



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

FERTILIZACIÓN PARA MAÍZ DE LA RAZA ZAPALOTE CHICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

MANUEL CABRERA GONZÁLEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

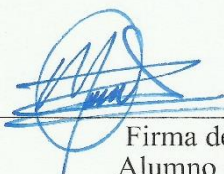
CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Ing. Manuel Cabrera González, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Víctor H. Volke Haller, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis


FERTILIZACIÓN PARA MAÍZ DE LA RAZA
ZAPALOTE CHICÓ EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 11 de febrero de 2019



Firma del
Alumno (a)



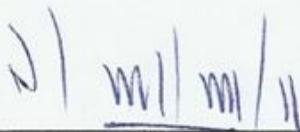
Dr. Víctor Hugo Volke Haller
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Fertilización para maíz de la raza Zapalote Chico en el Istmo de Tehuantepec** realizada por el alumno: Manuel Cabrera González bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Víctor Hugo Volke Haller

ASESOR



Dr. José Isabel Cortés Flores

ASESOR



Dr. Aquiles Carballo Carballo

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2019

FERTILIZACIÓN PARA MAÍZ DE LA RAZA ZAPALOTE CHICO EN EL ITSMO DE TEHUANTEPEC

Manuel Cabrera González, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) raza Zapalote Chico se cultiva principalmente en la Región del Istmo de Tehuantepec y su importancia radica en su precocidad, que permite obtener dos cosechas por año, y su uso específico en la preparación de productos y platillos culinarios importantes en la dieta de sus habitantes; sin embargo, los rendimientos son bajos, debido a un manejo deficiente del cultivo. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la respuesta de cuatro variedades nativas de la raza de maíz Zapalote Chico (OAX-826, OAX-834, COL-64 y ZAP-MOR), a la fertilización de N, P y K, en relación con el rendimiento de grano y las dosis óptimas económicas, rendimiento de rastrojo e índice de cosecha, concentración nutrimental en el grano y rastrojo, y la calidad intrínseca del grano, en la localidad de San Pedro Comitancillo, Oaxaca. El estudio se realizó en condiciones de campo durante los meses de abril a junio del 2017, y se aplicaron cinco dosis de N (0, 30, 60, 90 y 120 kg ha⁻¹) y cuatro dosis de P y K (0, 40, 80 y 120 kg P₂O₅ y K₂O ha⁻¹), en un diseño de parcelas divididas, con las variedades en las parcelas grandes y los tratamientos de fertilización en las parcelas chicas, con cuatro repeticiones. El análisis de la información se realizó mediante regresión. Los mayores rendimientos de grano se obtuvieron con la aplicación de 110 kg N, 60 kg P₂O₅ y 60 kg K₂O por hectárea y con una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹, con un mayor rendimiento en la variedad ZAP-MOR. Los mayores rendimientos de rastrojo se obtuvieron con la aplicación de 120 kg N ha⁻¹, sin aplicación de P y K, y una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹, con mayores rendimientos en la variedad ZAP-MOR. Los índices

de cosecha más altos se obtuvieron con 71 kg N ha⁻¹ y 75 kg P₂O₅ ha⁻¹, sin aplicación de K, con diferencias entre las variedades, de 0.47 a 0.56. La dosis óptima económica para las cuatro variedades fue de 80 kg N ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 40 kg K₂O ha⁻¹, con 50 000 plantas ha⁻¹, y los rendimientos óptimos económicos de grano de 1.211, 1.299, 1.203 y 1.470 t ha⁻¹, para las cuatro variedades, respectivamente. Entre las variedades se observaron algunas diferencias en la concentración de P y K en el grano y rastrojo. El N aplicado: 1) incrementó la concentración de N en el grano y rastrojo; 2) aumentó la concentración de P en el grano; y, 3) disminuyó la concentración de P y K en el rastrojo. El P aplicado incrementó la concentración de P en el grano. El K aplicado disminuyó la concentración de P en el grano e incrementó la concentración de K en el grano y rastrojo. Las variedades presentaron diferencias en el índice de flotación, peso hectolítrico, peso de 100 granos y porcentaje de reflectancia del grano. El N aplicado incrementó el índice de flotación, peso hectolítrico y peso de 100 granos, y disminuyó el porcentaje de reflectancia del grano. El P aplicado incrementó el índice de flotación y el porcentaje de reflectancia del grano. El K aplicado disminuyó el peso de 100 granos. Los resultados de ésta investigación contribuyen a mejorar la productividad de las variedades de la raza de maíz Zapalote Chico, mediante el aumento del rendimiento de grano y rastrojo sin afectar las características su calidad incidiendo en la seguridad y soberanía alimentaria de la región.

Palabras clave: Maíz Zapalote Chico (*Zea mays* L.), fertilización N, P y K, rendimiento de grano y rastrojo, índice de cosecha, concentración nutrimental en grano y rastrojo, calidad intrínseca del grano.

FERTILIZATION FOR MAIZE OF THE ZAPALOTE CHICO RACE IN THE ISTHMUS OF TEHUATEPEC

**Manuel Cabrera González, MSc.
Colegio de Postgraduados, 2019**

ABSTRACT

The Zapalote Chico maize (*Zea mays* L.) is grown mainly in the Isthmus of Tehuantepec Region and its importance lies in its precocity, which allows to obtain two harvests per year, and its specific use in the preparation of products and culinary dishes important in the diet of its inhabitants; however, yields are low, due to poor crop management. The objective of the present investigation was to evaluate the response of four native varieties of the Zapalote Chico corn race (OAX-826, OAX-834, COL-64 and ZAP-MOR), to fertilization of N, P and K, in relation to the optimum grain yield and economic dose, stubble yield and harvest index, nutritional concentration in the grain and stubble, and the intrinsic quality of the grain, in the town of San Pedro Comitancillo, Oaxaca. The study was conducted under field conditions during the months of April to June 2017, and five doses of N fertilizer (0, 30, 60, 90 and 120 kg ha⁻¹) and four doses of P and K fertilizer were applied (0, 40, 80 and 120 kg P₂O₅ and K₂O ha⁻¹), in a design of divided plots, where the varieties were in the large plots and the fertilization treatments in the small plots, with four repetitions. The analysis of the information was done by regression. The highest grain yield was obtained with the application of 110 kg N ha⁻¹, 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 60 kg K₂O ha⁻¹, and a plant density of 50 000 plants ha⁻¹, with a higher yield in the variety ZAP-MOR. The highest stubble yields were obtained with the application of 120 kg N ha⁻¹, without application of P and K, and a plant density of 50 000 plants ha⁻¹, with higher yields in the ZAP-MOR variety. The highest harvest indexes were obtained with of 71 kg N ha⁻¹ and 75 kg P₂O₅ ha⁻¹, without application

of K, with differences between the varieties, from 0.47 to 0.56. The optimal economic dose for the four varieties was 80 kg N ha⁻¹, 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 40 kg K₂O ha⁻¹, with 50 000 plants ha⁻¹, and the optimal economic grain yields of 1.211, 1.299, 1.203 and 1.470 t ha⁻¹ for the four varieties, respectively. Among the varieties, some differences were observed in the concentration of P and K in the grain and stubble. The applied N: 1) increased the concentration of N in grain and stubble; 2) increased the concentration of P in the grain; and 3) decreased the concentration of P and K in the stubble. The P applied increased the concentration of P in the grain. The K decreased the concentration of P in the grain and increased the concentration of K in grain and stubble. The varieties presented differences in the flotation index, hectoliter weight, weight of 100 grains and the percentage of grain reflectance. The applied N increased the flotation index, the hectoliter weight and the weight of 100 grains, and decreased percentage of grain reflectance. The P increased the flotation index and the percentage of grain reflectance. The K decreased the weight of 100 grains. The results of this research contribute to improve the productivity of the varieties of this corn race, by increasing the grain yield and stubble without affecting the characteristics of their quality and affecting the food security and sovereignty of the region

Key words: Maize Zapalote Chico (*Zea mays* L.), fertilization N, P and K, yield of grain and stubble, harvest index, nutritional concentration in grain and stubble, intrinsic grain quality.

AGRADECIMIENTOS

A todos los mexicanos (as) que, a través de sus impuestos, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi formación profesional.

Al Colegio de Postgraduados, en forma particular al Postgrado de Edafología, por brindarme la oportunidad de esta superación profesional.

A los integrantes de mi consejo particular: Dr. Víctor Hugo Volke Haller, Dr. José Isabel Cortés Flores, Dr. Aquiles Carballo Carballo, y a mi sinodal la Dra. Vinisa Saynes Santillán.

En especial al Dr. Víctor Hugo Volke Haller, mi más sincera y profunda gratitud, reconocimiento y respeto. Gracias por su incondicional apoyo, tiempo, dedicación, asesoramiento y guía a lo largo de este trabajo. Por enseñarme a comprender más a fondo la fertilización de los cultivos, además de mostrarme y enseñarme nuevos enfoques del análisis estadístico. Sin duda su conocimiento, experiencia, genialidad y visión, fueron importantes para lograr culminar esta meta profesional de mi vida.

Al Dr. Aquiles Carballo Carballo, por su gran amistad, dirección, colaboración, enseñanzas, comentarios, asesoramiento y guía en el desarrollo de mi investigación.

Al Dr. José Isabel Cortés Flores, por su dedicación en la revisión y aportes esenciales en la parte final de mi proyecto de investigación.

A la Dra. Vinisa Saynes Santillán, por su tiempo y dedicación en la revisión de mí escrito, por sus sugerencias, comentarios y aportes esenciales en la parte final de mi proyecto de investigación.

Al Tecnológico Nacional de México, Campus Comitancillo un agradecimiento muy especial, por haber proporcionado el terreno donde se realizó el experimento de campo, apoyar con la preparación del suelo y aportar el riego y el equipo de bombeo para este, así como todas las facilidades brindadas durante esta etapa de la investigación.

Al Dr. José Manuel Cabrera Toledo, por brindarme el material vegetal utilizado en mi investigación, además de su apoyo incondicional, asesoramiento y guía en la planeación, establecimiento y desarrollo de la presente investigación, sin su colaboración no fuese posible esto.

A la Dra. María Gricelda Vázquez Carrillo, jefa del Laboratorio de Calidad de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por permitirme el uso de sus instalaciones, además de su guía y asesoramiento en la realización de los análisis de calidad física de grano, parte fundamental de esta investigación.

A la Sra. Andrea Araceli Espejel Estrada, por su ayuda en la edición final de este escrito, además de todas sus atenciones lo largo de mi estancia en la maestría, pero sobre todo muchas gracias por sus consejos y gran amistad.

Al Dr. Antonio Trinidad Santos (†), por su colaboración, comentarios y consejos para el establecimiento de mi experimento. Gracias por todas sus enseñanzas, fue un honor conocerlo.

DEDICATORIAS

Con todo mi amor a:

Mis padres José Manuel Cabrera Toledo y Adelita González Toledo, por su amor incondicional, su apoyo durante toda mi vida, por siempre guiar y seguir cada paso que doy, por enseñarme los aspectos fundamentales de la vida: trabajo, dedicación y esfuerzo, por ser el mejor ejemplo de éxito y superación. Sin duda alguna la vida no me alcanzara para agradecerles todo lo que han hecho por mí. Los amo.

A mis hermanos María Isabel y José Yahir, sin duda alguna mis mejores amigos, pilares de mi sed de superación profesional, soy afortunado de tenerlos como hermanos, que no les quede duda que a pesar de la distancia siempre estaré para ustedes.

A mi incondicional compañera de vida, mi esposa María Teresa Vivanco de la Rosa, gracias por todo tu amor e incondicional apoyo, por toda tu fortaleza, sin ello no pudiese llegar a la meta final.

A mi hijo José Manuel Cabrera Vivanco, por la fortaleza y valor que me has y sigues mostrando, por regalarme la sonrisa más hermosa que mis ojos pueden ver, que nunca se te olvide que eres el motor de mi vida. Te amo.

A mi abuelita Isabel Toledo Antonio, por enseñarme y mostrarme lo que es el amor incondicional, sin duda todos tus consejos y cariño me ayudaron a ser la persona en la que me eh convertido.

A la memoria de mis abuelitos: Romeo, Alfonso y María de la Luz, estoy seguro que están orgullosos.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
AGRADECIMIENTOS	viii
DEDICATORIAS	x
LISTA DE CUADROS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xvi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 El maíz a nivel mundial.....	4
2.2 El maíz a nivel nacional.....	4
2.2.1. México como centro de origen del maíz.....	7
2.3 El maíz a nivel estatal.....	8
2.4 El maíz a nivel regional y local.....	11
2.5 Efecto de la fertilización sobre el rendimiento de maíz.....	16
2.6 Calidad del grano de maíz.....	23
2.6.1 Calidad extrínseca.....	23
2.6.2 Calidad intrínseca.....	23
2.7 Características físicas del grano de maíz raza Zapalote Chico.....	29
2.8 Efecto de la fertilización sobre las características del grano de maíz.....	30
III. OBJETIVO	32
IV. HIPOTESIS	32
V. MATERIALES Y METODOS	32
5.1. Localización y caracterización del sitio experimental.....	33
5.1.1. Muestreo y análisis de suelo.....	33
5.2. Factores de estudio.....	36
5.2.1. Material vegetal.....	36

5.2.2.	Diseño experimental y de tratamientos	36
5.2.3.	Espacio de exploración para los factores N, P y K	37
5.2.4.	Determinación de los niveles de fertilización	38
5.3.	Conducción del experimento	45
5.3.1.	Preparación del terreno	45
5.3.2.	Siembra	46
5.3.3.	Fertilización	46
5.3.4.	Aporque.....	47
5.3.5.	Control de malezas.....	47
5.3.6.	Riego	47
5.3.7.	Cosecha	48
5.4.	Variables evaluadas	48
5.4.1.	Rendimiento de grano	48
5.4.2.	Rendimiento de rastrojo.....	49
5.4.3.	Índice de cosecha	51
5.4.4.	Concentración de N, P y K en grano y rastrojo	51
5.4.6.	Variables de calidad intrínseca del grano	53
5.5.	Análisis estadístico	55
5.5.1.	Análisis de varianza	55
5.5.2.	Análisis de regresión.....	56
5.5.3.	Análisis de optimización económica	57
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
6.1.	Rendimiento de grano.....	61
6.1.1.	Respuesta de las variedades a los factores N, P y K.....	61
6.1.2.	Optimización económica	64
6.2.	Rendimiento de rastrojo.....	66
6.3.	Índice de cosecha.....	68
6.4.	Concentración nutrimental en el grano y rastrojo	70
6.4.1.	Concentración nutrimental en grano	70
6.4.2.	Concentración nutrimental en el rastrojo.....	75
6.5.	Calidad de grano	78

VII. CONCLUSIONES.....	85
VIII. LITERATURA CITADA	86

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Producción de maíz en varios distritos políticos del estado de Oaxaca en el año 2017.	8
Cuadro 2. Principales razas de maíz nativo cultivadas en regiones del estado de Oaxaca.	10
Cuadro 3. Medias de las variables cuantitativas de 18 variedades nativas sobresalientes de la raza Zapalote chico en San Pedro Comitancillo, Oaxaca (PV/2012).	15
Cuadro 4. Rendimiento promedio de grano ($t\ ha^{-1}$) de 18 variedades nativas sobresalientes de maíz de la Raza Zapalote Chico.	16
Cuadro 5. Características físicas del grano de maíz deseadas según su uso.	25
Cuadro 6. Clasificación de la dureza del grano de maíz en relación con el índice de flotación.	26
Cuadro 7. Clasificación de la dureza del grano en relación a su peso hectolítrico.	27
Cuadro 8. Clasificación del tamaño del grano de acuerdo al peso de 100 granos.	28
Cuadro 9. Características físicas de 18 variedades sobresalientes de la raza de maíz Zapalote Chico.	30
Cuadro 10. Análisis de suelos de las muestras del sitio experimental (parcela del Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo).	35
Cuadro 11. Análisis de suelos (macronutrientes) de las muestras del sitio experimental (parcela del Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo).	35
Cuadro 12. Análisis de suelos (micronutrientes) de las muestras del sitio experimental (parcela del Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo).	35
Cuadro 13. Sitios de colecta y denominación de cuatro maíces nativos sobresalientes de la raza Zapalote Chico.	36
Cuadro 14. Lista de tratamientos de la parcela chica, de acuerdo a un diseño Plan Puebla I.	37

Cuadro 15. Análisis de varianza general en parcelas divididas para las variables IF, PH, PCG y L de cuatro variedades de maíz la raza Zapalote Chico.	55
Cuadro 16. Costos fijos de producción de maíz raza Zapalote Chico en el Istmo de Tehuantepec.	59
Cuadro 17. Costo de los insumos N, P y K para la producción de maíz raza Zapalote Chico en el Istmo de Tehuantepec, en el ciclo agrícola P-V 2017.....	60
Cuadro 18. Análisis económico de cuatro variedades de maíz raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.....	65
Cuadro 19. Modelos de regresión para las concentraciones de N, P y K, en el grano de cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.....	70
Cuadro 20. Modelos de regresión para las concentraciones de N, P y K, en el rastrojo de cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.....	75
Cuadro 21. Análisis de varianza conjunto para índice de flotación, peso hectolítrico, peso de cien granos y luminosidad del grano de cuatro genotipos de maíz raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.	78
Cuadro 22. Componentes de calidad intrínseca de las cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico.	79
Cuadro 23. Modelos de regresión para las variables de calidad intrínseca del grano de cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.....	80

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Distribución de las razas de maíz nativo en el estado de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2005). 9
- Figura 2. Distribución de la raza de maíz Zapalote Chico en el estado de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2005). 12
- Figura 3. Área de distribución potencial de la raza de maíz Zapalote Chico en el estado de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2005). 13
- Figura 4. Rendimiento estimado de grano en función del N, P y K aplicados (a, b y c) y la densidad de población (d) para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR. 62
- Figura 5. Rendimiento estimado de rastrojo en función del N aplicado (a) y la densidad de población (b) para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR. 67
- Figura 6. Índice de cosecha estimado en función del N (a) y P (b) aplicados con un rendimiento de grano de 1.43 t ha⁻¹, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR. 70
- Figura 7. Concentración de N en el grano en función del N aplicado, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR. 71
- Figura 8. Porcentaje de proteína del grano en función del N aplicado para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR. 72
- Figura 9. Concentración del P en el grano en función del N, P (a) y K (b) aplicados, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR. 73

Figura 10. Efecto del K aplicado sobre la concentración de K en el grano de cuatro variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.	74
Figura 11. Concentración del N en el rastrojo en función del N aplicado, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.....	76
Figura 12. Concentración del P en el rastrojo en función del N aplicado, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.....	77
Figura 13. Concentración del K en el rastrojo en función del K (a) y el N (b) aplicados, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.	78
Figura 14. Índice de flotación en función del N (a) y el P (b) aplicados, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.	81
Figura 15. Peso hectolítrico en función del N aplicados para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.	82
Figura 16. Peso de 100 granos en función del N, P (a) y K (b) aplicados para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.....	83
Figura 17. Porcentajes de reflectancia del grano en función del N (a) y P (b) aplicados para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.	84

I. INTRODUCCIÓN

México es reconocido como centro de origen, domesticación y diversificación del maíz (*Zea mays*). Investigaciones sobre la constitución de los nudos cromosómicos de varias razas mexicanas de maíz indican que tuvo su origen a partir del Teocintle hace aproximadamente 5 000 años. En México existen 59 de 220 a 300 razas de maíz del continente americano, las cuales se continúan sembrando actualmente por razones culturales, sociales, técnicas y económicas (Sánchez *et al.*, 2000; Kato *et al.*, 2013).

El maíz es el cultivo de mayor importancia agrícola en México, sembrándose alrededor de 7.5 millones de hectáreas anualmente, de las cuales el 79 % corresponden a cultivos de temporal y 21 % a riego. El 85 % de los productores de maíz realizan esta práctica en predios cuya extensión no supera las 5 ha y el destino principal de la producción es autoconsumo, cultivando principalmente variedades locales comúnmente denominadas *maíces nativos*. Anualmente se produce un promedio de 27 700 000 ton, de las cuales 52 % provienen de la producción de temporal, cantidad insuficiente, ya que el consumo es de unos 30 millones de toneladas de maíz. Del total del maíz consumido, 74 % es maíz blanco (producción nacional), y el restante 26 % es maíz amarillo importado, principalmente de los EE. UU (SIAP, 2018; SIAP-Campo Mexicano, 2010; SE-DGIB, 2012).

En México, el maíz es un elemento fundamental en la alimentación; su consumo se realiza en una gran diversidad de productos nixtamalizados, como tortillas, pinoles, atoles, tostadas, totopos, tamales y elotes; de estos, la tortilla es el producto con mayor demanda con un consumo diario *per cápita* de 155 g en zonas urbanas y 218 g en las zonas rurales (SE-DGIB, 2012).

En este contexto, las razas nativas de maíz son de suma importancia, debido a que constituyen la materia prima para la elaboración de los diferentes alimentos para el consumo humano y están relacionadas con características únicas que las hacen insustituibles para preparar una gran variedad de platillos tradicionales (Cabrera, 2014; Fernández *et al.*, 2013). Las variedades mejoradas de maíz (híbridos) en su mayoría no son utilizadas debido a sus patrones varietales y que no poseen las características de calidad de los maíces nativos como: fácil nixtamalización, dureza y adhesividad de la masa, extensibilidad, capacidad de absorción de agua y rendimiento de masa y tortilla, pérdida de peso durante la cocción de la tortilla y resistencia al corte de la tortilla, además del tiempo de cocción, perfiles nutricionales, suavidad, sabor y durabilidad de la tortilla (Rangel *et al.*, 2004; Vidal *et al.*, 2008).

También, aunque el rendimiento de grano de los maíces híbridos es superior al de las razas nativas, pero los pequeños productores prefieren el cultivo y uso de las últimas, debido a que en su mayoría se siembran en condiciones edafo-climáticas limitativas, están mejor adaptadas a las condiciones climáticas locales, con menores costos de producción, y principalmente mayor aptitud para múltiples preparaciones culinarias tradicionales (Turrent *et al.*, 2010).

El Zapalote Chico es una de las razas con mejor adaptación en su área de distribución geográfica, en la planicie costera del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, pues tuvo un desarrollo coevolutivo junto con la cultura zapoteca, (Aragón *et al.*, 2005; López *et al.*, 2005). Esta raza es insustituible en la región, ya que puede consumirse en distintas preparaciones desde elote, en estado de madurez fisiológica y en grano seco (Muñoz, 2006; López, 2005). El producto más conocido y elaborado con esta raza de maíz es el *totopo istmeño*, que es una tortilla deshidratada y crujiente horneada en *comezcal* (olla de barro sin fondo ni tapa). Para esta zona del país se han generado y adaptado varios materiales genéticos; sin embargo, su adopción por parte de los

productores es escasa, ya que prefieren cultivar y consumir los productos elaborados con el Zapalote Chico (León, 1994).

El poco uso de semillas mejoradas, el abandono de programas de mejoramiento genético para esta zona del país, la baja fertilidad de los suelos y falta de asistencia técnica hacia los productores son causantes de los muy bajos rendimientos que se obtienen, poniendo en riesgo la soberanía y seguridad alimentaria de la región, dado que el consumo de Zapalote Chico está directamente relacionado con la dieta de sus habitantes; es ahí donde surge el interés entre los agricultores e investigadores de la región en asegurar la producción y productividad de esta raza de maíz, buscando la autosuficiencia alimentaria mediante su preservación, incrementando el rendimiento de grano sin afectar negativamente las características de calidad de grano, además de fomentar y difundir su uso.

Los programas de mejoramiento genético generalmente se enfocan a incrementar el rendimiento de grano y mientras que las características de calidad de grano son poco atendidas; por lo cual, es necesario impulsar estrategias de conservación y desarrollo de los maíces nativos, integrando cadenas de valor, lo que permitirá a los productores obtener mayores rendimientos de grano, asegurar la fuente de su alimentación, generar mayores ingresos y conservar su material genético que son parte del legado biocultural que México ha brindado al mundo.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la respuesta de cuatro variedades de la raza de maíz Zapalote Chico al efecto de la fertilización con N, P y K en relación al rendimiento de grano y rastrojo, índice de cosecha, contenido nutrimental en grano y rastrojo, así como la calidad intrínseca del grano, en la localidad de San Pedro Comitancillo perteneciente al Istmo de Tehuantepec en el estado de Oaxaca.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El maíz a nivel mundial

Si se considera la superficie sembrada, los principales granos que se producen en el mundo son maíz, trigo, arroz, cebada, sorgo y avena (SE-DGIB, 2012); de ellos el maíz es el cultivo de mayor área sembrada y cosechada en 168 países (MAIZAR, 2011).

De acuerdo con FAOSTAT (2018), a nivel mundial en el año 2016 se cosecharon aproximadamente 180 millones de hectáreas de maíz, con una producción de 1 060 107 470 ton, siendo Estados Unidos de Norte América el principal país productor, con una aportación del 36 %, seguido de China (22 %), Brasil (6 %), y Argentina y México cada uno con 4 % del total producido.

Durante el siglo XX y principios del XXI, el cereal que más importancia ha tenido en varios sectores de la economía en los países industrializados es el maíz, ya que se utiliza principalmente como forraje, materia prima para la producción de alimentos procesados y recientemente, para la producción de etanol (Serratos, 2009).

2.2 El maíz a nivel nacional

Las evidencias indican que el maíz tuvo su origen en México a partir del Teocintle hace 5 000 o 6 000 años, y en el año 1800 ya se había extendido a Mesoamérica y posteriormente al continente americano (Rodríguez y de León, 2008). El maíz se cultiva en México en gran diversidad de condiciones climáticas, edáficas y tecnológicas. Se siembra desde 1 a 3 800 msnm; en lugares con severa escasez de agua durante un verano que combina días largos con escasa humedad relativa e insolación intensa, hasta sitios de vendaval continuo; en ambientes con suficiente humedad e insolación adecuada, al igual que la sierra de neblina; en suelos muy alcalinos que ofrecen serios

retos de nutrición del cultivo, así mismo en suelos muy ácidos con retos no menos importantes. A las tensiones abióticas de diverso grado se suman tensiones bióticas ejercidas por los enemigos naturales del maíz, de escala microscópica, llegando a los insectos y vertebrados (trips, gusano cogollero, gusano soldado, gusano trozador, gusano elotero, barrenador del tallo, frailecillos, picudos, araña roja, chapulines, gallina ciega, diabrótica, catarina del maíz, gusano de alambre, mapaches, tlacuaches, perros, distintas especies de ganado y una gran variedad de aves). En la escala de la tipología tecnológica, el maíz es el elemento central de la etnoagricultura (practicada típicamente en las sierras), y es también cultivo clave de la agricultura tradicional, que combina raíces autóctonas y europeas, de la agricultura tipo Revolución Verde y en la agricultura industrial (Turrent, 2008).

En el año agrícola 2015, la producción de grano de maíz en México fue de 24.69 millones de toneladas con 85.9 % de maíz blanco y 13.6 % de maíz amarillo, y el restante 0.5 % con otros tipos de maíz (FIRA, 2016).

Según datos del SIAP (2018), en el año 2017 se sembraron en México 7 540 942 ha, de las cuales 1 596 855 ha (21 %) correspondieron a producción en riego y 5 944 086 (79 %) a temporal. La producción en ambas modalidades sumó 27 762 480 ton, con 13 357 198 ton en cultivos de riego y 14 405 282 en temporal teniendo un rendimiento promedio de 8.38 t ha⁻¹ y 2.52 t ha⁻¹ respectivamente. El principal productor es el estado de Sinaloa, que participa con el 22 % del total nacional y una producción de 6 167 095 ton, en una superficie de 574 413 ha (95 % bajo riego) con un rendimiento medio de 10.74 t ha⁻¹.

El maíz blanco se produce y consume en su totalidad en el país; de 22 millones de toneladas producidas alrededor de 12 millones se destinan al consumo humano comercial (industria harinera

y de masa de nixtamal, principalmente), aproximadamente 6 millones de toneladas son para autoconsumo, 2 millones de toneladas son consumidas por el sector pecuario y el resto se distribuye entre semillas, mermas, inventarios y exportaciones (principalmente a los países de Colombia, Guatemala, Kenia, Mozambique, El Salvador y Sudáfrica, hasta 500 mil toneladas del grano). En el caso del maíz amarillo, importado principalmente de los Estados Unidos, este es consumido por la industria productora de alimento pecuario balanceado, cerealera, de frituras y botanas y de féculas y almidones (SE-DGIB, 2012).

En México el cultivo de maíz se realiza en un sistema dual; por una parte, un gran número de pequeños agricultores campesinos lo producen para autoconsumo y venta a pequeña escala; y por la otra, un número relativamente pequeño de grandes agricultores que lo producen con fines comerciales y poco consumo directo (Bellon *et al.*, 2009). A nivel nacional se identifican aproximadamente 2 millones de productores dedicados al cultivo de maíz, 50.1 % de los ejidatarios tienen predios de 5 ha o menos, poseen 14.7 % de la superficie y en promedio una extensión de 2.8 ha; 25.6 % de los ejidatarios posee predios entre 5 y 10 ha, poseen 22.6 % de la tierra y el tamaño promedio de sus predios es de 8.4 ha; 10.1 % poseen entre 10 y 15 ha, son dueños de 13.8 % de la superficie y el promedio de sus predios es de 13.1 ha. 4.6% de los ejidatarios poseen predios mayores de 25 ha, tiene predios de una extensión promedio de 58 hectáreas y poseen 28.7 % de la superficie parcelada (Robles, 1999). Los pequeños agricultores utilizan una gran diversidad de maíces nativos (locales), mientras que los agricultores comerciales comúnmente utilizan maíces híbridos (Figuroa *et al.*, 2013).

2.2.1. México como centro de origen del maíz

México es reconocido como centro de origen, domesticación y diversificación del maíz. De acuerdo a Sánchez *et al.* (2000), en base a características morfológicas e isoenzimáticas, se localizan en el país 59 razas de las 220 a 300 que existen en el continente americano.

La gran riqueza genética que tiene México en sus poblaciones nativas de maíz, representa posibilidades extensas para la selección y recombinación de recursos fitogenéticos de este cereal para diferentes regiones. A su vez, esta riqueza genética es aprovechada para el consumo humano en diversas maneras, que incluyen: tortillas, tamales, tlacoyos, totopos, pinole y elotes, entre otros (Arrellano *et al.*, 2003; Figueroa *et al.*, 2005).

El maíz fue el alimento básico de los antiguos habitantes de Mesoamérica, quienes idearon una forma de procesarlo para mejorar su calidad: la nixtamalización. Esta es una palabra náhuatl que indica el proceso que consiste en cocer el maíz con agua y cal o ceniza. El maíz nixtamalizado se muele más fácilmente y tiene mayor valor nutritivo, ya que este proceso aumenta la biodisponibilidad de la vitamina B3 y reduce las micotoxinas. La nixtamalización se sigue utilizando hoy en día, y el Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT) la está promoviendo en el continente africano para mejorar la calidad alimenticia en varios países (O'Leary, 2016).

En México la principal forma de consumo humano del maíz es la tortilla (Coutiño *et al.*, 2008), ya que alrededor de 12 millones de toneladas se consumen en esta forma. La elaboración de tortillas se realiza mediante dos formas, la primera es el método tradicional maíz-masa-tortilla utilizado por 64 % de los consumidores y 36 % lo hace en base a la harina de maíz nixtamalizado (Sierra *et al.* 2010).

La Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura ha declarado a la cocina tradicional mexicana patrimonio cultural inmaterial de la humanidad (UNESCO, 2010), gracias al papel de los maíces nativos en la preparación de más de 600 platillos culinarios tradicionales (Ortega, 2003). Existe una correlación entre la raza de maíz y el tipo de preparación culinaria; por ejemplo, la raza Bolita es la idónea para elaborar la tortilla *tlayuda* y el *tejate*, el Cacahuacintle para el *pozole*, la raza Harinoso de Ocho para los *coricos*, la raza Bofo para *huacholes*, y la raza Zapalote chico para el *totopo istmeño* (Fernández *et al.*, 2013).

2.3 El maíz a nivel estatal

Según datos del SIAP (2018), en el estado de Oaxaca se sembró en 2017 una superficie de 518 332 ha, de las cuales el 6 % fue en riego y el 94 % en temporal. Ambos sistemas de producción sumaron 700 625 ton, con un rendimiento promedio de 2.40 t ha⁻¹ en riego y 1.30 t ha⁻¹ en temporal (Cuadro 1). Estos rendimientos son bajos si se comparan con los rendimientos promedios nacionales, que fueron de 8.38 t ha⁻¹ en riego y de 2.52 t ha⁻¹ en temporal.

Cuadro 1. Producción de maíz en varios distritos políticos del estado de Oaxaca en el año 2017.

Distrito	Temporal			Riego		
	SS	P	R	SS	P	R
Cañada	29 510.00	35 889.15	1.23	1 027.50	2 910.29	2.92
Costa	54 852.50	84 206.39	1.54	4 713.50	15 205.81	3.23
Huajuapán de León	105 611.50	98 340.70	0.94	7 277.10	15 313.70	2.13
Istmo	63 276.00	84 256.66	1.34	11 485.00	22 559.93	1.99
Sierra Juárez	19 641.50	23 809.06	1.25	1 073.25	2 472.93	2.3
Tuxtepec	62 764.00	139 562.69	2.28	0.00	0.00	0.00
Valles Centrales	149 649.50	155 823.01	1.05	7 451.55	20 275.06	2.72
Total	485 305.00	621 887.66	1.30	33 027.90	78 737.72	2.40

Fuente: SIAP (2018); SS = superficie sembrada (hectáreas); P = producción total (toneladas); R = rendimiento promedio (t ha⁻¹).

El 90 % de la superficie sembrada con maíz se realiza con razas nativas seleccionadas por los propios productores, 7 % con variedades mejoradas de polinización libre y 3 % con híbridos (Aragón *et al.*, 2005).

El estado de Oaxaca posee una alta variación genética del maíz (Figura 1); tiene 35 razas nativas que representa el 59 % de la diversidad reportada para México; esto, debido a su situación geográfica, alta diversidad climática, topografía variada, diferentes tipos de suelos, facilidad de entrecruzamiento de esta especie y principalmente al gran número de grupos étnicos que han formado diferentes variedades nativas mediante selección a través de miles de años (Aragón *et al.*, 2005).

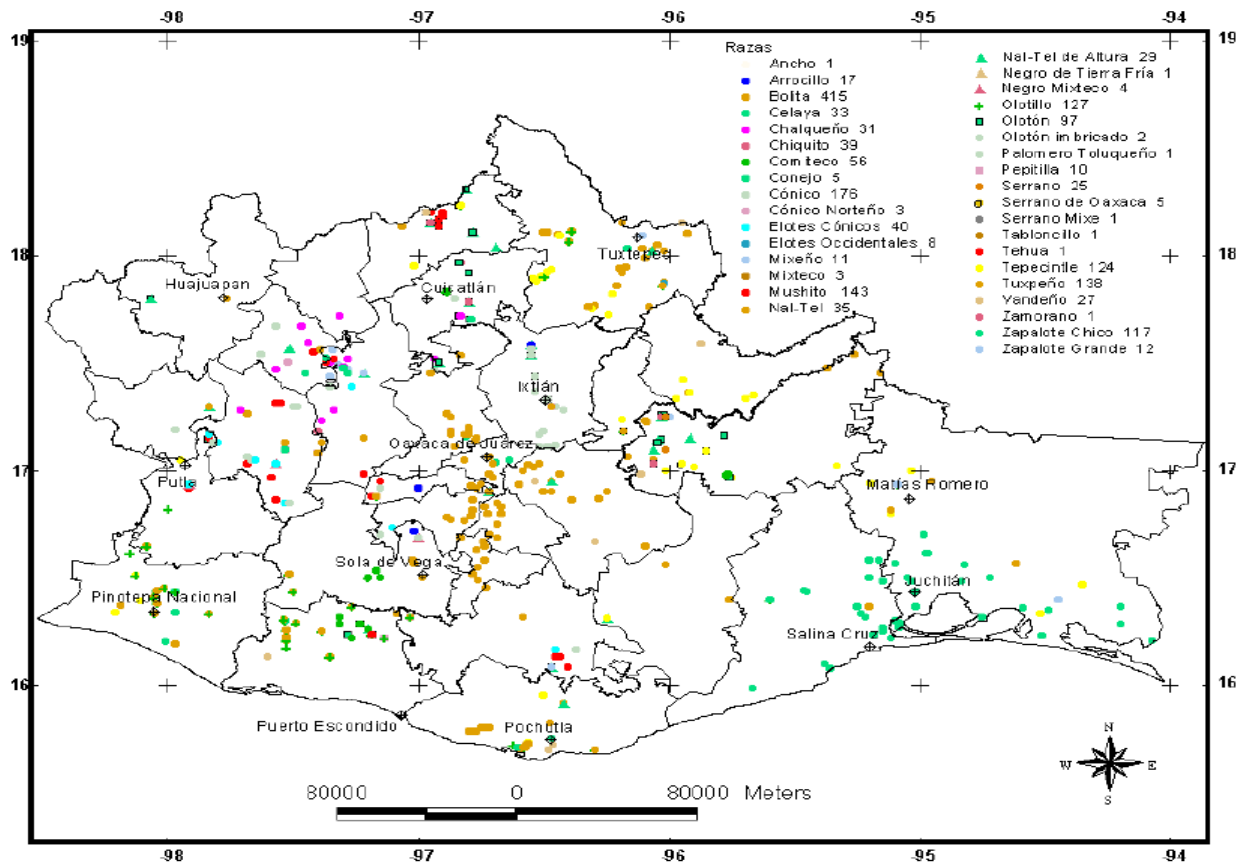


Figura 1. Distribución de las razas de maíz nativo en el estado de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2005).

Los ciclos de cultivo del maíz nativo de Oaxaca son muy variados: se pueden encontrar variedades nativas con un ciclo de tres meses en la región de la Costa e Istmo de Tehuantepec (razas Conejo y Zapalote Chico) y materiales hasta de nueve meses en la región Mixteca (Chalqueños), Sierra Norte (Olotón, Comiteco) y Sierra Sur (Mushito, Arrocillo, Cónico) (Cuadro 2). La variedad de colores de grano que se pueden encontrar es amplia: blancos (62.9 %), amarillos (20.1 %), azules (7.0 %), rojos (4.6 %) y naranjas (2.0 %) (Aragón *et al.*, 2006). Los maíces con granos de color azul agrupan a los de color morado, azul y negro, que representan 10.4 %, de todas las razas establecidas en la entidad. Aunque la utilización de genotipos de grano blanco es mayor por la disponibilidad de variedades y hábitos de consumo, un sector de la población prefiere productos nixtamalizados derivados de maíces de grano azul, principalmente tortillas, tlacoyos y gorditas (Salinas *et al.*, 2012).

Cuadro 2. Principales razas de maíz nativo cultivadas en regiones del estado de Oaxaca.

Región	Razas
Cañada	Comiteco, Olotón, Tepecintle, Chalqueño
Costa	Tuxpeño, Olotillo, Conejito, Tepecintle
Istmo	Zapalote Chico, Zapalote Grande, Tuxpeño
Mixteca	Chalqueño, Cónico
Sierra Juárez	Olotón, Cónico, Chalqueño, Bolita, Tuxpeño, Comiteco, Serrano Mixe
Tuxtepec	Tuxpeño, Tepecintle, Nal-tel, Olotillo
Valles Centrales	Bolita, Tepecintle, Pepitilla, Tabloncillo

Fuente: Aragón *et al.* (2006)

El maíz es el cultivo de mayor importancia a nivel estatal y constituye el alimento básico de los Oaxaqueños, la mayoría de las familias destinan su producción para el autoconsumo y en muy pequeña escala comercializan grano y productos transformados para el mercado local. El consumo per cápita de maíz en Oaxaca es de 200 kg anualmente (Aragón *et al.*, 2006).

El uso del maíz en las diferentes regiones del estado es muy variado: alimenticio, forrajero, medicinal, adivinatorio, artesanal y para la construcción (Aragón *et al.*, 2005).

2.4 El maíz a nivel regional y local

En la región del Istmo de Tehuantepec en el año agrícola 2017 se sembró una superficie de 74 761 ha con maíz, de las cuales 63 276 (85 %) fue en temporal, mientras que 11 485 ha (15 %) fueron en riego. Con ambos sistemas de producción se obtuvo un total de 106 816 ton, con un rendimiento medio de grano de 1.3 t ha⁻¹ en temporal y 1.9 t ha⁻¹ en riego (SIAP, 2018).

Aragón *et al.* (2006) reportan que en la región del Istmo de Tehuantepec se cultivan tres razas de maíz, principalmente: Zapalote Chico, Zapalote Grande y Tuxpeño, siendo el primero el de mayor superficie cultivada y consumo. López (2005) menciona que en dicha región existe una introgresión de otras razas de maíz como el Vandeyo, Olotillo y Tepecintle.

El maíz Zapalote Chico es una de las razas prehistóricas (Wellhausen *et al.*, 1951), la cual se desarrolló junto con la cultura indígena zapoteca, en la costa occidental de las llanuras de Oaxaca, mejor conocida como la planicie costera del Istmo de Tehuantepec (López *et al.*, 2005). Este maíz es denominado el “Rey del Istmo”; es de porte bajo, mazorca pequeña y el grano tiene un endospermo muy suave, que cubre una extensa área (Figura 2), y es de las razas que tiene mejor definida su área de distribución geográfica (Aragón *et al.*, 2005).

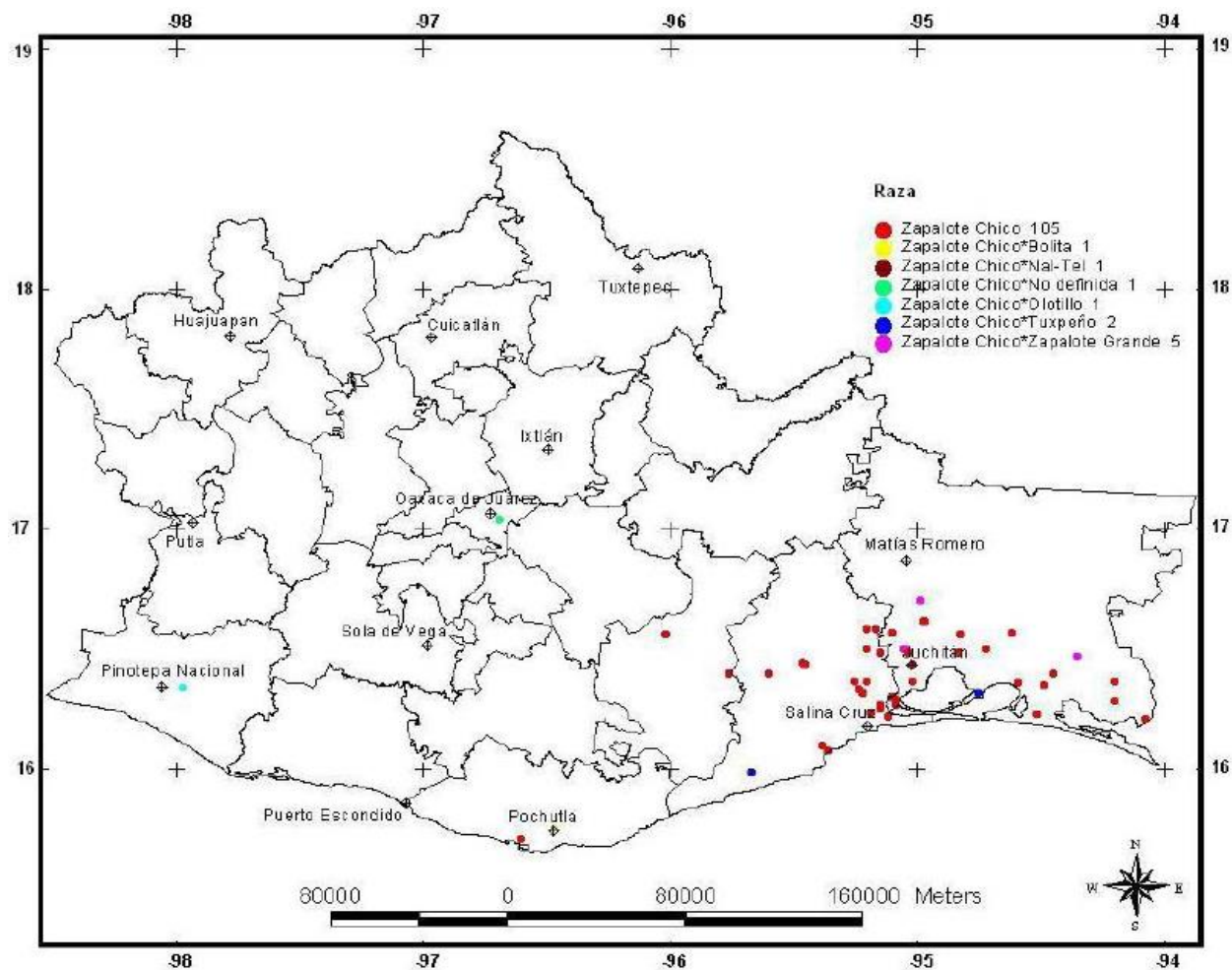


Figura 2. Distribución de la raza de maíz Zapalote Chico en el estado de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2005).

Los rangos climáticos donde se distribuye el Zapalote Chico son: altitud de 1 a 840 msnm, temperatura mínima de 16.5 a 22.5 °C, temperatura máxima de 29.5 a 34.6 °C, temperatura media de 23.1 a 28 °C, y precipitación de 588 a 1667 mm (Aragón *et al.*, 2005). Potencialmente, se puede cultivar en toda la planicie del Istmo hasta los límites de la Costa Oaxaqueña con Guerrero (Figura 3).

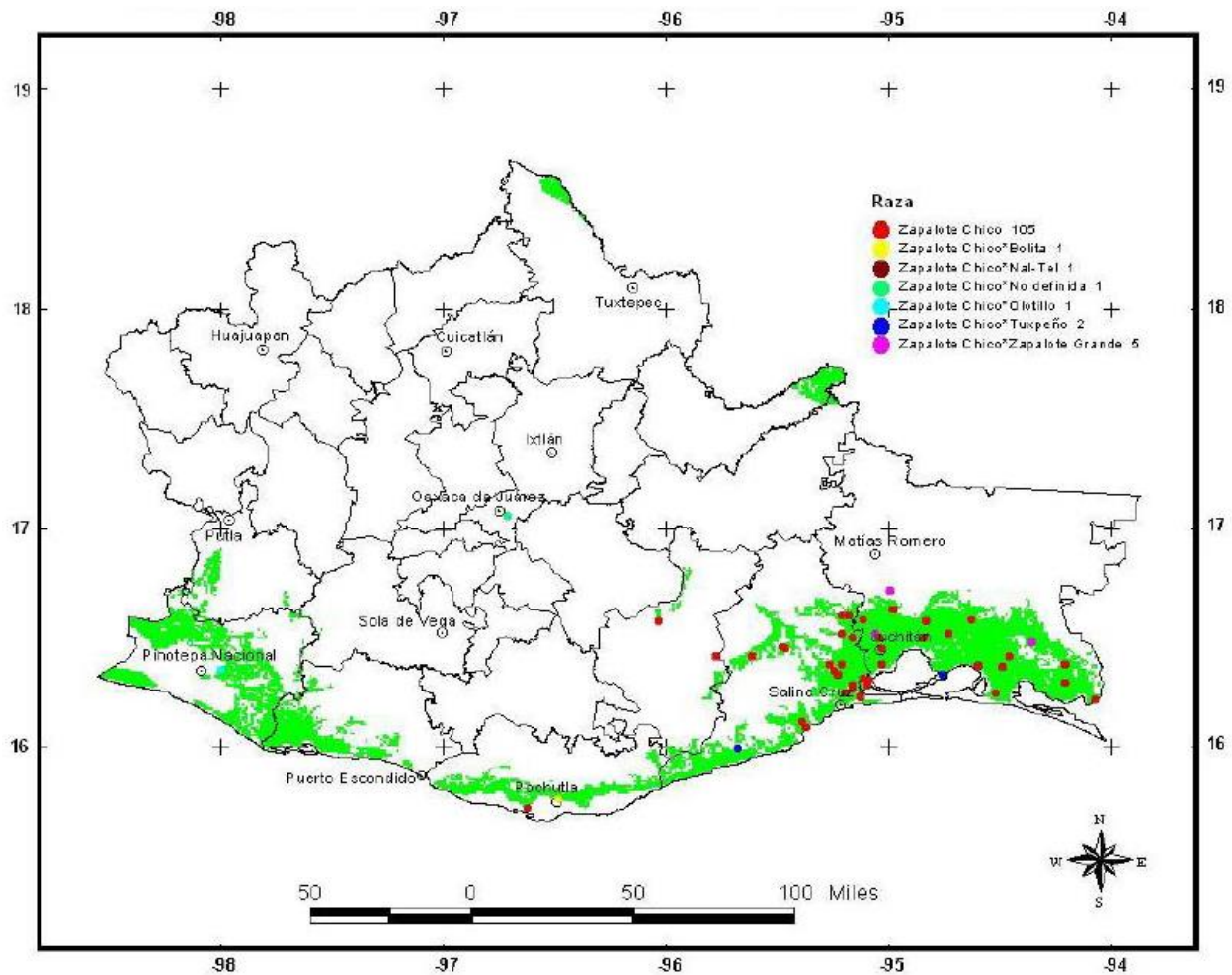


Figura 3. Área de distribución potencial de la raza de maíz Zapalote Chico en el estado de Oaxaca (Aragón *et al.*, 2005).

La preferencia de los productores por esta raza obedece a varias características genéticas ventajosas, que lo califican como insustituible para la región (Muñoz, 2006). Es un material muy precoz (85 días a madurez), que resiste fuertes vientos y a la sequía, así como el ataque del gusano cogollero, y por su excelente cobertura de mazorca se protege de las plagas de granos almacenados. Por su tipo de almidón, es único en la elaboración de los famosos totopos del Istmo (Aragón *et al.*, 2005).

El maíz Zapalote Chico puede consumirse en distintas preparaciones desde elote, en estado de madurez fisiológica y como grano seco. Uno de los productos más conocidos elaborados es el *totopo* (López, 2005). Los pobladores del Istmo de Tehuantepec inventaron el *totopo*, que es una tortilla deshidratada y crujiente horneada en comezcal (olla de barro sin fondo ni tapa); está caracterizada por su suavidad conferida por el endospermo semiharinoso que es bien distinguida por los consumidores regionales, quienes lo prefieren, en lugar de los totopos elaborados con el maíz de otras regiones que venden algunos comercios regionales (León, 1994).

No obstante, los cambios que en estos días experimentan los habitantes de la región en las formas de consumo (comida rápida), en los últimos años se ha agudizado la sensibilidad de la preferencia de algunos sectores de la población urbana y rural por productos alimenticios preparados en forma autóctona o tradicional con maíces nativos. Tal es el caso de las tortillas y los totopos que se elaboran con el Zapalote Chico, que se distingue por su mejor calidad comparado con la de harina industrializada de maíz híbrido. En la actualidad, predomina un interés común entre los agricultores locales e investigadores en preservar, fomentar y difundir el uso de los genotipos de Zapalote Chico por las comunidades de la región Istmeña de Oaxaca (Cabrera, 2014).

En el año de 1997, el Tecnológico Nacional de México, Campus Comitancillo, y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias realizaron actividades para coleccionar, conservar y mejorar los maíces de la raza Zapalote Chico, logrando reunir un total de 97 colectas. La constante evaluación y selección a partir de características agronómicas permitieron distinguir 18 colectas sobresalientes (Cuadros 3 y 4), las cuales se han caracterizado y conservado (Cabrera, 2014).

Cuadro 3. Medias de las variables cuantitativas de 18 variedades nativas sobresalientes de la raza Zapalote chico en San Pedro Comitancillo, Oaxaca (P-V/2012).

Variedad	Variables vegetativas						Variables de la mazorca			
	Ddm	Dff	Alp	Alm	Ram/p	Anl	Lam	Dia	Nhg	Ngh
OAX-823	46.45	47.90	199.50	80.50	0.41	6.95	9.82	3.74	9.90	25.35
OAX-826	47.40	40.80	192.00	66.50	0.35	6.59	12.18	3.84	10.30	25.50
OAX-827	48.70	50.45	191.25	70.75	0.37	6.62	12.76	4.24	11.30	26.96
OAX-830	46.70	47.95	201.75	80.00	0.39	6.28	12.00	4.07	11.50	28.50
OAX-832	47.70	49.25	214.25	92.50	0.43	6.81	10.36	3.91	10.00	24.55
OAX-834	45.65	48.50	191.00	89.00	0.48	7.03	10.97	3.94	10.20	26.45
OAX-838	46.20	47.70	199.75	79.25	0.39	6.26	13.30	4.13	11.40	28.20
COL-29	48.20	49.85	202.50	84.00	0.41	6.56	10.82	4.13	10.60	26.70
COL-31	46.70	48.35	186.75	76.25	0.41	5.71	9.68	3.84	10.80	24.55
COL-32	47.35	49.20	191.25	81.50	0.42	6.47	10.05	3.96	10.50	23.00
COL-34	46.75	48.60	192.75	75.25	0.39	6.40	10.91	3.90	10.40	26.35
COL-36	47.00	48.95	192.50	78.50	0.41	6.25	12.24	3.91	10.50	25.25
COL-45	47.75	49.50	187.00	79.00	0.42	6.56	11.72	4.14	12.20	27.20
COL-51	48.00	49.80	204.00	78.25	0.38	6.39	12.00	3.96	11.30	24.95
COL-58	48.15	50.00	209.50	83.00	0.40	5.80	12.31	3.89	10.40	26.90
COL-62	47.45	49.35	203.75	79.75	0.39	6.16	12.07	4.03	12.00	23.20
COL-64	48.00	49.85	184.25	64.25	0.35	6.00	11.21	3.84	11.00	24.00
ZAPMOR	49.50	51.15	204.75	95.25	0.46	6.80	9.37	4.37	16.45	23.40

Fuente: Cabrera (2014); las colectas marcadas en negrita corresponden a las utilizadas en la presente investigación. Dfm = días a floración masculina; Dff = días a floración femenina; Alp = altura de planta (cm); Alm = altura de mazorca (cm); Ram/p = relación entre altura de la mazorca superior /altura de planta; Anl = ancho de la lámina (cm); Lam = largo de mazorca (cm); Dia = diámetro de mazorca (cm); Nhg = número de hileras de grano; Ngh = número de granos por hilera.

Cuadro 4. Rendimiento promedio de grano ($t\ ha^{-1}$) de 18 variedades nativas sobresalientes de maíz de la Raza Zapalote Chico.

Variedad	Años					Promedio
	2004	2005	2008	2010		
1	OAX-823	4.26	1.61	3.33	0.99	2.55
2	OAX-826	2.67	1.33	3.13	1.38	2.13
3	OAX-827	3.69	1.64	3.48	1.4	2.55
4	OAX-830	2.33	1.66	1.64	1.3	1.73
5	OAX-832	2.91	3.69	2.79	0.63	2.51
6	OAX-834	1.87	2.58	3.15	0.96	2.14
7	OAX-838	3.23	2.76	3.67	1.62	2.82
8	COL-29	3.21	3.29	1.16	0.93	2.15
9	COL-31	2.58	2.49	2.89	1.1	2.27
10	COL-32	3.09	2.98	2.25	1.41	2.43
11	COL-34	2.66	3.42	2.52	1.71	2.58
12	COL-36	2.83	4.11	2.85	2.1	2.97
13	COL-45	3.05	2.84	3.94	1.49	2.83
14	COL-51	3.23	1.51	2.54	2.44	2.43
15	COL-58	2.53	1.67	3.26	1.85	2.33
16	COL-62	3.45	1.2	3.26	1.97	2.47
17	COL-64	2.51	1.86	3.12	1.42	2.23
18	ZAP MOR	3.15	1.92	3.09	1.42	2.40

Fuente: Cabrera (2014); las variedades marcadas en negrita corresponden a las utilizadas en la presente investigación.

2.5 Efecto de la fertilización sobre el rendimiento de maíz

Los factores que influyen en el rendimiento de cualquier cultivo son numerosos, tales como las condiciones geográficas, la calidad de los suelos y los regímenes climatológicos propios de la región, y aunado a las causas naturales se agregan situaciones históricas, sociales, tecnológicas y económicas; entre ellos hay una dependencia mutua y al cambiar tan solo uno de ellos, los otros responden positiva o negativamente. Algunos de estos factores son dados por

la naturaleza, por lo que la mano del hombre solo puede, en algunos casos, aminorar sus efectos en las plantas (Larqué *et al.*, 2017).

La planta requiere de elementos esenciales en diferentes cantidades, por lo que se clasifican en macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl y Ni). El suelo no necesariamente aporta o tiene la capacidad de aportar todos ellos en la cantidad que las plantas los necesita, por lo que se utiliza la fertilización química y el uso de abonos orgánicos para alcanzar rendimientos adecuados de los cultivos.

Las necesidades nutrimentales están definidas por el cultivo, según su producción de biomasa, en la cual se encuentra el producto de interés comercial, y su concentración nutrimental en ellos. Los macronutrientes (N, P y K) son requeridos por los cultivos en mayores cantidades. Estos nutrientes son los que han concentrado la mayor parte de la atención en las prácticas de fertilización, y los que han conseguido incrementos en el rendimiento en la mayoría de los cultivos. Los planes y técnicas de fertilización deben presentar diferencias que ayuden a mejorar o manejar más eficientemente cada uno de los nutrientes en particular para cada cultivo, tomando en cuenta distintos factores, como, forma química de la fuente, la oportunidad de aplicación, suelo, clima, manejo del cultivo, nivel de rendimiento deseado, etc.

El nitrógeno (N) participa en la síntesis de proteínas y por ello es vital para toda la actividad metabólica de la planta, es un elemento esencial de los aminoácidos, péptidos y proteínas. Además, el N se encuentra en moléculas tan importantes como las purinas y pirimidinas de los ácidos nucleicos, esenciales para la síntesis de proteínas, también en porfirinas de las clorofilas y en los citocromos que son esenciales para la fotosíntesis y la respiración (Torres, 2010; Alcántar y Trejo, 2012). Su deficiencia provoca reducciones severas en el crecimiento de un cultivo, básicamente por una menor tasa de crecimiento y de expansión foliar que reducen la captación de la radiación fotosintéticamente activa (Torres, 2010). Diversos

autores señalan que el aumento de la fertilización nitrogenada produce un incremento en el rendimiento y en el contenido proteico del grano de maíz (Taye *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2011).

El fósforo (P) forma parte de los ácidos nucleicos y participa en la síntesis de proteínas. Como constituyente del ATP (adenosín trifosfato) y de muchas coenzimas (NAD, FAD), interviene en todos los procesos metabólicos de transferencia de energía. Además, se encuentra, como constituyente de nucleoproteínas, y participa también en la división celular y en la transferencia de las características hereditarias por los cromosomas como constituyente del DNA y RNA, en la fotosíntesis, la glucólisis, el ciclo de Krebs, la β -oxidación, la oxidación directa de la glucosa y la descomposición de los carbohidratos (reacciones de carga) (Alcántar y Trejo, 2012). La aplicación de una dosis más alta de P mejora la emergencia de las plántulas a través de su efecto en el desarrollo de la raíz, y por lo tanto reduce los días de floración a madurez, y también aumenta el rendimiento de grano del maíz. La biomasa y los rendimientos de grano del maíz aumentaron con la aplicación de niveles crecientes de fertilizante P, y de igual manera se incrementó la absorción de nitrato del suelo y potasio por la planta de maíz (Ayub *et al.*, 2002).

El potasio (K) desempeña múltiples funciones en la activación de enzimas celulares, síntesis de proteínas, almidón, celulosa y vitaminas, resistencia al estrés abiótico y biótico, mejora de la eficiencia de uso de N y P, y la productividad y calidad de los productos agrícolas (Epstein y Bloom, 2005). El K es activador de más de 50 enzimas del metabolismo de carbohidratos y proteínas, participa en el equilibrio iónico y en la regulación osmótica (Alcántar y Trejo, 2012). El uso de fertilizantes con K es benéfico para mejorar los componentes de crecimiento y rendimiento de campo de los cultivos en condiciones de estrés por escasez de humedad en climas semiáridos, mejorando las características de crecimiento del

maíz, aumentando el rendimiento y los componentes del rendimiento, así como los ingresos de los agricultores en condiciones de riego limitadas.

Uno de los métodos utilizados para generar recomendaciones de fertilización para los cultivos es el de balance nutrimental, basado en que la dosis de fertilización depende de la demanda del nutrimento por el cultivo, el suministro del nutrimento por el suelo y la eficiencia de recuperación del nutrimento aplicado como fertilizante. Este método requiere de menos recursos y tiempo para su implementación, lo cual representa ventaja en relación con aquellos métodos basados en el método de campo, que requieren experimentación de campo, de análisis de laboratorio costosos y de plazos relativamente largos para alcanzar una aproximación aceptable a las dosis de fertilización, sin que posteriormente pueda haber ajustes de las mismas ante variaciones de los contenidos nutrimentales del suelo (Volke *et al.*, 1998).

El modelo conceptual simplificado para el cálculo de la fertilización basado en el método del balance nutrimental, es el siguiente:

$$\text{Dosis del fertilizante} = \frac{\text{Demanda del nutrimento por el cultivo} - \text{Suministro del nutrimento por el suelo}}{\text{Eficiencia de recuperación del fertilizante}}$$

La demanda de un nutrimento por un cultivo depende de la producción de biomasa y la concentración del nutrimento en la planta. La concentración mínima de un nutrimento en la planta, para alcanzar el rendimiento máximo posible en una condición dada, aunque varía entre las distintas partes de ella, es relativamente constante a la madurez fisiológica si se considera la biomasa aérea en conjunto; a esta concentración se le llama requerimiento interno (Greenwood, 1983). La producción de biomasa se puede estimar en la práctica a partir de la producción de la porción de interés económico (grano, biomasa aérea, fruto) y del índice de

cosecha, dado por la relación entre el producto de interés y la biomasa total producida (Etchevers *et al.*, 1991).

El suministro del suelo tiene relación, por un lado, con la disponibilidad de un nutrimento y por otro con la eficiencia de la planta para absorberlo, por lo cual la capacidad del suelo para suministrar nutrimentos depende de distintos factores del suelo, clima, manejo previo y del cultivo, según el elemento de que se trate. Así, para el N el suministro depende de la cantidad, calidad y manejo previo de los residuos y factores del suelo y clima que afectan la mineralización de la materia orgánica del suelo, y de la profundidad del sistema radical. Para el P, el suministro depende de la capacidad de adsorción de este elemento en el suelo, de las fertilizaciones previas que condicionan su disponibilidad y la densidad del sistema radical. Para el K, el suministro depende de la capacidad de amortiguamiento de K por el suelo, determinada por el tipo y contenido de arcilla, del grado de saturación de este elemento del complejo de intercambio y de la densidad del sistema radical (Rodríguez, 1990).

La eficiencia de recuperación del fertilizante depende de factores de planta, suelo y clima, del régimen hídrico y de las características (fuente, solubilidad y forma) y manejo (método y oportunidad de aplicación) del fertilizante, y presenta variaciones propias entre nutrimentos (Rodríguez, 1990).

Un enfoque nuevo e innovador para las prácticas de manejo de los fertilizantes es el concepto de los Cuatro Requisitos del Manejo Responsable de Nutrientes (4R), este enfoque considera dimensiones económicas, sociales y ambientales del manejo de nutrientes y es esencial para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El concepto es simple, esto es aplicar la fuente correcta de nutrientes, en la dosis, momento y lugar correcto de aplicación; sin embargo, su implementación necesita de un amplio conocimiento y es específico para cada sitio. Cuando se toman las decisiones correctas con respecto a las 4R se obtienen muchos

beneficios, entre ellos destacan: un mejor crecimiento de los cultivos, menor pérdida de nutrientes hacia el medio ambiente mejor protección de los espacios naturales y la vida silvestre (IPNI, 2019).

El fertilizante nitrogenado agregado al suelo es susceptible a una variedad de transformaciones químicas y microbianas que lo hacen difícil de manejar; las fuentes deben seleccionarse en función de las propiedades del suelo, las necesidades del cultivo y las posibles pérdidas en el agua o la atmósfera. En este caso, los elementos a considerar son: la lixiviación, que depende de la capacidad de retención de humedad del suelo, la profundidad del sistema radical y la precipitación; la desnitrificación (transformación de N nítrico en óxido nitroso), según la permeabilidad y drenaje del suelo y la temperatura; y la volatilización, para el caso de algunos fertilizantes como la urea o el amoníaco, cuando se aplican muy superficialmente sin cubrir adecuadamente, o en suelos con altos contenidos de carbonatos solubles. (IPNI, 2019; Volke *et al.*, 1998).

En el caso del P, los componentes asociados con el suelo que más influye en la eficiencia de uso de este elemento son el pH y las reacciones rápidas y lentas de adsorción de los iones fosfatados por los materiales coloidales del suelo. En suelos con pH ácido se produce la precipitación de fosfatos de Al y Fe, altamente insolubles, lo que conduce a concentraciones muy bajas de fosfatos en el suelo; la presencia en suelos de hidróxidos de Al favorece la retención de P en su superficie, disminuyendo su disponibilidad, el ion fosfato queda retenido en las superficies de óxidos e hidróxidos de hierro, también se produce la precipitación de los iones fosfatos y férricos, dando lugar a fosfatos de Fe de insolubilidad muy elevada, las interacciones entre estos dos elementos se pueden explicar cómo una reacción de precipitación de fosfato férrico externamente a la superficie radicular. En suelos alcalinos la reacción que predomina es con el Ca, esta interacción se debe fundamentalmente a la formación de fosfatos

de Ca de muy distintas solubilidades a la retención de P en las superficies de carbonato cálcico. La máxima disponibilidad de P se da en rangos de pH de 6 a 7 favoreciendo la presencia de los ortofosfatos primarios y secundarios. El factor de la planta que más se relaciona con la eficiencia de recuperación del fertilizante es la absorción del cultivo, la cual es función de la densidad de raíces, y del factor manejo, representado por la forma de aplicación del fertilizante (profundidad de aplicación, método de aplicación: al voleo, mateado, chorrillo, cubierto, descubierto, etc.) (Volke *et al.*, 1998; Fernández, 2007).

En el K, los aspectos del suelo que influyen en la eficiencia de uso son el tipo y contenido de arcilla, y el grado de saturación con K, y el factor de la planta que se relaciona con la eficiencia de recuperación del fertilizante es la eficiencia de absorción del cultivo, que es función de la densidad radical (Volke *et al.*, 1998).

La eficiencia de recuperación del fertilizante por un cultivo puede ser determinada en condiciones de suelo, clima y régimen hídrico similares, pero a nivel parcelario, si se desea una mayor precisión habrá que conocer o estimar las condiciones particulares relativas a los factores que la afectan (Volke *et al.*, 1998).

Niveles crecientes de N y P aplicados en el suelo, bajo diferentes condiciones de manejo y suelos incrementan el rendimiento de grano, biomasa aérea, número de granos por mazorca y altura de la planta del maíz y afectan significativamente el índice de cosecha (Taye *et al.*, 2015). La sinergia entre distintos nutrientes tiene un papel clave ya que ha encontrado que el rendimiento de grano bajo fertilización con N-P-K se incrementó en un 21% en trigo y en 44% promedio en maíz en comparación con la fertilización N-P (Zhang *et al.*, 2011).

2.6 Calidad del grano de maíz

La calidad implica la sanidad del grano (calidad extrínseca) y la composición física, que determina la textura y dureza, composición química (calidad intrínseca), que define el valor nutricional y las propiedades tecnológicas de procesamiento. De igual forma, cuando el grano se destina para consumo humano, la calidad también define las preferencias del consumidor. Para el caso del maíz, en países como México, la demanda de calidad del grano es grandemente influenciada por aspectos socioculturales que hacen del maíz parte esencial de su alimentación, dieta, cultura y religión. Dada la diversidad genética y cultural del maíz en México, existen en el país más de 600 platillos derivados de este cultivo, utilizándose razas nativas específicas o variedades con propiedades de calidad ya conocidas y específicas para diferentes productos alimenticios (Palacios, 2017).

2.6.1 Calidad extrínseca

Dentro de las características de calidad extrínseca se incluye:

- humedad del grano,
- integridad del grano (granos dañados, manchados, quebrados),
- presencia de impurezas,
- inocuidad (hongos o toxinas, principalmente).

2.6.2 Calidad intrínseca

Las características que se incluyen dentro de calidad intrínseca son:

- dureza de grano,

- color,
- tamaño y forma,
- contenido de proteína, grasa, almidón, carotenos y otros compuestos nutricionales.

2.6.2.1 Dureza del grano

La dureza del grano está relacionada con el peso hectolítrico e índice de flotación. Ambas características se correlacionan de manera inversa, mientras mayor peso hectolítrico tenga un maíz, será más duro y su índice de flotación será menor (Salinas *et al.*, 2010). Figueroa *et al.* (2013) puntualizan que el endospermo es el componente principal del grano que contribuye de manera importante en su dureza. La dureza del grano de maíz se define como la fuerza necesaria para romperlo y contribuye a otorgarle resistencia mecánica, propiedad deseable para mantener su integridad durante las operaciones de cosecha y postcosecha; sin embargo, también es el parámetro que determina esencialmente su capacidad para absorber y retener agua durante las diferentes etapas del proceso de cocción, especialmente durante la nixtamalización (Watson, 2003). Los maíces denominados suaves se hidratan más que los duros, es decir, absorben mayor cantidad de agua debido a que los gránulos de almidón son más fácilmente alcanzados por el líquido (Salinas y Aguilar, 2010).

La dureza está determinada por la estructura del grano, especialmente por la relación entre el endospermo vítreo y el harinoso. El maíz con endospermo vítreo, así como las variedades de maíz cristalino y reventador, tienen granos duros, en tanto que las variedades de maíz harinosas tienen granos blandos (Véles, 2004). De acuerdo con Robutti *et al.* (2000), la industria de la molienda seca requiere materia prima de grano duro o muy duro, para obtener fracciones de los tamaños adecuados a las distintas aplicaciones. La industria tortillera necesita conocer este parámetro para dar el tiempo de cocción adecuado al maíz al momento de nixtamalizar y

prefiere granos de intermedios a duros (Salinas *et al.*, 2010). Otras industrias y mercados buscan diferentes características de dureza y otros parámetros físicos para la elaboración de alimentos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características físicas del grano de maíz deseadas según su uso.

Uso	Características físicas del grano
Tortillas	Granos duros o semiduros. Valores intermedios-altos de peso de cien granos. Valores intermedios-bajos de peso específico (Peso hectolítrico). Valores altos de capacidad de absorción de agua, alto rendimiento de tortilla, baja pérdida de peso y baja resistencia al corte.
Atoles	Granos muy suaves y harinosos (con alto porcentaje de endospermo suave), lo que contribuye al desarrollo de viscosidad. Valores altos de peso de cien granos. Valores bajos de peso específico. Valores altos de capacidad de absorción de agua.
Palomitas	Granos pequeños, cristalinos, muy duros y con altos valores de peso específico. Valores bajos de capacidad de absorción de agua. Valores altos de volumen de expansión. Tiempos cortos de reventado.
Pinoles	Granos de baja dureza. Valores intermedios de peso específico y peso de cien granos. Valores bajos de capacidad de absorción de agua.
Pozoles	Granos suaves y harinosos (con alto porcentaje de endospermo suave), de preferencia grandes. Valores altos de peso de cien granos. Valores bajos de peso específico. Valores altos de capacidad de absorción de agua. Tiempos cortos de cocción para el reventado del grano.

Fuente: Fernández (2013), adaptado por Palacios (2017).

Como se mencionó anteriormente el índice de flotación y el peso hectolítrico son metodologías que sirven para determinar la dureza de todo tipo de grano de maíz, permitiendo su clasificación en materiales muy suaves, suaves, intermedios, duros y muy duros, asignando un tiempo de cocción durante el proceso de nixtamalización en función de dicha dureza (NMX-FF-034/1-SCFI- 2002).

Índice de flotación

El índice de flotación (IF) se basa en el número de granos que flotan en una solución de referencia, y depende de la densidad de estos con respecto a la densidad de la solución de nitrato

o azúcar, por lo que entre más duro sea el tipo de maíz menor es el valor de IF. Dado que el porcentaje de humedad de las muestras influye significativamente en el resultado, se recomienda que sea homogénea entre las muestras a evaluar (aproximadamente 12 %) (Salinas y Vázquez, 2006). En el Cuadro 6 se muestra la clasificación de la dureza del grano a partir del IF.

Cuadro 6. Clasificación de la dureza del grano de maíz en relación con el índice de flotación.

Número de granos flotantes	Dureza del grano
0 – 12	Muy duro
13 – 37	Duro
38 – 62	Intermedio
63 – 87	Suave
88 - 100	Muy suave

Fuente: Salinas y Vázquez (2006).

Peso hectolítrico

De acuerdo con Mauricio *et al.* (2004) el peso hectolítrico (PH) se considera como la densidad aparente del grano, la cual está relacionada con su dureza. Su determinación consiste en determinar el peso del grano contenido en un volumen de un litro (Salinas y Vázquez, 2006).

Para el caso de maíz blanco en la elaboración de tortillas y productos nixtamalizados de calidad comercial (NMX-FF-034/1-SCFI-2002), se considera que el grano debe tener una densidad mínima de 74 kg hL⁻¹, lo cual lo clasificaría como de dureza intermedia según resultados reportados en la bibliografía (Salinas y Aguilar, 2010). En el Cuadro 7 se presenta la clasificación de la dureza del grano de maíz en relación con el PH.

Cuadro 7. Clasificación de la dureza del grano en relación a su peso hectolítrico.

Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Dureza del grano
≥ 78	Duro
74 -75	Intermedio
≤ 73	Suave

Fuente: Salinas y Vázquez (2006).

2.6.2.2 Tamaño y forma del grano

Los granos de maíz varían en forma y tamaño debido a diferencias genotípicas y/o a la posición del grano en la mazorca. Esta heterogeneidad se puede explicar por la competencia existente durante el desarrollo del grano o la susceptibilidad al estrés debido a una posición desfavorable en la mazorca (Kim *et al.*, 2002). Los factores ambientales también influyen en esta característica, en especial la temperatura, ya que temperaturas altas aceleran el crecimiento del grano, pero disminuyen el tiempo de llenado del mismo y, por tanto, disminuyen también su peso y tamaño (Vázquez *et al.*, 2012). El tamaño de grano es una variable de interés para el procesamiento, debido al impacto que esto tiene en el grado de cocimiento y absorción de agua. Granos de una misma dureza, aunque de tamaño grande, requieren un menor cocimiento que granos pequeños en el mismo tiempo. Los industriales de la masa y la tortilla requieren maíces con una uniformidad de tamaño y forma de grano de al menos 85 % para que el cocimiento pueda ser uniforme (Salinas y Vázquez, 2006). La industria de harina nixtamalizada requiere maíces de grano intermedio, en tanto que la industria de la masa y tortilla se favorece también con granos de este tamaño o menores, que se hidratan más fácilmente que los grandes y favorecen el rendimiento de los productos que comercializan que son de humedad elevada (Salinas *et al.*, 2010).

Peso de cien granos

El peso de 100 granos (PCG) es un indicador del tamaño del grano, característica importante para los productores de harina porque estos granos contienen mayor proporción de endospermo que los pequeños, de modo que rinden más harina (Mauricio *et al.*, 2004).

De acuerdo con Salinas y Vázquez (2006), los granos pueden clasificarse según el PCG, como se indica en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Clasificación del tamaño del grano de acuerdo al peso de 100 granos.

Peso de 100 granos (g)	Tamaño
> 38	Grandes
33 -38	Medianos
< 33	Pequeños

Fuente: Salinas y Vázquez (2006).

2.6.2.3 Color

El color del grano de maíz varía ampliamente entre genotipos, y aunque no se considera una propiedad importante para su uso alimentario, influye considerablemente en la preferencia del consumidor (Mauricio *et al.*, 2004; Aragón *et al.*, 2012). Los maíces más comunes son de color blanco; la diferencia con los maíces de color (amarillos, rojos y azules) es que estos últimos tienen mayor cantidad de antocianinas, se asocian con mayor cantidad de antioxidantes y una serie de fitoquímicos que le dan mayor valor nutricional y una amplia aceptación por los agricultores que lo utilizan para fines muy específicos, como desarrollar maíz para pozole, pinole, atole, comer en elote, etcétera (de León, 2018).

Los granos con alto valor agregado son los que presentan características especiales de calidad que aumentan el beneficio para el usuario (Gómez *et al.*, 2006). El maíz azul, como fuente de pigmentos (antocianidinas) y antioxidantes naturales, muy apreciado para hacer tortillas, tostadas y botanas (Salinas *et al.*, 2007; de la Parra *et al.*, 2007); mientras que el

blanco, contiene antioxidantes naturales (del Pozo *et al.*, 2006; Ruiz *et al.*, 2008); los rojos se utilizan para consumirse en fresco porque tiene un sabor dulce, en elote o en ensalada (de León 2018).

Para el consumidor, el primer contacto que se tiene con un producto es visual, y a partir de ese momento es cuando se decide si será consumido o por alguna razón no cuenta con las características suficientes y, por lo tanto, será descartado; es por eso que la estandarización de color en un proceso, así como en la materia prima, es importante para que por medio de ellos se pueda asegurar la misma calidad colorimétrica en el producto final.

2.7 Características físicas del grano de maíz raza Zapalote Chico

La evaluación agromorfológica de algunas variables de calidad intrínseca del grano de 18 variedades de la raza Zapalote Chico realizada por Cabrera (2014), los resultados indicaron que: 1) el PH promedio fue de 75.6 kg hL^{-1} , ubicando al grano de estas variedades dentro de la categoría de maíces suaves; 2) el IF varió desde 46 a 85.7 %, determinando la dureza del grano como intermedia y suave; 3) el PCG promedio fue de 26.9 gramos, clasificándolos como granos pequeños; 4) los granos de maíces evaluados indican porcentajes de reflectancia entre 70.4 y 74.0, determinándose como granos de color blanco (Cuadro 9).

Cuadro 9. Características físicas de 18 variedades sobresalientes de la raza de maíz Zapalote Chico.

Variedad	PCG	PH	IF	Dureza †	Color
OAX-823	25.77	72.65	83.33	S	72.25
OAX-826	27.46	74.15	74.00	S	71.97
OAX-827	30.60	77.20	47.33	I	70.79
OAX-830	27.25	75.20	70.33	S	71.75
OAX-832	26.38	77.25	46.00	I	70.39
OAX-834	28.01	73.50	85.67	S	71.53
OAX-838	27.77	76.45	58.33	I	70.41
COL-29	28.54	73.70	81.00	S	71.24
COL-31	24.61	73.65	82.33	S	71.85
COL-32	26.65	74.20	71.33	S	74.05
COL-34	25.46	74.85	80.33	S	70.89
COL-36	26.03	76.05	62.33	I	71.48
COL-45	27.20	76.70	58.67	I	71.70
COL-51	27.23	78.65	49.67	I	71.59
COL-58	26.83	76.65	61.00	I	71.94
COL-62	29.91	78.65	46.33	I	71.18
COL-64	27.78	77.40	60.00	I	72.51
ZAP MOR	20.53	73.70	76.00	S	73.68

Fuente Cabrera (2014). Variedades marcadas en negritas corresponden a las utilizadas en la presente investigación; PCG = peso de 100 granos (g); PH = peso hectolítrico (kg hL⁻¹); IF = índice de flotación (%); † S; suave si IF = 63-87%; I; intermedio si IF = 38-62%; L = porcentaje de reflectancia del grano.

2.8 Efecto de la fertilización sobre las características del grano de maíz

El conocimiento, manejo y control parcial del ambiente de producción agrícola, en particular la nutrición de la planta, ha permitido aumentar la calidad nutritiva, extrínseca e intrínseca del grano de maíz. Zhan *et al.* (1993) encontraron que con la aplicación de N (0, 90 y 180 kg ha⁻¹) en el híbrido *cv* Funk 4023 hubo un incremento promedio de 8.4 % en la concentración de proteína en el grano, y un incremento significativo en el peso de 1000 granos

al pasar de 0 a 90 ha⁻¹, mientras que al incrementar la dosis de 90 a 180 kg ha⁻¹ no hubo efecto alguno en esta variable.

Oikeh *et al.* (1998), en cinco variedades mejoradas de maíz observaron que con la aplicación de N al suelo en dosis de 0, 30, 60 y 160 kg ha⁻¹ durante dos años, se incrementó la proteína de todos los cultivares; no así el IF que con 30 y 60 kg N ha⁻¹ incremento en los cultivares 8644-27 y TZPB-SR en comparación con las variedades SPL y TZB-SR, debido a un cambio en la proporción de endospermo harinoso. Así mismo, Tsai *et al.* (1992) al aplicar N al suelo en dosis de 0 a 402 kg ha⁻¹ a ocho híbridos de maíz durante tres años, encontraron que bajo condiciones deficientes de N se cosecharon granos menos traslúcidos y más susceptibles a daño mecánico durante su procesamiento. Además, se detectó que en el híbrido B73 x Mo17 el contenido de N en el grano incrementó de 11.4 a 16.8 g kg⁻¹ con la dosis más alta además los granos fueron más traslúcidos y vítreos.

Zepeda (2004), en un experimento con 10 híbridos de maíz, con tres dosis de N y dos de P en aplicaciones diarias a través del riego por goteo, encontró que el contenido de proteína y triptófano y componentes estructurales del grano no tuvieron respuesta significativa a la aplicación de P, mientras que el N incrementó 4 % el contenido de proteína del grano y disminuyó 10.01 % el IF de los maíces evaluados. El N disminuyó 16.9 % el porcentaje de endospermo harinoso y aumentó proporcionalmente el endospermo córneo. La aplicación de 300 kg N ha⁻¹ incrementó los porcentajes de pericarpio, germen y pérdida de sólidos en 6.2, 5.0 y 2.5 %, respectivamente, y disminuyó en 9.4 % el pericarpio retenido y 2.2 % la reflectancia del grano, e indirectamente favoreció el color blanco de la masa y la tortilla; también la aplicación de esta cantidad de N incrementó en uno de los híbridos el rendimiento de masa y de tortilla en 11.7 y 13.2 %, respectivamente.

III.OBJETIVO

Evaluar la respuesta de cuatro variedades nativas de la raza de maíz Zapalote Chico, a la fertilización de N, P y K, en relación con el rendimiento de grano y las dosis óptimas económicas, rendimiento de rastrojo e índice de cosecha, concentración nutrimental en el grano y rastrojo, y la calidad intrínseca del grano, en la localidad de San Pedro Comitancillo, Oaxaca.

IV.HIPOTESIS

Una fertilización adecuada de N, P y K en variedades nativas del maíz de la raza Zapalote Chico en la localidad de San Pedro Comitancillo, Oaxaca, incrementará el rendimiento de grano y rastrojo, en comparación con los rendimientos reportados para la región; de igual manera modificará la concentración nutrimental y la calidad intrínseca del grano.

V. MATERIALES Y METODOS

La investigación fue realizada en dos fases. La primera, consistió en un experimento de campo, el cual se llevó a cabo en la población de San Pedro Comitancillo, perteneciente a la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, para evaluar la respuesta de cuatro variedades nativas de maíz de la raza Zapalote Chico a la aplicación de distintos niveles de fertilización con N, P y K. La segunda fase fue realizada en laboratorio y consistió en: a) evaluar la calidad intrínseca (dureza, tamaño de grano y color) y; b) el contenido nutrimental del grano y rastrojo; las determinaciones de calidad se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); y los análisis del contenido nutrimental del grano y rastrojo fueron realizados en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo; ambas instituciones ubicadas en el municipio de Texcoco, Estado de México. El análisis de datos se realizó en el Campus Montecillo.

5.1. Localización y caracterización del sitio experimental

El sitio experimental correspondió a una parcela del Instituto Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo, que se encuentra entre las coordenadas 16° 29' N y 95° 09' O, con una altura sobre el nivel del mar de 70 m.

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), el clima corresponde a Aw_o (w)íg, cálido subhúmedo, el más seco de los sub-húmedos, con régimen de lluvias en verano. La precipitación media anual es de 600 mm, en el periodo de mayo a octubre, con patrones irregulares de precipitación. La temperatura media anual es de 27 °C. La evaporación media anual es de 2388 mm, que supera ampliamente a la precipitación. La humedad relativa media durante la época de lluvia es de 57 %, y en la época de seca de 34 %, siendo el promedio anual de 43.6 %. Los vientos dominantes son del noreste, los cuales se intensifican en los meses de octubre a marzo, alcanzando velocidades de 70 a 90 km/h, con periodos de cinco días de vientos fuertes y de dos a tres días de calma relativa. Los vientos que provienen del sureste se presentan en los meses de mayo a septiembre, y alcanzan velocidades de 20 a 30 km/h.

5.1.1. Muestreo y análisis de suelo

Con fines de caracterizar el sitio experimental se realizó un muestreo de suelos antes del establecimiento de la siembra, de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm de profundidad, mediante una estrategia de muestreo en zigzag integrando dos muestras compuestas a partir de ocho submuestras para cada una, abarcando la superficie del sitio experimental que correspondió a una hectárea.

Las propiedades del suelo analizadas fueron: textura, mediante el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1936); pH y conductividad eléctrica en relación 2:1 (Richards, 1990); contenido

de materia orgánica, por el método Walkley-Black (Jackson, 1976); nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico, por extracción con KCl 2N y destilación por arrastre de vapor (Bremner, 1965); fósforo extractable, por el método Olsen (Olsen y Dean, 1965); bases intercambiables, por el método $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (Chapman, 1965); la concentración de microelementos, por la metodología DTPA pH 7.3 (Jackson, 1976); y boro, por el método AS-15 (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Los análisis se realizaron en el laboratorio COLMERN, que pertenece al Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales, ubicado en la población de San Luis Huexotla, en el municipio de Texcoco, Estado de México.

En los Cuadros 10, 11 y 12 se presentan los resultados de los análisis químicos del suelo del sitio experimental. La textura fue franco arenosa (textura gruesa), el pH de 8.5 a 8.6 (alcalino), la CE de 0.11 a 0.13 dS m^{-1} (baja conductividad y libre de sales), el contenido de materia orgánica de 1.19 a 1.63 % (nivel medio), el nitrógeno inorgánico total de 21.4 a 33.3 mg kg^{-1} (nivel medio), el fósforo Olsen de 1.48 a 2.87 mg kg^{-1} (niveles muy bajos), el potasio de 80 a 144 mg kg^{-1} (moderadamente bajo), el calcio de 3728 hasta 5945 mg kg^{-1} (muy alto), el magnesio de 110 a 147 mg kg^{-1} (nivel medio), el hierro de 1.72 a 1.93 mg kg^{-1} (deficiente), el zinc de 0.26 a 0.36 mg kg^{-1} (deficiente); el cobre de 4.93 a 6.91 mg kg^{-1} (muy alto), el manganeso de 0.45 a 0.92 mg kg^{-1} (muy bajo), y el boro de 0.074 a 0.135 mg kg^{-1} (muy bajo) (Castellanos *et al.*, 2000; NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

Cuadro 10. Análisis de suelos de las muestras del sitio experimental (parcela del Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo).

Muestra	Profundidad cm	Propiedad					Textura
		pH	CE dS m ⁻¹	Arena -----	Arcilla % -----	Limo -----	
1	0 – 20	8.5	0.13	68	12	20	Franco arenosa
	20 – 40	8.6	0.11	68	14	18	Franco arenosa
2	0 – 20	8.5	0.11	64	14	22	Franco arenosa
	20 – 40	8.5	0.12	64	14	22	Francosa

CE = conductividad eléctrica.

Cuadro 11. Análisis de suelos (macronutrientes) de las muestras del sitio experimental (parcela del Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo).

Muestra	Profundidad cm	Propiedad							
		MO %	N-NH ₄ -----	N-NO ₃ -----	Ca -----	Mg -----	Na -----	K -----	P -----
1	0 – 20	1.38	5.5	23.8	5 348	118	22	126	2.87
	20 – 40	1.19	12.1	21.2	3 728	110	16	80	1.49
2	0 – 20	1.57	5.0	16.4	5 647	145	12	136	1.59
	20 – 40	1.63	10.2	21.1	5 945	147	10	144	1.98

MO = materia orgánica, N-NH₄ = nitrógeno amoniacal, N- NO₃ = nitrógeno nítrico.

Cuadro 12. Análisis de suelos (micronutrientes) de las muestras del sitio experimental (parcela del Tecnológico Nacional de México Campus Comitancillo).

Muestra	Profundidad cm	Propiedad				
		B -----	Fe -----	Cu -----	Mn -----	Zn -----
1	0 – 20	0.14	1.93	6.29	0.45	0.31
	20 – 40	0.07	1.72	4.93	0.94	0.26
2	0 – 20	0.09	1.86	6.90	0.42	0.36
	20 – 40	0.12	1.86	6.91	0.94	0.35

5.2. Factores de estudio

5.2.1. Material vegetal

El material genético que se utilizó consistió de cuatro variedades nativas de la raza de maíz Zapalote Chico (Cuadro 13), identificadas como sobresalientes en el trabajo “Variación en Morfología, Rendimiento y Calidad de Grano en Criollos Sobresalientes de Maíz de la Raza Zapalote Chico” realizado por Cabrera (2014).

Cuadro 13. Sitios de colecta y denominación de cuatro maíces nativos sobresalientes de la raza Zapalote Chico.

Colecta		Localidad	Nombre local
Identificación	Denominación		
V1	OAX-826	San Pedro Comitancillo	Zapalote Chico
V2	OAX-834	Santiago Laollaga	Zapalote
V3	COL-64	El Morro Mazatlán	Chiquito Morado
V4	ZAP-MOR	San Pedro Comitancillo	Zapalote Morado

Fuente: Cabrera (2014).

5.2.2. Diseño experimental y de tratamientos

Los factores en estudio variedades y niveles de N, P y K, se consideraron en un diseño experimental de parcelas divididas, en donde la parcela grande correspondió a las cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico, y las parcelas chicas a los tratamientos N, P y K de acuerdo a un diseño Plan Puebla I (Volke *et al.*, 2005), con un tratamiento adicional sin nitrógeno (Cuadro 14). Para las parcelas grandes se consideró un diseño en bloques completos, y las parcelas chicas se distribuyeron completamente al azar dentro de las parcelas grandes, y se consideraron cuatro repeticiones.

Cuadro 14. Lista de tratamientos de la parcela chica, de acuerdo a un diseño Plan Puebla I.

Tratamiento	Factores (kg ha ⁻¹)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	60	40	40
2	60	40	80
3	60	80	40
4	60	80	80
5	90	40	40
6	90	40	80
7	90	80	40
8	90	80	80
9	30	40	40
10	120	80	80
11	60	0	40
12	90	120	80
13	60	40	0
14	90	80	120
15	0	80	80

La unidad experimental fue de cuatro surcos a 0.60 m entre surcos y 5.5 m de largo y la parcela útil fueron los dos surcos centrales.

5.2.3. Espacio de exploración para los factores N, P y K

Se consideraron cuatro niveles de los factores N, P y K, que se establecieron con base en el requerimiento medio de estos elementos por el cultivo, que indicase el modelo de balance nutrimental (Rodríguez, 1990), que se basa en:

$$\text{Dosis del fertilizante} = \frac{\text{Demanda del nutrimento por el cultivo} - \text{Suministro del nutrimento por el suelo}}{\text{Eficiencia de recuperación del fertilizante}}$$

Con este modelo se estimaron las dosis de N, P y K, según los valores determinados y/o estimados para los submodelos que considera el modelo.

La demanda del cultivo requiere determinar un rendimiento esperado y la concentración del nutriente en la biomasa aérea y las raíces. El suministro del nutriente por el suelo requiere determinar su contenido en el suelo, y la estimación de aprovechamiento de dicho suministro. El aprovechamiento de un nutriente como fertilizante se maneja con base en estimaciones según el cultivo y las características físicas y químicas del suelo.

A partir de las dosis medias estimadas para N, P y K, se definieron los cuatro niveles de cada nutrimento, considerando valores inferiores y superiores de dichos niveles estimados, con la finalidad de evaluar la respuesta de las variedades a estos niveles de fertilización para poder obtener una dosis óptima.

5.2.4. Determinación de los niveles de fertilización

5.2.4.1. Estimación del rendimiento esperado

Cabrera *et al.* (2015) reportan que durante cuatro años de evaluación (2004, 2005, 2008 y 2010) el rendimiento promedio de grano para las variedades OAX-826, OAX-834, COL-64 y ZAP-MOR fue de 2.23 t ha⁻¹, obteniendo un rendimiento máximo experimental de 3.15 t ha⁻¹, con la dosis de fertilización 92 – 46 – 00, en la presente investigación se propuso incrementar el rendimiento de grano, por tanto, el rendimiento de grano a obtener se estableció en 3.5 t ha⁻¹.

5.2.4.2. Nitrógeno

Demanda de nitrógeno

La demanda de N se estableció en base al modelo obtenido por Volke *et al.* (1998) en la zona de Nochixtlán, Oaxaca, el cual se define como:

$$DN = 0.03857 Y - 0.03641 Y I + 9.548 R \quad (R^2 = 0.918)$$

Dónde: DN es el N extraído por el cultivo (kg N ha^{-1}), Y es el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), I es el índice de cosecha, y R es la incorporación de residuos de cosecha (sin, $R = 0$; con, $R = 1$).

Se consideró: $Y = 3\,010 \text{ kg ha}^{-1}$, debido a que al rendimiento esperado ($3\,500 \text{ kg ha}^{-1}$) se le restó el 14 % de humedad comercial, para llegar a peso seco; $I = 0.441$ (Volke *et al.*, 1998); $R = 0$, debido a que en la parcela experimental no se incorporaron los residuos de la cosecha anterior; por tanto:

$$DN = (0.03857 \times 3010) - (0.03641 \times 3010 \times 0.441) + 9.548 \times 0$$

$$DN = 67.77 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Suministro de nitrógeno orgánico del suelo

De acuerdo con Vanotti y Bundy (1994), la materia orgánica tiene una tasa de mineralización en promedio de 2 % anual y un contenido promedio de 5 % de N; considerando una densidad aparente del suelo de 1.4 g cm^{-3} (Rawls *et al.*, 1992), se calculó el peso del suelo a 20 cm de profundidad, ya que el maíz Zapalote Chico es una raza precoz y de porte pequeño, por tanto, sus raíces profundizan a no más de 30 cm. Con estos valores y el porcentaje promedio de materia orgánica igual a 1.48 % a 20 cm de profundidad, se estimó el suministro de N orgánico de la siguiente manera:

$$SN = \% \text{ MO} \times \text{PS} \times M \times \text{CN}$$

Dónde: SN es el suministro de N del suelo en kg N ha^{-1} , % MO es el porcentaje de materia orgánica del suelo; PS es el peso del suelo en kg ha^{-1} , M es la tasa de mineralización anual de la materia orgánica, dado que el Zapalote Chico es una raza precoz (85 – 90 días a cosecha) se

consideró una tasa de mineralización de 0.667 % que corresponde a un periodo de 4 meses; y CN es el contenido de N de la materia orgánica (5 %); por tanto:

$$SN = 0.0148 \times 2\,800\,000 \times 0.00667 \times 0.05$$

$$SN = 13.82 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Suministro de nitrógeno inorgánico del suelo

Con base en los resultados de laboratorio para N-NH₄ y N-NO₃ a 20 cm de profundidad y el peso del suelo, el suministro de N inorgánico se estimó como:

N-NH₄:

$$SNH_4 = CNH_4 \times PS \times \% N$$

Dónde: SNH₄ es el suministro de N amoniacal (kg N ha⁻¹), CNH₄ es la concentración de N amoniacal del suelo (mg kg⁻¹), PS es el peso del suelo a 20 cm de profundidad (kg ha⁻¹), considerando una densidad aparente de 1.4 g cm⁻³, y % N es el porcentaje de N que contiene el amonio (77.80 %).

$$SNH_4 = 5.25 \times 2\,800\,000 \times 0.778$$

$$SNH_4 = 11.44 \text{ kg N ha}^{-1}$$

N- NO₃:

$$SNO_3 = CNO_3 \times PS \times \% N$$

Dónde: SNO₃ es el suministro de N nítrico (kg N ha⁻¹), CNO₃ es la concentración de N nítrico del suelo (mg kg⁻¹), PS es el peso del suelo a 20 cm de profundidad (kg ha⁻¹),

considerando una densidad aparente de 1.4 g cm^{-3} , y % N es el porcentaje de N que contiene el nitrato (22.60 %).

$$SNO_3 = 20.1 \times 2\,800\,000 \times 0.226$$

$$SNO_3 = 12.72 \text{ kg N ha}^{-1}$$

N-inorgánico total:

$$SNI = SNH_4 + SNO_3$$

Dónde: SNI es el suministro de N inorgánico total (kg N ha^{-1}), SNH_4 es el suministro de N amoniacal (kg ha^{-1}), y SNO_3 es el suministro de N nítrico del suelo (kg ha^{-1}).

$$SNI = 11.44 + 12.72$$

$$SNI = 24.16 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Suministro total de nitrógeno del suelo

El suministro total de N corresponde a la suma del aporte de N orgánico más el del N inorgánico, esto es:

$$STN = SN + SNI$$

Dónde: STN es el suministro de total de N, en kg ha^{-1} ; SN es el aporte de N orgánico (kg ha^{-1}), y SNI es el suministro de N inorgánico (kg ha^{-1}).

$$STN = 13.82 + 24.16$$

$$STN = 37.98 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado

De acuerdo con Rodríguez (1987) la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado se puede considerar en promedio en 50 %.

Dosis de fertilizante nitrogenado

Con base en el método de balance nutrimental, el requerimiento de fertilizante nitrogenado se definió como:

$$DFN = (DN - SN) / EN$$

Dónde: DFN es la dosis de fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); DN es la demanda de N por el cultivo de maíz raza Zapalote Chico (kg ha^{-1}), SN es el suministro de N por el suelo (kg ha^{-1}), y EN es la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado.

$$DFN = (67.77 - 37.98) / 0.5$$

$$DFN = 59.58 \text{ kg N ha}^{-1} \approx 60 \text{ kg N ha}^{-1}$$

A partir de este valor se definió el espacio de exploración de 0 a 120 kg N ha^{-1} en incrementos constantes de 30 kg.

5.2.4.3. Fósforo

Demanda de fósforo

La demanda de P se estableció con base en el modelo obtenido por Volke *et al.* (1998), el cual se especifica en términos de rendimiento de grano, e interacciones de este con factores de suelo, clima y manejo, como:

$$DP = 0.005658 Y - 0.009432 Y I + 0.001889 Y PO^{0.25} - 0.0000007523 Y PO^{0.25} C^2$$

$$(R^2 = 0.874)$$

Dónde: DP es el P extraído por el cultivo (kg P ha⁻¹), Y es el rendimiento de grano (kg ha⁻¹), I es el índice de cosecha; PO es el fósforo Olsen del suelo (mg kg⁻¹), y C son los carbonatos del suelo, en porcentaje.

Se consideró: Y = 3 010 kg ha⁻¹, debido a que al rendimiento deseado (3 500 kg ha⁻¹) se le restó el 14 % de humedad comercial; I = 0.441 (Volke *et al.*, 1998); P = 2.23 mg kg⁻¹ (promedio de los resultados de P Olsen para la profundidad de 20 cm); C = 1 %; por tanto:

$$DP = (0.005658 \times 3,870) - (0.009432 \times 3,870 \times 0.441) + (0.001889 \times 3,870 \times 2.23^{0.25}) - (0.0000007523 \times 3,870 \times 2.23^{0.25} \times 1^2)$$

$$DP = 11.46 \text{ kg P ha}^{-1}$$

Suministro de fósforo

El suministro de P se estableció en base al modelo de Volke *et al.* (1998), que se expresa como:

$$SP = - 2.285 + 5.844 E + 6.160 NS^{0.5} PO^{0.25} - 5.621 NS PO^{0.25} - 0.0003518 PO^{0.25} C^2 - 0.8491 PO^{0.25} S + 0.4664 A^{0.5} \quad (R^2 = 0.812)$$

Dónde: SP es el suministro de P del suelo (kg P ha⁻¹), E es la aplicación de estiércol (sin, aplicación E = 0; con E = 1), NS es el N total del suelo (%), PO es el P Olsen del suelo (mg kg⁻¹), y C son los carbonatos del suelo (%); S es la sequía (inexistente, S = 0; moderada, S = 1; severa, S = 2); y A es la arena del suelo (%).

Se consideró: E = 0, debido a la nula aplicación de estiércol en la parcela experimental; NS = 0.086 % total a 20 cm de profundidad; P = 2.23 mg kg⁻¹ (promedio de los resultados de P Olsen para la profundidad de 20 cm); C = 1 %; S = 0, ya que el experimento se condujo en condiciones de riego; y A = 66 %, de acuerdo con los resultados de laboratorio; por tanto

$$\begin{aligned}
 SP &= -2.285 + (5.844 \times 0) + (6.160 \times 0.086^{0.5} \times 2.23^{0.25}) - (5.621 \times 0.086 \times 2.23^{0.25}) \\
 &\quad - (0.0003518 \times 2.23^{0.25} \times 1^2) - (0.8491 \times 2.23^{0.25} \times 0) + (0.4664 \times 66^{0.5}) \\
 SP &= 3.12 \text{ kg P ha}^{-1}
 \end{aligned}$$

Eficiencia de recuperación del fertilizante fosfatado

Se definió en base al modelo de Volke *et al.* (1998), el cual se expresa, exclusivamente por el rendimiento de grano del cultivo, definiéndose como:

$$EP = 0.0001071 * Y \qquad R^2 = 0.511$$

Dónde: EP es la eficiencia del fertilizante fosfatado; Y es el rendimiento de grano (kg ha⁻¹). Se consideró un rendimiento de grano de 3 010 kg ha⁻¹, por tanto:

$$EP = 0.0001071 \times 3\,010$$

$$EP = 0.32$$

Dosis de fertilizante fosfatado

Con base en el enfoque de balance nutricional multiplicado por el factor de conversión de P a P₂O₅, el requerimiento de fertilizante fosfatado, se calculó como:

$$DFP = [(DP - SP) / EP] \times FC$$

Dónde: DFP es la dosis de fertilizante fosfatado (kg ha⁻¹), DP es la demanda de P por el cultivo (kg ha⁻¹), SP es el suministro de P por el suelo (kg ha⁻¹) EP es la eficiencia de recuperación del fertilizante fosfatado; FC es el factor de conversión de P a P₂O₅.

$$DFP = [(11.46 - 3.12) / 0.32] \times 2.29$$

$$DFP = 59.68 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \approx 60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

A partir de este valor se definió el espacio de exploración para P de 0 a 120 kg N ha⁻¹.

5.2.4.4. Potasio

Los resultados de laboratorio indicaron que el K se encuentra en niveles moderadamente bajos en los primeros 20 cm de profundidad (126 – 136 mg kg⁻¹), y dado que el maíz es un cultivo de baja respuesta a K, se recomienda agregar de 30 a 60 kg K₂O ha⁻¹, para la obtención de rendimientos bajos y medios (Castellanos *et al.*, 2000), por lo cual se estableció el espacio de exploración para K en: 0 – 40 – 80 – 120 kg K₂O ha⁻¹.

5.3. Conducción del experimento

El experimento se realizó en el ciclo Primavera – Verano 2017.

5.3.1. Preparación del terreno

La preparación del terreno consistió en:

- **Barbecho.** Se realizó en forma mecanizada a una profundidad de 30 cm para voltear y aflojar la capa arable del suelo, e incorporar los residuos de maleza y rastrojo de la cosecha anterior.
- **Doble paso de rastra.** Se realizó mecánicamente y tuvo como función desmenuzar los terrones que se formaron con el barbecho, además de dejar suelto el suelo y formar una cama de siembra adecuada; un segundo paso de rastra se realizó en sentido cruzado al primero.
- **Surcado.** Los surcos se hicieron a una separación de 60 cm, realizado en forma mecanizada un día antes de la siembra.

5.3.2. Siembra

La siembra se hizo manualmente, colocando dos semillas por mata a una distancia de 50 cm entre matas (para obtener una densidad de población de 66 666 plantas ha⁻¹), y después se cubrieron con una capa de 2 a 3 cm de suelo; se realizó en seco el día 7 de abril del 2017, y se aplicó un riego de germinación al día siguiente, procurando que el agua se filtrara hasta la semilla.

5.3.3. Fertilización

La aplicación de fertilizante se realizó en dos ocasiones: la primera al momento de la siembra, aplicando el 50 % de la dosis de N y el 100 % del P y K, y la segunda al momento del aporque, aplicando el 50 % de N restante. Para N se utilizaron como fuentes sulfato de amonio (21 – 0 – 0) para los tratamientos 1, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13 y 14 y fosfato diamónico (18 – 46 – 0) en los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13; a pesar de que todos los tratamientos (a excepción del 15) requerían de la aplicación del N, algunos de estos tratamientos quedaron exentos de la fertilización con sulfato de amonio, debido a que el aporte de N del fosfato diamónico satisfacía el requerimiento de este nutrimento en la primera aplicación; para P se utilizó como fuente el fosfato diamónico en los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 y el superfosfato triple (0 – 46 – 0) únicamente en el tratamiento 15 (sin N); y, para K la fuente utilizada fue el cloruro de potasio (0 – 0 – 60) en todos los tratamientos a excepción del 13 que fue el testigo sin potasio. En la segunda aplicación de N se utilizó únicamente como fuente el sulfato de amonio (21 – 0 – 0) en todos los tratamientos, exceptuando el 15, sin N.

Los resultados de laboratorio clasificaron a la mayoría de los micronutrientes en niveles muy bajos, exceptuando al Cu que se encontró en niveles muy altos; debido a esto, se aplicó de manera adicional a cada tratamiento un complejo mineral de microelementos sulfatados con el

nombre comercial *Fermil Granulado*, a razón de 75 kg ha⁻¹ (dosis recomendada para gramíneas). A continuación, se presenta la composición química del *Fermil granulado*:

Elemento	Concentración %
Mg	8.0
Mn	1.2
Zn	3.1
Cu	0.1
Fe	2.1
Ca	3.8
B	0.4
S	9.2
Mo	0.01
Co	0.005
Ácidos fúlvicos	2.0

5.3.4. Aporque

El aporque se efectuó a los 30 días después de la emergencia, utilizando un arado impulsado por bueyes, denominado localmente *yunta*.

5.3.5. Control de malezas

El control de malezas se realizó de acuerdo con la presencia de ellas, combinado el control químico y manual; primero se realizó la aplicación de un herbicida preemergente cuatro días después de la siembra, utilizando el producto comercial Complot 90 a razón de 1 kg ha⁻¹; el control manual se realizó con machetes y azadones durante el desarrollo del cultivo.

5.3.6. Riego

El experimento se manejó bajo condiciones de riego rodado, aplicado periódicamente de acuerdo a las exigencias del cultivo, generalmente una vez a la semana, hasta que comenzaron las lluvias en la región.

5.3.7. Cosecha

La cosecha se realizó manualmente, el día 19 de julio del 2017, 110 días después de la siembra. Las mazorcas de cada una de las parcelas (tanto en los dos surcos centrales como en los surcos de bordo) fueron cosechadas, deshojadas y cuantificadas en campo, y fueron introducidas en bolsas de plástico previamente etiquetadas con el número de cada parcela para su traslado y almacenamiento.

5.4. Variables evaluadas

5.4.1. Rendimiento de grano

El rendimiento de grano (RG), se expresó en toneladas por hectárea, para lo cual se determinaron las siguientes variables:

Peso de campo (PC). Corresponde al peso total (kg) de las mazorcas previamente cosechadas, deshojadas y cuantificadas de cada parcela útil; los pesajes fueron realizados con una báscula digital Twiligh, modelo LT-GM5000.

Factor de desgrane (FD). En base a la forma, tamaño y sanidad, se seleccionaron cinco mazorcas representativas de cada parcela útil: estas fueron pesadas y registradas (P5M), posteriormente se desgranaron y se pesó únicamente el grano (PG5M), y con la siguiente fórmula se obtuvo el factor de desgrane:

$$FD = PG5M / P5M$$

Los pesajes fueron realizados con una báscula digital EatSmart Precision Pro.

Porcentaje de humedad en grano (PHG). Se determinó el porcentaje de humedad en grano de cada parcela útil, colocando el grano obtenido del desgrane de las cinco mazorcas

más representativas en un determinador de humedad de granos DRAMINSKI modelo DR-GMM.

Factor de humedad (FH). Se ajustó el porcentaje de humedad de grano (PHG) con respecto al porcentaje de humedad comercial (14 %), con la siguiente ecuación:

$$FH = (100 - PHG) / 86$$

Factor de superficie (FS). Es la relación de la superficie cosechada por parcela con respecto a una hectárea, expresado como:

$$FS = (10\ 000\ m^2) / (\text{superficie cosechada, en } m^2)$$

En este caso, la superficie cosechada fue el área de la parcela útil, la cual correspondió a dos surcos de 5.5 m de largo con la separación entre surcos de 0.60 m.

$$2 \times 0.60\ m \times 5.5\ m = 6.6\ m^2$$

El rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) se calculó como el peso total de las mazorcas por parcela útil (PC) multiplicado por el factor de desgrane (FD), el factor de humedad ajustado al nivel de humedad comercial del 14 % (FH), y el factor de conversión de la superficie cosechada respecto a una hectárea (FS), dividido entre 1,000 para convertir kilogramos a toneladas, como:

$$RG = (PC \times FD \times FH \times FS) / 1000$$

5.4.2. Rendimiento de rastrojo

En la mayoría de las unidades de producción agropecuaria del Istmo de Tehuantepec, el maíz es el cultivo principal, debido a que de él se obtienen grano para la alimentación humana y rastrojo para distintas especies de ganado. En las unidades de producción, el rastrojo puede llegar a ser tanto o más importante que el grano (Muñoz, 2006). A pesar de su relevancia, en

muchas ocasiones el rastrojo producido por los agricultores no es suficiente, por lo que no se cubren totalmente las necesidades de consumo del ganado durante la época de estiaje (Muñoz *et al.*, 2013), recurriendo a la compra de forraje en localidades aledañas y/o la renta de potreros, dándole un valor económico al rastrojo. Con base en los elementos anteriores y a la falta de información de producción de rastrojo y estimación del índice de cosecha de la raza de maíz Zapalote Chico, se evaluó el rendimiento de rastrojo en las cuatro variedades en estudio.

El rendimiento de rastrojo (RR) se expresó en toneladas por hectárea, con base en las siguientes variables:

Peso húmedo de rastrojo (PR). Se cortaron a ras de suelo todas las plantas correspondientes a la parcela útil de cada una de las unidades experimentales, y se pesaron (kg) con una báscula digital portátil WeiHeng; posteriormente se seleccionó una planta completa de cada una de las parcelas para después hacer una muestra compuesta de cuatro plantas por tratamiento para cada una de las cuatro variedades, las cuales fueron picadas y colocadas en una bolsa de papel (PHMR) previamente identificada, para determinar el porcentaje de humedad del rastrojo.

Porcentaje de humedad del rastrojo (PHR). Las muestras de rastrojo previamente colocadas en bolsas de papel (PHMR), se pesaron y se secaron por un periodo de 72 horas hasta llegar a peso constante; enseguida se pesaron nuevamente las muestras (PSMR); el porcentaje de humedad del rastrojo (PHR) se calculó con la siguiente fórmula:

$$PHR = [(PHMR - PSMR)] / PHMR$$

Peso seco del rastrojo (PSR). Con el peso húmedo del rastrojo de cada unidad experimental y el porcentaje de humedad de los tratamientos por variedad, se calculó el peso seco del rastrojo por cada unidad experimental, utilizando la siguiente fórmula:

$$PSR = PR \times (100 - PHR)$$

El rendimiento de rastrojo ($t \text{ ha}^{-1}$) se calculó como el peso seco total del rastrojo de la parcela (PSR) en kilogramos, multiplicado por el factor de conversión de la superficie cosechada respecto a una hectárea (FS), dividido entre 1000 para transformar en toneladas por hectárea, según se indica:

$$RR = (PSR \times FS) / 1000$$

5.4.3. Índice de cosecha

El índice de cosecha se determinó como:

$$IC = RG / (RG + RR)$$

Dónde: IC es el índice de cosecha; RG es el rendimiento de grano ($t \text{ ha}^{-1}$), a 14 % de humedad comercial; y RR es rendimiento de paja ($t \text{ ha}^{-1}$), en base seca.

5.4.4. Concentración de N, P y K en grano y rastrojo

En el grano. Se determinó en los tratamientos 1, 2, 3, 5, 9 13 y 15, en una muestra compuesta de las cuatro repeticiones para cada variedad, seleccionando una mazorca (completa y sana) de cada repetición, la cual se desgrano, y posteriormente fue secada, molida y tamizada (2 mm); los resultados se expresaron en $g \text{ kg}^{-1}$ con base en peso seco.

En el rastrojo. Se determinó en los tratamientos 1, 2, 3, 5, 9 13 y 15, en una muestra compuesta de las cuatro repeticiones para cada variedad, seleccionando una planta completa de cada repetición (incluyendo la espiga), la cual fue secada, molida y tamizada (2 mm) para su análisis en el laboratorio; los resultados se expresaron en $g \text{ kg}^{-1}$ con base en peso seco.

5.4.4.1. Nitrógeno

La determinación de la concentración de N en el tejido vegetal se realizó mediante el método Kjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999).

5.4.4.2. Fósforo

La concentración de P se realizó mediante la digestión húmeda del tejido vegetal, con una mezcla de ácidos nítrico y perclórico (HNO_3 : HClO_4 , 2:1) (Alcántar y Sandoval, 1999) y el P se midió con un equipo de espectrometría de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (ICP-AES; VARIAN[®], modelo Liberty II; Mulgrave, Australia),

5.4.4.3. Potasio

La determinación de K se realizó mediante la digestión húmeda del tejido vegetal, con una mezcla de ácidos nítrico y perclórico (HNO_3 : HClO_4 , 2:1) (Alcántar y Sandoval, 1999); su medición fue mediante flamometría con un equipo Corning 400-flame Photometer.

5.4.5. Porcentaje de proteína del grano

El porcentaje de proteína del grano se estimó, en los tratamientos 1, 2, 3, 5, 9, 13 y 15 como:

$$\% \text{ PG} = \text{CNG} \times 6.25$$

Dónde: % PG es el porcentaje de proteína en grano; CNG es la concentración de N en grano (%); y 6.25 es el factor de conversión de N a proteína (Sosa, 1981).

5.4.6. Variables de calidad intrínseca del grano

Las determinaciones se realizaron en los 15 tratamientos evaluados, en una muestra compuesta de las cuatro repeticiones para cada uno de los genotipos. La muestra estuvo compuesta por 250 g de grano sano de cada repetición. Se consideraron tres repeticiones para cada determinación.

5.4.6.1. Dureza del grano

Con base en los resultados de peso hectolítrico e índice de flotación, la dureza del grano se clasificó: muy suave, suave, intermedio, duro y muy duro (Salinas *et al.*, 2010).

Peso hectolítrico

La medición se realizó según el método 84 – 10 AACC utilizando una balanza para peso hectolítrico (American Association of Cereal Chemists, 2000). El resultado se expresó en kilogramos por hectolitro. De acuerdo con Salinas y Aguilar (2010), los maíces con un peso hectolítrico ≥ 78 kg hL⁻¹ se clasifican como duros; de 74 -75 kg hL⁻¹ son granos con dureza intermedia; y ≤ 73 kg hL⁻¹ se consideran granos con una dureza suave.

Índice de flotación

Se determinó por la relación del número de granos flotantes de un total de 100 (Nf), colocados en una solución de nitrato de sodio a una densidad de 1.25 g ml⁻¹ (Salinas *et al.*, 1992).

$$IF = Nf / 100$$

De acuerdo con Salinas y Vázquez (2006), la dureza del grano a partir del índice de flotación se puede clasificar en base a los siguientes valores: de 0 a 12 granos flotantes, maíces

muy duros; de 13 a 37, maíces duros; de 38 a 62, maíces con dureza intermedia; de 63 a 87, maíces suaves; y de 88 a 100, maíces muy suaves.

5.4.6.2. Color del grano

Se midió usando el colorímetro Mini Scan XE plus (Hunter Lab, modelo 45/0-L), que descompone el color en tres variables:

- Porcentaje de reflectancia (L): Es la luminosidad de la muestra que va de blanco, pasando por las tonalidades de grises hasta llegar a negro, siendo poco luminoso los valores cercanos a 0 (negro) y siendo luminoso los valores cercanos a 100 (blanco).

- La escala a: Indica las tonalidades de verde a rojo, donde valores negativos indican mayor tonalidad en verde, valores positivos indican mayor tonalidad en rojo.

- La variable b: Indica las tonalidades de azul a amarillo, donde valores negativos indican mayor tonalidad en azul, valores positivos indican mayor tonalidad en amarillo.

Con las variables a y b se calculó el ángulo del tono tinte o hue ($\text{hue} = \arctan a/b$), que es un valor angular, el cual indica el cuadrante correspondiente al color de la muestra en un sistema cartesiano, donde el eje X corresponde a los valores de a y el eje Y a los de b, y $0^\circ =$ color rojo-púrpura; $90^\circ =$ amarillo; $180^\circ =$ verde; y $270^\circ =$ azul (Mc Guire 1992).

5.4.6.3. Tamaño de grano

El tamaño del grano se clasificó en base al peso de 100 granos (PCG) como: granos grandes, cuando el $\text{PCG} \geq 38$ g; granos intermedios, con un PCG de 33 a 38 g; y granos pequeños, cuando el $\text{PCG} \leq 33$ g (Salinas y Vázquez, 2006).

Peso de cien granos (PCG)

Se seleccionaron 100 granos sanos de cada muestra y se registró su peso con ayuda de una balanza digital analítica.

5.5. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos realizados fueron de varianza y de regresión.

5.5.1. Análisis de varianza

El análisis de varianza se realizó para las variables de calidad intrínseca de grano: IF, PH, PCG y L; considerando que interesaba comparar las variedades para cada una de estas variables, con los tratamientos en conjunto, ya que el efecto de estos se analizó en el análisis de regresión. De esta manera, se realizó el análisis de varianza conjunto para las cuatro variedades de maíz raza Zapalote Chico y niveles de fertilización, con base en un diseño de parcelas divididas en fajas, donde la parcela grande correspondió a las variedades de maíz y los tratamientos de N, P y K a las parcelas chicas. En el Cuadro 15 se presenta el análisis de varianza para el caso de las variables de calidad intrínseca de grano y los correspondientes grados de libertad.

Cuadro 15. Análisis de varianza general en parcelas divididas para las variables IF, PH, PCG y L de cuatro variedades de maíz la raza Zapalote Chico.

Fuente de Variación	Grados de libertad
Repeticiones	2
Variedades	3
Error A	6
Tratamientos	14
Interacción Variedad x Tratamiento	42
Error B	112
Total	179

5.5.2. Análisis de regresión

El análisis de regresión se realizó con todas las variables determinadas y tuvo por finalidad observar el efecto de los tratamientos de N, P y K, sobre ellas dentro de cada variedad.

Para la especificación del modelo de regresión se procedió con base en las gráficas de la variable de respuesta vs. las dosis N, P, K según los tratamientos, y de acuerdo con la forma de la respuesta se especificó el modelo para cada factor.

Debido a que se observaron variaciones en la densidad de población, en relación con la planeada (66 666), se consideraron las gráficas de la variable respuesta vs. la densidad de población, de tal manera que, si se observaba alguna relación gráfica, se incluía este factor en el modelo según la forma de la relación.

En el modelo de regresión se consideraron las posibles interacciones entre los factores N, P y K, y en su caso, entre estos factores, las variedades y la densidad de población.

Las repeticiones se consideraron como variables auxiliares, según la modalidad:

Repetición	Variable auxiliar y su valor		
	R1	R2	R3
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	- 1	- 1	- 1

En el caso del análisis conjunto de las cuatro variedades, estas se consideraron como variables auxiliares, según la modalidad:

Variedad	Variable auxiliar y su valor		
	V2	V3	V4
1	0	0	0
2	-1	0	0
3	0	-1	0
4	0	0	-1

El análisis de regresión se realizó con el procedimiento PROC REG del programa SAS (Statistical Analysis System V9, 2002), y se consideró la opción R INFLUENCE para la detección de posibles puntos aberrantes con base en el estadístico R STUDENT y con un nivel de probabilidad de t de 0.01, para en su caso, proceder a su eliminación, y que los puntos aberrantes no constituyesen más del 10 % de la información.

La obtención del modelo final, se definió con base en el menor cuadrado medio del error del modelo y que las variables no presentaran signos contrarios a los esperados.

5.5.3. Análisis de optimización económica

La optimización económica se realizó con base en la ecuación de regresión conjunta para las cuatro variedades, del rendimiento de grano.

Con la ecuación de regresión, las dosis óptimas económicas de cada variedad se obtuvieron con un programa de cómputo SAS (Statistical Analysis System V9, 2002), que se alimentó con la ecuación de regresión, los costos fijos de producción, los costos variables referidos a las cantidades de N, P y K, y el precio medio del producto considerando el costo de la cosecha. La densidad de población se consideró como un costo fijo para una densidad que presentase la máxima respuesta (50 000 plantas ha⁻¹).

En la determinación de las dosis óptimas económicas se consideraron los criterios económicos de:

1. Maximización de los ingresos netos por superficie (hectárea), que consiste en maximizar la función de ingresos netos (IN) como:

$$IN = Y P_y - \left(CF + \sum_{i=1}^n X_i P_{xi} \right)$$

Donde Y es la función de producción, P_y es el precio del producto, CF es el costo fijo y X_i y P_{xi} es la cantidad de cada insumo y su precio, respectivamente, cuya sumatoria proporciona el costo variable.

2. Maximización de la relación beneficio/costo, que consiste en maximizar la relación beneficio/costo (RBC), obtenido como:

$$RBC = IN/CT$$

Donde IN es la función indicada en el criterio de maximización del ingreso neto, y CT es el costo total, que corresponde a la suma de los costos fijos y los costos variables de la misma función de IN.

La RBC definida de esta manera, indica la cantidad de IN que se obtiene por peso de costo total invertido en el proceso de producción, para obtener dicho ingreso neto.

Los costos fijos se calcularon para las actividades e insumos en el cultivo del maíz raza Zapalote Chico en la región del Istmo de Tehuantepec, según se indica en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Costos fijos de producción de maíz raza Zapalote Chico en el Istmo de Tehuantepec.

Actividad e insumo		Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
(pesos ha ⁻¹)					
Preparación del terreno	Barbecho	Unidad	1	1 200	1 200
	Rastra	Unidad	2	600	1 200
	Aporque	Unidad	1	600	600
Siembra	Sembradora	Unidad	1	650	650
	Semilla	L	32	10	320
	Fermil [†]	Bulto	1	250	250
Manejo agronómico	Riego de germinación	Jornal	2	150	300
		Costo del agua	ha	50	50
	Riego de auxilio (2)	Jornal	1	75	150
		Costo del agua	ha	50	100
Herbicida	Complot 90	Kg	1	190	190
	Aplicación	Jornal	1	150	150
Cosecha	Pisca	Jornal	8	150	1 200
	Desgrane	Costal	25	5	125
		Jornal	3	150	450
Total					6 935.00

[†] Fermil = complejo de microelementos sulfatados.

Los costos variables del N, P y K (Cuadro 17) se calcularon con base en las fuentes y oportunidad de aplicación, ya que la fertilización se dividió en dos partes; la primera aplicando el 50 % del N y el 100 % del P y K al momento de la siembra; y la segunda aplicando el 50 % restante del N al momento del aporque del cultivo. Para la primera aplicación, las fuentes de N fueron, el sulfato de amonio (21 – 0 – 0) para los tratamientos 1, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13 y 14 y fosfato diamónico (18 – 46 – 0) para los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, y 14. A pesar de que todos los tratamientos (a excepción del 15) requerían de la aplicación del N, algunos de estos tratamientos quedaron exentos de la fertilización con sulfato de amonio, debido a que el aporte de N del fosfato diamónico satisfacía el requerimiento de este nutrimento para la primera aplicación (50 %). En el caso del P se utilizó como fuente el fosfato diamónico en los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 y el superfosfato triple (0 – 46 –

0) únicamente en el tratamiento 15; y, para potasio la fuente utilizada fue el cloruro de potasio (0 – 0 – 60) que a excepción del tratamiento 13 que fue el testigo sin potasio. En la segunda aplicación de N se utilizó únicamente como fuente el sulfato de amonio (21 – 0 – 0) en todos los tratamientos, exceptuando el tratamiento 15 sin N.

En la presente investigación no se consideró el costo de transporte, debido a la cercanía con las bodegas comerciales, y el costo de aplicación está incluido en el concepto de la sembradora al momento de la siembra, ya que la mayoría de las sembradoras en la región cuentan con el depósito de fertilizantes.

Cuadro 17. Costo de los insumos N, P y K para la producción de maíz raza Zapalote Chico en el Istmo de Tehuantepec, en el ciclo agrícola P-V 2017.

Insumo	Costo pesos kg ⁻¹
Nitrógeno	18.00
Fosforo (P ₂ O ₅)	14.10
Potasio (K ₂ O)	11.00

El precio de venta del grano se consideró en 8 000 pesos por tonelada, debido a que en la región la comercialización del grano es por volumen, ya sea en litros, cuartillos (4 L), almos (16 L) o costales (64 L), y el precio por litro fluctúa entre 10 y 16 pesos, dependiendo la época del año y principalmente de la sequía que se presente.

El costo de cosecha fue de 1 775 pesos por hectárea, que se definió con base en el número de jornales que se ocupan para cosechar una hectárea de maíz en forma manual, que comúnmente se conoce como *pisca* y se realiza con canastos; y la experiencia regional menciona que 100 canastos de mazorcas corresponden a una tonelada de grano. Generalmente en la zona, ocho jornales cosechan 100 canastos de mazorcas y cuatro canastos de mazorcas corresponden a un costal de grano; por tanto, un promedio de 25 costales de grano corresponde

a una tonelada de grano; el costo promedio de los jornales es de 150 pesos, mientras que el costo de desgrane con maquinaria rentada es de 5 pesos por costal, empleándose tres jornales para esta actividad, de tal modo que:

$$\text{Costo de cosecha} = (11 \text{ jornales} \times 150 \text{ pesos}) + (25 \text{ costales} \times 5 \text{ pesos}) = 1,775 \text{ pesos.}$$

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Rendimiento de grano

6.1.1. Respuesta de las variedades a los factores N, P y K

Con base en que el objetivo de la investigación fue la comparación de las variedades de maíz raza Zapalote Chico, en términos de rendimiento de grano, se procedió a realizar un análisis de regresión que incluyese las variedades de maíz, los tratamientos de N, P, K y la densidad de población.

El modelo de regresión obtenido para el rendimiento de grano en función de las variedades, los factores N, P y K, y la densidad de población, fue el siguiente:

$$\text{RG} = - 0.533 - 0.370 \text{ V2} - 0.00755 \text{ V3} - 0.348 \text{ V4} + 0.00823 \text{ N} - 0.00003751 \text{ N}^2 + 0.00353\text{P} - 0.00002954 \text{ P}^2 + 0.00506 \text{ K} - 0.00004345 \text{ K}^2 + 0.00002227 \text{ D} + 0.000000000183 \text{ D}^2\text{V2} + 0.00001214 \text{ DV4}$$

$$(\text{Pr.F} = 0.0001, \text{CME} = 0.076, \text{CV} = 31.94 \%, \text{R}^2 = 0.659)$$

Dónde: RG = rendimiento de grano (t ha^{-1}); V2, V3, V4 = son variables auxiliares para las variedades con respecto a la variedad V1; N = nitrógeno aplicado (kg ha^{-1}); P = fósforo aplicado ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$); K = potasio aplicado ($\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$); D = densidad de población (miles de plantas por hectárea); Pr. F = probabilidad de F; CME = cuadrado medio del error; CV = coeficiente de variación; R^2 = coeficiente de determinación múltiple.

El rendimiento de grano fue afectado por las variedades, y positivamente por la aplicación de N, P y K, y la densidad de población, con una interacción positiva de esta con las variedades V2 y V4. Sin embargo, el modelo no permitió observar posibles interacciones entre las variedades y el N, P y K aplicados.

En la Figura 4 se presenta el rendimiento de grano estimado de las cuatro variedades en función del N, P y K aplicados con la máxima densidad de población observada de 50 000 plantas ha^{-1} , y de la densidad de población a cantidades no limitativas de N, P y K, para las cuatro variedades.

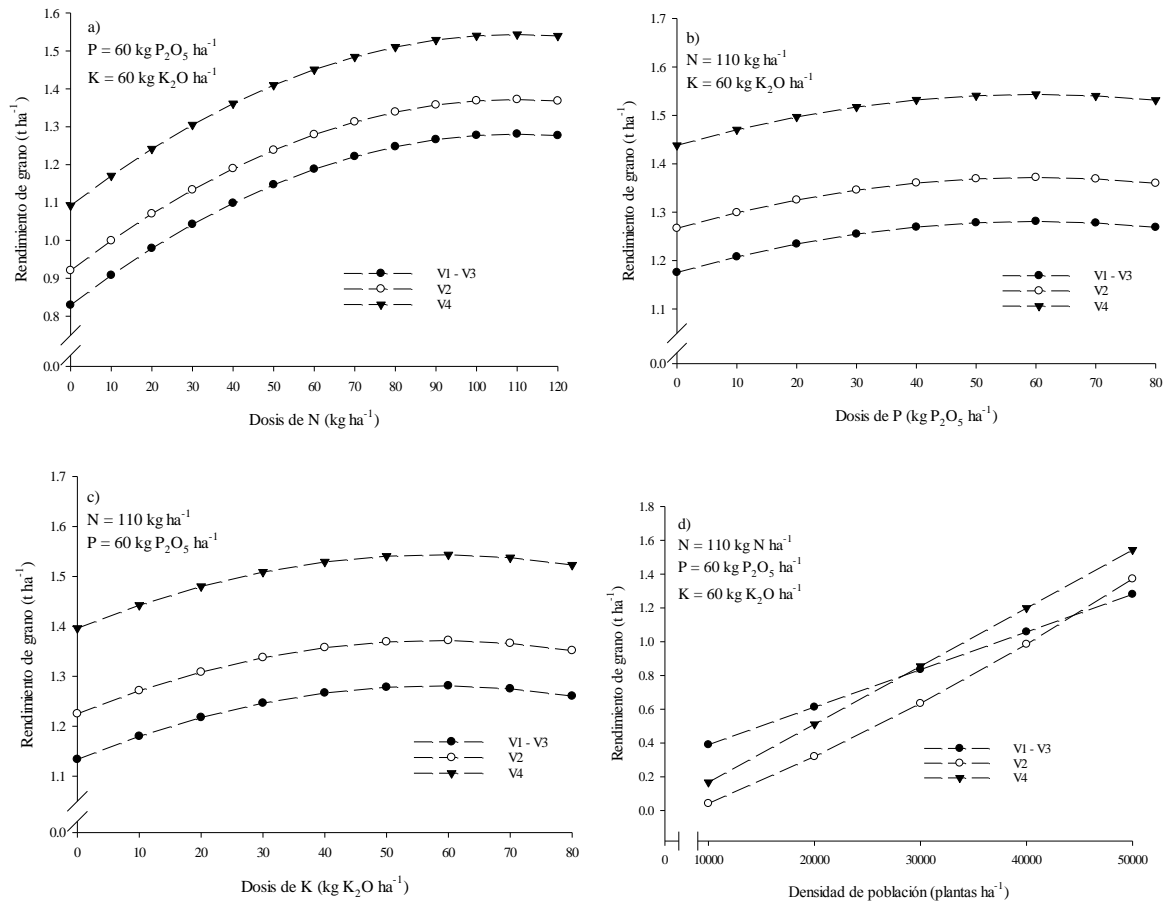


Figura 4. Rendimiento estimado de grano en función del N, P y K aplicados (a, b y c) y la densidad de población (d) para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Para las variedades, hubo un incremento de 0.09 t ha^{-1} de la variedad V2 y de 0.26 t ha^{-1} de la V4 respecto a la variedad V1, mientras que la variedad V3 presentó un menor rendimiento, de 0.0076 t ha^{-1} (no apreciables gráficamente) en relación a la variedad V1.

Para el N aplicado se observó respuesta hasta 110 kg N ha^{-1} , mientras que para el P y K hubo respuesta hasta 60 kg de P_2O_5 y K_2O , respectivamente. Para la densidad de población se presentó respuesta hasta la máxima densidad observada de $50\,000$ plantas ha^{-1} .

El efecto positivo del N se debe a que es esencial en el desarrollo de las plantas y en general, el suelo no tiene la capacidad suficiente de aportarlo en las cantidades requeridas por los cultivos. La respuesta del rendimiento a la aplicación de P y K puede estar relacionada con su baja concentración de ellos en el suelo, de 1.48 a $2.87 \text{ mg P kg}^{-1}$ y de 80 a 144 mg K kg^{-1} , respectivamente.

Los rendimientos de las cuatro variedades fueron bajos en comparación con el promedio regional (1.99 t ha^{-1}) reportado para condiciones de riego 2017 (SIAP, 2018), observándose como una causa de ello la baja densidad de población, de hasta $50\,000$ plantas ha^{-1} . La densidad de población del experimento se planeó en $66\,666$ plantas ha^{-1} , con base en que es la utilizada por los productores, aunque de manera experimental se ha llegado a usar $72\,800$ plantas ha^{-1} , reduciendo la distancia entre surcos a 0.5 m entre ellos (Cabrera, 2014).

Durante el desarrollo del experimento se perdieron plantas, debido a diversas condiciones:

- 1) excesiva humedad en el periodo de llenado de grano, causada por un periodo de lluvias extraordinarias durante los meses de mayo a junio;
- 2) junto con ello, aumentó de manera importante la presencia de malezas durante este periodo mencionado;
- 3) pérdidas de plantas por depredadores, como aves durante los primeros estados vegetativos de la planta VE y V1, y tlacuaches y perros de los estados V2 hasta V7; y,
- 4) de igual manera, hubo algunas pérdidas

al momento del aporque ya sea por cubrimiento de plantas o fuesen aplastadas por los bueyes de la yunta.

Sin embargo, según la tendencia de la respuesta a la densidad de población (Figura 4d), se puede observar que esta respuesta es mayor a la densidad planeada 66 666 plantas ha⁻¹, lo cual sería indicativo de que no se alcanzó la densidad de población máxima.

Otras posibles causas de los bajos rendimientos alcanzados pudo ser el pH alcalino del suelo (8.5) y la baja disponibilidad de microelementos, aunque estos fueron aplicados, tal vez no en una cantidad suficiente o su forma de aplicación no fue la correcta, debiéndose aplicar de manera foliar.

Para estos rendimientos limitativos, al menos por la densidad de población, los mayores rendimientos se observaron en la variedad V4 con 1.54 t ha⁻¹, seguido por la V2 con 1.37 t ha⁻¹, y los rendimientos más bajos se observaron en las variedades V1 y V3 con 1.28 y 1.27 t ha⁻¹, respectivamente, con aplicación de 110 – 60 – 60 y una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹.

6.1.2. Optimización económica

Los bajos rendimientos alcanzados para las cuatro variedades es probable que limitaron la repuesta a los factores N, P y K, de tal manera que las dosis óptimas económicas obtenidas pueden estar afectadas por estos bajos rendimientos.

El cálculo de las dosis óptimas económicas se hizo a la densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹ por ser la menos limitativa, con base en el modelo de regresión para el rendimiento de grano. En este modelo no se observaron interacciones entre las variedades y las dosis de N, P y K, las cuales, de existir, no se manifestaron debido al bajo nivel de los rendimientos observados. Debido a esto, las dosis óptimas económicas obtenidas fueron iguales en las cuatro

variedades; sin embargo, hubo diferencias en el rendimiento óptimo económico, en los ingresos netos y en la relación beneficio/costo entre las variedades.

En el Cuadro 18 se presentan las dosis óptimas económicas de N, P y K a una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹, el rendimiento óptimo económico, el ingreso neto y la relación beneficio/costo, para las cuatro variedades evaluadas.

Según lo señalado previamente, las dosis óptimas económicas fueron iguales para las cuatro variedades, de 80 kg N, 30 kg P₂O₅ y 40 kg K₂O por hectárea, y los rendimientos óptimos económicos fueron de 1.211, 1.299, 1.203 y 1.470 t ha⁻¹ para V1, V2, V3 y V4, respectivamente.

Cuadro 18. Análisis económico de cuatro variedades de maíz raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.

Variedad	DOE			DP	Rendimiento t ha ⁻¹	IN \$ ha ⁻¹	RBC
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
V1	80	30	40	50 000	1.211 b [†]	450.2	0.060
V2	80	30	40	50 000	1.299 b	1 150.2	0.154
V3	80	30	40	50 000	1.203 b	389.8	0.052
V4	80	30	40	50 000	1.470 a	2 522.2	0.338

DOE = Dosis óptima económica (kg ha⁻¹); DP = Densidad de población (miles de plantas ha⁻¹); IN = Ingreso neto; RBC = Relación beneficio costo; V1 = Variedad OAX-826; V2 = Variedad OAX-834; V3 = Variedad COL-64; V4 = Variedad ZAP-MOR; †: Medias con la misma letra en la columna no son estadísticamente diferentes (p =0.05).

Debido a estos bajos rendimientos, también resultaron bajos y muy bajos los ingresos netos y la relación beneficio/costo, de tal manera que, excepto para la V4, no resultaría aceptable para el productor usar la dosis óptima económica obtenida, excepto que se incrementen los rendimientos a través de, al menos, una mayor densidad de población.

Por ejemplo, considerando para la variedad V4 con rendimientos posibles de 2.5 y 3.0 t ha⁻¹, los valores de ingresos netos y la relación beneficio/costo se incrementarían a valores de 8 100 y 1.09, y de 11 212 y 1.50, respectivamente.

La dosis óptima económica de N y P obtenida es menor a la dosis utilizada regionalmente (92 – 46 – 00), además de que incluye el nutriente K, el cual no es utilizado por los productores de la región, bajo el supuesto de que los suelos son ricos en K; sin embargo, en el área de estudio el K se encontró en niveles moderadamente bajos de 80 a 144 mg K kg⁻¹.

6.2. Rendimiento de rastrojo

El modelo de regresión obtenido para el rendimiento de rastrojo en función de las variedades, las dosis de N, P y K, y la densidad de población, fue el siguiente:

$$RR = 0.09373 - 0.294 V2 - 0.0180 V3 - 0.385 V4 + 0.0000234 D + 0.0000000481 ND + 0.0000213 DV4.$$

$$(Pr.F = 0.0001, CME = 0.694, CV = 24.95 \%, R^2 = 0.735)$$

Dónde: RR = rendimiento de rastrojo (t ha⁻¹); V2, V3, V4 = son variables auxiliares para las variedades con respecto a la variedad V1; N = nitrógeno aplicado (kg ha⁻¹); D = densidad de población (miles de plantas por hectárea); Pr. F = probabilidad de F; CME = cuadrado medio del error; CV = coeficiente de variación; R² = coeficiente de determinación múltiple.

El modelo de regresión indica que el rendimiento de rastrojo fue afectado por las variedades, y de manera positiva por la densidad de población y el N aplicado en interacción positiva con la densidad de población, además de una interacción positiva entre la variedad V4 y la densidad de población. Por otra parte, el P y K aplicados no causaron efectos sobre el rendimiento de rastrojo.

En la Figura 5 se presenta el rendimiento de rastrojo estimado de las cuatro variedades en relación al N aplicado, con una densidad de 50 000 plantas ha⁻¹, y a la densidad de población con el valor máximo de N de 120 kg ha⁻¹.

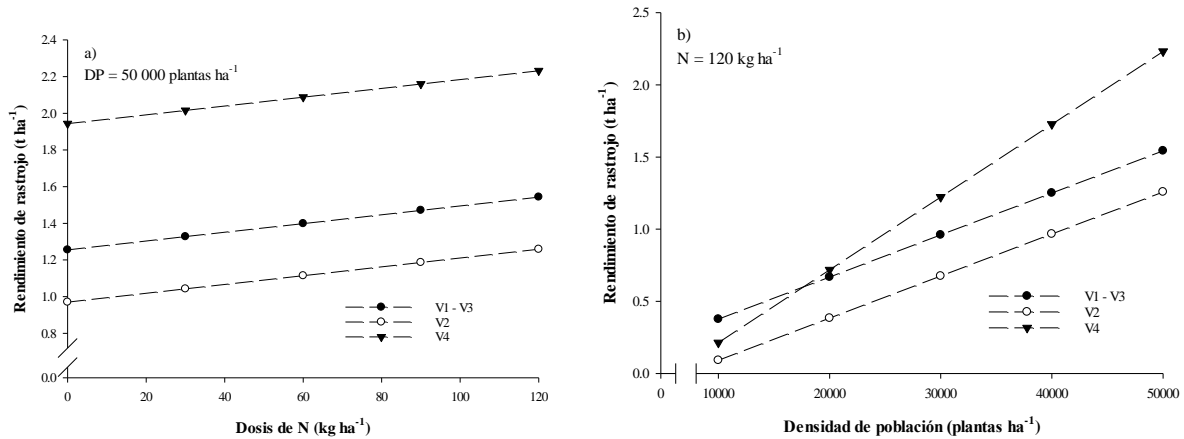


Figura 5. Rendimiento estimado de rastrojo en función del N aplicado (a) y la densidad de población (b) para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Con una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹, las variedades V1 y V3 tuvieron un rendimiento de rastrojo muy similar (diferencias no mayores a 18 kg), presentándose una disminución en el rendimiento de 0.294 t ha⁻¹ de V2 con respecto a V1; en contraste, la variedad V4 presentó los rendimientos de rastrojo más altos, de 0.680 y 0.386 t ha⁻¹ sobre las variedades V1 y V2, respectivamente (Figura 5a), lo que se presupone en esta variedad tuvo una mayor producción de hojas en comparación con las otras variedades.

Para el N aplicado se observó respuesta hasta 120 kg N ha⁻¹ para las cuatro variedades, con un incremento de 0.29 t ha⁻¹, similar para ellas puesto que no hubo interacción con el N aplicado.

Para la densidad de población se observó respuesta hasta más de 50 000 plantas ha⁻¹, similar a lo ocurrido con el rendimiento de grano, con una mayor respuesta para la variedad V4 (Figura 5b).

Esta alta respuesta del rendimiento de rastrojo a la densidad de población, por sobre 50 000 plantas ha⁻¹, sería un indicativo de que no se alcanzó la respuesta a la máxima densidad de población.

El bajo rendimiento de rastrojo de las cuatro variedades evaluadas probablemente tendría como posibles causas las mismas que afectaron los rendimientos de grano, independientemente del índice de cosecha que presenten.

La relevancia de la variedad V4 ZAP-MOR que produce más rastrojo es un indicativo de su potencial productivo aunado a la precocidad de esta variedad que permite al menos dos cosechas por año. Los resultados muestran que esta variedad podría ser una alternativa para satisfacer la falta de alimento para el ganado en las unidades de producción agropecuaria de la región, ya que en muchas ocasiones el rastrojo producido por el agricultor es insuficiente, existiendo un déficit en las necesidades de consumo de los rumiantes durante la parte final del otoño, el invierno y mediados de primavera.

6.3. Índice de cosecha

El modelo de regresión obtenido para el índice de cosecha en función de las variedades, las dosis de N, P y K, el rendimiento de grano y rastrojo, y la densidad de población, fue el siguiente:

$$IC = 0.0050 + 0.0275 V2 + 0.0392 V3 - 0.0504 V4 + 0.6403 Y^{0.5} - 0.2681 Y + 0.00207 N - 0.00001465 N^2 + 0.00162 P - 0.00001082 P^2$$

$$(Pr.F = 0.0001, CME = 0.0044, CV = 15.23 \%, R^2 = 0.478)$$

Dónde: IC = índice de cosecha; V2, V3, V4 = son variables auxiliares para las variedades con respecto a la variedad 1; N = nitrógeno aplicado (kg ha⁻¹); P = fósforo aplicado (kg P₂O₅)

ha⁻¹); Y = rendimiento de grano (t ha⁻¹); Pr. F = probabilidad de F; CME = cuadrado medio del error; CV = coeficiente de variación; R² = coeficiente de determinación múltiple.

El modelo de regresión indica que el índice de cosecha fue afectado por las variedades, y positivamente por el N, P y el rendimiento de grano. El K no causó efecto en el índice de cosecha.

En la Figura 6 se presenta el índice de cosecha estimado de las cuatro variedades en función del N y P aplicados, con un rendimiento de 1.43 t ha⁻¹. Para las variedades hubo un incremento en el índice de cosecha de 0.0275 de la variedad V2 sobre V1, de 0.0392 de V3 respecto a V1 y una disminución de 0.0504 de V4 en relación a V1. Para el N aplicado se observó respuesta hasta 71 kg N ha⁻¹ (Figura 6a), mientras que para el P hasta 75 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Figura 6b).

Los resultados mostraron que la aplicación de N y P probablemente tuvo un mayor impacto sobre el rendimiento de grano en comparación con el rastrojo, lo cual afectó positivamente el índice de cosecha.

Los mayores índices de cosecha estimados para cada variedad fueron: 0.52, 0.55, 0.56 y 0.47, respectivamente (Figura 6b). La variedad V4 presentó el índice de cosecha más bajo (0.47), lo que sugiere que en general, esta variedad destinó menos reservas a la producción de grano y favoreció la producción de follaje en comparación con las otras variedades, sin embargo, la variedad V4 presentó el mayor rendimiento de grano, lo cual supondría que tiene el potencial para ser cultivada con un doble propósito: la producción de grano y de rastrojo.

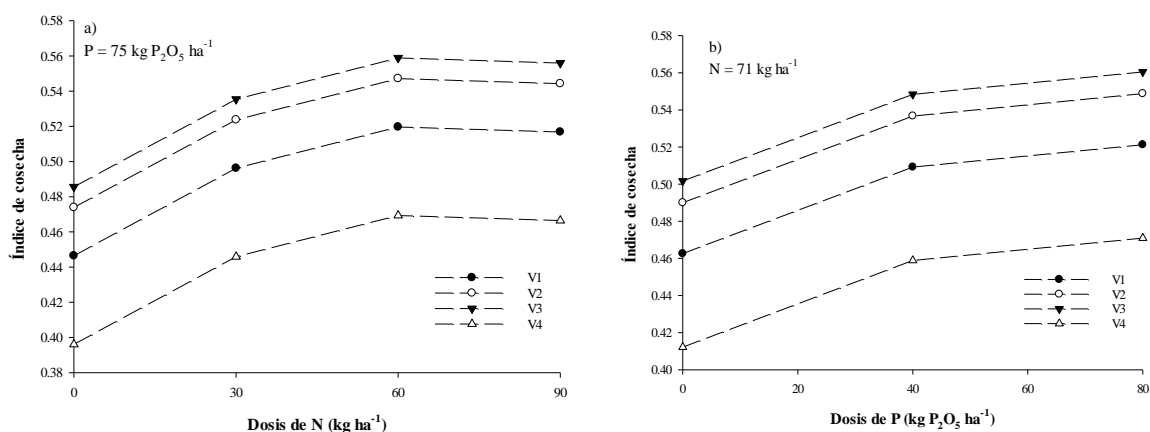


Figura 6. Índice de cosecha estimado en función del N (a) y P (b) aplicados con un rendimiento de grano de 1.43 t ha^{-1} , para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Los índices de cosecha obtenidos resultaron relativamente altos, en comparación con los reportados por Volke *et al.* (1998) en la zona de Nochixtlán, Oaxaca, para maíz de temporal, con valores de 0.32 a 0.44; y en el Valle de Puebla, con valores de 0.23 a 0.45, aunque se observaron valores de 0.48 en una variedad nativa. Los valores reportados en esta investigación también son mayores que los reportados para maíces nativos con valores de 0.20 a 0.44 en el estado de Puebla (Muñoz *et al.*, 2013).

6.4. Concentración nutrimental en el grano y rastrojo

6.4.1. Concentración nutrimental en grano

En el Cuadro 19 se presentan los modelos de regresión de las concentraciones de N, P y K, en el grano, en función de las dosis aplicadas de estos elementos y las variedades de maíz raza Zapalote Chico.

Cuadro 19. Modelos de regresión para las concentraciones de N, P y K, en el grano de cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.

Modelo de regresión	Pr.F	CME	CV	R ²
$\text{CNG} = 8.955 + 0.0915 \text{ N} - 0.000566 \text{ N}^2$	0.0001	0.876	7.899	0.645

$$\text{CPG} = 2.959 - 0.2229 V2 - 0.0453 V3 - 0.2400 V4 + 0.0562 N - 0.0003811 N^2 + 0.1592 P^{0.25} - 0.1798 K^{0.25} \quad 0.0237 \quad 0.1345 \quad 7.863 \quad 0.532$$

$$\text{CKG} = 5.364 - 1.2194 V2 + 0.08143 V3 + 0.2797 V4 + 0.0001 K \quad 0.102 \quad 5.879 \quad 0.801$$

CNG = concentración de N en el grano (g kg^{-1}), CPG = concentración de P en el grano (g kg^{-1}), CKG = concentración de K en el grano (g kg^{-1}), N = dosis de N (kg N ha^{-1}), P = dosis de P ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), K = dosis de K ($\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$), V2 = es una variable auxiliar para la variedad 2 con respecto a la variedad 1, V3 = es una variable auxiliar para la variedad 3 con respecto a la variedad 1, V4 = es una variable auxiliar para la variedad 4 con respecto a la variedad 1, Pr. F = probabilidad de F; CME = cuadrado medio del error; CV = coeficiente de variación (%); R^2 = coeficiente de determinación múltiple.

Para la concentración de N en el grano (CNG) se observó un efecto positivo del N aplicado, desde 8.99 g N kg^{-1} sin aplicación hasta un valor máximo de $12.65 \text{ g N kg}^{-1}$ con una aplicación de 80 kg N ha^{-1} , sin que se haya observado diferencias entre las variedades (Figura 7). Por otra parte, el P y K aplicados no causaron efecto en la concentración de N en el grano.

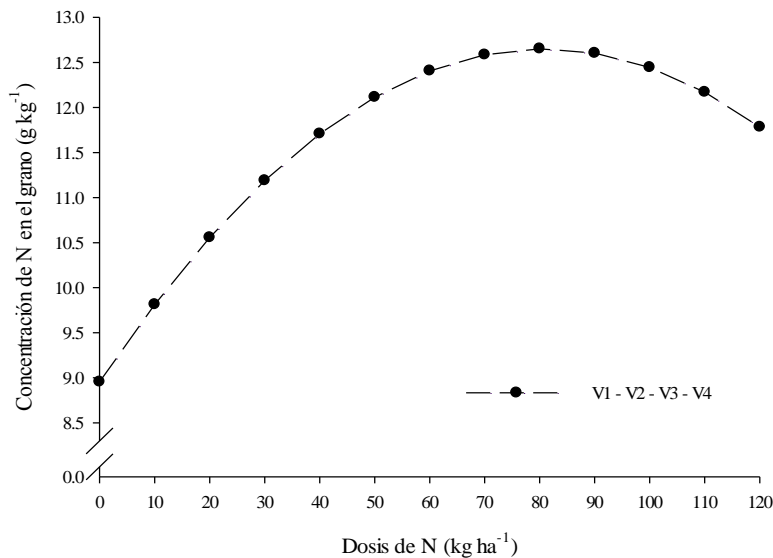


Figura 7. Concentración de N en el grano en función del N aplicado, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Estos valores son mayores que los obtenidos por Alvares *et al.* (2016), de alrededor de 8 g N kg^{-1} en sistemas de cultivo de maíz con cobertura de leguminosas en Chiapas; sin embargo,

Martínez *et al.* (2009), en 50 materiales de maíz cubano encontraron concentraciones de N en grano de 10.64 a 19.18 g kg⁻¹ sin aplicación de fertilizantes.

Con base en la concentración de N, se procedió a estimar el porcentaje de proteína en el grano, mismo que presentó un incremento desde 5.62 % sin la aplicación de N hasta un valor máximo de 7.91 % con la adición de 80 kg N ha⁻¹ (Figura 8).

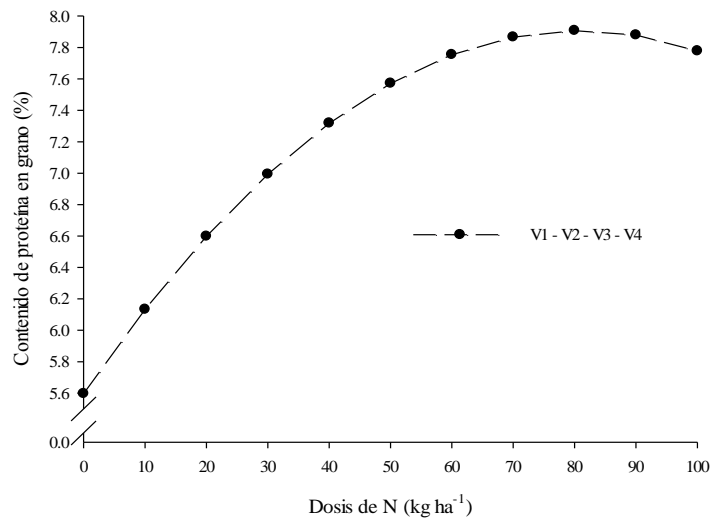


Figura 8. Porcentaje de proteína del grano en función del N aplicado para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Estos valores son menores que los obtenidos por Salinas *et al.* (2013), quienes mencionan que los contenidos de proteína en algunas razas del trópico mexicano (Conejo, Elotes Occidentales, Olotillo, Tepecintle, Tuxpeño y Zapalote Chico), entre 9.5 % y 10.4 %. Se debe destacar que el contenido de proteínas está directamente relacionado con la fertilización nitrogenada que se realice al cultivo, aunque de igual manera, la información genética que tiene cada variedad de maíz será determinante (Krivanek *et al.*, 2007).

Si bien la concentración de proteína en el grano, puede ser importante en la calidad del grano para la obtención de totopos o la gran diversidad de productos obtenidos mediante la nixtamalización del grano de las variedades de maíz Zapalote Chico, cabe señalar que no se dispone de información previa al respecto.

Para la concentración de P en el grano (CPG) se observó un efecto positivo del N y P aplicados, y un efecto negativo de K, al igual que diferencias entre las variedades. La variedad con mayor concentración de P fue V1, con 2.96 g kg^{-1} sin la aplicación de N, P y K, seguida por V3 con 2.91 g kg^{-1} , V2 con 2.74 g kg^{-1} y V4 con 2.72 g kg^{-1} .

El N incrementó la concentración de P en 2.07 g kg^{-1} con una aplicación de 74 kg N ha^{-1} para todas las variedades (Figura 9a), y el K la disminuyó en 0.45 g kg^{-1} con $40 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ y en 0.60 g kg^{-1} con $120 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ (Figura 9b).

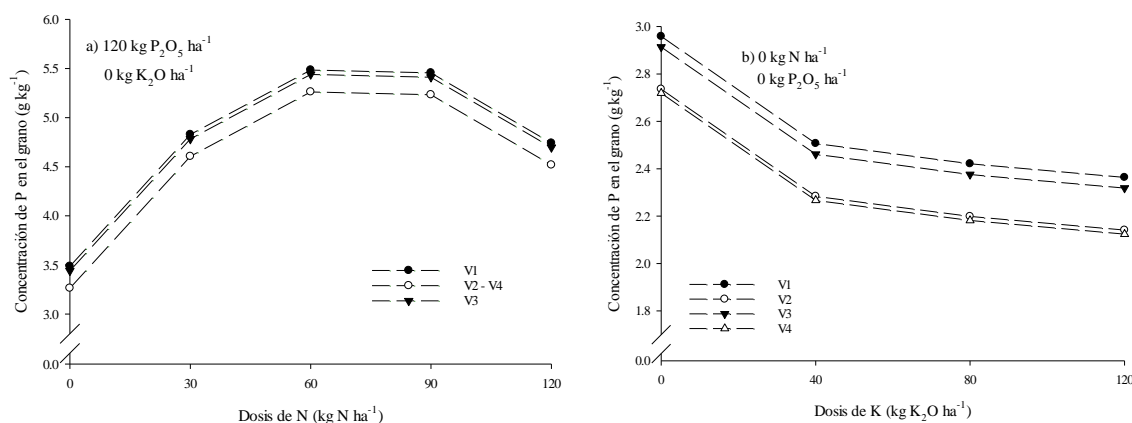


Figura 9. Concentración del P en el grano en función del N, P (a) y K (b) aplicados, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Los resultados obtenidos sin la aplicación de K se encuentran en niveles altos, comparados con los resultados de Puga *et al.* (2013), quienes encontraron concentraciones de P en granos de maíz brasileño entre 3.06 y 3.68 g kg^{-1} , mientras que de Vasconcelos *et al.* (2013), reportan

que en maíces provenientes de la compañía CERES de Portugal, niveles de P en el grano que oscilan entre 2.40 y 3.30 g kg⁻¹.

La variedad con mayor concentración de K fue V4, con un valor de 5.64 g kg⁻¹ sin aplicación de K, seguida por V3 con 5.44 g kg⁻¹, V1 con 5.36 g kg⁻¹ y V2 con 4.14 g kg⁻¹. El K incrementó la concentración de K en 0.78 g kg⁻¹ con la adición de 120 kg K₂O ha⁻¹ en todas las variedades (Figura 10).

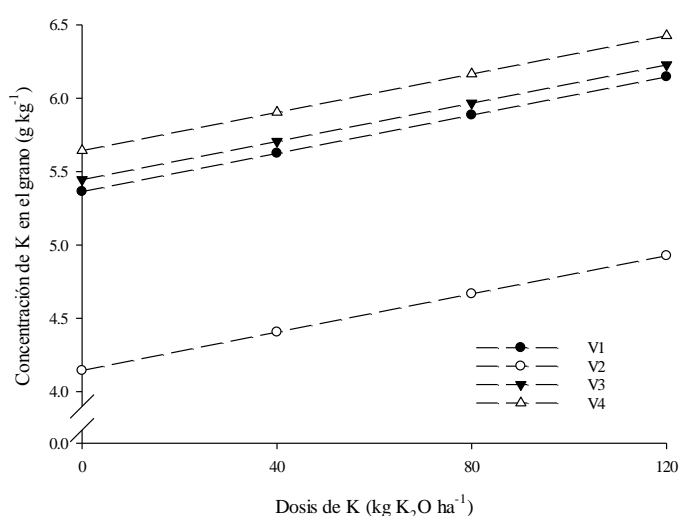


Figura 10. Efecto del K aplicado sobre la concentración de K en el grano de cuatro variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

La variedad V2 mostró las menores concentraciones de K (4.93 g K kg⁻¹ con 120 kg K₂O ha⁻¹), sin embargo, estos resultados son superiores a los reportados por Martínez *et al.* (2017), quienes encontraron concentraciones de K en granos de maíz cubano entre 1.12 y 3.29 g kg⁻¹, y de la misma manera a los obtenidos por Vasconcelos *et al.* (2013), quienes reportan en maíces provenientes de la compañía CERES de Portugal una concentración de K en el grano de 3.57 a 3.96 g kg⁻¹.

6.4.2. Concentración nutrimental en el rastrojo

En el Cuadro 20 se presentan los modelos de regresión obtenidos para las concentraciones de N, P y K, en el rastrojo, en función del N, P y K aplicados y las variedades de maíz raza Zapalote Chico.

Cuadro 20. Modelos de regresión para las concentraciones de N, P y K, en el rastrojo de cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.

Modelo de regresión	Pr.F	CME	CV	R ²
$CNR = 4.534 + 0.0804 N - 0.0007232 N^2$	0.0108	1.589	20.013	0.276
$CPR = 1.826 + 0.227 V2 + 0.00329 V3 + 0.356 V4 - 0.0001100 N^2$	0.0445	0.1171	22.774	0.403
$CKR = 12.676 - 0.7100 V2 - 0.233 V3 - 0.201 V4 - 0.03846 N + 0.02425 K$	0.0001	2.504	14.323	0.267

CNR = concentración de N en el rastrojo ($g\ kg^{-1}$), CPR = concentración de P en el rastrojo ($g\ kg^{-1}$), CKR = concentración de K en el rastrojo ($g\ kg^{-1}$), N = dosis de N ($kg\ N\ ha^{-1}$), K = dosis de K ($kg\ K_2O\ ha^{-1}$), V2 = es una variable auxiliar para la variedad 2 con respecto a la variedad 1, V3 = es una variable auxiliar para la variedad 3 con respecto a la variedad 1, V4 = es una variable auxiliar para la variedad 4 con respecto a la variedad 1, Pr. F = probabilidad de F; CME = cuadrado medio del error; CV = coeficiente de variación (%); R² = coeficiente de determinación múltiple.

El ajuste de los modelos de regresión tiene valores bajos del coeficiente de determinación múltiple (< 0.50); sin embargo, presentan coeficientes de variación relativamente bajos ($< 25\%$); por lo tanto, los valores del R² indican una ligera respuesta de las concentraciones en el rastrojo de N, P y K, a los factores de N y K aplicados.

La concentración de N en el rastrojo fue afectada positivamente por la dosis de N aplicado, sin observarse diferencias entre las variedades. La concentración de N presentó un incremento desde $4.53\ g\ N\ kg^{-1}$ sin aplicación de N hasta $6.77\ g\ N\ kg^{-1}$ con aplicación de $55\ kg\ N\ ha^{-1}$

(Figura 11). Por otra parte, el P y K no causaron efecto sobre la concentración de N en el rastrojo.

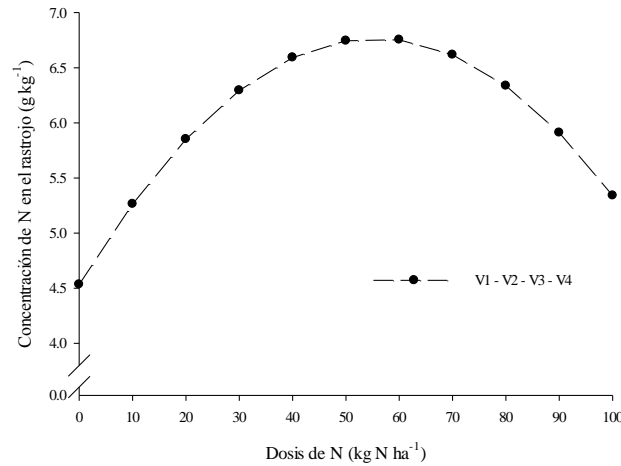


Figura 11. Concentración del N en el rastrojo en función del N aplicado, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

El porcentaje de proteína en el rastrojo presentó un incremento desde de 2.83 sin aplicación de N hasta 4.23 % con una aplicación de 55 kg N ha⁻¹; valores que son bajos en comparación con los reportados por Chávez (1984), de 4.82 a 8.75 % en variedades nativas del área del Plan Puebla; Sánchez *et al.* (2012) reportan que el rastrojo de maíz utilizado como alimento en ovinos en el Valle de México en promedio contiene 5.66 % de proteína

La concentración de P en el rastrojo (CPR) fue afectada negativamente por el N aplicado, existiendo diferencias entre las cuatro variedades. La variedad con mayor concentración de P fue V4, con un valor de 2.18 g kg⁻¹ sin la aplicación de N, seguida por V2 con 2.05 g kg⁻¹ y por V1 y V3, con 1.83 g kg⁻¹.

El N disminuyó la concentración de P en 1.59 g kg⁻¹ con 120 kg N ha⁻¹ para todas las variedades (Figura 12). El P y K aplicados no causaron efecto en la concentración de P en el rastrojo.

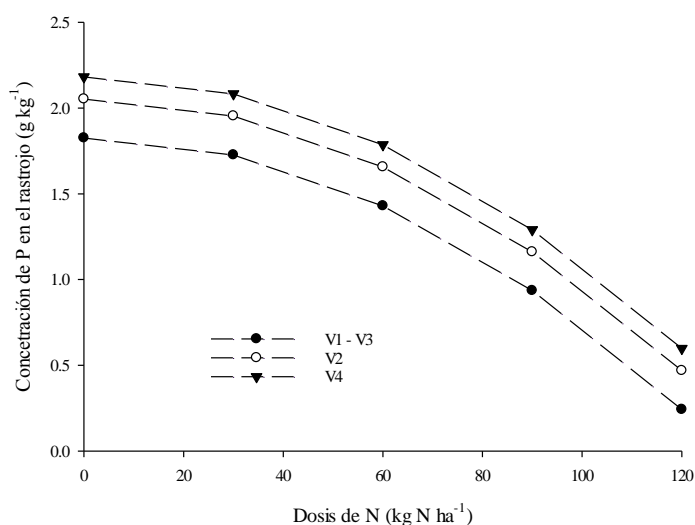


Figura 12. Concentración del P en el rastrojo en función del N aplicado, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Ramírez y Soto (2017) reportan concentraciones promedio de 5.8 g P kg⁻¹ en forraje verde hidropónico de maíz, mientras que Benton *et al.* (1991) mencionan concentraciones en el orden de 4.0 a 8.0 g P kg⁻¹ en plantas de maíz desarrolladas en Estados Unidos, valores que son muy superiores a los encontrados en la presente investigación.

La concentración de K en el rastrojo (CKR) presentó un efecto negativo del N aplicado y positivo de K aplicado. La variedad con mayor concentración de K fue V1, con un valor de 12.68 g kg⁻¹ sin aplicación de N y K, seguida por V4 con 12.48 g kg⁻¹, V3 con 12.44 g kg⁻¹ y V2 con 11.97 g kg⁻¹. El K incrementó la concentración de K en 2.91 g kg⁻¹ con la adición de 120 kg K₂O ha⁻¹ en todas las variedades sin la aplicación de N (Figura 13a). El N disminuyó la concentración de K en 4.62 g kg⁻¹ en las cuatro variedades con 120 kg N ha⁻¹ (Figura 13b). Por otra parte, el P aplicado no afectó la concentración de K en paja.

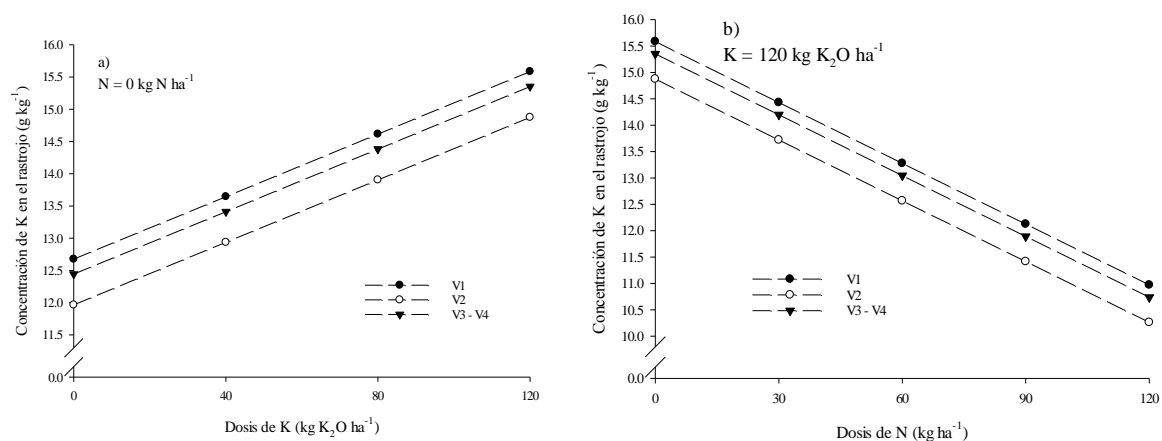


Figura 13. Concentración del K en el rastrojo en función del K (a) y el N (b) aplicados, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

6.5. Calidad de grano

El índice de flotación (IF), peso hectolítrico (PH), peso de 100 granos (PCG) y porcentaje de reflectancia del grano (L) presentaron diferencias significativas ($p = 0.01$) para variedades, tratamientos y para la interacción variedad por tratamiento (Cuadro 21).

Cuadro 21. Análisis de varianza conjunto para índice de flotación, peso hectolítrico, peso de cien granos y luminosidad del grano de cuatro genotipos de maíz raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.

Fuente de variación	Variable			
	IF	PH	PCG	L
Repetición	ns	ns	ns	ns
Variedad	**	**	**	**
Tratamiento	**	**	**	**
Variedad*Tratamiento	**	**	**	**
CV	2.43	1.07	3.59	1.45

IF = índice de flotación; PH = peso hectolítrico; PCG = peso de cien granos; L = porcentaje de reflectancia; ** = significancia al 1 %; ns = efecto no significativo; CV = coeficiente de variación (%).

En el Cuadro 22 se presenta la comparación de medias de las variables de calidad intrínseca del grano, considerando un nivel de probabilidad de 0.05. Para el IF, la variedad

OAX-826 presentó el mayor valor, con 98.16 %, seguida de las variedades COL-64 y OAX-834, con 95.56 y 94.02 % y en último lugar la variedad ZAP-MOR, con 90.13 %. Para el PH, la variedad ZAP-MOR presentó el valor más alto, con 70.84 kg hL⁻¹, seguida de las demás variedades, con valores entre 69.36 y 69.84 kg hL⁻¹. Para el PCG, las variedades OAX-826 y COL-64 presentaron los mayores valores, con 25.08 y 25.15 g, seguidas de la variedad OAX-834, con 21.6 g y la variedad ZAP-MOR con 18.92 g. Para L, las variedades OAX-826, OAX-834 y COL-64 presentaron los valores más altos, entre 73.08 y 73.26 %, y la variedad ZAP-MOR presentó el menor valor con 72.48 %. Cabe mencionar que el IF y el PH correlacionan negativamente de tal modo que, mientras mayor PH tengan los granos de un maíz su IF será menor (Salinas *et al.*, 2010).

Cuadro 22. Componentes de calidad intrínseca de las cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico.

Variedad	IF %	PH kg hL ⁻¹	PCG g	L %
OAX-826 (V1)	98.16 a [†]	69.36 b	25.08 a	73.18 a
OAX-834 (V2)	94.02 c	69.84 b	21.68 b	73.26 a
COL-64 (V3)	95.56 b	69.62 b	25.15 a	73.08 a
ZAP-MOR (V4)	90.13 d	70.84 a	18.92 c	72.48 b
DMS	1.197	0.616	0.519	0.564

IF = índice de flotación; PH = peso hectolítrico; PCG = peso de 100 granos; L = reflectancia; †: Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey 0.05); DMS = diferencia mínima significativa.

En general peso de los granos de las cuatro variedades esta raza de maíz puede considerarse bajo, debido principalmente a su textura harinosa (Vásquez *et al.*, 2003). El valor de L se relaciona con su grado de brillantez (0 = negro, y 100 = blanco) y las cuatro variedades mostraron valores que corresponden a una alta luminosidad.

En el Cuadro 23, se presentan los modelos de regresión de las variables de calidad intrínseca del grano, en función del N, P y K aplicados.

Cuadro 23. Modelos de regresión para las variables de calidad intrínseca del grano de cuatro variedades de maíz de la raza Zapalote Chico en el año 2017 en San Pedro Comitancillo, Oaxaca.

Modelo de regresión	Pr.F	CME	CV	R ²
IF = 94.906 - 3.846 V2 - 2.600 V3 - 7.465 V4 - 0.1498 N + 0.003800 N ² - 0.00002157 N ³ + 0.1560 P - 0.001500 P ²	0.0001	13.882	3.932	0.439
PH = 68.4559 + 0.441 V2 + 0.304 V3 + 1.587 V4 + 0.0335 N - 0.0002586 N ²	0.0001	1.879	1.963	0.202
PCG = 23.757 - 2.019 V2 + 0.422 V3 - 5.721 V4 + 0.0152 N + 0.0076 P - 0.0104 K	0.0001	1.444	5.297	0.822
L = 73.172 + 0.082 V2 - 0.104 V3 - 0.626 V4 - 0.0096 N + 0.0207 P - 0.0001287 P ²	0.0021	1.427	1.644	0.112

IF = índice de flotación (%), PH = peso hectolítrico (kg hL⁻¹), PCG = peso de 100 granos (g), L = porcentaje de reflectancia, N = dosis de N (kg N ha⁻¹), P = dosis de P (kg P₂O₅ ha⁻¹), K = dosis de K (kg K₂O ha⁻¹), V2 = es una variable auxiliar para la variedad 2 con respecto a la variedad 1, V3 = es una variable auxiliar para la variedad 3 con respecto a la variedad 1, V4 = es una variable auxiliar para la variedad 4 con respecto a la variedad 1, Pr. F = probabilidad de F; CME = cuadrado medio del error; CV = coeficiente de variación (%); R² = coeficiente de determinación múltiple.

El IF fue afectado por el N aplicado, con un efecto inicial negativo hasta 25 kg N ha⁻¹ y posteriormente un efecto positivo hasta 92 kg N ha⁻¹, a la vez que un efecto positivo del P, existiendo respuesta hasta 52 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Por otra parte, el K aplicado no causó efecto sobre el IF.

La variedad con mayor IF fue V1, con 94.90 % sin la aplicación de N y P, seguida por V2 con 92.31 %, V3 con 91.06 % y V4 con 87.44 %. El N incrementó el IF en 1.59 % en las cuatro variedades con una aplicación de 92 kg N ha⁻¹, sin la aplicación de P (Figura 14a). El P incrementó el IF en 4.06 % con la aplicación de 52 kg P₂O₅ ha⁻¹ en todas las variedades, sin aplicación de N (Figura 14b).

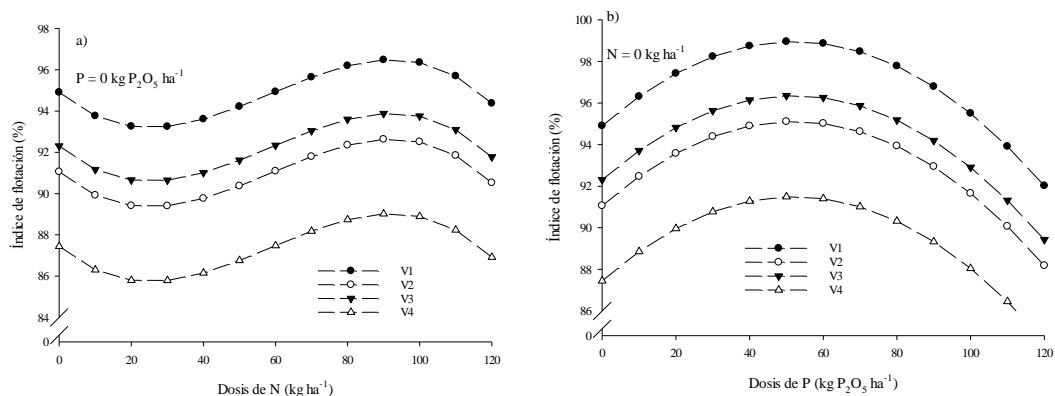


Figura 14. Índice de flotación en función del N (a) y el P (b) aplicados, para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Los resultados obtenidos son superiores a los reportados por Salinas *et al.* (2013), quienes determinaron en una colecta de Zapalote Chico proveniente de la región del Istmo y regenerada en Río Grande, Tututepec, Oaxaca, un IF promedio de 73 %; por su lado, Cabrera (2014) menciona que el IF de las variedades en estudio estuvo en el rango de 60 a 83.33 %, con la aplicación de 92 kg N y 46 kg P₂O₅.

Según la clasificación de dureza del grano en base al IF propuesto por Salinas y Vázquez (2006), los granos de las cuatro variedades evaluadas corresponden a una dureza muy suave.

El PH fue afectado de manera positiva por el N aplicado y se observó un comportamiento diferente entre las variedades. Por otra parte, el P y K aplicados no causaron efecto en el PH de las variedades en estudio.

La variedad con mayor PH fue V4, con 70.04 kg hL⁻¹ sin la aplicación de N, seguida de V2 con 68.90 kg hL⁻¹, V3 con 68.76 kg hL⁻¹ y V1 con 68.46 kg hL⁻¹. El N incrementó el PH en 1.08 kg hL⁻¹ en las cuatro variedades con una aplicación de 64 kg N ha⁻¹ (Figura 15).

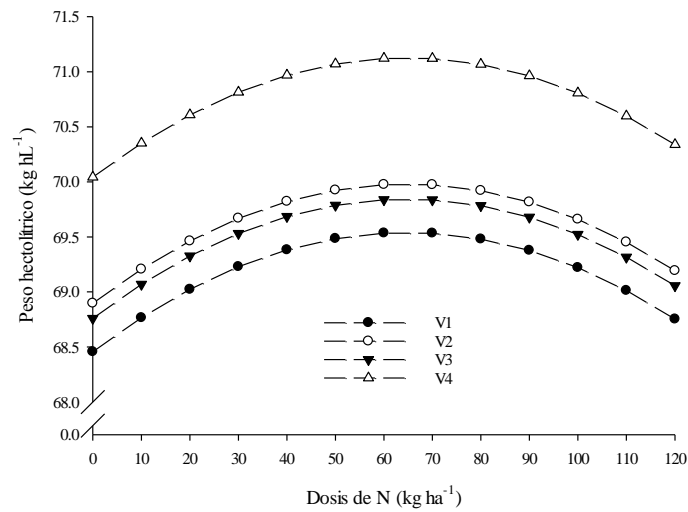


Figura 15. Peso hectolítico en función del N aplicados para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

El PH de las cuatro variedades fue menor en comparación con los reportados por Cabrera (2014), quien menciona valores de 73.70 a 77.40 kg hL⁻¹ con la aplicación de 92 kg N ha⁻¹ en la región del Istmo de Tehuantepec; Salinas *et al.* (2013), en una colecta de maíz Zapalote Chico regenerada en Río Grande, Tututepec, Oaxaca, reportan un PH de 76.40 kg hL⁻¹.

Un indicador de calidad para el maíz destinado a la elaboración de productos nixtamalizados es la dureza de grano, propiedad que se estima indirectamente con los valores de PH e IF. De acuerdo con la norma NMX-FF-034/1- SCFI-2002 (SAGARPA, 2002), los granos de maíz aptos para la industria de productos nixtamalizados deben tener un IF máximo de 40 % y un PH mínimo de 74 kg hL⁻¹. Ninguna de las variedades presentó un PH dentro de lo establecido en la norma NMXFF-034/1-SCFI-2002 para ser procesadas en la industria de los productos nixtamalizados. Las cuatro variedades de la raza Zapalote Chico evaluadas tienen una dureza de grano fuera de la norma, de acuerdo con su IF.

El PCG fue afectado positivamente por el N y P aplicados, y negativamente por el K aplicado. La variedad con mayor PCG fue V3 con 24.18 g sin la aplicación de N, P y K, seguida

de V1 con 23.76 g, V2 con 21.74 g y V4 con 18.04 g. El N y P incrementaron el PCG en 2.74 g en las cuatro variedades con 120 kg N y de P_2O_5 ha^{-1} (Figura 16a). Para el K aplicado se observó una disminución de 0.01 g por kilogramo de K_2O aplicado (Figura 16b).

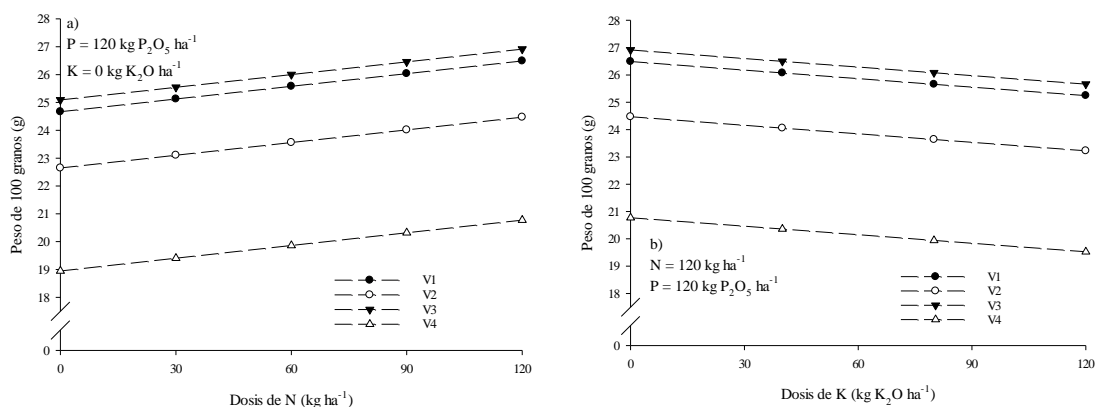


Figura 16. Peso de 100 granos en función del N, P (a) y K (b) aplicados para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Cabrera (2014) reportó en la región del Istmo de Tehuantepec un PCG en las cuatro variedades evaluadas de 27.46 g, 25.77 g, 27.78 y 20.53 g, respectivamente, con una aplicación de 92 kg N ha^{-1} y 46 kg de P_2O_5 ha^{-1} , valores mayores a los observados en la presente investigación; Salinas *et al.* (2013) reportan en una colecta de Zapalote Chico un PCG de 29.6 g, valor superior a lo observado en la presente investigación. De acuerdo a la clasificación del tamaño del grano en base al PCG propuesta por Salinas y Vázquez (2006), los granos de las cuatro variedades evaluadas corresponden a un tamaño de grano pequeño.

El tamaño de grano es una variable de gran interés en el proceso de nixtamalización, debido a su impacto en el procesamiento de cocción y absorción de agua (Salinas *et al.*, 2010). De acuerdo con Billeb y Bressani (2001), el peso de mil granos sugiere el tamaño del grano de cada variedad, y para el proceso de nixtamalización son preferibles las variedades de mayor peso y tamaño de grano.

El valor de L fue afectado positivamente por el P aplicado y negativamente por el N aplicado; por otra parte, no se observó efecto del K aplicado. Las variedades que presentaron los valores más altos de L fueron V2 y V1 con 73.17 % sin la aplicación de N y P, seguida de V3 con 73.07 % y V4 con 72.55 %.

El N aplicado disminuyó L en 1.15 % en las cuatro variedades con 120 kg N ha⁻¹ (Figura 17a), y el P la incrementó en 0.83 % con 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ sin adiciones de N, para las cuatro variedades (Figura 17b).

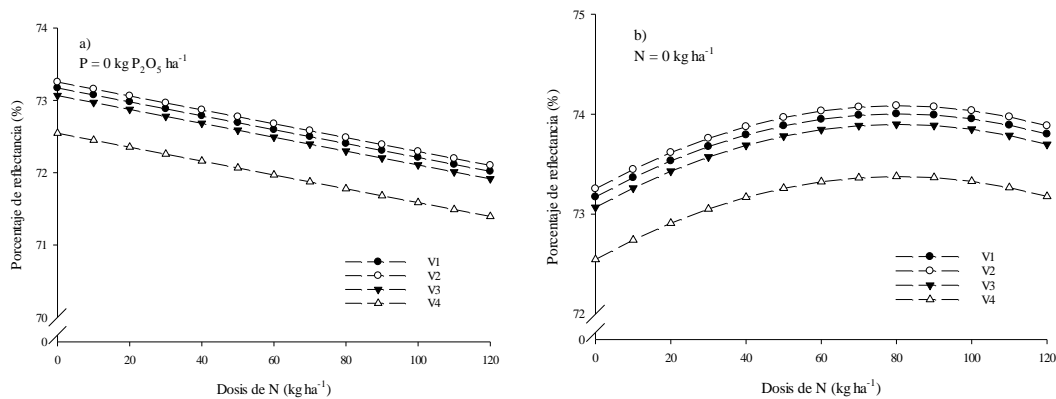


Figura 17. Porcentajes de reflectancia del grano en función del N (a) y P (b) aplicados para las variedades de maíz raza Zapalote Chico: V1 = OAX-826, V2 = OAX-834, V3 = COL-64 y V4 = ZAP-MOR.

Cabrera (2014) reporta para las variedades evaluadas valores de L de 71.97 a 73.68 %, los cuales no varían demasiado de los observados en la presente investigación; sin embargo, no concuerdan con los reportados por Salinas et al. (2013), quienes mencionan que los granos de una colecta de Zapalote Chico presentaron un valor de L de 43 %.

Los granos de las cuatro variedades pueden considerarse como maíces de color blanco dado que el porcentaje de reflectancia se relaciona con el grado de brillantez del grano (0 = negro, y 100 = blanco), estos valores indican la tendencia del color que se obtendrá en los

productos posteriores que ofrecen valor agregado al maíz de la raza Zapalote Chico, como son el *totopo istmeño* y la gran diversidad de productos derivados de su nixtamalización.

VII. CONCLUSIONES

Para las variedades de maíz raza Zapalote Chico estudiadas (OAX-826, OAX-834, COL-64 y ZAP-MOR):

- El N, P y K aplicados al suelo y la densidad de población incrementaron el rendimiento de grano en las cuatro variedades, con un mayor rendimiento en la variedad ZAP-MOR.
- El N aplicado y la densidad de población incrementaron el rendimiento de rastrojo en las cuatro variedades, con un mayor rendimiento en la variedad ZAP-MOR.
- El N y P aplicados incrementaron el índice de cosecha en las cuatro variedades, con diferencias entre ellas. La variedad ZAP-MOR presentó los índices de cosecha más bajos, sin embargo, fue la de mayor rendimiento de grano, por lo cual tiene el potencial para ser cultivada con un doble propósito.
- Las dosis óptimas económicas de N, P y K, con 50 000 plantas ha^{-1} , fueron similares para las cuatro variedades, de 80 kg N ha^{-1} , 30 kg P_2O_5 ha^{-1} y 40 kg K_2O ha^{-1} .
- El N aplicado incremento la concentración de N en el grano y rastrojo, sin presentarse diferencias entre las variedades; incrementó la concentración de P en el grano, con una mayor concentración en la variedad OAX-826; disminuyó la concentración de P y K en el rastrojo.
- El P aplicado incrementó la concentración de P en el grano, con una mayor concentración en la variedad OAX-826.
- El K aplicado incremento la concentración de K en el grano y rastrojo, con mayores concentraciones en la variedad ZAP-MOR en el grano y la variedad OAX-826 en el rastrojo.

- Las variables índice de flotación, peso hectolítrico, peso de 100 granos y porcentaje de reflectancia mostraron diferencias entre las variedades. Se observó una correlación negativa entre el índice de flotación y el peso hectolítrico. El grano de las cuatro variedades fue clasificado con una dureza suave, tamaño pequeño y de color blanco.
- Ninguna de las variedades cumplió con los valores de índice de flotación y peso hectolítrico establecidos por la industria nixtamalera; sin embargo, las variedades de esta raza de maíz poseen muchos atributos que son aprovechados por los pobladores de la Región, destacándose entre ellos la suavidad del grano, lo cual se refleja en las tortillas y totopos que se elaboran de ellos, y de igual manera a su consumo en elote.

VIII. LITERATURA CITADA

- AACC (American Association of Cereal Chemists). 2000. Approved methods of the AACC. 6th ed. St. Paul Minnesota, USA.
- Alcántar G., G. y L. I. Trejo T. 2012. Nutrición de Cultivos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Publicación Especial No 10. Chapingo, México.
- Álvarez S., J. D., R. Muñoz A., E. Huerta L. y J. Nahed T. 2016. Balance parcial de nitrógeno en el sistema de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) con cobertura de leguminosas en Chiapas, México. *Agronomía Costarricense* 40:29-39.
- Aragón C., F., J. de D. Figueroa C., M. Flores Z., M. Gaytán M. y J. J. Véles M. 2012. Calidad Industrial de Maíces Nativos de la Sierra Sur de Oaxaca. Libro Técnico Núm. 15. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Santo Domingo Barrio Bajo, Etna, Oaxaca, México.
- Aragón C., F., S. Taba., J. M. Hernández C., J. de D. Figueroa C. y V. Serrano A. 2005. Actualización de la información sobre los maíces criollos de Oaxaca. Instituto Nacional de

Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Informe final SNIB-CONABIO proyecto Núm. CS002. México D. F.

Aragón C., F., S. Taba., J. M. Hernández C., J. de D. Figueroa C., V. Serrano A. y H. F. Castro G. 2006. Catálogo de maíces criollos de Oaxaca. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico Núm. 6. Oaxaca, Oaxaca. México.

Arellano V., J. J., C. Tut C., A. María R., Y. Salinas M. y O. R. Taboada G. 2003. Maíz azul de los valles altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. Revista Fitotecnia Mexicana 26:101–107.

Ayub, Muhammad., M. A. Nadeem., M. S. Sharar. and N. Mahmood. 2002. Response of maize (*Zea mays* L.) fodder to different levels of nitrogen and phosphorus. Asian Journal of Plant Sciences 4:352-354.

Billeb S., A. C., y R. Bressani. 2001. Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 51:86-94.

Benton, J. Jr., J. B. Wolf, and H. A. Mills. 1991. Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Inc. Athens Georgia.

Bellon C., M. R., A. F. Barrientos P., P. Colunga G-M., H. Perales R., J. A. Reyes A., R. Rosales S. y D. Zizumbo V. 2009. Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. *In*: Capital natural de México, vol. II: estado de conservación y tendencias de cambio. Sarukhán, J. (coord. gen.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. pp: 355-382.

Bouyoucos, G. J. 1936. Directions for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. Soil Science 42:225-230.

Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. p. 1149-1178. *In*: C. A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wi.

Cabrera T., J. M. 2014. Variación en morfología, rendimiento y calidad de grano en criollos sobresalientes de maíz de la raza Zapalote Chico. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.

- Cabrera T., J. M., A. Carballo C. y F. Aragón C. 2015. Evaluación agronómica de maíces raza Zapalote chico en la región Istmeña de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11: 2075-2082.
- Castellanos R., J. Z., J. X. Uvalle B. y A. Aguilar S. 2000. *Manual de Interpretación de Análisis de suelos y aguas*. 2a ed. México.
- Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. p. 891-901. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of analysis*. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wi.
- Chávez C., X. 1984. Respuesta del maíz en términos de producción, contenido proteico en el grano y calidad del rastrojo, a ocho factores de la producción en el área del Plan Puebla. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- Coutiño B., E., M. G. Vázquez C., B. Torres M. y Y. Salinas M. 2008. Calidad del grano, tortillas y botanas de dos variedades de maíz de la raza Comiteco. Nota científica. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 9-14.
- Epstein, E. and A. J. Bloom. 2005. *Mineral Nutrition Plants. Principles and Perspectives*, 2nd ed. Sinauer, Sunderland, MA.
- Etchevers B., J., J. Rodríguez S. y A. Galvis S. 1991. Generación de recomendaciones de fertilización mediante un enfoque sistémico racional. *Terra* 9: 3-10.
- FAOSTAT- FAO. Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2018. [En línea] Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (revisado el 6 de marzo de 2018)
- Fernández., M. T. 2007. Fósforo: amigo o enemigo. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar XLI:51-57.
- Fernández S., R., L. A. Morales C. y A. Gálvez M. 2013. Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:275-283.
- Figuroa C., J. D., A. Mauricio R., S. Taba., E. Morales., A. Mendoza G., F. Rincón S., M. L. Reyes V. and J. J. Véles M. 2005. Kernel characteristics and tortilla making quality of maize accessions from Mexico, the Caribbean, and South and Central America. *In*: *Latin American*

- Maize Germplasm Conservation: Regeneration, in situ Conservation, Core Subsets, and Prebreeding. Taba S. (ed.). Proceedings of a Workshop held at CIMMYT. México, D.F. pp. 71.
- Figuroa C., J. D., D. E. Narváez G., A. Mauricio S., S. Taba., M. Gaytán M., J. J. Véles M., F. Rincón S. y F. Aragón C. 2013. Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:305–314.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 2016. Panorama Agroalimentario. Maíz. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Social. México.
- García., E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3a ed. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México D.F.
- Gómez R., R., J. D. Figuroa C., M. Gayosso C., E. Ramírez M. y A. D. Hernández F. 2006. Maíces criollos del Altiplano del Estado de Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Secretaría de Educación Pública. Pachuca de Soto, Hidalgo, México.
- Greenwood, D.J. 1983. Quantitative theory and the control of soil fertility. *New Phytologist* 94:1-18.
- IPNI (International Plant Nutrition Institute). 2019. 4R de la Nutrición de Plantas. [En línea] Disponible en <http://nla.ipni.net/article/NLA-3095> (revisado el 14 de enero de 2019).
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. Beltrán, M. J. (trad.). 3ª edición. Editorial Omega. Barcelona, España.
- Kato, A., R. Ortega P., E. Boege., A. Wegier A., J. A. Serratos H., V. Alavez. L., Jardón B., L. Moyers. y V. D. Ortega D. 2013. Origen y diversidad del maíz. *In: El maíz ante los transgénicos: un análisis integral sobre el caso de México.* Álvarez B, E.R. y A. Piñeyro N. (eds.). UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades: Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad. (Colección debate y reflexión). pp:25-59.
- Kim, T. H., J. G. Hampton., L. U. Opara., A. K. Hardacre. and B. R. Mackay. 2002. Effects of Maize Grain Size, Shape and Hardness on Drying Rate and the Occurrence of Stress Cracks. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82:1232–39.

- Krivanek, A. F., H. De Groote., N. S. Gunaratna., A. O. Diallo. and D. K. Friesen. 2007. Breeding and disseminating quality protein maize (QPM) for Africa. *African Journal of Biotechnology* 6:312-324.
- Larqué S., B. S., A. Limón O., M. B. G. Irizar G. y M. Díaz V. 2017. Fertilización Química del Maíz, su Impacto en el Rendimiento y en los Costos de Producción. Folleto Técnico Núm. 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México.
- León., C. H. de. 2018. Estudian la diversidad genética de maíces de colores. Agencia Informativa CONACYT. [En línea] Disponible en <https://www.inforural.com.mx/estudian-la-diversidad-genetica-de-maices-de-colores/> (revisado el 17 junio de 2018).
- León T., J. E. 1994. Caracterización física, nutricional, sensorial y regional del totopo de la sociedad de solidaridad social “Tona Taati” del Istmo de Tehuantepec, Oax. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- López R., G., A. Santacruz V., A. Muñoz O., F. Castillo G., L. Córdova T. y H. Vaquera H. 2005. Caracterización morfológica de poblaciones nativas de maíz del Istmo de Tehuantepec, México. *Interciencia* 5:284-290.
- López R., G. 2005. Caracterización de la diversidad del maíz del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- MAIZAR (Asociación Maíz y Sorgo Argentino). 2011. El Maíz, primero en el mundo. [En línea] Disponible en <http://www.maizar.org.ar/vertext.php?id=392> (revisado 13 febrero 2017).
- Martínez C., M., R. Ortiz P. y M. D. Ración. 2017. Contenido de fósforo, potasio, zinc, hierro, sodio, calcio y magnesio, análisis de su variabilidad en accesiones cubanas de maíz. *Cultivos Tropicales* 38:92-101.
- Martínez C., M., N. Palacios. y R. Ortiz P. 2009. Caracterización nutricional del grano de 50 accesiones de maíz cubano. *Cultivos Tropicales* 30:80-88.

- Mauricio S., R. A., J. D. Figueroa C., S. Taba., M. L. Reyes V., F. Rincón Sánchez. y A Mendoza G. 2004. Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:213-222.
- McGuire, G. R. 1992. Reporting objective color measurements. *Hort Science* 27:1254-1255.
- Muñoz O., A. 2006. Centli-Maíz. Prehistoria e historia, diversidad, potencial, origen genético y geográfico, glosario centli-maíz. Colegio de Postgraduados-SINAREFI. Montecillo, Estado de México.
- Muñoz T., F., J. D. Guerrero R., P. Antonio L., A. Muñoz G., H. López S., E. Ortiz T, J. A. Hernández G., O. Taboada G., S. Vargas L. y M. Valadez R. 2013. Producción de rastrojo y grano de variedades locales de maíz en condiciones de temporal en los valles altos de Libres-Serdán, Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 4:515-530.
- NMX-FF-034-2002-SCFI-PARTE-1 (Norma Mexicana para Maíces Destinados al Proceso de Nixtamalización) 2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereales-maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado. Especificaciones y métodos de prueba. Especificaciones y Métodos de Prueba. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Dirección General de Normas. México, D. F.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Oikeh, S O., J. G. Kling. and A. E. Okoruwa. 1998. Nitrogen fertilizer management effects on maize grain quality in the West African moist Savanna. *Crop Sci.* 38:1056-1061.
- Olsen, S. R. y L. A. Dean. 1965. Phosphorus. p. 1035-1049. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of analysis. Part 2. Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Madison, Wi.
- O'Leary, M. 2016. Maíz: De México para el mundo. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). [En línea] Disponible en <https://www.cimmyt.org/es/maiz-de-mexico-para-el-mundo/> (revisado el 6 de marzo de 2018).

- Ortega P., R. 2003. La diversidad del maíz en México. *In: Sin maíz no hay país*. Esteva, G. y C. Marielle. (eds.). Culturas Populares de México. México, D. F. pp:123-154
- Palacios R., N., A. Molina. y M. G. Vázquez C. 2017. ¿Qué es la calidad del grano? Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). [En línea] Disponible en <http://conservacion.cimmyt.org/es/hubs/2181-ique-es-la-calidad-del-grano-de-maiz> (revisado el 17 de agosto de 2017).
- Parra, C. de la., S. O. Serna S. and R. Hai L. 2007. Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *J. Agric. Food Chem.* 55:4177-4183.
- Pozo I, D. del., C. H. Brenes., S. O. Serna S. and Talcott, S. T. 2006. Polyphenolic and antioxidant content of white and blue corn (*Zea mays* L.) products. *Food Res. Int.* 39:696-703.
- Puga, A., Prado, R. de M., Mattiuz, B-H., Vale, D. and Fonseca, I. M. 2013. Chemical composition of corn and sorghum grains cultivated in oxisol with different application methods and doses of zinc. *Ciencia e Investigación Agraria* 40:97-108.
- Ramírez V., C. y F. Soto B. Efecto de la nutrición mineral sobre la producción de forraje verde hidropónico de maíz. *Agronomía Costarricense* 41:79-91.
- Rangel M., E., A. Muñoz O., G. Vázquez C., J. Cuevas S., J. Merino C. y S. Miranda C. 2004. Nixtamalización, elaboración y calidad de tortilla de maíces de Ecatlán, Puebla, México. *Agrociencia* 38: 53-61.
- Rawls, W. J., L. R Ahuja. and D. L. Brakensiek. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. p. 329-340. *In: van Genuchten, M. Th., Leij, F.J. and Lund L.J. (eds.). Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Proc. Int Worksh. Riverside. University of California, Riverside.*
- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª ed. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa. México, D. F.
- Robles B., H. 1999. Tendencias del campo mexicano. *In: Estudios Agrarios. Revista de la procuraduría Agraria* Núm. 13.

- Rodríguez M., R., y C. De León. 2008. El cultivo de maíz temas selectos Vol. 1. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- Rodríguez S., J. 1990. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica, Santiago de Chile.
- Rodríguez S., J. 1987. Normas de fertilización para el cultivo de la cebada y el maíz en el estado de Tlaxcala, México. Informe Técnico. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Robutti, J., F. Borras., M. Ferrer., M. Percibaldi. and C. A. Knutson. 2000. Evaluation of Quality Factors in Argentine Maize Races. *Cereal Chemistry* 77:24–26.
- Ruiz T., N. A., F. Rincón S., L. V. Hernández M., J. D. Figueroa. y M. G. Loarca P. 2008. Determinación de compuestos fenólicos y su actividad antioxidante en granos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31:29-34.
- Salinas M., Y., F. Aragón C., C Ybarra M., J. Aguilar V., B. Altunar L. y E. Sosa M. 2013. Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:23-31.
- Salinas M., Y. y L. Aguilar M. 2010. Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 2:5-11.
- Salinas M., Y., J. L. Arellano V. y F. Martínez B. 1992. Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíces híbridos precoces para Valles Altos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 42: 161-167.
- Salinas M., Y., F. J. Cruz C., S. A. Díaz O. y F. Castillo G. 2012. Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:33-41.
- Salinas M., Y., J. J. López R., G. F. González F. y M. G. Vázquez C. 2007. Compuestos fenólicos del grano de maíz y su relación con el oscurecimiento de masa y tortilla. *Agrociencia* 41:295-305.

- Salinas M., Y., J. Soria R. y E. Espinosa T. 2010. Aprovechamiento y distribución de maíz azul en el Estado de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de México, Chapingo, México. Folleto Técnico Núm. 42.
- Salinas M., Y. y M. G. Vázquez C. 2006. Metodologías de análisis de calidad nixtamalera-tortillera en maíz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de México, Chapingo, México. Folleto Técnico Núm. 24.
- Sánchez A., E., M. E. Ortega C., G. Mendoza M., O. D. Montañez V. y S. E. Buntinx D. 2012. Rastrojo de maíz tratado con urea y metionina protegida en dietas para ovinos en crecimiento. *Interciencia*. Vol. 37. Núm. 5. pp. 395-399.
- Sánchez J., J., M. Goodman M. y C. Stuber W. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Econ. Bot.* 54:43-59.
- SE-DGIB (Secretaría de Economía-Dirección General de Industrias Básicas). 2012. Análisis de la Cadena de Valor Maíz-Tortilla: situación actual y factores de competencia local. Secretaría de Economía-Dirección General de Industrias Básicas. [En línea Disponible en <http://www.economia.gob.mx/files/comunidadnegocios/industriacomercio/informacionSectorial/20120411analiscadenavalormaiz-tortilla.pdf> (revisado 12 de enero de 2017).
- Serratos H., J. A. 2009. El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. [En línea] Disponible en <https://www.greenpeace.org/archivemexico/es/Footer/Descargas/reports/Agricultura-sustentable-y-transgenicos/el-origen-y-la-diversidad-del/> (revisado 21 de enero de 2018)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2018. Producción Agropecuaria y Pesquera. Producción anual agrícola. [En línea] Disponible en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (revisado el 6 de marzo de 2018).
- SIAP-Campo Mexicano. 2010. Situación actual y Perspectivas del Maíz en México 1996-2010. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/Estudios/Perspectivas/maiz96-10.pdf (revisado el 9 de enero de 2019).

- Sierra M., M., A. Palafox C., M. G. Vázquez C., F. Rodríguez M. y A. Espinosa C. 2010. Caracterización Agronómica, Calidad industrial y Nutricional de maíz para el trópico mexicano. *Agronomía Mesoamericana* 21:21-29.
- Sosa M., E. 1981. Manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release 9.0. SAS Inst., Cary, NC, USA.
- Taye, G., K. Tesfaye. and T. Debele. 2015. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on the yield of maize (*Zea mays* L.) at Nedjo, West Wollega, Ethiopia. *Journal of Natural Sciences Research* 5:197-202.
- Tsai, C. Y., I. Dweikat., D. M. Huber. and H. L. Warren. 1992. Interrelationship of nitrogen nutrition with maize (*Zea mays*) grain yield, nitrogen use efficiency and grain quality. *J. Sci. Food & Agric.*58:1-8.
- Torres D., M. 2010. Fertilización Nitrogenada del Cultivo de Maíz. [En línea] Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/Fertilizacion%20Nitrogenada%20del%20Cultivo%20de%20Maiz.asp> (revisado el 10 de enero de 2017).
- Turrent F., A. 2008. Apéndice I. Producción bajo temporal. *In: El cultivo de maíz temas selectos*, vol. 1. Rodríguez M., R., y C. De León (cords). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- Turrent F., A., J. I. Cortés F., A. Espinosa C., H. Mejía A. y J. A. Serratos H. 2010 ¿Es ventajosa para México la tecnología actual de maíz transgénico? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.1:631-646.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2010. [En línea] Disponible en <https://ich.unesco.org/en/RL/traditional-mexican-cuisine-ancestral-ongoing-community-culture-the-michoacan-paradigm-00400> (revisado el 22 de octubre de 2016)
- Vanotti, M. B. and L. G. Bundy. 1994. Corn nitrogen recommendations based on yield response data. *Journal of Production Agriculture* 7:249-256.

- Vasconcelos M, C. B. M. de., R. Bennett., C. Castro., P. Cardoso., M. J. Saavedra. and E. A. Rosa. 2013. Study of composition, stabilization and processing of wheat germ and maize industrial by-products. *Industrial Crops and Products* 42:292-298.
- Vázquez C., M. G., L. Guzmán B., J. L. Andrés G. y F. Márquez S. 2003. Calidad de grano y tortillas de maíces criollos y sus retrocruzas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:231-238.
- Vázquez C., M. G., D. Santiago R., Y. Salinas M., I. Rojas M., J. L. Arellano V., G. A. Velázquez C. y A. Espinoza C. 2012. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla en híbridos de maíz en valles altos de Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:229-237.
- Véles M., J. J. 2004. Caracterización de Tostadas Elaboradas Con Maíces Pigmentados Y Diferentes Métodos de Nixtamalización. CICATA-Instituto Politécnico Nacional. México. D. F.
- Vidal M., V. A., M. G. Vázquez C., B. Coutiño E., A. Ortega C., J. L. Ramírez D., R. Valdivia B., M. J. Guerrero H., F. J. Caro V. y O. Cota A. 2008. Calidad proteínica en colectas de maíces criollos de la sierra de Nayarit, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31:15-21.
- Volke H., V., A. Turrent F. y A. Castillo M. 2005. Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 68 p.
- Volke H., V., A. Turrent F., L. López P. y S. Navarro G. 2010. Generación de recomendaciones de fertilización nitrogenada para maíz de temporal: análisis de los enfoques del método de campo y del modelo sistémico. *In: Ciencias Ambientales. Temáticas para el Desarrollo. Vol. IV.* Ruiz C., J., R. Castelán V., V. Tamariz F. y A. Hernández M (eds.). Dirección de Fomento Editorial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Volke H., V., J. Etchevers B., A. Sanjuan R. y T. Silva P. 1998. Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. *Terra Latinoamericana*, 16:79-91.
- Watson, S. A. 2003. Description, development, structure, and composition of the corn kernel. p. 69-106. *In: White, P. J. and L. A. Johnson (ed.). Corn: Chemistry and Technology. 2th ed.* American 13 Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul Minnesota, USA.

- Wellhausen, E. J., L. M. Roberts., E. Hernandez X. y P. C. Mangelsdorf. 1951. Razas de maíz en México. Su origen, características y distribución. *In: Xolocatzia. Obras de Efraín Hernández Xolocotzi. Rev. Geogr. Agríc. II:609-732.*
- Zepeda B., R. 2004. Calidad nutritiva y nixtamalera-tortillera del grano, y discriminación de variables asociadas a la estabilidad de híbridos de maíz. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- Zhang, H. M., Yang, X. Y., He, X. H., Xu, M. G., Huang, S. M., Liu, H. and Wang, B. R. 2011. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. *Pedosphere* 21:154–163.
- Zhang, F., A. F. Mackenzie., and D. L. Smith. 1993. Corn yield and shifts among corn quality constituents following application of different nitrogen fertilizer sources at several times during corn development. *J. Plant Nutr.* 16:1317-1337.