. $I = (100 - P) * (V/100)$. $B = P + I$. Si $X > S$, entonces. $P = (X/S) * 100$. $I = (P - 100) * (V/100)$. $B = P - I$. Donde: X= es el valor de concentración de un nutrimento en la muestra; S es el valor de concentración de un nutrimento en la norma de referencia; P= es el porcentaje de estándar; V= es el coeficiente de variación; I= es la influencia de la variación y B= es el índice de equilibrio.

Criterios de decisión para el IB Kenworthy: escasez= 17-50; abajo del normal= 50-83; normal= 83-117; arriba del normal= 117-150; exceso= 150-183. Para el cálculo DRIS se establecieron las relaciones nutrimentales con base a los datos del análisis foliar; N/P, N/K, N/Ca, Mg/N, K/P, Ca/P,

Mg/P, Ca/P, Mg/K, Mg/Ca, etc. (Lucena, 2002) y se usaron las siguientes ecuaciones: Sí $A/B > a/b$ entonces $f(A/B) = 100 * \left(\frac{A/B}{a/b} - 1 \right) * \frac{10}{CV}$ 2). Sí $A/B < a/b$ entonces $f(A/B) = 100 * \left(1 - \frac{a/b}{A/B} \right) * \frac{10}{CV}$ 3). Donde: A/B = es la relación de dos nutrientes en la muestra; a/b = es la relación de dos nutrientes en la norma de referencia y CV = es el coeficiente de variación de la norma correspondiente.

Los índices se calcularon usando la siguiente ecuación: $\frac{[f(A/B)+f(A/C)+f(A/D)-f(E/A)+f(A/N)]}{z}$ 4).

Donde: A, B, C, D, E y N simbolizan nutrientes y z representa las funciones que intervienen en el cálculo. La función (ecuación 4) es (+) si el elemento A es numerador y (-) si es denominador. La suma de los índices positivos y negativos deben ser cero para que exista un balance entre los nutrientes de la muestra analizada. Los índices negativos significan deficiencia y los índices positivos indican suficiencia o excesos relativos. El más negativo es el más deficiente y los que le siguen indican el orden de requerimientos de los nutrientes.

El índice de desviación del óptimo porcentual se calculó aplicando la siguiente relación: $DOP = \frac{C * 100}{C_{ref}} - 100$ 1). Donde: C = es la concentración foliar (en porcentaje sobre materia seca) del elemento en la muestra analizada; C_{ref} = es el óptimo del mismo elemento (porcentaje sobre materia seca) definido en las mismas condiciones en que fue tomada la muestra problema y lógicamente, para el mismo cultivo. El signo del DOP para un elemento determinado será negativo en caso de déficit y positivo en caso de exceso. Cuando el contenido de la muestra coincida con el óptimo de referencia el DOP será igual a cero (Montañés *et al.*, 1991).

Resultados y discusión

Se inició la presentación con los resultados de la fertilidad, mostrando el diagnóstico del estado nutrimental del suelo. Posteriormente, se presentaron los resultados del estado nutrimental del tejido foliar del cultivo, haciendo el diagnóstico nutrimental mediante los métodos siguientes: índices de balance (Kenworthy, 1961), desviación óptima porcentual (Montañés *et al.*, 1991) y el sistema integrado de diagnóstico y recomendación (Beaufils, 1973). En los cuadros se presentaron las concentraciones nutrimentales, el índice de balance de cada nutriente y el orden de requerimiento nutrimental, destacando las deficiencias, suficiencias y excesos para cada tratamiento.

Diagnóstico nutrimental del suelo

Los resultados del análisis de suelo se presentan en el Cuadro 1, el diagnóstico del estado nutrimental del suelo indicó que el pH resultó neutro, el cual es adecuado para la disponibilidad de los nutrientes esenciales. Por su parte, la concentración de materia orgánica fue alta lo cual indica un aporte importante de nutrientes al descomponerse, los cuales podrán contribuir a la nutrición del cultivo de maíz y mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, contribuyendo de manera importante a su salud y sostenibilidad (Libohova *et al.*, 2018).

Cuadro 1. Análisis químico y físico del suelo en las unidades experimentales.

Parámetro	Concentración	Unidad	Clasificación
pH	6.72		Neutro
Materia orgánica	4.03	(%)	Alto
Nitrógeno inorgánico	28	(mg kg ⁻¹)	Medio
Fósforo	64.67	(mg kg ⁻¹)	Muy alto
Potasio	927	(mg kg ⁻¹)	Muy alto
Calcio	4 245.2	(mg kg ⁻¹)	Muy alto
Magnesio	766.3	(mg kg ⁻¹)	Muy alto
Hierro	5.45	(mg kg ⁻¹)	Bajo
Manganeso	10.59	(mg kg ⁻¹)	Bajo
Zinc	2.88	(mg kg ⁻¹)	Medio
Cobre	0.69	(mg kg ⁻¹)	Muy bajo
Boro	3.16	(mg kg ⁻¹)	Muy alto
Intercambio catiónico	22	(cmol kg ⁻¹)	Medio
Densidad aparente	1.16	(t m ⁻³)	Arcilloso

Los niveles de N resultaron medios requiriéndose la aplicación de alguna fuente fertilizante que lo contenga, especialmente de urea, nitrato de amonio o sulfato de amonio. Por su parte, los niveles de P, K, Ca, Mg y B resultaron en una concentración muy alta, de acuerdo con los estándares establecidos por Ankerman y Large (1977); Camberato y Pan (2000). La alta concentración de estos nutrientes se da por las aplicaciones periódicas de fertilizantes que se han realizado en el terreno en años previos al establecimiento del experimento y se han acumulado de tal manera que los niveles disponibles para el cultivo son excesivos, en cantidad y calidad (Horneck *et al.*, 2011).

Sin embargo, el exceso de P en el suelo puede interaccionar negativamente el calcio y con la mayoría de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu), ya sea por la formación de precipitados en el suelo o por procesos de inmovilización en los procesos metabólicos dentro de las plantas, lo cual impide la translocación de los elementos minerales desde la raíz a los distintos órganos de la planta y en consecuencia su asimilación (Brown y Tiffin, 1962; Verma y Minhas, 1987; James *et al.*, 1995; Zhu *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2015).

En cuanto a micronutrientes, el suelo presenta niveles bajos de hierro y manganeso lo que pueden provocar problemas de clorosis y afectar significativamente procesos como la fotosíntesis y respiración, en especial el hierro por su función en la cadena de transporte de electrones y cofactor de enzimas (Schmidt *et al.*, 2020), es grupo prostético de muchas enzimas también está involucrado en la síntesis de clorofila y es esencial para el funcionamiento de los cloroplastos (Rout *et al.*, 2015). Por su parte, el zinc se encontró en un nivel medio en el suelo, siendo este un elemento de vital importancia en el establecimiento del cultivo de maíz, ya que es un precursor de triptófano, por lo que contribuye a una emergencia más rápida y homogénea de las semillas, formador de raíces y crecimiento del grano (Mortvedt, 2000). La concentración de Cu por otro lado fue muy baja. Por consiguiente, la fórmula de nutrición se integró 16.2-01-18.7 +1 Zn + 0.5Cu +0.15 B, en una dosis de 600 kg ha⁻¹ para la dosis óptima.

Índice de balance Kenworthy

Los datos de concentración nutrimental, los índices de balance de Kenworthy y el orden de requerimiento nutrimental para maíz variedad Celeste se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Diagnóstico nutrimental en maíz variedad Celeste con cinco dosis de fertilización utilizando el índice de balance Kenworthy.

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	IDN
Testigo											
CN	1.46	0.29	2.08	0.56	0.26	163.8	41.73	16.45	9.18	16.3	902.6
IBK	58.4	98.5	102.9	148.3	86.2	104.9	63.9	63.3	81.2	95	
ORN	N> Zn> Mn> Cu> Mg> B> P> K> Fe> Ca										
Tratamiento uno: dosis del productor											
CN	2.08	0.32	2.24	0.45	0.19	188.5	61.9	17.23	10	111.3	1314.8
IBK	75.2	105	109.4	125.1	72	113.7	75.4	65.1	85.3	488.6	
ORN	Zn> N> Mg> Mn> Cu> P> K> Fe> Ca> B										
Tratamiento dos: 0.5 de la dosis óptima											
CN	1.94	0.32	2.12	0.51	0.23	146.3	58.9	19.93	9.85	61.39	1108.6
IBK	71.4	104.1	104.7	138.2	80.2	98.7	73.7	71.3	84.5	281.8	
ORN	Zn> N> Mn> Mg> Cu> Fe> P> K> Ca> B										
Tratamiento tres: dosis óptima											
CN	2.15	0.32	2.28	0.54	0.2	173.7	72	19.08	9.7	72.66	1182.4
IBK	77.1	104.7	110.6	144.1	74.6	108.5	81.2	69.3	83.8	328.5	
ORN	Zn> N> Mg> Mn> Cu> Fe> P> K> Ca> B										
Tratamiento cuatro: 1.5 la dosis óptima											
CN	2.06	0.3	2.28	0.47	0.21	148.4	69.65	21.95	9.65	136.3	1421.4
IBK	74.5	99.4	110.6	130.3	75.9	99.4	79.8	75.9	83.6	592	
ORN	N> Zn> Mg> Mn> Cu> Fe> P> K> Ca> B										

CN= concentración en la hoja; IBK= índice de balance Kenworthy; IDN= índice de desbalance nutrimental; ORN= orden de requerimiento nutrimental; color rojo= nutrientes deficientes; color verde= nutrientes balanceados; color azul= nutrientes en exceso.

El análisis de los resultados permite afirmar que, en todos los tratamientos, los nutrientes N, Zn, Mg y Mn se encontraron en deficiencia. La deficiencia de Cu se presentó en los tratamientos T₀ (testigo) y T₄ (1.5 veces la dosis óptima). Los nutrientes que se ubicaron en un intervalo normal fueron Fe, P, K y Cu. Mientras que el Ca y B estuvieron arriba de la concentración normal y en exceso, respectivamente. Mientras que para la variedad Estrella se muestran en el (Cuadro 3). Se observó que, en todos los tratamientos hubo deficiencias de N, Zn y Mn. El P, Fe y Cu se encontraron dentro de intervalos normales.

Cuadro 3. Diagnóstico nutrimental en maíz variedad Estrella con cinco dosis de fertilización usando el índice de balance Kenworthy.

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	IDN
Testigo											
CN	1.35	0.26	1.72	0.58	0.26	135.9	44.65	18.13	7.3	25.16	905.9
IBK	55.3	89.6	89.4	153.9	86.3	95	65.6	67.1	72	131.7	
ORN	N> Mn> Zn> Cu> Mg> K> P> Fe> B> Ca										
Tratamiento uno: dosis del productor											
CN	2.03	0.28	1.31	0.58	0.32	163.9	59.53	20.28	10	133.1	1407.4
IBK	73.8	94.2	73.6	153.6	98	105	74.1	72.1	85.3	578.7	
ORN	Zn> K> N> Mn> Cu> P> Mg> Fe> Ca> B										
Tratamiento dos: 0.5 de la dosis óptima											
CN	1.76	0.28	1.4	0.57	0.29	133.4	50.13	16.55	11.23	147.5	799.3
IBK	66.4	95	77.1	151.8	91.4	94.1	68.7	63.5	91.3	638.7	
ORN	Zn> N> Mn> K> Cu> Mg> Fe> P> Ca> B										
Tratamiento tres: dosis óptima											
CN	2	0.29	1.72	0.52	0.27	168.3	60.35	17.78	9.58	178.1	1584
IBK	73.1	96.6	89.4	140.4	88.5	106.5	74.5	66.3	83.2	765.5	
ORN	Zn> N> Mn> Cu> Mg> K> P> Fe> Ca> B										
Tratamiento cuatro: 1.5 de la dosis óptima											
CN	1.83	0.25	1.46	0.53	0.23	143.2	71.35	20.8	10.73	186.2	1596
IBK	68.3	86.8	79.4	142	80.2	97.6	80.8	73.3	88.8	798.8	
ORN	N> Zn> K> Mg> Mn> P> Cu> Fe> Ca> B										

CN= concentración en la hoja; IBK= índice de balance Kenworthy; IDN= índice de desbalance nutrimental; ORN= orden de requerimiento nutrimental; color rojo= nutrientes deficientes; color verde= nutrientes balanceados; color azul= nutrientes en exceso.

El Ca y B por otra parte se presentaron dentro de un rango clasificado como arriba del normal y excesivo respectivamente. Correlacionando el diagnóstico foliar de la variedad Celeste con el de suelos, hubo correspondencia de Ca y B altos en el suelo y en la planta. Mientras que los niveles de Mn y Cu fueron bajos en el suelo y en las hojas de maíz. Por su parte, los niveles de P, K, Mg y B fueron altos en el suelo resultaron medios en el tejido foliar. Mientras que el N y Zn fueron medios en el suelo y bajos en el tejido foliar; es decir, que hubo algún tipo de pérdida de estos nutrientes en el suelo por fijación o volatilización que impidió su aprovechamiento por la planta de maíz variedad Celeste. Los resultados del análisis foliar fueron similares en deficiencia, suficiencia y en exceso, entre la variedad celeste y la estrella cuyos resultados se aprecian en el Cuadro 3.

Solo se observaron diferencia entre ambas variedades que en la variedad Estrella, el Mg se ubicó en un rango normal excepto en el tratamiento T₄ (1.5 de la dosis óptima), mientras que el K se catalogó como deficitario en los tratamientos T₁ (dosis del productor), T₂ (0.5 de la dosis óptima) y T₄(1.5 de la dosis óptima).

Diagnóstico nutrimental mediante DRIS

El sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS) clasifica el orden de requerimientos de nutrimentos (ORN) y el índice de desbalance nutrimental (IDN) de una muestra foliar, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 4 para la variedad Celeste.

Cuadro 4. Diagnóstico nutrimental para maíz variedad Celeste con cinco dosis de fertilización utilizando el sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS).

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	IDN
	Testigo										
CN	1.46	0.29	2.08	0.56	0.26	163.8	41.73	16.45	9.18	16.3	149.5
IBD	-362	-12.6	-70.6	56	64.7	175.4	16.5	-43.7	42.2	283.6	
ORN	N> K> Zn> P> Mn> Ca> Cu> Mg> Fe> B										
	Tratamiento uno: dosis del productor										
CN	2.08	0.32	2.24	0.45	0.19	188.5	61.9	17.23	10	111.3	1791.5
IBD	-159	-223	-186	-307	-382	78.2	177.7	-456	197.6	3051	
ORN	Zn> Mg> Ca> P> N> K> Fe> Mn> Cu> B										
	Tratamiento dos: 0.5 de la dosis óptima										
CN	1.94	0.32	2.12	0.51	0.23	146.3	58.9	19.93	9.85	61.39	612.7
IBD	-396	-117	-170	-111	-126	0	105.7	-142	109	1460	
ORN	N> Zn> K> Mg> P> Ca> Fe> Mn> Cu> B										
	Tratamiento tres: dosis óptima										
CN	2.15	0.32	2.28	0.54	0.2	173.7	72	19.08	9.7	72.66	711.5
IBD	-396	-157	-161	-127	-233	52.7	131.9	-236	113.9	1723	
ORN	N> Zn> K> P> Ca> Mg> Fe> Mn> Cu> B										
	Tratamiento cuatro: 1.5 de la dosis óptima										
CN	2.06	0.3	2.28	0.47	0.21	148.4	69.65	21.95	9.65	136.3	362.4
IBD	-663	-337	-251	-355	-410	-139	192.6	-351	226.8	3449	
ORN	N> Zn> K> P> Ca> Mg> Fe> Mn> Cu> B										

CN= concentración en la hoja; IBD= índice DRIS; IDN= índice de desbalance nutrimental; ORN= orden de requerimiento nutrimental; color rojo= nutrimentos deficientes; color negro= nutrimentos balanceados.

Los resultados indicaron que el diagnóstico DRIS clasifica al N, Zn, P, K, Ca y Mg como deficientes en todos los tratamientos. Por otro lado, el Mn, Fe, Cu y B se catalogaron en un rango normal. El tratamiento T₄ (1.5 de la dosis óptima) fue el que presentó la mayor cantidad de nutrimentos deficientes. El testigo por otro lado fue el que presentó menos nutrimentos deficientes, el N, K y P fueron deficientes en este tratamiento. Los tratamientos restantes T₁ (dosis del productor), T₂ (0.5 de la dosis óptima) y T₃ (dosis óptima) tuvieron deficiencias de N, K, P, Zn, Ca, Mg y Fe. En caso del Mn, Cu y B se presentaron en concentraciones normales.

Por su parte, la variedad Estrella cuyos resultados se muestran en el Cuadro 5 el Mg se ubicó en un rango normal excepto en el tratamiento T₄ (1.5 de la dosis óptima) donde se ubicó debajo de lo normal. El K se catalogó como deficitario en los tratamientos T₁ (dosis del productor), T₂ (0.5 de

la dosis óptima) y T₄ (1.5 de la dosis óptima). Se registran deficiencias de N, K y P para el testigo mientras que los demás tratamientos se reportan niveles deficitarios de fueron N, P, K, Zn, Mg, Ca y Fe. Nutrientes como el Mn, Cu y B estuvieron en concentraciones de suficiencia en todos los tratamientos. A pesar de que el suelo mostró altos niveles de P, K, Ca, Mg y B, el DRIS indicó que la planta mantuvo valores medios y bajos para estos nutrientes.

Cuadro 5. Diagnóstico nutrimental en maíz variedad Estrella con cinco dosis de fertilización utilizando el sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS).

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	IDN
Testigo											
CN	1.35	0.26	1.72	0.58	0.26	135.9	44.65	18.13	7.3	25.16	239
IBK	-421	-62.2	-160	70.1	57.5	99.7	43.1	7.4	30.4	574	
ORN	N> K> P> Zn> Cu> Mn> Mg> Ca> Fe> B										
Tratamiento uno: dosis del productor											
CN	2.03	0.28	1.31	0.58	0.32	163.9	59.53	20.28	10	133.1	1491.2
IBK	-666	-372	-628	-218	-128	-54.8	190.6	-324	230.4	3333	
ORN	N> K> P> Zn> Ca> Mg> Fe> Mn> Cu> B										
Tratamiento dos: 0.5 de la dosis óptima											
CN	1.76	0.28	1.4	0.57	0.29	133.4	50.13	16.55	11.23	147.5	1503.6
IBK	-857	-378	-542	-240	-209	-193	224.2	-586	275.4	4009	
ORN	N> Zn> K> P> Ca> Mg> Fe> Mn> Cu> B										
Tratamiento tres: dosis óptima											
CN	2	0.29	1.72	0.52	0.27	168.3	60.35	17.78	9.58	178.1	1844.8
IBK	-865	-463	-470	-398	-336	-115	239.4	-683	304.4	4631	
ORN	N> Zn> K> P> Ca> Mg> Fe> Mn> Cu> B										
Tratamiento cuatro: 1.5 de la dosis óptima											
CN	1.83	0.25	1.46	0.53	0.23	143.2	71.35	20.8	10.73	186.2	1787.2
IBK	-986	-589	-633	-394	-474	-229	263.3	-499	321.9	5006	
ORN	N> K> P> Zn> Mg> Ca> Fe> Mn> Cu> B										

CN= concentración en la hoja; IBK= índice DRIS; IDN= índice de desbalance nutrimental; ORN= orden de requerimiento nutrimental; color rojo= nutrientes deficientes; color negro= nutrientes balanceados.

Relación de resultados de la fertilidad del suelo y el diagnóstico foliar

Las tres metodologías de interpretación de análisis foliar coinciden en que los nutrientes más deficientes fueron N y Zn en todos los tratamientos en ambas variedades, los cuales coinciden en su nivel de deficiencia determinados en el suelo. La deficiencia de N en todos los tratamientos se debe principalmente a que es el nutriente más requerido por el cultivo y también se pierde fácilmente del suelo, por lo que no fue suficiente para cubrir la demanda del cultivo. Según Below (2010) el N con más frecuencia limita el crecimiento y rendimiento del maíz, debido a que las plantas requieren cantidades relativamente grandes de N (de 1.5 a 3.5% de peso seco de la planta) y este se pierde con mayor facilidad por diferentes procesos. Los bajos contenidos de Zn se explican debido a la alta concentración de P en el suelo, elemento que reacciona reteniéndolo y generando su deficiencia en las plantas (Adriano y Murphy, 1970).

Por su parte, el Mg, Mn y Cu en las tres metodologías fluctuaron entre el rango de deficiencia y normal expresando de forma indirecta las bajas concentraciones. En la metodología DRIS el P, K y Fe se ubicaron como deficientes mientras que en Kenworthy y DOP estos nutrientes se presentaron en una concentración normal. Con la excepción del B en el protocolo DRIS. Estas metodologías indicaron que el Ca y B estuvieron en exceso.

De acuerdo con el diagnóstico Kenworthy el tratamiento que tuvo más deficiencias nutrimentales en ambas variedades fue el T₄, siendo el tratamiento T₂ el que reportó un mejor balance nutrimental en la variedad Estrella. Según la metodología DRIS el tratamiento con menos niveles deficitarios de nutrientes fue el testigo en ambas variedades; se registraron las mayores deficiencias en el tratamiento T₄ para la variedad Celeste. Por otra parte, el diagnóstico DOP indica que para la variedad celeste todos los tratamientos presentaron niveles deficientes de nutrientes, mientras que en la variedad Estrella el tratamiento T₂ fue el tratamiento con menos niveles deficitarios y el tratamiento T₄ con mayores deficiencias nutrimentales.

La deficiencia de los micronutrientes se puede atribuir a la concentración tan alta de P en el suelo. Un exceso de P interacciona negativamente con la mayoría de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu), bien por la formación de precipitados en el suelo o por procesos metabólicos en las plantas que impiden la translocación de los nutrientes desde la raíz al resto de partes de la planta refieren autores como Brown y Tiffin (1962); Verma y Minhas (1987); James *et al.* (1995); Zhu *et al.* (2002); Zhang *et al.* (2015). Mecanismos que explican de reducción del Fe por aplicación de P pueden ser la inhibición de la absorción de Fe por las raíces, inhibición del transporte de Fe desde las raíces a los brotes y la inmovilización interna del Fe en la planta (Ayued, 1970; Elliott y Lauchli, 1985; Moraghan y Mascagni, 1991; Fageria, 2001).

Respecto al P y K en el análisis de suelo estos se calificaron como muy alto lo que explica lo obtenido en las metodologías de diagnóstico Kenworthy y DOP las cuales centran dichos nutrientes en una concentración normal. Por otro lado, los contenidos de Ca y B en el suelo se catalogaron como muy altas. Al comparar esta clasificación con los resultados de las tres metodologías donde al igual que en el suelo se clasificaron como excesivos, se puede observar una gran correlación entre los niveles nutrimentales del suelo y las que muestra la planta. Un exceso de Ca puede provocar deficiencia de K motivada por una insuficiente absorción de este, debido al antagonismo Ca-K, puede inducir a una clorosis férrica e inmovilizar el zinc, cobre y fósforo, provocando la deficiencia de estos elementos. Al igual que el K, niveles altos de Ca pueden provocar antagonismos importantes con el P y Mg.

Conclusiones

El diagnóstico determinó al suelo como arcilloso, con pH neutro, muy bajo en Cu, bajo en Fe y Mn, medio en N, Zn y CIC, alto en materia orgánica y muy alto de P, K, Ca, Mg y B. Las tres metodologías de interpretación foliar determinaron deficiencias y ORN diferentes, en una misma variedad y entre tratamientos. Sin embargo, en las tres metodologías se encontró que los nutrientes N y Zn fueron los más deficientes mientras que el Ca y B se presentaron en niveles altos. Para la variedad celeste las tres metodologías coincidieron en determinar con deficiente al N, Mg, Mn, y Zn. Mientras que en la variedad estrella se diagnosticaron como deficientes al N y Zn, mientras que los demás elementos no coincidieron.

Los métodos de diagnóstico índices de balance Kenworthy y DOP coincidieron en que el N, Mg, Mn y Zn fueron los más deficientes en la variedad celeste, mientras que en la variedad estrella el N, Mn, Zn, y Cu fueron diagnosticados como los más deficientes.

El diagnóstico foliar mediante índices de balance Kenworthy y DOP tuvieron correlación positiva entre la concentración alta de Ca y B en el suelo en ambas variedades de maíz, mientras que el Mn y Cu fue baja en el suelo y en el follaje. Mientras que los elementos P, K Ca, Mg y Zn no tuvieron correlación ya que en el suelo fueron medios y altos y en el follaje fueron diferentes. Para el diagnóstico DRIS se determinó de medios o suficientes a altos niveles de Ca, Mg y B tanto en el suelo como en la planta. Por último, la concentración de Cu en el suelo y de la planta resultó baja; mientras que la B fue alta.

Literatura citada

- Ankerman D. B. S. and Large R. 1977. Soil and plant analysis. A & L Agricultural Laboratories. Memphis, TN, USA.
- Beaufils, E. R. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System. (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. Soil Science Bulletin 1. University of natal. Pietermaritzburg, South Africa. 1-132 pp.
- Camberato, J. J. and Pan, W. L. 2000. Bioavailability of calcium, magnesium, and sulfur. *In*: summer, M. E. (Ed). Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, Florida. Doi: 10.3390/s130810823. D53-D70.
- Conde, D. L.; Alia, T. I.; Valdez, A. L. A.; Ariza, F. R.; Juárez, L. P.; Pérez, A. G. A.; Pelayo, Z. C.; Díaz, L. S. F. y Martínez, M. A. 2018. La dosis de fertilización afecta el rendimiento y calidad en limón persa (*Citrus latifolia* Tan.). Acta Agrícola y Pecuaria. 4(1):1-9.
- Fontanetto, H. y Keller, O. 2006. Manejo de la fertilización en maíz. Experiencias en la región pampeana argentina. Información técnica cultivos de verano. 106:85-113. <http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/miscelaneas/106/misc106.085.pdf>.
- Horneck, D. A.; Sullivan, D. M.; Owen, J. S. and Hart, J. M. 2011. Soil test interpretation guide. [Corvallis, Or.]: Oregon state university, extension service. <http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/22023>. 73-74 pp.
- Imakumbili, M. L. E.; Semu, E.; Semoka, J. M. R.; Abass, A. and Mkamilo, G. 2020. Plant tissue analysis as a tool for predicting fertilizer needs for low cyanogenic glucoside levels in cassava roots: An assessment of its possible use. Plos One. 15(2):e022864. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228641>.
- Jones, J. J. B. 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. 1st. Ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>.
- Kenworthy, A. L. 1961. Interpreting the balance of nutrient-elements in leaves of fruit trees. Reuther W. Plant Analysis and Fertilizers Problems. 28-43 pp.
- Kenworthy, A. L. 1967. Plant analysis and interpretation of analysis for horticulture crops. *In*: soil testing and plant analysis. Part II. Soil Science Society of America. Madison, WI. 59-76 pp.
- Libohova, Z. C.; Seybold, D.; Wysocki, S.; Wills, P.; Schoeneberger, C.; Williams, D.; Lindbo, D.; and Owens, P. R. 2018. Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the national cooperative soil survey characterization database. Journal of soil and water conservation. 73(4):411-421. www.jsowconline.org/content/73/4/411.full.pdf+html.

- Lucena, J. R. 2002. Informe DRIS: Normas para el diagnóstico del análisis foliar del olivo, partiendo de la base de datos de Fertiberia. Madrid, España. 9-18 pp.
- Marschner, H. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Third edition. Academic Press, London.
- Montañes, L.; Heras, L. y Sanz, M. 1991. Desviación del óptimo porcentual (DOP): Nuevo índice para la interpretación de análisis vegetal. Zaragoza, España. Aula Dei. 3-4:93-107.
- Moraghan, J. T. and Mascagni, H. J. 1991. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. *In: luxmoore, R. J. (Ed). Micronutrients in agriculture, 2nd. Soil Science Society of America. Madison, WI. 371-425 pp.*
- Morejon, M. P.; Herrera, J. A. Ayra, P. C.; González, C. P.; Rivera, E. R.; Fernández, P.; Peña, R. E.; Téllez, R. P.; Rodríguez, N. C. and Noval, P. B. M. 2017. Alternatives in nutrition of transgenic maize FR-Bt1 (*Zea mays* L): response in growth development, and production. *Cultivos Tropicales. 38(4):146-155.*
- Mortvedt, J. J. 2000. Bioavailability of micronutrients. In: summer, M. E. (Ed). Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Prado, R. and Caione, G. 2012. Plant analysis, soil fertility, roland nuhu issaka, IntechOpen. Doi: 10.5772/53388. <https://www.intechopen.com/chapters/41131>
- Rout, G. S. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science. 3:1-24. Doi: 10.7831/ras.3.1.*
- SEMARNAT. 2022. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. México. 1-70 pp.
- Sedlacek, C.; Giguere, A. and Pjevac, P. 2020. Is too much fertilizer a problem? *Front. Young minds. 8:63-65. Doi: 10.3389/frym.2020.00063.*
- Schmidt, W.; Thomine, S. and Buckhout, T. J. 2020. Editorial: Iron nutrition and interactions in plants. *Front. Plant Sci. 10:1670. Doi: 10.3389/fpls.2019.01670.*
- Yousaf, M.; Li, X.; Zhang, Z.; Ren, T.; Cong, R.; Karim, S. T.; Fahad, S.; Shah, A. N. B. and Lu J. 2016. Nitrogen fertilizer management for enhancing crop productivity and nitrogen use efficiency in a rice-oilseed rape rotation system in China. *Front. Plant Sci. 7:1 496. Doi: 10.3389/fpls.2016.01496.*
- Zhang, W.; Liu, D. Y.; Li, C. X.; Cui, Z. L.; Chen, X. P.; Russell, Y. and Zou, C. Q. 2015. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application. *Field Crop Research. 184:155-161.*