



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES
(PROTECCIÓN Y PRODUCCIÓN VEGETAL)**

**“VARIACIÓN MORFOLÓGICA DE PLANTAS Y
ESPECTROFOTOMÉTRICA DE HARINAS DE MAÍCES
PIGMENTADOS DE LA MIXTECA OAXAQUEÑA”**

TESIS QUE PRESENTA

FRANCISCO TORRES ESCAMILLA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTORES DE TESIS:
DR. JOSÉ LUIS CHÁVEZ SERVIA
DR. FERNANDO CASTILLO GONZÁLEZ

SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAXACA.



MAYO 2013



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO
ACTA DE REVISION DE TESIS

SIP-14 BIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 15 del mes de abril del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada:

Variación morfológica de plantas y espectrofotométrica de harinas de maíces pigmentados de la Mixteca oaxaqueña"

Presentada por el alumno:

Torres Apellido paterno	Escamilla materno	Francisco nombre(s)	Con registro:						
			A	1	1	0	2	5	9

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

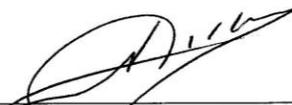
Directores de tesis



 Dr. Fernando Castillo González



 Dr. José Luis Chávez Servia



 Dr. Celerino Robles Pérez

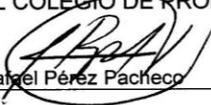


 Dr. Jaime Ruiz Vega



 M. en C. Laura Martínez Martínez

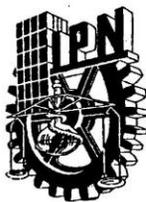
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



 Dr. Rafael Pérez Pacheco



ESTADO UNIDOS MEXICANOS
 CENTRO INTERDISCIPLINARIO
 DE INVESTIGACION PARA EL
 DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
 C.I.I.D.I.R.
 UNIDAD OAXACA
 I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 15 del mes de abril del año 2013, el (la) que suscribe Torres Escamilla Francisco alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro A110259, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Drs. Fernando Castillo González y José Luis Chávez Servia y cede los derechos del trabajo titulado, "Variación morfológica de plantas y espectrofotométrica de harinas de maíces pigmentados de la Mixteca oaxaqueña", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó pako3849@hotmail.com se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Torres Escamilla Francisco



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
IPN.

Agradecimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico aportado para mi formación profesional y la realización de este trabajo

Al centro interdisciplinario de Investigación y Desarrollo Integral Regional-Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional, que fue parte importante de mi formación.

Al Dr. José Luis Chávez Servia, por su paciencia y atinada conducción de este trabajo, así como la aportación de conocimientos que estoy seguro servirán para continuar con mi preparación.

Al Dr. Fernando Castillo González, a quien agradezco sus consejos y colaboración en este trabajo.

A los Drs. Celerino Robles Pérez y Jaime Ruiz Vega y M. en C. Laura Martínez Martínez por su invaluable ayuda y colaboración en el desarrollo de esta investigación.

A la M. en C. Araceli Minerva Vera Guzmán, agradezco sus aportaciones y comentarios así como las facilidades y el préstamo de las instalaciones y equipo proporcionadas para esta investigación.

A la Dra. López Pérez Mercedes Guadalupe investigadora del Cinvestav Unidad Irapuato por el préstamo y apoyo de equipos y laboratorios durante mi estancia.

A Nacho y Constantino por permitir establecer los trabajos de investigación en sus parcelas. Gracias por la confianza y ayuda.

A mis dos Grandes amigos Isael y Dagoberto que estuvieron colaborando gran parte en el trabajo de campo, Sin duda dos personas responsables y trabajadoras.

Dedicatorias.

Gran parte de este conociendo se lo debo a mis padres quienes me enseñaron valorar la vida, sin duda un gran hombre “Jorge Torres Aguilar” y a mi señora madre “Francisca Escamilla Valdes” con todo respeto y cariño para ustedes.

Para Angélica la mujer que me ha acompañado durante este tiempo, para ti con mucho amor, que de manera incondicional me has brindado tu apoyo y comprensión.

A mis Hermanos Eli, Jorgito, Janeth, Ivonne, Ivan que son dignos de admiración y a ti Nancy[†] donde quiera que estés te recuerdo como nunca.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN GENERAL	3
1.1 Bibliografía.....	7
CAPÍTULO II PATRONES DE VARIACIÓN FENOTÍPICA EN POBLACIONES NATIVAS DE MAÍZ AZUL Y ROJO DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA.....	12
2.1 Introducción	12
2.2 Materiales y métodos.....	15
2.2.1 Colecta de muestras poblacionales	15
2.2.2 Caracterización morfológica.....	16
2.2.3 Análisis estadísticos.....	18
2.3 Resultados y discusión.....	18
2.3.1 Variación fenotípica en poblaciones de grano azul	18
2.3.2 Variación fenotípica en poblaciones de grano rojo	25
2.4 Conclusiones.....	32
2.5 Bibliografía.....	33
CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MAÍCES PIGMENTADOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO	37
3.1 Introducción	37
3.2 Materiales y métodos.....	41

3.2.1 <i>Material biológico</i>	41
3.2.2 <i>Preparación de muestras y análisis de infrarrojo</i>	41
3.2.3 <i>Análisis estadístico</i>	43
3.3 Resultados y discusión	43
3.3.1 <i>Variación entre muestras del agricultor y de polinización controlada</i>	43
3.3.2 <i>Descripción de la variación fenotípica espectrofotométrica</i>	53
3.3.3 <i>Clasificación de la variación fenotípica espectrofotométrica</i>	58
3.4 Conclusiones	62
3.5 Bibliografía	63
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN GENERAL	68
4.1 Bibliografía	73
CAPITULO V CONCLUSIONES GENERALES	77

ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

CAPÍTULO II.....	12
Cuadro 1. Origen de las colectas poblacionales de maíz azul y rojo, en el distrito de Tlaxiaco, Oaxaca.	17
Cuadro 2. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza y variación en 21 caracteres evaluados en 32 poblacionales nativas de maíz azul. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.	19
Cuadro 3 Cuadrados medios del análisis de varianza de grupos fenotípicos para 21 variables fenológicas, morfológicas y rendimiento de grano en maíz azul. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.	23
Cuadro 4. Promedios por grupo fenotípico en 21 variables fenológicas, morfológicas y rendimiento de grano en maíz azul. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.	24
Cuadro 5. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza y variación de 21 caracteres fenológico, morfológicos y rendimiento de grano de 18 poblaciones nativas de maíz rojo. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.....	26
Cuadro 6. Cuadrados medios del análisis de varianza de grupos poblacionales de maíz rojo, en relación a 21 variables fenológicas, morfológicas y rendimiento. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.	29
Cuadro 7. Promedios de 21 variables fenológicas, morfológica y rendimiento de grano en grupos fenotípicos de poblaciones de maíz rojo. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPÍTULO II	12
Figura 1. Localización del área de colecta de maíz pigmentado en 22 agencias del distrito de Tlaxiaco, Oaxaca	15
Figura 2. Dispersión de 32 poblaciones de maíz azul, con base en los dos primeros componentes principales y municipio de origen de la colecta.	21
Figura 3. Dendrograma de agrupamiento jerárquico de 32 muestras poblacionales de maíz Mixteco azul, con base en distancias euclidianas.....	22
Figura 4. Dispersión de 18 poblaciones de maíz de grano rojo, con base en el origen de las muestras y diferencias en caracteres fisiológicos y morfológicos.....	27
Figura 5. Dendrograma de agrupamiento jerárquico de 18 muestras poblacionales de maíz rojo de la Mixteca alta oaxaqueña, con base en caracteres fisiológicos y morfológicos de planta, espiga, mazorca y grano.	28
CAPÍTULO III	37
Figura 1. Espectros de absorbancia de harinas de maíz azul (a) y rojo (b) en muestras del agricultor y de polinización controlada, y el estándar de triptófano.	45
Figura 2. Espectros de absorbancia de harinas de maíz azul (a) y rojo (b) en muestras del agricultor y de polinización controlada, y el estándar de lisina.....	48
Figura 3. Espectros de absorbancia de harinas de maíz azul (a) y rojo (b) en muestras del agricultor y de polinización controlada, y el estándar de β -caroteno.	49
Figura 4. Espectros de absorbancia de infrarrojo cercano de harinas de maíz azul (a) y rojo (b), y localización de regiones de enlaces de grupos orgánicos de referencias bibliográficas, en muestras del agricultor y de polinización controlada.	52
Figura 5. Dispersión de 32 poblacionales de maíz azul en función de los dos primeros componentes principales, en muestras de productores (a, c) y con polinización controlada (b, d), y con base espectros de infrarrojo cercano ajustados por la primera (a, b) y segunda derivada (c, d).....	54
Figura 6. Dispersión de 18 poblacionales de maíz rojo en función de los dos primeros componentes principales, en muestras de productores (a, c) y con polinización controlada (b,	

d), y con base en espectros de infrarrojo cercano ajustados por la primera (a, b) y segunda derivada (c, d).....57

Figura 7. Dendrograma espectrofotométrico de absorbancia de harinas de maíz azul en muestra de los productores (a) y de polinización controlada (b), con datos ajustado por la segunda derivada. CH, Chalcatongo de Hidalgo; SMG, San Miguel El Grande; SEA, San Esteban Atlatlahuca; SY, Santiago Yosondua; TX, Tlaxiaco; y SCTA, Santa Catarina Yosonotú.....59

Figura 8. Dendrograma espectrofotométrico de absorbancia de harinas de maíz rojo en muestra de productores (a) y de polinización controlada (b), con datos ajustado por la segunda derivada. CH, Chalcatongo de Hidalgo; SMG, San Miguel El Grande; SEA, San Esteban Atlatlahuca; SY, Santiago Yosondua; TX, Tlaxiaco; y SCTA, Santa Catarina Yosonotú.....61

RESUMEN

Los consumidores y comercializadoras de harinas, masa y tortillas generan una alta demanda de maíz blanco, y consecuentemente los programas de mejoramiento genético públicos y privados orientan sus acciones a generar variedades de grano blanco y a veces amarillo, y casi nunca generan variedades de grano azul o rojo. También la demanda del mercado por maíz blanco hace que se tengan bajos precios en la venta de maíz pigmentado. En el presente trabajo se plantearon los objetivos de: (i) describir y clasificar la variación fenotípica de una colección de poblaciones de maíz azul (32) y rojo (18), mediante caracteres agromorfológicos; y (ii) con espectros de absorbancia de infrarrojo cercano de harinas de grano. La caracterización agromorfológica se realizó en dos experimentos (grano azul y rojo), ambos bajo un diseño de bloques al azar, en Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca. Los análisis de varianza de la descripción agromorfológica mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre colectas de grano azul y rojo. Para el análisis de las harinas por espectroscopia de infrarrojo cercano, se utilizaron dos tipos de muestras: la colectada con agricultores y la segunda provino de la siembra y polinización fraternal manual (polinización controlada). Entre poblaciones de maíz azul y rojo se determinaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en uno o más caracteres de planta, espiga, mazorca y grano. En ambos casos los patrones de variación fenotípica dependen de la variabilidad en altura de planta y mazorca, días a floración masculina o femenina, y número de ramas de la espiga, y presentaron cierta asociación con las regiones de origen de las poblaciones. En poblaciones de maíz azul se clasificaron tres grupos significativamente diferentes ($P < 0.05$), donde el rendimiento experimental de grano varió de 4.7 a 10.9 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. En la colección de grano rojo se distinguieron tres grupos fenotípicos significativamente diferentes ($P < 0.05$), con rendimientos experimentales de grano de 5.9 a 7.8 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Los grupos se diferenciaron por el tiempo en alcanzar la floración masculina o femenina, altura de planta y mazorca y caracteres de mazorca y olote. Se determinaron diferencias en los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano tanto en harinas de grano azul como de grano rojo. Las poblaciones colectadas con los agricultores y de polinización controlada, difieren en los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano. La segunda derivada permitió describir y clasificar con mayor precisión las poblaciones de maíz azul y rojo. Los patrones de distribución, de acuerdo al análisis de componentes principales, muestran que las colecciones de maíz azul y rojo siguen tendencias de acuerdo al origen de las colectas. Con ayuda del análisis de conglomerados, se lograron clasificar tres grupos fenotípicos para las de grano azul, y tres para poblaciones de grano rojo. Los espectros de infrarrojo cercano de harinas de maíz azul y rojo permitieron hacer inferencias sobre la composición textura y dureza del grano de las poblaciones colectadas y con polinización controlada, a través de la presencia de tonos y sobretonos asociados a enlaces O-H, C=O, N-H, COOH y C-H.

Palabras clave: Poblaciones nativas, infrarrojo cercano, maíz azul y rojo, variación fenotípica.

ABSTRACT

Consumer and marketers of floury, dough and tortilla generate high demand of white corn, and consequently the public and private plant breeding programs addressing their actions to obtain white maize varieties and sometimes yellow ones, but never or almost never they generate blue or red maize varieties. Besides, the high market demands of white corn enhance the low prices of the pigmented corns. In this work, the objectives were: (i) describe and classify the phenotypic variation from a population's collection of blue (32) and red (18) maize through agromorphological traits, and (ii) using absorbance spectrums of near-infrared of floury kernels. The agromorphological characterization was carried out in two experiments (blue and red kernel), under a design of randomized complete blocks at Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlan, Oaxaca. The analyses of variance for the agromorphological descriptors showed significant differences ($P < 0.05$) among accessions of blue and red kernel. In the floury analysis by near-infrared spectroscopy was used two types of kernel samples: the collected sample with farmers and another generated by sowing and manual fraternal pollination (controlled pollination). Among blue and red maize populations were detected significant differences ($P < 0.05$) to one or more traits of plant, tassel, ear and kernel. In both cases, the phenotypic variation patterns depend on variability in plant and ear height, days to silk or pollen shed, and number of branches on tassel, and such patterns presented certain association with origin regions of the maize populations. Blue maize populations were classified in three groups significantly different ($P < 0.05$), where experimental yield of grain varied from 4.7 to 10.9 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Into red kernel accessions were distinguished three phenotypic groups different significantly ($P < 0.05$), with experimental yields of grain from 5.9 to 7.8 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. The groups were differentiated by time to reach the silk or pollen shed phase, plant and ear height, and ear and pith characters. Important differences were determined for absorbance spectrums of near-infrared as blue kernel floury as well as red kernel ones. The absorbance spectrums of the collected populations with farmers were different from those generate with controlled pollination. Second derivate allowed describing and classifying, with major certainness, the blue and red maize populations. The distribution patterns, on base to principal component analysis, showed that blue and red maize accessions following trends related with samples origin. Cluster analysis determined three phenotypic groups in blue kernel and also three for the red kernel populations. Near-infrared spectrums of blue and red maize floury allowed make inferences on kernel texture and hardness of the farmers' populations and those controlled pollination throughout presence of tones and overtones associated with O-H, C=O, N-H, COOH and C-H bonds

Keywords: Native populations, near-infrared (NIR), blue and red maize, phenotypic variation.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz es el principal cultivo en México, se producen anualmente alrededor de 23 millones de toneladas anuales en aproximadamente 7.75 millones de hectáreas, de éstas el 78 % (6.03 millones) se siembran en condiciones de temporal. En Oaxaca se siembran anualmente más de 550 mil hectáreas de maíz, y en la región Mixteca más de 120 mil hectáreas con rendimientos promedio de $1.01 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, principalmente de maíz blanco y amarillo, en monocultivo y/o asociado con cucurbitáceas y leguminosas, predominantemente en condiciones de temporal (91.6 %) y un reducido porcentaje en parcelas de riego (SIAP, 2011). En el país, las estadísticas de superficie sembrada con maíz muestran que, la mayor producción de grano es en condiciones de temporal y que la mayoría (76.5 %) de los pequeños agricultores utilizan semilla que multiplican de sus propias poblaciones o variedades nativas, mientras que el resto, principalmente en la agricultura empresarial utilizan variedades mejoradas (Herrera *et al.*, 2002).

Los programas de mejoramiento genético en México se han dedicado a generar variedades mejoradas de maíz de grano blanco; sin embargo, las de granos azul o rojo no están en sus prioridades. Recientemente el maíz azul ha ganado terreno en el mejoramiento genético en diferentes regiones del país; aunque, estas poblaciones no cuentan con el respaldo de los consumidores y comercializadores porque se les castiga en los precios de venta (Arellano *et al.*, 2003; Urias-Peraldi *et al.*, 2013). Tampoco se cuenta con suficiente información documental acerca de las propiedades nutricionales y el valor cultural que ayuden a tomar

decisiones en favor de la conservación y aprovechamiento de las poblaciones nativas de grano azul y rojo.

En el sistema de producción tradicional, los agricultores cultivan superficies relativamente pequeñas de maíz, lo que ayuda y favorece la conservación *in situ* de una gran variabilidad genética de caracteres morfológicos, fisiológicos y genéticos. Esta variación está influenciada por los factores climáticos y edáficos naturales asociados a sus nichos agroecológicos de producción. Además, el agricultor ejerce fuertes presiones de selección para satisfacer las demandas de adaptación agroecológica y necesidades de uso asociadas a los aspectos económicos y culturales. Por ejemplo, existen tipos de maíces o granos que, de acuerdo al color, son utilizados para preparar platillos específicos y otros productos como tortillas, atoles, bebidas refrescantes (p. ej. pozol, tejate, etc.) y otras preparaciones, que en conjunto permiten darle variedad a la dieta familiar rural (Hernández *et al.*, 1985; Cazares *et al.*, 2005; Tuxill, 2005; Pool, 2007; Chambers y Momsen, 2007; Camacho, 2011; Ortega, 2003).

En años recientes ha despertado el interés en el estudio de maíces pigmentados, no solo para evaluar el rendimiento de grano y caracteres agronómicos (Arellano *et al.*, 2003) y su diversidad fenotípica (Espinosa-Trujillo *et al.*, 2006), sino desde la perspectiva nutricional y de tecnología de alimentos; por ejemplo, aislamiento y caracterización de almidón (Agama-Acevedo *et al.*, 2005; Agama-Acevedo *et al.*, 2011), acumulación de antocianinas en pericarpio y aleurona del grano pigmentado y sus efectos genéticos (Espinosa *et al.*, 2009), y contenido de proteína, lisina y triptófano en poblaciones nativas de maíz Mixteco (Vera-Guzmán *et al.*, 2012). El consumo de maíz azul, además de aportar nutrimentos, tiene efectos

benéficos en la salud humana (Alarcón-Aparicio *et al.*, 2010). Tanto el grano azul como el rojo, contienen antocianinas y carotenoides que generalmente se encuentran en la cutícula, aleurona y endospermo del grano (Salinas *et al.*, 1999). Las antocianinas están asociadas con alta capacidad antioxidante y efectos benéficos en la reducción de la presión arterial, colesterol y triglicéridos (Guzmán-Gerónimo *et al.*, 2011). Además poseen actividades biológicas antimutagénicas y anticancerígenas (Stintzing y Carle, 2004; Mazza, 2007; López-Martínez *et al.*, 2009, Aguilera *et al.*, 2011; López-Martínez y García-Galindo, 2009; López-Martínez *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010; Zilic *et al.*, 2012; Castillo-Nonato y Chávez-Mejía, 2013).

Wellhausen *et al.* (1951) clasificaron a la diversidad de maíz basándose en caracteres morfológicos y citogenéticos; Sánchez *et al.* (2000) y Mijangos-Cortés *et al.* (2007) utilizaron una combinación de caracteres morfológicos e isoenzimáticos; Hernández (1986) utilizó caracteres de composición del grano; McClintock *et al.* (1981) mediante nudos cromosómicos apoyaron la diferenciación y origen de las razas; y las técnicas moleculares basadas en secuencias de ADN han confirmado varios de los hallazgos previos en diferenciación racial (Reif *et al.*, 2006). No obstante, predomina la documentación de la diversidad inter e intraracial a través de caracteres agronómicos y morfológicos, complementados con análisis de taxonomía numérica (Ortega y Sánchez, 1989; Ortega *et al.*, 1991; Benz, 1986, 1997; Herrera *et al.*, 2000; Herrera-Cabrera *et al.*, 2004; Aragón *et al.*, 2006; Kato *et al.*, 2009; Vielle-Calzada y Padilla, 2009; Prasanna, 2012).

Por otro lado, surge la espectroscopía de infrarrojo cercano para la caracterización de plantas, alimentos, líquidos, compuesto y cualquier materia (líquida, sólida o semisólida) capaz de absorber diferentes longitudes de onda de luz infrarroja. Es una técnica que ayuda a

describir, discriminar y clasificar espectroscópicamente muestras con apoyo de la estadística-matemática o quimiometría (Putzig *et al.*, 1992; Cen y He, 2007; González-Martín *et al.*, 2010; Xiaobo *et al.*, 2010; Lavine y Workman, 2010; Tan *et al.*, 2012). No es un análisis de composición química, pero mediante la modelación y calibración multivariante, basada en espectros de absorbancia o transmitancia, tienen potencial de aplicación en la predicción de composiciones y discriminación de muestras. Por ejemplo, en maíz los análisis de infrarrojo cercano se han utilizado en predicciones de calidad de forraje (Montes *et al.*, 2006; Valenciaga *et al.*, 2006), predecir la composición del grano (Orman y Schumann, 1991; Baye *et al.*, 2006; Jiang *et al.*, 2007; Tallada *et al.*, 2009; Egesel y Kahriman, 2012; Dall'Asta *et al.*, 2012) e incluso la dureza (Williams *et al.*, 2009; Fox y Manley, 2009), contenido de almidón (Paulsen *et al.*, 2003), carotenoides (Brenna y Berardo, 2004), textura del endospermo (Manley *et al.*, 2009), rendimiento de etanol (Hao *et al.*, 2012) y apoya el mejoramiento genético mediante el análisis de gran número de muestras para la determinación de aceites y ácidos grasos (Preciado-Ortiz *et al.*, 2013), aminoácidos y proteínas (Rosales *et al.*, 2011). En recursos genéticos se ha utilizado en la caracterización de germoplasma de maíz (Berardo *et al.*, 2009) y en la descripción y clasificación de diferentes accesiones de trigo harinero de diferente origen geográfico (Roussel *et al.*, 2005) y condiciones de cultivo (Ferrio *et al.*, 2004).

En este contexto, en el presente trabajo se plantearon los objetivos de: describir y clasificar la variación fenotípica de una colección de poblaciones de maíz azul y rojo (i) mediante caracteres agromorfológicos, y (ii) con base en espectros de absorbancia de infrarrojo cercano de harinas de grano, en muestras obtenidas con agricultores e incrementadas por siembra y polinización controlada, todas originarias de la Mixteca alta oaxaqueña.

1.1 Bibliografía

- Agama-Acevedo, E., O. Marie-Astrid, F. Imad A, O. Paredes-López, J. Ortíz, L.A. Bello-Pérez. 2005. Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *Agrociencia* 39:419-429.
- Agama-Acevedo, E., Y. Salinas-Moreno, G. Pacheco-Vargas y L.A. Bello-Pérez 2011. Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 23:317-329.
- Aguilera O., M., M.C. Reza V., R.G. Chew M. y J.A. Meza V. 2011. Propiedades funcionales de las antocianinas. *Biotecnia* 13:16-22.
- Alarcón-Aparicio, E., T. Alarcón-Zavaleta, P. Gómez-López, J. Alvarado, R. Oliart-Ros, E. Aquino, R. Guzmán-Gerónimo and J.L. Chávez-Servia. 2010. Total polyphenols, total anthocyanins and antioxidant activity of blue maize (*Zea mays* L.). En: Fourth International Congress on Food Science and Food Biotechnology in Developing Countries, November 29-December 1, Boca del Río, Veracruz, Mexico.
- Aragón, F., S. Taba, J.M. Hernández, J.D. Figueroa, V. Serrano y F.H. Castro. 2006. Catálogo de Maíces de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.
- Arellano V., J. L., C. Tut C., A. María R., Y. Salinas M. y O.R. Taboada G. 2003. Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimientos de grano y caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:101-107.
- Baye, T.M., T.C. Pearson and A.M. Settles. 2006. Development of calibration to predict maize seed composition using single kernel near infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science* 43:236-246.
- Benz, B. F. 1986. Taxonomy and evolution of Mexican maize. Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin. 433 p.
- Benz, B. F. 1997. Diversidad y distribución prehispánica del maíz mexicano. *Arqueología Mexicana* 5: 16-23.
- Berardo, N., G. Mazzinelli, P. Valoti, P. Lagana and R. Redaelli. 2009. Characterization of maize germplasm for the chemical composition of the grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57:2378-2384.
- Brenna, O. V. and N. Berardo. 2004. Application of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to the evaluation of carotenoids content in maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52:5577-5582.
- Camacho V., T.C. 2011. Making milpa, making life in La Selva: A testimony how Tzeltal peasants perform maize cultivation practices in the Lacandon jungle, Mexico. Ph.D. Thesis, Graduate School of Social Sciences, Wageningen University. 232p.
- Castillo-Nonato, J. y C. Chávez-Mejía. 2013. Caracterización campesina del manejo y uso de la diversidad de maíces en San Felipe del Progreso, estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 10:23-38.
- Cazares S., E., V.M. Interian K., J.L. Chávez S., E. Sauri D., M. González M., M.E. Guadarrama M. y L. Latorunerie M. 2005. Recetas de las Mujeres de Yaxcabá, Yucatan, cocinadas con ingredientes locales. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, IDRC, Instituto Tecnológico de Mérida y Fundación PRODUCE-Yucatán. Mérida, México. 78 p.

- Cen, H and Y. He. 2007. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science and Technology* 18:72-83.
- Chambers, K.J. and J.H. Momsen. 2007. From the kitchen and the field: Gender and maize diversity I the Bajío region of Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography* 28:39-56.
- Dall'Asta, C., C. Falavigna, G. Galaverna and P. Battilani. 2012. Role of maize hybrids and their chemical composition in *Fusarium* infection and fumosin production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60:3800-3808.
- Egesel, C.Ö and F. Kahriman. 2012. Determination of quality parameters in maize grain by NIR reflectance spectroscopy. *Journal of Agricultural Science* 18:31-42.
- Espinosa T., E., M.C. Mendoza C., F. Castillo G., J. Ortiz C., A. Delgado A. y A. Carrillo S. 2009. Acumulación de antocianinas en pericarpio y aleurona del grano y sus efectos genéticos en poblaciones criollas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:303-309.
- Espinosa-Trujillo, E., M.C. Mendoza C. y F. Castillo G. 2006. Diversidad fenotípica entre poblaciones de maíz con diferentes grados de pigmentación *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2): 19 -23.
- Ferrio, J.P, E. Bertran, M.M. Nachit, J. Catala and J.L. Araus. 2004. Estimation of grain yield by near-infrared reflectance spectroscopy in durum wheat. *Euphytica* 137:373-380.
- Fox, G. and M. Manley. 2009. Hardness methods for testing maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemical* 57:5647-5657.
- González-Martín, I., J.M. Hernández-Hierro, S. Salvador-Esteban, C. González-Pérez, I. Revilla and A. Vivar-Quintana. 2010. Discrimination of seasonality in cheeses by near-infrared technology. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91:1064-1069.
- Guzmán-Gerónimo, R.I., T.M. Alarcón-Zavala, E. Silva-Hernández, J.E. Meza-Alvarado, S. Herrera-Meza, R.M. Oliart-Ros y J.L. Chávez-Servia. 2011. Polifenoles totales, antocianinas, actividad antioxidante de maíz azul y su efecto en ratas Wistar con síndrome metabólico inducido. In: 3er. Congreso Internacional de Biología, Química y Agronomía, Septiembre 28–Octubre 1 de 2011, Zapopan, México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Hao, X., K. Thelen and J. Gao. 2012. Prediction of the ethanol yield of dry-grind maize grain using near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering* 112:161-170.
- Hernández C., J.M. 1986. Estudio de caracteres químicos del grano de las razas mexicanas de maíz y clasificación racial. Tesis M.C., Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 79 p.
- Hernández X., E. 1985. Maize and man in the greater Southwest. *Economic Botany* 39:416-430.
- Herrera C., B.E., A. Macías L., R. Díaz R., M. Valadez R. y A. Delgado A. 2002. Uso de semilla criolla y caracteres de mazorca para la selección de semilla de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:17-23.
- Herrera C., B.E., F. Castillo C., J.J. Sánchez G., R. Ortega P. y M.M. Goodman. 2000. Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones nativas de maíz en una región: caso de la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:335-354.
- Herrera-Cabrera, B.E., F. Castillo-González, J.J. Sánchez-González, J.M. Hernández-Casillas, R.A. Ortega-Paczka y M.M. Goodman. 2004. Diversidad del maíz chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.

- Jiang, H Y., J. Zhu Y, Y.J. Zhu, M. Wei, L.R. Dai, J. M. Song, Y.L. Yan and S.J. Chen. 2007. Analysis of protein, starch and oil content of single intact kernels by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize (*Zea mays* L). *Journal Plant Breeding* 126:492-497.
- Kato, T.A., C. Mapes, L.M. Mera, J.A. Serratos y R.A. Bye. 2009. Origen y Diversificación del Maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- Lavine, B. and J. Workman. 2010. Chemometrics. *Analytical Chemistry* 82:4699-4711.
- Lee, C-H., H.S. Garcia and K.L. Parkin. 2010. Bioactivities of kernel extracts of 18 strains of maize (*Zea mays*). *Journal of Food Science* 75:667-672.
- López R., G., A. Santacruz V., A. Muñoz O., F. Castillo G., L. Córdova T. y H. Vaquera H. 2010. Perfil isoenzimático de maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. I. Caracterización de grupos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:1-10.
- López-Martínez, L.X. y H.S. García-Galindo. 2009. Actividad antioxidante de extractos metanólicos y acuosos de distintas variedades de maíz mexicano. *Nova Scientia* 3:51-65.
- López-Martínez, L.X., R.M. Oliart-Ros, G. Valerio-Alfaro, C-H. Lee, K.L. Parkin and H.S. García. 2009. Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *Food Science and Technology* 4:1187-1192.
- Manley, M., P. Williams, D. Nilsson and P. Geladi. 2009. Near infrared hyperspectral imaging for the evaluation of endosperm texture in whole yellow maize (*Zea mays* L.) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57:8761-8769.
- Mazza, G. 2007. Anthocyanins and health. *Ann. Inst. Super Sanita* 43:369-374.
- McClintock, B., T.A. Kato Y., and A. Blumenschein. 1981. Chromosome Constitution of Races of Maize. Its Significance in the Interpretation of Relationships between Races and Varieties in the Americas. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico. 517 p.
- Mijangos-Cortés, J.O., T. Corona-Torres, D. Espinosa-Victoria, A. Muñoz-Orozco, J. Romero-Peñalosa and A. Santacruz-Varela. 2007. Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Michoacan, Mexico and the Chalqueño complex. *Genetic Resources and Crop Evolution* 54:309-325.
- Montes, J.M., H.F. Utz, W. Schipprack, B. Kusterer, J. Muminovic, C. Paul and A.E. Melchinger. 2006. Near.infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters. *Plant Breeding* 125:591-595.
- Orman, B.A. and R.A. Schumann. 1991. Comparison of near-infrared spectroscopy calibration methods for the prediction of protein, oil, and starch in maize grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 39:883-886.
- Ortega P., R.A. y J.J. Sánchez G. 1989. Aportaciones al estudio de la diversidad de maíz en las partes altas de México. *Fitotecnia Mexicana* 12:105-119.
- Ortega P., R.A., J.J. Sánchez G., F. Castillo G. y J.M. Hernández C. 1991. Estado actual de los estudios sobre maíces nativos en México. En: R. Ortega, G. Palomino, F. Castillo, V.A. González y M. Livera (eds.), *Avances en el Estudio de los recursos Fitogenéticos de México*. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. pp: 161-185.
- Ortega, P. R. 2003. La diversidad del maíz en México. *In: G. Esteva y C. Marielle (Coord), Sin maíz no hay país*. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes Dirección General de Culturas Populares e Indígenas. pp: 123-154.

- Paulsen, M.R., L. O. Pordesimo, M. Singh, S.W. Mbuvi and B. Ye. 2003. Maize starch yield calibrations with near infrared reflectance. *Biosystems Engineering* 85:455-460.
- Pool P., M.J. 2007. La demanda y oferta de semillas de maíz (*Zea mays* L.) y los factores que influyen en la diversidad de variedades entre los agricultores de Sacaba y Yaxcabá, Yucatán. Tesis M.C. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán. 144 p.
- Prasanna, B.M. 2012. Diversity in global maize germplasm: Characterization and utilization. *Journal of Biosciences* 37:843-855.
- Preciado-Ortiz, R.E., S. García-Lara, S. Ortiz-Islas, A. Ortega-Corona and S.O. Serna-Saldivar. 2013. Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crop Research* 142:27-35.
- Putzig, C.L., M.A. Leugers, M.L. Mckelvy, G.E. Mitchell, R.A. Nyquist, R.R. Papenfuss, and L. Yurga. 1992. Infrared spectrometry. *Analytical Chemistry* 64:270-302.
- Reif, J.C., M. L. Warburton, X.C. Xia, D.A. Hoisington, J. Crossa, S. Taba, J. Muminovic, M. Bohn, M Frisch and A.E. Melchinger. 2006. Grouping of accessions of Mexican races of maize revisited with SSR markers. *Theoretical Applied and Genetics* 113:177-185.
- Rosales, A., L. Galicia, E. Oviedo, C. Islas and N. Palacio-Rojas. 2011. Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for protein, tryptophan, and lysine evaluation in quality protein maize (QPM) breeding programs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:10781-10786.
- Roussel, V., G. Branlard, J.C. Vézine, D. Berrand and F. Balfourier. 2005. NIRS analysis reveals temporal trends in the chemical composition of French bread wheat accessions cultivated between 1800 and 2000. *Journal of Cereal Science* 42:193-203.
- Salinas M., Y., M. Soto H., F. Martínez B., V. González H. y R. Ortega P. 1999. Análisis de antocianinas en maíces de grano azul y rojo provenientes de cuatro razas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 22:161-174.
- Sánchez G., J.J., M.M. Goodman and C.W. Stuber. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59.
- Servicio de Información Agroalimentaria (SIAP). 2011. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2011. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350 (revisado en abril 4, 2013).
- Stintzing, F.C. and R. Carle. 2004. Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science and Technology* 15:19-38.
- Tallada, J.G., N. Palacios-Rojas and P.R. Armstrong. 2009. Prediction of maize seed attributes using a rapid single kernel near. *Journal of Cereal Science* 50:381-387.
- Tan, S-M., R-M. Luo, Y-P. Zhou, H. Xu, D-D. Song, T. Ze, T-T. Yang and Y. Nie. 2012. Boosting partial least-squares discriminant analysis with application to near infrared spectroscopic tea variety discrimination. *Journal of Chemometrics* 26:34-39.
- Tuxill, J.D. 2005. Agrarian change and crop diversity in mayan milpas of Yucatan, Mexico. Ph. D. Thesis, Faculty of Graduate School, Yale University. 375 p.
- Urias-Peraldi, M., J.A. Gutiérrez-Urbe, R.E. Preciado-Ortiz, A.S. Cruz-Morales, S.O. Serna-Saldivar and S. García-Lara. 2013. Nutritional profiles of improved blue maize (*Zea mays*) hybrids for tropical regions. *Field Crop Research* 141:69-76.

- Valenciaga, D., E. Oliveira y S. Saliba. 2006. La espectroscopia de reflectancia en el infrarojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 40:259-267.
- Vera-Guzmán, A.M., J.L. Chávez-Servia y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Proteína, lisina y triptófano en poblaciones nativas de maíz mixteco. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(Esp. 5):7-13.
- Vielle-Calzada, J-P and J. Padilla. 2009. The Mexican landraces: Description, classification and diversity. In: J.L. Bennetzen and S.C. Hake (eds.), *Handbook of Maize: Its Biology*. Springer Science. pp: 543-561.
- Wellhausen, E.J., L.M. Roberts, E. Hernández X. y P.C. Mangelsdorf. 1951. Razas de Maíz de México, su Origen, Características y Distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F. 720 p.
- Williams, P., P. Geladi, G. Fox and M. Manley. 2009. Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Analytica Chimica Acta* 653:121-130.
- Xiaobo, Z., Z. Jiewen, M.J. W. Povey, M. Holmes and M. Hanpin. 2010. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy. *Analytical Chemical Acta* 667:14-32.
- Zilic, S. A. Serpen, G. Akillioglu, V. Gökmen and J. Vancetovic. 2012. Phenolic compounds, carotenoides, anthocyanins and antioxidant capacity of colored maize (*Zea mays* L.) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60:1224-1231.

CAPÍTULO II

PATRONES DE VARIACIÓN FENOTÍPICA EN POBLACIONES NATIVAS DE MAÍZ AZUL Y ROJO DE LA MIXTECA ALTA OAXAQUEÑA

2.1 Introducción

El maíz es el principal cereal cultivado en México, anualmente se producen más de 23 millones de toneladas, en aproximadamente 7.75 millones de hectáreas, 6.03 millones en condiciones de temporal. En Oaxaca se siembran anualmente más de 550 mil hectáreas de maíz, y en la región Mixteca más de 120 mil hectáreas con rendimientos promedio de 1.01 ton·ha⁻¹, principalmente de maíz blanco y amarillo, en monocultivo y/o asociado con cucurbitáceas y leguminosas, predominantemente en condiciones de temporal (91.6 %) y un reducido porcentaje en parcelas con riego (SIAP, 2011). Las estadísticas de superficie sembrada con maíz muestran que, la mayor producción de grano es en condiciones de temporal y generalmente con semilla que los pequeños agricultores multiplican de sus propias poblaciones o variedades nativas (76.5 %), y bajo porcentaje utilizan variedades mejoradas, regularmente en la agricultura empresarial (Herrera *et al.*, 2002).

Por décadas los programas públicos y privados de mejoramiento genético de maíz, que generan variedades mejoradas para cultivarse en México, liberan y promocionan el cultivo de maíces de grano blanco y en algunos casos de grano amarillo, y los azules o rojos no están en sus prioridades. Este hecho se corrobora con el listado de variedades mejoradas de maíz elegibles de certificación, > 90 % de grano blanco de un total de 978 inscritas en el catálogo nacional de variedades vegetales 2011 (Rosario, 2011). En estos últimos años ha cobrado

interés el mejoramiento de maíz azul y en baja proporción el de grano rojo (Arellano *et al.*, 2003; Urias-Peraldi *et al.*, 2013).

Los pequeños agricultores tradicionales conservan una gran diversidad de poblaciones de maíz que difieren en formas, tamaños y coloraciones de grano, mazorca, altura de planta, tiempo de siembra a floración y madurez fisiológica y de cosecha del grano, entre otros caracteres. Esa diversidad es parte de las opciones productivas para sortear la variabilidad climática y edáfica que se presentan en los nichos agroecológicos de producción, y de manera importante provee la materia prima para variar la dieta familiar; algunas formas, texturas y colores de grano están relacionados con la preparación de platillos específicos (Hernández *et al.*, 1985; Cazáres *et al.*, 2005; Tuxill, 2005; Pool, 2007; Chambers y Momsen, 2007; Camacho, 2011).

Los maíces de grano pigmentado han despertado interés en la tecnología de alimentos, nutraceutica, farmacología y salud. Los de grano azul poseen antocianinas y carotenos en el endospermo, aleurona y cutícula, compuesto asociados, principalmente antocianinas, con alta actividad antioxidante y propiedades funcionales para disminuir colesterol, reducir riesgos para adquirir cáncer, enfermedades coronarias, son antitumorales, antiinflamatorios y antidiabético (Stintzing y Carle, 2004; Mazza, 2007; Aguilera *et al.*, 2011; López-Martínez y García-Galindo, 2009; López-Martínez *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; Alarcón-Aparicio *et al.*, 2010; Guzmán-Gerónimo *et al.*, 2011; Alarcón *et al.*, 2011; Zilic *et al.*, 2012; Castillo-Nonato y Chávez-Mejía, 2013).

Arellano *et al.* (2003) evaluaron agrónomicamente 88 poblaciones de grano azul y 12 de grano rojo, originarias de los Valles Altos de Guanajuato, Querétaro, México, Tlaxcala y Puebla, y determinaron potenciales de rendimiento de 5.6 a 6.6 ton ha⁻¹, lo que indican que tienen igual potencial de rendimiento que los maíces blancos. Espinosa *et al.* (2010) evaluaron la aptitud combinatoria general y específica de algunas poblaciones nativas de maíz azul, y determinaron que la coloración de grano azul y rojo en el grano se acrecentó a medida que se combinan poblaciones con mayor intensidad de color. Por esta circunstancia, los agricultores manejan y siembra sus maíces de grano azul o rojo en parcelas independientes con el objetivo de mantener cierto grado de pureza de sus materiales y además la selección que ellos hacen se basa en lo observado, entonces, solo visualizan el color que se encuentra en el pericarpio y/o aleurona del grano (Espinosa *et al.*, 2009).

En Oaxaca son incipientes los trabajos sobre el entendimiento de los patrones de variación genotípica y fenotípica de las poblaciones de maíz azul y rojo, y casi nulo uso en el mejoramiento genético o aprovechamiento de esos recursos genéticos. En una colecta realizada por Aragón *et al.* (2006), determinaron que de 1,818 muestras solo 10.5 y 3.6 % correspondían a poblaciones de grano azul y rojo o naranja. En la Mixteca Alta, Chávez y Diego (2011), en una muestra de 116 hogares visitados, determinaron que la siembra de maíz azul y rojo representa el 20.2 y 17.8% de la superficie total sembrada, respectivamente. En este contexto, se planteó el objetivo de caracterizar y clasificar los patrones de variación fenotípica de una colección de poblaciones de maíces de grano azul y rojo originarias de la Mixteca alta oaxaqueña, con base en caracteres fisiológicos, de planta, espiga, mazorca y grano.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Colecta de muestras poblacionales

De enero a marzo de 2011, se colectaron 50 muestras poblacionales de maíz pigmentado en 22 agencias y comunidades de los municipios de San Miguel El Grande, San Esteban Atlatlahuca, Chalcatongo de Hidalgo, Santiago Yosondúa, Santa Catarina Yosonotú y Guadalupe Victoria del distrito de Tlaxiaco (Figura 1). Las comunidades y municipios donde se realizó la colecta, se ubican geográficamente entre $16^{\circ} 56' 47''$ y $17^{\circ} 3' 40''$ N, y de $97^{\circ} 31' 22''$ a $97^{\circ} 43' 45''$ O, a una altitud de 2020 a 2660 msnm. El clima es templado subhúmedo con oscilaciones térmicas de 16 a 22 °C y precipitaciones anuales de 550 a 2,177 mm (García, 1988).

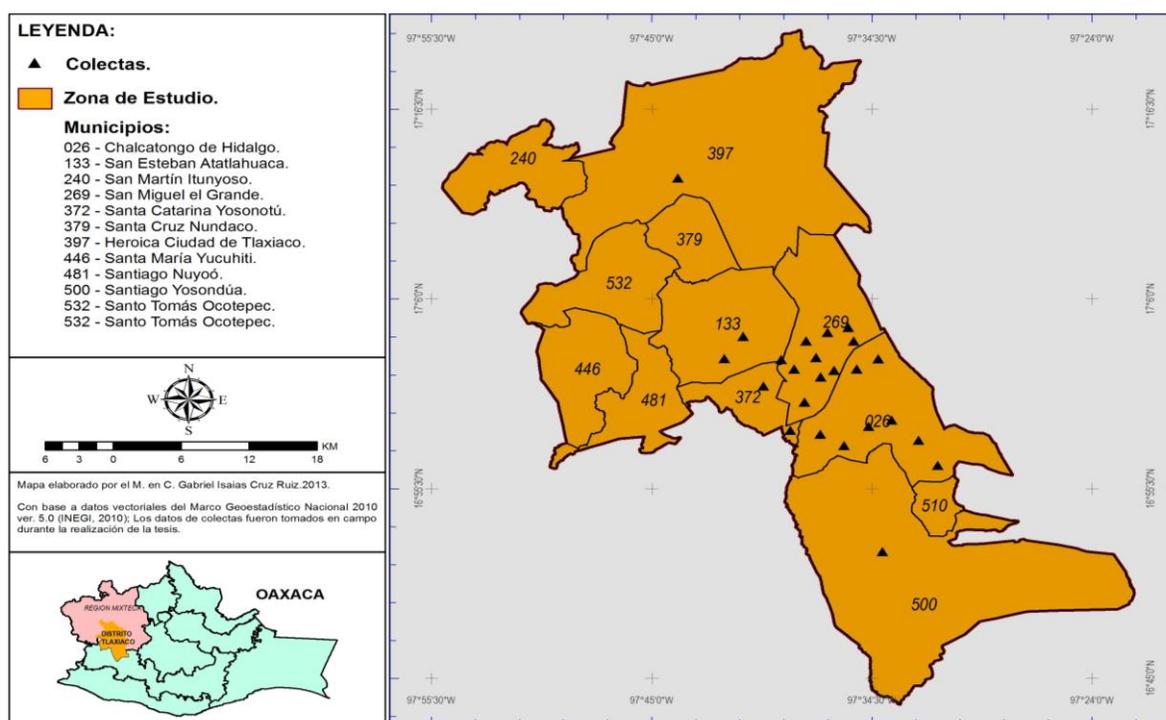


Figura 1. Localización del área de colecta de maíz pigmentado en 22 agencias del distrito de Tlaxiaco, Oaxaca.

Se colectaron 30 mazorcas por productor y en caso de no tener mazorcas, de 2 a 3 kg de grano. En total se obtuvo una colección de 32 poblaciones de maíz azul y 18 de rojo.

Durante la colecta se integró una base de datos pasaporte con información de: nombre del agricultor donante y georeferenciación de localidad de colecta, descripción de mazorca (peso, diámetro, largo y número de hileras) y grano (ancho, longitud, grosor y peso). El código de identificación de las colectas se formó con la primera letra del color de grano (R=rojo o A=azul) y un número consecutivo en orden ascendente (Cuadro 1).

2.2.2 Caracterización morfológica

Con el objetivo de describir la variabilidad fenológica y agromorfológica de la colección de maíz azul y rojo, se hizo una caracterización morfológica en Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, durante el ciclo primavera-verano de 2011, con base en los descriptores propuesto para maíz del IBPGR (1991). En campo se implementó un diseño de bloques completos al azar tanto para el grupo de colectas azules (32 colectas) como para la de rojos (18 colectas), con cinco y seis repeticiones, respectivamente. La unidad experimental consistió en dos surcos de cinco metros de largo cada uno, separados a 0.70 m, se sembraron cuatro semillas por mata a una distancia de 0.70 m. Durante el desarrollo del cultivo se aplicó la fórmula de fertilización 120-90-60; nitrógeno-fósforo-potasio. El sitio del experimento se encuentra a 2,380 msnm, 97° 22' 55" LN, 17° 33' 22" LO, presenta un clima templado subhúmedo con lluvias de mayo a septiembre. La selección de variables a evaluar se basó en los trabajos de Sánchez *et al.* (1993), Herrera *et al.* (2000), Sánchez *et al.* (2000), Chávez-Servia *et al.* (2011), Chávez y Diego (2011), Diego *et al.* (2012) y Chávez-Servia *et al.* (2012). Se incluyeron 20 variables fenológicas y morfológicas de planta, mazorca, grano y espiga, más el rendimiento de grano por parcela experimental. Este último se ajustó al 14% de humedad.

Cuadro 1. Origen de las colectas poblacionales de maíz azul y rojo, en el distrito de Tlaxiaco, Oaxaca.

Colecta	Origen de la muestra (agencia, municipio)	Altitud (m)	Latitud (N)	Longitud (O)
A-01	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07"	97° 35' 14"
A-02	Abasolo, Chalcatongo de Hidalgo	2580	16° 59' 17"	97° 33' 34"
A-03	Reforma, Chalcatongo de Hidalgo	2640	16° 56' 47"	97° 31' 22"
A-04	Imperio, Santiago Yosondua	2280	16° 58' 43"	97° 38' 24"
A-05	Aldama, Chalcatongo de Hidalgo	2240	16° 57' 53"	97° 35' 50"
A-06	Chapultepec, Chalcatongo de Hidalgo	2520	16° 58' 57"	97° 34' 40"
A-07	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17"	97° 37' 43"
A-08	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
A-09	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
A-10	Iturbide, San Miguel El Grande	2480	17° 03' 40"	97° 35' 22"
A-11	Hidalgo, San Miguel El Grande	2500	17° 04' 25"	97° 35' 38"
A-12	Guadalupe Victoria, San Miguel El Grande	2480	17° 04' 08"	97° 36' 37"
A-13	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07"	97° 38' 12"
A-14	Benito Juárez, San Esteban Atlatlahuca	2400	17° 02' 38"	97° 38' 50"
A-15	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
A-16	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
A-17	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
A-18	Santa Catarina Yosonotu	2260	17° 01' 10"	97° 39' 40"
A-19	San Esteban Atlatlahuca	2450	17° 03' 55"	97° 40' 38"
A-20	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
A-21	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
A-22	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
A-23	El Ojite, Tlaxiaco	2020	17° 12' 41"	97° 43' 45"
A-24	San Esteban Atlatlahuca	2450	17° 03' 55"	97° 40' 38"
A-25	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07"	97° 35' 14"
A-26	Cañada Morelos, Chalcatongo de Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"
A-27	Cañada Morelos, Chalcatongo De Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"
A-28	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40"	97° 36' 57"
A-29	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45"	97° 37' 10"
A-30	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40"	97° 36' 57"
A-31	Guerrero Grande, San Esteban Atlatlahuca	2520	17° 02' 42"	97° 41' 32"
A-32	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45"	97° 37' 10"
R-01	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07"	97° 35' 14"
R-02	Allende, Chalcatongo de Hidalgo	2660	16° 58' 10"	97° 32' 17"
R-03	Imperio, Santiago Yosondua	2280	16° 58' 43"	97° 38' 24"
R-04	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
R-05	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07"	97° 38' 12"
R-06	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07"	97° 38' 12"
R-07	Benito Juárez, San Esteban Atlatlahuca	2400	17° 02' 38"	97° 38' 50"
R-08	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17"	97° 37' 43"
R-09	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40"	97° 36' 57"
R-10	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 36' 18"
R-11	Yucunicuca, Santa Catarina Yosonotu	2400	16° 58' 43"	97° 38' 24"
R-12	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
R-13	Guerrero Grande, San Esteban Atlatlahuca	2520	17° 02' 42"	97° 41' 32"
R-14	Benito Juárez, San Esteban Atlatlahuca	2400	17° 02' 38"	97° 38' 50"
R-15	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17"	97° 37' 43"
R-16	Cañada Morelos, Chalcatongo de Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"
R-17	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40"	97° 36' 57"
R-18	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45"	97° 37' 10"

2.2.3 Análisis estadísticos

Con el objetivo de probar las diferencias significativas entre colectas de maíces azules y rojos, se hizo un análisis de varianza mediante el modelo lineal de bloques al azar. Las variables longitud del pedúnculo, ramificaciones primarias y secundarias de la espiga, longitud de la parte ramificada de la espiga y rendimiento, se transformaron con la expresión $\sqrt{x + 1}$, para obtener un ajuste a la normalidad.

Se hizo una descripción de la variación fenotípica mediante el análisis de componentes principales por el método de varianzas y covarianzas, a partir de una matriz de medias estandarizadas con el valor máximo de cada variable, y sin considerar el rendimiento de grano. En este análisis se determinaron las variables de mayor valor descriptivo de la varianza total. Posteriormente, con la matriz de datos de variables de mayor valor descriptivo, se hizo un análisis de conglomerados de agrupamiento jerárquico por el método de la media no ponderada (UPGMA, acrónimo en inglés). Finalmente, con los grupos formados en el análisis de conglomerados, se evaluó la diferencia entre grupos mediante un análisis de varianza y una comparación de medias de grupos por el método de Tukey ($P \leq 0.05$). Todo los análisis se hicieron con el paquete estadístico SAS (SAS inc., 2009).

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Variación fenotípica en poblaciones de grano azul

En el análisis de varianza se determinaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre colectas para todas las variables evaluadas, excepto en peso de mil granos (Cuadro 2). Esto último indica semejanza en densidad de grano entre colectas. El análisis de varianza reflejó

que las poblaciones difieren en uno o más caracteres; esto es, entre productores de maíz azul, las colectas o poblaciones, aunque de semejante color de grano, son diferentes fenotípicamente. El coeficiente de variación varió de 6.2 a 28.0%.

Cuadro 2. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza y variación en 21 caracteres evaluados en 32 muestras poblacionales nativas de maíz azul. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.

Caracteres descriptivos evaluados	Cuadrado Medio	Mín.	Máx.	Media	CV (%)
Altura de planta (m)	2.29**	1.94	3.10	2.6	11.0
Altura de mazorca (m)	1.56**	0.98	1.94	1.5	16.2
Número de ramas primarias en la espiga	2.78**	1.7	3.1	2.5	24.2
Número de ramas secundarias en la espiga	2.38**	1.1	1.9	1.6	28.0
Longitud de la parte ramificada de la espiga (cm)	2.43**	1.9	3.2	2.5	20.3
Longitud de pedúnculo en la espiga (cm)	1.67**	3.7	4.4	4.1	15.4
Longitud total de espiga (cm)	263.30**	29.2	40.0	36.5	14.1
Días a floración masculina	96.37**	78.0	99.0	87.1	6.2
Días a floración femenina	139.17**	81.3	106.2	93.8	6.3
Longitud de mazorca (cm)	38.44**	11.1	15.3	13.3	13.1
Diámetro la mazorca (cm)	1.47**	4.0	4.8	4.3	8.6
Número de hileras en la mazorca	19.82**	11.6	14.6	13.3	15.4
Número de granos por hilera	161.84**	22.7	30.7	27.0	16.1
Diámetro de olote (mm)	2.08**	1.6	2.6	2.2	11.1
Diámetro de raquis (mm)	0.78**	0.8	1.3	1.0	18.9
Longitud de grano (mm)	0.01*	12.5	15.0	13.8	6.7
Ancho de grano (mm)	0.01**	7.8	9.9	8.9	7.6
Grosor de grano (mm)	<0.01*	4.3	5.0	4.6	7.7
Peso de 1000 granos (g)	2756.15 ^{NS}	294.8	410.2	341.8	13.0
Volumen de 1000 granos	5150.49**	387.0	532.0	453.0	9.4
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	0.56**	4.73	12.27	8.7	15.4

^{NS}No significativo (P > 0.05); *significativo a P < 0.05; **significativo a P < 0.01; CV = coeficiente de variación.

En el análisis de componentes principales se determinó que altura de planta y mazorca, número de ramas primarias, secundarias y longitudes de la parte ramificada y del pedúnculo de la espiga, diámetro de raquis, olote y mazorca, fueron las variables de mayor valor explicativo de la varianza fenotípica total evaluada en 32 poblaciones de maíz azul (Figura 2). Al tercer componente principal se explicó 87.5% de la varianza total. Esto es, los caracteres

descriptivos de planta, espiga y mazorca son relevantes para describir y diferenciar las poblaciones nativas de maíz azul que se cultiva en la región comprendida por los municipios de Chalcatongo, San Miguel El Grande, San Esteban Atlatlahuca, Santa Catarina Yosonotu y Santiago Yosondua, Oaxaca.

En la Figura 2 se muestran diferentes patrones de variación fenotípica en función del origen de las colectas. Por ejemplo, las muestras de San Miguel El Grande se diferencian del resto, por la variación en días a floración femenina, diámetro de olote y características de espiga principalmente. Esto hace que se ubiquen en el cuadrante I y III, en orden del movimiento de las manecillas del reloj. En contraposición, las colectas originarias del municipio de Chalcatongo se localizan, esencialmente, en los cuadrantes II y III, y obedecen a la variabilidad de características de espiga, altura de mazorca y planta. Es de resaltar una muestra de San Miguel que fue la más precoz (78 días a floración masculina), y en general las muestras de San Esteban fueron altas (> 2.7 m de altura de planta) y tardías (> 91 días a floración masculina). Los resultados muestras que a través del tiempo, los agricultores consientes y probablemente sin una selección sistemática, han provocado divergencias fenotípicas y genotípicas en sus poblaciones cultivadas de maíz, como se ha demostrado en otros trabajos sobre análisis de diversidad genética en poblaciones nativas (Pressoir y Berthaud, 2004a b; Hayano-Kanashiro *et al.*, 2009; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2012).

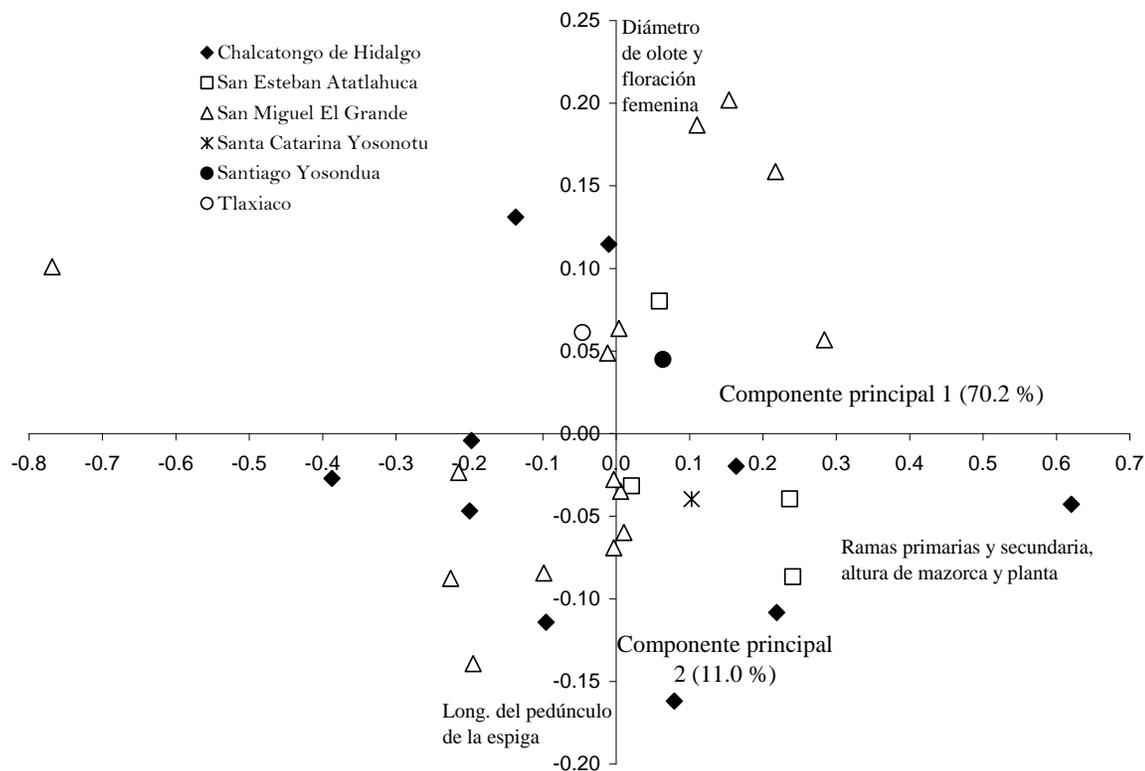


Figura 2. Dispersión de 32 poblaciones de maíz azul, con base en los dos primeros componentes principales y municipio de origen de la colecta.

Los resultados aquí mostrados complementan los trabajos de Chávez-Servia *et al.* (2012), Chávez-Servia y Diego-Flores (2011) y Chávez-Servia *et al.* (2011) sobre la descripción de la variación fenotípica de las poblaciones de maíz en la Mixteca alta oaxaqueña, confirman que los caracteres de planta, espiga, mazorca, grano y días a floración, son determinantes en la diferenciación de la diversidad de poblaciones nativas de maíz en la región. La variación fenotípica descrita también hacen referencia al intercambio de semilla entre agricultores vecinos y al flujo genético que tiene lugar a través del polen. Existen patrones de variación determinados por la forma y tamaño de mazorca, altura de planta y características del grano que, Wellhausem *et al.* (1951), Benz (1986) y Aragón *et al.* (2006) clasificaron en las razas Cónico, Mixteco y Chalqueño, entre otras. Recientemente Chávez-Servia *et al.* (2011) a ese

conjunto de razas los denominan complejos raciales, debido a que no es posible diferenciar fenotípica y claramente la pertenencia de cada una de las poblaciones a una raza en particular.

En el análisis de conglomerados se determinaron tres grupos fenotípicos significativamente diferentes (pseudo $F = 11.9$, $P < 0.05$), con un coeficiente de determinación mayor a 0.9, (Figura 3). El grupo I, está constituido por 29 colectas, que se caracterizadas por plantas de ciclo intermedio y porte medio. El grupo I se diferenció en dos grandes subgrupos uno con espigas menos ramificadas (Ia) y otro (Ib) con espigas muy ramificadas y grandes. El grupo II se integró por dos colectas precoces a la floración y de porte bajo. Finalmente el grupo III se conformó por una de las colectas más tardías, de plantas altas, grano ancho y de alta densidad (Figura 3 y Cuadro 4).

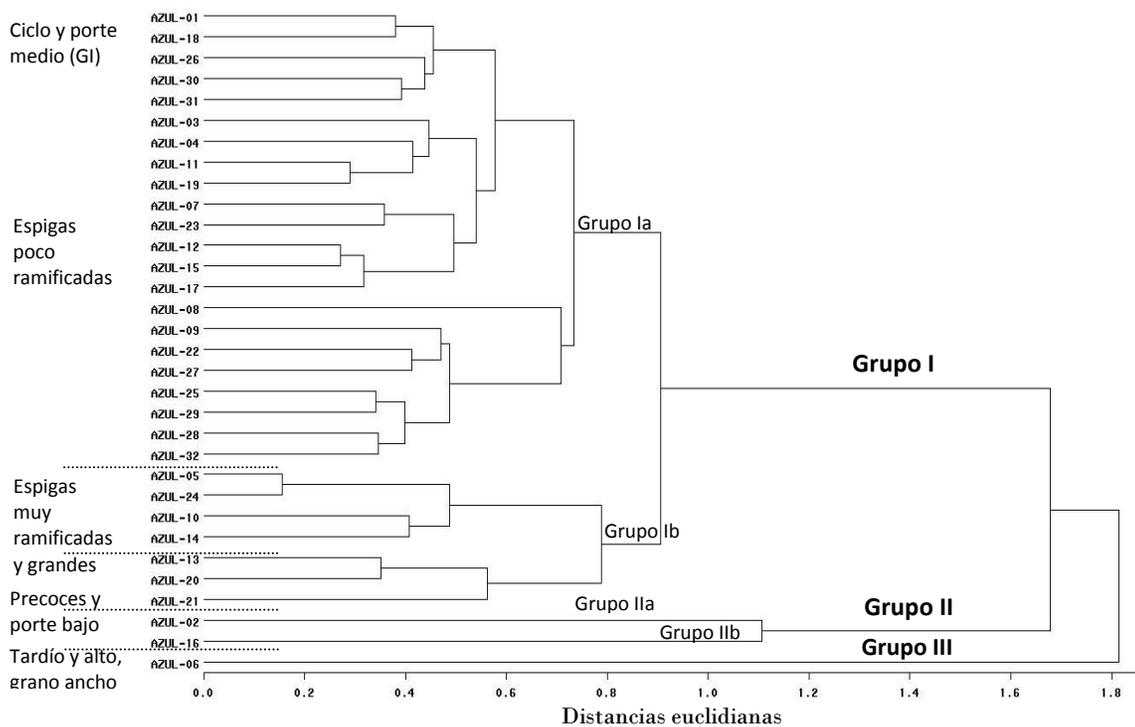


Figura 3. Dendrograma de agrupamiento jerárquico de 32 muestras poblacionales de maíz Mixteco azul, con base en distancias euclidianas.

El análisis de conglomerados confirma que, las características de planta, mazorca, grano y espiga son relevantes para diferenciar patrones fenotípicos de diversidad morfológica de maíces azules, en la región comprendida por los municipios de Chalcatongo de Hidalgo, San Miguel El Grande, San Esteban Atatlahuca, Tlaxiaco, Santiago Yosondua y Santa Catarina Yosonotu, Oaxaca.

Cuando se realizó el análisis de varianza entre grupos fenotípicos, se determinaron diferencias significativas en todas las variables evaluadas, excepto en diámetro de mazorca, número de hileras, diámetro de olote y raquis, longitud de grano y peso de mil granos. Las diferencias en rendimiento entre grupos (Cuadro 3) también fueron estadísticamente significativas ($P < 0.05$).

Cuadro 3 Cuadrados medios del análisis de varianza de grupos fenotípicos para 21 variables fenológicas, morfológicas y rendimiento de grano en maíz azul. Tooxi, Santo Domingo Yanhuatlán, primavera-verano 2011.

VARIABLES EVALUADAS	Grupo fenotípico	Colecta (grupo)	C.V. (%)
Días a floración masculina	527.17**	67.42**	6.2
Días a floración femenina	819.59**	93.24**	6.3
Altura de planta (m)	18.54**	1.22*	11.0
Altura de mazorca (m)	13.24**	0.76 ^{NS}	16.2
Número de ramas primarias en la espiga	22.6**	1.50 ^{NS}	24.2
Número de ramas secundarias en la espiga	9.32**	0.39**	16.4
Longitud de la parte ramificada en la espiga (cm)	21.36**	1.14**	20.3
Longitud del pedúnculo de la espiga (cm)	3.24**	1.58**	15.4
Longitud total de espiga (cm)	1463.75**	185.33**	14.1
Longitud de mazorca (cm)	114.29**	34.23**	13.1
Diámetro de mazorca (cm)	1.23 ^{NS}	1.49**	8.6
Número de hileras en la mazorca	5.83 ^{NS}	20.27*	15.4
Número de granos por hileras en la mazorca	658.51**	129.45*	16.1
Diámetro de olote (mm)	1.32 ^{NS}	2.14*	11.1
Diámetro de raquis (mm)	0.49 ^{NS}	0.81*	18.9
Longitud de grano (mm)	0.01 ^{NS}	0.01*	6.7
Ancho de grano (mm)	0.04**	<0.01*	7.6
Grosor de grano (mm)	0.002**	0.001 ^{NS}	7.7
Peso de 1000 granos (g)	6081.93 ^{NS}	2512.47 ^{NS}	13.0
Volumen de 1000 granos	13874.17**	4426.54**	9.4
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	1.79**	0.48**	15.4

^{NS}No significativo ($P > 0.05$); *significativo a $P < 0.05$; **significativo a $P < 0.01$; C.V.= coeficiente de variación.

La variación fenotípica distintiva entre grupos mostró una relación directa entre días a floración masculina y femenina con altura de mazorca y planta. El grupo II presentó porte bajo; de 1.9 a 2.2 m en altura de planta, 1.0 a 1.1 m en altura de mazorca, de 78 a 85 días a floración masculina y femenina. En el grupo I se registró un comportamiento intermedio con promedios dentro de un intervalo de 86.9 a 98.1 días a floración masculina y femenina, altura de mazorca de 1.4 a 1.6 m y de 2.6 a 2.8 m en altura de planta. En contraste, el grupo III fue tardío a la floración con promedios de 97.6 a 106.2 días, hasta 1.9 m y 3.1 m en altura de mazorca y planta, respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Promedios por grupo fenotípico en 21 variables fenológicas, morfológicas y rendimiento de grano en maíz azul. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.

Variables evaluadas	Grupos fenotípicos (Figura 3)				
	Ia (22)	Ib (7)	Ila (1)	Ilb (1)	III (1)
Días a floración masculina	86.9 b	91.1 b	80.8 c	78.0 c	97.6 a
Días a floración femenina	92.2 b	98.1 b	85.0 c	81.3 c	106.2 a
Altura de planta (m)	2.6 b	2.8 b	2.2 c	1.9 c	3.1 a
Altura de mazorca (m)	1.4 b	1.6 b	1.1 c	1.0 c	1.9 a
Long. de la parte ramificada de espiga (cm)	17.4 a	16.5 a	18.3 b	14.8 b	14.4 c
Número de ramas primarias en la espiga	6.4 b	7.4 b	4.6 c	3.7 c	10.6 a
Número de ramas secundarias en la espiga	36.2 b	38.1 b	31.9 c	29.2 c	38.4 a
Longitud de pedúnculo en la espiga (cm)	6.6 b	8.1 b	4.8 b	3.0 b	10.0 a
Longitud total de espiga (cm)	1.7 a	2.1 a	1.1 b	0.1 b	3.2 a
Longitud de mazorca (cm)	13.2 a	14.0 a	12.5 b	11.1 b	14.3 a
Diámetro de mazorca (cm)	4.3 a	4.5 a	4.2 a	4.2 a	4.2 a
Número de hileras por mazorca	13.2 a	13.5 a	14.0 a	13.0 a	13.0 a
Número de granos por hilera en la mazorca	26.9 a	27.7 a	24.3 b	22.7 b	29.6 a
Diámetro de olote (mm)	2.1 a	2.4 a	2.1 a	1.8 a	2.2 a
Diámetro de raquis (mm)	1.0 a	1.2 a	1.0 a	0.9 a	1.1 a
Longitud de grano (mm)	13.8 a	13.6 a	13.7 a	15.1 a	13.7 a
Ancho de grano (mm)	8.8 a	9.1 a	8.1 b	7.8 b	8.9 a
Grosor de grano (mm)	4.6 a	4.7 a	5.1 a	4.5 a	4.4 b
Peso de 1000 granos (g)	337.4 a	363.9 a	320.2 a	307.7 a	306.8 a
Volumen de 1000 granos (ml)	450.7 a	473.9 a	411.4 a	441.7 a	387.0 b
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	8.6 a	9.2 a	6.4 b	4.7 b	10.9 a

[†]En hilera, medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, P < 0.05).

El grupo precoz y de porte bajo (II) también presentó los menores valores en número de ramas primarias y secundarias de la espiga, longitud de espiga y mazorca, granos por hilera, ancho de

grano y rendimiento. El grupo I se distingue por intermedio número de ramas primarias (6.4 a 7.4) y secundarias (36.2 a 38.1), y difiere significativamente del grupo III por que presentó los mayores valores en ramas primarias (10.6) y secundarias (38.4). El grupo III, entre su principales características fue la menor longitud de la parte ramificada (14.4 ramas), menor grosor de grano (4.4 mm) y consecuentemente bajo volumen de 1000 granos (387 ml), Cuadro 4.

2.3.2 Variación fenotípica en poblaciones de grano rojo

En las poblaciones de maíz con grano rojo, se detectaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en altura de planta y mazorca, número de ramas primarias de la espiga, días a floración masculina y femenina, número de granos por hilera en la mazorca, diámetros de olote y raquis. En este caso, entre las 18 poblaciones de maíz no hubo diferencias en rendimiento, características de grano, mazorca y espiga (Cuadro 5). Esto indica una reducida variabilidad fenotípica representada en la colección evaluada. Los maíces de grano rojo se encuentran en baja frecuencia en la Mixteca, como se evidenció en el trabajo de Chávez y Diego (2011) y en la colecta de germoplasma realizada por Aragón *et al.* (2006). Los resultados también sugieren que las poblaciones de grano rojo están amenazadas porque regionalmente se privilegia el cultivo de maíz blanco como consecuencia de la facilidad en la venta o es reducida su variabilidad genética, y particularmente en este trabajo, no se lograron distinguir diferencias fenotípicas entre poblaciones.

La variación fenotípica detectada entre las poblaciones respecto a altura de mazorca (de 1.2 a 1.84 m) y planta (2.34 a 3.05 m), días a floración masculina (83.0 a 96.3 días) y femenina (87.7 a 102.5 días), muestra que el ambiente de la región de origen de las colectas (p. ej. estacionalidad corta de lluvias y presencia de heladas) ha ejercido una presión de selección

natural y también la selección por caracteres de mazorca que hacen año con año los agricultores, antes de la siembra, han modificado la poblaciones cultivadas (Cuadro 5). En campo es notoria la diferencia entre poblaciones de ciclo corto y porte bajo, en relación a las de ciclo largo y altura intermedia o tardía con porte alto. Esta modificación en los patrones de variación fenotípica y genética, también se ha documentado en poblaciones de maíz de los Valles Centrales de Oaxaca (Soleri y Cleveland, 2001; Pressoir y Bethaud, 2004b). Además se ha demostrado que las presiones de selección que ejercen las condiciones climáticas son determinantes para diferencia poblaciones entre y dentro de razas de maíz (Ruiz-Corral *et al.*, 2008; Mercer *et al.*, 2008).

Cuadro 5. Significancia de cuadrados medios del análisis de varianza y variación de 21 caracteres fenológico, morfológicos y rendimiento de grano de 18 poblaciones nativas de maíz rojo. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.

VARIABLES EVALUADAS	Cuadrado Medio	Mín.	Máx.	Media	CV (%)
Altura de planta (m)	2.66**	2.34	3.05	2.7	11.8
Altura de mazorca (m)	1.70**	1.20	1.84	1.4	16.9
Número de ramas primarias en la espiga	3.34**	2.4	3.4	2.7	23.4
Número de ramas secundarias en la espiga	0.26 ^{NS}	1.5	1.8	1.7	17.4
Longitud de la parte ramificada de la espiga (cm)	1.24 ^{NS}	2.5	3.0	2.7	19.6
Longitud del pedúnculo en la espiga (cm)	0.57 ^{NS}	3.6	4.1	3.9	17.2
Longitud total de espiga (cm)	143.50 ^{NS}	33.8	41.6	38.2	14.3
Días a floración masculina	86.25**	83.0	96.3	90.0	5.0
Días a floración femenina	105.43**	87.7	102.5	95.6	5.7
Longitud de mazorca (cm)	24.26 ^{NS}	12.4	14.8	13.8	13.9
Diámetro de mazorca (cm)	16.19 ^{NS}	3.1	6.9	4.4	8.4
Número de hileras en la mazorca	28.77 ^{NS}	11.6	15.4	13.1	15.2
Número de granos por hilera	146.89*	24.2	31.5	28.2	16.9
Diámetro de olote (mm)	0.91**	1.1	2.6	2.3	10.3
Diámetro de raquis (mm)	0.40**	0.9	1.3	1.1	18.2
Longitud de grano (mm)	0.90 ^{NS}	12.6	14.1	13.3	5.6
Ancho de grano (mm)	0.72 ^{NS}	8.4	10.0	9.0	7.2
Grosor de grano (mm)	0.21 ^{NS}	4.1	4.9	4.5	8.3
Peso de 1000 granos (g)	2388.43 ^{NS}	304.5	401.5	334.6	14.5
Volumen de 1000 granos (ml)	5099.06 ^{NS}	384.0	540.0	434.8	14.2
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	0.17 ^{NS}	4.7	7.8	6.4	15.2

^{NS}No significativo (P > 0.05); *significativo a P < 0.05; **significativo P < 0.01; C.V.= coeficiente de variación

Con base en las variables donde se detectaron diferencias significativas entre poblaciones, se hizo un análisis descriptivo de componentes principales (CP). La varianza explicada

acumulada al tercer componente principal fue de 93.1%. En la Figura 4 se describe la dispersión de 18 poblaciones de grano rojo con base en la precocidad, altura de planta y mazorca, diámetro de olote y mazorca, número de ramas primarias de la espiga y número de granos por hileras en la mazorca. Las muestra originarias de Chalcatongo, San Esteban y San Miguel presentaron una gran variación en relación a altura de mazorca y planta, y días a floración. Por ejemplo, tres muestras de San Miguel fueron altas y tardías pero también hubo muestras de plantas bajas y precoces (proyección sobre el eje del CP1, Figura 4), patrón que se repite en algunas colectas de San Esteban y de Chalcatongo. Una muestra de San Esteban Atlatlahuca fue diferente a todas (parte inferior en el eje del CP2). Los resultados muestran que a pesar de similitudes en características de mazorca y grano en las poblaciones evaluadas, sus diferencias se detectan en caracteres de planta y espiga. Parte de las presiones de selección son las condiciones de cultivo; por ejemplo, se siembra maíz rojo solo en condiciones de temporal en San Esteban y San Miguel pero en Chalcatongo, Santiago y Santa Catarina a veces los maíces se siembran en el sistema de *cajete* y con riego.

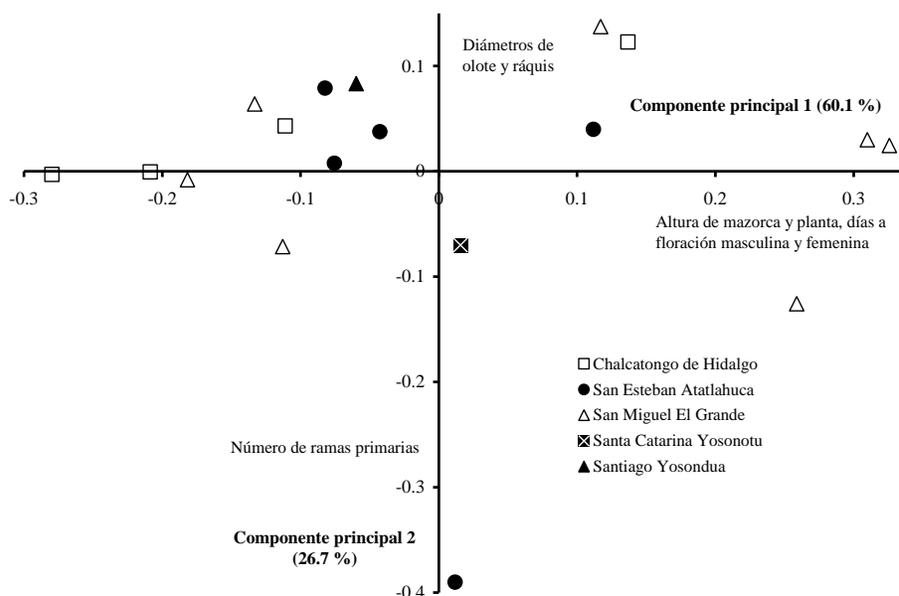


Figura 4. Dispersión de 18 poblaciones de maíz de grano rojo, con base en el origen de las muestras y diferencias en caracteres fisiológicos y morfológicos.

En el análisis de conglomerados se determinaron tres grupos de variación fenotípica y con diferencias significativas (pseudo $F=8.5$, $P < 0.05$) entre ellos. El grupo I se desagregó en dos subgrupos (Ia y Ib); el primero se integró por poblaciones con ciclo intermedio, porte intermedio de planta y espigas poco ramificadas y el segundo se diferenció por poseer espigas muy ramificadas y grandes, pero semejante al primero en días a floración y altura de planta. El tercer grupo (III) se caracterizó por dos subgrupos; el primero agrupo a dos poblaciones originarias de Chalcatongo y el segundo por una población de San Miguel que fueron tardíos y altos. Finalmente, el grupo II se integró por una población precoz y de porte bajo que fue colectada en el municipio de Chalcatongo (Figura 5). Estos resultados evidencian, con mayor precisión, los patrones de diferenciación fenotípica observados en el análisis de componentes principales descritos en la Figura 4.

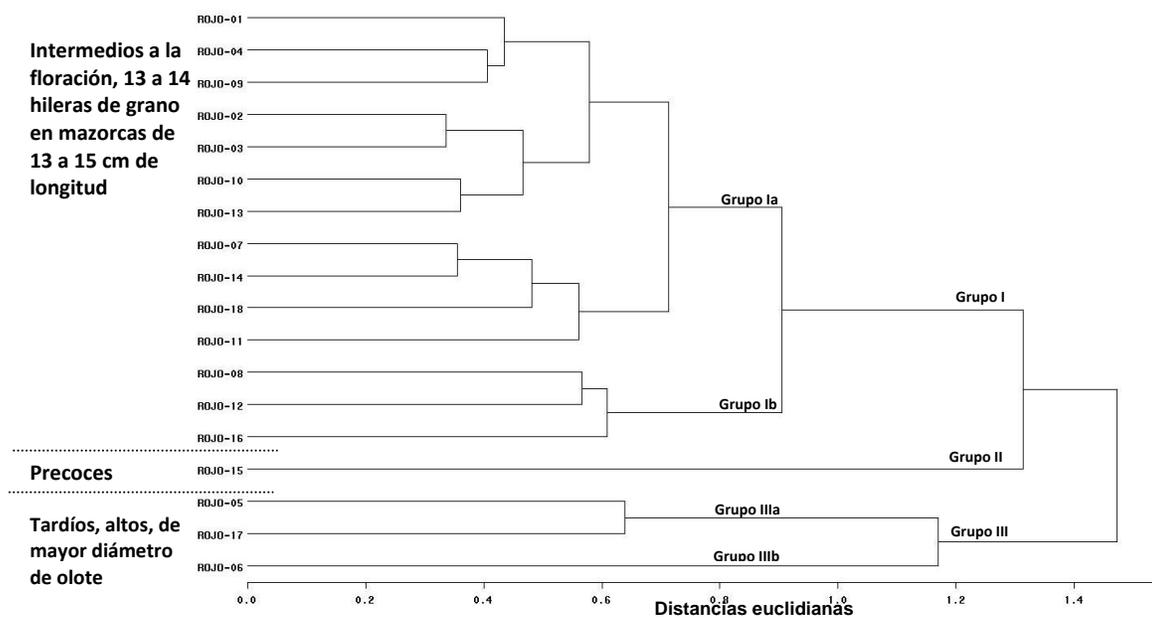


Figura 5. Dendrograma de agrupamiento jerárquico de 18 muestras poblacionales de maíz rojo de la Mixteca alta oaxaqueña, con base en caracteres fisiológicos y morfológicos de planta, espiga, mazorca y grano.

Un análisis de varianza permitió probar las diferencias entre grupos fenotípicos, y se determinó que para las variables número de ramas secundarias, longitud de pedúnculo y total de espiga, número de granos por hilera en la mazorca y grosor de grano, no hubo diferencias significativas entre grupos ($P > 0.05$); todas las demás variables mostraron diferencias como altura de planta y mazorca, ramas primarias, días a floración, longitud y diámetro de mazorca y rendimiento, entre otras. En contraposición, solo hubo diferencias significativas ($P < 0.05$) dentro de grupos (colecta anidada en grupos) en altura de mazorca, días a floración masculina y femenina, diámetro de olote y raquis (Cuadro 6).

Cuadro 6. Cuadrados medios del análisis de varianza de grupos poblacionales de maíz rojo, en relación a 21 variables fenológicas, morfológicas y rendimiento. Tooxi, Santo Domingo Yanhuítlán, primavera-verano 2011.

VARIABLES EVALUADAS	Grupo fenotípico	Colecta (grupo)	C.V. (%)
Altura de planta (m)	11.61**	1.54 ^{NS}	11.8
Altura de mazorca (m)	7.28**	1.02**	16.7
Longitud de la parte ramificada de la espiga (cm)	5.48**	0.64 ^{NS}	19.6
Número de ramas primarias de la espiga	21.00**	0.91 ^{NS}	23.4
Número de ramas secundarias en la espiga	0.72 ^{NS}	0.21 ^{NS}	17.4
Longitud del pedúnculo de espiga (cm)	1.75 ^{NS}	0.43 ^{NS}	17.2
Longitud total de espiga (cm)	216.78 ^{NS}	134.38 ^{NS}	14.3
Días a floración masculina	154.15**	78.13*	5.0
Días a floración femenina	267.82**	85.03**	5.7
Longitud de mazorca (cm)	61.01*	19.42 ^{NS}	13.9
Diámetro de mazorca (cm)	58.22**	11.35 ^{NS}	8.4
Número de hileras de la mazorca	73.76*	24.09 ^{NS}	15.2
Número de granos por hilera	42.41 ^{NS}	160.85 ^{NS}	16.8
Diámetro de olote (mm)	4.20**	0.52**	10.3
Diámetro de raquis (mm)	1.35**	0.28**	18.2
Longitud de grano (mm)	0.14 ^{NS}	0.99 ^{NS}	5.6
Ancho de grano (mm)	1.98*	0.54 ^{NS}	7.2
Grosor de grano (mm)	0.13 ^{NS}	0.23 ^{NS}	8.3
Peso de 1000 granos (g)	10958.41*	1237.27 ^{NS}	14.5
Volumen de 1000 granos	23749.71**	2707.61 ^{NS}	14.2
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	0.51*	0.13 ^{NS}	15.2

^{NS}No significativo ($P > 0.05$); *significativo a $P \leq 0.05$; ** significativo a $P \leq 0.01$; C.V.= coeficiente de variación.

Esto resultados dan cuenta de la diferenciación entre grupos más que dentro de grupos o bien que cada grupo es homogéneo pero diferente de los demás. En otras palabras, la selección

y manejo que dan los agricultores a sus poblaciones de maíz han generado patrones fenotípicos diferenciales como ha sido documentado por Soleri y Cleveland (2001) en los Valles centrales de Oaxaca, Perales *et al.* (2003a y b) en el estado de México y Morelos; Louette *et al.* (1997) en Jalisco y Aguirre-Gómez *et al.* (2000) en Guanajuato.

En la comparación de medias entre grupos de maíces de grano rojo, se observó que el grupo I es semejante en altura de mazorca y planta al grupo II pero se diferencia en menor número de ramas primarias en la espiga (7 a 8), un tamaño de mazorca intermedio (13.6 a 14.5 cm en longitud y 4.2 a 4.4 cm en diámetro), de 13.0 a 13.4 hileras de granos en la mazorca, y un diámetro de olote intermedio. El grupo II se diferenció en menor tamaño de mazorca (12.6 cm de largo, 4.0 cm de diámetro y 11.6 hileras de granos), menor diámetro de olote (2.0 cm) y raquis (0.9 cm), pero el más precoz a la floración masculina (85.3 días) y femenina (89.3 días). En el otro extremo se encuentra el grupo III, fue tardío a la floración masculina y femenina (93.1 a 96.3 días), mayor altura de planta (3.0 a 3.1 m) y mazorca (1.7 m), de olote grueso (2.4 a 2.6 cm de diámetro), mazorca de mayor diámetro (4.4 a 6.9 cm) y mayor número de hileras de granos en la mazorca (12.7 a 15.4 hileras), (Cuadro 7). Los resultados muestran que las poblaciones cultivadas de maíz rojo en la región de Chalcatongo-Yosondua-Santa Catarina, evaluadas en este trabajo, se diferenciaron en tres grupos fenotípico en relación al tiempo en alcanzar la floración masculina y femenina, altura de planta y mazorca, características de espiga, mazorca y olote, y con similar rendimiento de grano, experimentalmente de 5.9 a 7.8 ton•ha⁻¹ (Cuadro 7).

Cuadro 7. Promedios de 21 variables fenológicas, morfológica y rendimiento de grano en grupos fenotípicos de poblaciones de maíz rojo. Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, primavera-verano 2011.

Variables evaluadas	Grupos fenotípicos (Figura 5)				
	Ia (11)	Ib (3)	II (1)	IIIa (2)	IIIb (1)
Días a floración masculina	87.8 ab	95.1 ab	85.3 b	93.1 a	96.3 a
Días a floración femenina	93.4 ab	100.1 ab	89.3 b	100.6 a	102.0 a
Altura de planta (m)	2.5 b	2.9 b	2.4 b	3.0 a	3.1 a
Altura de mazorca (m)	1.3 b	1.6 b	1.3 b	1.7 a	1.7 a
Long. de la parte ramificada de la espiga (cm)	15.7 a	15.0 a	13.5 a	15.2 a	14.9 a
Número de ramas primarias de la espiga	7.1 b	7.6 b	8.2 a	9.1 a	8.5 a
Número de ramas secundarias en la espiga	37.6 a	39.3 a	36.9 a	39.0 a	41.6 a
Longitud del pedúnculo de la espiga (cm)	7.2 a	7.7 a	11.7 a	10.2 a	10.3 a
Longitud total de espiga (cm)	1.8 a	2.0 a	2.1 a	2.2 a	2.2 a
Longitud de mazorca (cm)	13.6 ab	14.5 ab	12.6 b	14.6 a	14.2 a
Diámetro de mazorca (cm)	4.2 ab	4.4 ab	4.0 b	4.4 a	6.9 a
Número de hileras en la mazorca	13.0 ab	13.4 ab	11.6 b	12.7 a	15.4 a
Número de granos por hilera	27.6 a	29.9 a	27.8 a	29.6 a	27.3 a
Diámetro de olote (cm)	2.3 b	2.3 b	2.0 c	2.4 a	2.6 a
Diámetro de raquis (cm)	1.1 a	1.2 a	0.9 b	1.2 a	1.3 a
Longitud de grano (mm)	13.3 a	13.5 a	13.1 a	13.1 a	13.6 a
Ancho de grano (mm)	9.0 a	8.8 a	8.9 a	9.4 a	10.0 a
Grosor de grano (mm)	4.5 a	4.5 a	4.3 a	4.5 a	4.6 a
Peso de 1000 granos (g)	327.6 a	327.1 a	324.3 a	359.2 a	401.5 a
Volumen de 1000 granos	424.4 a	422.5 a	425.0 a	467.8 a	540.0 a
Rendimiento (ton•ha ⁻¹)	5.9 a	6.8 a	6.2 a	7.8 a	6.7 a

[†]En hilera, medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, P < 0.05).

Los patrones de comportamiento poblacional de maíces nativos también ha sido documentado en Valles Alto o Meseta Central de México; por ejemplo, por Carballoso-Torrecilla *et al.* (1999), Antonio *et al.* (2004), Herrera-Cabrera *et al.* (2004) y Mijangos-Cortés *et al.* (2007) en poblaciones de la raza Chaqueño del Estado de México y Michoacán, Santa *et al.* (2008 y 2012) en maíz del altiplano central de Puebla, y por Diego-Flores *et al.* (2012) en maíces de la Mixteca baja oaxaqueña. En general, se argumenta que las razas de maíces cultivados en el Altiplano Central de México se han adaptado a condiciones restrictivas de variaciones en la estación de lluvias o sequía, presencia de heladas y baja fertilidad de suelos, por lo que, poseen características y patrones particulares de variación genética y fenotípica

(Sánchez *et al.*, 2000; Perales *et al.*, 2003b; Ruiz-Corral *et al.*, 2008; Mercer *et al.*, 2008; Kato *et al.*, 2009).

2.4 Conclusiones

Se determinaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre poblaciones de maíz azul y rojo, en uno o más caracteres de planta, espiga, mazorca y grano. La colección de maíces azules presentó una alta variabilidad en todos los caracteres no así la colección de grano rojo debido a que estas últimas fueron más homogéneas en caracteres de espiga, longitud y diámetro de mazorca y dimensiones de grano. En ambos casos los patrones de variación fenotípica dependen de la variabilidad en altura de planta y mazorca, días a floración masculina o femenina, y número de ramas de la espiga y en general presentaron asociación con las regiones de origen de las poblaciones.

En la colección de maíces azules se determinaron tres grupos significativamente diferentes ($P < 0.05$) y varían, esencialmente, en caracteres de altura de planta y mazorca, descripción de la espiga, ancho y grosor de grano. Entre grupos fenotípicos, el rendimiento de grano experimental fue de 4.7 a 10.9 ton•ha⁻¹.

Las poblaciones de grano rojo se agruparon en tres grupos fenotípicos significativamente diferentes ($P < 0.05$). Los grupos se diferenciaron por el tiempo en alcanzar la floración masculina o femenina, altura de planta y mazorca y caracteres de mazorca y olote. Entre grupos el rendimiento experimental de grano varió de 5.9 a 7.8 ton•ha⁻¹.

2.5 Bibliografía

- Aguilera O., M., M.C. Reza V., R.G. Chew M. y J.A. Meza V. 2011. Propiedades funcionales de las antocianinas. *Biocencia* 13:16-22.
- Aguirre-Gómez, J.A., M.R. Bellon and M. Smale. 2000. A regional analysis of maize biological diversity in southeastern Guanajuato, Mexico. *Economic Botany* 54:60-72.
- Alarcón-Aparicio, E., T. Alarcón-Zavaleta, P. Gómez-López, J. Alvarado, R. Oliart-Ros, E. Aquino, R. Guzmán-Gerónimo and J.L. Chávez-Servia. 2010. Total polyphenols, total anthocyanins and antioxidant activity of blue maize (*Zea mays* L.). En: Fourth International Congress on Food Science and Food Biotechnology in Developing Countries, November 29-December 1, Boca del Río, Veracruz, Mexico.
- Alarcón-Aparicio, E., R.I. Guzmán-Gerónimo, E.N. Aquino-Bolaños y J.L. Chávez-Servia. 2011. Actividad anticancerígena *in vitro* de extractos de maíz y tortilla azul. En: 3er. Congreso Internacional de Biología, Química y Agronomía, Septiembre 28–Octubre 1 de 2011, Zapopan, México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Antonio M., M., J.L. Arellano V., G. García de los S., S. Miranda C., J.A. Mejía C. y F.V. González C. 2004. Variedades criollas de maíz azul raza Chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:9-15.
- Aragón, F., S. Taba, J.M. Hernández, J.D. Figueroa, V. Serrano y F.H. Castro. 2006. Catálogo de Maíces de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.
- Arellano V., J. L., C. Tut C., A. María R., Y. Salinas M. y O.R. Taboada G. 2003. Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimientos de grano y caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:101-107.
- Benz, B. F. 1986. Taxonomic and evolution of Mexican maize. Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin. 433 p.
- Camacho V., T.C. Making milpa, making life in La Selva: A testimony how Tzeltal peasants perform maize cultivation practices in the Lacandon jungle, Mexico. Ph.D. Thesis, Graduate School of Social Sciences, Wageningen University. 232 p.
- Carballoso-Torrecilla, V., A. Mejía-Contreras, S. Valderrama-Castro, A. Carballo-Carballo y F.V. González-Cossío. 1999. Divergencia en poblaciones de maíz nativas de Valles Altos de México. *Agrociencia* 34:167-174.
- Castillo-Nonato, J. y C. Chávez-Mejía. 2013. Caracterización campesina del manejo y uso de la diversidad de maíces en San Felipe del Progreso, estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 10:23-38.
- Cazares S., E., V.M. Interian K., J.L. Chávez S., E. Sauri D., M. González M., M.E. Guadarrama M. y L. Latorunerie M. 2005. Recetas de las Mujeres de Yaxcabá, Yucatan, cocinadas con ingredientes locales. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, IDRC, Instituto Tecnológico de Mérida y Fundación PRODUCE-Yucatán. Mérida, México. 78 p.
- Chambers, K.J. and J.H. Momsen. 2007. From the kitchen and the field: Gender and maize diversity I the Bajío region of Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography* 28:39-56.
- Chávez S., J.L y P. Diego F. 2011. Familias campesinas y variación fenotípica de poblaciones nativas de maíz en la región de Tlaxiaco, Oaxaca. *Desarrollo, Ambiente y Cultura* 1:28-38.

- Chávez-Servia, J. L., P. Diego-Flores y C.J. Carrillo-Rodríguez. 2011. Complejos raciales de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huemlulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai* 7:107-115.
- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Variación fenotípica de una muestra de maíces de la región Chalcatongo de Hidalgo, Oaxaca. *Ciencia Ergo Sum* 18: 251-257.
- Diego-Flores, P., J.L. Chávez-Servia, J.C. Carrillo-Rodríguez y F. Castillo-González. 2012. Variabilidad en poblaciones de maíz nativo de la Mixteca baja oaxaqueña, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 44:157-171.
- Espinosa T., E., M.C. Mendoza C., F. Castillo G., J. Ortiz C., A. Delgado A. y A. Carrillo S. 2009. Acumulación de antocianinas en pericarpio y aleurona del grano y sus efectos genéticos en poblaciones criollas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:303-309.
- Espinosa T., E., M.C. Mendoza C., F. Castillo G., J. Ortiz C. y A. Delgado A. 2010. Altitud combinatoria del rendimiento de antocianinas y característica agronómicas en poblaciones nativas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:11-19.
- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 217 p.
- Guzmán-Gerónimo, R.I., T.M. Alarcón-Zavala, E. Silva-Hernández, J.E. Meza-Alvarado, S. Herrera-Meza, R.M. Oliart-Ros y J.L. Chávez-Servia. 2011. Polifenoles totales, antocianinas, actividad antioxidante de maíz azul y su efecto en ratas Wistar con síndrome metabólico inducido. In: 3er. Congreso Internacional de Biología, Química y Agronomía, Septiembre 28–Octubre 1 de 2011, Zapopan, México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Hayano-Kanashiro, C., C. Calderón-Vázquez, E. Ibarra-Laclette, L. Herrera-Estrella, and J. Simpson. 2009. Analysis of gene expression and physiological responses in three Mexican maize landraces under drought stress and recovery irrigation. *PLoS ONE* 4:e7531 doi:10.1371/journal.pone.0007531.
- Hernández X., E. 1985. Maize and man in the greater Southwest. *Economic Botany* 39:416-430.
- Herrera C., B.E., A. Macías L., R. Díaz R., M. Valadez R. y A. Delgado A. 2002. Uso de semilla criolla y caracteres de mazorca para la selección de semilla de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:17-23.
- Herrera-Cabrera, B.E., F. Castillo-González, J.J. Sánchez-González, J.M. Hernández-Casillas, R.A. Ortega-Paczka y M.M. Goodman. 2004. Diversidad del maíz chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.
- Herrera C., B.E., F. Castillo C., J.J. Sánchez G., R. Ortega P. y M. M. Goodman. 2000. Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones nativas de maíz en una región: caso de la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:335-354.
- IBPGR. 1991. Descriptors for Maize. International Maize and Wheat Improvement Center, Mexico City/International Board for Plant Genetic Resources, Rome, Italy. 88 p.
- Kato, T.A., C. Mapes, L.M. Mera, J.A. Serratos y R.A. Bye. 2009. Origen y Diversificación del Maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- Lee, C-H., H.S. Garcia and K.L. Parkin. 2010. Bioactivities of kernel extracts of 18 strains of maize (*Zea mays*). *Journal of Food Science* 75:667-672.

- López-Martínez, L.X., R.M. Oliart-Ros, G. Valerio-Alfaro, C-H. Lee, K.L. Parkin and H.S. García. 2009. Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *Food Science and Technology* 4:1187-1192.
- López-Martínez, L.X. y H.S. García-Galindo. 2009. Actividad antioxidante de extractos metanólicos y acuosos de distintas variedades de maíz mexicano. *Nova Scientia* 3:51-65.
- Louette, D., A. Charrier and J. Berthaud. 1997. In situ conservation of maize in Mexico: genetic diversity and maize seed management in a traditional community. *Economic Botany* 51:20-38.
- Mazza, G. 2007. Anthocyanins and health. *Ann. Inst. Super Sanita* 43:369-374.
- Mercer, K., A. Martínez-Vásquez and H.R. Perales. 2008. Asymmetrical local adaptation of maize landraces along an altitudinal gradient. *Evolutionary Applications* 1:489-500.
- Mijangos-Cortés, J.O., T. Corona-Torres, D. Espinosa-Victoria, A. Muñoz-Orozco, J. Romero-Peñaloza and A. Santacruz-Varela. 2007. Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Michoacan, Mexico and the Chalqueño complex. *Genetic Resources and Crop Evolution* 54:309-325.
- Perales R., H. S.B. Brush and C.O. Qualset. 2003a. Landraces of maize in Central Mexico: An altitudinal transect. *Economic Botany* 57:7-20.
- Perales R., H. S.B. Brush and C.O. Qualset. 2003b. Dynamic management of maize landraces in Central Mexico. *Economic Botany* 57:21-34.
- Pool P., M.J. 2007. La demanda y oferta de semillas de maíz (*Zea mays* L.) y los factores que influyen en la diversidad de variedades entre los agricultores de Sacaba y Yaxcabá, Yucatán. Tesis M.C. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán. 144 p.
- Pressoir, G. and J. Berthaud. 2004a. Patterns of population structure in maize landraces from the Central Valleys of Oaxaca, México. *Heredity* 92:88-94.
- Pressoir, G. and J. Berthaud. 2004b. Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. *Heredity* 92:95-101.
- Rodríguez-Pérez, G., F. Zavala-García, C. Ojeda-Zacarías, A. Gutiérrez-Diez, J.E. Treviño-Ramírez y F. Rincón-Sánchez. 2012. Diversidad de maíces criollos de Nuevo León, México, mediante AFLP y caracteres morfológicos. *Agronomía Mesoamericana* 23:29-39.
- Rosario R., R.J. 2011. Catálogo Nacional de Variedades Vegetales. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. México, D.F. 31 p.
- Ruiz-Corral, J.A., N. Duran-Puga, J.J. Sánchez-González, J. Ron-Parra, D.R. González-Eguiarte, J.B. Holland and G. Medina-García. 2008. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 mexican maize races. *Crop Science* 48:1502-1512.
- Sánchez G., J.J., M.M. Goodman and C.W. Stuber. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59.
- Sánchez, J.J., M.M. Goodman and O. Rawlings. 1993. Appropriate characters for racial classification in maize. *Economic Botany* 47:44-59.
- Santa R., R.H., A. Gil M., A. Santacruz V., S. Miranda C. y L. Córdova T. 2008. Diversidad morfológica de maíces nativos del Valle de Puebla. *Agricultura Técnica en México* 34:189-200.

- Santa R., R.H., A. Gil M., A. Santacruz V., H. López S., P.A. López y S. Miranda C. 2012. Diversidad fenotípica de maíces nativos del altiplano centro-oriente del estado de Puebla, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:97-109.
- Servicio de Información Agroalimentaria (SIAP). 2011. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2011. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350 (revisado 4 abril, 2013).
- Soleri, D. and D.A. Cleveland. 2001. Farmers' genetic perception regarding their crop populations: an example with maize in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. *Economic Botany* 55:106-128.
- Stintzing, F.C. and R. Carle. 2004. Functional properties of anthocyanins and betalains in plantas, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science and Technology* 15:19-38.
- Tuxill, J.D. 2005. Agrarian change and crop diversity in mayan milpas of Yucatan, Mexico. Ph. D. Thesis, Faculty of Graduate School, Yale University. 375 p.
- Urias-Peraldi, M., J.A. Gutiérrez-Urbe, R.E. Preciado-Ortiz, A.S. Cruz-Morales, S.O. Serna-Saldivar and S. García-Lara. 2013. Nutraceutical profiles of improved blue maize (*Zea mays*) hybrids for tropical regions. *Field Crop Research* 141:69-76.
- Wellhausen, E.J., L.M. Roberts, E. Hernández X. y P.C. Mangelsdorf. 1951. Razas de Maíz de México, su Origen, Características y Distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F. 720 p.
- Zilic, S., A. Serpen, G. Akillioglu, V. Gökmen and J. Vancetovic. 2012. Phenolic compounds, carotenoides, anthocyanins and antioxidant capacity of colored maize (*Zea mays* L.) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60:1224-1231.

CÁPITULO III

DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MAÍCES PIGMENTADOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO

3.1 Introducción

En México y otros países, aún permanecen vigentes diferentes paradigmas tecnológicos agrícolas del siglo pasado: pensar que las variedades modernas inevitablemente reemplazarán a las variedades o poblaciones autóctonas o nativas, que las variedades modernas superan en rendimiento agronómico a las variedades tradicionales en todos los nichos agroecológicos, y que todos los agricultores piensan maximizar sus rendimientos y tasa de retorno de capital y no otras características (Frankel, 1970a, 1970b). Por el contrario, diferentes trabajos han demostrado que, particularmente en los centros de origen y diversificación de los cultivos, las poblaciones cultivadas nativas compiten agronómica y económicamente con las variedades modernas y aún más, poseen mayor número de caracteres preferidos por los agricultores y consumidores o usuarios del material (Perales *et al.*, 1998; Meng *et al.*, 1998).

La diversidad genética del maíz en México ha sido descrita y clasificada en 59 razas mediante diferentes métodos y herramientas de orden etnotaxonómico, taxonomía numérica, bioquímica y molecular, pero basados en el concepto de raza de Anderson y Cutler (1942). Wellhausen *et al.* (1951) clasificaron a la diversidad de maíz basándose en caracteres morfológicos y citogenéticos; Sánchez *et al.* (2000) y Mijangos-Cortés *et al.* (2007) utilizaron una combinación de caracteres morfológicos e isoenzimáticos; Hernández (1986) utilizó

caracteres de composición del grano; McClintock *et al.* (1981) mediante nudos cromosómicos apoyaron la diferenciación y origen de las razas; y las técnicas moleculares, basadas en secuencias de ADN han confirmado varios de los hallazgos previos en diferenciación racial (Reif *et al.*, 2006). No obstante, predomina la documentación de la diversidad inter e intraracial a través de caracteres agronómicos y morfológicos complementados con análisis de taxonomía numérica (Ortega y Sánchez, 1989; Ortega *et al.*, 1991; Benz, 1986, 1997; Herrera *et al.*, 2000; Herrera-Cabrera *et al.*, 2004; Aragón *et al.*, 2006; Kato *et al.*, 2009; Vielle-Calzada y Padilla, 2009; Prasanna, 2012).

La espectroscopía de infrarrojo cercano se ha usado para la caracterización de plantas, alimentos, bebidas, compuestos y cualquier materia (líquida, sólida o semisólida) capaz de absorber diferentes longitudes de onda de luz infrarroja. Es una técnica que ayuda a describir, discriminar y clasificar espectroscópicamente muestras con apoyo de la estadística-matemática o quimiometría (Putzig *et al.*, 1992; Cen y He, 2007; González-Martín *et al.*, 2010; Xiaobo *et al.*, 2010; Lavine y Workman, 2010; Tan *et al.*, 2012). La técnica se ha utilizado para determinar la autenticidad de alimentos y bebidas (Karoui, 2012), alimentos procesados (Macías-Rodríguez *et al.*, 2004) y detección de sustancias indeseables (Fernández-Pierna *et al.*, 2012). No es un análisis de composición química pero mediante la modelación y calibración multivariante, basada en espectros de absorbancia o transmitancia, tienen potencial de aplicación en la predicción de composiciones y discriminación de muestras. Por ejemplo, los análisis de infrarrojo cercano se han utilizado en predicciones de calidad de forraje en maíz (Montes *et al.*, 2006; Valenciaga *et al.*, 2006) y apoya la calibración de raciones alimentarias de animales (Soldado *et al.*, 2011). En maíz se ha utilizado para predecir la composición del grano (Orman y Schumann, 1991; Baye *et al.*, 2006; Jiang *et al.*, 2007; Tallada *et al.*, 2009;

Egesel y Kahrman, 2012; Dall'Asta *et al.*, 2012) e incluso la dureza (Williams *et al.*, 2009; Fox y Manley, 2009), contenido de almidón (Paulsen *et al.*, 2003), carotenoides (Brenna y Berardo, 2004), textura del endospermo (Manley *et al.*, 2009), rendimiento de etanol (Hao *et al.*, 2012) y apoya el mejoramiento genético mediante el análisis de gran número de muestras para la determinación de aceites y ácidos grasos (Preciado-Ortiz *et al.*, 2013), aminoácidos y proteínas (Rosales *et al.*, 2011). Puede clasificar y verificar daños en granos de soya (Agelet *et al.*, 2012a) y avena (Serranti *et al.*, 2013), y detectar, en alimentos, la presencia de fumosinas producidas por diferentes especies de *Fusarium* (Gaspardo *et al.*, 2012; Williams *et al.*, 2012). En recursos genéticos se ha utilizado en la caracterización de germoplasma de maíz (Berardo *et al.*, 2009) y en la descripción y clasificación de diferentes accesiones de trigo harinero con diferente origen geográfico (Roussel *et al.*, 2005) y condiciones de cultivo (Ferrio *et al.*, 2004).

El análisis por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR, acrónimo en inglés), se basa en la absorción o transmitancia de radiación electromagnética en longitudes de onda de 800 nm (número de onda de 12, 500 cm^{-1}) a 2500 nm (4000 cm^{-1}) por muestras que no requieren una preparación previa (Putzig *et al.*, 1992; Patnaik, 2004; Xiaobo *et al.*, 2010). La absorción se debe a los anarmónicos y bandas de combinación de las vibraciones fundamentales de las moléculas; la muestra irradiada experimenta un cambio en el momento bipolar y genera movimientos de vibración rotacional que tienen como ejes algunos de los enlaces de las moléculas. En la interacción de diferentes absorbancias se generan tonos y sobretonos, espectros con bandas anchas o sobrepuestas, pero se diferencian tonos debido a diferentes pesos moleculares; esto es, aumenta o decrece la anarmonicidad del enlace, regularmente del

tipo C-H, O-H y N-H, en función de la composición principal de la muestra analizada (Putzig *et al.*, 1992; Cen y He, 2007; Contreras, 2012).

El grano de maíz se compone esencialmente de almidón (67.8 a 74.0%), agua (30.7 a 33.0%), proteínas (6.0 a 11.5%), lípidos (3.9 a 5.8%) y bajas cantidades de fibra (celulosa y hemicelulosa), azúcares, minerales, oligoelementos y metabolitos secundario como vitaminas o provitaminas, flavonoides, fenoles y carotenoides (FAO, 1993; Méndez-Montealvo *et al.*, 2005). La cantidad y variabilidad de estos componentes químicos en los granos, depende del genotipo, ambiente e interacción genotipo-ambiente. Consecuentemente, el análisis por espectroscopia de infrarrojo cercano muestra parte de esa variabilidad en términos fenotípicos, debido a que no se hace directamente una calibración mediante análisis químicos de las harinas evaluadas, pero informa de la absorbancia de radiación electromagnética a través de los diferentes enlaces presentes en los compuestos (Cen y He, 2007), lo que se refleja en variaciones espectrales. En este sentido, los espectros de harinas reflejan los enlaces glucosídicos de celulosa, hemicelulosa, amilasa y amilopectina, estos dos últimos integran el almidón del grano; enlaces C-H, C=O y C-C en las cadenas hidrocarbonadas y grupo carboxilo (COOH) de los ácidos grasos insaturados (oleico y linoleico); y enlaces peptídicos (NH-CH-CO) del grupo carboxilo (COOH) y grupo amino (NH₂), entre otros (Valencia, 1995). La radiación se absorbe en los diferentes enlaces de la moléculas: C-H, O-H, N-H y C=O, entre otros, y la cantidad de luz absorbida es proporcional a la concentración de los compuesto de acuerdo con la ley de Beer-Lambert (Agelet *et al.*, 2012b).

En este trabajo, el objetivo fue describir y clasificar la variabilidad fenotípica de una colección de maíces azules y rojos, con base en espectros de absorbancia de infrarrojo cercano

de harinas de grano, en muestras obtenidas con agricultores e incrementadas por siembra y polinización controlada.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Material biológico

Se colectaron 50 muestras poblacionales de maíz pigmentado; 32 azules y 18 rojos, de febrero a marzo de 2011, en 22 comunidades de seis municipios de la Mixteca oaxaqueña: San Miguel El Grande, San Esteban Atlatlahuca, Chalcatongo de Hidalgo, Santiago Yosondua, Santa Catarina Yosonotu y Tlaxiaco, dentro del distrito geopolítico de Tlaxiaco. Geográficamente se encuentra entre 16° 44' 40'' y 17° 29' 06'' LN, de 97° 23' 19'' a 97° 53' 30'' LO, en altitudes de 950 a 2900 msnm y un clima que varía de templado a templado subhúmedo con variaciones promedio de temperatura de 16 a 22 °C y lluvias variables de 550 a 2,177 mm de precipitación anual (García, 1988).

Los estándares que se utilizaron fueron dos aminoácidos, L-lisina monohidroclorada con pureza ≥ 98 % y L- triptófano ≥ 98 % de la marca sigma aldrich y un carotenoide, el β -caroteno con 97 % de pureza marca Fluka

3.2.2 Preparación de muestras y análisis de infrarrojo

Para el análisis por espectroscopía de infrarrojo cercano, se utilizaron dos tipos de muestras: la muestra colectada con los agricultores o “muestra original del agricultor” y la segunda provino de una siembra de las colectas, realización de cruzamiento fraternales y cosecha de dos mazorcas por parcela. A esta última se le llamo muestra de “polinización controlada”. Esto último se hizo con el objetivo de eliminar, hasta donde fuera posible, el

efecto ambiental en las muestras originales ya que provienen de diferentes parcelas ubicadas en diferentes micronichos agroecológicos. También permite probar, mediante los resultados del análisis de infrarrojo, si el ambiente tiene influencia en los resultados.

Para obtener la muestra de polinización controlada, la siembra de las colectas se hizo el 22 de mayo de 2011 en Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca (2,380 msnm), bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones para las de grano azul y seis para rojo. El manejo fue uniforme para las poblaciones. A la cosecha, solo se utilizaron dos mazorcas por repetición y mediante una mezcla de 100 g por repetición se integró una muestra compuesta, y a partir de ella se obtuvo una submuestra de 300 g de grano por colecta.

Las muestras de granos de la colecta proveniente del agricultor y la de polinización controlada, se molieron en un molino de aspas y se cribaron en un tamiz con malla de 500 micrómetros. Se limpió el molino cuidadosamente cada vez que se molió cada muestra. Posteriormente, se colocaron en frascos ámbar y se mantuvieron en refrigeración ($\pm \sim 8$ °C) hasta su análisis. Previo al análisis espectrofotométrico, se colocaron en un desecador con sílica gel durante 24 horas.

Las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro de infrarrojo cercano con transformada de Fourier (FT-NIR Perkin Elmer, serie 44916), en un rango de infrarrojo cercano de 4000 cm^{-1} (2500 nm) a 10000 cm^{-1} (1000 nm). Se utilizó un detector de transmisión de sulfato de triglicina deuterada de rápida recuperación (FR-DTGS). Cada muestra de harina se colocó en seis celdas (sextuplicado) de 300 mg cada una, se aseguró que la compactación fuera regular para todos los casos. Todas las mediciones se hicieron a una

resolución de 4 cm^{-1} , en intervalos de 2.0 cm^{-1} , y con 16 barridos por muestra. La región de estudio durante el análisis fue de $4000\text{ a }9000\text{ cm}^{-1}$. Se generaron los espectros de tres estándares; triptófano, lisina y β -caroteno, a manera de testigos externos con fines comparativos. Esto último para evaluar las diferencias o semejanzas entre las muestras del agricultor y las muestras de polinización controlada.

3.2.3 Análisis estadístico

Para describir los patrones de variación espectrofotométrica de harinas, se generaron la primera y la segunda derivada de cada espectro de absorbancia, en puntos de números de onda desde $4000\text{ a }9000\text{ cm}^{-1}$. A partir de esas matrices de datos, se hizo un análisis iterativo de componentes principales con el objetivo de seleccionar los puntos espectrales de mayor valor descriptivo de la variación fenotípica evaluada, y con base en referencias espectrales previamente reportadas (Jiang *et al.*, 2007; Hong-Jiang *et al.*, 2007; Tallada *et al.*, 2009; Shiroma y Rodríguez-Saona, 2009; Egesel y Kahrman *et al.*, 2012). Posteriormente, con la base de los datos seleccionados de la segunda derivada, se hizo un análisis de conglomerados de agrupamiento jerárquico, y a partir de base en las distancias euclidianas se construyó un dendrograma por el método de ligamiento promedio. Todo esto tanto para las muestras del agricultor como las de polinización controlada, en las bases de datos de la primera y segunda derivada. Los análisis se realizaron a través del programa estadístico SAS (SAS inc., 2009).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Variación entre muestras del agricultor y de polinización controlada

En la comparación de los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano, en muestras de los agricultores y de polinización controlada, se observaron diferencias en la magnitud de

absorbancia entre el número de onda 6500 y 9000 cm^{-1} . En las de grano azul se registró una mayor absorbancia en las muestras del agricultor que las de polinización controlada, y en las de grano rojo la relación fue inversa; sin embargo, la diferencia no fue tan pronunciada como en el primer caso (Figura 1). Este patrón de divergencia, también se observó en las regiones que determinan el contenido de triptófano en la muestra.

Por otra parte, en los espectros de harinas de maíz se observan regiones que coinciden con el espectro de triptófano, bandas de absorción de los enlaces que reflejan la presencia de este aminoácido. En la región de 4651-4545 se presentaron bandas de combinación del grupo amino R-NH₂; de 5660-5800 cm^{-1} en el primer sobretono de estiramiento del C-H; en 5800-6000 cm^{-1} está el primer sobretono del CH₂; de 8400 a 8500 cm^{-1} el segundo sobretono de CH₃ (Xiaobo et al., 2010; Workman y Weyer, 2012). Además, en el espectro de triptófano se observó de 6850 a 6700 cm^{-1} el segundo sobretono de N-H, banda relacionada con el grupo indol característico en esta molécula; la que no se presentó en los espectros de las muestras, esto probablemente se deba a la baja concentración de este compuesto en las harinas de maíz (Vera et al., 2012) y al tipo de matriz (carbohidratos) donde se encuentra inmersa. No obstante, es oportuno señalar que cada región del espectro contiene información de todos los componentes químicos y la interpretación directa de absorbancias como compuestos puede conducir a errores.

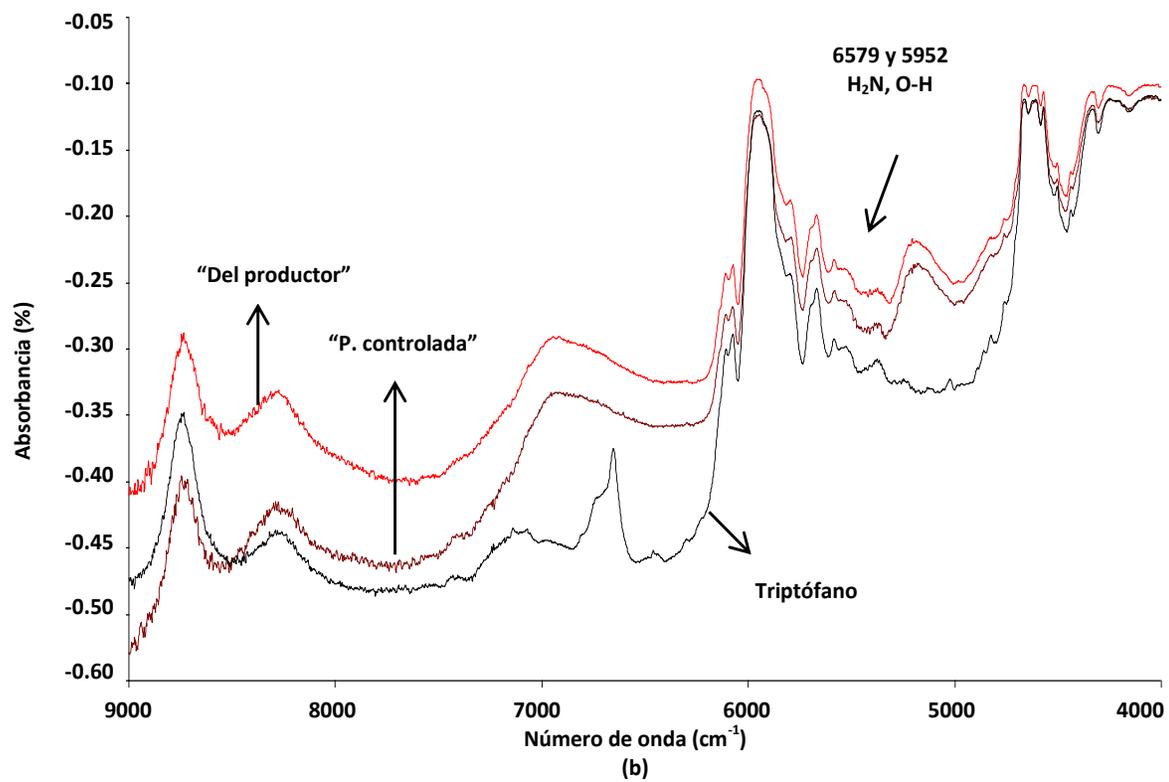
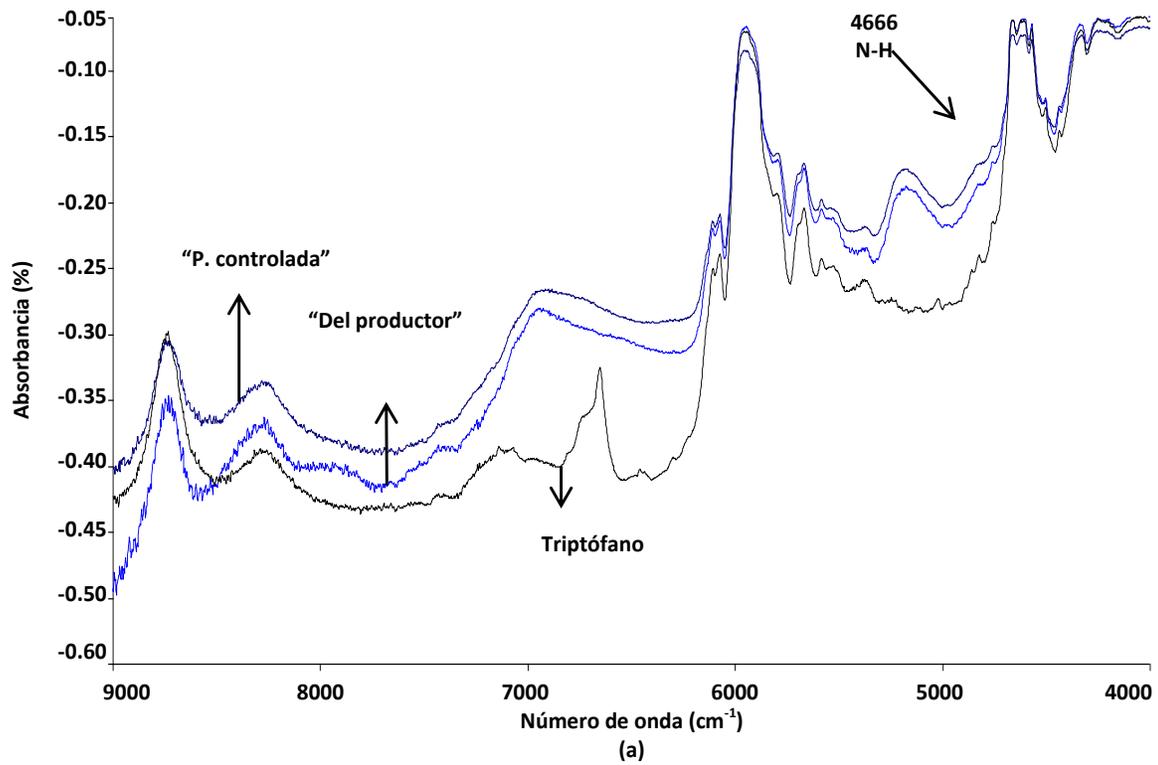


Figura 1. Espectros de absorbancia de harinas de maíz azul (a) y rojo (b) en muestras del agricultor y de polinización controlada, y el estándar de triptófano.

La comparación del espectro de absorbancia del estándar de lisina y los espectros de maíz azul y rojo (Figura 2) muestran semejanzas en ciertas regiones del espectro, por ejemplo de 4200 a 4450 cm^{-1} y 5700 a 6000 cm^{-1} , esto se explica porque en estas regiones se presentan bandas de combinación y primer sobretono del CH_2 respectivamente, molécula que forma parte de la estructura de la lisina. En el rango de 4650 a 4850 cm^{-1} y de 5235 a 5320 cm^{-1} se da el mismo comportamiento, en esta región se han reportado bandas de combinación del grupo amino R-NH_2 y grupo carboxilo COOH , respectivamente; enlaces que caracterizan a los aminoácidos (Shao *et al.*, 2011; Xiaobo *et al.*, 2010; Ferrio *et al.*, 2004; Egesel y Kahrman, 2012; Ferrio *et al.*, 2004; Egesel y Kahrman, 2012). Las muestras azules o rojas con origen diferente presentaron diferencias importantes en el porcentaje de absorbancia, y se infiere que, el ambiente probablemente influye en el contenido de aminoácidos.

Cuando se compararon los espectros de las muestras de maíz rojo y azul contra el espectro que genera el estándar de β -caroteno (Figura 3); se encontraron bandas características de carotenoides reportadas previamente en maíz (Brena y Berardo, 2004). En el rango de 4205-4545 cm^{-1} se presentaron bandas de combinación del estiramiento de C-H; en 5138 cm^{-1} el tercer sobretono de enlaces $-\text{CH}=\text{CH}-$; de 5660-5800 cm^{-1} el primer sobretono de estiramiento de C-H; en 7320 cm^{-1} bandas de combinación de C-H de los grupos CH_3 y en 8635 cm^{-1} el tercer sobretono del estiramiento de CH en el enlace $-\text{CH}=\text{}$; todos estos enlaces forman parte de la estructura del estándar β -caroteno. Por lo que se puede inferir que, los carotenoides, específicamente β -caroteno, se encuentran presentes en las muestras de harina de maíz. En la figura 3b, en el espectro de harina de maíz del agricultor, se muestran rangos del espectro con mayor similitud al estándar, esto podría estar relacionado con la diferencia de concentración del β -caroteno en estas harinas. Es de resalta que la información presentada es

de harinas de maíces rojos y azules, los que se han caracterizado por tener una mayor concentración de antocianinas, compuestos responsables de las tonalidades púrpura (Espinoza *et al.*, 2009) y también presentan β -caroteno en menor proporción (Zilic *et al.*, 2012).

Es difícil observar un patrón determinado debido la reducida proporción de flavonoides en el grano: antocianinas en grano azul o compuesto derivados de delphinidina y cianidina; y en grano rojo pelargonidina, α o β -carotenos, entre otros, con diverso enlaces conjugados -C-C- (Brenna y Berardo, 2004; Valencia, 1995). Por consiguiente, a través de los espectros de absorbancia, los compuestos, grupos funcionales y enlaces asociados a amilosa y amilopectina del almidón, los aceites, proteínas y polisacáridos presentes en las harinas de las muestras de maíz, determinaran las diferencias de muestra a muestra y con ello ayudaran a establecer los patrones de variación fenotípica en el conjunto de muestras analizadas.

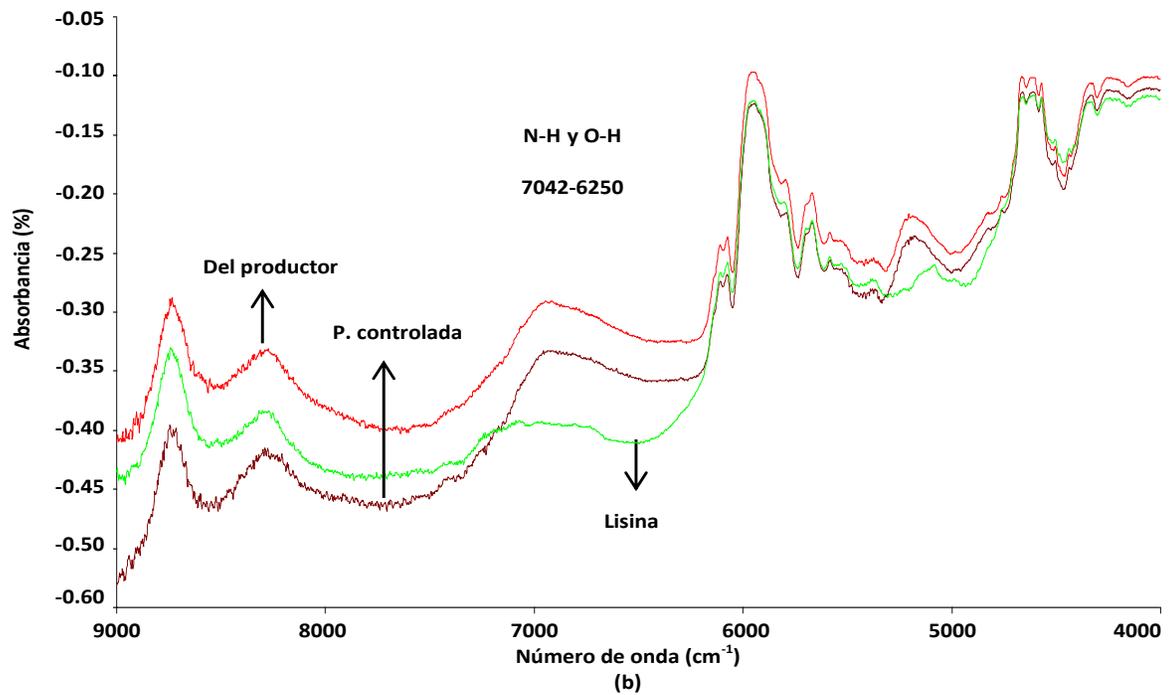
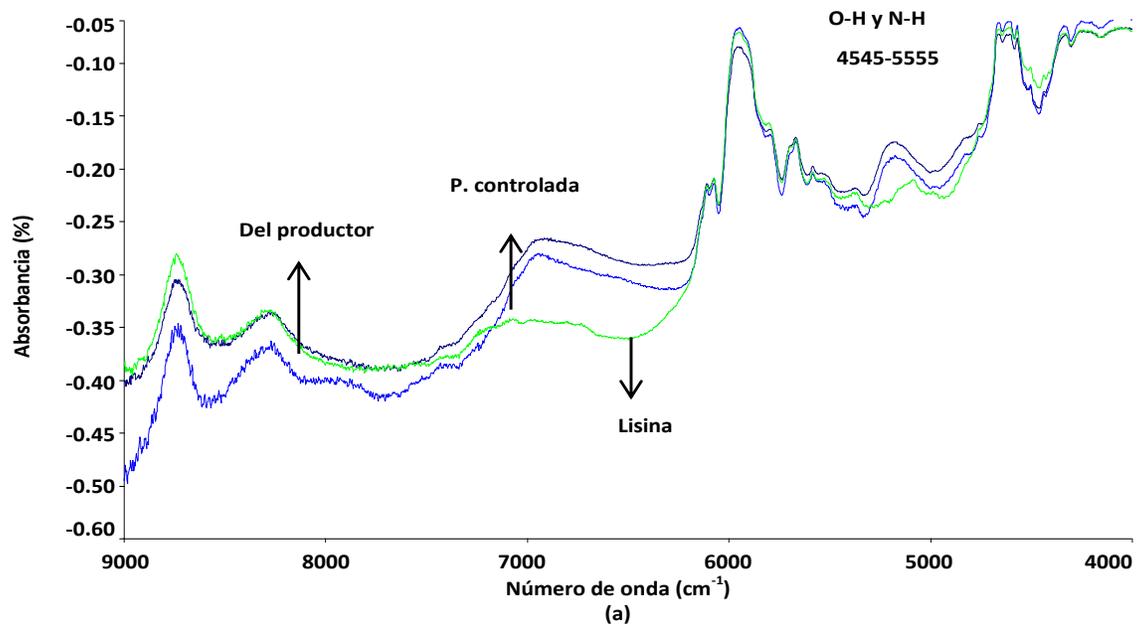


Figura 2. Espectros de absorbancia de harinas de maíz azul (a) y rojo (b) en muestras del agricultor y de polinización controlada, y el estándar de lisina.

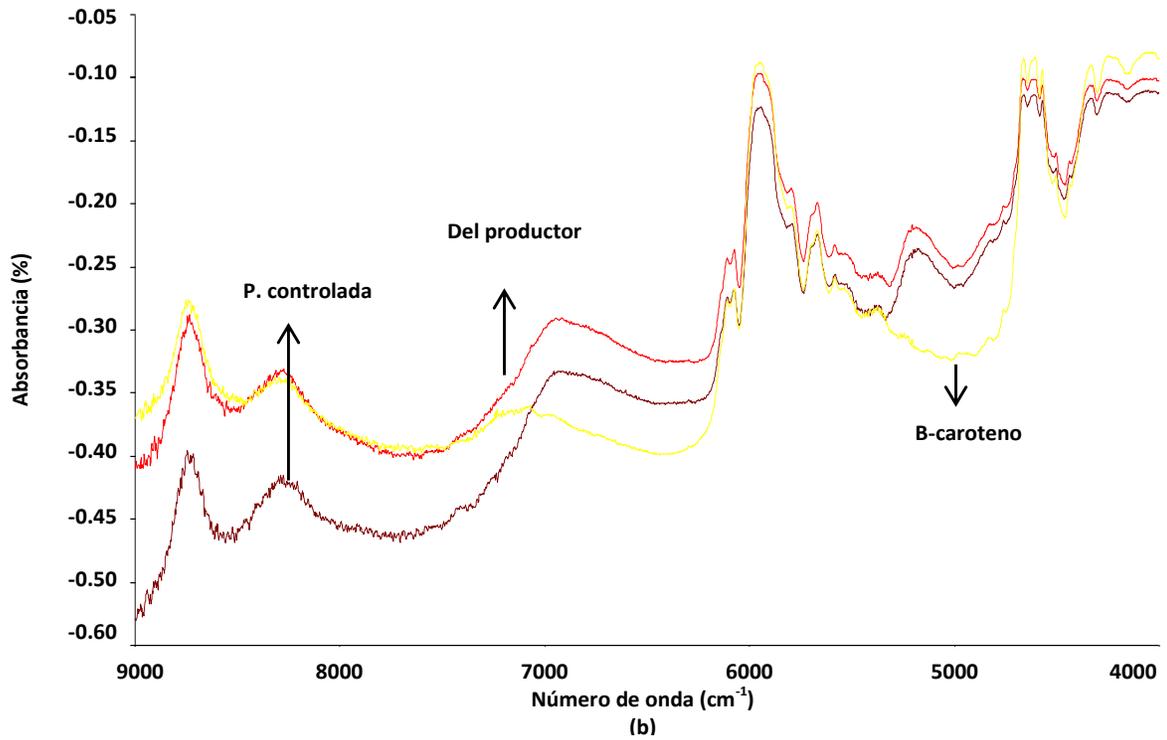
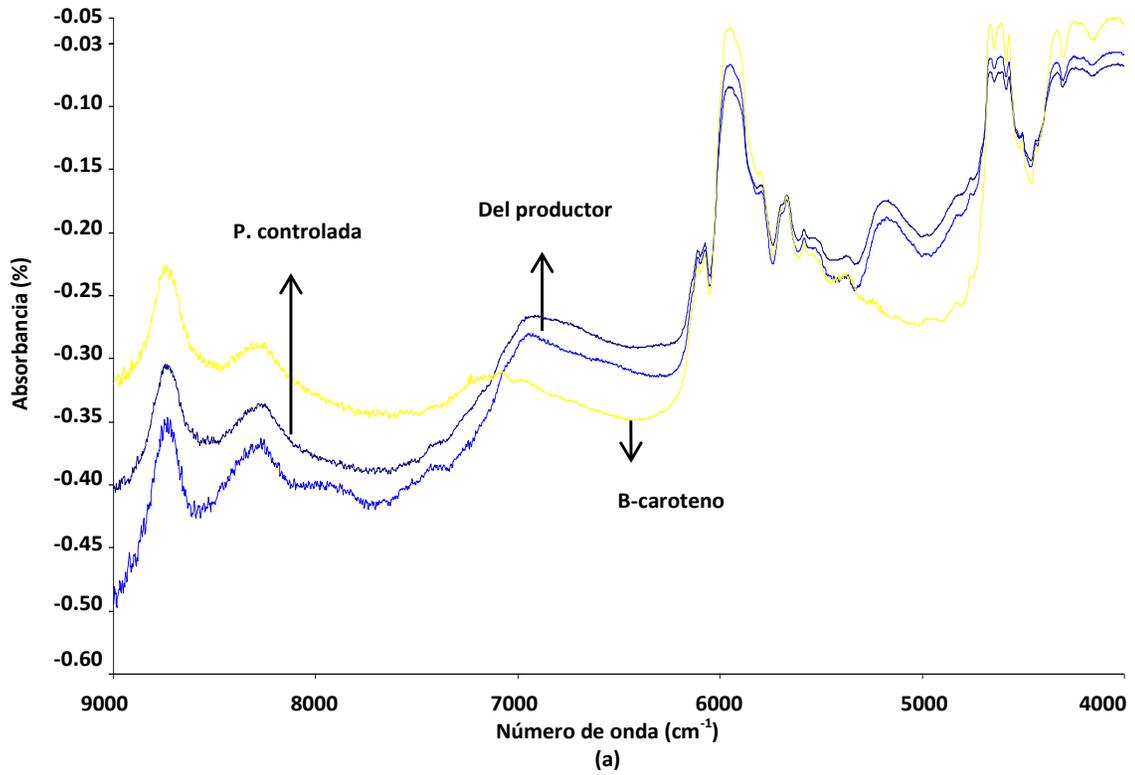


Figura 3. Espectros de absorbancia de harinas de maíz azul (a) y rojo (b) en muestras del agricultor y de polinización controlada, y el estándar de β -caroteno.

Debido a que no se hicieron análisis químicos de las harinas y consecuentemente no hay una calibración de los modelos espectroscópicos, en la Figura 4 se hizo una representación de la probable localización de enlaces (C-H, O-H, C=O, N-H y COOH) reportados por otros autores que analizaron muestras de grano o harinas de maíz u otros cereales. Por ejemplo, Tallada *et al.* (2009) indican que el contenido de proteínas en maíz se asocia con diferencias en los números de onda de infrarrojo cercano de 8510.73-8163.26 cm^{-1} ; para Jiang *et al.* (2007) las regiones importantes están entre 8978.9-5446 cm^{-1} , 4605.2-4242.6 cm^{-1} y 6102 a 4242.8 cm^{-1} ; en aceites o grasas están en 7505.6-5446 cm^{-1} y 4605.2-4242 cm^{-1} (Jiang *et al.*, 2007); almidón es de 4245 a 4335 cm^{-1} (Shiroma y Rodríguez-Saona, 2009); carbohidratos 6666-5550 cm^{-1} (Egesel y Kahrman, 2012); y agua de 5405-4901 cm^{-1} (Ferrio *et al.*, 2004).

Los compuestos químicos en las muestras de maíz determinan la naturaleza y el número de enlaces presentes, consecuentemente el número de onda y la cantidad de luz absorbida. Los picos en el NIR no fueron muy definidos o agudos, ya que consisten en sobretonos y bandas de combinación de las absorciones primarias en el infrarrojo medio (William *et al.*, 1998). Por esta razón, en el NIR es difícil una interpretación directa de la absorbancia de cada grupo funcional en los espectros de las harinas de maíz. Sin embargo, se han implementado técnicas matemáticas de análisis que generan información de los espectros de cada muestra.

En este trabajo, se analizaron las diferencias espectrales de muestra a muestra y se interpretaron como diferencias fenotípicas debidas tanto a variaciones de tipos de grano, composición química que se infiere por diferencias espectrales moleculares (enlaces de moléculas), ambiente de cultivo y origen de la muestra. En la comparación de espectros de

muestras del agricultor contra las obtenidas por polinización controlada, debido a las diferencias observadas, se analizaron por separado y se compararon los patrones de variación fenotípica (Figura 4). Las diferencias en espectros de infrarrojo cercano, entre muestras, ayudan a describir la variabilidad presente en la colección evaluada tanto de maíces azules como rojos. Además, deben considerarse las características estructurales del grano relacionadas con la proporción de amilosa/amilopectina que determina si es endospermo harinoso o córneo, proteínas del embrión y contenido de celulosa y hemicelulosa en la cutícula.

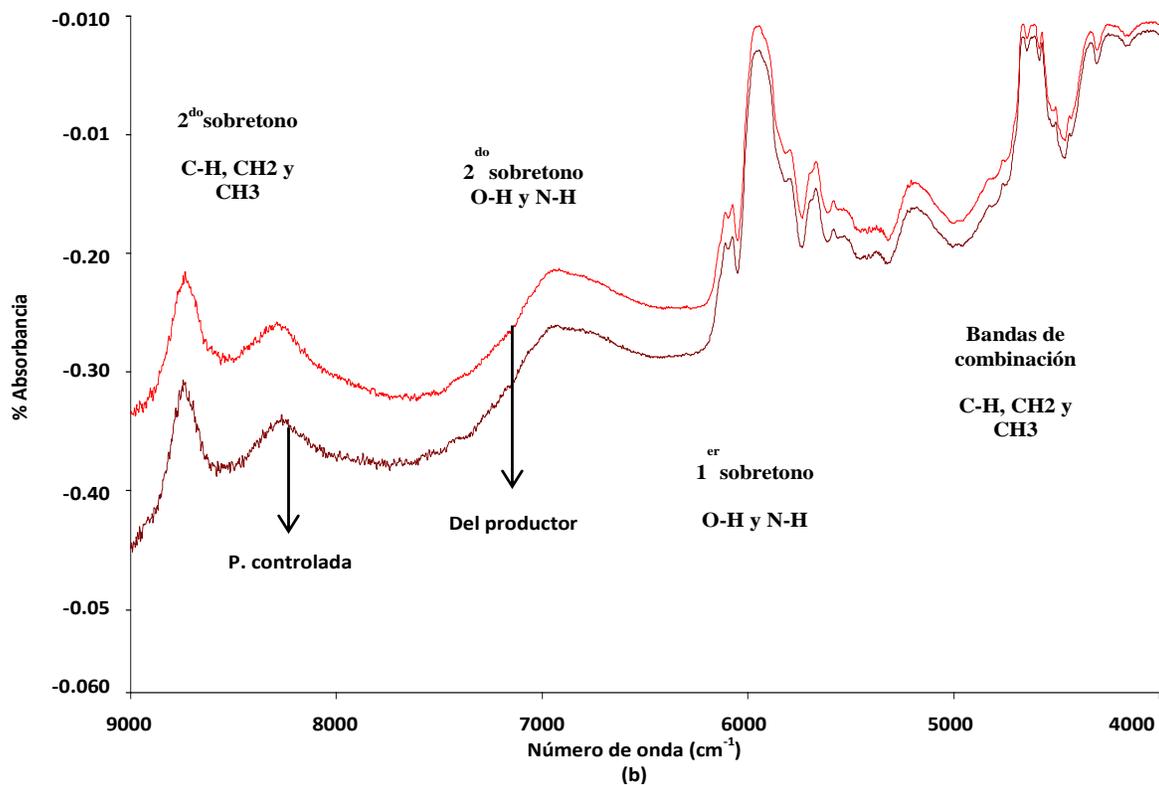
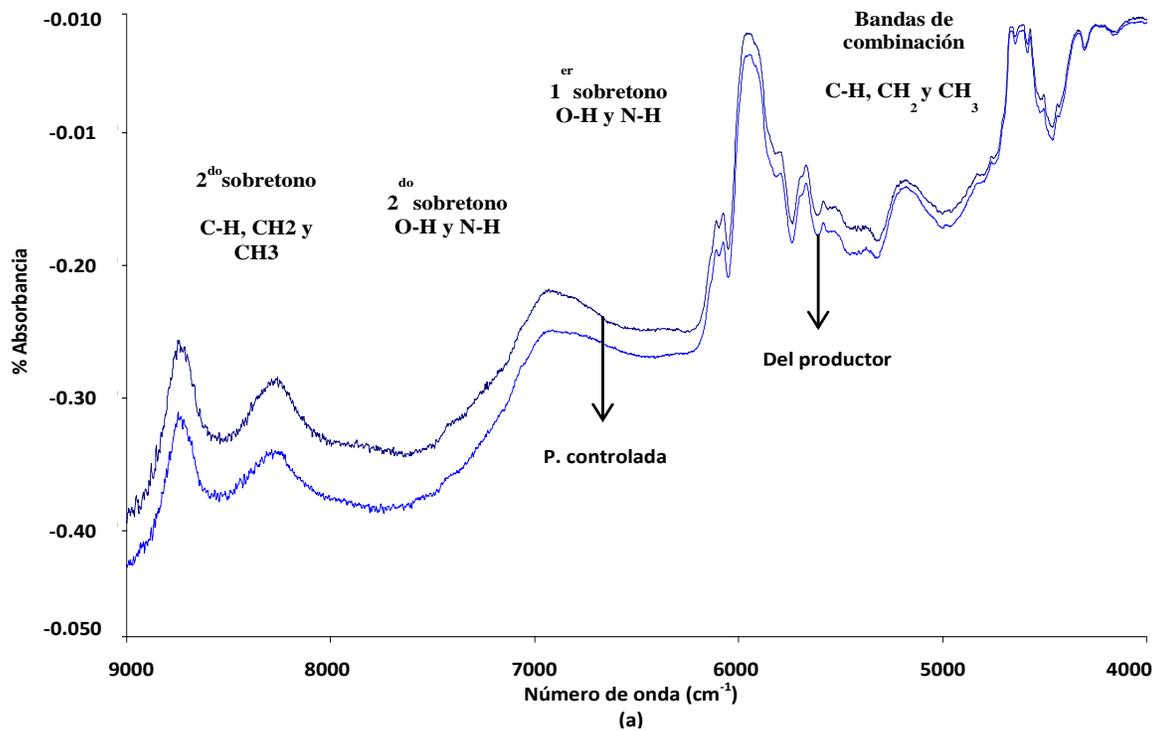


Figura 4. Espectros de absorbancia de infrarrojo cercano de harinas de maíz azul (a) y rojo (b), y localización de regiones de enlaces de grupos orgánicos de referencias bibliográficas, en muestras del agricultor y de polinización controlada.

3.3.2 Descripción de la variación fenotípica espectrofotométrica

Las relaciones estructurales (endospermo, embrión, pericarpio y pedicelo) y composición del grano influyen en la composición de las harinas de grano (Zepeda-Bautista *et al.*, 2009; Berardo *et al.*, 2009). En este caso, las diferencias promedio de muestra a muestra de harinas y/o colecta a colecta estuvieron influenciadas por las características estructurales del grano o tipo de grano (predominando los tipos harinosos), composición del almidón y del embrión, esencialmente. En un trabajo previo con diferentes muestras de maíz de la Mixteca alta oaxaqueña, se determinaron diferencias significativas entre y dentro de 11 poblaciones de grano azul y 12 de grano rojo, en contenido de lisina, triptófano y proteína (Vera-Guzmán *et al.*, 2012). Por consiguiente, es de esperarse diferencias espectroscópicas entre y dentro de las muestras de grano azul y rojo descritas.

En el análisis de componentes principales (CP) de los datos, ajustados por la primera derivada, se determinaron 227 valores de números de onda (cm^{-1}), que ayudaron a explicar más del 80 % (13er. CP) de la varianza total evaluada, en colectas originales o del agricultor y multiplicadas con polinización controlada de grano azul. En la Figura 5 se hizo una representación gráfica de los dos primeros componentes principales de la primera y segunda derivada, donde se describen diferentes patrones de comportamiento de acuerdo al tipo de muestra procesada y su origen. En la primera derivada se nota visualmente un mayor amontonamiento de las muestras en comparación con la gráfica de las muestras con polinización controlada; esto obedece, en parte, a que el ambiente de cultivo fue el mismo en las de polinización controlada y los cruzamientos fraternales solo permitieron polinizar las mazorcas con polen de plantas pertenecientes a la misma colecta.

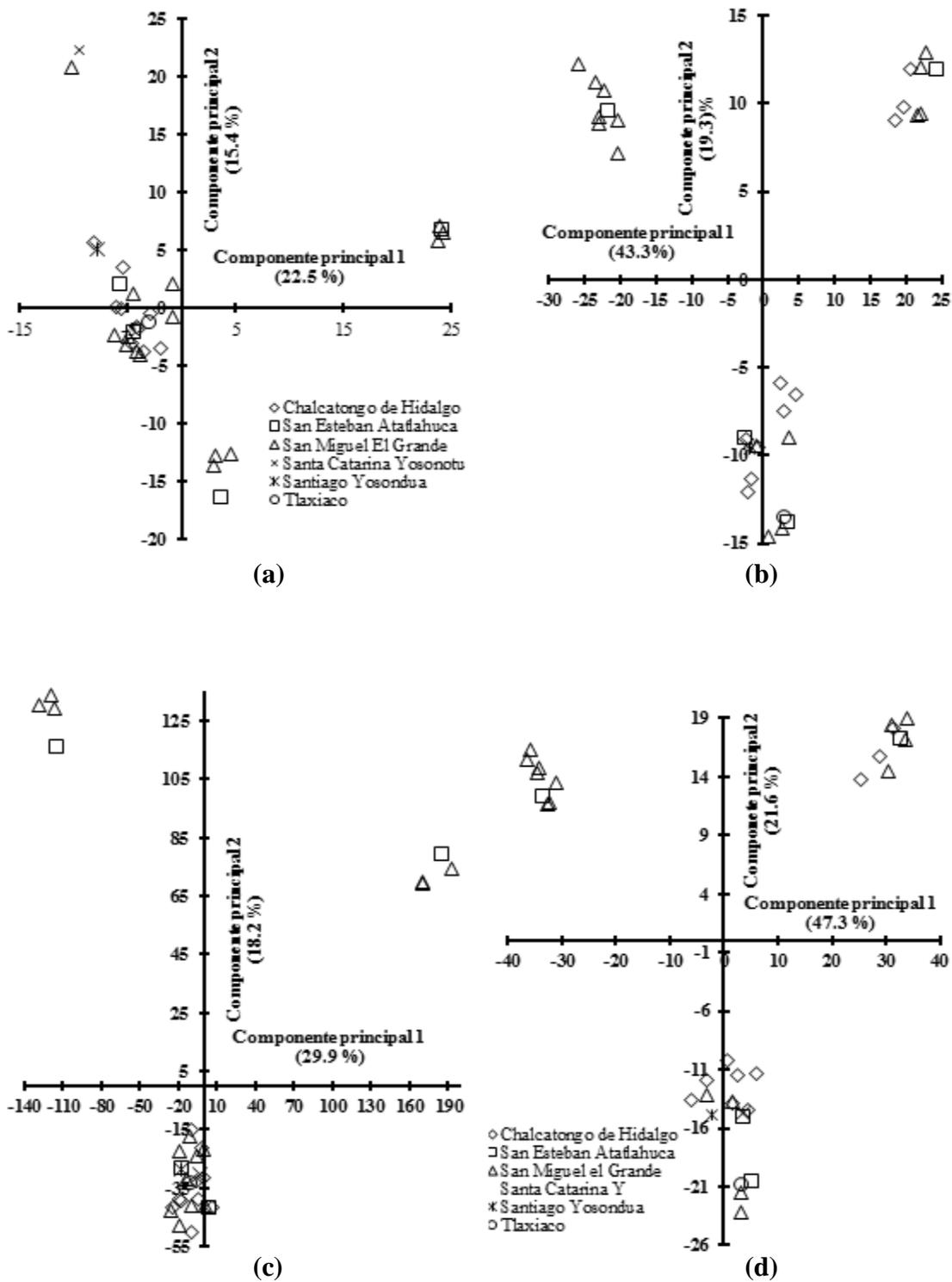


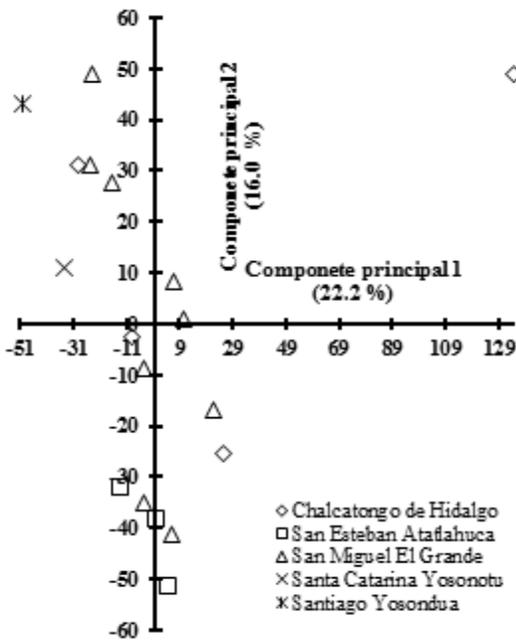
Figura 5. Dispersión de 32 poblacionales de maíz azul en función de los dos primeros componentes principales, en muestras de productores (a, c) y con polinización controlada (b, d), y con base espectros de infrarrojo cercano ajustados por la primera (a, b) y segunda derivada (c, d).

Otro patrón relevante y para destacar en la Figura 5, es el efecto de mayor descripción o diferenciación de las muestras cuando se utiliza la segunda derivada y además las muestras provienen de polinización controlada. En este punto, es oportuno señalar que la segunda derivada produce un “suavizado” de los espectros como consecuencia de la estimación de la absorbancia promedio entre dos picos o longitudes de onda sucesivas, y también reduce la correlación entre variables o longitudes de onda consecutivas y el efecto de dispersión del tamaño de partículas (Macho, 2002). Así, los resultados muestran que es pertinente utilizar muestras de harinas provenientes de granos con polinización controlada, sembradas en un mismo ambiente y utilizar los espectros de la segunda derivada.

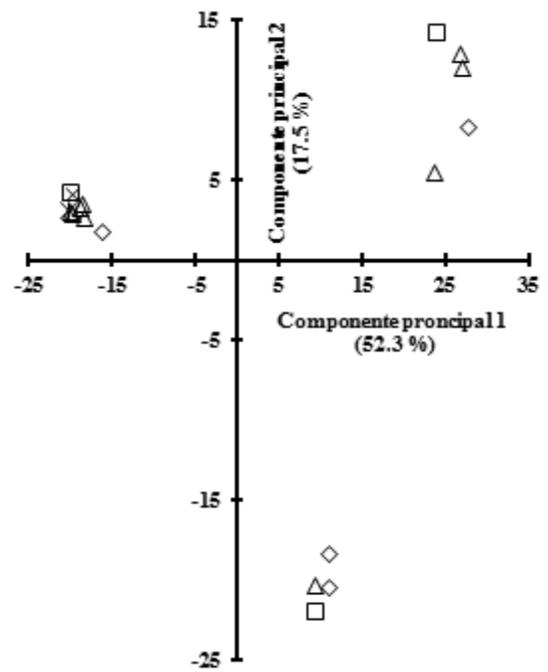
La mayor cantidad de muestras de maíz azul fueron colectadas en los municipios de Chalcatongo y San Miguel El Grande, y en la Figura 5 se nota este efecto y se distinguen patrones por origen de la muestra. En general, en las muestras de polinización controlada (Figura 5b y 5d), los materiales de San Miguel (cuadrante superior derecho) presentan patrones diferentes a los de Chalcatongo, San Esteban, Santa Catarina, Santiago y Tlaxiaco, con ello se podrían asumir como cuatro grupos diferenciales. También indica que los agricultores que poseen estos maíces, aunque del mismo color de grano, les han dado un manejo diferente hasta el punto de distinguirse diferencias sustanciales en las harinas evaluadas por espectroscopía de infrarrojo. Las observaciones aquí descritas se han confirmado fenotípicamente a través de características de mazorcas y granos (Capítulo previo de este trabajo) que ayudan a definir complejos raciales o grupos fenotípicos diferentes (Chávez y Diego 2011; Chávez-Servia *et al.*, 2011; Chávez-Servia *et al.*, 2012).

En el análisis de componentes principales para describir la variación de los maíces de grano rojo, se determinaron hasta 285 valores de número de onda de los espectros de infrarrojo cercano, que ayudaron a describir la variabilidad total presente en 18 colectas. Nuevamente la segunda derivada ayudó a determinar tres patrones de diferenciación fenotípica tanto en las muestras del agricultor como en las de polinización controlada (Figura 6). A diferencia de las muestras de grano azul, en este caso no se observan diferencias marcadas por origen de los materiales o bien muestran un patrón diferente. Esto es, en cada grupo de dispersión de muestras se combinan muestras originarias de San Miguel, San Esteban y Chalcatongo. Lo que infiere, de ellos es que las diferencias estructurales y del endospermo podrían generar diferencias espectrales asociadas con el tipo de grano. Los granos de las razas Cónico y Chalqueño, son de tipo corneo, en contraposición, a los de la raza Mixteco son regularmente harinosos, y dan como resultado que sean más duros los primeros que los segundos. En las muestras evaluadas se observaron ambos tipos de granos.

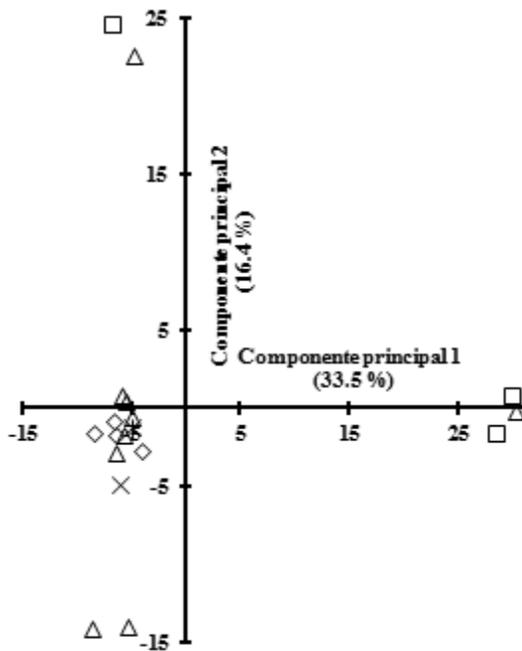
Las diferencias espectrométricas en los análisis realizados muestran diferencias que podrían derivar de la composición del grano. En los maíces harinosos del tipo Mixteco la cantidad de amilosa es mayor que de amilopectina, y contrariamente los granos córneos o cerosos contienen mayor cantidad de amilopectina que de amilosa (Paliwal, 2001). Estos compuestos están asociados con enlaces del tipo C-C, C-H y C=O, entre otros. También el reducido número de muestras (18) incluidas en el trabajo no ayudan a conocer, con mayor precisión, las diferencias en relación a su origen, o bien hay mayor intercambio de semilla de maíces rojos que de azules y blancos por ser más frecuentes estos últimos (Chávez y Diego, 2011).



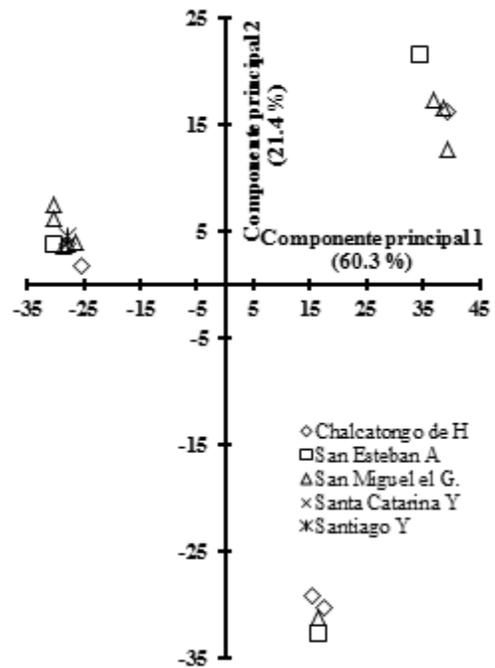
(a)



(b)



(c)



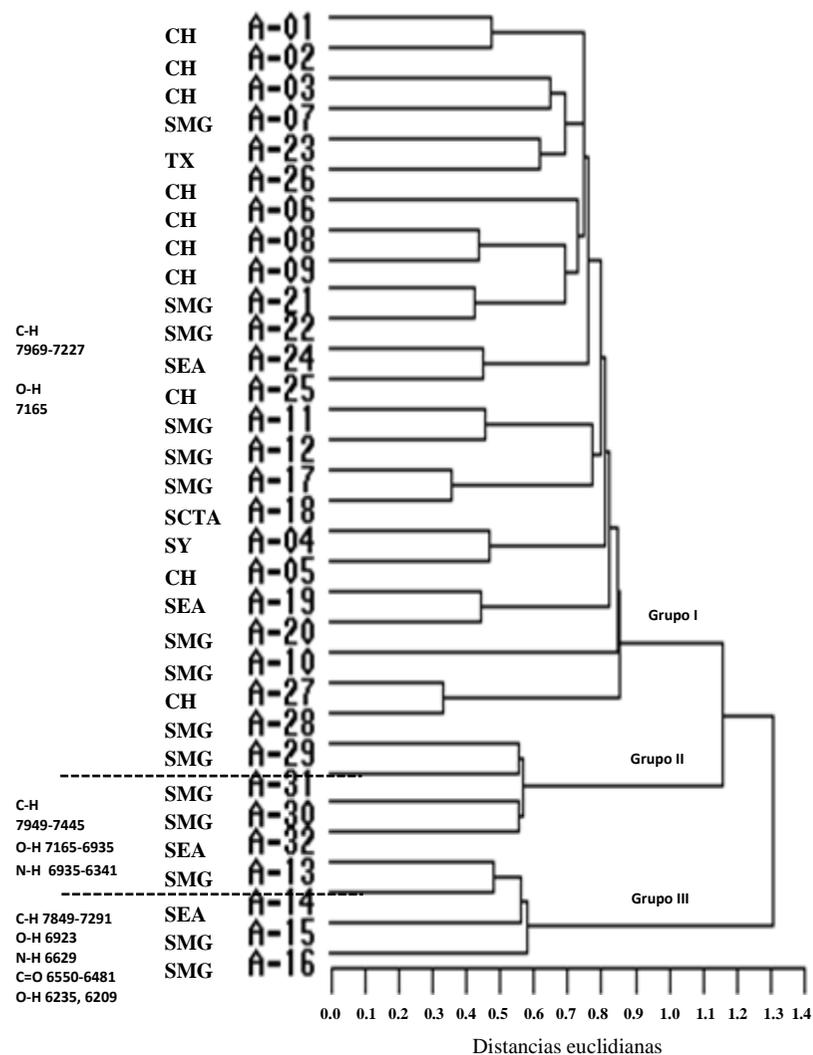
(d)

Figura 6. Dispersión de 18 poblacionales de maíz rojo en función de los dos primeros componentes principales, en muestras de productores (a, c) y con polinización controlada (b, d), y con base en espectros de infrarrojo cercano ajustados por la primera (a, b) y segunda derivada (c, d).

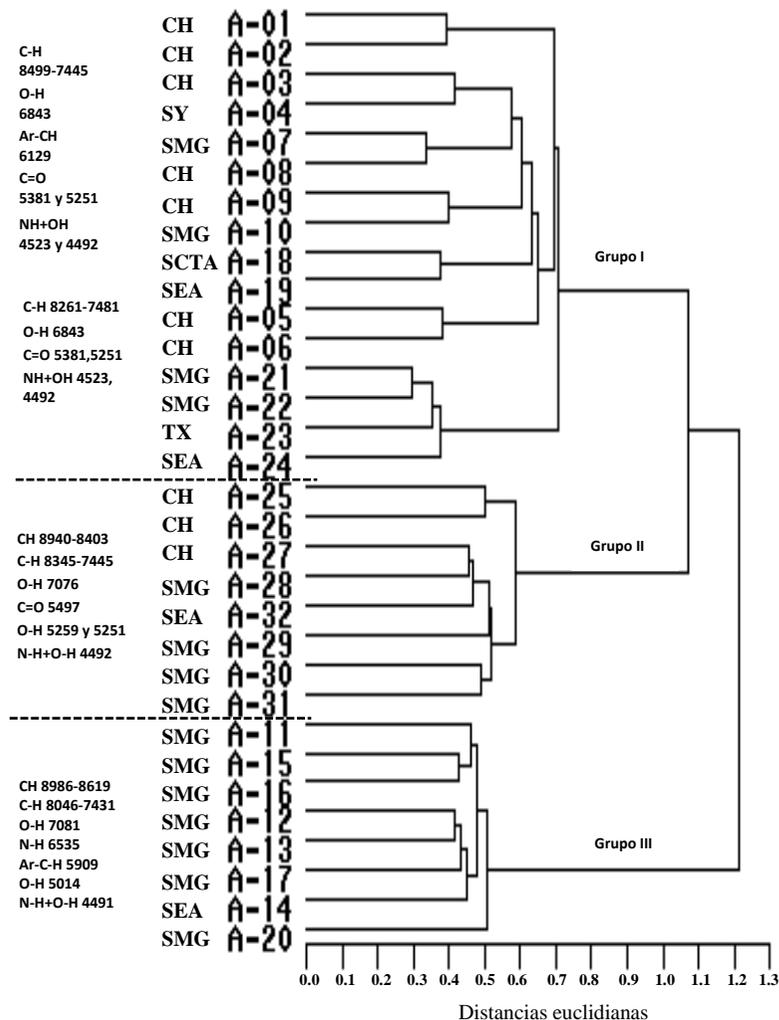
3.3.3 Clasificación de la variación fenotípica espectrofotométrica

La clasificación de muestras utilizando los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano, con base en los datos de la segunda derivada, en maíz azul dio como resultado la integración de tres grupos significativamente diferentes (pseudos $F = 4.7$, $P < 0.05$) tanto en las muestras del agricultor como en las de polinización controlada (Figura 7). En el análisis de conglomerados de las muestras de agricultores se integraron tres grupos: el Grupo I se conformó por 24 colectas o muestras poblacionales, el Grupo II por cuatro y el Grupo III con cuatro. Estos grupos presentaron cierta homología con los integrados en los análisis de muestras con polinización controlada; aunque con mayor precisión. Esto es, la segunda derivada y el análisis de muestras de harinas con polinización controlada ayuda a determinar con mayor precisión los grupos fenotípicos de una manera semejante a lo descrito en el análisis de componentes principales.

En el dendrograma integrado por poblaciones con polinización controlada (Figura 7b), el Grupo I se distingue por enlaces del primer sobretono de C-H, primer sobretono de O-H, estiramiento del segundo sobretono de C=O y las bandas de combinación de C-H+O-H. Los que, reflejan parte de la conformación de enlaces glucosídicos de celulosa, hemicelulosa, amilosa y amilopectina, estos dos últimos integran el almidón del grano. Las muestras que conforma el Grupo I no pertenecen a un municipio específico. En contraposición las muestras del Grupo II son principalmente de San Miguel y Chalcatongo, esto indica que comparten semejante estructura, composición y textura de grano; y difieren significativamente del Grupo III, las que predominantemente son de San Miguel.



(a)



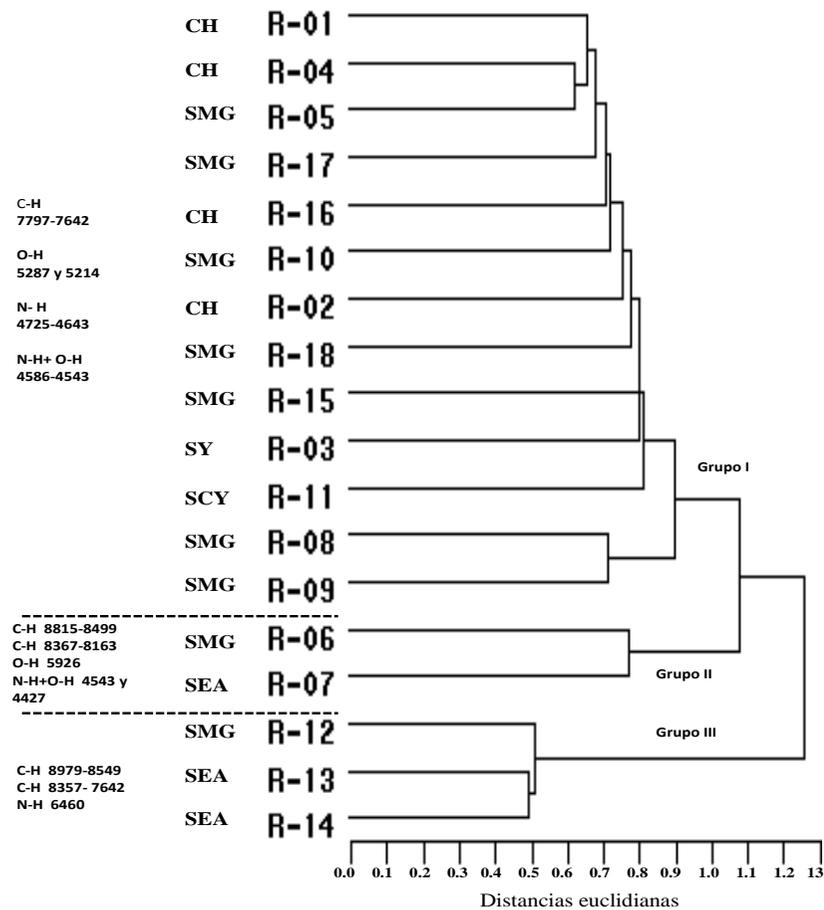
(b)

Figura 7. Dendrograma espectrofotométrico de absorbancia de harinas de maíz azul en muestra de los productores (a) y de polinización controlada (b), con datos ajustado por la segunda derivada. CH, Chalcatongo de Hidalgo; SMG, San Miguel El Grande; SEA, San Esteban Atatlahuca; SY, Santiago Yosondúa; TX, Tlaxiaco; y SCTA, Santa Catarina Yosonotú.

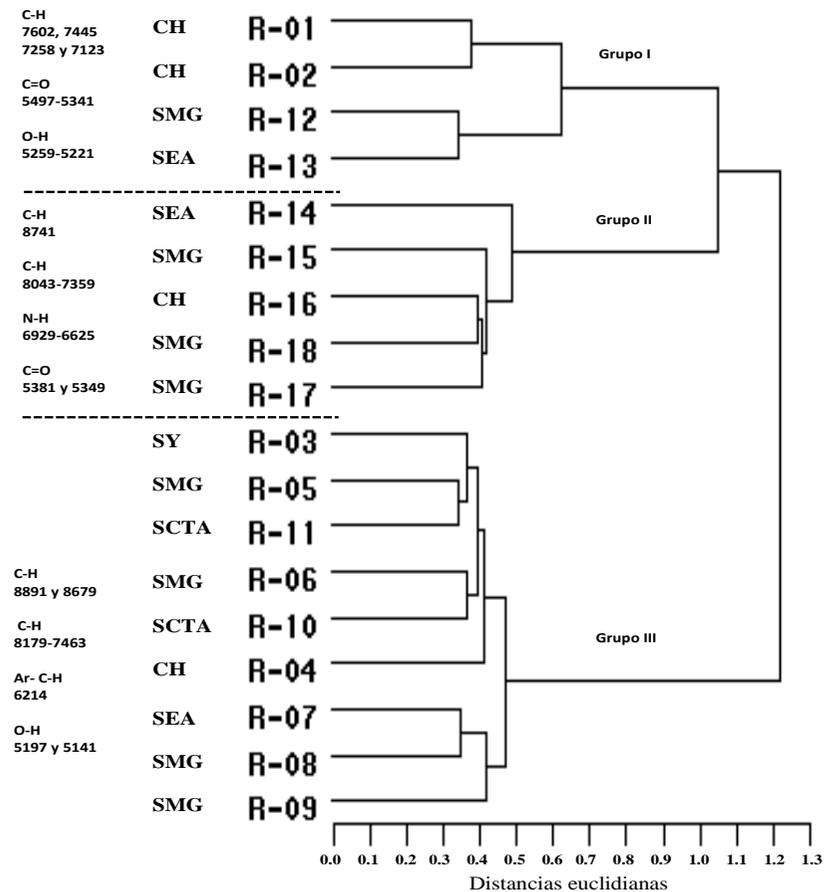
Los resultados indican un manejo significativamente diferente de los maíces azules en relación con los orígenes. Se diferencian por sobretonos de C-H ($8940-8403\text{ cm}^{-1}$), N-H (6535 cm^{-1}), Ar-C-H (5909 cm^{-1}), O-H (5014 cm^{-1}) y N-H+O-H de combinación (4491 cm^{-1}).

En el análisis de conglomerados de 18 poblaciones de maíz rojo, con base en los datos ajustados por la segunda derivada (Figura 8), se determinaron tres grupos significativamente diferentes (pseudo $F= 2.9$, $P < 0.05$). Específicamente en la muestras de polinización controlada, el Grupo I se integró por dos colectas de Chalcatongo, una de San Miguel y otra de San Esteban (Figura 8a). Las bandas que representan a este grupo son la combinación de primer sobretono C-H ($7602, 7445, 7258$ y 7123 cm^{-1}), estiramiento de del segundo sobretono de C=O ($5497, 5471, 5403, 5381, 5349$, y 5341 cm^{-1}) y la banda O-H de combinación ($5259, 5251, 5239$ y 5221 cm^{-1}). El Grupo II presentó bandas de absorción de C-H del segundo sobretono (8741 cm^{-1}), del primer sobretono C-H ($8043-7359\text{ cm}^{-1}$), N-H del primer sobretono ($6929, 6921, 6633$ y 6625 cm^{-1}) y estiramiento del segundo sobretono de C=O (5381 y 5349 cm^{-1}). Por último, el Grupo III agrupo a colectas de diferente origen y se observó que, por el tipo de enlaces que la conforman, las poblaciones tienen granos de tipo harinoso más que cristalino o corneo.

Los resultados de descripción y clasificación de colectas de maíz azul y rojo a través del análisis espectroscópico de harinas, son relevantes para clasificar los patrones de diversidad fenotípica. No obstante, se aportaría mayor información si se complementaran con diferentes análisis químicos que permitan establecer modelos de calibración y con ello predecir la composición de harinas y/o grano, y en conjunto obtener información con mayor poder descriptivo y clasificatorio (Berardo *et al.*, 2009) y también complementar los métodos



(a)



(b)

Figura 8. Dendrograma espectrofotométrico de absorbancia de harinas de maíz rojo en muestra de productores (a) y de polinización controlada (b), con datos ajustado por la segunda derivada. CH, Chalcatongo de Hidalgo; SMG, San Miguel El Grande; SEA, San Esteban Atlahuca; SY, Santiago Yosondua; TX, Tlaxiaco; y SCTA, Santa Catarina Yosonotú.

de clasificación fenotípica con base en caracteres agromorfológicos, isoenzimáticos, citogenéticos o de genética molecular con base en secuencias de ADN. En este trabajo, el origen de las muestras determinó su diferenciación fenotípica.

3.4 Conclusiones

Se determinaron diferencias en los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano de harinas de maíz azul y rojo, respecto al tipo de muestras. Las muestras de maíz donadas por el agricultor difieren espectroscópicamente de las muestras cultivadas en un solo sitio y multiplicadas con polinización controlada (cruzamientos fraternales).

La descripción y clasificación de las colectas de maíz azul y rojo fue más precisa cuando se utilizaron espectros de absorbancia de infrarrojo cercano ajustados con la segunda derivada, como consecuencia de la estimación de absorbancias promedio entre dos picos o longitudes de onda sucesivas (suavizado), y redujeron las correlaciones entre variables o longitudes de onda consecutivas.

La descripción de colectas de maíz azul y rojo, a través del análisis de componentes principales de los espectros de absorbancia, mostró que el origen de las colectas está relacionado con diferencias en patrones diferenciales de comportamiento, sobre todo las de Chalcatongo de Hidalgo y San Miguel El Grande.

El análisis de conglomerados permitió definir tres grupos fenotípicos tanto para las poblaciones de maíz azul como en las poblaciones de maíz rojo. En ambos casos, los espectros de infrarrojo cercano de harinas permitieron hacer inferencias de la estructura, composición y

textura o firmeza del grano, a través de diferencias en tonos y sobretonos de los enlaces C-H, O-H, C=O, N-H y COOH.

3.5 Bibliografía

- Agelet, L.E., D.D. Ellis, S. Duvick, A.S. Goggi, C.R. Hurburgh and C.A. Gardner. 2012a. Feasibility of near infrared spectroscopy for analyzing corn kernel damage and viability of soybean and corn kernels. *Journal of Cereal Science* 55:160-165.
- Agelet, L.E., P.R. Armstrong, I.R. Clariana and C.R. Hurburgh. 2012b. Measurement of single soybean seed attribute by near-infrared technologies. A comparative study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60:8314-8322.
- Anderson, E. and H.C. Cutler. 1942. Races of *Zea mays*: I. Their recognition and classification. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 29:69-89.
- Aragón, F., S. Taba, J.M. Hernández, J.D. Figueroa, V. Serrano y F.H. Castro. 2006. Catálogo de Maíces de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.
- Baye, T.M., T.C. Pearson and A.M. Settles. 2006. Development of calibration to predict maize seed composition using single kernel near infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science* 43:236-246.
- Benz, B. F. 1986. Taxonomy and evolution of Mexican maize. Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin. 433 p.
- Benz, B. F. 1997. Diversidad y distribución prehispánica del maíz mexicano. *Arqueología Mexicana* 5 16-23.
- Berardo, N., G. Mazzinelli, P. Valoti, P. Lagana and R. Redaelli. 2009. Characterización of maize germplasm for the chemical composition of the grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57:2378-2384.
- Brenna, O. V. and N. Berardo. 2004. Application of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to the evaluation of carotenoids content in maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52:5577-5582.
- Cen, H and Y. He. 2007. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science and Technology* 18:72-83.
- Chávez S., J.L. y P. Diego F. 2011. Familias campesinas y variación fenotípica de poblaciones nativas de maíz en la región de Tlaxiaco, Oaxaca. *Desarrollo, Ambiente y Cultura* 1(1):28-38.
- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2011. Complejos raciales de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai* 7(1):107-115.
- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Variación fenotípica de una muestra de maíces de la región de Chalcatongo de Hidalgo. *Ciencia Ergo Sum* 19(3):251-257.
- Contreras T., N. 2012. Descripción y clasificación de poblaciones de maíz Mixteco, mediante espectroscopia en infrarrojo cercano. Tesis Q.F.B., Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca. Oaxaca, México. 48 p.

- Dall'Asta, C., C. Falavigna, G. Galaverna and P. Battilani. 2012. Role of maize hybrids and their chemical composition in *Fusarium* infection and fumosin production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60:3800-3808.
- Diego-Flores, P., J.L. Chávez-Servia, J.C. Carrillo-Rodríguez y F. Castillo-González. 2012. Variabilidad de poblaciones de maíz nativo de la Mixteca baja oaxaqueña, México. *Facultad de Ciencias Agrarias (UNCuyo)* 44: 157-171.
- Egesel, C.Ö and F. Kahrman. 2012. Determination of quality parameters in maize grain by NIR reflectance spectroscopy. *Journal of Agricultural Science* 18:31-42.
- Espinosa, T. E., M. del C. Mendoza C., F. Castillo G., J. Ortiz C., A. Delgado A. y A. Carrillo S. 2009. Acumulación de antocianinas en pericarpio y aleurona del grano y sus efectos genéticos en poblaciones criollas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:303-309.
- FAO. 1993. El Maíz en la Nutrición Humana, Colección FAO: Alimentación y Nutrición No. 25. Roma, Italia. 179 p.
- Fernandez-Pierna, J.A., P. Vermeulen, O. Amand, A. Tossens, P. Dardenne and V. Baeten. 2012. NIR hyperspectral imaging spectroscopy and chemometrics for the detection of undesirable substances in food and feed. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 117:233-239.
- Ferrio, J.P, E. Bertran, M.M. Nachit, J. Catala and J.L. Araus. 2004. Estimation of grain yield by near-infrared reflectance spectroscopy in durum wheat. *Euphytica* 137:373-380.
- Fontanine, J., J. Horrand and B. Schimer. 2004. Amino acid contents in raw material can be precisely analyzed in a global network of near-infrared spectrometers: collaborative trials prove the positive effects of instrument standardization and repeatability files. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52:701-708.
- Fox, G. and M. Manley. 2009. Hardness methods for testing maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57:5647-5657.
- Frankel, O.H. 1970a. Genetic conservation in perspective. In: O.H. Frankel and E. Bennett (eds.), *Genetic Resources in Plants: Their Exploration and Conservation*, International Biological Program. Handbook No. 1, Oxford, IPB and Blackwell Scientific Publications.
- Frankel, O.H. 1970b. The genetic dangers of the green revolution. *World Agriculture* 19:9-13.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Gaspardo, B., S. Del Zotto, E. Torelli, S.R. Cividino, G. Firrao, G. Della Riccia and B. Stefanon. 2012. A rapid method for detection of fumosins B₁ and B₂ in corn meal using Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy implemented with integrating sphere. *Food Chemistry* 135:1608-1612.
- González-Martín, I., J.M. Hernández-Hierro, S. Salvador-Esteban, C. González-Pérez, I. Revilla and A. Vivar-Quintana. 2010. Discrimination of seasonality in cheeses by near-infrared technology. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91:1064-1069.
- Hao, X., K. Thelen and J. Gao. 2012. Prediction of the ethanol yield of dry-grind maize grain using near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering* 112:161-170.
- Hernández C., J.M. 1986. Estudio de caracteres químicos del grano de las razas mexicanas de maíz y clasificación racial. Tesis M.C., Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 79 p.

- Herrera C., B.E., F. Castillo G., J.J. Sánchez G., R. Ortega P. y M.M. Goodman. 2000 Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones nativas de maíz en una región: Caso de la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:335-354.
- Herrera-Cabrera, B.E., F. Castillo-González, J.J. Sánchez-González, J.M. Hernández-Casillas, R. Ortega-Paczka y M.M. Goodman. 2004. Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.
- Hong-Jiang, Z., W. Jin-Hong, L. Li-Jun, L. Ying, Y. Hua, Y. Xin-quiao, W. Xiao-Shan, C. Liang, and M. Han-Wei. 2007. Comparison of near infrared spectroscopy models for determining protein and amylase contents between calibration samples of recombinant inbre lines and conventional varieties of rice. *Agricultural Science in China* 6:941-948.
- Jiang, H Y., J. Zhu Y, Y.J. Zhu, M. Wei, L.R. Dai, J. M. Song, Y.L. Yan and S.J. Chen. 2007. Analysis of protein, starch and oil content of single intact kernels by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize (*Zea mays* L). *Journal Plant Breeding* 126:492-497.
- Karoui, R. 2012. Food authenticity and fraud. In: Y. Pico (ed.), *Chemical Analysis of Food: Techniques and Applications*. Academic Press, Amsterdam, The Netherlands. pp: 499-517.
- Kato, T.A., C. Mapes, L.M. Mera, J.A. Serratos y R.A. Bye. 2009. Origen y Diversificación del Maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- Lavine, B. and J. Workman. 2010. *Chemometrics*. Analytical Chemistry 82:4699-4711.
- López R., G., A. Santacruz V., A. Muñoz O., F. Castillo G., L. Córdova T. y H. Vaquera H. 2010. Perfil isoenzimático de maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. I. Caracterización de grupos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:1-10.
- Macho A., S. 2002. Metodologías analíticas basadas en espectroscopia de infrarrojo y calibración multivariante: Aplicación a la industria petroquímica. Tesis Doctoral, Departamento de Química Analítica i Química Orgánica, Universidad Rovira I Virgili, Tarragona, España. 222 p.
- Macías-Rodríguez, L., E. Quero-Gutiérrez y M.G. López. 2004. Caracterización de tres cultivares de fresa (*Fragaria xananassa* Duch.) por espectroscopia de infrarrojo medio y quimiometría. *Agrociencia* 38:487-495.
- Manley, M., P. Williams, D. Nilsson and P. Geladi. 2009. Near infrared hyperspectral imaging for the evaluation of endosperm texture in whole yellow maize (*Zea mays* L.) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57:8761-8769.
- McClintock, B., T.A. Kato Y., and A. Blumenschein. 1981. Chromosome Constitution of Races of Maize. Its Significance in the Interpretation of Relationships between Races and Varieties in the Americas. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico. 517 p.
- Mendez-Montealvo, G., J. Solorza-feria, M. Velázquez-del Valle, N. Gómez-Montiel, O. Paredes-López y L.A. Bello-Pérez. 2005. Composición química y caracterización calorimétrica de híbridos y variedades sintéticas de maíz cultivado en México. *Agrociencia* 39:267-274.
- Meng, E.C.H., J.E. Taylor and S.B. Brush. 1998. Implications for the conservation of wheat landraces in Turkey from a household model of varietal choice. In: M. Smale (ed.), *Farmers, gene banks and crop breeding: Economic analyses of diversity in wheat, maize and rice*. CIMMYT and Klumer Academic Publishers. pp:127-142.

- Mijangos-Cortés, J.O., T. Corona-Torres, D. Espinoza-Victoria, A. Muñoz-Orozco, J. Romero-Peñalosa and A. Santacruz-Varela. 2007. Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Michoacan, Mexico and the Chalqueño complex. *Genetic Resources and Crop Evolution* 54:309-325.
- Montes, J.M., H.F. Utz, W. Schipprack, B. Kusterer, J. Muminovic, C. Paul and A.E. Melchinger. 2006. Near-infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters. *Plant Breeding* 125:591-595.
- Orman, B.A. and R.A. Schumann. 1991. Comparison of near-infrared spectroscopy calibration methods for the prediction of protein, oil, and starch in maize grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 39:883-886.
- Ortega P., R.A. y J.J. Sánchez G. 1989. Aportaciones al estudio de la diversidad de maíz en las partes altas de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 12:105-119.
- Ortega P., R.A., J.J. Sánchez G., F. Castillo G. y J.M. Hernández C. 1991. Estado actual de los estudios sobre maíces nativos en México. En: R. Ortega, G. Palomino, F. Castillo, V.A. González y M. Livera (eds.), *Avances en el Estudio de los recursos Fitogenéticos de México*. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. pp: 161-185.
- Osborne, B.G., T. Fearn and P.H. Hindle. 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Longman Scientific & Technical, Essex, England.
- Paliwal, R.L. 2001. Tipos de maíz. En: R.L. Paliwal, G. Granados, H.R. Lafitte y A.D. Violic (eds.), *El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Patnaik, P. 2004. *Dean's Analytical Chemistry Handbook*. The McGraw Hill. 1280 p.
- Paulsen, M.R., L. O. Pordesimo, M. Singh, S.W. Mbuvi and B. Ye. 2003. Maize starch yield calibrations with near infrared reflectance. *Biosystems Engineering* 85:455-460.
- Perales R., H., S.B. Brush and C.O. Qualset. 1998. Agronomic and economic competitiveness of maize landraces and *in situ* conservation in Mexico. In: M. Smale (ed.), *Farmers, gene banks and crop breeding: Economic analyses of diversity in wheat, maize and rice*. CIMMYT and Klumer Academic Publishers. pp: 109-125.
- Prasanna, B.M. 2012. Diversity in global maize germplasm: Characterization and utilization. *Journal of Biosciences* 37:843-855.
- Preciado-Ortiz, R.E., S. García-Lara, S. Ortiz-Islas, A. Ortega-Corona and S.O. Serna-Saldivar. 2013. Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crop Research* 142:27-35.
- Putzig, C.L., M.A. Leugers, M.L. Mckelvy, G.E. Mitchell, R.A. Nyquist, R.R. Papenfuss, and L. Yurga. 1992. Infrared spectrometry. *Analytical Chemistry* 64:270-302.
- Reif, J.C., M. L. Warburton, X.C. Xia, D.A. Hoisington, J. Crossa, S. Taba, J. Muminovic, M. Bohn, M Frisch and A.E. Melchinger. 2006. Grouping of accessions of Mexican races of maize revisited with SSR markers. *Theoretical Applied and Genetics* 113:177-185.
- Rosales, A., L. Galicia, E. Oviedo, C. Islas and N. Palacio-Rojas. 2011. Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for protein, tryptophan, and lysine evaluation in quality protein maize (QPM) breeding programs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:10781-10786.
- Roussel, V., G. Branlard, J.C. Vézine, D. Berrand and F. Balfourier. 2005. NIRS analysis reveals temporal trends in the chemical composition of French bread wheat accessions cultivated between 1800 and 2000. *Journal of Cereal Science* 42:193-203.
- Sánchez, J.J., M.M. Goodman and C.W. Stuber. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59.

- SAS. 1999. SAS® Procedures Guide, ver. 8. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 1643 p.
- Serranti, S., D. Cesare, F. Marini and G. Bonifazi. 2013. Classification of oat and groat kernels using NIR hyperspectral imaging. *Talanta* 103:276-284.
- Shao, Y., Y. Cen, Y. He and F. Liu. 2011. Infrared spectroscopy and chemometrics for the starch and protein prediction in irradiated rice. *Food Chemistry*, 126: 1856-1861.
- Shiroma, C. and L. Rodriguez-Saona. 2009 Application of NIR and MIR spectroscopy in quality control chips. *Journal of Food Composition and Analysis* 22:596-605.
- Soldado, A., J.R. Quevedo, A. Bahamonde, S. Modroño, A. Martínez-Fernández, F. Vicente, D. Perez-Martín, A. Garrido-Varo, J.E. Guerrero and B. de la Roza-Delgado. 2011. Validation of two discriminant strategies applied to NIRS data spectra for detection of animal meals in feedstuffs. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9:41-48.
- Tallada, J.G., N. Palacios-Rojas and P.R. Armstrong. 2009. Prediction of maize seed attributes using a rapid single kernel near. *Journal of Cereal Science* 50:381-387.
- Tan, S-M., R-M. Luo, Y-P. Zhou, H. Xu, D-D. Song, T. Ze, T-T. Yang and Y. Nie. 2012. Boosting partial least-squares discriminant analysis with application to near infrared spectroscopic tea variety discrimination. *Journal of Chemometrics* 26:34-39.
- Valencia O., C. 1995. Fundamentos de Fitoquímica. Trillas, México, D.F. 235 p.
- Valenciaga, D., E. Oliveira y S. Saliba. 2006. La espectroscopia de reflectancia en el infrarojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 40:259-267.
- Vera-Guzmán, A.M., J.L. Chávez-Servia y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Proteína, lisina y triptófano en poblaciones nativas de maíz mixteco. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(Esp. 5):7-13.
- Vielle-Calzada, J.P. and J. Padilla. 2009. The Mexican landraces: Description, classification and diversity. In: J.L. Bennetzen and S.C. Hake (eds.), *Handbook of Maize: Its Biology*. Springer Science. pp: 543-561.
- Wellhausen, E.J., L.M. Roberts, E. Hernández X. y P.C. Mangelsdorf. 1951. Razas de Maíz de México; su Origen, Características y Distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F. 720 p.
- Williams, P., P. Geladi, G. Fox and M. Manley. 2009. Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Analytica Chimica Acta* 653:121-130.
- Williams, P.J., P. Geladi, T.J. Britz and M. Manley. 2012. Investigation of fungal development in maize kernels using NIR hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Journal of Cereal Science* 55:272-278.
- Workman, J. y L. Weyer. 2012. *Analytical Chemistry. Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near- Infrared Spectroscopy*. Second edition. CRC Press Taylor Francis group.
- Xiaobo, Z., Z. Jiewen, M.J. W. Povey, M. Holmes and M. Hanpin. 2010. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy. *Analytical Chemical Act* 667:14-32.
- Zepeda-Bautista, R., A. Carballo-Carballo, A. Muñoz-Orozco, J.A. Mejía-Contreras, B. Figuerora-Sandoval, F.V. González-Cossio y C. Hernández-Aguilar. 2009. Proteína, triptófano y componentes estructurales del grano en híbridos de maíz (*Zea mays* L.) producidos bajo fertirrigación. *Agrociencia* 43:143-152.
- Zilić, S., A. Serpen, G. Akilloğlu, V. Gökmen, y J. Vančetović. 2012. Phenolic Compounds, Carotenoids, Anthocyanins, and Antioxidant Capacity of Colored Maize (*Zea mays* L.) Kernels. *Journal Agricultural Food Chemistry*, 60, 1224-1231.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN GENERAL

En México la diversidad del maíz se ha clasificado en 59 razas, con base en caracteres morfológicos, izoenzimáticos y moleculares (Sánchez *et al.*, 2000; Reif *et al.*, 2006; Kato *et al.*, 2009). En Oaxaca, Aragón *et al.* (2006) reportaron la presencia de 35 razas con variaciones en coloraciones de grano, que es producto de la acumulación de pigmentos en la capa de cutícula, aleurona o endospermo del grano y determinado por diferencias genéticas (Espinosa-Trujillo *et al.* 2006). Regularmente, la coloración está relacionada por la presencia de antocianinas y carotenos (Espinosa *et al.* 2009). Los resultados de este trabajo mostraron diferentes patrones fenotípicos entre y dentro de las poblaciones de maíz azul y rojo, principalmente en caracteres descriptivos de planta, espiga, mazorca y grano. Algunos trabajos previos en la misma región, determinaron que tales caracteres son relevantes para describir y diferenciar las poblaciones de maíz en la Mixteca alta oaxaqueña (Chávez-Servia *et al.*, 2012; Chávez y Diego, 2011, Chávez-Servia *et al.*, 2011).

Las colectas de grano azul presentaron alta variación morfológica entre colectas para todas las variables. El resultado de esta gran variación muestra que; 1) hay fuerte presión de los nichos agroecológicos de producción, y 2) los agricultores, a través del tiempo, han aplicado una selección sistemática, y como resultado se observan divergencias tanto fenotípicas como genotípicas en las poblaciones de maíz, como se ha demostrado en otros trabajos sobre el análisis de divergencias genéticas en poblaciones nativas (Pressoir y Berthaud, 2004a y 2004b; Hayano-Kanashiro *et al.*, 2009; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2012;). En

las poblaciones de maíz rojo se presentó una reducida variabilidad en altura de planta y mazorca, número de ramas primarias de la espiga, días a floración masculina y femenina, número de granos por hilera en la mazorca y diámetros de olote, pero no hubo diferencias en características de espiga, mazorca, grano y rendimiento. Esto se puede explicar en parte, por la baja frecuencia de maíces rojos en la Mixteca como se evidenció en el trabajo de Chávez y Diego (2011) y en todo Oaxaca en la colecta de germoplasma realizada por Aragón *et al.* (2006); aunque, se esperaría que realmente suceda así y también da pauta para estudios más detallados a nivel del estado.

Los patrones de variación fenotípica de maíces azules, distintiva entre grupos, mostró una relación directa entre días a floración masculina y femenina con altura de mazorca y planta, dentro del Grupo I el comportamiento fue intermedio en la mayoría de caracteres, el Grupo II presentó un porte bajo en altura de planta; en contraste el grupo III fue tardío a la floración. Esto indica, probablemente, que las poblaciones han desarrollado ciertos grados de tolerancia a la sequía y variabilidad de la temporada de lluvias que predomina en la región; en este sentido, las poblaciones presentan una diversidad fenológica que les ha permitido enfrentar las irregularidades en cantidad, distribución y frecuencia de precipitaciones. Regularmente, el agricultor en caso de escasez de lluvias, siembra los maíces tardíos o denominados de “cajete” que identifica como los más tolerante a sequía. Después siembra los intermedios y precoces una vez que inicia o se establece el temporal, estos patrones también se han encontrado en otros trabajos de agricultura tradicional (Canul, 2009).

Las colección de poblaciones de grano rojo en la región que comprende los municipios de Chalcatongo de Hidalgo, Santiago Yosondúa y Santa Catarina Yosonotú, se agruparon en

tres grupos fenotípicos, con base en el tiempo que necesitan para alcanzar la floración masculina y femenina, altura de planta y mazorca, características de espiga, mazorca y olote, pero presentaron similar rendimiento de grano. Este tipo de grano, además de cumplir con satisfactores alimenticios para sus cultivadores, se asocia con aspectos socioculturales religiosos, y por ello la presión de selección ha sido mayor y su demanda, aunque pequeña, siempre es constante. En este contexto, los maíces rojos son regularmente de temporal y se han adaptado a la variabilidad y corta estación de lluvias, y presencia de heladas tempranas o tardías (Pérez-de la Luz *et al.*, 2011). El productor prefiere seleccionar mazorcas para semilla después de la cosecha, utilizando criterios como tamaño, sanidad, olote delgado y número de hileras (Herrera *et al.*, 2002), lo que ha permitido, en parte, la conservación de poblaciones nativas y tradicionales a través de generaciones, y son opciones para afrontar la irregularidad de precipitaciones, y en su dinámica poblacional, integrar nuevas poblaciones nativas (Dyer y Taylor, 2008; Espinosa *et al.*, 2009).

Por otro lado, dentro de las tecnologías y herramientas de análisis de gran número de muestras de alimentos surge la espectroscopía de infrarrojo cercano, con el objetivo de describir, clasificar y verificar autenticidad o fraudes en muestras de productos. En este trabajo se utilizaron muestras de harinas de granos donados por los agricultores e incrementados por siembra y polinización manual. Así, en los espectros de poblaciones de maíz azul y rojo, tanto en las muestras del agricultor como en polinización controlada, se identifican enlaces que corresponden a las bandas C-H, O-H, C=O, N-H y COOH, las que se asocian con proteínas (Tallada *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2007; Hong-Jian *et al.*, 2007), grasas (Jiang *et al.*, 2007); almidón (Shiroma y Rodríguez-Saona, 2009); carbohidratos (Egesel y Kahrman *et al.*, 2012) y agua (Ferrio *et al.*, 2004).

El patrón encontrado está asociado con el origen de la muestra y puede asumirse también con diferencias en manejo que el agricultor le da a sus poblaciones de maíz. De acuerdo con los espectros de la primera y segunda se observó que las poblaciones de Chalcatongo de Hidalgo, San Miguel El Grande, Santiago Yosondúa y Tlaxiaco se ubican de manera cercana, lo mismo ocurre para las poblaciones de San Miguel El Grande y San Esteban Atlatlahuca. Este comportamiento se debe, en parte, a que en la región Mixteca los campesinos siembran poblaciones con ciertas características distintivas de planta, mazorca y grano muy cercanas las descritas para las razas Mixteco, Cónico y Cháqueño, y por ello podría pensarse que son distintivas de la región como se ha documentado en otros trabajos (Perales *et al.*, 2005). La forma de selección ha permitido mantener las características propias de cada población, y con el tiempo se fijan ciertos caracteres para considerarse identidades genéticas independientes cuando se analizan por isoenzimas o algún marcador basado en ADN (Chávez *et al.*, 2003; Pressoir y Berthaud, 2004b; Hayano-Kanashiro *et al.*, 2009).

En este trabajo, se obtuvieron mejores ajustes con la segunda derivada para describir y clasificar las poblaciones nativas de maíz azul y rojo. Macho (2002) sugiere que, información de la segunda deriva se pueden identificar longitudes de onda características de cada compuesto de la muestra. Es importante mencionar que, las poblaciones con polinización controlada, que se establecieron en campo bajo las mismas condiciones se diferenciaron de las poblaciones originales, las que fueron cultivadas en diferentes nichos agroecológicos. Esto es el ambiente influyó en el comportamiento espectrofotométrico de las harinas.

Canul (2009) reconoce que las poblaciones nativas de maíz están adaptadas a las condiciones topográficas, orografías, edáficas y climáticas de cada región de origen, debido al proceso de selección, cantidad de precipitación y suelos de escasa fertilización. Adicionalmente menciona que tal adaptación se asocia con aspectos culinarios como el color, tamaño, textura del grano y tiempo en cocción, con base a gustos y preferencias locales.

La dispersión de las poblaciones de maíz rojo presentó menor variación que los de grano azul. En términos generales y descriptivos espectrofotométricos, se mostraron distinciones entre las poblaciones del municipio de Chalcatongo de Hidalgo, San Miguel El Grande y San Esteban Atlatluca, respecto a la de otros orígenes. El reducido número de muestras de grano rojo incluido en este trabajo (18), no permitió hacer una descripción más precisa, aunque siempre ha estado en baja proporción en la región (Chavéz y Diego, 2011). Debido a la baja proporción de poblaciones y superficie sembrada de maíz rojo, implica un mayor riesgo de pérdida o erosión genética, y por consiguiente es necesario buscar estrategias que promuevan el mantenimiento y aprovechamiento de esa diversidad genética.

Los resultados aquí presentados son antecedentes útiles para formular y establecer diversas estrategias de conservación del germoplasma local en sus lugares de cultivo. Aragón *et al.* (2006) proponen que la región de Chalcatongo de Hidalgo sea considerada como un área de conservación y mejoramiento *in situ* de la raza Mixteco. En este sentido, las aportaciones previas de Chávez-Servia *et al.* (2012) y los resultados mostrados en este trabajo podrían ayudar a formular estrategias a corto y mediano plazo que eviten la inminente erosión de los acervos genéticos de la región. No obstante, que representan un alto potencial nutracéutico y

farmacológico por el contenido de antocianinas y carotenos, entre otros aspectos (Alarcón-Aparicio *et al.*, 2010, 2011).

4.1 Bibliografía

- Aguilar-Castillo, J.A., A. Carballo-Carballo, F. Castillo-González, A. Santacruz-Várela, J. Mejía-Contreras, J. Crossa-Hiriartte y G. Baca-Castillo. 2006. Diversidad fenotípica y variantes distintivas de la raza Jala de maíz. *Agricultura Técnica en México*. 32:1
- Alarcón-Aparicio, E., R.I. Guzmán-Gerónimo, E.N. Aquino-Bolaños y J.L. Chávez-Servia. 2011. Actividad anticancerígena in vitro de extractos de maíz y tortilla azul. En: 3er. Congreso Internacional de Biología, Química y Agronomía, Septiembre 28–Octubre 1 de 2011, Zapopan, México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Alarcón-Aparicio, E., T. Alarcón-Zavaleta, P. Gómez-López, J. Alvarado, R. Oliart-Ros, E. Aquino, R. Guzmán-Gerónimo and J.L. Chávez-Servia. 2010. Total polyphenols, total anthocyanins and antioxidant activity of blue maize (*Zea mays* L.). En: Fourth International Congress on Food Science and Food Biotechnology in Developing Countries, November 29-December 1, Boca del Río, Veracruz, Mexico.
- Aragón F., S. Taba, J.M. Hernández, J.D. Figueroa, V. Serrano y F.H. Castro. 2006. Catálogo de Maíces de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.
- Canul K., J. 2009. Diversidad genética de poblaciones nativas de maíz azul y su mantenimiento en el sistema milpa de Yucatán. Tesis Dr.C. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Campus Montecillo. 70 p.
- Chávez J., P. Ramírez, F. Castillo, J. Canul y V. Interían. 2003. Diversidad genética de un sistema tradicional de policultivo en México: variación izoenzimática. *Revista de Ciencias Agrícolas* 20:99-117.
- Chávez S., J.L y P. Diego F. 2011. Familias campesinas y variación fenotípica de poblaciones nativas de maíz en la región de Tlaxiaco, Oaxaca. *Desarrollo, Ambiente y Cultura* 1:28-38.

- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2011. Complejos raciales de poblaciones de Maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Sociedad, Cultura y Desarrollo*. 7(1):107-115.
- Chávez-Servia, J.L., P. Diego-Flores y J.C. Carrillo-Rodríguez. 2012. Variación fenotípica de una muestra de maíces de la región Chalcatongo de Hidalgo, Oaxaca. *Ciencia Ergo Sum* 18: 251-257
- Dyer G. A. and J.E. Taylor. 2008. A crop population perspective on maize seed systems in Mexico. *PNAS*. 105:470-475.
- Egesel C.Ö. and F. Kahriman. 2012. Determination of quality parameters in maize grain by NIR reflectance spectroscopy. *Journal of Agricultural Science*. 18:31-42.
- Espinosa T., E., M.C. Mendoza C., F. Castillo G., J. Ortiz C., A. Delgado A. y A. Carrillo S. 2009. Acumulación de antocianinas en pericarpio y aleurona del grano y sus efectos genéticos en poblaciones criollas de maíz pigmentado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:303-309.
- Espinosa-Trujillo, E., M.C. Mendoza C., F. Castillo G. 2006. Diversidad fenotípica entre poblaciones de maíz con diferentes grados de pigmentación *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2): 19 -23.
- Ferrio, J.P, E. Bertran, M.M. Nachit, J. Catala and J.L. Araus. 2004. Estimation of grain yield by near-infrared reflectance spectroscopy in durum wheat. *Euphytica* 137:373-380
- Hayano-Kanashiro, C., C. Calderón-Vázquez, E. Ibarra-Laclette, L. Herrera-Estrella, and J. Simpson. 2009. Analysis of gene expression and physiological responses in three Mexican maize landraces under drought stress and recovery irrigation. *PLoS ONE* 4:e7531 doi:10.1371/journal.pone.0007531.
- Herrera C., B.E., A. Macías-López., R. Díaz R., M. Valadez R. y A. Delgado A. 2002. Uso de semilla criolla y caracteres de mazorca para la selección de semilla de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:17-23.
- Hong-Jiang, Z., W. Jin-Hong, L. Li-Jun, L. Ying, Y. Hua, Y. Xin-quiao, W. Xiao-Shan, C. Liang, and M. Han-Wei. 2007. Comparison of near infrared spectroscopy models for determining protein and amylase contents between calibration samples of recombinant inbre lines and conventional varieties of rice. *Agricultural Science in China* 6:941-948.

- Jiang, H Y., J. Zhu Y, Y.J. Zhu, M. Wei, L.R. Dai, J. M. Song, Y.L. Yan and S.J. Chen. 2007. Analysis of protein, starch and oil content of single intact kernels by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize (*Zea mays* L). *Journal Plant Breeding* 126:492-497
- Kato, T.A., C. Mapes, L.M. Mera, J.A. Serratos y R.A. Bye. 2009. Origen y Diversificación del Maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 p.
- Liu L., D. Cozzolino, W. U. Cynkar, M. Gishen and C. B. Colby. 2006. Geographic Classification of Spanish and Australian Tempranillo red wine by visible and near-infrared spectroscopy combined with multivariate analysis. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 54, 6754-6759.
- Macho A., S. 2002. Metodologías analíticas basadas en espectroscopia de infrarrojo y calibración multivariante: Aplicación a la industria petroquímica. Tesis Doctoral, Departamento de Química Analítica i Química Orgánica, Universidad Rovira I Virgili, Tarragona, España. 222 p.
- Macías-Rodríguez, L., E. Quero-Gutiérrez y M.G. López. 2004. Caracterización de tres cultivares de fresa (*Fragaria xananassa* Duch.) por espectroscopia de infrarrojo medio y quimiometría. *Agrociencia* 38:487-495.
- Ortega P.R. 2003. La diversidad del maíz en México. In. Sin maíz no hay país. Culturas Populares e Indígenas. 123-154.
- Perales H.R., B. F. Benz and S. B. Brush. 2005. Maize diversity and ethnolinguistic diversity in Chiapas, México. *PNAS* 102:946-954.
- Pérez-de la Luz, R., H. López-Sánchez, P. López A, A. Gil-Muñoz, A. Santacruz-Varela y J. D. Guerrero-Rodríguez. 2011. Evaluación de poblaciones nativas de maíz en ambientes con heladas en valles altos de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:5 703-714
- Pressoir, G. and J. Berthaud. 2004a. Patterns of population structure in maize landraces from the Central Valleys of Oaxaca, México. *Heredity* 92:88-94.
- Pressoir, G. and J. Berthaud. 2004b. Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. *Heredity* 92:95-101.

- Reif J.C., M. L. Warburton, X. C. Xia, D.A. Hoisington, J. Crossa, S. Taba J, J. Muminovic, B. Bohn, M Frisch & A.E. Melchinger. 2006. Grouping of accessions of Mexican races of maize revisited with SSR markers. *Theoretical Applied and Genetic*. 113:177-185.
- Rodríguez-Pérez, G., F. Zavala-García, C. Ojeda-Zacarías, A. Gutiérrez-Diez, J.E. Treviño-Ramírez y F. Rincón-Sánchez. 2012. Diversidad de maíces criollos de Nuevo León, México, mediante AFLP y caracteres morfológicos. *Agronomía Mesoamericana* 23(2):29-39.
- Sánchez J.J., M.M. Goodman y C.W. Stuber. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Econ. Bot.* 54:43-59.
- Shiroma, C. and L. Rodriguez-Saona. 2009. Application of NIR and MIR spectroscopy in quality control chips. *Journal of Food Composition and Analysis* 22:596-605
- Tallada, J.G., N. Palacios-Rojas and P.R. Armstrong. 2009. Prediction of maize seed attributes using a rapid single kernel near. *Journal of Cereal Science* 50:381-387.
- Williams, P., P. Geladi, G. Fox and M. Manley. 2009. Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Analytica Chimica Acta* 653:121-130

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

En poblaciones de maíz azul y rojo se determinaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en uno o más caracteres de planta, espiga, mazorca y grano. Las colectas de grano azul presentaron alta variación morfológica entre colectas para todas las variables, de manera contraria la colección de grano rojo no mostró diferencias en caracteres de espiga, longitud y diámetro de mazorca y dimensiones de grano. En ambos casos los patrones de variación fenotípica dependen de la variabilidad en altura de planta y mazorca, días a floración masculina o femenina, y número de ramas de la espiga. Además estos patrones presentaron cierta asociación con las regiones de origen de las poblaciones.

En las poblaciones de maíz azul se lograron clasificar tres grupos significativamente diferentes ($P < 0.05$) las que difieren en altura de planta y mazorca, descripción de la espiga, ancho y grosor de grano. En este caso el rendimiento experimental de grano de los grupos fenotípicos varió de 4.7 a 10.9 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. En la colección de grano rojo se integraron tres grupos fenotípicos significativamente diferentes ($P < 0.05$). Los grupos se diferenciaron por el tiempo en alcanzar la floración masculina o femenina, altura de planta y mazorca y caracteres de mazorca y olote. Entre grupos, el rendimiento experimental de grano no presentó diferencias significativa y varió de 5.9 a 7.8 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Se determinaron diferencias en los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano tanto en harinas de grano azul como en rojo. Las poblaciones donadas por el agricultor difieren de las muestras de polinización en los espectros de absorbancia de infrarrojo cercano, primera y

segunda derivada. La a segunda derivada fue más precisa para describir y clasificar poblaciones de maíz azul y rojo. Los patrones de variación fenotípica de poblaciones de maíz azul y rojo, a través del análisis de componentes principales de los espectros de absorbancia, se mostró que están asociados con el origen de las colectas. En el análisis de conglomerados se lograron definir tres grupos fenotípicos, tanto en poblaciones de maíz azul como en rojo. En ambos casos, los espectros de infrarrojo cercano de harinas permitieron hacer inferencias de la estructura, composición y textura o firmeza del grano, a través de diferencias en tonos y sobretonos de los enlaces C-H, O-H, C=O, N-H y COOH.

Las poblaciones de grano azul y rojo, presentaron una alta variabilidad agromorfológica y espectrofotométrica que puede aprovecharse en un programa de mejoramiento participativo con orientación y objetivos locales, así como para diseñar o promover una estrategia de conservación y aprovechamiento de esa diversidad genética. La baja frecuencia de poblaciones de grano rojo en la Mixteca alta oaxaqueña requiere de atención especial por los programas regionales y nacionales de conservación de germoplasma de maíz nativo.