



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO EN LÍNEAS EXPERIMENTALES DE CEBADA DE DOS HILERAS (*Hordeum distichum* L.)

DENISE NAVARRETE ROJAS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: **RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO EN LÍNEAS EXPERIMENTALES DE CEBADA DE DOS HILERAS (*Hordeum distichum* L.)** realizada por la alumna: **DENISE NAVARRETE ROJAS**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. VÍCTOR HUGO VOLKE HALLER

DIRECTOR
DE TESIS

DR. RENÉ GÓMEZ MERCADO

ASESOR

DR. ANTONIO TURRENT FERNÁNDEZ

ASESOR

DR. AQUILES CARBALLO CARBALLO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2015

RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO EN LÍNEAS EXPERIMENTALES DE CEBADA DE DOS HILERAS (*Hordeum distichum* L.)

Denise Navarrete Rojas, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

En México, la producción de malta para la elaboración de cerveza ha sido con cebada de seis hileras (*Hordeum vulgare* L.); sin embargo, la cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.) presenta mejores características de grano para obtener una cerveza de mejor calidad. Desde hace seis años, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) trabaja en la obtención de variedades de cebada de dos hileras que se adapten a las condiciones edafoclimáticas de las regiones productoras de cebada, y en su manejo agronómico, que cumplan con los estándares de calidad de grano aceptados por la industria maltera. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el comportamiento de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras a la fertilización nitrogenada y dosis de semilla, en relación a rendimiento y calidad de grano para la producción de malta, bajo condiciones de temporal, en Villa de Tezontepec, Hidalgo. El experimento se llevó a cabo durante tres años, 2011, 2012 y 2013, en un diseño de parcelas divididas y dos repeticiones, donde la parcela grande correspondió a las líneas experimentales de cebada (M1H2, M2H2, M3H2, M4H2 y M5H2) y las parcelas chicas a los tratamientos de un diseño factorial 3^2 resultado de la combinación de las dosis de nitrógeno (30, 60 y 90 kg ha⁻¹) y las dosis de semilla (70, 100 y 130 kg ha⁻¹). El largo del ciclo del cultivo fue similar en los tres años, de 98 días, con escasa variación entre las líneas experimentales (diferencias máximas de 1 a 2 días). Se presentaron diferencias en la cantidad y distribución de las precipitaciones y variaciones en las temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo del cultivo, lo que afectó el rendimiento de grano, con mayores rendimientos en el año 2012. Las dosis óptimas económicas de nitrógeno variaron entre 30 y 50 kg N ha⁻¹, con 73 %

de los casos con valores de 30 kg N ha⁻¹, el valor menor probado; las dosis de semilla entre 70 y 130 kg semilla ha⁻¹, con 47 % de los casos con valores de 70 kg semilla ha⁻¹, el valor menor probado, y los rendimientos óptimos económicos entre 1.807 y 2.529 t ha⁻¹ en el año 2011, 2.918 y 3.265 t ha⁻¹ en el año 2012, 2.148 y 2.783 t ha⁻¹ en el año 2013. Todas las líneas experimentales presentaron altos contenidos de proteína del grano. Excepto la línea experimental M3H2 en el año 2012. Todas las líneas experimentales presentaron valores óptimos en peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado, solamente en el año 2013. Sin embargo, los altos contenidos de proteína del grano de las líneas experimentales probadas las hacen inapropiadas para la elaboración de malta, pero por sus buenos rendimientos en la zona, su uso estaría canalizado para consumo humano o para forraje o alimentación para ganado.

Palabras clave: cebada de dos hileras, malta, contenido de proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico, índice de llenado.

**GRAIN YIELD AND QUALITY OF FIVE EXPERIMENTAL TWO-ROWED BARLEY
(*Hordeum distichum* L.) LINES**

Denise Navarrete Rojas, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

In Mexico, production of malt for brewing was six-row barley (*Hordeum vulgare* L.); however, the two-row barley (*Hordeum distichum* L.) grain presents better characteristics for a better quality beer. For six years, the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP) works in obtaining varieties of two-row barley to suit the conditions of soil and climate of the producing regions of barley and handling agronomic, who meet quality standards accepted by the malting grain industry. The objective of this research paper was to evaluate the behavior of five experimental lines of two-row barley to nitrogen fertilization and seeding rate in relation to yield and quality of grain for malt production under rainfed conditions in the Villa de Tezontepec area in Hidalgo State. The experiment was conducted for three years, 2011, 2012 and 2013, in a split plot design and two replications, where large plot corresponded to experimental barley lines (M1H2, M2H2, M3H2, M4H2 and M5H2) and small to treatment of a 3² factorial design result of the combination of the nitrogen dose plots (30, 60 and 90 kg ha⁻¹) and seed doses (70, 100 and 130 kg ha⁻¹). The length of the crop cycle was similar in the three years, 98 days, with little variation between the experimental lines (maximum differences of 1 - 2 days). Differences in the amount and distribution of rainfall and changes in maximum and minimum temperatures during the crop cycle were shown, which affect grain yield, higher yields in 2012. The optimal economic nitrogen rates varied between 30 and 50 kg N ha⁻¹, with 73% of cases with values of 30 kg N ha⁻¹, the lowest value tested; the seed rates between 70 and 130 kg seed ha⁻¹, with 47% of cases with values of 70 kg seed ha⁻¹, the lowest value tested, and yields economic optimum between 1.807 and 2.529 t ha⁻¹ in the 2011, 2.918 and 3.265 t ha⁻¹ in 2012, 2.148

and 2.783 t ha⁻¹ in 2013. All experimental lines showed high grain protein content. Except the experimental line M3H2 in 2012. All experimental lines showed optimal values in grain weight, test weight and degree of filling, only in 2013. However, high grain protein content of the experimental lines tested make them unsuitable for the production of malt, but for its good performance in the area, its use would be channeled for human consumption or for forage or feed for livestock.

Key words: two-row barley, malt, protein content, grain weight, test weight, degree of filling.

AGRADECIMIENTOS

Al ser supremo, Dios, por estar conmigo siempre, cuidar de mí en todo momento y permitir terminar satisfactoriamente mis estudios de postgrado.

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

A los integrantes de mi consejo particular, el Dr. Víctor H. Volke Haller por su apoyo, tiempo y guía durante mi formación académica y por las sugerencias en el análisis durante mi proyecto de investigación. El Dr. René Gómez Mercado por las facilidades brindadas, por permitirme trabajar con el proyecto de cebada del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El Dr. Antonio Turrent Fernández y el Dr. Aquiles Carballo Carballo por sus comentarios y seguimiento a esta investigación.

A todos los Maestros y Doctores del postgrado por el conocimiento compartido y su ejemplo que hicieron enriquecer un poco más mi desarrollo profesional. A todos mis compañeros y amigos por los buenos y malos momentos que de alguna forma me motivaron a seguir superándome.

Al personal del laboratorio de semillas y del laboratorio de génesis y morfología de suelos del Colegio de Postgraduados por las facilidades otorgadas para realizar los análisis necesarios para esta investigación.

A mis padres, Baltazar Navarrete Diego y Eneida Rojas Bailón, por todos los consejos que me han brindado, por el apoyo incondicional, por el ejemplo de superación y el valor para enfrentar cualquier dificultad en la vida. A ustedes, los seres que más quiero, muchas gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. El cultivo de la cebada	3
2.2. Variedades.....	4
2.2.1. Variedades mejoradas de seis hileras	4
2.2.2. Variedades mejoradas de dos hileras.....	7
2.3. Usos del grano: malta y forraje	7
2.4. Efecto de las condiciones ambientales	8
2.4.1. Clima.....	8
2.4.2. Suelo.....	9
2.5. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento de grano.....	9
2.6. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre variables de calidad del grano	11
2.6.1. Porcentaje de proteína.....	11
2.6.2. Peso del grano.....	14
2.6.3. Peso hectolítrico	15
2.6.4. Índice de llenado.....	15
2.7. Efecto de la dosis de semilla sobre el rendimiento y la calidad de grano ...	16
III. OBJETIVO	18
IV. HIPÓTESIS	18
V. MATERIALES Y MÉTODOS	19
5.1. Ubicación del sitio experimental.....	19
5.2. El cultivo de la cebada en la zona de estudio	20
5.3. Información de suelo y clima.....	20
5.3.1. Muestreo y análisis de suelo.....	20

5.3.2. Descripción del perfil de suelo	20
5.3.3. Datos climatológicos	21
5.4. Diseño de tratamientos y experimental	21
5.5. Conducción del experimento.....	22
5.5.1. Preparación del terreno	22
5.5.2. Siembra	22
5.5.3. Fertilización.....	22
5.5.4. Control de malezas	22
5.5.5. Cosecha.....	23
5.6. Variables evaluadas.....	23
5.6.1. Rendimiento.....	23
5.6.2. Calidad de grano.....	24
5.7. Análisis estadístico.....	25
5.7.1. Análisis de varianza	25
5.7.2. Análisis de regresión.....	26
5.8. Análisis de optimización.....	28
5.8.1. Dosis óptimas económicas de nitrógeno y semilla.....	28
5.8.2. Minimización y maximización de variables de calidad de grano	30
5.9. Análisis de correlación	31
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
6.1. Suelos de la localidad y de los sitios experimentales.....	32
6.2. Clima.....	33
6.3. Ciclo del cultivo	33
6.4. Rendimiento de grano.....	33
6.4.1. Análisis de regresión.....	38
6.4.2. Análisis económico	40
6.5. Calidad del grano.....	44
6.5.1. Análisis de varianza de las variables de calidad	44
6.5.2. Efecto de nitrógeno y dosis de semilla sobre las variables de calidad de grano.....	47
6.5.2.1. Proteína.....	47

6.5.2.2. Peso de mil granos.....	51
6.5.2.3. Peso hectolítrico.....	54
6.5.2.4. Índice de llenado	57
6.6. Relaciones entre rendimiento y variables de calidad, y entre variables de calidad.....	59
6.6.1. Rendimiento y variables de calidad	59
6.6.2. Relación entre variables de calidad	62
VII. CONCLUSIONES	63
VIII. LITERATURA CITADA.....	65
IX. APÉNDICE	73

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis de varianza general en parcelas subdivididas para cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (<i>Hordeum Distichum</i> L.).....	26
Cuadro 2. Costos fijos de producción de cebada.	29
Cuadro 3. Costos variables de producción de cebada.	30
Cuadro 4. Valores óptimos de las variables de calidad maltera.	31
Cuadro 5. Fecha de inicio de las etapas fenológicas durante el ciclo del cultivo de las cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	34
Cuadro 6. Análisis de varianza combinado para el rendimiento de grano en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, de los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	34
Cuadro 7. Rendimiento de las líneas experimentales de cebada dos hileras en los años 2011, 2012 y 2013, y promedios de ellas en los tres años, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	35
Cuadro 8. Análisis de varianza por año para rendimiento de grano en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, de los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	36
Cuadro 9. Ecuaciones de regresión para rendimiento de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	39
Cuadro 10. Análisis económico de rendimiento de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	41
Cuadro 11. Análisis de varianza combinado para las variables de calidad de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	45
Cuadro 12. Valores medios de las variables de calidad de grano de cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	46

Cuadro 13. Ecuaciones de regresión para porcentaje de proteína de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	48
Cuadro 14. Valor mínimo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para proteína del grano en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	49
Cuadro 15. Ecuaciones de regresión para peso de mil granos de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	51
Cuadro 16. Valor máximo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para peso de mil granos en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	53
Cuadro 17. Ecuaciones de regresión para peso hectolítrico de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	54
Cuadro 18. Valor máximo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para peso hectolítrico en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	56
Cuadro 19. Ecuaciones de regresión para índice de llenado de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.....	57
Cuadro 20. Valor máximo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para el índice de llenado de grano en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	59
Cuadro 21. Ecuaciones de regresión entre el rendimiento de grano y las variables de calidad en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (<i>Hordeum distichum</i> L.), en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.	61

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Ubicación del sitio experimental, Villa de Tezontepec, Hidalgo. 19
- Figura 2. Rendimientos medios de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.) y la variedad Esmeralda (*Hordeum vulgare* L.), en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo..... 37
- Figura 3. Rendimientos óptimos económicos de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.), en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo. 42

I. INTRODUCCIÓN

En México, la producción de cebada para malta de la elaboración de cerveza se realiza con variedades de seis hileras (*Hordeum vulgare* L.), porque la investigación en mejoramiento genético las hicieron aptas a muchas regiones con distintas condiciones climáticas y a resistencia a plagas y enfermedades; sin embargo, en otros países productores de cebada para malta, se utilizan variedades de dos hileras (*Hordeum distichum* L.), puesto que permiten obtener una mejor calidad de malta y cerveza. Esto se debe a que la cebada de dos hileras tiene un grano más grueso y una cascara más fina que los granos de la cebada de seis hileras, además que tiene mayor cantidad de extracto y menor contenido de proteínas y enzimas.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en su Programa de Mejoramiento Genético, inició en 2008 la investigación en variedades de cebada de dos hileras que se adaptasen a las condiciones climáticas de las diferentes regiones del país, así como para encontrar el mejor manejo agronómico a fin de optimizar el contenido de proteína en el grano, el que depende de muchos factores, entre otros, de la fertilización, la calidad del suelo, las horas luz, la variedad, las condiciones climáticas, etc., de tal suerte que en ocasiones puede ocurrir que la cebada sembrada para calidad maltera al término del ciclo de producción no reúna los criterios de calidad requeridos, por lo que el grano tiene que destinarse a forraje.

Los programas de mejoramiento genético buscan encontrar variedades con buen rendimiento y calidad de grano, que se adapten a condiciones edafoclimáticas determinadas y sean resistentes a enfermedades. Sin embargo, dos factores de manejo inciden en el rendimiento, son la fertilización nitrogenada y la dosis de semilla, a la vez que la fertilización nitrogenada presenta efecto también en el contenido de proteína del grano, de tal modo que si este es muy elevado no es apropiado para la fabricación de malta para cerveza.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar durante tres años, el comportamiento de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, así como el efecto de la fertilización nitrogenada y la dosis de semilla, en relación a rendimiento y calidad de grano en la producción de malta para la elaboración de cerveza, de acuerdo con las condiciones climáticas y edáficas de la zona de Villa de Tezontepec, Hidalgo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de la cebada

En la actualidad, la cebada se produce en casi todo el mundo (Fundación Produce Guanajuato, 2005), clasificándose en el quinto lugar de producción entre todos los cultivos alimentarios, detrás del maíz, trigo, arroz y soya (Baik y Ullrich, 2008).

El uso de la cebada se orienta a la producción de malta, para la elaboración de cerveza (60%), y para la alimentación de ganado (34%), entre otros usos y desechos (Bello-Pérez *et al.*, 2010). Actualmente hay una tendencia a la diversificación en la utilización de la cebada; por ejemplo, se emplea en la producción de alcohol combustible (Ingledew *et al.*, 1995), en películas biodegradables (Tejinder, 2003), como sustituyente parcial de la harina de trigo (Ragae y El Sayed, 2006) o como fibra dietética (Izydorczyk *et al.*, 2008).

En México, la producción de cebada ha ido en aumento en los últimos años, ocupando así el cuarto lugar en la producción nacional de granos, después del maíz, sorgo, trigo y desplazando al arroz (Bello-Pérez *et al.*, 2010). En el 2012, la producción de cebada grano fue de 1 031 533 t, siendo la superficie sembrada de 335 767 ha y la cosechada de 328 190 ha, con un rendimiento medio de 3.14 t ha⁻¹ y un valor de la producción de 3 945 millones de pesos (SAGARPA-SIAP, 2014).

Además, la cebada tiene gran importancia socioeconómica en México, debido que representa el ingreso de miles de familias que habitan en zonas productoras de los Valles Altos de la mesa central (Zamora *et al.*, 2003). En los últimos años el Estado de Hidalgo ha sido el principal productor de cebada grano, con cifras que alcanzan las 236 620 t, lo que representa un 42 % de la producción total nacional, seguido por Tlaxcala, con 163 517 ha (29 %), Puebla, con 76 882 ha (14 %), Estado de México, con 60 303 ha (11 %) y Guanajuato, con 9 658 ha (2 %) (SAGARPA-SIAP, 2014).

2.2. Variedades

Las cebadas que se cultivan en México pertenecen a la familia de las *Poáceas* (gramíneas), al género *Hordeum vulgare* L. (de seis hileras) y *Hordeum distichum* L. (de dos hileras), que por sus características físicas y químicas fueron registradas por la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) como aptas para la producción de malta (Impulsora Agrícola, S.A., 1995).

Sin embargo, no cualquier cebada puede dar buena calidad de malta. Así por ejemplo, la cebada común (*Hordeum spontaneum*) no tiene calidad maltera; no obstante, cuando se inició la industria cervecera en México, en 1906, como no había otro tipo de cebada, se le usó para fabricar malta.

Los investigadores agrícolas, mediante cruzamientos entre cebadas de todo el mundo, han seleccionado plantas con mejores características agronómicas, y han obtenido variedades que sirven para fines específicos, por ejemplo:

- *Variedades de grano sin cascara*, con alto contenido de proteína, que se usan para alimentación humana.
- *Variedades forrajeras*, también con alto contenido de proteína, que se usan para alimentación animal.
- *Variedades malteras*, cuyo contenido de proteína no es alto, y que tienen el grano con propiedades químicas adecuadas para la obtención de malta.

2.2.1. Variedades mejoradas de seis hileras

Con el fin de solucionar el problema que representa la roya lineal amarilla (*Puccinia striiformis f. sp. hordei*), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), mediante el convenio establecido en 1957 por la Secretaria de Agricultura y Ganadería, La Fundación Rockefeller y la Industria Maltera Nacional, trabajó intensamente en la generación de variedades mejoradas de cebada que tuvieran resistencia a esta enfermedad, y con ello, minimizaran los

costos por concepto de aplicación de fungicidas para su control (González *et al.*, 2006).

Bajo este contexto, desde la década de 1960, el INIFAP ha liberado 18 variedades con adaptación a las condiciones de riego y temporal, de las cuales las de mayor éxito son las variedades Esperanza, Esmeralda y Adabella.

Variedad Esperanza

La variedad *Esperanza* fue liberada en el año 1989. Esta variedad superó en resistencia a la roya lineal amarilla y en rendimiento a las variedades prevalecientes, como *Centinela* y *Puebla*. Es resultado de la selección de líneas avanzadas de cebada a partir de la variedad Dwarf Good proveniente de la India, y del cruzamiento final que se hizo en el Campo Experimental de El Bajío, Guanajuato, y del Valle de México, México. Sus cualidades productivas sobresalientes hicieron posible que se sembrara año con año desde 1989, en una superficie que ha llegado a ser de 80,000 ha en todo el país, en los últimos años.

Esta variedad tiene crecimiento de primavera, es de porte enano, y es considerada como una variedad de ciclo intermedio. La floración ocurre entre los 69 y 77 días y la madurez se presenta entre los 118 y los 134 días, dependiendo de las condiciones ambientales (humedad, temperatura) y de la fecha de siembra (González *et al.*, 2006).

Los granos de la variedad Esperanza reúnen las características de calidad requeridas por la industria cervecera nacional, debido al balance que guardan sus características químicas en grano malteado, esto es: 1) como extracto de molienda fina, 2) diferencia entre el extracto de molienda fina y el extracto de molienda gruesa, 3) poder diastásico, alfa-amilasa, y 4) relación entre proteína soluble y proteína total (González *et al.*, 2006).

Variedad Esmeralda

La variedad Esmeralda es el resultado de la selección de líneas segregantes de cebada originadas del cruzamiento simple de las líneas M9653 X M9667, realizado por el Programa Nacional de Cebada del INIFAP, en el Campo Experimental Valle de México, México. Es la primera variedad con tolerancia a la roya lineal amarilla desarrollada en México para condiciones de temporal.

Esta variedad tiene hábito de crecimiento de primavera, es de porte intermedio, su tallo es medianamente fuerte con tolerancia al acame, y su ciclo vegetativo es de 49 a 64 días a floración y su madurez fisiológica ocurre a los 91 días en Tlacateopan, México, a los 102 días en Chapingo, México, y a los 120 días en Toluca, México, dependiendo de las condiciones climáticas (humedad, temperatura) y de la fecha de siembra (Zamora *et al.*, 1997).

La industria cervecera evaluó el grano de la variedad Esmeralda, y lo consideró apto para los procesos industriales de malta y de cerveza, debido al balance que guardan sus características químicas en el grano malteado (Zamora *et al.*, 1997).

Variedad Adabella

La variedad Adabella es el resultado de la selección de líneas segregantes de cebada, originadas de un cruzamiento simple realizado por el Programa Nacional de Cebada Maltera del INIFAP, en el Campo Experimental Valle de México, México, y es una alternativa para rendimientos superiores y mayor tolerancia a enfermedades foliares comunes que atacan a la cebada de Valles Altos.

Esta variedad tiene hábito de crecimiento de primavera, su ciclo vegetativo es de 48 a 72 días a floración y de 90 a 132 días a madurez fisiológica, dependiendo de las condiciones climáticas (humedad, temperatura) y la fecha de siembra. Es de porte alto, que puede llegar a 100 cm. Posee alto rendimiento potencial con excelente calidad para la producción de malta, y se adapta a ambientes de temporal de muy buena y buena productividad (Zamora *et al.*, 2008).

2.2.2. Variedades mejoradas de dos hileras

En México, además de Estados Unidos y Canadá, la producción de malta se hace exclusivamente con cebada de seis hileras, porque la investigación en mejoramiento genético las hicieron aptas a muchas regiones con distintas condiciones climáticas y a resistencia de plagas y enfermedades, y porque posee un alto potencial enzimático; sin embargo, es ampliamente aceptado en los demás países productores, de Europa principalmente, que la cebada de dos hileras es la preferida para fabricar una mejor cerveza; esto, porque presentan granos más gruesos y uniformes, mayor cantidad de extracto y una cáscara más fina que la cebada de seis hileras.

Desde hace seis años, el INIFAP, en su Programa de Mejoramiento Genético, desarrolla investigación para obtener variedades mejoradas de dos hileras que se adapten a las condiciones climáticas de las regiones cebaderas del país, así como encontrar el mejor manejo agronómico para optimizar el contenido de proteína en el grano y obtener malta de mejor calidad para la elaboración de cerveza.

2.3. Usos del grano: malta y forraje

La cebada se utiliza como forraje para los animales y para la producción de malta-cerveza, principalmente. La diferencia reside básicamente en el contenido de proteína y el tamaño de los granos (Bishop, 1930; Briggs, 1998). Mientras que para la alimentación animal se busca un porcentaje de proteína por arriba del 12%, para la producción de cerveza los estándares óptimos se encuentran entre el 10.5 a 12.5%, debido a que por debajo del 10%, limita las cantidades de nutrientes para que las levaduras realicen la fermentación, y por encima del 12% disminuye la calidad de otros factores, enturbian la cerveza durante la cadena de frío y afectan el sabor de la misma. Con respecto al tamaño de los granos, estos deben quedar retenidos en una criba de 2.5 mm (primera calidad) en un alto nivel, cercano al 85 %. Granos de menor tamaño presentan distintas velocidades de germinación, alto contenido de proteína y bajo contenido de almidón, y es de acuerdo a estas características que se

determina el destino de la comercialización de la cebada a ser consideradas para clasificación como grano para malta o forraje.

2.4. Efecto de las condiciones ambientales

2.4.1. Clima

Diversas investigaciones sobre la calidad del grano de cebada para malta, reflejan que depende de muchos factores, entre otros, de la variedad, de las condiciones climáticas, de la calidad del suelo, de las dosis de fertilización, del manejo postcosecha, etc., de tal suerte que en conjunto de todas estas, en ocasiones al término del ciclo de producción no se reúna los criterios de calidad requeridos.

Las precipitaciones y condiciones de temperatura tienden a variar año tras año, modificando los impactos sobre el establecimiento y desarrollo correcto de cualquier cultivo sembrado en temporal. Bajo esta condición, la producción de cebada en ambientes con estrés puede determinar efectos adversos sobre la calidad de los granos (Ross *et al.*, 2010).

De manera general, la cebada requiere una temperatura mínima de 6 °C para la germinación, 16 °C para la floración y 20 °C para la madurez, pero puede tolerar muy bien bajas temperaturas (Cao y Moss, 1989; López-Castañeda *et al.*, 1996); no obstante, las temperaturas bajas ocasionan que el crecimiento y la aparición de espiguillas sea más lenta, provocando un retraso en las etapas fenológicas posteriores, lo que puede reflejarse en un alargamiento del ciclo de crecimiento (FAO, 2004).

Por otro lado, las sequías y las altas temperaturas ocurridas durante la etapa de iniciación floral afectan la productividad de la cebada, ya que aquí se define el número potencial de espiguillas fértiles en la espiga y ocurre la elongación del tallo, que es uno de los almacenamientos de fotosintatos que posteriormente serán removilizados hacia el desarrollo del grano. El estrés hídrico o térmico durante la etapa de llenado de grano provoca una reducción del calibre de los granos y un

aumento en el contenido de proteína (Fathi *et al.*, 1997; Savin *et al.*, 1997), debido a que en ese momento los granos representan la parte de la planta en desarrollo; asimismo, los estomas se cierran, las hojas se enrollan, muriendo primero las hojas más viejas y después las más jóvenes, y la planta acelera el transporte de las reservas almacenadas en sus órganos hacia los granos para su llenado antes de morir; además, la consecuencia del estrés durante el estado lechoso del grano es que los granos quedan arrugados y pequeños (Rawson y Gómez, 2001), y por ende el contenido de proteína aumenta.

2.4.2. Suelo

La cebada prospera bien en suelos con texturas arenosas, en tanto que los suelos arcillosos y con exceso de humedad le son desfavorables, aunque en ellos se pueden obtener altos rendimientos si se realiza un laboreo y se maneja apropiadamente la humedad; los suelos con exceso de nitrógeno inducen al acame e incrementan el porcentaje de nitrógeno en el grano hasta niveles inapropiados para la fabricación de malta (FAO, 2004).

2.5. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento de grano

El rendimiento de las nuevas variedades de cebada presenta una mayor respuesta a la aplicación de nitrógeno (Prystupa, 2005); sin embargo, el exceso de nitrógeno produce plantas que pueden ser susceptibles al acame y a enfermedades, que disminuyen el rendimiento y aumentan el costo de fertilización y cosecha. Mientras que una deficiente disponibilidad de nitrógeno reduce el margen de producción en relación a un cultivo bien fertilizado. La dosis y el momento de la fertilización nitrogenada son las mejores herramientas para producir un alto rendimiento por hectárea. En sí el nitrógeno se relaciona con un avance en la capacidad de fijación de granos por unidad de superficie, afectando tres componentes del rendimiento: número de espigas por hectáreas, números de granos por espiga y peso del grano. También afecta al porcentaje de proteína del grano, que es un importante componente para la calidad del grano (Oropesa, 2012).

La literatura hace referencia a que el rendimiento de grano del cultivo de cebada se incrementa conforme se aumenta el número de riegos y la dosis de fertilización nitrogenada (Lauer y Partridge, 1990; Or y Hanks, 1992). Por lo que, bajo esta condición en ciclos de temporal, la producción de cebada en ambientes con estrés puede determinar efectos adversos sobre el rendimiento de grano (Ross *et al.*, 2010).

Se ha demostrado que la acumulación de materia seca en el cultivo de cebada depende directamente de la cantidad de agua acumulada y disponible en el suelo durante su ciclo de desarrollo (Tsegaye *et al.*, 1993), y que la producción del cultivo de cebada disminuye en relación directa con la sequía del suelo, pero la expresión del decremento depende de la etapa en la cual se presenta la sequía, y esto se relaciona con una disminución de la densidad de población, hojas y número de granos por planta (Coles *et al.*, 1991).

Sin embargo, en un estudio realizado con cebada en buenas condiciones ambientales, la respuesta a la fertilización nitrogenada fue variable en rendimiento y calidad del grano, pues presentó disminución en el peso del grano y aumento en el contenido de proteína. No obstante, el aumento en el contenido de proteína del grano ocurrió con la aplicación de dosis de nitrógeno (25 kg ha^{-1}) superiores a aquellas que proporcionan incrementos del rendimiento (Ma Lazzari *et al.*, 2001).

Además, algunas investigaciones realizadas en el norte de Europa encontraron que el rendimiento y el contenido de proteína del grano interactúan con las fechas de siembra, con un menor rendimiento y mayor contenido de proteína cuando la siembra es tardía (Conry, 1995, 1997), explicado por la fecha de siembra que influye en el tiempo entre la etapa de desarrollo del cultivo y el clima (McKenzie *et al.*, 2004).

2.6. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre variables de calidad del grano

El nitrógeno es el elemento de mayor importancia que afecta parámetros relacionados con la calidad, como la concentración de proteína en el grano, el peso hectolítrico, el peso y tamaño del grano.

2.6.1. Porcentaje de proteína

Estudios sobre dosis de fertilización nitrogenada (Agbede, 1987) y el régimen de agua (Clarke *et al.*, 1990) en cereales, han demostrado que estos dos factores y su interacción influyen en la concentración de nitrógeno en el grano, el que es un buen indicador de otras características de calidad requeridas por la industria maltera.

Existen, además, numerosos estudios que muestran que cuando se retrasa el momento de aplicación del nitrógeno con respecto a la siembra, tiende a aumentar el contenido de proteína del grano (Doyle y Shapland, 1991; Bulman y Smith, 1993).

La fertilización nitrogenada durante siembra o macollaje producen incrementos en el contenido proteico de los granos (Loewy y Ron, 2001). Esta tendencia observada está de acuerdo con Vaughan *et al.* (1990), quienes reportaron que, a medida que se retrasa el momento de aplicación más allá de 30 días, una proporción cada vez mayor de este nutriente es transportado directamente al grano, pero sin incrementar el rendimiento.

Por el contrario, experimentos realizados en Rothamsted, Inglaterra, demostraron que la concentración de nitrógeno en el grano de cebada fue invariablemente menor cuando la dosis de fertilización nitrógeno se aplicó en etapas tempranas, como la siembra o después de la emergencia (Widdowson *et al.*, 1986), debido a que cuando el nitrógeno está disponible rápidamente en etapas tempranas del ciclo de desarrollo de la planta, se promueve el crecimiento vegetativo (Carreck y Christian, 1991).

Además del incremento de contenido de proteína del grano que origina la fertilización nitrogenada, causa una reducción del tamaño de los granos

(Weston *et al.*, 1993; De Ruiter, 1999; Ross *et al.*, 2010). La reducción en el tamaño de grano se debe a que cuando se fertiliza con nitrógeno, además de otro nutriente, aumenta el número de granos que provienen de macollos, ya que se generan granos en posiciones más distales de la espiga que se caracterizan por un menor tamaño (Ellis y Marshall, 1998; De Ruiter, 1999).

En cebada de seis hileras, los granos provenientes de la base o del centro de la espiga tienen un peso mayor que los del extremo apical (Ellis y Marshall, 1998; Yin *et al.*, 2002), por lo que se puede suponer que los granos apicales tienen menor tamaño que los provenientes del centro de la espiga. Ellis y Marshall (1998) observaron que los granos apicales (más pequeños) tenían un mayor contenido de proteína que los centrales, aunque la diferencia fue muy pequeña. Yin *et al.*, (2002), en cambio, observaron que el contenido de proteína en el grano de distintas posiciones se estaba determinado por el momento de la fertilización nitrogenada: cuando se fertilizaba durante el macollaje, los granos del centro y del ápice de la espiga tenían contenidos similares de proteína, mientras que cuando se fertilizaba en el estado de vaina engrosada, los granos centrales y basales (más grandes) tenían concentraciones de proteína menores que los apicales (más pequeños).

Como sucede con el resto de los cereales de invierno, si bien el nitrógeno incrementa los rendimientos de cebada cuando se agrega en suelos deficientes en materia orgánica (Bergh *et al.*, 2000; Ferraris *et al.*, 2008; Fontanetto *et al.*, 2009; Prystupa *et al.*, 2003 y 2008), puede disminuir el calibre e incrementar el contenido de proteína del grano.

De esta manera, es difícil predecir, en las primeras etapas del cultivo, el contenido de proteína del grano que se logrará con una determinada dosis de fertilizante, ya que las condiciones climáticas a lo largo del ciclo afectan marcadamente esta respuesta.

Por otro lado, las sustancias nitrogenadas del grano tienen una gran importancia en la calidad de la malta que se fabrica, puesto que tiene una influencia positiva en:

- Sabor de la cerveza.
- El mantenimiento de la estabilidad de la espuma.
- La nutrición de las levaduras.

En el malteado, niveles altos de proteína del grano causan una germinación errática y aumentan las pérdidas o merma del malteo.

Una misma variedad de cebada dará maltas con extracto más bajo cuanto más elevado sea el contenido de proteína del grano. Se puede decir que el extracto, que es el porcentaje de sustancia seca de la malta que se disuelve en el mosto durante el braseado (la primera parte de la fabricación de la cerveza), y es la sustancia principal característica de una malta, está directamente relacionado con el rendimiento en litros de mosto y, por lo tanto, con la cantidad de un determinado tipo de cerveza que un fabricante puede obtener con una malta. Este es un dato de primera importancia económica para la industria cervecera, así como el potencial de rendimiento en kilos por hectárea de una variedad para un agricultor. El extracto esta en relación directa con el contenido de almidón del grano y en relación inversa con el contenido de proteína.

De igual manera, debemos distinguir las diferentes fracciones de las proteínas, de las cuales, la fracción soluble en alcohol, o sea la hordeína, es la que prevalece cuando aumentan los porcentajes de proteína y representa la mayor parte de la proteína de reserva. Los excedentes se depositan en el endosperma, en las células adyacentes a la capa de aleurona. Cuando más elevados son los porcentajes de proteína, mayor es la proporción de las prolaminas.

En el mosto, un porcentaje muy elevado de proteína aumenta la proporción de las proteínas de alto peso molecular solubles en el mosto, y trae dificultades de filtrado, aumenta la intensidad del color y perjudica el gusto.

En la cerveza, niveles altos de nitrógeno soluble en el mosto, se combinan con los polifenoles ocasionando enturbiamiento en frío de la cerveza.

Debido a la relación volumen/superficie, el porcentaje de proteína disminuye cuanto más redondeado es el grano y, por lo tanto, mayor su contenido de almidón. Por este motivo, los granos de mayor tamaño, mayores de 2.8 mm, son los que generalmente tienen menor contenido de proteína, y esta aumenta progresivamente al disminuir ellos, alcanzando un menor valor a tamaños de 2.2 mm.

Cuando se menciona el porcentaje de proteína de una cebada o malta, en realidad se hace referencia al porcentaje de nitrógeno, expresado como proteína ($N \times 6.25$). Es conocida la relación entre el contenido de nitrógeno de la cebada y el extracto de la malta obtenida. Por eso, puede decirse que el extracto está en relación inversa al contenido de nitrógeno y en relación directa con el porcentaje de almidón.

En general, el contenido en nitrógeno del mosto tiene gran influencia en la calidad de la cerveza y en el proceso a que deberá ser sometido ese mosto. Por una parte, se necesita un determinado nivel de nitrógeno soluble, especialmente de bajo peso molecular, para una adecuada nutrición de las levaduras y un desarrollo normal de la fermentación. Por otra parte, elevadas concentraciones de proteínas de alto peso molecular perjudican la filtrabilidad y estabilidad de la cerveza. Demasiado nitrógeno en el mosto está también correlacionado con un color más oscuro de la cerveza producida.

2.6.2. Peso del grano

El peso del grano es uno de los componentes del rendimiento. Está relacionado directamente con la cantidad de almidón y, por lo tanto, tiene relación con la calidad. Tschermak (1923) encontró una correlación positiva entre peso del grano, almidón y extracto. Bishop (1930) definió una fórmula para determinar el extracto de la malta obtenida a partir del contenido en nitrógeno y el peso de mil granos de la cebada.

No se debe confundir peso del grano con su tamaño y forma. Un grano pesado, pero alargado, puede tener un bajo porcentaje de granos sobre el tamiz de 2.5 mm. Un grano con buena clasificación por tamices, puede tener un peso medio.

En Europa y América del Norte se considera que los granos demasiado grandes no son los mejores en maltería, ya que se prolonga la germinación y la disolución es heterogénea.

En la comercialización de cebada interesa más el tamaño que el peso. Ulonska (1983) señala que no hay relación directa entre el peso del grano y la calidad, y sí la hay entre tamaño y calidad.

2.6.3. Peso hectolítrico

El peso hectolítrico tiene una importancia mucho menor en la comercialización de cebada cervecera, de la que tiene en la de trigo o granos forrajeros. El motivo es que el peso hectolítrico aumenta si la trilla fue muy fuerte, y se eliminan totalmente las aristas y parte de las cáscaras. Los granos sin cáscaras absorben humedad muy rápidamente durante el remojo en la fabricación de malta. Esto ocasiona una germinación heterogénea y perjudica la malta producida.

Actualmente se considera que el peso hectolítrico está relacionado con la calidad, ya que el almidón tiene un peso específico más alto que las cáscaras y, por lo tanto, indican un menor porcentaje de ellas y más harina. Sin embargo, los resultados no deben ser analizados aisladamente, sino junto con la clasificación y comparando solamente variedades de una misma procedencia en el mismo año.

2.6.4. Índice de llenado

La clasificación por tamaño, o índice de llenado, es determinada con zarandas o tamices de 2.8 mm, 2.5 mm y 2.2 mm. Las normas de comercialización en Europa y varios países de América del Sur, que siguen las normas del EBC (European Brewery Convention), se refieren siempre a estas zarandas. En Estados Unidos y Canadá, se usan tamices similares, de acuerdo a las normas ASBC (American Society of Brewing Chemists).

El motivo de esta clasificación es que, en maltería, se deben remojar y germinar siempre en forma separada los granos mayores de 2.5 mm, pues éstos se

comportan en forma distinta a la fracción 2.2 – 2.5 mm. La fracción superior a 2.8 mm se comporta igual a la de 2.5 – 2.8 mm, y por este motivo se maltean siempre juntas. Estas dos fracciones juntas tienen diversos nombres según los países. Por lo general se denomina cebada de primera calidad o cebada de primera, y es la fracción exportable de la cebada cervecera. La malta exportada es la fabricada con cebada mayor de 2.5 mm. La fracción 2.2 - 2.5 mm tiene generalmente más proteína, más porcentaje de glumelas y menos extracto. En el Uruguay esta fracción se usa en la fabricación de malta para consumo interno. La cebada inferior a 2.2 mm tiene muy poco almidón y es siempre vendida como forraje.

Según esto, existe la necesidad de contar con indicadores objetivos de la capacidad de suministro de nitrógeno por el suelo, para ajustar la dosis de nitrógeno a aplicar; y así desarrollar sistemas de recomendación para un mejor manejo del cultivo.

2.7. Efecto de la dosis de semilla sobre el rendimiento y la calidad de grano

Los productores de cebada consideran que para tener una buena cosecha con los cereales, como la cebada, la dosis de semilla debe ser alta, porque así corrigen los problemas derivados de la reducida germinación de las semillas en circunstancias ambientales desfavorables, o cuando la semilla es de baja calidad (Borrajo y Ramírez, 2006).

Aumentar las dosis de semilla en los cereales también ha sido empleado como forma de favorecer la competencia del cultivo frente a las malas hierbas y disminuir de esa manera el daño que estas causan en los rendimientos de los cultivos. En algunos trabajos donde se probó distintas dosis de semilla, fertilización y uso de fungicidas en cebada, una menor dosis se tradujo en un incremento del peso medio y llenado del grano. En cambio, el uso de fungicida no tuvo efectos sobre el calibre de los granos, aunque la aplicación del fungicida provocó un incremento en la proporción de granos retenidos en la criba de 2.8 mm, condición altamente deseable en la producción de malta (Ross, 2010).

En una investigación donde se evaluó dos formas tradicionales de control de malezas (rotación de cultivos y densidad de siembra: 80 kg/ha (200 semillas/m²), 160 kg/ha (400 semillas/m²) y 240 kg/ha (600 semillas/m²)), con cebada en condiciones de secano semiárido y durante 14 años, los resultados indicaron que la cebada produjo 50% más cuando está en rotación que cuando se maneja en monocultivo. La densidad de siembra no influyó en la producción de cebada cuando se cultivó en rotación con otro cultivo, en cambio sí para la baja densidad de siembra cuando la cobertura de las malezas fue superior a 20 %, sin embargo, se consideró que en el monocultivo de cebada el uso de herbicidas es generalmente imprescindible (Lascasta *et al.*, 2007).

Por otra parte, distribuir más semilla de la necesaria supone incrementar los costos del cultivo, especialmente cuando se utilizan semillas de calidad. Algunas recomendaciones que indican la densidad de siembra para la cebada, dicen que la cantidad para campo debe de ser 200 a 250 plantas/m² en siembras de otoño y de 250 a 300 plantas/m² en siembras de primavera, o en aquellas situaciones en las que cabe esperar bajo ahijamiento (Márquez, 2007).

La producción se relaciona con el número de espigas por metro cuadrado, más que con la capacidad de ahijamiento y la dosis de semilla. Con dosis excesivamente altas se pueden obtener granos de tamaño pequeño e incrementar la tendencia al acamado. En este sentido, el objetivo es establecer una población suficiente evitando los problemas de pérdidas y del calibrado a causa de un número de granos muy elevado. Las dosis de semilla más bajas pueden disminuir el rendimiento y generar tasas de proteínas muy elevadas. Además, la época de siembra de la cebada en primavera tiene una relación importante en la elección de la densidad del cultivo. Esto también va a depender del tipo de suelo donde se establezca el cultivo de cebada, es decir, para suelos limosos, secos y con una preparación fina, la densidad de siembra que se aconseja es de 290 granos/m² para una población de 250 plantas/m², pero en suelos húmedos, con terrones o pedregosos, se aconsejan 350 granos/m² para una población de 300 plantas/m² (Kuhn, 2014).

III. OBJETIVO

Evaluar la respuesta de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras a la fertilización nitrogenada y a la dosis de semilla, en relación a rendimiento y calidad de grano para la producción de malta, en la zona de Villa de Tezontepec, Hidalgo.

IV. HIPÓTESIS

Las variedades de cebada de dos hileras tienen requerimientos de fertilización nitrogenada y dosis de semillas propias y diferentes entre sí, en relación a rendimiento y calidad de grano.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del sitio experimental

El sitio experimental estuvo ubicado en el Rancho Capulín, municipio de Villa de Tezontepec, localizado en el estado de Hidalgo (19°54' N, 98°53' O, 2355 m) (Figura 1), donde se realizaron tres experimentos de respuesta de cinco líneas experimentales de cebada a nitrógeno y dosis de semilla en los años 2011, 2012 y 2013.

En el área del sitio en estudio se observa un clima de tipo BSi kw (i') g (García, 1988) que corresponde a semiseco templado, con poca oscilación y marcha de la temperatura tipo Ganges y escasas precipitaciones anuales que varían entre 300 y 600 mm, y temperaturas medias anuales que van de 12 a 16 °C. El suelo, de acuerdo a la Taxonomía de Suelos (2006), se ha clasificado como Lithic Haplustoll, y en su parte bajo cultivo presenta una topografía plana, con pendientes menores a 4% (Gómez *et al.*, 2007).

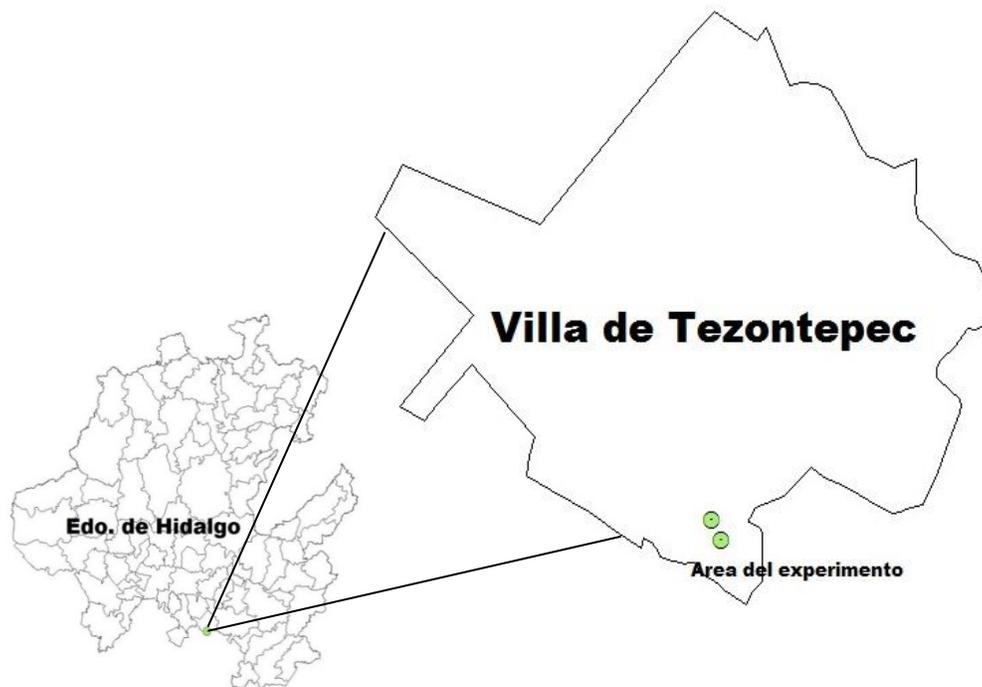


Figura 1. Ubicación del sitio experimental, Villa de Tezontepec, Hidalgo.

5.2. El cultivo de la cebada en la zona de estudio

La cebada se siembra en la zona de Villa de Tezontepec en condiciones de temporal, y este se inicia entre la segunda quincena de junio y la primera de julio, a la vez que la cosecha ocurre entre la segunda quincena de octubre y la primera de noviembre.

La variedad que utilizan los productores es Esmeralda, por la adaptación que tiene para la región. La preparación del suelo consiste en un cinceleo y en una o dos pasadas de rastra. Las dosis de semilla que se utilizan son de 120 a 125 kg ha⁻¹. El tratamiento de fertilización recomendado por el INIFAP en la zona es la 40 – 40 – 30 (kg N–P₂O₅–K₂O ha⁻¹), pero de acuerdo con los resultados de algunas investigaciones en la región, se llega a hacer la recomendación de sólo utilizar la mitad de la dosis (20 – 20 – 15). Durante el ciclo de producción se utilizan herbicidas para el control de malezas y de insecticidas para el control de plagas. Los rendimientos de grano varían de 1.8 a 2.5 t ha⁻¹, dependiendo de la cantidad y distribución de las precipitaciones.

5.3. Información de suelo y clima

5.3.1. Muestreo y análisis de suelo

En el sitio experimental se realizaron muestreos de suelos antes de la siembra a una profundidad de 0 a 20 cm, tomando dos muestras compuestas en un muestreo en zig-zag.

Las propiedades del suelo analizadas fueron: pH, materia orgánica, densidad aparente, textura, conductividad eléctrica, nitratos, cationes intercambiables, fósforo extractable, potasio intercambiable y carbonatos totales. Los análisis se realizaron en el Laboratorio del Departamento de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados.

5.3.2. Descripción del perfil de suelo

En cada sitio experimental se hizo una descripción del perfil de suelo, de

acuerdo al Manual para la Descripción de Perfiles de Suelo en el Campo (Cuanalo, 1975), se tomaron muestras de los horizontes y los análisis se realizaron en el Laboratorio de Génesis y Morfología de Suelos del Colegio de Postgraduados

5.3.3. Datos climatológicos

Durante el desarrollo de los experimentos, en cada año se contó con información de datos diarios de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, precipitación, evapotranspiración en un tanque tipo “A” y humedad relativa del aire, de la Estación Agroclimática del INIFAP ubicada en Tolcayuca, Hidalgo.

5.4. Diseño de tratamientos y experimental

Los factores en estudio fueron:

- Cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras.
- Tres dosis de nitrógeno: 30, 60 y 90 kg ha⁻¹.
- Tres dosis de semilla: 70, 100 y 130 kg ha⁻¹.

Estos factores se ordenaron en un diseño de parcelas divididas, donde la parcela grande correspondió a las líneas experimentales de cebada, y las parcelas chicas a los tratamientos de un diseño factorial 3², resultado de la combinación de las dosis de nitrógeno y las dosis de semilla. Para las parcelas grandes se consideró un diseño de bloques completos al azar, y las parcelas chicas se distribuyeron al azar dentro de las parcelas grandes, y se consideraron dos repeticiones.

Las líneas experimentales de cebada de dos hileras fueron obtenidas del programa de Mejoramiento Genético de Cebada Maltera del INIFAP, que para los experimentos fueron denominadas como: M1H2, M2H2, M3H2, M4H2 y M5H2.

La dosis de nitrógeno y las dosis de semilla fueron establecidas con base en las utilizadas en la región, y recomendadas por el INIFAP.

La unidad experimental fue una parcela de 1.2 m de ancho por 3 m de largo, con cuatro hileras a 0.30 m de espaciamiento, con una superficie de la parcela de

3.6 m²; se consideró como parcela útil a las dos hileras centrales, con una superficie de 1.8 m².

Los experimentos se realizaron: para rendimiento, en tres años (2011, 2012 y 2013), y para calidad de grano, en dos años (2012 y 2013).

5.5. Conducción del experimento

5.5.1. Preparación del terreno

La preparación del terreno consistió en un cinceleo, dos pasadas de rastra y un surcado a 0.30 m de distancia entre surcos.

5.5.2. Siembra

La siembra se hizo en forma manual, distribuyendo la semilla a lo largo de los surcos, según las dosis de semilla, y después se cubrieron con una capa de 2 a 3 cm de suelo.

Las fechas de siembra variaron por año, y fueron las siguientes: 5 de julio en 2011, 22 de junio en 2012 y 18 de junio en 2013.

5.5.3. Fertilización

La aplicación de fertilizante nitrogenado se efectuó en forma manual, depositando todo el fertilizante en el surco en la siembra, utilizando urea como fuente nitrogenada. Por otra parte, se aplicó una fertilización base con 40 kg de P₂O₅ ha⁻¹, como superfosfato de calcio triple, y 30 kg de K₂O ha⁻¹, como cloruro de potasio.

La preparación del terreno, la siembra y la fertilización se realizaron el mismo día, según las fechas indicadas anteriormente.

5.5.4. Control de malezas

Las malezas fueron controladas con herbicidas, en dos aplicaciones: la primera se hizo a los 25 días después de la siembra, aplicando AXIAL+AMBER en 1 L ha⁻¹, y la segunda a los 40 días, en la cual se aplicó Esteron 2 4-D en 1.5 L ha⁻¹.

5.5.5. Cosecha

La cosecha se realizó de forma manual a los 25 días después de la madurez. Las espigas cosechadas fueron introducidas en bolsas de papel debidamente etiquetadas con el número de parcela y variedad, para posteriormente pasarlas por una trilladora manual y una sopladora hasta que el grano quedó libre de paja y se pudieran cuantificar las variables a evaluar.

Las fechas de cosecha variaron por cada año, y fueron las siguientes: 3 de noviembre de 2011, 19 de octubre de 2012 y 10 de octubre de 2013.

5.6. Variables evaluadas

Si bien en los experimentos se consideraron variables como altura de planta después de la floración, longitud de espiga, en el presente trabajo solo se presenta la información de rendimiento y de variables de calidad del grano, como contenido de proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado.

A continuación se describen las metodologías de determinación de estas variables.

5.6.1. Rendimiento

La información se obtuvo para los años 2011, 2012 y 2013.

Peso muestra: se pesó en gramos toda la muestra de grano limpio después de la cosecha de la parcela útil en una báscula granataria digital.

Porcentaje de humedad: se tomó una muestra suficiente de granos y se colocaron en un determinador de humedad John Deere Medidor Plus de Granos SW08120.

Rendimiento: para obtener el rendimiento en ton ha⁻¹ se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \left[(\text{PM}) * \left(\frac{100 - \% \text{ HG}}{86.5} \right) * \left(\frac{10000}{1.8} \right) \right] / 1000$$

donde:

- Rendimiento = rendimiento en toneladas por hectárea
- 100 = valor de 100%
- HG = porcentaje de humedad del grano a la cosecha
- 86.5 = 100 – porcentaje de humedad comercial (13.5 %)
- PM = peso de grano en la superficie cosechada (kg)
- 1.8 = superficie cosechada (m²)
- 1000 = factor para expresar el rendimiento en toneladas por hectárea

5.6.2. Calidad de grano

Las determinaciones de las variables de calidad de grano se realizaron en el Laboratorio de Cebada del INIFAP, para los ciclo 2012 y 2013, según los procedimientos que se indican.

Contenido de proteína: se tomaron 250 gramos de semilla y se colocaron en un equipo de marca FOSS, donde a través de Espectroscopía se obtuvieron los datos en porcentaje.

Peso de mil granos: se contaron 200 granos muestreados al azar, y se pesaron en una báscula granataria digital, y posteriormente se le aplicó las siguientes fórmulas:

$$1. \text{ PMG (BH)} = 200 \times 5$$

$$2. \text{ PMG (BS)} = \text{PMG (BH)} \times \frac{100 - \text{HG}}{100}$$

donde:

PMG = peso de mil granos

(BH) = base húmeda
(BS) = base seca
HG = porcentaje de humedad en el grano

Peso hectolítrico: expresado en kg hl^{-1} , en una probeta de 250 ml se colocó una muestra de granos de cebada suficiente a la medida de la probeta para posteriormente pesar en una báscula granataria digital.

Índice de llenado: se tomaron 250 gramos de semilla, y se pesó por cribas de 2.38 mm y 1.98 mm, y según la siguiente fórmula se calculó la variable:

Fórmula:

$$\text{ILL} = 6(A) + 5(B) + 4(C)$$

donde:

ILL = Índice de llenado
A = porcentaje de grano retenido en la criba de 2.38 x 19.05 mm
B = porcentaje de grano retenido en la criba de 1.98 x 19.05 mm
C = porcentaje de grano que pasa en la criba de 1.98 x 19.05 mm

Los factores 6, 5 y 4 son de ponderación.

5.7. Análisis estadístico

5.7.1. Análisis de varianza

De acuerdo con la información obtenida, el análisis estadístico tuvo como objetivo comparar las líneas experimentales de cebada de dos hileras, en términos de rendimientos y de las variables de calidad de grano, y de la respuesta de estas variables al nitrógeno y a las dosis de semilla.

De esta manera, se realizó un análisis de varianza conjunto para años, líneas experimentales y tratamientos de nitrógeno y dosis de semilla, con base en un diseño de parcelas subdivididas, donde el año corresponde a la parcela grande, las líneas experimentales a las parcelas medianas y los niveles de nitrógeno y dosis de semilla combinados en un arreglo factorial 3^2 , correspondieron a las parcelas chicas.

En el Cuadro 1 se presenta el análisis de varianza para el caso de tres y dos años, indicando las fuentes de variación y los correspondientes grados de libertad.

Cuadro 1. Análisis de varianza general en parcelas subdivididas para cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.).

Fuente de variación	gl – Rendimiento	gl – Calidad
Año (A)	2	1
Error a	3	2
Línea experimental (L)	4	4
Interacción A x L	8	4
Error b	12	8
Nitrógeno (N)	2	2
Dosis de semilla (D)	2	2
Interacción N x D	4	4
Interacción A x N	4	2
Interacción A x D	4	2
Interacción A x N x D	8	4
Interacción L x N	8	8
Interacción L x D	8	8
Interacción L x N x D	16	16
Interacción A x L x N	16	8
Interacción A x L x D	16	8
Interacción A x L x N x D	32	16
Error c	120	80
Total	269	179

gl = Grados de libertad

5.7.2. Análisis de regresión

Con fines de tener resultados más detallados acerca de la respuesta de las variables rendimientos y calidad de grano a los factores de nitrógeno y dosis de semilla, se procedió a realizar un análisis de regresión.

Para este análisis existen dos modalidades de procedimiento: un análisis combinado para años, líneas experimentales y tratamientos de nitrógeno y dosis de semilla, con las respectivas interacciones, en una ecuación de regresión, y un análisis individual por línea experimental dentro de años, para una ecuación de regresión que sólo incluye los factores nitrógeno y dosis de semilla, y sus

interacciones. La segunda modalidad implica realizar 15 análisis de regresión para rendimiento y 10 para cada variable de calidad.

El procedimiento de regresión a considerar en la primera modalidad dependerá de las preferencias del investigador ya sea de eliminación hacia atrás, selección a pasos o máximo incremento de R^2 , con sus respectivos criterios de bondad.

En el presente caso, se optó por la segunda modalidad, considerando el procedimiento PROC REG del programa SAS, teniendo en cuenta que permite observar, y dado el caso eliminar, observaciones aberrantes, algo importante de verificar en la información de respuesta a los factores experimentales.

Dentro de esta modalidad, se procedió a graficar las curvas de respuesta de la variable en estudio contra los factores nitrógeno y dosis de semilla, con base en el diseño de tratamiento factorial 3^2 .

El modelo de regresión especificado fue el cuadrático para ambos factores, y en algunos casos también de raíz cuadrada, según la respuesta observada; de esta manera, el modelo especificado podía incluir variables simples, raíz cuadrada, lineales y/o cuadráticas, y variables de interacciones de segundo orden y en algunos casos de tercer orden como $X_1 X_2^2$ y $X_1^2 X_2$, a la vez que se incluyó una variable auxiliar para las repeticiones.

El siguiente paso fue, con base en el modelo especificado, continuar con el procedimiento PROC REG del programa SAS y la opción R INFLUENCE, a verificar la presencia de posibles observaciones aberrantes, con base en el estadístico RStudent y las pruebas de t al nivel de probabilidad de 0.01 y la prueba de bondad en la tabla C.4 de Myers al nivel de probabilidad de 0.05 (Myers, 1990).

Finalmente se obtuvo la ecuación final con el criterio de bondad del menor cuadrado medio del error, y dado el caso, eliminación de puntos aberrantes, considerando que no constituyesen más del 10 % de la información.

5.8. Análisis de optimización

5.8.1. Dosis óptimas económicas de nitrógeno y semilla

Con las ecuaciones de regresión obtenidas se procedió a calcular: para rendimiento, las dosis óptimas económicas de nitrógeno y semilla, y el rendimiento óptimo económico; y para las variables de calidad de grano los valores de nitrógeno y semilla máximos para las variables en que se buscaba un valor alto según la Norma Oficial Mexicana FF-043-1982 para calidad maltera, o los valores mínimos a cierto valor de la variable máximo aceptado para una calidad óptima.

En ambos casos, los resultados se obtuvieron mediante un programa de cómputo en SAS, que se alimenta con las ecuaciones de regresión, y para el rendimiento, con los costos de los insumos nitrógeno y semilla, y el precio del producto.

Para rendimiento se consideraron también los costos fijos de producción, y se calcularon además los costos por tonelada de grano y la relación beneficio / costo.

Para la determinación de las dosis óptimas económicas se consideró el criterio económico de maximización de la utilidad por hectárea, que consiste en maximizar la función de ingreso neto (IN) expresada como:

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

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

El costo por tonelada (CPT) correspondió a:

$$CPT = CT/Y$$

donde CT es el costo total y Y es el rendimiento.

La relación beneficio / costo (RBC) correspondió a:

$$RBC = IN/CT$$

donde IN es el ingreso neto y CT es el costo total.

Para este análisis se calcularon los costos fijos y variables de producción, donde los costos fijos procedieron de las actividades e insumos considerados como tales para el cultivo de cebada en la región, y los costos variables se refirieron al costo total de la unidad de nitrógeno como urea, y de la semilla de cebada. El precio de venta de la cebada se consideró en 3 600 pesos / ton, que es la que está pagando la industria cervecera. En el Cuadro 2 se presentan los costos fijos, y en el Cuadro 3 los costos variables.

Cuadro 2. Costos fijos de producción de cebada.

Actividad e insumo		Costo (pesos ha⁻¹)
Preparación del suelo:	Cinceleo	600.00
	Rastra	350.00
Fertilización:	Aplicación	60.00
	90 kg SFT ha ⁻¹	630.00
	50 kg KCl ha ⁻¹	380.00
Siembra		350.00
Herbicida:	Aplicación	150.00
	Esteron 47 (1.5 L ha ⁻¹)	105.00
Insecticida:	Aplicación	150.00
	Pirimor (200 g ha ⁻¹)	250.00
Trilla		600.00
Acarreo		100.00
Transporte a la fabrica		250.00
Total		3 975.00

Cuadro 3. Costos variables de producción de cebada.

Actividad o concepto	Costo (pesos kg⁻¹)
Semilla (pesos kg ⁻¹)	7.00
Transporte (150 pesos ton / 10 km)	0.33
Costo del capital (6 % anual / ciclo)	0.44
Costo total de semilla	7.77
Nitrógeno (7 000 pesos / 1 ton urea)	15.22
Transporte (150 pesos ton / 10 km)	0.33
Costo del capital (6 % anual / ciclo)	0.93
Costo total de nitrógeno	16.48

5.8.2. Minimización y maximización de variables de calidad de grano

Para la obtención de los valores óptimos (máximos o mínimos) de las variables de calidad de grano (proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado), se siguió el mismo procedimiento de optimización del programa SAS utilizado para el cálculo de las dosis óptimas económicas, excepto que no se consideraron costos ni precios, de tal modo que así se obtuvieron dichos valores para una cantidad de nitrógeno y dosis de semilla dadas.

En el Cuadro 4 se presentan los valores óptimos de las variables de calidad de grano establecidos por las empresas cerveceras.

Cuadro 4. Valores óptimos de las variables de calidad maltera.

Variable	Valor óptimo
Proteína (%)	10.5 – 12.5
Peso de mil granos (g)	30 – 60
Peso hectolítrico (kg hl ⁻¹) ¹	>58
Índice de llenado de grano (%) ¹	>85

¹Se bonifican valores mayores y se castigan valores menores.

5.9. Análisis de correlación

Para comprender el grado de asociación entre todas las variables estudiadas se calcularon los coeficientes de correlación lineal simple entre ellas; esto fue de rendimiento contra proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado, y entre estas últimas variables de calidad del grano.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Suelos de la localidad y de los sitios experimentales

Los suelos de la localidad presentan un material parental de cenizas y tobas volcánicas. En su fracción gruesa (arena) existe un importante contenido de vidrio volcánico, por lo que en términos taxonómicos pueden ser considerados con propiedades vítricas. La pendiente es aproximadamente de 2 %. Por su drenaje superficial, se le considera un sitio donador (pasivo), sin pedregosidad superficial. La profundidad media es de 55 cm, encontrándose sobre tepetate. La descripción del primer perfil de suelo del sitio experimental de 2011 y 2012 indica una secuencia de horizontes de Ap-Bw-Ckm, y la del sitio experimental de 2013 indica una secuencia de horizontes de A-A₂-Bwk-Ck, lo que evidencia un suelo formado *in-situ* con procesos de carbonatación incipiente en los horizontes subsuperficiales, evidenciado por la presencia de filamentos de carbonatos de calcio, y con procesos edafogénicos que han transformado la estructura para la formación del horizonte Bw (Cámbico). De acuerdo con la WRB (2007), el suelo de la zona se clasifica como Cambisol Vítrico Eútrico, donde el término Cambisol aplica a suelos que tienen procesos evolutivos incipientes, el término Vítrico obedece a la presencia importante de vidrio volcánico en la fracción gruesa del suelo, y el término Eútrico refleja una saturación de bases superior a 50 % en el perfil del suelo (Apéndice).

En el Cuadro 1-A del Apéndice se presentan los análisis químicos del suelo de dos muestras en cada sitio experimental, a una profundidad de 0 a 20 cm. Algunos aspectos que cabe resaltar son que se trata de suelos con pH moderadamente alcalinos (pH = 7.6 – 8.0), con baja conductividad eléctrica (CE = 0.05 – 0.07 dS m⁻¹), medianamente altos y altos en materia orgánica (MO = 2.4 – 3.8 %), moderadamente altos y muy altos en fósforo (P = 20.1 – 42.8 mg kg⁻¹), de medio a muy alto en bases intercambiables (potasio, magnesio, calcio y sodio), moderadamente bajo y alto en micronutrientes (hierro, cobre, zinc, manganeso) y con bajo contenido de boro, de acuerdo con la clasificación de Castellanos *et al.* (2000); además, de acuerdo a la descripción del perfil del suelo, ambos perfiles presentan textura franco-arcillosa.

6.2. Clima

En las Figuras 1-A a 6-A del Apéndice se presentan los datos de las temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) y mínimas ($T_{\text{mín}}$) medias mensuales, y las precipitaciones medias semanales y mensuales, en el ciclo del cultivo en los años 2011, 2012 y 2013, obtenidos de la Estación Agroclimática del INIFAP, ubicada en Tolcayuca, Hidalgo.

La precipitación total durante el ciclo del cultivo (siembra a madurez fisiológica) fue de 362 mm en el año 2011, 270 mm en el año 2012 y 391 mm en el año 2013; sin embargo, se presentaron diferencias en la distribución, lo que pudo haber afectado el rendimiento y la poca respuesta a la fertilización nitrogenada, según se indicará más adelante.

Por su parte, si bien hubo variación de las temperaturas máximas y mínimas semanales durante el ciclo del cultivo, las temperaturas máximas medias mensuales variaron entre 22 y 24 °C en los tres años, a la vez que las temperaturas mínimas medias mensuales disminuyeron de 10 a -5 °C en el año 2011, de 11 a 4 °C en el año 2012 y de 11 a 7 °C en el año 2013, entre el inicio y final del ciclo del cultivo.

6.3. Ciclo del cultivo

En el Cuadro 5 se presenta la fecha de siembra y la fecha de inicio de las etapas fenológicas durante el ciclo del cultivo de las cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras. Estas fechas se consideraron en promedio para cada línea experimental, puesto que hubo escasa variación entre ellas (diferencias máximas de 1 a 2 días). El largo del ciclo del cultivo fue similar entre años, de 98 días.

6.4. Rendimiento de grano

De acuerdo con el análisis de varianza conjunto de años, líneas experimentales, nitrógeno y dosis de semilla (Cuadro 6), la variable rendimiento de grano presenta efecto significativo ($p = 0.05$) sólo para el factor año y la interacción año por línea experimental por dosis de semilla.

Cuadro 5. Fecha de inicio de las etapas fenológicas durante el ciclo del cultivo de las cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Año	Siembra	Amacollamiento (27 días)	Embuchamiento (37 días)	Espigamiento (42 días)	Floración (54 días)	Madurez (97 días)
2011	05 / Jul.	31 / Jul.	10 / Ago.	20 / Ago.	27 / Ago.	09 / Oct.
2012	22 / Jun.	18 / Jul.	28 / Jul.	07 / Ago.	14 / Ago.	26 / Sept.
2013	18 / Jun.	14 / Jul.	24 / Jul.	03 / Ago.	10 / Ago.	22 / Sept.

Cuadro 6. Análisis de varianza combinado para el rendimiento de grano en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, de los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Fuente de variación	Significancia
Año (A)	*
Línea experimental (L)	ns
Interacción A x L	ns
Nitrógeno (N)	ns
Dosis de semilla (D)	ns
Interacción N x D	ns
Interacción A x N	ns
Interacción A x D	ns
Interacción A x N x D	ns
Interacción L x N	ns
Interacción L x D	ns
Interacción L x N x D	ns
Interacción A x L x N	ns
Interacción A x L x D	*
Interacción A x L x N x D	ns
CV (%)	18.01

* = significancia al 5%; ns = no significancia; CV = coeficiente de variación.

Según este análisis (Cuadro 6), todas las líneas experimentales se habrían comportado de igual manera dentro de los años, y la diferencia de comportamiento entre años se debe a que en el año 2012 se observó un mayor rendimiento que en los años 2011 y 2013, como lo indica la comparación de medias que se presenta en el Cuadro 7.

En el caso de las líneas experimentales, si bien las líneas M1H2 y M5H2 dieron un rendimiento medio algo mayor que las demás líneas, este como ya se señaló, no fue significativamente mayor (Cuadro 7).

Lo que hace atribuir que los mayores rendimientos medios observados en el año 2012, se deben a una mayor precipitación ocurrida en los meses de agosto (Figuras 1-A, 3-A y 5-A), durante la etapa de la formación de espiga y floración del cultivo, lo que coincide con los resultados encontrados por Lazzari *et al.* (2007), que mencionan además que los incrementos en el rendimiento no solo se deben a la disponibilidad de agua, sino también a la aplicación de nitrógeno y a la dinámica de este en los diferentes suelos.

Cuadro 7. Rendimiento de las líneas experimentales de cebada dos hileras en los años 2011, 2012 y 2013, y promedios de ellas en los tres años, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Rendimiento			Media
	2011	2012	2013	
	----- (t ha ⁻¹) -----			
M1H2	2.399 a ^y	3.265 a	1.976 a	2.547 a
M2H2	2.107 a	2.751 a	2.173 a	2.344 a
M3H2	1.768 a	2.917 a	2.174 a	2.286 a
M4H2	1.976 a	2.721 a	2.336 a	2.344 a
M5H2	2.341 a	2.803 a	2.447 a	2.530 a
Media	2.118 b ^z	2.891 a	2.221 b	

^y = medias con letras iguales para líneas experimentales por año no son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$); ^z = medias entre año con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$);

Para corroborar este resultado se realizó un análisis de varianza para las líneas experimentales para cada año, el cual indicó también, no significancia entre ellas, pero sí para la interacción línea experimental por dosis de semilla solamente en el año 2013 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Análisis de varianza por año para rendimiento de grano en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, de los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Fuente de variación	Significancia		
	2011	2012	2013
Línea experimental (L)	ns	ns	ns
Nitrógeno (N)	ns	ns	ns
Dosis de semilla (D)	ns	ns	ns
Interacción N x D	ns	ns	ns
Interacción L x N	ns	ns	ns
Interacción L x D	ns	ns	*
Interacción L x N x D	ns	ns	ns
CV (%)	17.09	18.34	17.70

* = significancia al 5%; ns = no significancia; CV = coeficiente de variación.

La interacción año por línea experimental por dosis de semilla indica que las líneas experimentales respondieron de manera diferente a las dosis de semilla en los tres años de estudio. Este aspecto se considerará más adelante en un análisis más detallado sobre la respuesta de las líneas experimentales al nitrógeno y la dosis de semilla.

Un interés de estas líneas experimentales de dos hileras fue su comparación con la variedad Esmeralda de seis hileras, actualmente en uso por la industria cervecera.

Los rendimientos medios de la variedad Esmeralda en los sitios experimentales fueron: 1.750 t ha⁻¹ en el año 2011, 2.550 t ha⁻¹ en el año 2012 y 2.000 t ha⁻¹ en el año 2013, y la media para los tres años fue de 2.100 t ha⁻¹, rendimiento que puede ser ligeramente menor que el de las líneas experimentales de

dos hileras. En la Figura 2 se presenta la comparación de los rendimientos medios de las líneas experimentales y la variedad Esmeralda para los tres años de estudio.

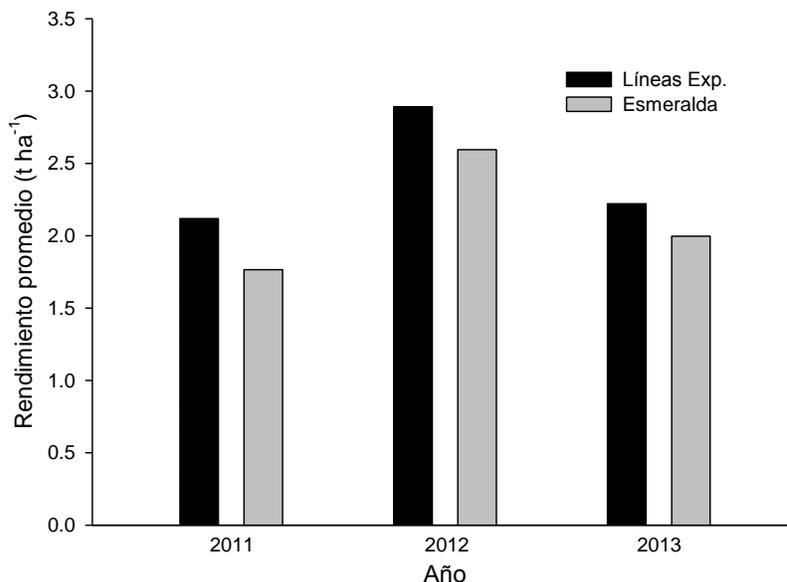


Figura 2. Rendimientos medios de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.) y la variedad Esmeralda (*Hordeum vulgare* L.), en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Fischer (1985) estableció que el rendimiento en trigo es más sensible a los cambios climáticos en el crecimiento durante el corto periodo comprendido entre aproximadamente tres semanas antes y pocos días después de la antesis, que a cambios en cualquier otro momento.

Por lo que, Echagüe *et al.* (2001) mencionan que la respuesta del rendimiento y de la concentración de nutrientes en la planta y/o granos, va a depender de la aplicación de fertilizante nitrogenado, relacionado con la cantidad de nutrimentos disponibles en el suelo, que indica lo absorbido en toda la oferta nutricional, y que puede llegar a ser muy variable de acuerdo a las condiciones ambientales durante el ciclo del cultivo.

En cebada, el rendimiento se incrementa si el índice de área foliar alcanza su valor máximo al inicio de elongación del tallo, y tanto la tasa de crecimiento y la partición a las espigas es máxima entre el periodo de alargamiento del tallo y la floración.

Por tanto, de este modo cualquier factor que favorezca el crecimiento del cultivo durante el periodo de crecimiento de los tallos (encañado) y la aparición de las espigas lograría aumentos del peso de espiga seca por unidad de área en la floración, con lo que aumentaría el número de granos y el rendimiento.

Al respecto, diversos autores coinciden en que el momento de la floración es de importancia crítica en la determinación del rendimiento de los cultivos de cereales, ya que define la adaptación de los cultivos, una propiedad que refleja la mejor combinación entre la dinámica estacional de las condiciones ambientales y las necesidades nutrimentales de los cultivos para el rendimiento (McKenzie *et al.*, 2004).

Consecuentemente, las variaciones en peso de los granos guardan relación con las condiciones ambientales que regulan la expresión del peso, principalmente temperatura y disponibilidad hídrica después de la floración.

6.4.1. Análisis de regresión

Si bien el análisis conjunto de varianza indica no significancia para las líneas experimentales y de igual manera para los tratamientos de nitrógeno y dosis de semilla, excepto para la interacción año por línea experimental por dosis de semilla, se procedió a realizar un análisis de regresión para la respuesta de las líneas experimentales a estos tratamientos, dentro de los años, a fin de obtener un análisis más detallado. En estos términos, se estimaron ecuaciones de regresión del rendimiento de grano a función de estos factores, por línea experimental en los tres años. En el Cuadro 9 se presentan las ecuaciones de regresión obtenidas, incluyendo el cuadrado medio del error (CME), la probabilidad de F (Pr. F), el coeficiente de variación (CV) y el coeficiente de determinación múltiple (R^2).

Cuadro 9. Ecuaciones de regresión para rendimiento de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Ecuación [†]	CME [§]	Pr. F [*]	CV ^ϕ	R ² [¶]
Año 2011					
M1H2	$Y = 0.239 + 0.598 R + 0.00457 N + 0.0430 D - 0.000252 D^2$	0.074	0.0017	11.22	0.739
M2H2	$Y = 2.764 + 0.00121 R - 0.0000549 N^2 - 0.0000380 D^2$	0.041	0.0033	9.58	0.640
M3H2	$Y = 3.705 + 0.0972 R + 0.0000129 N^2 - 0.0426 D + 0.000209 D^2$	0.030	0.2124	9.74	0.363
M4H2	$Y = -0.512 + 0.348 R + 0.0157 N - 0.000105 N^2 + 0.0392 D - 0.000200 D^2$	0.043	0.0350	10.53	0.622
M5H2	$Y = 3.267 - 0.221 R - 0.0821 D^{0.5}$	0.114	0.2011	14.40	0.193
Año 2012					
M1H2	$Y = 3.275 - 0.0207 R$	0.182	0.9195	13.07	0.0007
M2H2	$Y = 0.545 - 0.197 R + 0.0523 D - 0.000276 D^2$	0.240	0.5601	17.77	0.133
M3H2	$Y = 0.144 - 0.729 R + 0.0327 N - 0.0003 N^2 + 0.0515 D - 0.000256 D^2$	0.107	0.0066	11.21	0.702
M4H2	$Y = 3.343 - 0.592 R - 0.108 N + 0.00204 ND - 0.00000954 ND^2$	0.297	0.0447	20.04	0.504
M5H2	$Y = 1.671 - 0.258 R + 0.0546 N - 0.000479 N^2$	0.240	0.2389	17.49	0.253
Año 2013					
M1H2	$Y = 0.352 + 0.236 R + 0.0305 N - 0.000279 N^2 + 0.00848 D$	0.808	0.0226	14.38	0.586
M2H2	$Y = 0.445 - 0.333 R + 0.0198 N - 0.000207 N^2 + 0.035 D - 0.000183 D^2$	0.109	0.1797	15.16	0.459
M3H2	$Y = 2.910 - 0.346 R - 0.0273 N + 0.000257 N^2$	0.054	0.0341	10.67	0.501
M4H2	$Y = 5.380 - 0.792 R - 0.0000397 N^2 - 0.0495 D + 0.000233 D^2$	0.865	0.0008	12.59	0.748
M5H2	$Y = -2.135 + 0.266 R + 0.102 D - 0.000542 D^2$	0.161	0.0421	16.38	0.433

[†] Y = rendimiento de grano (t ha⁻¹); R = repetición; N = nitrógeno aplicado (kg N ha⁻¹); D = dosis de semilla (kg semilla ha⁻¹); [§] CME = cuadrado medio del error; * Pr. F = probabilidad de F; ^ϕ CV = coeficiente de variación (%); [¶] R² = coeficiente de determinación múltiple.

Las ecuaciones de regresión presentan valores medios y bajos de R^2 , sin embargo, la mayoría de las ecuaciones presentan CV relativamente bajos, menores a 18 % y uno de 20 %, por lo que los bajos R^2 se deben fundamentalmente a los bajos rendimientos y/o bajas respuestas a los factores nitrógeno y dosis de semilla observadas.

6.4.2. Análisis económico

Con las ecuaciones de regresión de las líneas experimentales se calcularon las dosis óptimas económicas de nitrógeno y dosis de semilla, el rendimiento óptimo económico, el ingreso neto, el costo por tonelada de producto y la relación beneficio - costo, para las líneas experimentales de cebada por año.

En el Cuadro 10 se presentan las dosis óptimas económicas de nitrógeno y dosis de semilla para las líneas experimentales en los años 2011, 2012 y 2013 y en promedio para los tres años, indicando además el rendimiento óptimo económico, y el ingreso neto, el costo por tonelada de grano y la relación beneficio – costo.

Considerando los tres años, se observan algunas diferencias entre líneas experimentales en las dosis óptimas económicas de nitrógeno y dosis de semilla.

Para nitrógeno, las dosis óptimas económicas variaron entre 30 y 50 kg N ha⁻¹, en 80 % de los casos con valores de 30 a 35 kg N ha⁻¹, 20 % con valores de 45 a 50 kg N ha⁻¹, de tal modo que para todas las líneas experimentales las dosis óptimas económicas medias de nitrógeno fueron de 30 a 37 kg N ha⁻¹.

Para semilla, las dosis óptimas económicas variaron entre 70 y 130 kg de semilla ha⁻¹, con 47 % para valores de 70 kg de semilla ha⁻¹, la dosis menor probada, 47 % para valores de 80 a 105 kg de semilla ha⁻¹ y sólo un valor de 130 kg de semilla ha⁻¹, de tal modo que para las líneas experimentales M2H2, M3H2, M4H2 y M5H2 las dosis óptimas económicas medias para semilla fueron de 83, 78, 90 y 77 kg de semilla ha⁻¹, respectivamente, mientras que para la línea experimental M1H2, la media fue de 93 kg de semilla ha⁻¹ en los tres años, presentando una dosis óptima económica de 130 kg de semilla ha⁻¹ solamente en el año 2013.

Cuadro 10. Análisis económico de rendimiento de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Tratamiento		Rendimiento (t ha ⁻¹)	Ingreso neto [†] -----	Costo por tonelada ^ξ - (pesos t ⁻¹) -	Relación beneficio – costo ^φ -----
	N [‡] (kg ha ⁻¹)	D [§]				
Año 2011						
M1H2	30	80	2.506	3930	2032	0.772
M2H2	30	70	2.529	4091	1982	0.816
M3H2	30	70	1.807	1493	2773	0.298
M4H2	30	95	1.957	1839	2660	0.353
M5H2	30	70	2.469	3875	2030	0.773
Año 2012						
M1H2	30	70	3.265	6739	1535	1.344
M2H2	30	90	2.918	5336	1781	1.032
M3H2	45	95	3.225	6157	1691	1.129
M4H2	30	105	3.066	5753	1724	1.089
M5H2	50	70	3.072	5716	1739	1.070
Año 2013						
M1H2	45	130	2.378	2835	2408	0.495
M2H2	35	90	2.391	3355	2197	0.639
M3H2	30	70	2.148	2720	2334	0.531
M4H2	30	70	2.624	4434	1910	0.884
M5H2	30	90	2.783	4849	1857	0.938
Promedio						
M1H2	35	93	2.716	4501	1992	0.870
M2H2	32	83	2.613	4261	1987	0.829
M3H2	35	78	2.393	3457	2266	0.653
M4H2	30	90	2.549	4009	2098	0.775
M5H2	37	77	2.775	4813	1875	0.927

[‡]N = nitrógeno aplicado; [§]D = dosis de semilla; [†] ingreso neto = ingreso total – costo total; ^ξ costo por tonelada = (costo fijo + costo variable) / rendimiento; ^φ relación beneficio – costo = ingreso neto / (costo variable + costo fijo).

Los rendimientos óptimos económicos presentaron algunas variaciones entre líneas experimentales dentro de año y entre años, con mayores valores en el año 2012. A nivel medio, las líneas experimentales que presentaron mayores rendimientos óptimos económicos fueron la M1H2 y M5H2, con valores entre 2.716 y 2.775 t ha⁻¹, valores menores la línea experimental M3H2, con 2.393 t ha⁻¹, y valores intermedios las líneas experimentales M2H2 y M4H2, con rendimientos óptimos económicos entre 2.613 y 2.549 t ha⁻¹.

Con fines de visualizar de mejor manera esta situación, en la Figura 3 se presentan los rendimientos óptimos económicos de la línea experimental en los tres años, llamando la atención los menores rendimientos dados por las líneas experimentales M3H2 y M4H2 en el año 2011 y las líneas experimentales M3H2 y M1H2 en el año 2013, a la vez que la línea experimental M2H2 dio menores rendimientos en el año 2012 y 2013.

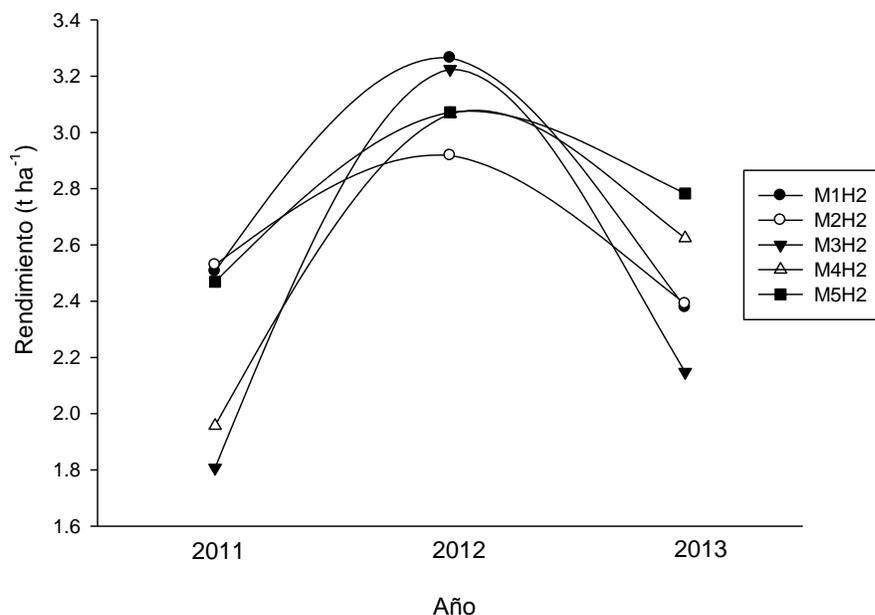


Figura 3. Rendimientos óptimos económicos de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.), en los años 2011, 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Los mayores rendimientos observados en el año 2012 se debieron a las mayores precipitaciones que ocurrieron durante las etapas de formación de las espigas y floración, y los menores rendimientos en el año 2011 se debieron a la poca uniformidad de las precipitaciones durante el ciclo, según esto, factores externos tales como agua del suelo o la temperatura ambiente podrían haber originado estas diferencias relativas.

Resultados similares obtuvieron Ross *et al.* (2009) en años con menores precipitaciones, observando además un efecto negativo sobre el rendimiento por la aplicación de dosis altas de nitrógeno, producto del déficit hídrico. Es decir, la estimulación del consumo hídrico temprano por la fertilización con altas dosis de nitrógeno determinó que la limitación hídrica en el llenado fuese más intensa; sin embargo, el hecho de que las dosis mayores de nitrógeno no incrementen el rendimiento por encima de lo alcanzado con la dosis menos, conduciría a pensar que un incremento significativo de la absorción de nitrógeno por el cultivo tiene relación con la aplicación de dosis por encima de aquella que produce un aumento de rendimiento, como lo sugirieron Gallagher *et al.* (1987).

Por otro lado, los ingresos netos estuvieron asociados principalmente con los rendimientos y en menor grado con algunos mayores costos derivados especialmente de las mayores dosis de semilla con que se obtuvieron.

Por su relación con los rendimientos, los costos por tonelada de grano tenderán a ser menores al aumentar los rendimientos, a la vez que la relación beneficio – costo tenderá a ser mayor al aumentar también el rendimiento y consecuentemente el ingreso neto.

En este sentido, solo en el año 2012 se obtuvieron ingresos netos superiores a 5 000 pesos ha⁻¹, entre 5 336 y 6 739 pesos ha⁻¹, y en promedio para los tres años entre 4 009 y 4 813 pesos ha⁻¹, con la excepción de la línea experimental M3H2 que dio un valor de 3 457 pesos ha⁻¹.

En cuanto a la relación beneficio – costo, en promedio para los tres años, ellas variaron entre 0.775 y 0.927 para las líneas experimentales M1H2, M2H2, M4H2 y M5H2, con un valor de 0.653 para la línea experimental M3H2.

6.5. Calidad del grano

Existe un consenso generalizado para la mayoría de los cereales, en que la calidad es tan importante como la cantidad. En cebada, la calidad de grano se podría definir como una de las propiedades que optimizan su aprovechamiento, es decir, para la producción de malta se requieren granos grandes y contenidos medios de proteína, y de no cumplirse con estos requerimientos el destino de los granos pasa a ser forrajero. Las variables de calidad consideradas fueron: proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado.

6.5.1. Análisis de varianza de las variables de calidad

En el Cuadro 11 se presenta el análisis de varianza conjunto de años, líneas experimentales y tratamientos de nitrógeno y dosis de semilla para las variables de calidad de grano en las cinco líneas experimentales y dos años de estudio.

En proteína no se observó diferencias significativas entre años, líneas experimentales y dosis de semilla; en cambio sí se observó diferencias significativas para nitrógeno y la interacción año por nitrógeno.

En peso de mil granos se observaron diferencias significativas entre años, líneas experimentales y las interacciones año por línea experimental y año por nitrógeno.

En peso hectolítrico se observaron diferencias significativas para año, líneas experimentales y nitrógeno.

En el índice de llenado se observaron diferencias significativas para año, líneas experimentales, nitrógeno y las interacciones año por línea experimental y año por nitrógeno.

En el Cuadro 12 se presenta la comparación de medias para las variables de calidad de grano de las líneas experimentales por año.

Para proteína, en todas las líneas experimentales se observan valores medios entre 14.4 y 16.7 %, valores mayores al valor máximo aceptado por la industria cervecera, que es de 12.5 %.

Cuadro 11. Análisis de varianza combinado para las variables de calidad de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Fuente de variación	Proteína (%)	Peso de mil granos (g)	Peso hectolítrico (kg hl ⁻¹)	Índice de llenado (%)
Año (A)	ns	*	**	*
Línea experimental (L)	ns	**	*	**
Interacción A x L	ns	*	ns	**
Nitrógeno (N)	**	ns	*	**
Dosis de semilla (D)	ns	ns	ns	ns
Interacción N x D	ns	ns	ns	ns
Interacción A x N	**	*	ns	**
Interacción A x D	ns	ns	ns	ns
Interacción A x N x D	ns	ns	ns	ns
Interacción L x N	ns	ns	ns	ns
Interacción L x D	ns	ns	ns	ns
Interacción L x N x D	ns	ns	ns	ns
Interacción A x L x N	ns	ns	ns	ns
Interacción A x L x D	ns	ns	ns	ns
Interacción A x L x N x D	ns	ns	ns	ns
CV (%)	7.26	8.03	3.99	7.56

ns = no significancia; * = significancia al 5 %; ** = significancia al 1 %; CV = coeficiente de variación.

Sin embargo, cabe señalar que estos promedios proceden de distintas dosis de nitrógeno: 30, 60 y 90 kg ha⁻¹ y de diferentes dosis de semilla: 70, 100 y 130 kg de semilla ha⁻¹, por lo que en el análisis final habrá que considerar, al menos para nitrógeno si las dosis bajas y en especial de 30 kg N ha⁻¹, dan valores menores de proteína.

Para peso de mil granos, las líneas experimentales presentaron, en el año 2012, valores medios de 29.1 a 39.0 g, y en el año 2013, valores medios de 39.4 a 42.3 g.

Cuadro 12. Valores medios de las variables de calidad de grano de cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Proteína (%)	Peso de mil granos (g)	Peso hectolítrico (kg hl ⁻¹)	Índice de llenado (%)
Año 2012				
M1H2	15.4 a ^y	35.6 a	57.9 a	85.0 a
M2H2	16.4 a	31.9 b	54.6 a	68.0 b
M3H2	14.4 a	36.7 a	59.5 a	89.9 a
M4H2	16.7 a	29.1 b	59.7 a	69.0 b
M5H2	15.7 a	39.0 a	59.2 a	93.0 a
Media de año	15.7 a ^z	34.5 b	58.2 b	81 b
Año 2013				
M1H2	15.9 a	39.4 a	64.8 a	98.0 a
M2H2	15.7 a	41.1 a	63.8 a	99.0 a
M3H2	16.2 a	40.1 a	66.3 a	99.0 a
M4H2	15.9 a	40.9 a	64.9 a	99.0 a
M5H2	15.5 a	42.3 a	63.9 a	99.1 a
Media de año	15.8 a	40.8 a	64.7 a	98.8 a

^y = medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$);

^z = medias entre año con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$).

En cebada el peso de mil granos normalmente varía entre 30 y 60 g, con un valor promedio de 45 g, por lo que los valores observados son relativamente bajos para todas las líneas experimentales, con menores valores para las líneas experimentales M2H2 y M4H2 en el año 2012.

Para que el grano sea considerado con calidad para malta, uno de los requisitos es que el peso hectolítrico sea mayor a 58 kg hl⁻¹ para cebadas de dos hileras. En el año 2012, la línea experimental M2H2 presentó un peso hectolítrico

menor a 58 kg hl⁻¹ y las demás líneas experimentales valores entre 57.9 y 59.7 kg hl⁻¹; en cambio en el año 2013 todas las líneas experimentales presentaron valores de entre 63.9 y 66.3 kg hl⁻¹.

Para índice de llenado, el valor mínimo aceptado por la industria cervecera es de 85 %, y se observaron valores menores en las líneas experimentales M2H2 y M4H2 en el año 2012, de 68.0 y 69.0 %, respectivamente, llamando la atención los valores altos observados para todas las líneas experimentales, de 98 a 99.1 %, en el año 2013.

El efecto de nitrógeno, y dado el caso de las dosis de semilla, sobre las variables de calidad de grano se tratará de manera más detallada mediante un análisis de regresión más adelante.

6.5.2. Efecto de nitrógeno y dosis de semilla sobre las variables de calidad de grano

Con fines de observar el efecto de los factores de los tratamientos de fertilización nitrogenada y dosis de semilla sobre las variables de calidad de grano, se realizó un análisis de regresión de estas variables como función de éstos factores para las líneas experimentales en los dos años de estudio.

A partir de las ecuaciones obtenidas, se obtuvieron los valores óptimos, máximos o mínimos según fuese el caso, de dichas variables para los diferentes valores de los factores fertilización nitrogenada y dosis de semilla.

6.5.2.1. Proteína

En el Cuadro 13 se presentan las ecuaciones de regresión obtenidas para la variable proteína del grano en función de la dosis de nitrógeno y dosis de semilla para las líneas experimentales en los años 2012 y 2013.

En general, las ecuaciones presentaron coeficientes de variación (CV) relativamente bajos, con valores de 3.30 a 8.31 %, y los valores de R² variaron desde 0.312 hasta 0.798.

Cuadro 13. Ecuaciones de regresión para porcentaje de proteína de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Ecuación [†]	CME [§]	Pr. F*	CV [¶]	R ²
Año 2012					
M1H2	Prot = 10.575 + 2.251 R + 0.481 N ^{0.5}	1.628	0.0017	8.31	0.598
M2H2	Prot = 20.542 + 1.351 R + 0.604 N ^{0.5} - 0.202 D + 0.00101 D ²	0.726	0.0008	5.20	0.770
M3H2	Prot = 21.739 - 1.244 R + 0.806 N ^{0.5} - 0.283 D + 0.00146 D ²	0.901	0.0002	6.59	0.798
M4H2	Prot = 13.979 + 0.856 R + 0.0506 N - 0.0000682 D ²	1.222	0.0014	6.61	0.658
M5H2	Prot = 15.711 + 0.811 R - 0.0680 N + 0.000880 N ²	0.700	0.0010	5.32	0.678
Año 2013					
M1H2	Prot = 21.0167 - 0.217 R - 0.201 N + 0.00170 N ²	0.344	0.0016	3.68	0.678
M2H2	Prot = 19.144 - 0.122 R - 0.120 N + 0.000898 N ²	0.665	0.1442	5.21	0.312
M3H2	Prot = 11.548 - 0.238 R + 0.1787 N - 0.00140 N ²	0.627	0.0404	4.88	0.460
M4H2	Prot = 16.695 - 0.877 R + 0.127 N - 0.00109 N ² - 0.0814 D + 0.000462 D ²	0.276	0.0121	3.30	0.696
M5H2	Prot = 2.613 - 0.828 R + 0.0782 N - 0.000745 N ² + 0.269 D - 0.00144 D ²	1.040	0.1017	6.57	0.525

[†] Prot = porcentaje de proteína en el grano (%); R = repetición; N = nitrógeno aplicado (kg N ha⁻¹); D = dosis de semilla (kg semilla ha⁻¹); [§] CME = cuadrado medio del error; * Pr. F = probabilidad de F; [¶] CV = coeficiente de variación (%); ^{||} R² = coeficiente de determinación múltiple.

A partir de las ecuaciones de regresión, se calcularon los contenidos de proteína del grano para distintos niveles de nitrógeno y dosis de semilla, y en el Cuadro 14 se presentan los niveles de estos factores que dieron valores de proteína mínimos, incluyendo también los niveles óptimos económicos de estos factores, a manera de comparación.

Cuadro 14. Valor mínimo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para proteína del grano en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Tratamiento		Proteína (%)
	N [¶]	D [§]	
	----- (kg ha ⁻¹) -----		
Año 2012			
M1H2	30	70	14.3 [†]
	30	70	14.3 [‡]
M2H2	30	90	14.6
	30	90	14.6
M3H2	40	95	12.5
	45	95	12.8
M4H2	30	70	15.6
	30	105	15.2
M5H2	40	70	14.8
	50	70	14.9
Año 2013			
M1H2	45	70	15.3
	45	130	15.3
M2H2	35	70	16.0
	35	90	16.0
M3H2	30	70	15.5
	30	70	15.5
M4H2	30	70	15.6
	30	70	15.6
M5H2	30	90	16.4
	30	90	16.4

¶ N = dosis de nitrógeno; § D = dosis de semilla; † = valor de maximización; ‡ valor de optimización económica.

Se observa que todas las líneas experimentales presentaron valores mayores de 12.5 % de proteína en grano a niveles bajos de nitrógeno, de 30 kg N ha⁻¹ o cercanos a estos, excepto la línea experimental M3H2 que presentó un valor de 12.5 %, con 40 kg N ha⁻¹, en el año 2012.

Estudios sobre fertilización nitrogenada inicial revelan que, el nitrógeno puede incrementar el contenido de proteína en el grano, hasta en más de 2 puntos de

porcentaje, lo que equivale a que cada kilogramo de nitrógeno aplicado aumentase el contenido de proteína en 0.03 % en promedio (Prystupa *et al.*, 2008); además, otras investigaciones (Lazzari *et al.*, 2005; Landriscini *et al.*, 2010), encontraron que cuando se fertiliza con 30 o 60 kg N ha⁻¹ al inicio del ciclo del cultivo, la mayor disponibilidad de nitrógeno afecta en el incremento de proteína en el grano.

Puesto que no se dispuso de información sobre la respuesta de la cebada, tanto para rendimiento como para contenido de proteína del grano, a niveles inferiores a 30 kg N ha⁻¹, no es posible inferir si a dichos niveles los contenidos de proteína fuesen menores a 12.5 %, tampoco si los rendimientos serían inferiores.

En cuanto a la dosis de semilla, las líneas experimentales M1H2, M4H2 y M5H2 en el año 2012 y las líneas experimentales M1H2, M2H2, M3H2 y M4H2 en el año 2013 no mostraron respuesta a este factor, y para las líneas experimentales M2H2 y M3H2 en el año 2012 y M5H2 en el año 2013 la respuesta a dosis de semilla fue de forma cuadrática negativa – positiva, de tal manera que el menor contenido de proteína se obtuvo con la dosis de semilla intermedia de 90 kg semilla ha⁻¹.

Por otra parte, cabe señalar que la variedad Esmeralda de seis hileras, actualmente en uso por la industria cervecera, puede presentar contenidos menores de proteína, de hasta 8.4 % (López *et al.*, 2007), valor que es inferior al valor máximo aceptado de 12.5 %, aunque también menor a 10.5 % el valor óptimo mínimo requerido.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las dosis crecientes de nitrógeno incrementaron el nivel de proteína, por lo que las líneas experimentales de cebada de dos hileras probadas no serían apropiadas para la producción de malta para la elaboración de cerveza, y sin embargo, debido a sus buenos rendimientos, su uso estaría indicado para consumo humano o para la alimentación de ganado.

6.5.2.2. Peso de mil granos

En el Cuadro 15 se presentan las ecuaciones de regresión para peso de mil granos de las cinco líneas experimentales en los años 2012 y 2013.

Cuadro 15. Ecuaciones de regresión para peso de mil granos de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Ecuación [†]	CME [§]	Pr. F*	CV [¶]	R ² [¶]
Año 2012					
M1H2	$P_{mg} = -3.233 R - 0.0331 N - 0.488 D + 0.00230 D^2$	4.275	0.0170	5.80	0.637
M2H2	$P_{mg} = 21.198 + 0.507 R - 0.035 N + 0.276 D - 0.00145 D^2$	2.758	0.2595	5.25	0.358
M3H2	$P_{mg} = 13.544 + 2.679 R - 0.000298 N^2 + 0.507 D - 0.00260 D^2$	4.145	0.0205	5.54	0.566
M4H2	$P_{mg} = 37.590 - 2.129 R - 0.0286 N - 0.123 D + 0.000622 D^2$	0.531	0.0002	2.51	0.839
M5H2	$P_{mg} = 26.978 - 1.240 R + 0.282 N + 1.439 D^{0.5} - 0.0311 ND^{0.5}$	4.492	0.1529	5.43	0.382
Año 2013					
M1H2	$P_{mg} = -2.813 + 2.041 R + 0.887 D - 0.00450 D^2$	6.063	0.0258	6.26	0.498
M2H2	$P_{mg} = 10.177 - 0.968 R + 0.626 D - 0.00294 D^2$	6.051	0.1022	5.99	0.369
M3H2	$P_{mg} = 52.404 - 4.612 R - 0.393 N + 0.00323 N^2$	6.062	0.0038	6.14	0.605
M4H2	$P_{mg} = 42.658 - 3.541 R$	5.695	0.0062	5.84	0.382
M5H2	$P_{mg} = 31.080 + 1.485 R - 0.038 N + 0.244 D - 0.0011 D^2$	1.995	0.0921	3.34	0.489

[†] P_{mg} = peso de mil granos (g); R = repetición; N = nitrógeno aplicado (kg N ha⁻¹); D = dosis de semilla (kg semilla ha⁻¹); [§] CME = cuadrado medio del error; * Pr. F = probabilidad de F; [¶] CV = coeficiente de variación (%); [¶] R² = coeficiente de determinación múltiple.

Las ecuaciones de regresión presentaron bajos coeficientes de variación (CV), entre 2.51 y 6.26 %, y valores de R² entre 0.358 y 0.839, con 54.5 % de los casos inferiores a 0.500. Los bajos valores de R² se deberían a un bajo efecto de los

factores nitrógeno y dosis de semilla sobre el peso de mil granos, puesto que los coeficientes de variación son bajos.

En el Cuadro 16 se presentan los valores máximos de peso de mil granos, obtenidos para las líneas experimentales en los años 2012 y 2013, con las respectivas dosis de nitrógeno y semilla, a lo cual se agregó los valores obtenidos con las dosis óptimas económicas que se obtuvieron para rendimiento de grano, a manera de comparación.

El peso de mil granos fue afectado negativamente o no afectado por el nitrógeno, de tal forma que la dosis que dio el mayor valor de esta variable fue de 30 kg N ha⁻¹, mientras que para la dosis de semilla, el efecto sobre el peso de mil granos fue muy variado, de negativo para las líneas experimentales M1H2 en 2012 y M3H2 en 2013, y no hubo efecto para la línea experimental M4H2 en 2013, a positivo para las líneas experimentales M2H2, M3H2, M4H2 y M5H2 en el 2012, y M1H2, M2H2 y M5H2 en 2013, con valores de 95 a 130 kg semilla ha⁻¹ (Cuadro 16).

Los valores relativamente bajos del peso de mil granos pueden tener relación con las dosis de nitrógeno aplicado, al menos las mayores de 30 kg N ha⁻¹, esto es de 60 y 90 kg N ha⁻¹, pero también con la cantidad y distribución de la precipitación ocurrida en el ciclo del cultivo. Al respecto, Otegui (2001) encontró, a lo largo de cuatro años de evaluación, que el peso de mil granos en genotipos de cebada de dos y seis hileras, disminuyó en plantas que sufrieron de estrés hídrico, y menciona que esta característica es un componente del rendimiento que se liga a la tolerancia a la sequía, ya que un peso más elevado puede ser indicador de una mayor capacidad de translocación de fotosintatos desde los órganos de reserva al grano, cuando se produce un estrés hídrico terminal. En este sentido, Ross *et al.* (2010) reportan que, donde hubo estrés hídrico durante las etapas críticas en el cultivo de la cebada, se obtuvieron granos más pequeños, debido a que esto provoca una reducción del peso individual del grano, cuya magnitud está relacionada a la limitación durante el llenado del grano de los mismos.

Cuadro 16. Valor máximo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para peso de mil granos en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Tratamiento		Peso de mil granos (g)
	N [¶]	D [§]	
	----- (kg ha ⁻¹) -----		
Año 2012			
M1H2	30	70	38.3 [†]
	30	70	38.3 ^º
M2H2	30	95	33.5
	30	90	33.5
M3H2	30	100	39.3
	45	95	39.0
M4H2	30	130	30.2
	30	105	29.6
M5H2	30	130	40.6
	50	70	39.5
Año 2013			
M1H2	30	100	41.9
	45	130	37.5
M2H2	30	105	43.1
	35	90	42.3
M3H2	30	70	41.2
	30	70	41.2
M4H2	30	70	40.9
	30	70	40.9
M5H2	30	110	44.2
	30	90	43.7

[¶] N = dosis de nitrógeno; [§] D = dosis de semilla; [†] = valor de maximización; ^º valor de optimización económica.

El efecto positivo de la dosis de semilla sobre el peso de mil granos en siete de los casos, se dio a valores relativamente bajos de esta variable, como ya se mencionó, por lo que sería de escasa magnitud, y por tanto, no se consideró.

6.5.2.3. Peso hectolítrico

En el Cuadro 17 se presentan las ecuaciones de regresión para peso hectolítrico de las cinco líneas experimentales en los años 2012 y 2013.

Cuadro 17. Ecuaciones de regresión para peso hectolítrico de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Ecuación [†]	CME [§]	Pr. F*	CV ^ϕ	R ² [¶]
Año 2012					
M1H2	$P_{\text{hect}} = 88.0825 - 3.462 R - 0.255 N + 0.00175 N^2 - 0.373 D + 0.00160 D^2$	1.333	0.0007	1.99	0.852
M2H2	$P_{\text{hect}} = 66.735 - 1.204 R - 0.421 N + 0.00323 N^2$	6.025	0.1048	4.50	0.366
M3H2	$P_{\text{hect}} = 50.792 + 1.380 R + 0.161 N - 0.00178 N^2 + 0.130 D - 0.000682 D^2$	1.492	0.0043	2.05	0.621
M4H2	$P_{\text{hect}} = 64.563 - 1.544 R - 0.606 N^{0.5} + 0.000330 (D-70)^2$	1.442	0.0029	2.01	0.621
M5H2	$P_{\text{hect}} = 67.790 - 0.200 R - 0.0205 N - 0.734 D^{0.5}$	3.401	0.2005	3.11	0.291
Año 2013					
M1H2	$P_{\text{hect}} = 89.517 - 0.5 R - 0.556 D + 0.00294 D^2$	5.103	0.0907	3.48	0.361
M2H2	$P_{\text{hect}} = 65.881 + 2.647 R - 0.0986 N - 0.000275 D^2 + 0.000925 ND$	0.628	0.0003	1.24	0.831
M3H2	$P_{\text{hect}} = 42.368 + 1.126 R + 0.116 N + 0.360 D - 0.00122 D^2 - 0.00109 ND$	2.896	0.0481	1.57	0.567
M4H2	$P_{\text{hect}} = 62.820 + 1.156 R - 0.0391 N + 0.0379 D$	3.996	0.0615	3.08	0.421
M5H2	$P_{\text{hect}} = 49.589 - 2.170 R + 0.10692 N - 0.00104 N^2 + 0.309 D - 0.00166 D^2$	5.849	0.2759	3.79	0.377

[†] P_{hect} = peso hectolítrico (kg hl⁻¹); R = repetición; N = nitrógeno aplicado (kg N ha⁻¹); D = dosis de semilla (kg semilla ha⁻¹); [§] CME = cuadrado medio del error; * Pr. F = probabilidad de F; ^ϕ CV = coeficiente de variación (%); [¶] R² = coeficiente de determinación múltiple.

Las ecuaciones de regresión presentaron bajos coeficientes de variación (CV), entre 1.24 y 4.50 %, y valores de R^2 entre 0.361 y 0.852 y un valor de 0.291, con 50 % de los casos inferiores a 0.500. Los bajos valores de R^2 se debieron a un bajo efecto de los factores de nitrógeno y dosis de semilla sobre el peso hectolítrico, puesto que los coeficientes de variación son bajos.

En el Cuadro 18 se presentan los valores máximos de peso hectolítrico obtenidos para las líneas experimentales en los años 2012 y 2013, con las respectivas dosis de nitrógeno y de semilla, a la cual se agregó los valores obtenidos de estos en las dosis óptimas económicas de rendimientos de granos, a manera de comparación.

El peso hectolítrico fue afectado negativamente o no afectado por el nitrógeno para todas las líneas experimentales, excepto la línea M3H2 en 2012 y M5H2 en 2013, de tal modo que la dosis que dio el mayor valor de esta variable fue de 30 kg N ha⁻¹, y para las líneas experimentales M3H2 y M5H2 fue de 45 y 50 kg N ha⁻¹, respectivamente; a su vez, para la dosis de semilla en seis casos se observó un efecto positivo, hasta 90 y 130 kg semilla ha⁻¹, esto es para las líneas experimentales M3H2 y M4H2 en el año 2012 y M1H2, M3H2, M4H2 y M5H2 en el año 2013.

Existe evidencia que la forma y el tamaño del grano tienen un efecto importante sobre el peso hectolítrico. Los granos redondos y chicos tendrían mejor peso hectolítrico que los granos grandes y alargados; por lo que en este caso esta diferencia podría estar relacionada a variaciones en la morfología del grano.

Los valores relativamente bajos de peso hectolítrico pueden tener relación con las dosis de nitrógeno aplicadas mayores de 30 kg N ha⁻¹, esto es de 60 y 90 kg ha⁻¹, puesto que hubo efecto negativo del nitrógeno sobre esta variable, aunque en las líneas experimentales M3H2 en el año 2012 y M5H2 en 2013 este efecto negativo se observó después de 45 y 50 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Cuadro 18. Valor máximo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para peso hectolítrico en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Tratamiento		Peso hectolítrico (kg hl ⁻¹)
	N [¶] ----- (kg ha ⁻¹) -----	D [§]	
Año 2012			
M1H2	30	70	62.0 [†]
	30	70	62.0 ^º
M2H2	30	70	56.4
	30	90	56.4
M3H2	45	95	61.3
	45	95	61.3
M4H2	30	130	61.7
	30	105	60.9
M5H2	30	70	60.9
	50	70	60.5
Año 2013			
M1H2	30	130	66.6
	45	130	66.7
M2H2	30	70	64.8
	35	90	64.4
M3H2	30	130	68.3
	30	70	63.3
M4H2	30	130	67.2
	30	70	64.9
M5H2	50	95	65.6
	30	90	65.1

[¶] N = dosis de nitrógeno; [§] D = dosis de semilla; [†] = valor de maximización; ^º valor de optimización económica.

El efecto positivo de la dosis de semilla sobre el peso hectolítrico en seis de los casos, aunque de baja magnitud, implicaría una correlación positiva entre el tamaño del grano y el peso hectolítrico, como efectivamente ocurrió en el año 2012, pero no en el año 2013, en que dicha correlación tendió a ser negativa (Figuras 8-A y 9-A del Apéndice).

6.5.2.4. Índice de llenado

En el Cuadro 19 se presentan las ecuaciones de regresión para índice de llenado del grano de las cinco líneas experimentales en los años 2012 y 2013.

Cuadro 19. Ecuaciones de regresión para índice de llenado de grano de cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Ecuación [†]	CME [§]	Pr. F*	CV ^ϕ	R ² [¶]
Año 2012					
M1H2	Idll = 179.419 - 9.474 R - 0.136 N - 1.652 D + 0.00792 D ²	43.457	0.0172	7.76	0.636
M2H2	Idll = -53.930 - 8.349 R - 1.618 N ^{0.5} + 2.946 D - 0.0148 D ²	70.203	0.0317	12.32	0.589
M3H2	Idll = 49.763 + 4.778 R - 0.00161 N ² + 0.971 D - 0.00497 D ²	21.971	0.0035	5.22	0.676
M4H2	Idll = 135.961 - 5.472 R - 1.129 N - 0.455 D + 0.00817 ND	33.155	0.0002	8.35	0.791
M5H2	Idll = 98.426 - 3.338 R - 0.00000968 N ² D	4.784	0.0001	2.35	0.744
Año 2013					
M1H2	Idll = 91.841 + 0.544 R + 0.125 N - 0.00107 N ² + 0.287 D ^{0.5}	0.957	0.1614	1.00	0.375
M2H2	Idll = 98.401 - 0.0356 R + 0.0106 N	0.239	0.110	0.49	0.375
M3H2	Idll = 100.799 + 0.0605 R - 0.0629 N + 0.000448 N ²	0.172	0.1002	0.43	0.371
M4H2	Idll = 99.575 - 0.435 R - 0.0000296 D ²	0.165	0.0501	0.41	0.348
M5H2	Idll = 99.245 - 0.0685 R + 0.0000321 N ² - 0.0000236 D ²	0.068	0.1522	0.26	0.324

[†] Idll = porcentaje de índice de llenado de grano (%); R = repetición; N = nitrógeno aplicado (kg N ha⁻¹); D = dosis de semilla (kg semilla ha⁻¹); [§] CME = cuadrado medio del error; * Pr. F = probabilidad de F; ^ϕ CV = coeficiente de variación; [¶] R² = coeficiente de determinación múltiple.

Las ecuaciones de regresión presentaron bajos coeficientes de variación (CV), entre 0.26 y 7.76 %, con un valor de 12.32 %, y valores de R² entre 0.589 y 0.791 en el año 2012 y entre 0.324 y 0.375 en el año 2013. Los valores menores de R² del

año 2013 coinciden con valores menores del coeficiente de regresión, lo que indica que en este año hubo un bajo efecto de los factores nitrógeno y dosis de semilla sobre el índice de llenado.

En el Cuadro 20 se presentan los valores máximos de índice de llenado para las cinco líneas experimentales en los años 2012 y 2013, con las respectivas dosis de nitrógeno y de semilla, a lo que se agregó los valores obtenidos con las dosis óptimas económicas de rendimiento de grano, a manera de comparación.

El índice de llenado fue afectado negativamente o no afectado por el nitrógeno en las cinco líneas experimentales en el año 2012 y en dos líneas experimentales en el año 2013, y positivamente en tres líneas experimentales en el año 2013, hasta 60 y 90 kg N ha⁻¹; por su parte, la dosis de semilla afecto positivamente al índice de llenado en dos de las líneas experimentales en el año 2012 y en una en el año 2013.

Estos resultados coinciden con Ross *et al.* (2009), quienes no encontraron efectos de la fertilización nitrogenada sobre el índice de llenado, y que la respuesta estuvo limitada al estrés hídrico y térmico durante el llenado de grano; por otra parte Prystupa *et al.* (1998) mencionan que la aplicación de fertilizantes nitrogenados puede disminuir el índice de llenado.

El mayor valor de índice de llenado observado en las líneas experimentales en el año 2013 fue de 99.4 %, lo que refleja que el alto porcentaje en el índice de llenado del grano se dio principalmente por las mayores precipitaciones ocurridas después de la etapa de floración, como se observa en las gráficas para los años 2012 y 2013 (Figuras 5-A y 7-A), lo que coincide con los resultados de Magliano *et al.* (2014), quienes observaron que en ambientes con mayores precipitaciones se obtuvieron mayores índices de llenado. Sin embargo, las líneas experimentales M2H2 y M4H2 presentaron en el año 2012 un menor porcentaje en el índice de llenado debido (Figura 5-A), tal vez, debido a una deficiencia hídrica en la última semana de agosto y en la primera semana de septiembre, durante la etapa fenológica del llenado de grano, lo que pudiera interpretarse como que estas líneas experimentales son menos aptas para la región.

Cuadro 20. Valor máximo y óptimo económico de nitrógeno y dosis de semilla para el índice de llenado de grano en cinco líneas experimentales, en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Línea experimental	Tratamiento		Índice de llenado (%)
	N [†]	D [§]	
	----- (kg ha ⁻¹) -----		
Año 2012			
M1H2	30	70	93.8 [†]
	30	70	93.8 ^φ
M2H2	30	90	78.4
	30	90	78.4
M3H2	30	95	98.1
	45	95	96.3
M4H2	30	70	84.7
	30	105	77.3
M5H2	30	70	96.2
	50	70	95.1
Año 2013			
M1H2	60	130	99.1
	45	130	98.9
M2H2	90	70	99.3
	35	90	98.8
M3H2	30	70	99.3
	30	70	99.3
M4H2	30	70	99.2
	30	70	99.2
M5H2	90	70	99.4
	30	90	99.1

[†] N = dosis de nitrógeno; [§] D = dosis de semilla; [†] = valor de maximización; ^φ valor de optimización económica.

6.6. Relaciones entre rendimiento y variables de calidad, y entre variables de calidad

6.6.1. Rendimiento y variables de calidad

Se relacionó el contenido de proteína con el rendimiento y el rendimiento con las variables peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado, mediante

análisis de regresión para cada año, considerando variables auxiliares para las líneas experimentales de cebada.

Las ecuaciones de regresión se presentan en el Cuadro 21, y tuvieron coeficientes de variación (CV) de 7.99 a 12.47 % en el año 2012 y de 5.47 a 16.53 % en el año 2013, y valores de R^2 de 0.446 a 0.538 en el año 2012 y de 0.122 a 0.292 en el año 2013.

En el año 2012 se observó una relación negativa entre contenido de proteína y rendimiento, mientras que en 2013 la relación fue positiva, con algunas diferencias entre las líneas experimentales. Al respecto, Ferraris *et al.* (2009) encontraron alta correlación entre el rendimiento de la cebada y la calidad del grano, observándose que en los lugares donde el rendimiento fue alto, el contenido de proteína en el grano decreció; mientras que Prystupa (2006) no encontró una relación mayor entre el porcentaje de proteína y el rendimiento, argumentando que las diferencias entre proteína y rendimiento se dan principalmente por el ambiente, y en segunda instancia por el genotipo.

Además, trabajos previos (Rausch *et al.*, 2003; Landriscini *et al.*, 2004) mostraron ninguna o muy baja relación entre la aplicación de nitrógeno inicial y los parámetros rendimiento y proteína, y demostrado por Aguinaga (2004) encontró que la disponibilidad inicial de nitrógeno guarda escasa relación con la proteína del grano.

El rendimiento se asoció positivamente con el peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado en los años 2012 y 2013, con algunas diferencias entre años y líneas experimentales. Algunas investigaciones han encontrado que en ambientes favorables y de mayor rendimiento hay menor proporción de granos, es decir, un mayor número de granos por incrementos en las dosis de nitrógeno se contrarresta por una reducción en el peso por grano. Castro *et al.* (2011) encontraron una relación positiva entre el rendimiento y el peso de mil granos, mientras que el rendimiento y el peso hectolítrico presentaron efectos negativos, señalando que se

produjeron elevadas precipitaciones durante el mes de noviembre, lo que favoreció el buen llenado de grano.

En los dos años, el rendimiento se asoció positivamente con el índice de llenado aunque con menor efecto en el año 2013, con algunas diferencias entre las líneas experimentales, similar a los resultados de algunos autores, que encontraron relaciones positivas entre el rendimiento y el calibre o índice de llenado de grano (Magliano, 2014).

Cuadro 21. Ecuaciones de regresión entre el rendimiento de grano y las variables de calidad en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.), en los años 2012 y 2013, en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

Año	Ecuación [†]	CME [§]	Pr. F*	CV ^φ	R ² [¶]
2012	Prot = 18.570 + 0.723 R – 2.650 V3 + 0.722 V4 – 1.267 Y	1.588	0.0001	7.99	0.538
	Y = – 2.563 – 0.252 R – 0.200 V2 – 0.258 V3 – 0.590 V5 + 0.282 Pmg – 0.00306 Pmg ²	0.129	0.0001	12.47	0.446
	Y = 2.041 – 0.369 R – 0.193 V2 – 0.317 V3 – 0.561 V4 – 0.326 V5 + 0.000503 Phe ²	0.104	0.0001	11.02	0.493
	Y = 1.476 – 0.241 R – 0.300 V3 – 0.500 V5 + 0.0240 Idll	0.106	0.0001	11.27	0.528
2013	Prot = 14.994 – 0.336 R – 0.389 V5 + 0.603 Y	0.746	0.0028	5.474	0.159
	Y = - 2.736 – 0.088 R + 0.151 V4 + 0.144 V5 + 0.800 Pmg ^{0.5}	0.142	0.0001	16.53	0.292
	Y = 0.621 – 0.173 R + 0.280 V2 + 0.275 V3 + 0.408 V4 + 0.595 V5 + 0.0241 Phe	0.136	0.0009	16.49	0.260
	Y = 1.896 – 0.0137 R + 0.155 V5 + 0.0227 Idll ²	0.107	0.0234	14.55	0.139

[†] Prot = porcentaje de proteína en el grano (%); Y = rendimiento (t ha⁻¹); Pmg = peso de mil granos (g); Phe = peso hectolítrico (kg hl⁻¹); Idll = índice de llenado de grano (%); R = repetición; V2, V3, V4, V5 = variables auxiliares para las líneas experimentales M2H2, M3H2, M4H2, M5H2, en relación con la línea experimental M1H2; [§] CME = cuadrado medio del error; * Pr. F = probabilidad de F; ^φ CV = coeficiente de variación; [¶] R² = coeficiente de determinación múltiple.

6.6.2. Relación entre variables de calidad

Las correlaciones entre las variables de calidad se presentan para los años 2012 y 2013 en las figuras 8-A y 9-A, respectivamente. La proteína y el peso de mil granos presentaron una correlación negativa en los dos años, mientras que la proteína y el peso hectolítrico muestran una correlación negativa en el año 2012 y positiva en el año 2013. La proteína y el índice de llenado presentaron una correlación negativa en ambos años, similar a lo obtenido por Prystupa (2006), quien encontró una relación negativa entre el porcentaje de proteína y el calibre de los granos. El peso de mil granos y el peso hectolítrico presentaron una correlación positiva en el año 2012 y negativa en el año 2013, cabiendo señalar que los valores de peso hectolítrico son mayores en el año 2013. El peso de mil granos y el índice de llenado presentaron una correlación positiva en los dos años, con valores mayores del índice de llenado en el año 2013. El peso hectolítrico y el índice de llenado mostraron una correlación positiva en el año 2012 y negativa en el año 2013, con valores en el índice de llenado mayores en el año 2013.

VII. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se concluyó lo siguiente:

La fecha de siembra fue relativamente temprana y las precipitaciones presentadas durante las etapas fenológicas de formación de espiga en los ciclos de cultivo de los años 2012 y 2013 favorecieron la producción de grano, y se obtuvieron mejores rendimientos en comparación con el año 2011, tanto para las líneas experimentales de cebada de dos hileras y como para la variedad Esmeralda de seis hileras.

La respuesta de las líneas experimentales a nitrógeno por sobre 30 kg N ha^{-1} fue inexistente o menor a 50 kg N ha^{-1} ; sin embargo, no se obtuvo información para dosis de nitrógeno menores a 30 kg N ha^{-1} , no observadas. La respuesta de rendimiento a dosis de semilla varió entre $70 \text{ kg de semilla ha}^{-1}$, la dosis menor observada, y $105 \text{ kg de semilla ha}^{-1}$.

Todas las líneas experimentales, excepto la línea M3H2 en el año 2012, presentaron contenidos de proteína de grano mayores a 12.5 %, valor máximo aceptado por la industria cervecera, a dosis de nitrógeno de 30 kg N ha^{-1} , la dosis menor probada. Si bien cabría probar las líneas experimentales a dosis menores que 30 kg N ha^{-1} , a fin de observar si se obtienen valores menores de proteína del grano, los altos valores obtenidos hacen suponer que esto puede no ser posible.

Todas las líneas experimentales presentaron valores de peso de mil granos relativamente bajos, entre 30.2 g en el año 2012 y 44.2 g en el año 2013, para todos los niveles de nitrógeno y dosis de semilla probados, aunque estos valores son aceptados por la industria cervecera.

Todas las líneas experimentales presentaron valores de peso hectolítrico de grano mayores a 58 kg hl^{-1} , valor mínimo aceptado por la industria cervecera, excepto la línea experimental M2H2 en el año 2012, con un valor de 56.4 kg hl^{-1} .

Excepto las líneas experimentales M2H2 y M4H2 en el año 2012, todas las líneas experimentales presentaron índices de llenado de grano mayores a 85 %, valor mínimo aceptado por la industria cervecera.

Si bien la mayoría de las líneas experimentales de cebada de dos hileras probadas cumplen con los requisitos de calidad de grano, de peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de llenado, sus altos contenidos de proteína no las hacen apropiadas para la producción de malta para la elaboración de cerveza.

VIII. LITERATURA CITADA

- Agbede, O. O. 1987. Response of barley seedling to nitrogen and phosphorus rates on soils with various fertility levels. *Soil Sci.* 143: 192-197.
- Aguinaga, A. A. 2004. Análisis de las relaciones entre proteínas de reserva, calidad maltera y ambiente de cultivo en cebada cervecera. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Sur [Bahía Blanca, Argentina]. Biblioteca Departamento de Agronomía, 149 pp.
- Baik, B. K., and S. E. Ullrich. 2008. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science* 48: 233 - 242.
- Bello-Pérez, L. A., M. M. Sánchez-Rivera, C. Núñez-Santiago, S. L. Rodríguez-Ambriz and A. D. Román-Gutiérrez. 2010. Effect of the pearled in the isolation and the morphological, physicochemical and rheological characteristics of barley starch. *Carbohydrate Polymers* 81: 63 - 69.
- Bergh, R., A. Baez, A. Quattrocchio y M. Zamora. 2000. Fertilización nitrogenada para calidad en trigo candeal. *Informaciones Agronómicas* 7: 13-16.
- Bishop, L. R. 1930. Statistical studies of the analytical data accumulated in the course of the barley investigations. *J. Inst. Brew.* 36:421-434.
- Borrajo, C. I. y M. Ramírez. 2006. Toma y remisión de muestras. Laboratorio de Semillas. Programa Capacitación 2006. Ed. EEA Mercedes, Centro Regional Corrientes. INTA. 5p.
- Briggs, D. E. 1998. Malts and malting. Blackie Academic y Professional. Londres. 796 p.
- Bulman, P. and D. Smith, 1993. Grain protein response of spring barley to high rates and post-anthesis application of fertilizer nitrogen. *Agron. J.* 87: 1109-1113.
- Cao, W. and N. D. Moss, 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci.* 29: 1018 - 1021.
- Carreck, N. L. and D. G. Christian. 1991. The effect of the previous crop on the growth nitrogen uptake and yield of winter barley intended for malting. *J. Sci. Food Agric. Soc. Chem.* 62: 137-145.
- Castellanos J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAPA. 226 p.

- Clarke, J. M., C. A. Campbell, H. W. Cutforth, R. M. DePauw and G. E. Winkleman. 1990. Nitrogen and phosphorus uptake, translocation, and utilization efficiency of wheat in relation to environment and cultivar yield and protein levels *Can. J. Plant Sci.* 69: 1135-1147.
- Claves para la Taxonomía de Suelos. 2006. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Décima Edición. Traducción de: Ortiz – Solorio, C. A. y Gutiérrez – Castorena, M. C. 2007. Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas Montecillo, Texcoco, Estado de México. 331 p.
- Coles, G. D., P. D. Jamielson and R. M. Haslemore. 1991. Effect of moisture stress on malting quality in Triumph barley. *J. Cereal Sci.* 14: 161-167.
- Conry, M. J. 1995. Comparison of early, normal and late sowing at three rates of nitrogen on the yield, grain nitrogen and screenings content of Blenheim spring malting barley in Ireland. *J. Agricult. Sci.* 125: 183–188.
- Conry, M. J. 1997. Effect of fertiliser N on the grain yield and quality of spring malting barley grown on five contrasting soils in Ireland. *Proc. Res. Irish Acad.* 97: 185–196.
- Cuanalo de la C., H. E. 1975. Manual para la Descripción de Perfiles de Suelo en el Campo. Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- De Ruiter, J. M. 1999. Yield and quality of malting barley (*Hordeum vulgare* L. “Valette”) in response to irrigation and nitrogen fertilisation. *New Zealand J. Crop. Hort. Sci.* 27:307-317.
- Doyle, A. D. and R. A. Shapland. 1991. Effect of split applications on the yield and protein content of dryland wheat in Northern New South Wales. *Aust. J. Exp. Agric.* 31: 85-92.
- Echagüe, M., M.R. Landriscini, S. Venanzi y M.A. Lázzari. 2001. Fertilización nitrogenada en cebada cervecera. *INPOFOS. Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 10:5-8.
- Ellis, R. P. and B. Marshall. 1998. Growth, yield and grain quality of barley (*Hordeum vulgare* L.) in response to nitrogen uptake. II. Plant development and rate of germination. *J. Exp. Bot.* 49:1021-1029.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Taner, A., Muzaffer, A. and Fazil, D. 2004. *BARLEY: Post-Harvest Operations*

Organisation: The Central Research Institute for Field Crops. FAO. Roma, Italia.

- Fathi, G., G. K. McDonald and R. C. M. Lance. 1997. Effect of post-anthesis water stress on the yield and grain protein concentration of barley grown at two levels of nitrogen. *Aust. J. Agric. Res.* 48: 67 - 80.
- Ferraris, G., R. Bergh, T. Loewy, L. Ventimiglia, F. H. Gutierrez Boem y P. Prystupa. 2008. Fertilización de Cebada Cervecera cv. Scarlett: III. Efecto del Nitrógeno en espigazón y su interacción con el nitrógeno inicial. En: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.
- Ferraris, G. N., P. Prystupa, F. H. Gutierrez Boem y L. Couretot. 2009. Fertilización en cebada cervecera pautas de manejo para la obtención de altos rendimientos con calidad. Áreas de Desarrollo Rural EEA, INTA. Pergamino y General Villegas, Argentina. pp. 450-453.
- Fischer, R. A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature *J. Agric. Sci., Camb.* 105: 447-461.
- Fontanetto, H., E. Weder, G. Gianinetto y G. Berrone. 2009. Efecto de diferentes fertilizantes NPS en cebada. *AGRICULTORES*. (Gacetilla del Departamento Técnico. Cultivos de trigo, colza, arveja y lenteja.) Número 11. Mayo 2009: 4-6.
- Fundación Produce Guanajuato. Plan estratégico de investigación y de transferencia de tecnología. Cadena Agroalimentaria de Cebada. Disponible desde: http://www.inca.gob.mx/materiales_eventos/pe_transtecno/Agricultoras/CEBADA_Reporte%20II.pdf.
- Gallagher, E. J., A. Doyle and D. Dilworth. 1987. Effect of management practices on aspects of cereal yield and quality. *Aspects App. Biol.* 15:151-170.
- García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. (Para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana). Cuarta edición: 1987. Pag. 120.
- Gómez, M. R., C. J. P. Pérez, E. A. Magallanes, G. V. Rueda, F. T. Lozada, J. M. Benavides, R. H. Monroy, L. M. A. Meneses, C. E. Reyes, T. A. Hernández y C. R. A. Arias. 2007. Diagnóstico de Producción y Rentabilidad de Cebada Grano Temporal en el Estado de Hidalgo del Ciclo Primavera Verano 2006.

- Gómez, M. R., D. M. Zamora, y T. J. M. Arreola. 2006. El Sistema de Labranza de Conservación en el Cultivo de Cebada de Temporal en el Estado de Hidalgo.
- González, E. A., S. Wood, G. J. Islas, C. L. Márquez, D. M. Zamora, P. F. Ramírez y H. S. Solano. 2006. Impacto económico del mejoramiento genético de la cebada en México: Variedad Esperanza. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México, D.F. Publicación Técnica No. 20. p. 67.
- Inglede, W. M., A. M. Jones, R. S. Bhatti and B. G. Rosnagel. 1995. Fuel alcohol production from hull-less barley. *Cereal Chemistry* 72: 147 - 150.
- Impulsora Agrícola (IASA). 1995. El cultivo de la cebada maltera en temporal. México.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Izydorczyk, M. S., T. L. Chornick, F. G. Paelley, N. M. Edwards and J. E. Dexter. 2008. Physicochemical properties of hull-less barley fibre rich fractions varying in particle size and their potential as functional ingredients in two-layer flat bread. *Food Chemistry* 108: 561 - 570.
- KUHN. 2014. http://www.kuhn-seedliner.com/internet/web_seedliner.nsf/0/B5C32A10369F7D11C1257876004D6482?OpenDocument. Disponible a marzo de 2014.
- Lacasta, C., E. Estalrich, R. Meco y M. Benítez. 2007. Interacción de densidades de siembra de cebada y rotaciones de cultivo sobre el control de la flora arvense y el rendimiento del cultivo. Congreso 2007 de la Sociedad Española de Malherbología. 191-196.
- Landriscini, M.R., L.G. Suñer, A. Lázzari y A. Rausch. 2004. Respuesta de la cebada cervecera a la aplicación de N. *INPOFOS. Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 22:15-18.
- Landriscini, M.R., A. Lázzari y J. A. Galantini. 2010. Fertilización nitrogenada y balance de nutrientes en cebada Cervecera. Fertilización y nutrición en cebada cervecera. *Cl. Suelo (Argentina)* 28(2): 201-214.
- Lauer, J. G. and J. R. Partridge. 1990. Planting date and nitrogen rate effects on spring malting barley. *Agron. J.* 82: 1083-1088.

- Lázzari, M.A., M.R. Landriscini y M.E. Echagüe. 2005. Patrones de absorción de nitrógeno nativo y del fertilizante en cebada cervecera con fertilizaciones cercanas a la siembra. *Ciencia del Suelo* 23: 69-77.
- Lázzari, M.A., M.R. Landriscini and M.E. Echagüe. 2007. Uptake of nitrogen by malting barley grown under conditions found in Buenos Aires Province, Argentina. *Communication in Soil Sc. and Plant Analysis* 38(3-4): 371-388.
- Loewy T. y M. M. Ron. 2001. Componentes de rendimiento en trigo y cebada cervecera bajo distintos niveles nutricionales. V Congreso Nacional de Trigo, Villa Carlos Paz. p. 7.
- López-Castañeda, C., R. A. Richards, G. D. Farquhar and R. E. Williamson. 1996. Seed and seedling characteristics contributing to variation in early vigor among temperate cereals. *Crop Sci.* 36 No. 5: 1257-1266.
- López, P. P., G. F. Prieto, M. M. Gaytán, G. A. D. Román. 2007. Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la Región Centro de México. *Sociedad Chilena de Nutrición, Bromatología y Toxicología Chile. Revista Chilena de Nutrición*, vol. 34. núm. 1. p. 1-12.
- Ma Lazzari, M. Landriscini, M. Cantamutto, A. Miglierina, R. Rosell, F. Möckel, y M. Echagüe. 2001. Absorción de nitrógeno por cebada cervecera en dos suelos del Sur Bonaerense, Argentina. *Ciencia del suelo.* 19: 101-108.
- Magliano, P.N., P. Prystupa y F.H. Gutiérrez Boem. 2014. Contenido proteico en granos de distinto tamaño en cebada cervecera. *IAH* 14. pp. 14 – 18.
- Márquez, L. 2007. Las sembradoras y las dosis de siembra. *Agrotécnica.* 70-72 pp.
- McKenzie, R.H., A. B. Middleton, L. Hall, J. DeMulder and E. Bremer. 2004. Fertilizer response of barley grain in south and central Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 84:513-523.
- Myers, R. H. 1990. *Classical and modern regression with applications.* Second ed. PWS-KENT Publishing Company. Boston, MA, USA. 246 p.
- NMX-FF-043-SCFI-2003. Norma Mexicana. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano -cereal- cebada maltera (*Hordeum vulgare* L. y *Hordeum distichum* L.). Especificaciones y métodos de prueba. DOF.

- Or, D. and R. J. Hanks. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation nonuniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 226-233.
- Oropeza, J. P. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento y calidad en trigo y cebada. Tesis: Ingeniero en Producción Agropecuaria. Pontificia Universidad Católica Argentina. Facultad de Ciencias Agrarias. p. 11-12.
- Otegui, O., J. Zamalvidez, C. Perdomo, R. Goyenola y A. Cerveñansky. 2001. Momento de aplicación de nitrógeno: efecto en eficiencia de uso del fertilizante, rendimiento y concentración proteica en grano de cebada cervecera en Uruguay. *Effect of Timing of Nitrogen Application on Fertilizer Use Efficiency, Yield and Grain Protein Concentration of Malting Barley in Uruguay.* *Terra* 20: 71-80.
- Prystupa, P., J.D. Scheiner, D. Martínez y R.S. Lavado. 1998. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en dos ambientes del norte de la Provincia de Buenos Aires. *Actas del IV Congreso Nacional de Trigo y II Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-Invernal.* Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires: p. 57.
- Prystupa, P., R. Savín y G. Slafer. 2003. Rendimiento y calidad en cebada en respuesta a disponibilidad nitrogenada y fosforada. 2003. En: *El cultivo de cebada y la producción de malta. Oportunidades para la articulación de la agroindustria con la investigación científica.* Buenos Aires, EPG-FAUBA. 2 pp.
- Prystupa P. 2005. *Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos.* Editores: Echeverria H. y Garcia F. Grancharoff Impresores. Capítulo 15. p. 317
- Prystupa, P., F. H. Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti, G. Ferraris and L. Couretot. 2006. Measuring corn response to fertilization in the Northern Pampas. *Better Crops* 90: 25-27.
- Prystupa, P., G. Ferraris, R. Bergh, T. Loewy, L. Ventimiglia y F.H. Gutierrez Boem. 2008. Fertilización de Cebada Cervecera cv. Scarlett: IV. Modelo de respuesta del contenido proteico a la Fertilización Nitrogenada. En: *XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* San Luis, Argentina. 5 p.
- Ragaei, S. and M. A. El Sayed. 2006. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry* 95: 9 - 18.

- Rausch, A., A. Lazzari y M. R. Landriscini. 2003. Cebada cervecera. Disponibilidad de nitrógeno y rendimiento del cultivo de buena calidad maltera. *Fertilizar* 32:13-17.
- Rawson, H. y H. Gómez, 2001. Trigo regado: manejo de cultivo. Roma, Italia: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2001. p. 106.
- Ross F., Massigoge J. y Zamora M. 2009. Fertilización de cebada cervecera en diferentes ambientes. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informaciones agronómicas del cono sur. Argentina. 4 p.
- Ross F., J. Massigoge y M. Zamora. 2010. Efectos del ambiente y la fertilización en cebada cervecera Cv Scarlett: Parte I Rendimiento. XXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina. p 142.
- Ross, F., J. Massigoge, M. Zamora. 2010. Efectos del ambiente y la fertilización en cebada cervecera Cv Scarlett: Parte II Calidad. XXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Rosario Argentina. p 148.
- Ross, F., J. Massigoge, y M. Zamora. 2011. Fertilización de cebada cervecera en ambientes con tosca en el sur de Buenos Aires, Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 3:9-13.
- SAGARPA-SIAP. 2014. Estadística básica Agrícola. Serie Histórica. <http://www.siap.gob.mx>. Disponible al 20 de mayo de 2014.
- Savin, R., P. J. Stone, M.E. Nicolas and I. F. Wardlaw. 1997. Grain growth and malting quality of barley. 1. Effects of heat stress and moderately high temperature. *Aust. J. Agric. Res.* 48 : 615 - 624.
- Tejinder, S. 2003. Preparation and characterization of films using barley and oat β -glucan extracts. *Cereal Chemistry* 80: 728 - 731.
- Tsegaye, T., J. F. Stone and H. E. Reeves. 1993. Water use characteristics of wide-space furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 240-245.
- Vaughan, B., K. A. Barbarick, D.G. Westfall and P.L. Chapman. 1990. Tissue nitrogen levels for dryland hard red winter wheat. *Agron. J.* 82: 561-565.
- Weston, D. T., R. D. Horsley, P. B. Schwarz, and R. J. Goos. 1993. Nitrogen and planting effects on low-protein spring barley. *Agron. J.* 85:1170-1174.

- Widdowson, F. V., R. J. Darvy, A. M. Derwar, J. F. Jenking, B. R. Kerry, D. W. Lawlor, R. T. Plumb, C. J. S. Ross, G. C. Scott, A. D. Todd and D. W. Wood. 1986. The effects sowing date and other factors on growth, yield and nitrogen uptake, and on incidence of pests and diseases of winter barley at Rothamsted from 1981-1983. *J. Agric. Sci. Camb.* 106: 551-574.
- Yin, C., G. P. Zhang, J. M. Wang and J. X. Chen. 2002. Variation of Betaamylase activity in barley affected by cultivar and environment and its relation to protein content and grain weight. *J. Cereal Sci.* 36:307-312.
- Zamora, D. M., H. S. Solano y P. E. Sevilla. 2003. La Cebada Maltera (*Hordeum vulgare* L.) cereal fundamental en la historia del Campo Experimental Valle de México. In: reseña histórica, SAGARPA-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigaciones de la Región Centro (CIRCE), Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX). Chapingo, Estado de México, México. pp. 31-38 (Publicación especial núm. 1).
- Zamora, D. M., C. A. M. Ibañez, P. F. Ramírez y C. L. Márquez. 1997. Esmeralda, variedad de cebada maltera para los Valles Altos. SAGARPA- Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigaciones de la Región Centro (CIRCE), Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX). Chapingo, Estado de México, México. Folleto Técnico Núm. 5. p. 20.
- Zamora, D. M., H. S. Solano, M. R. Gómez, M. I. Rojas, M. J. Ireta, G. R. Garza y T. C. Ortiz. 2008. Adabella: Variedad de Cebada Maltera para Valles Altos de la Mesa Central de México. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Chapingo, Estado de México, México. *Agricultura Técnica en México* Vol. 34 Núm. 4. pp. 491 - 493.

IX. APÉNDICE

Descripción y análisis físicos y químicos del perfil del suelo

Sitio experimental de los años 2011 y 2012

Perfil

Localidad: Villa de Tezontepec, Hgo.

Coordenadas: 19° 54' 13.30" LN y 98° 53' 02.50" LO

Elevación: 2333 msnm.

Relieve: Plano.

Pendiente: < 1 %.

Material parental: Tepetate.

Drenaje superficial: Sitio receptor pasivo.

Pedregosidad: No evidente.

Flora: Pastos y herbáceas.

Fauna: Tejones, conejo y ratones.

Vegetación cultivada: Cebada, avena, frijol.



Horizonte	Descripción
Ap	0-20 cm, ligeramente húmedo; gris muy oscuro (10 YR 3/1) cuando húmedo y pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2) cuando seco; textura franco arcilloso; estructura granular medianamente desarrollada de 2 a 5 cm; consistencia friable cuando húmedo y ligeramente plástico cuando saturado; permeabilidad moderada: poros muchos finos tabulares continuos con orientación al azar dentro de los agregados; raíces abundantes finas de tamaño mediano a fino; sin reacción al HCl y lenta reacción al H ₂ O ₂ ; con transición tenue y ondulada al siguiente horizonte, drenaje medio y fauna escasa.
Bw	20-38 cm, húmedo, negro (10 YR 2/1) cuando húmedo y pardo oscuro (10 YR 3/3) cuando seco; textura franco arcilloso; estructura en bloques subangulares medianamente desarrollados de 2 a 6 cm; consistencia friable cuando húmedo y ligeramente plástico cuando saturado; permeabilidad moderada; poros medios finos y discontinuos al azar de todos los agregados; raíces muchas finas, medias pocas y gruesas escasas; sin reacción al HCl y fuerte y lenta reacción al H ₂ O ₂ ; presencia de escasas motas de color amarillento de alrededor de 1 cm; transición horizontal abrupto al siguiente horizonte.
Ckm	> a 38 cm; ligeramente húmedo; pardo amarillento (10 YR 5/4) cuando húmedo y pardo pálido (10 YR 6/3) cuando seco; textura arena migajosa; estructura laminar fuertemente desarrollada; consistencia extremadamente duro cuando seco, extremadamente firme cuando húmedo y no pegajoso y no plástico cuando saturado; permeabilidad nula o casi nula; sin poros y escasas raíces muy finas; fuerte reacción al HCl y nula reacción al H ₂ O ₂ ; presencia de concreciones de carbonato de calcio alrededor de las fracturas de los agregados, capa sementada de tepetate.

Análisis químicos y físicos

H	pH	CE	MO	N	P	CaCO ₃	Na	K	Ca	Mg	CIC
Ap	6.70	0.06	1.06	0.62	5.48	0.30	0.02	0.10	12.00	5.09	17.92
Bw	7.40	0.03	1.32	0.93	5.48	0.26	0.04	0.03	13.20	6.34	17.75
Ckm	7.70	0.04	0.79	0.69	22.60	4.11	0.15	0.18	18.44	10.24	32.64

CE en dSm⁻¹; MO, N (total) y CaCO₃ en %; P como P₂O₅ en mg.kg⁻¹; Na, K Ca, Mg y CIC en Cmol₍₊₎.kg⁻¹

H	Da	PSB	RAS	A	L	R	CLASE TEXTURAL
Ap	1.38	> 50	0.005	35.7	33.6	30.8	Franco arcilloso
Bw	1.47	> 50	0.128	30.9	39.9	29.2	Franco arcilloso
Ckm	1.67	> 50	0.04	84.5	11.1	4.4	Arena migajosa

Da en g.cm⁻³; A = arena (%), L = limo (%) y R = arcilla (%).

Sitio experimental del año 2013

Perfil

Localidad: Villa de Tezontepec, Hgo.

Coordenadas: 19° 52' 14.9" LN y 98° 48' 7.5" LO

Elevación: 2333 msnm.

Pendiente: 2% con exposición hacia el noroeste.

Material parental: Cenizas y tobas volcánicas.

Drenaje superficial: Sitio donador pasivo.

Pedregosidad: Superficial.

Flora: Matorral semidesértico, donde los pirules, mezquites, huizaches y los pastos son dominantes.

Fauna: Hormigas y algunos ejemplares de gallina ciega y gusano de alambre.

Vegetación cultivada: Cebada, trigo y maíz.



Horizonte	Descripción
A	0-10 cm; seco; 10YR 4/1; estructura migajosa fina; franco arcillo arenoso; muy friable; permeabilidad rápida; poros muy finos, intersticiales, numerosos y caóticos; raíces finas y comunes; reacción nula al HCl y fuerte al H ₂ O ₂ ; transición media al siguiente horizonte.
A ₂	10-23/30 cm; ligeramente húmedo; 10YR 5/2; bloques subangulares de 3 a 5 cm de moderado desarrollo; franco arenoso; muy friable; permeabilidad moderada; poros muy finos, intersticiales, numerosos y caóticos; raíces finas y comunes; reacción ligera al HCl y fuerte al H ₂ O ₂ ; transición ondulada y marcada al siguiente horizonte.
Bwk	23/30-34/44 cm; ligeramente húmedo; 10YR 5/2; bloques subangulares de 5 a 7 cm de moderado desarrollo; franco arenoso; muy friable; permeabilidad moderada; poros muy finos, intersticiales, numerosos y caóticos; raíces finas y comunes; reacción moderada al HCl y fuerte al H ₂ O ₂ ; presencia de fragmentos de tepetate de 2 a 4 cm en el 25% del horizonte; transición ondulada y marcada al siguiente horizonte.
Ck	34/44-54 cm; seco; 10YR 7/4; masivo que se rompe en bloques angulares de 5 a 15 cm de pobre desarrollo; franco arcilloso; muy firme; permeabilidad lenta; poros muy finos, intersticiales, numerosos y caóticos y algunas grietas de 1 mm de espesor horizontales con acumulaciones de carbonatos en sus paredes; raíces finas y raras; reacción muy fuerte al HCl y ligera al H ₂ O ₂ .

Análisis químicos y físicos

H	pH	CE	CO	MO	N	P	CaCO ₃	Na	K	Ca	Mg	CIC
A	7.6	0.86	1.2	2.1	0.078	36.3	0.56	0.37	0.12	10.17	3.76	23.7
A ₂	7.8	0.66	1.0	1.7	0.112	28.6	0.57	0.40	1.03	9.50	3.79	21.9
Bwk	8.0	0.83	1.1	1.9	0.078	31.1	0.90	0.54	0.12	13.81	1.74	24.6

CE en dSm⁻¹; CO, MO, N (total) y CaCO₃ en %; P como P₂O₅ en mg.kg⁻¹; Na, K Ca, Mg y CIC en Cmol₍₊₎.kg⁻¹

H	Da	Color S	Color H	A	L	R	CLASE TEXTURAL
A	1.26	5YR 5/1	7.5YR 3/1	27.7	43.5	28.8	Franco arcilloso
A ₂	1.37	5YR 4/1	7.5YR 2.5/1	25.9	46.6	27.5	Franco arcilloso
Bwk	1.30	5YR 4/1	7.5YR 2.5/1	23.1	42.8	34.1	Franco arcilloso

Da en g.cm⁻³; A = arena, L = limo y R = arcilla en %.

Cuadro 1-A. Análisis de las muestras de suelos de los dos sitios experimentales en estudio.

Muestra	pH	CE	Materia orgánica	Fósforo	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Boro	Fierro	Cobre	Manganeso	Zinc
		(dS m ⁻¹)	(%)	----- mg kg ⁻¹ -----									
Sitio A-1	8.0	0.23	2.6	20.1	3061	295	484	20	0.521	26.3	0.7	9.5	0.4
Sitio A-2	7.9	0.24	3.8	21.3	3090	303	512	10	0.536	29.9	0.7	10.6	0.3
Sitio B-1	7.6	0.25	3.4	42.8	2809	294	268	30	0.376	33.3	0.7	11.9	0.8
Sitio B-2	7.8	0.19	2.4	27.6	3258	297	296	20	0.247	36.8	0.7	11.3	0.8

Relación 1:2: pH, CE; materia orgánica: Walkley y Black; fósforo: Olsen; bases intercambiables: CH₃COONH₄ 1N pH 7; boro: Azometina – H; micronutrientes: DTPA.

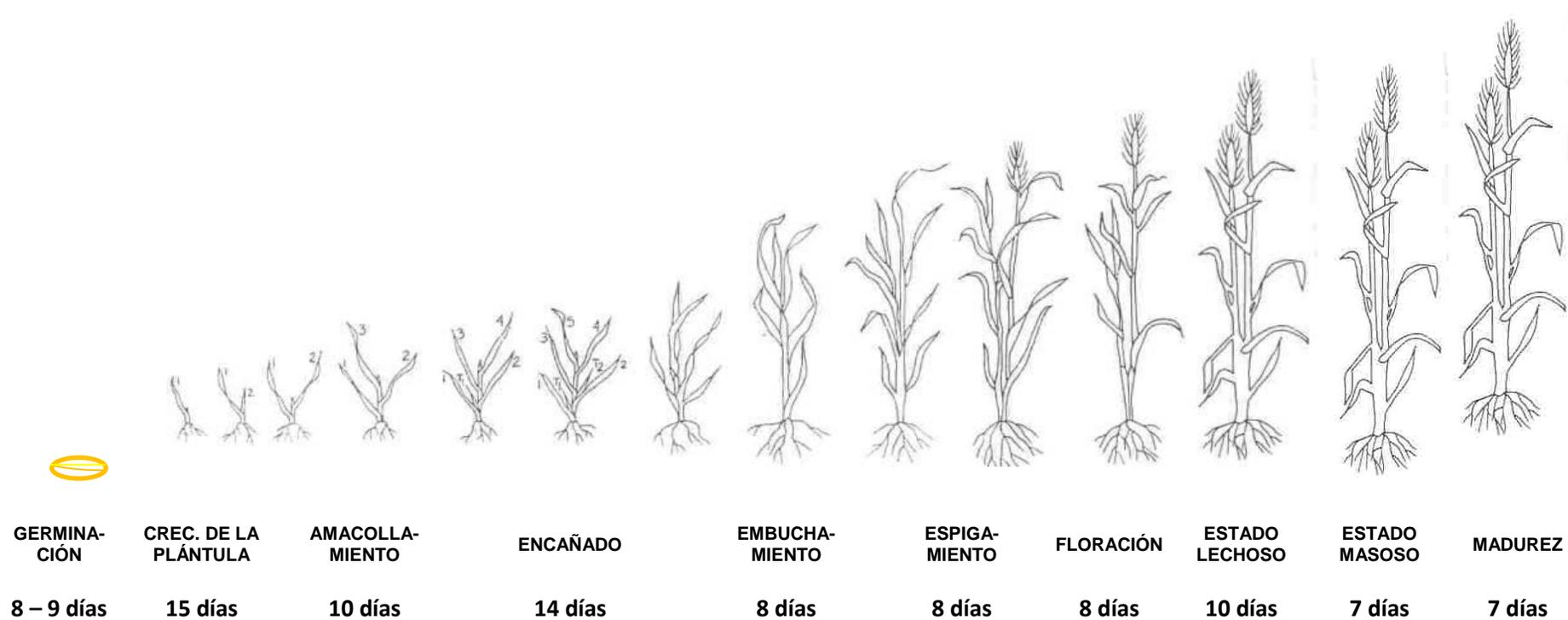


Figura 1-A. Duración de las etapas fenológicas del cultivo de la cebada (*Hordeum vulgare* L.), en Villa de Tezontepec, Hidalgo.

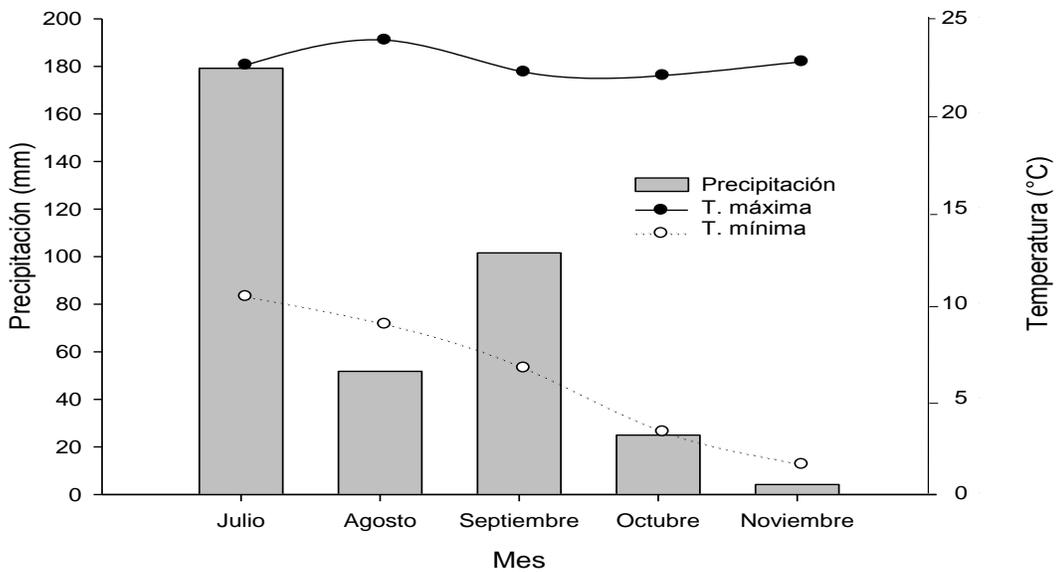


Figura 2-A. Precipitación mensual y promedio de temperatura mínima y máxima observadas en la estación agroclimática de Tolcayuca, Hidalgo, del INIFAP (2011).

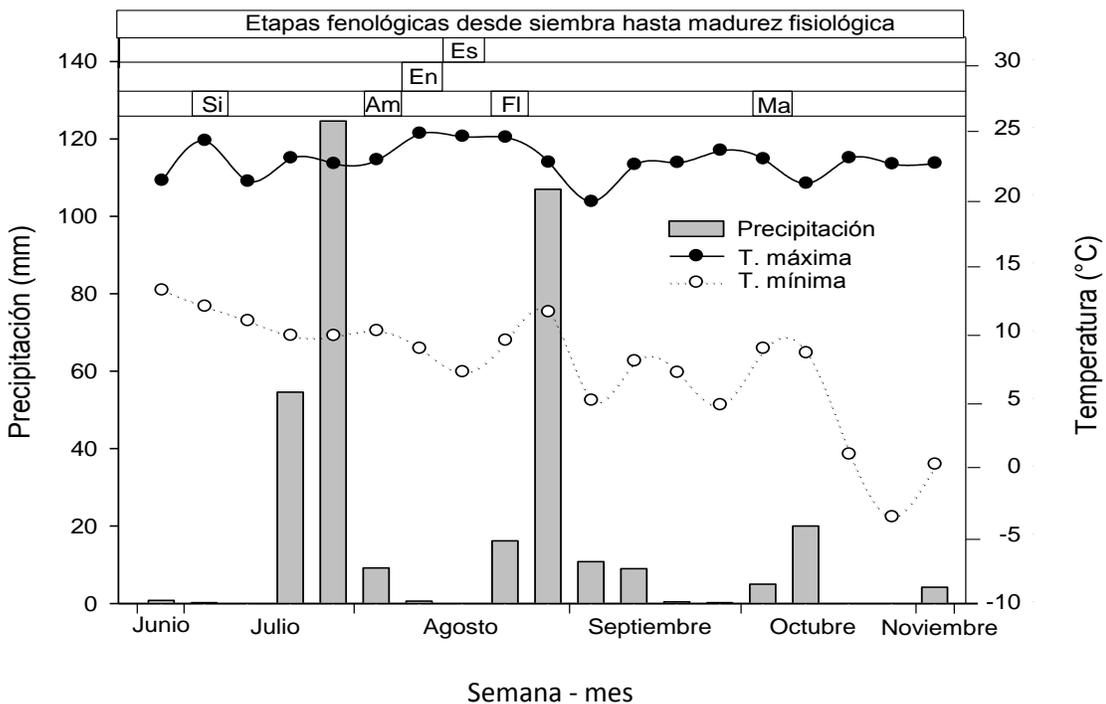


Figura 3-A. Precipitación semanal y promedio de temperatura mínima y máxima observadas en la estación agroclimática de Tolcayuca, Hidalgo, del INIFAP (2011).

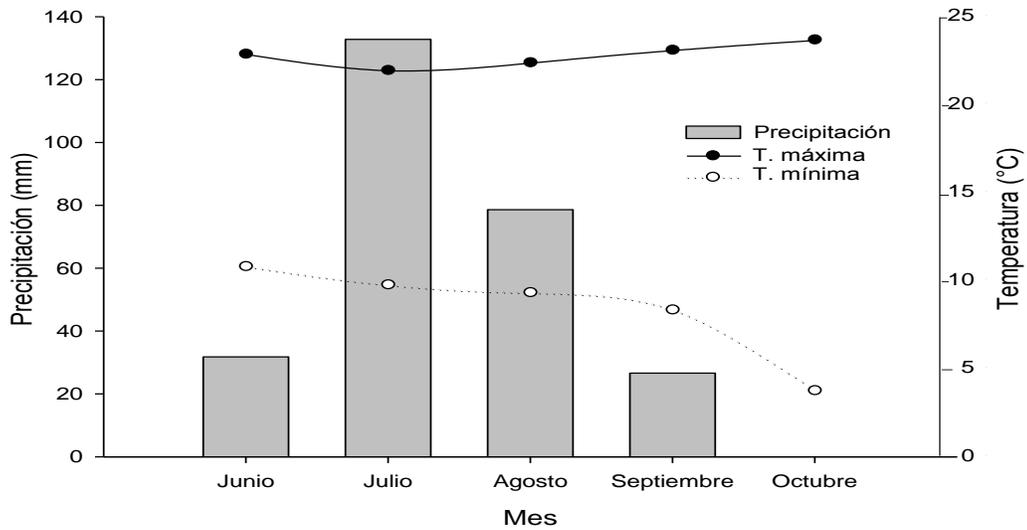


Figura 4-A. Precipitación mensual y promedio de temperatura mínima y máxima observadas en la estación agroclimática de Tolcayuca, Hidalgo, del INIFAP (2012).

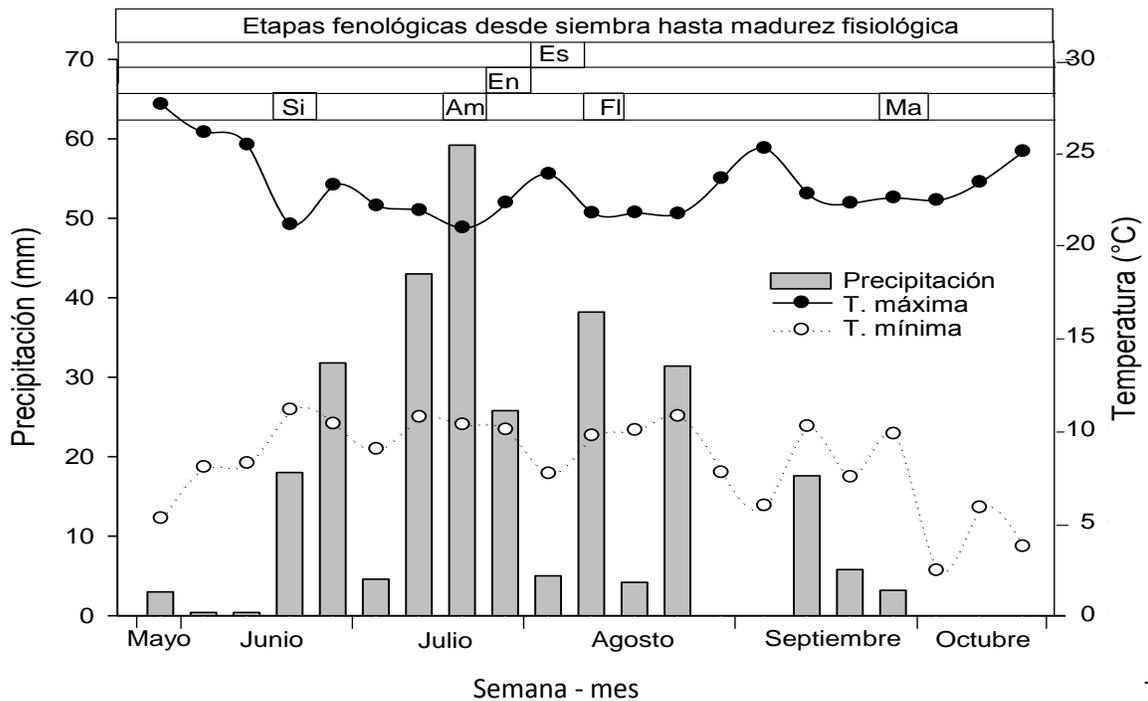


Figura 5-A. Precipitación semanal y promedio de temperatura mínima y máxima observadas en la estación agroclimática de Tolcayuca, Hidalgo, del INIFAP (2012).

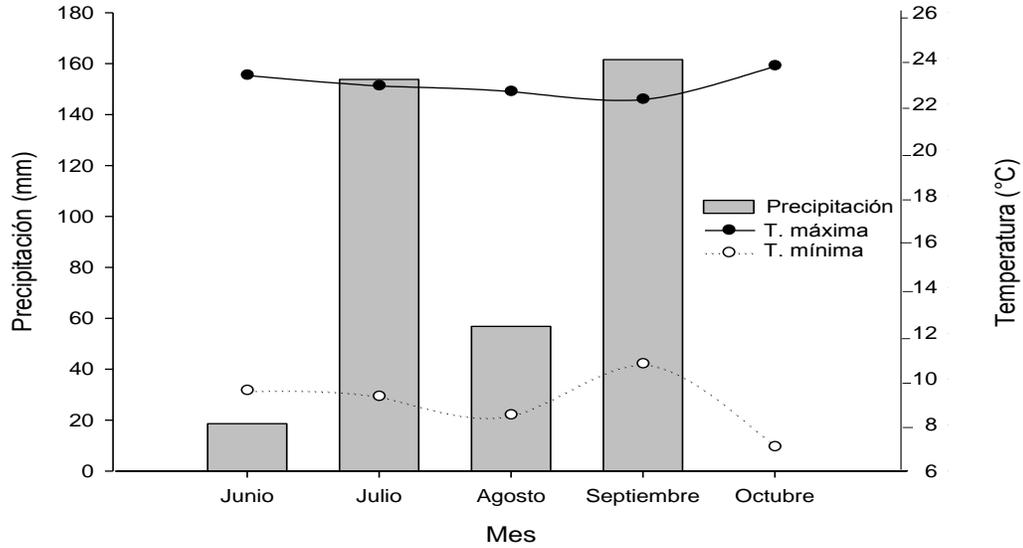


Figura 6-A. Precipitación mensual y promedio de temperatura mínima y máxima observadas en la estación agroclimática de Tolcayuca, Hidalgo, del INIFAP (2013).

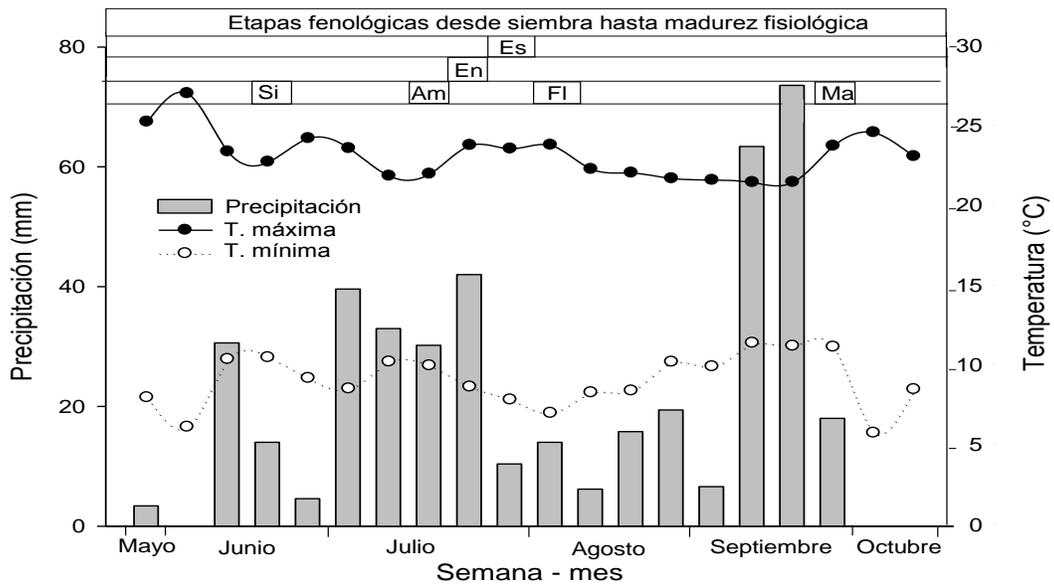
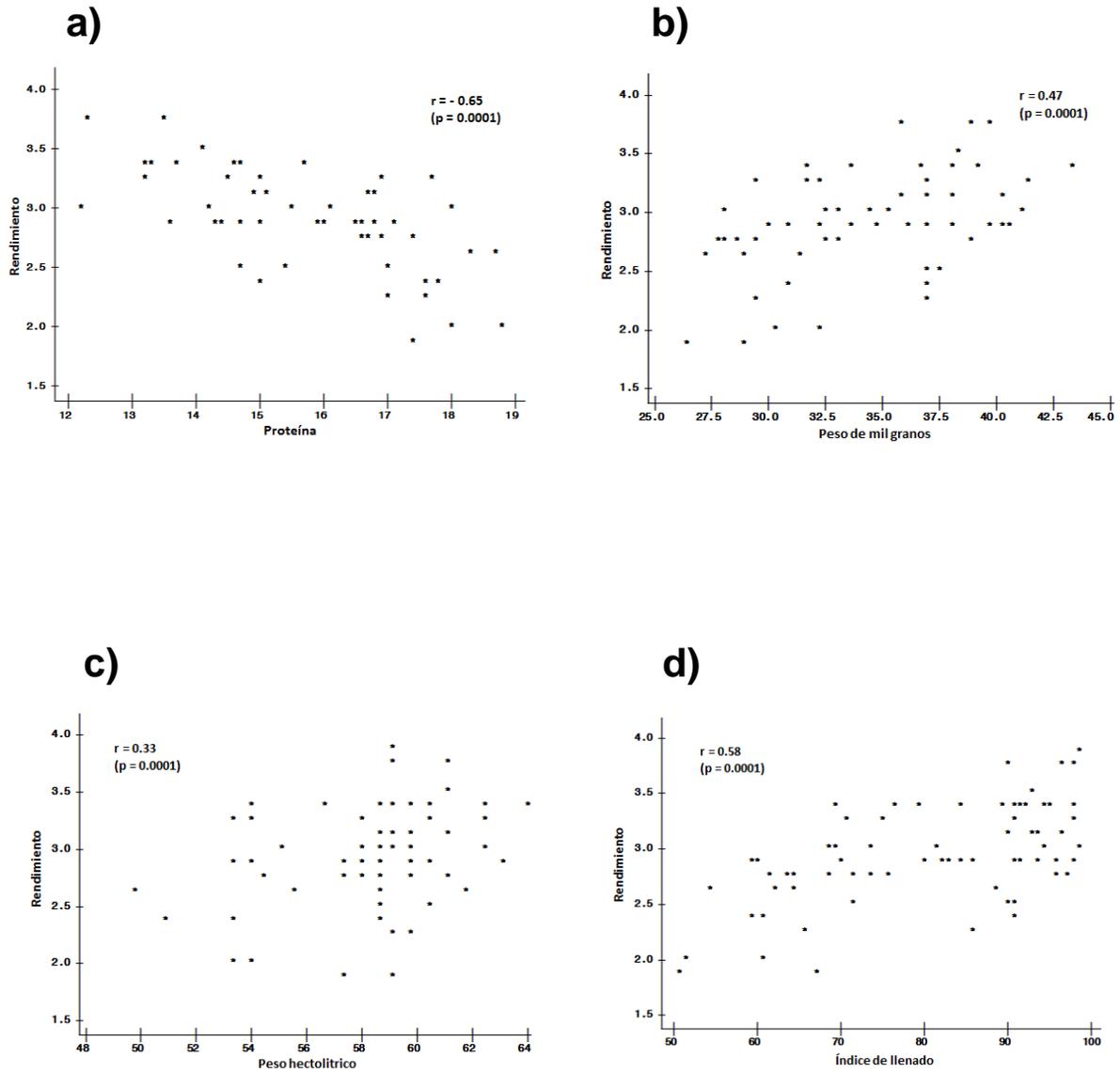
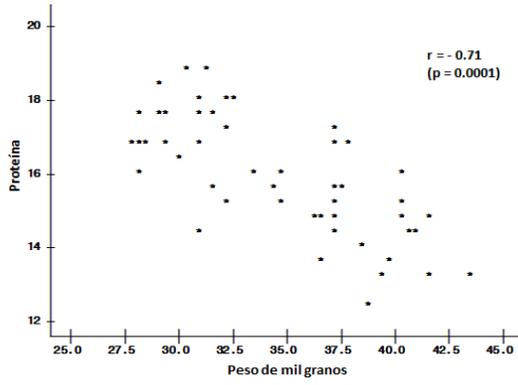


Figura 7-A. Precipitación semanal y promedio de temperatura mínima y máxima observadas en la estación agroclimática de Tolcayuca, Hidalgo, del INIFAP, (2013).

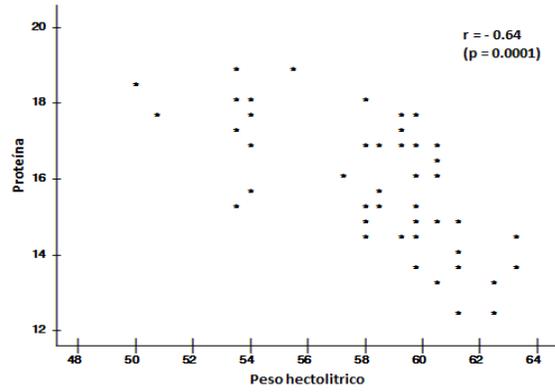
Figura 8-A. Correlación lineal simple entre variables de respuesta: Rendimiento de grano, porcentaje de proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico y porcentaje de índice de llenado en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en Villa de Tezontepec, Hidalgo, año 2012



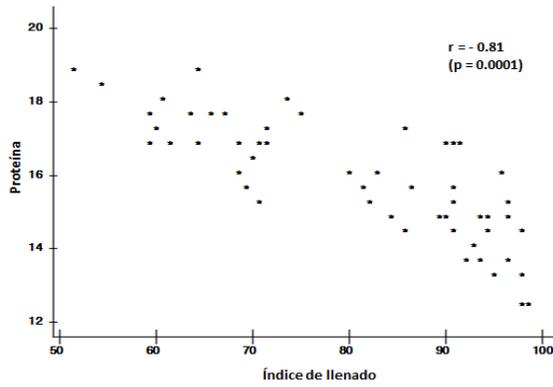
e)



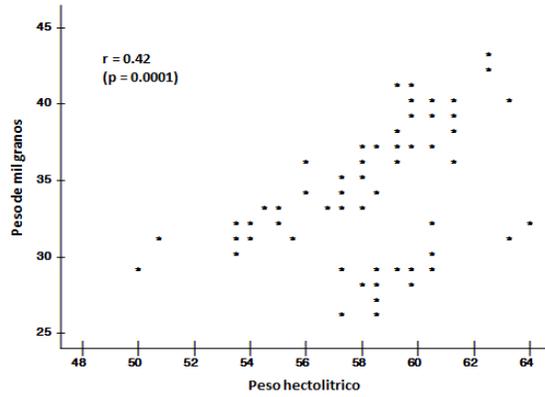
f)



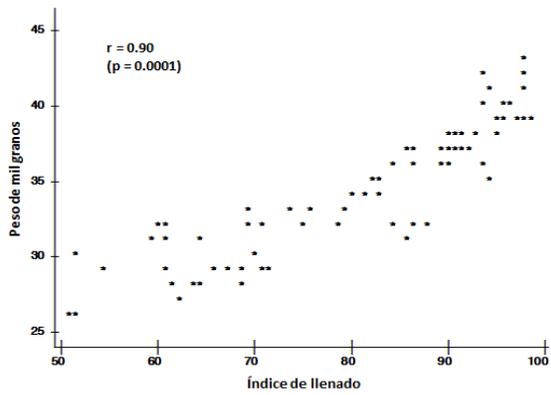
g)



h)



i)



j)

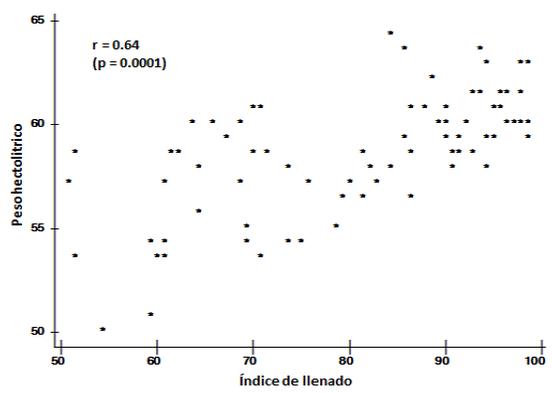


Figura 9-A. Correlación lineal simple entre variables de respuesta: Rendimiento de grano, porcentaje de proteína, peso de mil granos, peso hectolítrico y porcentaje de índice de llenado en cinco líneas experimentales de cebada de dos hileras, en Villa de Tezontepec, Hidalgo, año 2013

