

Metodología analítica: determinación de la composición elemental en granos de maíz Analytical methodology: determining of the elemental composition in grains of maize

A. Aguilar-Martínez^a , C. E. Márquez-Herrera^b , J. Nieto-Sotelo^c , G. I. Cassab^d , N. C. Galván-Tejada^e 

^a Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México

^c Laboratorio de Fisiología Molecular, Jardín Botánico, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 CDMX, México.

^d Departamento de Biología Molecular de Plantas, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 62210 Cuernavaca, Mor., México

Resumen

En este estudio, se desarrolló y validó una metodología analítica para determinar la composición elemental en granos de maíz mediante digestión por microondas e ICP-OES. La digestión se realizó con HNO₃ y H₂O₂, para 22 muestras de maíz, y se determinó la composición elemental con ICP-OES. El método fue validado con el material de referencia SRM 1577c, que mostró la presencia de K, Ca, Mg, P, Cu, Fe, Mn, Zn y Na con %R de 87-98 % y, DER < 5.3% con excepción del Mg, valores que indican que la metodología demostró ser precisa y exacta. En las muestras de maíz fue posible determinar hasta 12 elementos (K, Ca, Mg, P, Cu, Fe, Mn, Zn, Na, Al, Ba y Sr) con el ICP-OES, con límites de detección entre 0.075-2.533 mg kg⁻¹, para Ba y P, respectivamente. Esta metodología constituye una herramienta aplicable para la caracterización de la composición elemental en granos de maíz cuyo uso puede contribuir a futuras investigaciones.

Palabras Clave: Maíz, digestión por microondas, ICP-OES, análisis multielemental, elementos traza.

Abstract

In this study, an analytical methodology was developed and validated to determine the elemental composition in grains of maize using microwave digestion and ICP-OES. Digestion was performed with HNO₃ and H₂O₂ on 22 maize samples, and the elemental composition was determined using ICP-OES. The method was validated with the reference material SRM 1577c, which showed the presence of K, Ca, Mg, P, Cu, Fe, Mn, Zn, and Na with %R of 87-98 % and DER < 5.3% with the exception of Mg, values that indicate that the methodology is precise and accurate. Up to 12 elements (K, Ca, Mg, P, Cu, Fe, Mn, Zn, Na, Al, Ba, and Sr) could be determined in the maize samples using ICP-OES, with detection limits between 0.075 and 2.533 mg kg⁻¹ for Ba and P, respectively. This methodology constitutes an applicable tool for characterizing the elemental composition in maize the use of which can contribute to future research.

Keywords: Maize, Microwave digestion, ICP-OES, Multielemental Analysis, Trace elements.

*Autor para la correspondencia: cosettenadia@gmail.com

Correo electrónico: ag435091@uaeh.edu.mx (Alvaro Aguilar-Martínez), ciromar@unam.mx (Ciro Eliseo Márquez-Herrera), jorge.nieto@ib.unam.mx (Jorge Nieto-Sotelo), gladys.cassab@ibt.unam.mx (Gladys Iliana Cassab López), cosettenadia@gmail.com (Nadeshda Cosette Galván-Tejada).



1. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial, tanto por su valor nutricional en la alimentación humana y animal como por su utilización industrial en la obtención de más de 600 productos, muchos de los cuales sustituyen compuestos de origen petroquímico (Izquierdo y Cirilo, 2013; Mejía, 2003; García-Lara y Serna-Saldivar, 2019). Esta multifuncionalidad convierte a la calidad e inocuidad del grano en parámetros críticos, directamente vinculados a su composición elemental.

La presencia de elementos esenciales como el Fe, Zn y Mg determina en gran medida su valor nutricional, mientras que contaminantes como Cd, Pb o As pueden representar riesgos significativos para la salud (Liu *et al.*, 2025). Por lo tanto, el desarrollo y la aplicación de metodologías analíticas precisas y eficientes para la cuantificación multielemental en matrices complejas, como el maíz, resulta fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y el control de calidad (Duz *et al.*, 2012).

En la actualidad, existe un amplio espectro de técnicas analíticas disponibles para la determinación de elementos en granos de maíz (Tabla 1), cada una con ventajas y limitaciones específicas en términos de sensibilidad, selectividad, tiempo de análisis por muestra y del costo asociado a su aplicación. Entre las más empleadas se encuentran la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), capaz de determinar multielementos a nivel de ppt (Wang *et al.*, 2019); la Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) y su variante con horno de grafito (GFAAS), que son usadas considerablemente para la detección de contaminantes como Cd y Pb (Liu *et al.*, 2025; Wu *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2012) al igual que la Espectrometría de Emisión Atómica (AES) (Yan *et al.*, 2012). Asimismo, se han explorado métodos avanzados como la Ablación Láser acoplada a ICP-MS (LA-ICP-MS) que permiten obtener información detallada sobre la distribución de elementos en muestras sólidas con alta precisión en dos o tres dimensiones (Gaiss *et al.*, 2019) y la Espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS) para un análisis puntual, rápido y multielemental (Jabbar *et al.*, 2020). La Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) ocupa un lugar destacado por su versatilidad, precisión y capacidad de análisis simultáneo de múltiples elementos. Esta técnica ofrece ventajas significativas, que incluyen amplios rangos lineales, límites de detección entre ppm y ppb para la mayoría de los elementos, y una relativa robustez frente a interferencias matriciales en comparación con otras técnicas (Yan *et al.*, 2012; Skoog, 2018; Macedo *et al.*, 2020). En el análisis del maíz, ICP-OES ha demostrado ser efectivo para la determinación de macro y micronutrientes como K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Na y Cu (Djalovic *et al.*, 2024; Duz *et al.*, 2012).

Si bien diversas investigaciones han reportado la determinación elemental en el maíz mediante técnicas como ICP-OES o ICP-MS (Duz *et al.*, 2012; Djalovic *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2019), existe variabilidad en los protocolos de digestión, en el número de elementos determinados y en los parámetros de validación analítica reportados. Además, la información disponible sobre elementos traza en granos de

maíz es limitada en bases de datos oficiales como la Base de Alimentos de México (BAM) o la de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas en inglés, FAO).

Este estudio tuvo como objetivo desarrollar y validar una metodología analítica para la determinación multielemental en granos de maíz. La metodología combinó una digestión ácida asistida por microondas (HNO₃ al 68% y H₂O₂ al 29%) con la detección por ICP-OES, técnica seleccionada por su capacidad de análisis simultáneo, alta sensibilidad y bajos límites de detección. La validación se centró en parámetros fundamentales: % de recuperación (%R), desviación estándar relativa (DER), límite de detección (LD) y límite de cuantificación (LC) para validar que el método propuesto proporcionara datos cuantitativos precisos y exactos.

2. Metodología

2.1. Muestreo

Se analizaron 22 muestras de maíces de diferentes variedades nativas (Ancho, costeño, palomero toluqueño y cacahuacintle) e híbrida (Comanche de Aspros Semillas) que fueron colectadas con base en el muestreo *snowball* (Atkinson y Flint, 2001), en las localidades de Coatetelco, Huitzilac, Cuentepec, Alpuyecá, El Zapote, El Cebadal y Totoloapan del Estado de Morelos y de la localidad de San Bartolo, Edo. Méx. (proyecto PRONACES # 316926/FOP07-2021-03/CONAHCYT). Los granos de maíz fueron almacenados en bolsas herméticas de polietileno dentro del refrigerador a una temperatura de 5°C, hasta su posterior análisis.

2.2. Tratamiento previo

Las muestras de granos de maíz se colocaron en charolas de aluminio, se secaron en un horno eléctrico (*Thermo Scientific* PR305225G) durante 24 horas a una temperatura de 70°C y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para después ser colocadas en bolsas herméticas de polietileno y almacenadas en un desecador. Después se realizó un muestreo aleatorio de las muestras de granos de maíz como se describe a continuación: se formó un cuadrado con la bolsa de polietileno que contenía cada muestra, de manera uniforme, y se dividió en una cuadrícula de 16 cuadros de la misma medida. Se eligieron 4 cuadros de forma aleatoria con una tabla de números aleatorios para tener entre 30 y 70 granos de maíz, según fuera el tamaño del grano para cada cuadro seleccionado (Beyer, 2018).

2.3. Molienda

Las muestras seleccionadas del muestreo aleatorio se molieron en un molino de acero (Marca Tekmar, modelo A-10) hasta obtener un polvo fino homogéneo. Para evitar la contaminación entre muestras se removió el residuo con aire a presión. Las muestras molidas fueron almacenadas en bolsas de papel encerado hasta su análisis.

Tabla 1. Técnicas Analíticas utilizadas para hacer la determinación elemental en granos de maíz.

Técnica	Elementos reportados	LD*	Tiempo*
ICP-OES	Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Sn. (Duz <i>et al.</i> , 2012) N, P, K, Na, Ca, Mg, Zn, Mn, y Cu. (Djalovic <i>et al.</i> , 2024)	ppb	+29 elementos/1min
ICP-MS	B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Ba, Pb y U. (Wang <i>et al.</i> , 2019) Li, I, Co, Ni, Mo, Cs, B, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sr, Ti, Cd, Sn, Tl, Pb y Cr. (Hongxing <i>et al.</i> , 2011) Ca, Co, Se, Zn, Cu, Fe, Mn, Mo, Mg, K, Na, Ba, Al, Pb, Cd, As, Ni, Cr, Sr y U (Qamar <i>et al.</i> , 2018)	ppt	+29 elementos/6 min
AES	K y Na (Yan <i>et al.</i> , 2012)		
AAS	Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, y Zn (Yan <i>et al.</i> , 2012)	ppm	Elemento/15s
GFAAS	Cd, Pb y Cr (Liu <i>et al.</i> , 2025) Cd y Pb (Wu <i>et al.</i> , 2022)	ppb	Elemento/4min
CF-LIBS	K, Ca, Mg, Fe, Na, Si, Li, Sr, Ti, Al, C y Cr (Jabbar <i>et al.</i> , 2020)	ppm	-
LA-ICP-MS	As, Cd, Hg, Sb y Zn (Gaiss <i>et al.</i> , 2019)	ppt	-

LD: límite de detección, ICP: Plasma acoplado inductivamente, OES: Espectroscopia de emisión óptica, MS: Espectroscopia de masas, AES: Espectroscopia de emisión atómica, AAS: Espectroscopia de absorción atómica, GFAAS Espectroscopia de absorción atómica en horno de grafito: CF Calibración Libre, LIBS: Espectroscopia de descomposición inducida por láser, LA: Ablación laser.

* Tyler y Yvon (1995)

2.4. Controles

1. Material de referencia certificado: Hígado bovino NIST SRM 1577c.

2. Estándar Universal (UDA): Se utilizó una solución estándar UDA (*Universal Data Acquisition*) marca *Perkin Elmer* de 69 elementos en una concentración de 2 ppm de Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, In, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Tl, U, V, Zn, Au, Hf, Ir, Pd, Pt, Rh, Ru, Sb, Sn, Te, B, Ge, Mo, Nb, P, Re, S, Si, Ta, Ti, W, Zr, Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pt, Sc, Sm, Tb, Th, Tm, Y, Yb y Hg.

3. Blanco de digestión (BD): Agua Milli Q ASTM Tipo 1 con 8 mL de HNO₃ (68%) concentrado y 2 mL de H₂O₂ (29%), aforado a 50 mL.

4. Blanco ambiental (BA): Agua Milli Q (25ml) en un recipiente de 50 mL el cual se mantenía en el área de trabajo. Los BD y BA fueron los primeros en ser analizados para evitar su contaminación por alguna muestra o por la solución UDA.

2.5. Digestión con microondas

El primer paso que se llevó a cabo en el proceso de digestión fue lavar con 8 mL de ácido nítrico (HNO₃) concentrado los recipientes de politetrafluoroetileno (R-PTFE), resistentes a presiones de 110 bares, introduciéndolos al horno de microondas durante 10 minutos a una potencia de 300 W, para después ser enjuagados con agua Milli Q. El equipo que se utilizó para realizar la digestión fue un horno de microondas (*Milestone*, MLS1200 Mega). Los R-PTFE fueron secados con aire comprimido. En cada uno se pesaron, con una balanza analítica (Sartorius, BP 221 S), 0.2 g de cada una de las muestras molidas y a continuación se

añadieron 8 mL de HNO₃ (68%) concentrado y 2 mL de H₂O₂ (29%) en una relación 4:1. Cada muestra se procesó por triplicado.

Se eligió el programa de digestión recomendado por el fabricante del horno de microondas (*Milestone* modelo MLS1200 Mega) como lo muestra la Tabla 2. Los R-PTFE se enjuagaron 3 veces con agua Milli Q para arrastrar la posible cantidad de muestra que hubiera quedado adherida en sus paredes. A continuación, las muestras digeridas se aforaron a 50 mL con agua Milli Q y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su posterior análisis.

Tabla 2. Programa de potencia del sistema de digestión por microondas para granos de maíz

Paso	Potencia(W)	Tiempo (min)
1	250	1
2	0	1
3	250	5
4	400	5
5	650	5
6	0	15

2.6. Determinación por ICP-OES

El equipo que se utilizó para hacer la determinación elemental en los granos de maíz fue un ICP-OES simultáneo (marca *Perkin Elmer*, modelo Avio 500) con el programa *Perkin Elmer Syngist 3.0 ICP-OES* y se consideraron los parámetros operativos instrumentales de la Tabla 3.

El equipo se optimizó con un estándar de Mn de 1 ppm (*Inorganic Ventures*) usando la línea espectral de 257.610 nm para buscar el punto en el que la señal fuera mayor y tuviera buena alineación óptica. La información generada se

controló en el programa *Syngist 3.0* y de igual manera se almacenaron los datos del análisis. En la curva de calibración se utilizó agua Milli Q como blanco y cuatro soluciones con diferentes concentraciones (0.1, 1, 5 y 10 ppm) para 25 elementos comunes (As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, Tl, V, Zn, Al, B, Ba y Na). En estas mismas soluciones el Si y el K estuvieron en concentraciones 5 y 10 veces mayores, respectivamente; y la concentración de Ag a 0.5 veces de la concentración del grupo principal. Las soluciones se prepararon a partir de dos estándares comerciales *Perkin Elmer S21* y *7A*, en HNO_3 al 5%. Para el caso del P se utilizó un estándar de P 1,000 mg L^{-1} (*Perkin Elmer*) para preparar soluciones de 25 mg L^{-1} , 50 mg L^{-1} y 100 mg L^{-1} .

Tabla 3. Condiciones operativas instrumentales utilizadas en el ICP-OES

Parámetros	
Potencia	1,500 W
Flujo de gas para plasma	10 L min^{-1}
Flujo de gas auxiliar	0.2 L min^{-1}
Flujo de gas del nebulizador	0.5 L min^{-1}
Flujo de la muestra	2 mL min^{-1}
Modo de visualización	Axial
Réplicas	3
Corrección de <i>background</i>	2 puntos
Cámara de nebulización	Ciclónica de vidrio
Nebulizador	<i>GemCone</i>
Detector	Detector de estado sólido
Gas de purga	Nitrógeno
Gas de corte	Aire
Gas de plasma	Argón

2.7. Procesamiento de datos y validación analítica

Con los datos obtenidos se generó una curva de calibración, para cada uno de los elementos, observándose linealidades de $R^2 > 0.99$. Los datos se reprocesaron con las curvas de calibración y se eliminaron las señales con valores negativos, las que tuvieron % de DER $> 5\%$ correspondiente al ruido instrumental en las señales y aquellas cuya concentración estuviera por debajo del LD. Además, se eliminaron los datos que al realizar la resta entre la concentración de la muestra menos la concentración del BD resultara con valores negativos. Todos los datos que fueron eliminados se consideraron que se encontraban por debajo del LD.

La diferencia entre la concentración de las muestras y la concentración de su respectivo BD se realizó en las concentraciones con unidades de masa/volumen (mg L^{-1}), para después realizar la conversión a mg kg^{-1} , con el uso del volumen y el peso exacto de la muestra que se describió en el apartado 2.5.

Después de hacer el reprocesamiento de los datos, se analizó de forma visual cada uno de los espectros obtenidos y se comparó el espectro obtenido de cada muestra respecto a su blanco de corrida correspondiente para comprobar que la señal proviniera de la muestra de maíz y no del efecto del ruido instrumental.

2.8. Estadística y cálculos

El tratamiento estadístico y el procesamiento de datos se realizaron a partir de la información generada por el programa *Syngistix 3.0*. Posteriormente, los cálculos estadísticos descriptivos y las conversiones de unidades se efectuaron con el programa Microsoft Excel (Versión 2011). A continuación, se enlista cada uno de ellos: promedio, DE, % DER, LD, LC, concentración masa/volumen a masa/masa y la concentración de muestra menos la concentración del BD.

3. Resultados y Discusión

En esta investigación se validó el método propuesto mediante el análisis del material de referencia SRM 1577c del *National Institute of Standards & Technology*. La determinación con el ICP-OES mostró, en el material de referencia, la presencia de 9 elementos que fueron extraídos mediante digestión con HNO_3 concentrado y H_2O_2 .

3.1. Eficiencia de la digestión por microondas

La digestión por microondas minimiza pérdidas por volatilización y reduce la contaminación cruzada en comparación con técnicas de digestión convencionales (Zunk, 1990). Los porcentajes de recuperación oscilaron entre 87 y 98 %, valores que son aceptables para la guía internacional AOAC (Association of Official Analytical Chemists) que va de 90 a 107 % (Latimer, 2016). Con excepción de Mn y Na, el porcentaje de recuperación de los elementos restantes (Ca, Cu, Fe, Mg, Zn, K y P) fue superior al 90% (Tabla 4), lo que demostró una eficiencia notable en la solubilización de los elementos y en la oxidación de la matriz orgánica con HNO_3 concentrado y H_2O_2 en una relación de 4:1, respectivamente.

Tabla 4. Evaluación de la precisión y exactitud de la metodología desarrollada mediante el análisis del material de referencia SRM 1577c.

Elemento	Certificado* (mg kg^{-1})	Encontrado (mg kg^{-1})	%R	DER (%)
Ca	131±10	121.51±2	93	1.89
Cu	275.20±4.6	269.88±4	98	1.57
Fe	197.94±0.6	190.99±4	97	2.12
Mg	620±42	567.11±40	91	7.16
Mn	10.46±0.5	9.15±0.33	87	3.15
Zn	181.10±1	168.87±6	93	3.66
K	10230±640	10076±233	98	2.32
Na	2033±64	1785±58	88	3.24
P	11750±270	11292±432	96	3.82

%R: Porcentaje de recuperación, DER: Desviación estándar relativa, *Información obtenida del NIST (*National Institute of Standards & Technology*).

3.2. Exactitud y precisión

Para conocer la efectividad del ICP-OES simultáneo se compararon las concentraciones encontradas del material de referencia 1577c con las concentraciones reportadas y certificadas por el *National Institute of Standards & Technology* (NIST). Los resultados (Tabla 4) dan evidencia del buen ajuste del equipo, al obtener concentraciones de los 9 elementos con valores cercanos a los reportados por el NIST que validan la correcta selección de parámetros

instrumentales (longitudes de onda, flujos de plasma y corrección de interferencias espectrales).

La precisión del método, evaluada mediante la desviación estándar relativa ($DER < 5.3\%$), fue satisfactoria para la mayoría de los elementos, con excepción del Mg, que cumplen con los criterios establecidos por Latimer (2016).

3.3. Elementos determinados por el ICP-OES

La digestión con HNO_3 concentrado y H_2O_2 en una relación de 4:1 en el equipo de microondas y el uso de ICP-OES permitieron detectar 12 elementos (K, P, Mg, Ca, Fe, Zn, Mn, Na, Cu, Al, Ba y Sr) en las muestras de maíz, número de elementos mayor a los detectados con ICP-OES por otros autores (Duz et al., 2012; Djalovic et al., 2024) (Tabla 1). Los límites de detección alcanzados con el ICP-OES simultáneo estuvieron entre 0.075 mg kg^{-1} , para Ba, y 2.533 mg kg^{-1} , para P (Tabla 5).

La composición elemental de los granos de maíz (Tabla 6), demostró la presencia de cuatro macronutrientes en una relación de concentraciones promedio $K > P > Mg > Ca$ y de cinco micronutrientes con una relación respecto a sus concentraciones promedio de $Zn > Fe > Na > Mn > Cu$.

Tabla 5. Longitudes de onda (λ) utilizadas, S, LD y LC.

Elemento	λ (nm)	S	LD (mg kg^{-1})	LC (mg kg^{-1})
Ca	317.93	0.0005	0.375	1.25
Cu	327.39	0.0014	1.050	3.50
Fe	298.20	0.0002	0.150	0.50
Mg	285.21	0.0006	0.450	1.50
Mn	257.61	0.0003	0.225	0.75
Zn	206.20	0.0002	0.150	0.50
K	766.49	0.0023	1.725	5.75
Na	589.59	0.0003	0.225	0.75
P	213.62	0.0034	2.533	8.44
Al	396.15	0.0017	1.275	4.25
Ba	233.53	0.0001	0.075	0.25
Sr	407.77	0.0003	0.225	0.75

λ : longitud de onda, S: desviación estándar, LD: Límite de detección, LC: límite de cuantificación.

También fueron detectados otros elementos traza como son el Sr, Al y Ba (Tabla 6). En el espectro de la Figura 1 se aprecia la presencia de Sr, donde se observa que la intensidad de la señal de la muestra de granos de maíz es mayor respecto a su BD, lo que indica que la señal del Sr proviene de las muestras de granos de maíz y no de los reactivos (HNO_3 y H_2O_2), del agua Milli Q, del material o instrumentos utilizados. Casos similares se observaron para Al y Ba.

Es importante mencionar que la Base de Alimentos Mexicana (BAM, 2025) sólo muestra en el contenido nutricional del maíz a tres de los 12 elementos determinados en esta investigación (Ca, Fe y Zn), lo que lleva a sugerir que el método aquí propuesto puede detectar macronutrientes adicionales que son importantes para el desarrollo y crecimiento de los seres vivos (p. ejem., K, P y Mg) cuyas concentraciones fueron mayores a las del Ca, así como micronutrientes adicionales como el Na, Mn y Cu. Los

valores encontrados para los elementos P, Ca, Fe y Zn (Tabla 6) fueron similares a las reportadas en la literatura (BAM, FAO y Djalovic et al., 2024). Sin embargo, para los elementos K y Mg los valores fueron superiores en su mayoría ($> 2900 \text{ mg kg}^{-1}$ y $> 890 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) y para los elementos Na, Mn y Cu inferiores ($< 147 \text{ mg kg}^{-1}$, $< 3.40 \text{ mg kg}^{-1}$, $< 5.56 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) a los reportados (FAO y Djalovic et al., 2024), lo que destaca la gran variación de los maíces de México. Estas diferencias pueden deberse a su origen genético, al manejo agrícola o al suelo en que son cultivados y subrayan la importancia de estudiarlos a mayor profundidad en el futuro.

Tabla 6. Concentración mínima, máxima y su promedio de cada de las 22 muestras de maíz colectadas.

Elemento	Min (mg kg^{-1})	Max (mg kg^{-1})	Promedio (mg kg^{-1})
K	1842.24	5430.83	3017.71
P	1747.77	3340.86	2510.36
Mg	719.93	1462.02	928.55
Ca	41.28	114.47	69.49
Fe	0.72	87.49	24.70
Zn	14.29	72.11	29.65
Na	3.93	17.00	11.08
Mn	0.32	10.27	3.86
Cu	1.38	2.15	1.76
Sr	0.12	3.17	0.97
Al	4.28	19.34	11.23
Ba	0.06	1.24	0.49

En cuanto a la importancia de conocer la presencia de elementos traza como el Sr y Ba, estudios recientes de salud humana indican que el Sr contribuye a la mitigación de varias enfermedades no transmisibles, al ser un elemento que inhibe el estrés oxidativo, presenta propiedades antioxidantes y suprime las citocinas inflamatorias al estar asociado con Ca y Ba (Ru et al., 2024). Por otra parte, la detección del Al en alimentos es importante al ser un elemento muy tóxico para la salud humana si se excede de los límites permisibles (Yeh et al., 2016; Renke et al., 2023).

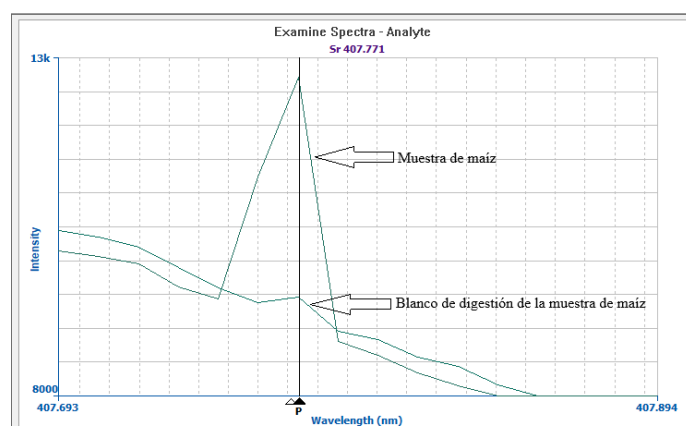


Figura 1. Espectros de emisión atómica del elemento Sr para una muestra de granos de maíz y de su respectivo blanco de digestión. Syngist 3.0.

4. Conclusiones

La metodología analítica desarrollada y validada mediante el material de referencia certificado SRM 1577c, demostró ser precisa y exacta para el análisis elemental en muestras de granos de maíz, con recuperaciones y valores de % DER aceptables según normativas internacionales (AOAC), lo que confirma la confiabilidad de la digestión por microondas y del ICP-OES. La mezcla de HNO₃ y H₂O₂ (relación 4:1) aseguró que la digestión por microondas tuviera una oxidación eficiente, solubilización completa de la matriz y reducción en la pérdida de analitos. Los límites alcanzados evidenciaron la alta sensibilidad analítica de la técnica, lo que permitió cuantificar macro y micronutrientes, así como elementos traza. Como resultado fue posible la determinación simultánea de 12 elementos incluidos Al, Ba y Sr, lo que supera el número de elementos comúnmente reportados por la BAM y FAO. Este método constituye una herramienta analítica aplicable para la caracterización de la composición elemental, calidad e inocuidad de los granos de maíz, cuyo uso puede contribuir a futuras investigaciones nutricionales, agronómicas y de regulación sanitaria.

Agradecimientos

Agradecimiento a los proyectos CONAHCYT (FOP07 PRONACES, Soberanía Alimentaria # 316926) y SECIHTI (Eje 2, Mejoramiento de cultivos de maíz y frijol # PEE-2025-G-124). A SECIHTI por el financiamiento de Estancia Posdoctoral Incidencia (3) 2022 de N.C. Galván-Tejada en la Modalidad: Continuidad de Estancia Posdoctoral de Incidencia 2022 (1).

Referencias

Atkinson, R., & Flint, J. (2001). Accessing hidden and hard-to-reach populations: Snowball research strategies. *Social Research Update*, 33(1), 1-4.

BAM 2025: Base de Alimentos de México <https://insp.mx/informacion-relevante/bam-bienvenida>. Fecha de actualización enero de 2025.

Beyer, W. H. (2018). *Handbook of tables for probability and statistics* (2a ed.) CRC Press. Taylor and Francis Group, Estados Unidos. Pp 480.

Charles, B., Fredeen, K. J. (1997). Concepts, instrumentation and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectrometry. Perkin Elmer Corp. Pp 12-59.

Coutinho, C. A., Thomsen, V. (2011). Spectrometers for elemental spectrochemical analysis, Part IV: inductively coupled plasma optical emission spectrometers. *Spectroscopy*, 26(9), 44-48.

Djalovic, I., Prasad, P. V., Akhtar, K., Paunović, A., Riaz, M., Dugalic, M., Katanski, S., Zaheer, S. (2024). Nitrogen fertilization and cultivar interactions determine maize yield and grain mineral composition in calcareous soil under semiarid conditions. *Plants*, 13(6), 844. DOI: 10.3390/plants13060844.

Duz, M. Z., Celik, K. S., Aydin, I., Erdogan, S., Aydin, F., Hamamci, C. (2012). Microwave digestion followed by ICP-OES for the determination of Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Sn in maize. *Atomic Spectroscopy*, 33(3), 78-82. DOI:10.46770/AS.2012.03.002.

Gaiss, S., Amarasiriwardena, D., Alexander, D., Wu, F. (2019). Tissue level distribution of toxic and essential elements during the germination stage of corn seeds (*Zea mays* L.) using LA-ICP-MS. *Environmental Pollution*, 252, 657-665. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.05.129.

García-Lara S., Serna-Saldivar S. O. (2019). *Corn History and Culture*, en Serna-Saldivar S. O. (ed.), *Corn Chemistry and Technology*, Ch 1. 3th edition. Cambridge. UK y US. pp. 1-18.

Hongxing, Z., Yu-Kui, R. (2010). Determination of trace elements, heavy metals and rare earth elements in corn seeds from Beijing by ICP-MS simultaneously. *Journal of Chemistry*, 8(2), 782-786. DOI: 10.1155/2011/152713.

Izquierdo, N., Cirilo, A. (2013). Usos del maíz: Efectos del ambiente y del manejo sobre la composición del grano [Ponencia]. *Jornada de Actualización: Calidad del grano de maíz para la industria y la producción de bovinos*. Balcarce, Argentina.

Jabbar, A., Akhtar, M., Mahmood, S., Ahmed, R., Baig, M. A. (2020). Determination of major inorganic nutrients in maize tissues by calibration-free laser induced breakdown spectroscopy. *Analytical Letters*, 53(8), 1328-1341. DOI: 10.1080/00032719.2019.1705477.

Jin, Q., Liang, F., Zhang, H., Zhao, L., Huan, Y., Song, D. (1999). Application of microwave techniques in analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 18(7), 479-484. DOI: 10.1016/S0165-9936(99)00110-7.

Latimer, G. W. (2016). Guidelines for standard method performance requirements: Official methods of analysis. AOAC International, 1-18.

Liu, Q., Wang, S., Zhou, J., Bao, L., Zhou, W., Zhang, N. (2025). Accumulation and transport of Cd, Pb, As, and Cr in different maize varieties in southwest China. *Agriculture*, 15(2), 203. DOI: 10.3390/agriculture15020203.

Mejía, D. (2003). *Maize: post-harvest operations*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), AGST.

Qamar, S., Aslam, M., Huyop, F. Z., Javed, M. A. (2018). Rapid detection of nutrients in "*Zea mays* L." using inductively coupled plasma mass spectrometry. *Romanian Biotechnological Letters*, 23(2), 13394.

Renke, G., Almeida, V. B. P., Souza, E. A., Lessa, S., Teixeira, R. L., Rocha, L., Sousa, P. L., Starling-Soares, B. (2023). Clinical outcomes of the deleterious effects of aluminum on neuro-cognition, inflammation, and health: a review. *Nutrients*, 15(9), 2221. DOI: 10.3390/nu15092221.

Ru, X., Yang, L., Shen, G., Wang, K., Xu, Z., Bian, W., Zhu, W., Guo, Y. (2024). Microelement strontium and human health: comprehensive analysis of the role in inflammation and non-communicable diseases (NCDs). *Frontiers in Chemistry*, 12, 1367395. DOI: 10.3389/fchem.2024.1367395.

Tyler, G., & Yvon, J. (1995). ICP-OES, ICP-MS and AAS Techniques Compared. *ICP Optical Emission Spectroscopy Technical Note*, 5, 1-11.

Skog, D. A., Holler, F. J., Crouch, S. R. (2018). *Principios de análisis instrumental* (7a ed.). Cengage Learning, España. Pp 256-257.

Wang, F., Zhao, H., Yu, C., Tang, J., Wu, W., Yang, Q. (2019). Determination of the geographical origin of maize (*Zea mays* L.) using mineral element fingerprints. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(3), 1294-1300. DOI: 10.1002/jsfa.10144.

Wu, Y., Wang, S., Cui, W., Tian, W., Zhang, J., Chen, X., Zhou, M. (2022). Rapid, simultaneous, and automatic determination of lead and cadmium in cereals with a new high performance composite hollow cathode lamp coupled to graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Molecules*, 27(23), 8571. DOI: 10.3390/molecules27238571

Yan, P., Wang, Q., Yan, X., Chang, X. H., Du, J. Z., Sun, Y. (2012). Determination of nineteen kinds of mineral elements content of genetically modified antidwarf mosaic maize by AES, AAS and ICP-MS. *Asian Journal of Chemistry*, 24(8), 3773.

Yeh, T. S., Liu, Y. T., Liou, P. J., Li, H. P., & Chen, C. C. (2016). Investigation of aluminum content of imported candies and snack foods in Taiwan. *Journal of food and drug analysis*, 24(4), 771-779.

Zunk, B. (1990). Mikrowellenaufschluss zur bestimmung von spurenelementen in pflanzenmaterial. *Analytica Chimica Acta*, 236, 337-343. DOI: 10.1016/S0003-2670(00)83331-0

ACEPTADO--ACCEPTED

ACEPTADO--ACCEPTED