

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y
RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**ADAPTABILIDAD DE 21 LINEAS AVANZADAS PRECOCES
DE TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum* L.)
EN LA ESTACION EXPERIMENTAL DE KALLUTACA.**

POR:

WILSON YAPU MAMANI

EL ALTO – BOLIVIA

2015

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

ADAPTABILIDAD DE 21 LINEAS AVANZADAS PRECOCES
DE TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum* L.)
EN LA ESTACION EXPERIMENTAL DE KALLUTACA.

*Tesis de Grado como requisito
parcial para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo*

WILSON YAPU MAMANI

Asesor:

Ing. Agr. Ph.D., Félix Marza Mamani

Ing. Agr. Ph.D., Humberto Nelson Sainz Mendoza

Tribunal Revisor:

Ing. Agr. Ph.D., Francisco Mamani Pati

Ing. Agr. Ramiro Raúl Ochoa Torrez

Ing. Agr. Wilfredo German Lizarro Flores

APROBADO

Director de Carrera:

Ing. Agr. Laoreano Coronel Quispe

EL ALTO - BOLIVIA

2015

DEDICATORIA:

*Dedicado con mucho cariño a mis padres
Rupertino Yapu Vargas y María Mamani Apaza.
A mis herman@s Jovana, Freddy, Yeny,
Gustavo, Yhonny, Jhanneth y Ana.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, una magnífica familia y hermanos, por ofrecerme tantas oportunidades y permitirme llegar a mi primer objetivo.

A mis padres que nunca escatimaron esfuerzos en diferentes etapas de mi formación, por darme siempre su comprensión, amor y aliento.

A mis hermanos que compartieron y acompañaron a encarar los obstáculos en el camino hacia los objetivos, que no me abandonaron en los momentos de flaqueza y me dieron siempre su apoyo.

Al Dr. Félix Marza Mamani, Coordinador del Programa Nacional de Trigo (PN-Trigo) del INIAF, por sus valiosos consejos, sugerencias, asesoramiento y sobre todo por la invitación para emprender la presente tesis.

Al Dr. Humberto Sainz Mendoza, por su valioso apoyo incondicional, ayuda otorgada antes, durante y después de la realización de la tesis.

Al tribunal examinador Dr. Francisco Mamani, Ing. Ramiro Ochoa y al Ing. Wilfredo Lizarro por sus valiosos consejos, sugerencias, correcciones y seguimiento en la elaboración del presente trabajo.

A la Carrera Ingeniería Agronómica, plantel administrativo, docentes y compañeros por brindar y compartir sus conocimientos, por estar siempre disponibles a apoyar, por su comprensión y trato fraterno.

A la Universidad Pública de El Alto, por haberme acogido, por haber sido parte de mi preformación y por haberme brindado oportunidades de competitividad académica y de vida universitaria.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS	ii
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipótesis	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Generalidades del cultivo de trigo.....	4
2.1.1. Origen geográfico del trigo	4
2.1.2. Evolución genética del trigo harinero del pan.....	4
2.1.3. Distribución geográfica de trigo en el globo.....	6
2.1.4. Clasificación taxonómica de trigo	7
2.2. Ciclo vegetativo y escala fenológica del trigo	8
2.3. Precocidad intrínseca del trigo.....	11
2.4. Adaptabilidad	12
2.5. Limitantes del altiplano boliviano para el trigo	13
2.6. Plagas y enfermedades en zonas del altiplano	13

2.6.1.	Plagas	13
2.6.2.	Enfermedades	14
2.7.	Impacto global de Fitomejoramiento de trigo en Mega-Ambientes por CIMMYT .	14
2.7.1.	Adaptación amplia	14
2.7.2.	Metodología de definición de ambientes y regiones agro-ecológicas.....	15
2.7.3.	Evolución del concepto Mega-Ambiente.....	17
2.8.	ESWYT y SAWYT desarrollados y distribuidos por CIMMYT	18
2.9.	Expansión potencial de producción del trigo en el Cono Sur.....	20
2.10.	Calidad panadera de trigo harinero.....	21
2.10.1.	Proteína y Gluten del grano	21
2.10.2.	Dureza del grano	22
2.10.3.	El almidón	23
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1.	Localización	24
3.1.1.	Ubicación Geográfica	24
3.2.	Características Edafoclimáticas	24
3.3.	Materiales	24
3.3.1.	Material genético en estudio	24
3.3.2.	Material de gabinete	26
3.3.3.	Material de campo	26
3.3.4.	Materiales de Laboratorio.....	27
3.4.	Metodología	27
3.4.1.	Desarrollo del ensayo.....	27
3.4.2.	Diseño experimental.....	28
3.4.3.	Variables de respuesta.....	28
3.4.3.1.	Variables de adaptabilidad	28

3.4.3.1.1.	Número de macollos por planta	28
3.4.3.1.2.	Número de tallos por metro cuadrado	29
3.4.3.1.3.	Atura de planta	29
3.4.3.1.4.	Precocidad	29
3.4.3.1.5.	Reacción a acame	29
3.4.3.1.6.	Reacción a desgrane	29
3.4.3.1.7.	Tolerancia a sequía	30
3.4.3.1.8.	Tolerancia a Roya	30
3.4.3.2.	Variables de comportamiento fenológico	30
3.4.3.2.1.	Días a emergencia	30
3.4.3.2.2.	Días a espigado	30
3.4.3.2.3.	Días a floración	31
3.4.3.2.4.	Días a madurez fisiológica	31
3.4.3.3.	Variables componentes del rendimiento	31
3.4.3.3.1.	Número de plantas por metro cuadrado	31
3.4.3.3.2.	Número de espigas por metro cuadrado	31
3.4.3.3.3.	Número de granos por espiga	31
3.4.3.3.4.	Número de espiguillas por espiga	32
3.4.3.3.5.	Peso de mil granos	32
3.4.3.3.6.	Área foliar	32
3.4.3.3.7.	Rendimiento en grano	32
3.4.3.4.	Variables "Morfología de espiga"	32
3.4.3.4.1.	Longitud de espiga	32
3.4.3.4.2.	Longitud de arista	33
3.4.3.4.3.	Posición de espiga	33
3.4.3.4.4.	Densidad de espiga	33

3.4.3.5. Variables “calidad de grano”	33
3.4.3.5.1. Peso hectolítrico	33
3.4.3.5.2. Tipo de grano	33
3.4.3.5.3. Tamaño del grano	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. Factor ambiente	34
4.2. Estadística descriptiva del ensayo	36
4.3. Evaluación del comportamiento Fenológico	37
4.4. Comparación de variables de adaptabilidad	41
4.5. Comparaciones de variables “morfología de Espiga”	47
4.6. Comparación de variables componentes de rendimiento y rendimiento	50
4.7. Calidad del grano y otras características	55
4.8. Asociación de variables	58
4.9. Modelos predictivos del Rendimiento en grano de trigo	61
4.10. Análisis exploratorio	63
5. CONCLUSIONES	66
6. RECOMENDACIONES	68
7. BIBLIOGRAFÍA	69
8. ANEXOS	77

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Escala fenológica del trigo, descripción de estados morfológicos externos involucrados en procesos de crecimiento y desarrollo.	10
Cuadro 2.	Causas que favorecen el daño por roedores y aves, y datos adicionales requeridos para la identificación de causas.	14
Cuadro 3.	Nombre de cruza e historial de selección de líneas avanzadas precoces de trigo harinero, ensayadas en la Estación Experimental de Kallutaca en la gestión agrícola 2013-14.....	25
Cuadro 4.	Resumen descriptiva variables de adaptabilidad, Comportamiento Fenológico, Componentes de rendimiento, morfología de espiga y calidad de grano para 15 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.	36
Cuadro 5.	Análisis de varianza para variables de comportamiento fenológico: Días a emergencia (DE), Días a espigado (ESP), Días a floración (DF) y Días a madurez fisiológica (DM), para 21 líneas precoces de trigo harinero, en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.....	38
Cuadro 6.	Análisis de varianza para variables de adaptabilidad: Número de macollos por planta (NM), altura planta (AP) y número de tallos por metro cuadrado (NTM) de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.....	41
Cuadro 7.	Análisis de varianza para variables de morfología de espiga: Longitud de espiga (LE); longitud de arista (LA). En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.	47
Cuadro 8.	Análisis de varianza para variables componentes de rendimiento: Número de planta por metro cuadrado (NPM); Número de espiguillas por espiga (NEE); Área foliar (AF); Peso de mil granos. En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.	50
Cuadro 9.	Análisis de varianza para variables componentes cuantitativos del rendimiento y rendimiento en grano: Número espigas por metro cuadrado (NEM);	

Número de granos por espiga (NGE); Rendimiento en grano (RDTO). En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.	53
Cuadro 10. Análisis de varianza para peso hectolitrico (PH), en la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero. Determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.	56
Cuadro 11. Análisis de varianza para modelos predictivos del rendimiento obtenidos por regresión lineal empleando el método de pasos sucesivos, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.	62
Cuadro 12. Modelo predictivo del rendimiento en grano obtenidos por regresión lineal múltiple empleando el método de pasos sucesivos, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. La evolución y relación genómica entre cultivo de trigos harineros y duros, y hierbas silvestres diploides relacionados (Modificado de Snape y Pánková, 2006).	6
Figura 2. Cariograma del trigo harinero <i>Triticum aestivum</i> L. (FAO, 2006).....	7
Figura 3. Distribución geográfica de Mega-Ambientes en el Cono Sur.....	18
Figura 4. Secuencia cronológica de implementación de Pruebas de rendimiento (ESWYT y SAWYT) de líneas de trigo especializado para Mega-Ambientes (Trethowan, 2006).....	20
Figura 5. Potencial de expansión de la producción del trigo, en corto tiempo en el Cono Sur (Buck, 2009).	21
Figura 6. La estructura histológica del grano de trigo: Muestra componentes bioactivos relacionados con la fracción de fibra de trigo, presentes en harina integral pero ausentes dentro la harina refinada "blanca" (Adaptado de Barron <i>et al.</i> , 2007).	23
Figura 7. Datos mensuales de precipitación acumulada (mm), temperatura máxima promedio (°C) y temperatura mínima promedio (°C), en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca, gestión agrícola 2013-14. Elaborado en base a datos diarios de la Estación Agrometeorológica Automática de la Estación Experimental de Kallutaca y SENAMHI (2014).	34
Figura 8. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables de comportamiento fenológico: Días a la espiga, Días a anthesis completa y días a madurez fisiológica, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....	39
Figura 9. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables de adaptabilidad: Número de tallos por metro cuadrado, número de macollos y altura planta. En la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....	42
Figura 10. Frecuencias porcentuales para variable precocidad, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....	44

- Figura 11.** Frecuencias porcentuales de variables cualitativas ordinales de adaptabilidad: Tolerancia a sequía, reacción a desgrane, reacción acame y roya. En la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....45
- Figura 12.** Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables de morfología de espiga: Longitud de espiga y longitud de arista, en la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero. Determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.....48
- Figura 13.** Análisis porcentual para variables de la morfología de espiga: Posición de espiga y densidad de espiga, en la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero. Determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.49
- Figura 14.** Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables componentes cuantitativos del rendimiento: Número de planta por metro cuadrado, Número de espiguillas por espiga, Área foliar y Peso de mil granos. En la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....51
- Figura 15.** Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables componentes cuantitativos del rendimiento y rendimiento en grano: Número espigas por metro cuadrado, Número de granos por espiga, Rendimiento en grano. En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.54
- Figura 16.** Análisis porcentual del variable tamaño de grano, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, determinado en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....57
- Figura 17.** Análisis porcentual para variable tipo de grano, en la adaptabilidad 21 de líneas avanzadas precoces de trigo harinero. Determinado en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....57
- Figura 18.** Matriz de dispersión y coeficiente de correlación lineal Pearson de variables cuantitativas, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....58

- Figura 19.** Matriz de dispersión y correlaciones lineal no paramétrica de Spearman para variables cualitativas, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....60
- Figura 20.** Importancia relativa de los componentes principales y pesos de las variables originales por componente, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....63
- Figura 21.** Análisis de componentes principales: BIPLLOT de interacción de variables y líneas, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.....64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Croquis del experimento.....	78
Anexo 2.	Producción de trigo en Bolivia.	79
Anexo 3.	Mapa de distribución de Mega-Ambientes de trigo en Bolivia definido por CIMMYT.	80
Anexo 4.	Mega-Ambientes definidos por CIMMYT, para mejoramiento y producción del trigo en el mundo.	81
Anexo 5.	Mínimo tiempo térmico requerido en las fases de desarrollo	82
Anexo 6.	Cambios de las temperaturas base y óptima de acuerdo a las fases de desarrollo.....	82
Anexo 7.	Temperatura y Fotosíntesis de la hoja.....	83
Anexo 8.	Diagrama esquemático de algunos de los cambios más relevantes en la morfología externa del cultivo a lo largo de su ciclo de desarrollo (Slafer <i>et al.</i> , 2003). .	83

RESUMEN

El trigo se cultiva en casi todos los climas del mundo, desde el nivel del mar hasta los 4000 metros de altitud, presenta una amplia adaptabilidad conferida por su material genético contenida en 42 cromosomas y sometida a mejoramiento genético se la cultiva desde el Ecuador hasta los 67° N en Escandinavia y hasta los 45° S en Argentina, Chile y Nueva Zelanda. Bajo este antecedente y con el desafío de aunar fuerzas para llenar el vacío tecnológico en el rubro en nuestro país Bolivia se instaló un ensayo en el Altiplano Norte de La Paz específicamente en la Estación Experimental de Kallutaca con el objetivo de determinar la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, con material genético proveniente de CIMMYT, testeado para precocidad en ensayos de multilocalidad por el PN-Trigo de INIAF como resultante para esta investigación se empleó 10 líneas SAWYT y 10 líneas ESWYT; además de la variedad comercial Tepoca, el ensayo se condujo bajo el diseño de bloques completos al azar. Los resultados de la investigación mostraron un ciclo de cultivo bastante prolongado, en especial la fase comprendida entre la floración y la madurez fisiológica, esto producto de bajas temperaturas y precipitaciones altas en las etapas finales de llenado de grano. Comparado los componentes de rendimiento y rendimiento se identificaron las siguientes líneas productivas: 9-20S, 13-32E, 22-19S y 10-20S con rendimientos de 2176, 2072, 1935 y 1904,8 Kg*ha⁻¹, respectivamente. En tanto las líneas con características destacables de morfología de espiga y calidad de grano fueron las siguientes: 15-32E, 29-32E, 43-33E 27-32E. También se identificaron líneas muy tardías: Tepoca, 1-33E, 9-20S y 25-19S, tardías: 43-33E, 27-32E, 10-20S, 36-19S, 4-19S y 42-19S, intermedias: 45-33E, 44-33E, 41-33E, 13-32E, 24-32E, 3-20S, 4-20S, 6-20S y 22-19S, precoz 29-32E y muy precoz 15-32E.

Palabras Claves: *Triticum aestivum* L., Adaptabilidad, Precocidad, SAWYT, ESWYT

ABSTRACT

Wheat is grown in almost all climates of the world, from the sea level to the 4000 meters height above sea level, present an ample adaptability conferred by its genetic material contained in chromosomes 42 and submitted to genetic improvement is cultivated from Ecuador to 67 N in Scandinavia and to 45 S in Argentina, Chile and New Zealand. Under this antecedent and with the challenge of joining forces to fill the technological void in the area at our country Bolivia was installed an essay in the North High Plateau of La Paz specifically at the Kallutaca Experiment Station with the objective of determining the adaptability of 21 lines Early advanced bread wheat with genetic material of CIMMYT, selected for precociousness in essays of multi-environment by the PN-Wheat INIAF, as resultant for this research were used 10 lines SAWYT and 10 lines ESWYT; In addition to the commercial variety Tepoca, the essay was managed under the design of randomized complete block. The results of the research showed fairly long crop cycle, particularly the intermediate stage between flowering and physiological maturity, this product of low temperatures and high rainfall in the final stages of grain filling. Compared yield components and yield the following production lines were identified: 9-20S, 13-32E, 22-19S and 10-20S with yields of 2176, 2072, 1935 and 1904.8 kg*ha⁻¹, respectively. In both lines with remarkable characteristics of spike morphology and grain quality these were: 15-32E, 29-32E, 43-33E 27-32E. Also were identified very tardy lines: Tepoca, 1-33E, 9-20S and 25-19S, tardy: 43-33E, 27-32E, 10-20S, 36-19S, 4-19S and 42-19S, intermediate: 45-33E, 44-33E, 41-33E, 13-32E, 24-32E, 3-20S, 4-20S, 6-20S and 22-19S, precocious 29-32E and very precocious 15-32E.

Key Words: *Triticum aestivum* L., Adaptability, Precocity, SAWYT, ESWYT

1. INTRODUCCIÓN

El trigo junto al maíz y arroz constituye la base alimentaria de la dieta de la humanidad, desde este punto de vista el trigo cumple también un importantísimo rol como grano forrajero y forraje (materia verde y materia seca), además de grano para la obtención de diversas harinas, en tanto la especie *Triticum aestivum* en su generalidad su harina se emplea para la elaboración del pan. Esta especie se la cultiva en casi todos los climas del mundo, desde el nivel del mar hasta los 4000 metros de altitud, presentando amplia adaptabilidad conferida en parte por su material genético contenida en 42 cromosomas y un trabajo sostenido y continuo de mejoramiento genético desde su domesticación (Skovmand *et al.*1992), las variedades de trigo cultivadas de alto rendimiento sembradas actualmente (variedades avanzadas) y aquellas que han sido sustituidas (variedades obsoletas) por las avanzadas; se sabe que casi todas fueron sometidas al mejoramiento genético.

La generación constante de variedades y tecnología en la producción de trigo por países potencia y rezago de otros países ha permitido la dependencia de los segundos, en consecuencia en el mundo las demandas de alimento son crecientes. Las estadísticas muestran que para 2009 más del 18% del consumo mundial está basado en trigo, a la par los datos decenales de la nómina de naciones muestran en esta gestión como importadoras relevantes de harina de trigo, donde figura nuestro país suman hasta un 43% de las importaciones promedio de: Libia, Indonesia, Irak, Yemen, Hong-Kong, Brasil, Angola, Cuba, Bolivia y Corea del Norte (Miro y Bertolasi, 2009).

El crecimiento poblacional demanda mayor productividad en menor área y este desafío debe ser asumido, más en Latinoamérica donde la región andina no es autosuficiente, incluida Chile, Brasil, Centro América y México, que recurren al trigo de afuera para cubrir su demanda interna. Países como Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, que antes se autoabastecían en la actualidad compran entre el 85 y el 99% para cubrir el déficit de su consumo interno (Herbas, 2008).

En caso de nuestro país (Bolivia) las importaciones de grano de trigo y harina en el quinquenio 1996-2000 ascendieron hasta el 78.6% (Ormachea, 2009); esta situación no ha sufrido modificaciones significativas en la actualidad se asume que la producción

nacional cubre entre el 27 al 42% de la demanda, teniendo que importarse harina y grano de trigo en volúmenes significativos (INIAF, 2013).

La producción de trigo boliviana está centrada en dos áreas definidas: Zona tradicional que comprende zonas agrícolas en los departamentos de Cochabamba, Chuquisaca, Tarija, Potosí y parte de La Paz y Oruro, con rendimientos que varían de 0.5 a 1 t·ha⁻¹ y un promedio de 0.805 t·ha⁻¹, y Área oriental en el departamento de Santa Cruz, en donde el rendimiento varía de 0.4 a 2 t·ha⁻¹ con un promedio de 1.33 t·ha⁻¹ (MACA, 2004). Al respecto FAOSTAT citado por Zeballos *et al.* (2011) señala que los rendimientos durante los años 2008 al 2009 se incrementaron de 1.293 a 1.314 t·ha⁻¹, que continúan en niveles bajos comparados con los rendimientos de países como Chile con 4.081 t·ha⁻¹, Uruguay con 3.358 t·ha⁻¹, Brasil 2.040 t·ha⁻¹. Los rendimientos del trigo en Bolivia sólo se encerrarían por encima de los rendimientos de Venezuela 0.301 t·ha⁻¹ y Ecuador 0.862 t·ha⁻¹.

Por otro lado el altiplano boliviano no es zona tradicional del cultivo de trigo, sin embargo se han desarrollado programas de mejoramiento genético para la adaptabilidad en estas condiciones desfavorables, entre los más sobresalientes se podría mencionar el rol de PROTRIGO (1991-2001) en provincias de La Paz: Omasuyos, Camacho y Los Andes.

Entre los antecedentes más recientes numeramos los ensayos conducidos en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2009-2010 en la provincia altiplánica de Los Andes, entre ellos Moñocopa (2012) evaluó la adaptabilidad de 25 líneas de trigo destacando un rendimiento promedio general de 2.8 t·ha⁻¹ a nivel experimental, por su parte Quispe (2012), evaluó la habilidad de adaptación y productividad de 146 líneas del vivero 41 IBWSN del CIMMYT identificando líneas de alto rendimiento superiores a 3.1 t·ha⁻¹, estas experiencias han mostrado que el trigo en estas condiciones presenta alto potencial de rendimiento y un ciclo vegetativo bastante prolongado con medias de 240 y 199 días, respectivamente.

A pesar de existir antecedentes alentadores en el Altiplano Norte de Bolivia el cultivar trigo sigue siendo un reto, puesto que la baja fertilidad de los suelos y comportamiento climático adverso condiciona el cultivo presentando: Ciclo vegetativo largo, bajo rendimiento, susceptibilidad a enfermedades y grano de baja calidad considerándose el cultivo de trigo como poco rentable, pero su presencia constituye una realidad que puede y debe ser mejorada en su producción y rendimiento.

1.1. Justificación

La presente investigación de adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca es parte de la red nacional de ensayos conducidos por el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) a través del Programa Nacional de Trigo (PN-Trigo) que busca promover el cultivo de trigo en el territorio boliviano, se estableció dentro de los objetivos del PN-Trigo de generar variedades con adaptabilidad amplia, alto rendimiento, calidad, resistencia a factores bióticos y abióticos, sin descuidar otros aspectos de manejo agronómico.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Determinar la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) a condiciones del altiplano en la Estación Experimental de Kallutaca.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento fenológico de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero.
- Comparar el comportamiento agronómico y componentes de rendimiento de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero.

1.3. Hipótesis

- No existen diferencias en el comportamiento fenológico, comportamiento agronómico y componentes de rendimiento de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Generalidades del cultivo de trigo

2.1.1. Origen geográfico del trigo

Las más antiguas evidencias arqueológicas del cultivo de trigo vienen de Siria, Jordania, Turquía, Israel e Irak; sin embargo, estudios más precisos con marcadores moleculares han mostrado que todas las formas cultivadas de trigo tienen su origen en las montañas del suroeste de Turquía, desde donde se asume se distribuyeron hacia el norte y el sur de Mesopotamia entre los valles de los ríos Tigris y Eufrates en el Medio Oriente alrededor del 10000 a.C (Sánchez, 2008). Estas aseveraciones concuerdan con Ruiz (1981), que había evidenciado la existencia de hallazgos de restos carbonizados de granos de trigo almidonero (*Triticum dicocoides*) y huellas de granos en barro cocido en Jarmo (Iraq septentrional), que datan del año 6700 a.C., además de indicar un fenómeno de mutación o una hibridación que ocurrió en el trigo silvestre, hace alrededor de 8 milenios, dando por resultado una planta tetraploide con semillas más grandes, la cual no podría haberse diseminado con el viento.

2.1.2. Evolución genética del trigo harinero del pan

A lo largo de la historia de la humanidad, durante los últimos milenios, el trigo empleado por los seres humanos ha ido multiplicando las copias de su material genético hasta el punto en que los granos que se usan hoy en día vienen de plantas hexaploides (con seis copias; los humanos sólo tenemos dos pero en el reino vegetal es un fenómeno muy extendido). A medida que el trigo ha evolucionado, hibridando con otras especies del mismo género o de otros, muchas de sus características morfológicas han cambiado para hacerse más aceptables para el consumo y más cómodas para su recolección, como la capacidad para que todas las espiguillas permanezcan en el tallo sin caer en la época de siega, gracias a la hibridación con una especie del género *Aegilops sp.*, también gramínea, que le confirió lo que los expertos denominaron factor Q (Grubial, 2011).

Actualmente, las especies diploides, son consideradas silvestres, y parece ser que las especies cultivadas provienen de una diploide en concreto: *T. monococcum*. Las especies tetraploides todavía siguen cultivándose y, por ejemplo, *T. durum*, que tiene una cantidad de proteínas muy importante en el endospermo del interior de los granos y es muy duro

(de ahí su nombre), se emplea en la producción de pastas y sémolas. Los hexaploides, como *T. aestivum* o *T. spelta*, candeal y espelta respectivamente, son los que se emplean principalmente como harina porque tienen mucho gluten en el endospermo, una glucoproteína unida al almidón de la semilla y formada por gliadina y glutenina, lo que permite que al fermentar la harina del pan tenga la consistencia esponjosa que tiene (Grubial, 2011).

Estudios genéticos apuntan que el germen de la domesticación de estas plantas se sitúa en la región de Diyarbakir, al sureste de Turquía. Desde aquí tuvo comienzo el cultivo de la “escanda menor”, una especie de trigo (*Triticum monococcum*) de genoma de tipo AA y un pariente cercano de *Triticum urartu*, ancestro de trigo harinero actual. Esta zona también se considera el germen del cultivo del trigo propiamente dicho, *T. turgidum* ssp. *dicoccoides* conocido hoy día como “almidonero silvestre” (Dubcovsky y Dvorak, 2007).

El genoma de *Triticum aestivum* está compuesto por 21 pares de cromosomas, que pueden ser clasificados como: AABBDD y clasificado en tres bloques A, B y D. El bloque D se corresponde con el juego de cromosomas DD; y es uno de los mejor conocidos. Este juego de cromosomas es parte del genoma del trigo y es el genoma completo de otra especie de planta, *Aegilops tauschii* (también llamada *Triticum tauschii* y *Aegilops squarrosa*) (Dvorak *et al.*, 1998; Han *et al.*, 2003; Özkan *et al.*, 2002). Se trata de una hierba que crece de forma salvaje a modo de maleza y que es oriunda de Oriente Medio y Próximo.

Por su parte, el bloque de cromosomas A y B conforman el juego de cromosomas AABB, el cual a su vez es prácticamente el genoma de otra especie de planta, *Triticum turgidum* (Peterse *et al.*, 2006), otra gramínea originaria de Oriente Medio y Próximo donde algunas de sus variedades todavía son cultivadas en estas áreas.

El *Triticum aestivum* es en realidad una especie formada por la fusión genética de *Aegilops tauschii* y *Triticum turgidum*, una especie de maleza y una especie de “trigo silvestre”, que al unirse originaron a su vez una especie completamente nueva de trigo (Cnidus, 2009).

Por su parte el genoma de *Triticum turgidum* se denomina como AABB, el trabajo de los científicos ha demostrado que nos encontramos ante dos genomas más. Por un lado tenemos al juego de cromosomas AA, que pertenece a una hierba silvestre cuyo nombre

científico es *Triticum urartu*, un pariente de los “trigos”, “almidoneros” y “escandas”, entre otras (Levy y Feldman, 2002; Nevo *et al.*, 2002).

En tanto que el grupo de cromosomas BB es el más controvertido, los últimos estudios moleculares parecen indicar que el juego de cromosomas BB es herencia de una especie concreta de este grupo de plantas, *Aegilops speltoides*, una hierba nativa del sureste de Europa y el oeste de Asia. (Fernández-Calvín y Orellana, 1990; Kilian *et al.*, 2007; Levy y Feldman, 2002).

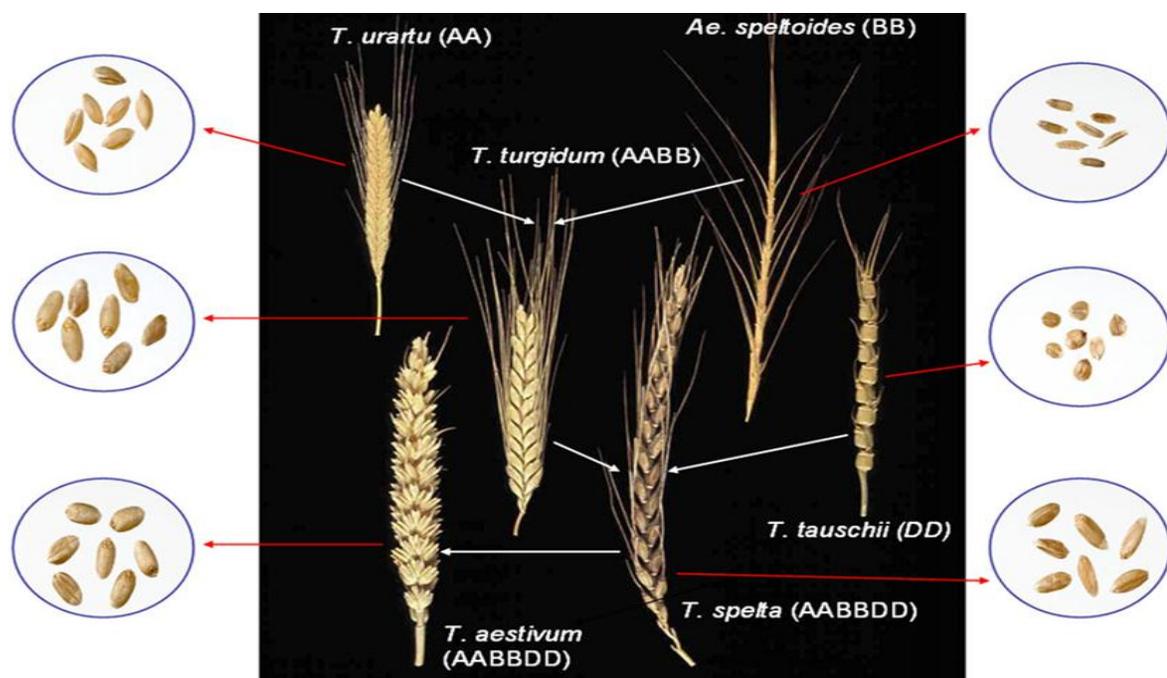


Figura 1. La evolución y relación genómica entre cultivo de trigos harineros y duros, y hierbas silvestres diploides relacionados (Modificado de Snape y Pánková, 2006).

2.1.3. Distribución geográfica de trigo en el globo

El trigo fue uno de los primeros cultivos comestibles domesticados ya hace 8 000 años, ha sido el alimento base de las civilizaciones principales de Europa, al Oeste de Asia y África del Norte. Hoy, el trigo abarca más área terrestre que ningún otro cultivo comercial y continúa siendo la fuente más importante de grano para comida de los humanos. Su producción conduce todos los cultivos, incluyendo arroz, maíz y papa, mostrando la más amplia distribución geográfica, ya que es cultivado desde el Ecuador hasta los 67° N en

Escandinavia y hasta los 45° S en Argentina, Chile y Nueva Zelanda (Trethowan *et al.*, 2005).

Aunque tiene más éxito entre las latitudes de 30° a 60° N y 27° a 40° S (Nuttonson, 1955), el trigo puede ser producido más allá de estos límites, desde dentro del Círculo Polar Ártico para las elevaciones más altas cerca del ecuador. La investigación desarrollada por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) durante los últimos dos decenios han demostrado que la producción de trigo en muchas áreas más calientes es tecnológicamente factible (Saunders y Hettel, 1994). Se la cultiva con rendimientos aceptables en altitudes comprendidas desde el nivel del mar hasta 3000 msnm y sin embargo, ha sido reportado incluso a 4570 msnm en el Tíbet (Percival, 1921).

2.1.4. Clasificación taxonómica de trigo

El trigo comprende alrededor de 30 tipos que tienen suficientes diferencias genéticas como para ser consideradas especies distintas o subespecies, el trigo harinero es un cereal del especie *aestivum*, género *Triticum* subfamilia *Pooideae*, familia *Poaceae*, orden *Cyperales*, clase *Liliopsida*, división Magnoliophyta, y es la especie de trigo más extensamente cultivada en el mundo. Es una planta alohexaploide, debido a su conformación de 42 cromosomas repartidos en 6 juegos desde tres diferentes especies (*Triticum urartu*, *Aegilops speltoides* y *T. tauschii*) de 7 cromosomas cada uno, un tamaño de 16.000 millones de pares de bases. La planta posee tres genomas idénticos, los cuales poseen información genética repetida, lo cual le confiere a la especie en sí gran adaptabilidad a los diferentes ambientes (Wikipedia, 2013; Cnidus, 2009; Mac Key, 2005 citado por Sánchez 2008).

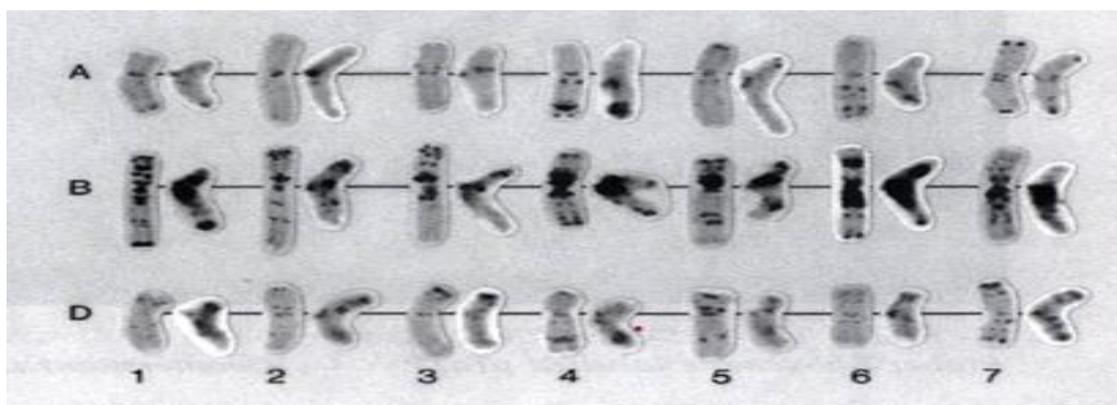


Figura 2. Cariograma del trigo harinero *Triticum aestivum* L. (FAO, 2006).

2.2. Ciclo vegetativo y escala fenológica del trigo

De acuerdo a Martin (2003) el ciclo del cultivo de trigo se puede dividir en tres grandes fases:

Fase vegetativa: En el período Siembra – Emergencia además de la diferenciación de nuevos primordios foliares, se produce el crecimiento de los 2 órganos encargados de la emergencia de la plántula: epicotile y coleóptile. Crecen hasta que el segundo alcanza la superficie del suelo y percibe la luz.

Desde la aparición de la 1ª hoja a través del coleóptile, las restantes aparecen a intervalos (filocrono) regulares de aproximadamente 100°C (TT, para una T⁰ base de 0°C). La longitud de la vaina aumenta con el número de hoja correspondiente, llevando cada hoja a una posición progresivamente superior.

El período de aparición de hojas (todo el ciclo pre-antesis, que va desde emergencia hasta hoja bandera), está caracterizado por 3 etapas diferentes.

1ª Etapa o Pre-macollaje: dura entre la emergencia y la aparición de la 4ª hoja desplegada; cada hoja emerge de un “falso tallo” formado por las vainas de las hojas ya aparecidas.

2ª Etapa o Macollaje: se caracteriza por la aparición de macollos o vástagos desde el interior de las vainas de las hojas, existiendo un alto grado de sincronía entre la aparición de las hojas y de los macollos. La producción de macollos se prolonga por un tiempo largo, dependiendo de la disponibilidad de recursos y la densidad del cultivo. Con la aparición de la 4ª hoja aparece el primer macollo y con la aparición de la 5ª hoja, el segundo macollo y así sucesivamente.

Si la disponibilidad de recursos fuera ilimitada, el número de macollos crecería indefinidamente. Sin embargo el Macollaje dura entre 30 y 40 días y su final coincide con el inicio de la encañazón (elongación de tallos), porque este proceso consume recursos que ahora se vuelven limitantes para la formación de nuevos macollos. Durante esta etapa, muchos macollos (los últimos formados), mueren por no poder completar su desarrollo, produciendo una caída continua en el número total de macollos del cultivo en función del tiempo.

3ª Etapa o Encañazón: se caracteriza por la elongación de los entrenudos de los tallos, dando origen al “tallo verdadero” de la planta. Esta etapa finaliza cuando los tallos completan su alargamiento, con el inicio de la Floración.

Fase reproductiva: El último entrenudo en alongarse en cada tallo es el “pedúnculo”, encargado de producir la emergencia de la espiga. El proceso de encañazón modifica el porte de la planta, tornándola erecta. El despliegue de la lámina de la hoja bandera coincide con el estado de vaina engrosada (donde la espiga está encerrada en la vaina de la hoja bandera) y con la formación de los granos de polen.

En este estadio, la planta es muy sensible a estrés hídrico, heladas y altas temperaturas.

En este momento también se incrementan las necesidades de N y P.

La última parte de la Encañazón transcurre desde la aparición de la hoja bandera a la Floración, durante la cual se da la emergencia de la espiga (Espigazón). El final del período de Encañazón coincide con la definición del número de espigas del cultivo.

A los pocos días de la emergencia de la espiga se produce la autofecundación (cleistogamia) y luego aparecen las anteras (la Floración se identifica con la Antesis o emergencia de los estambres fuera de las espiguillas después de la fecundación) y comienza la formación de las cubiertas del grano. El período Espigazón – Antesis es crítico para la ocurrencia de una helada y es generalmente en función de ello que se definen las fechas de siembra del cultivo.

Fase de llenado de grano: Entre la Antesis y la Madurez del cultivo, se produce la etapa de llenado de Grano. También suele decirse que esta etapa ocurre entre la Floración completa y la Madurez fisiológica del cultivo. Durante esta fase se acelera progresivamente la senescencia foliar. La duración del período Llenado de Grano depende del genotipo de la planta y una buena disponibilidad hídrica. En Madurez fisiológica los granos alcanzan su mayor tamaño y el cultivo ya no tiene más hojas verdes. Hay poca evidencia de que la duración del período Llenado de Grano (medido en TT), varíe entre macollos y fechas de siembra. Este período es más o menos constante para un amplio rango de condiciones, exceptuando estrés hídrico. Aquí hay una importante absorción de N y P por parte del cultivo.

La fase de Llenado Efectivo del Grano tiene diferentes estados: El estado grano lechoso es cuando al presionar el grano se observa un líquido blanquecino pero las envolturas están formadas y el tamaño potencial del mismo, determinado.

El estado de grano pastoso es cuando este comienza a perder su tonalidad verdosa, se amarillea y adquiere consistencia pastosa o granulosa en su endospermo.

El estado de grano duro es cuando presionado el grano fuertemente con una uña, no se rompe pero se marca.

El estado de grano maduro es cuando presenta color amarillento o tostado y no se aplasta bajo la presión. En resumen, la etapa Llenado de Grano tiene dos grandes fases: Cuaje, donde se define el número de granos y se produce una activa división celular en el endospermo, caracterizada por un gran tenor acuoso en el grano, y fase de Llenado Efectivo, caracterizada por una disminución progresiva de la humedad del grano e incremento de la Materia Seca en el endospermo.

La duración de las distintas etapas fenológicas del cultivo, están reguladas por tres factores determinantes: Temperatura, Fotoperiodo (duración del día) y Vernalización (requerimiento de horas de frío). El conocimiento de las respuestas del cultivo a estas variables ambientales, permite caracterizar la adaptabilidad de los diferentes cultivares a las distintas zonas productivas (Miralles, 2004).

Ante la imposibilidad de acceder a datos precisos de los factores climático-fisiológicos antes mencionados, es importante poder contar con una metodología práctica que permita a través de la observación visual de ciertas estructuras morfológicas de la planta, identificar el estadio fenológico por el que transcurre el cultivo. Cada uno de ellos, en el caso del trigo, puede ser identificado mediante el empleo de distintas escalas, permitiendo tener una referencia precisa de cada una de las etapas del cultivo (Slafer *et al.*, 2003).

La escala de Zadoks (1974), es la más utilizada para describir estados morfológicos externos del cultivo (véase cuadro 1); estos involucran procesos de crecimiento y desarrollo. Esta escala divide el ciclo del cultivo en etapas principales y etapas secundarias.

Cuadro 1. Escala fenológica del trigo, descripción de estados morfológicos externos involucrados en procesos de crecimiento y desarrollo.

Esc.	Estado vegetativo	Esc.	Estado vegetativo
0	Germinación	41	Vaina de la hoja bandera extendida
07	Emergencia del coleoptilo	45	Inflorescencia en mitad de la vaina de la hoja bandera
09	Hoja en el extremo del coleoptilo	47	Vaina de la hoja bandera abierta
1	Crecimiento de la planta	49	Primeras aristas visibles
11	1º hoja desarrollada	5	Emergencia de la inflorescencia
12	Dos hojas desarrolladas	51	Primeras espiguillas de la inflorescencia visibles
13	Tres hojas desarrolladas	55	Mitad de la inflorescencia emergida
14	Cuatro hojas desarrolladas	59	Emergencia completa de la inflorescencia
2	Macollaje	6	Antesis (centrípeta)
21	Un tallo principal y un macollo	61	Comienzo de antesis

23	Un tallo principal y tres macollos	65	Mitad de antesis
25	Un tallo principal y cinco macollos	69	Antesis completa
27	Un tallo principal y siete macollos	7	Grano lechoso
3	Elongación del tallo	75	Medio grano lechoso
31	1º nudo detectable	77	Grano lechoso avanzado
32	2º nudo detectable	8	Grano pastoso
33	3º nudo detectable	83	Comienzo de grano pastoso
37	Hoja bandera visible	87	Pastoso duro
39	Lígula de hoja bandera visible	9	Madurez
4	Preemergencia floral	91	Cariopse duro (difícil de dividir)
		92	Cariopse duro (no se marca con la uña)

Fuente: Zadoks, Chankg y Konzak (1974).

2.3. Precocidad intrínseca del trigo

Los trigos de ciclo largo o corto, no es indiferente para el buen éxito de la cosecha. Uno de los mecanismos más potentes de resistencia a la sequía es la precocidad de la variedad, que hace que ésta escape a la misma y a los calores del final del período de llenado del grano, aunque las variedades de ciclo más largo tienen un potencial productivo mayor y en el periodo de maduración, un adelanto, puede evitar daños de final de estación, además de permitir una recolección temprana. La condición de precocidad de un trigo no implica el que sea sensible al frío, pues esta cualidad aunque es constante para cada variedad, está influida por el fotoperiodo (INFOAGRO, 2013).

Aquino y Burgos (2012), señalan que la precocidad de una variedad en trigo vulgarmente se mide por el número de días entre la siembra y la maduración del cultivo, pudiéndose apreciar por el valor del índice heliotérmico. Debido a que las variedades más precoces son las que necesitan menos energía para llegar al espigado. Señalan también que el conocimiento aislado de la precocidad de una serie de variedades, en una localidad geográfica, no es suficiente para poder determinar sus exigencias bioclimáticas anaptigenas, ya que en otra situación geográfica el orden de precocidad podría ser diferente.

La precocidad intrínseca o *Earliness per se* (EPS), puede ser definida como el mínimo número de días a espigado de un cultivar una vez que se satisfacen los requerimientos de vernalización y fotoperiodo (van Beem *et al.*, 2005). Genéticamente la precocidad *per se* o

precocidad intrínseca están controladas por genes menores y parecen estar distribuidos entre diferentes grupos homólogos (genomas “A”, “B” y “D”) (Reynolds *et al.*, 2013), estos genes de precocidad per se han recibido menos atención que los de las respuestas al fotoperiodo y la vernalización. Sin embargo, existe evidencia de que se encuentran en varios cromosomas, incluyendo en los brazos largos del homólogo del grupo 2 (Scarth y Law, 1983; Hoogendoorn, 1985).

Los genes Eps se vinculan con diferencias en la floración del trigo una vez que los requerimientos de vernalización y fotoperiodo son satisfechos, estas diferencias son de un orden menor a las asociadas con vernalización y fotoperiodo, sin embargo, poseen un valor adaptativo relevante en el ajuste fino de la adaptación de un cultivar a un ambiente particular y una base genética compleja aun no completamente esclarecida (Lombardo, Nisi, y Helguera, 2013).

2.4. Adaptabilidad

Adaptación se define como el proceso por el cual individuos y especies cambian de forma o función de tal manera sobreviven mejor en ciertas condiciones ambientales, implica el desarrollo normal, suficiente producción de gametos y sin restricción de producción de grano, y un rendimiento aceptable, siendo esto una característica varietal, capacidad de aprovechar mejor el agua, la energía lumínica, las sustancias nutritivas y en general, las condiciones del medio ambiente, puede definirse también como el comportamiento de un genotipo o una población genotípica en un ambiente (Gómez, 2001 y Mamani, 2004).

Experimentos conducidos por Mamani (2004), han probado la naturaleza de la respuesta de diferentes especies de plantas a hábitats distintos, concluyéndose lo siguiente:

- a) Cada especie se encuentra en posición de fuerzas distintas para sobrevivir en diferentes regiones climáticas.
- b) La mayor parte de las especies, exhiben diferentes formas de desarrollo en distintos niveles de altitud.
- c) Las especies difieren en sus características inherentes a colonizar diferentes, lugares ecológicos.
- d) El genotipo es plástico, permitiendo una modificación fenotípica no heredable para desarrollarse en respuesta al medio.

2.5. Limitantes del altiplano boliviano para el trigo

Pedros y Cierco (2012), consideran que las condiciones y limitantes en la producción de trigo en el altiplano son por lo general los siguientes:

- La problemática más importante se da por las difíciles condiciones climáticas que el altiplano de Bolivia le impone al cultivo, por suelos pobres en materia orgánica, con déficit de agua en la última mitad del ciclo vegetativo y problemas de frío en el periodo de llenado del grano.
- Las variedades de trigo usadas actualmente son variedades adaptadas al suelo boliviano de ciclo largo. No se dispone de conocimiento y experiencias previas sobre variantes de cultivo de ciclo corto, y que se adapten bien a las condiciones bolivianas.
- Ausencia de una entidad de experimentación que pueda emitir recomendaciones de tipo de semilla y modelo productivo a ejecutar.

El mismo autor recomienda usar variedades de trigo de ciclo corto, adaptadas a las condiciones del Altiplano de Bolivia que parte del éxito de la mejora productiva, precisa disponer también de variedades testeadas en el altiplanos y que además sean de ciclo corto, que llegue rápidamente a la madurez y puedan ser cosechadas antes de la llegada de los primeros fríos. Esas variedades de ciclo corto, crecerían rápidamente después de la siembra en octubre y noviembre, aprovechando las lluvias de verano (diciembre a febrero) y realizarían el llenado del grano antes de las primeras heladas.

2.6. Plagas y enfermedades en zonas del altiplano

2.6.1. Plagas

El trigo en altura (>3000 msnm) tiene una amplia diversidad de plagas, una mayoría no tiene importancia económica, sin embargo en ocasiones se presenta el ataque de afidos o pulgones, los mismos que se combaten generalmente con la presencia de las lluvias (Ruiz, Cotrina y De Neef, 2005).

De acuerdo a Kosina, *et al.* (2013) los roedores y las aves pueden ser un problema grave durante el establecimiento del cultivo (plantas por área), madurez y el almacenamiento de los granos. Las causas que favorecen a estas plagas y su identificación se resumen en cuadro 2.

Cuadro 2. Causas que favorecen el daño por roedores y aves, y datos adicionales requeridos para la identificación de causas.

Causas que favorecen el daño por pájaros y roedores	Datos adicionales requeridos
1. Se sembró a muy poca profundidad, o no se afirmó el suelo sobre la semilla.	Desenterrar la semilla y medir la profundidad de siembra.
2. Acame, que permitió que los roedores alcanzaran las mazorcas.	Contar las plantas acamadas.
3. Se sembró el trigo fuera de temporada, o se sembró una variedad muy precoz que fue la única fuente de alimento para los pájaros y roedores en la zona.	Observar la madurez del cultivo y compararla con la de otro trigo en la zona. Ver si hay daños en los campos sembrados tardíamente.

Fuente: Kosina *et al.* (2013).

2.6.2. Enfermedades

Ruiz, Cotrina y De Neef (2005), señalan que las enfermedades que mayor daño causan al cultivo de trigo, en zonas altas son tres tipos diferentes de roya que atacan al cultivo de trigo:

- Roya morena de hoja: Aparece en los primeros estadios de la planta en las hojas basales (base), es de color marrón oscuro.
- Roya negra del tallo: Aparece generalmente entre la espigazón y maduración atacando al tallo y las hojas de color negro amarillento.
- Roya amarilla o de las glumas: ataca a tallo y hoja pero con mayor predominancia a las glumas y los granos, de color amarillo naranja y su aparición es antes de la espigazón y maduración, dando como consecuencia granos chupados.

2.7. Impacto global de Fitomejoramiento de trigo en Mega-Ambientes por CIMMYT

2.7.1. Adaptación amplia

CIMMYT constituye referente en la mejora del trigo, distribuye amplia diversidad de germoplasma que posee y desarrolló. CIMMYT nunca ha buscado ni ha propuesto un solo cultivar para todo el mundo. CIMMYT ha generado variabilidad para la resistencia a enfermedad de tipo durable, al llevar ciertos elementos de homogeneidad, como la insensibilidad del fotoperiodo y la estatura semienana. En sentido de que la uniformidad de ciertos rasgos por mérito propio no debería ser igualada con vulnerabilidad genética (Rajaram, Borlaug, van Ginkel. 2002).

Los cultivares modernos de trigo muestran a menudo una amplia adaptación geográfica, así como una amplia adaptación a un rango de condiciones medioambientales y de manejo. Esta amplitud en la adaptación ha sido lograda de diferentes maneras por diferentes programas de mejoramiento, pero la herramienta más importante para este logro ha sido la extensiva experimentación y evaluación en campo de líneas de mejoramiento en muchos ambientes durante el proceso de selección (Braun y Payne citados por Reynolds, 2013).

Comparado con el maíz y el arroz, el trigo posee una adaptación natural más amplia que puede atribuirse a la combinación de múltiples alelos para el fotoperiodo y genes sensibles al enfriamiento (o vernalización) que determinan la productividad agro-ecológica del cultivo, definiendo adaptación amplia como la habilidad de un cultivar para producir rendimientos altos en diferentes ambientes (Braun y Payne citados por Reynolds, 2013).

Tal germoplasma necesita diversidad crítica y esencial o latitudes hasta las montañas ecuatoriales. Los trigos de primavera desarrollados por el CIMMYT y sus organizaciones predecesoras, que hicieron impacto desde la Revolución Verde, fueron insensibles al fotoperiodo, un prerequisite para una amplia adaptación geográfica. Los sistemas de fitomejoramiento empleados para desarrollar este tipo de germoplasma consistieron en trasladar generaciones alternantes de trigo entre dos ambientes contrastantes, el sur y norte de México - al norte, en el Valle del Yaqui (Ciudad Obregón, Sonora, México) donde los días son cortos durante el “ciclo de invierno” y donde la foto-insensibilidad es necesaria para obtener una floración temprana y evitar estreses terminales por calor, y al sur, en Toluca (Estado de México, México), donde los días son más largos y las noches son más frescas. Esta alternancia de ambientes fue el pilar del éxito para los que conocemos hoy como los Trigos de la Revolución Verde, cuyo principal resultado fue un tipo de trigo completamente nuevo: semi-enano, de alto rendimiento, insensible al fotoperiodo y resistente a enfermedades (Trethowan *et al.*, 2007).

2.7.2. Metodología de definición de ambientes y regiones agro-ecológicas

De acuerdo a Wang, van Ginkel, Trethowan y Pfeiffer (2003), la piedra angular de la metodología de fitomejoramiento de CIMMYT es el uso de una piscina diversa de genes para cruzarse, fitomejoramiento dirigida a sectores específicos de los ambientes, viajan regularmente con dos objetivos, proliferando selección para el rendimiento debajo de las condiciones óptimas, y localización experimental para la identificación de germoplasma

superior con buena de enfermedad. El programa de Trigo de CIMMYT, a lo largo de su historia, ha definido ambiente de producción en blanco cuidadosamente, un requisito previo para cualquier empresa de fitomejoramiento exitosa. En los 1940s, esta caracterización estaba restringida para México. Pero como es bien conocido, un alcance global ha sido logrado. Con esta expansión, la necesidad, especialmente entre fitomejoradores, surgió definir ambientes separados del blanco en términos de los rasgos del cultivo requeridos. La descripción geográfica a solas se había vuelto claramente inadecuada. Tres consideraciones primordiales tuvieron que ser matizadas: (1) la diversificación profunda de sistemas de producción pidiendo asistencia; (2) la convicción alguna vez creciente de la necesidad para la estabilidad y adaptación amplia en función del rendimiento; y (3) la realización de mejoramiento en condiciones específicas especializó rasgos. Sobre el tiempo y empíricamente, un set de así llamadas zonas agro-ecológicas fue desarrollado, se basó en una mezcla de planta, enfermedad, edáficos y características climáticas. Por los 1970s pasados, las siguientes 15 zonas agro-ecológicas diferentes habían sido concebidas:

1. Subcontinente (India, Pakistán, Bangladesh y Nepal)
2. Este de Asia (China, Japón y Corea)
3. Oriente Medio (Turquía para Afganistán)
4. África Del Norte e Iberia
5. Valle de Nilo (Egipto y Sudán)
6. África Oriental (incluyendo Etiopía, Kenia, Tanzania y Madagascar)
7. África sureño
8. Norte de México
9. América Central
10. La región andina
11. El Cono Sureño de Sudamérica
12. Australasia
13. EEUU / Canadá
14. Europa sureña (Italia, Yugoslavia, Bulgaria, etcétera.)
15. Europa occidental (Inglaterra, Francia, Alemania, etcétera.)

El programa de mejoramiento de trigo de CIMMYT fue organizándose para servir las necesidades de germoplasma de 1-11 regiones agro-ecológicas. Sin embargo, con pocos esfuerzos de mejoramiento utilizaron el germoplasma de las 15 regiones en sus

programas de hibridación, incluyendo regiones 12-15 del mundo en adelante (Rajaram *et al.*, 1995).

2.7.3. Evolución del concepto Mega-Ambiente

En los 1980s los intentos para redefinir las regiones agro-ecológicas además incluyeron rasgos socio-económicos. Actualmente, el término de Mega-Ambiente (MAs) se usa para describir dominios globales. El MAs es definido como una área no necesariamente continuo, ocurriendo en más de un país frecuentemente y continente (Wang, van Ginkel, Trethowan y Pfeiffer, 2003).

En 1988, el Plan Estratégico de CIMMYT propuso que el término mega-ambiente (MAs) subdividiendo dominios globales de trigo. Sin embargo, CIMMYT con objetivos del programa ha estado continuamente desarrollando en los pasados 50 años, tratando de combinar rasgos agronómicos superiores con tolerancias esenciales y específicas y abióticas y bióticas para poner la dirección en 120 millones de hectáreas de condiciones que cultivan trigo muy diverso. Al momento el fitomejoramiento basada en MAs y el programa de fitomejoramiento de Trigo del Pan de CIMMYT ya estratégicamente y claramente estaba ocupándose de los asuntos implicados en la adaptación para tales ambientes variados como regiones de regadío, áreas de lluvia alta, suelos ácidos, zonas semiáridas, áreas tropicales y zonas del trigo otoñal. La delineación de MAs se basa en disponibilidad de sistema agua, del tipo de suelo, de régimen de temperaturas, de producción y asociados estreses bióticos y abióticos. Las preferencias de los consumidores para el grano, el industrial, la calidad y fin de uso son también considerados (Rajaram *et al.*, 1995).

Entonces se habían definido por el CIMMYT a 12 MAs: Seis MAs que enfocan la atención en áreas primaverales de producción de trigo, tres MAs enfocan la atención en áreas facultativas de trigo y tres MAs enfocan la atención en áreas del trigo otoñal (Rajaram *et al.*, 1995). Desarrollándose exitosas pruebas multi-ambientes de líneas selectas bajo el esquema de alternancia de ambientes cada año, que consiste en envió de varios cientos de nuevas líneas de trigo a cerca de 200 cooperadores en más de 50 países, quienes evalúan el material y comparten los resultados con la comunidad internacional del trigo. El rol de la Red Internacional del Mejoramiento de Trigo (IWIN, acrónimo en inglés International Wheat Improvement Network), en la cual participan básicamente cada uno de los mayores programas de trigo a nivel mundial y que se basa en el intercambio de

germoplasma e información entre CIMMYT y cooperadores ha permitido que el trigo desarrollado en México haya tenido un impacto global en el mejoramiento de este cultivo, el Centro Internacional para la Agricultura de Áreas Áridas (ICARDA) emplea un sistema similar (Reynolds, 2013).

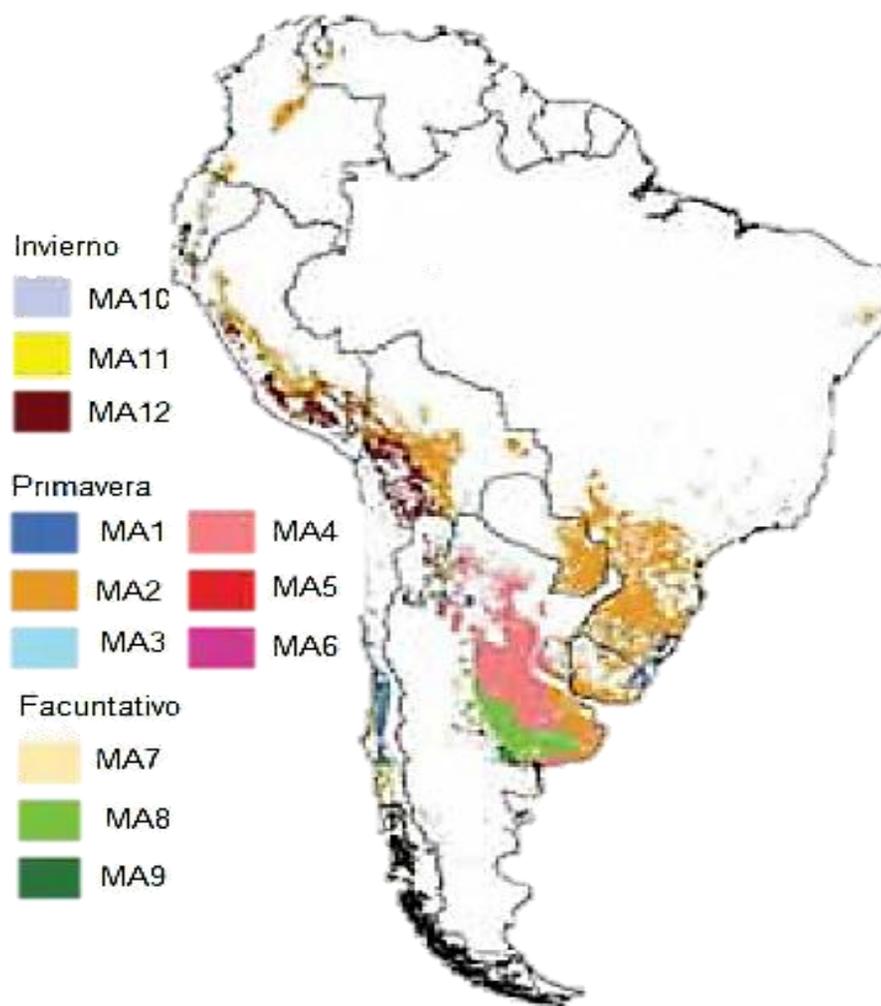


Figura 3. Distribución geográfica de Mega-Ambientes en el Cono Sur.

2.8. ESWYT y SAWYT desarrollados y distribuidos por CIMMYT

Las mejores entradas de IBWSN (Vivero internacional de Selección de Trigo del Pan) entran dentro la Prueba de Rendimiento de Trigo Primavera Elite (ESWYT) distribuido desde 1979 por CIMMYT, en tanto la Prueba de Rendimiento de Trigo Semi-Árido

(SAWYT) se distribuye desde el establecimiento del programa de mejoramiento en Mega-Ambientes. Tal distribución consiste en 50 entradas de 2 copias arregladas en un diseño alfa lattice. Cada ESWYT y SAWYT tiene 45 líneas nuevas de trigo harinero, cuatro líneas testigo o control establecido por CIMMYT (no necesariamente el mismo cada año) y un control local que probablemente es la mejor variedad comercial adaptada en sitios locales individuales. Para mantener la diversidad genética, las entradas representativas incluyen historiales genéticos diversos en la prueba.

Las parcelas experimentales individuales cultivados por los cooperadores usualmente varían en el tamaño y son adaptados a la siembra local, donde la prueba de rendimiento es la prácticas usado por los cooperadores. Una aleatorización diferente sirve para cada sitio. Las prácticas de la gerencia de prueba se basan en prácticas estándar de conservación del cultivo para sitios específicos. Un manual de manejo con instrucciones para gerencia de prueba y el registro de datos son provistos a cada colaborador junto con el embarque de la semilla. Los paquetes de la semilla están preparados y son despachados para los colaboradores de diferentes países por la Unidad de Distribución e Información de Semilla de CIMMYT. El programa de trigo CIMMYT distribuye varias pruebas de rendimiento anualmente dirigido a sectores específicos para ambientes específicos de crecimiento de trigo y condiciones administrativas en muchos países en vías de desarrollo y desarrollados a través de su red internacional colaborativa de mejora de trigo (Velu y Singh, 2013). El ESWYT se apuntó para ambientes de regadío con producción más alta; esta prueba está a menudo cultivada en otros ambientes también, materiales adaptados para otros ambientes son también identificados por los cooperadores. Hay más de 100 sitios en todo el mundo donde las pruebas de rendimiento de CIMMYT son anualmente establecidas; sin embargo, la recuperación de datos es aproximadamente del 50 %. Los sitios son descriptivos de diferentes mega ambientes basados en su clasificación de CIMMYT (Rajaram *et al.*, 1995).

El análisis histórico de ESWYT, testado en el pasado durante 15 años (1995-2009) en muchos países, mostró rendimientos medias de cinco entradas con más altos rendimientos reflejando ganancias genéticas anuales de 0.66% comparado con 'Attila' (variedad comercial mexicana) (Sharma *et al.*, 2012). Otro estudio usando datos internacionales de 30 años revela una ganancia de rendimiento de 0.7 % a través de los años en México (Lopes *et al.*, 2012). Resultados de este estudio demuestran continuas ganancias genéticas de rendimiento en el trigo primaveral de pan, son líneas

desarrolladas y distribuidas por CIMMYT para ambientes del globo con irrigación y precipitación pluvial.

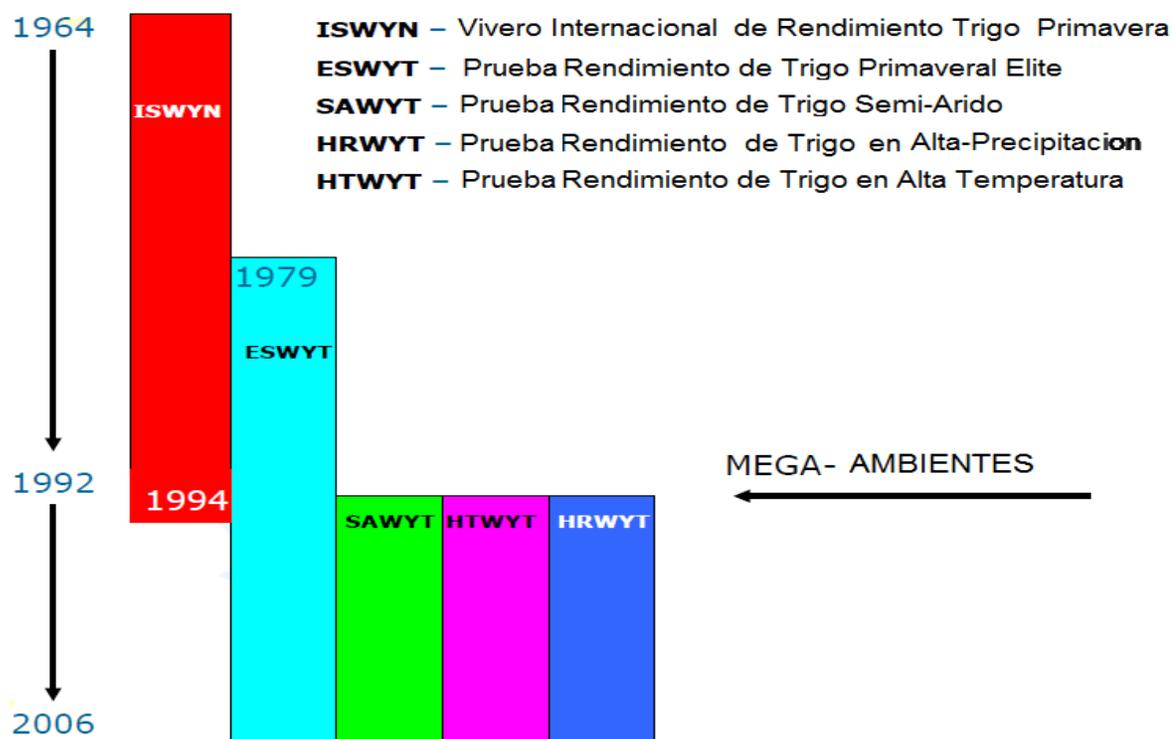


Figura 4. Secuencia cronológica de implementación de Pruebas de rendimiento (ESWYT y SAWYT) de líneas de trigo especializado para Mega-Ambientes (Trethowan, 2006).

2.9. Expansión potencial de producción del trigo en el Cono Sur

De acuerdo a Buck (2009), los prerequisites para la expansión de la producción de trigo en Cono Sur son:

- Políticas adecuadas a largo plazo
- Incremento y/o precio estable de trigo
- Las inversiones financieras en la infraestructura: Almacenamiento (adelante y fuera de granja); el riel y el transporte vía fluvial (Paraná, sistemas de ríos Amazonas) para reemplazar acarreo de camión; Sistemas de irrigación.

- Fuerte servicio de extensión agrícola para implementar tecnologías de ahorro de costo y apuntalar sostenible preservación agrícola y natural (suelo, agua) de recursos.
 - En gran medida, el cero o la labranza mínima son comunes en la práctica de la agricultura en todo Cono Sur.
- El suministro adecuado para evitar subida de costes de producción (esp. fertilizantes y el combustible).
- Adopción de variedades de alto rendimiento.

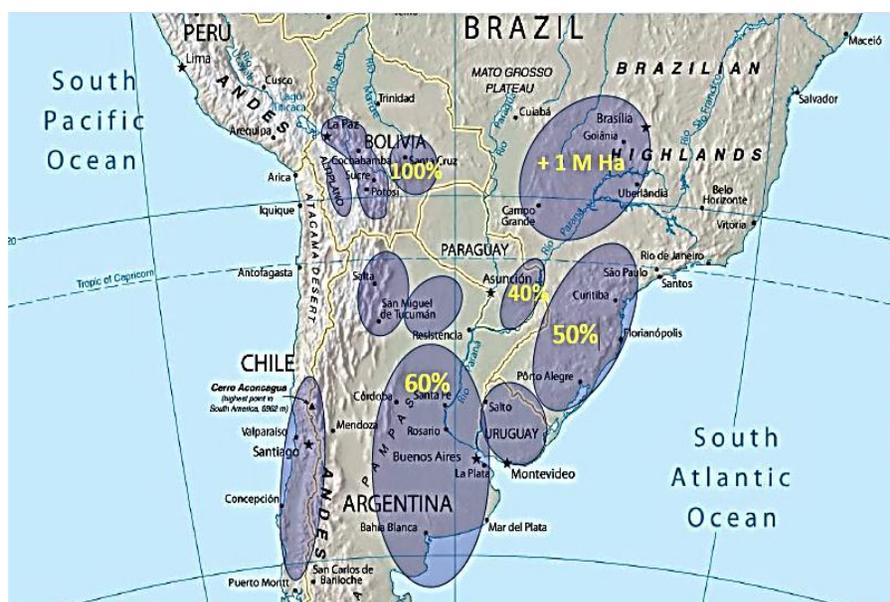


Figura 5. Potencial de expansión de la producción del trigo, en corto tiempo en el Cono Sur (Buck, 2009).

2.10. Calidad panadera de trigo harinero

2.10.1. Proteína y Gluten del grano

Las propiedades funcionales de trigo están en las llamadas proteínas almacenadas insolubles denominadas colectivamente gluten, las cuales inciden fuertemente en la variación que se puede detectar entre diferentes cultivares con respecto a su calidad panadera. Estas proteínas consisten en fracciones que contribuyen a la calidad panadera denominadas: Gluteninas de alto peso molecular (GAPM), gluteninas de bajo peso molecular (GBPM), y gliadinas (Jobet *et al.*, 2009).

El grano de trigo contiene de 8 y 17 por ciento de proteína dependiendo de la variedad y condiciones donde se la cultiva, de los cuales el 78 a 85% de proteína total del endospermo comprenden el gluten, entre las características que le confiere el gluten esta una propiedad única de harina de trigo de insolubilidad de algunas formas de proteína cuando entra en contacto con el agua, este comportamiento es influido por compuestos principalmente de proteínas polímeras y monoméricas conocidos como gluteninas y gliadinas, respectivamente (MacRitchie, 1994). Las gluteninas confieren elasticidad, mientras las gliadinas le confieren principalmente la extensibilidad y flujo viscoso al complejo del gluten. Así, el gluten es responsable de la mayoría de las propiedades viscoelásticas de trigo en masas de harina y es el factor principal dictando el uso de una variedad de trigo en pan y pasta. El gluten viscoelasticidad, para los propósitos un fin de uso, es comúnmente conocido como la fuerza de harina o de masa.

2.10.2. Dureza del grano

La dureza del grano está determinada por la manera en que los componentes están apiñados en las celdas del endospermo y se refiere a la resistencia que opone el grano para ser fracturado y para acortarse para moldar harina de trigo integral o moldar partículas del endospermo (la sémola o la harina refinada). La dureza del grano es un rasgo de calidad del grano asociado con las propiedades molientes de trigo y con la calidad de horneado de los productos resultantes de molienda (Miller *et al.*, 1982).

El mismo autor señala que los tiempos de molienda, requieren energía para la molienda y el nivel de daño de almidón producido en la harina molida está influenciado por la dureza del grano. Los trigos duros requieren tiempos más largas de molienda y más energía moliente, y producen una mayor cantidad de almidón dañado.

En la textura del grano, es decir el mayor o menor grado de dureza, se ha demostrado que las proteínas llamadas puroindolina a (pinA) y b (pinB), respectivamente, juegan un rol preponderante en la variación de este carácter (Gautier *et al.*, 1994, Giroux y Morris, 1997, 1998). La caracterización de germoplasma de Europa y Estados Unidos ha demostrado que la dureza de los trigos duros se debe a la ausencia de expresión de la pinA, como consecuencia de una delección en el gen que la codifica (Pina-D1) o a la presencia de una mutación puntual en la secuencia del gen que codifica para pinB (Pinb-D1). Hasta el momento se ha identificado una única variante alélica en Pina-D1 y seis variantes en Pinb-D1 (Giroux y Morris, 1997; Lillemo y Morris, 2000; Morris *et al.*, 2001).

En ningún caso se han observado genotipos que combinen alelo para dureza en ambos loci. El alelo activo en el locus *pina-D1* sumado a la ausencia de mutación en el locus *pinb-D1* son determinantes de textura blanda.

2.10.3. El almidón

El almidón es el componente principal del grano de trigo (80 a 85% de peso seco), sus funciones influyen poco en las propiedades funcionales de harinas de trigo usadas en la panificación, galleta y pastel. El almidón dañado (mecánicamente dañado durante la molienda harinera), sin embargo, expone sus componentes (la amilosa y la amilopectina) a interactuar con otros componentes de la fórmula de horneado, influenciado importantemente por la absorción de agua y los requisitos de tiempo de fermentación de masa de confección de pan, así como también el fermentado y propiedades texturales de miga de pan. Algo de almidón dañado gusta en harinas de confección de pan, pero es altamente indeseable en galleta y harinas para pastel, puede reducir considerablemente la capacidad de expansión de masas de la galleta (Miller y Hosney, 1997).

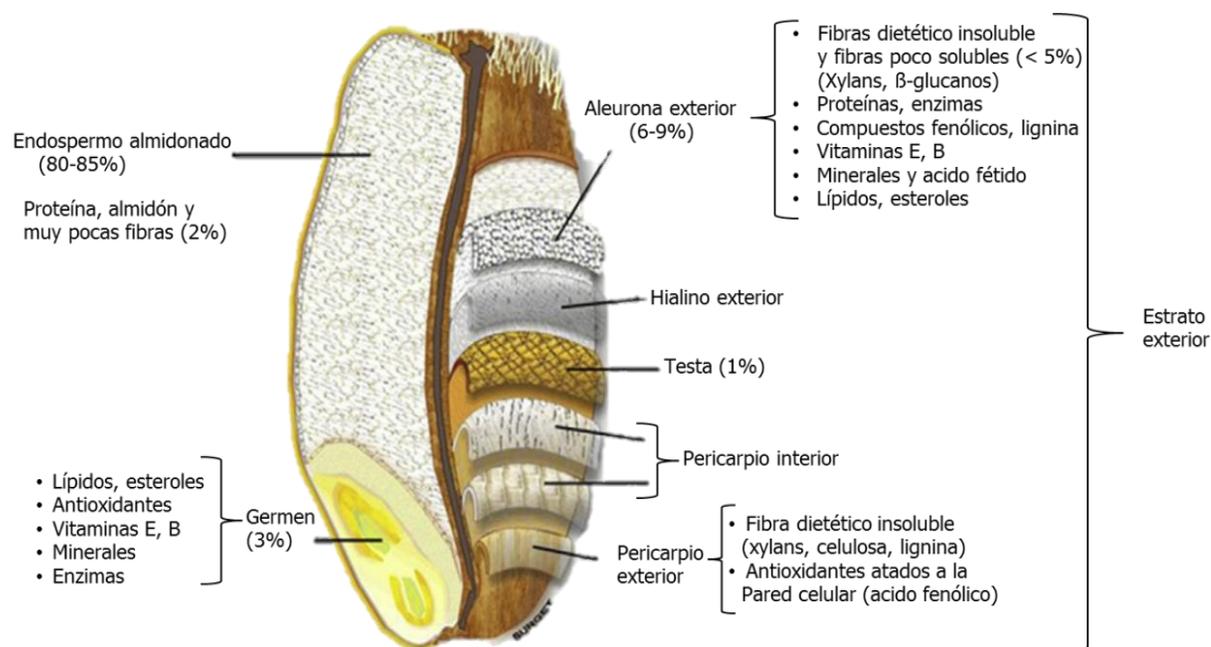


Figura 6. La estructura histológica del grano de trigo: Muestra componentes bioactivos relacionados con la fracción de fibra de trigo, presentes en harina integral pero ausentes dentro la harina refinada "blanca" (Adaptado de Barron *et al.*, 2007).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación Geográfica

La presente investigación de adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero se desarrolló en la gestión agrícola 2013-2014, en la región del Altiplano Norte de Bolivia en la Estación Experimental de Kallutaca dependiente del Área de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Recursos Naturales de la Universidad Pública de El Alto, ubicado en la localidad del mismo nombre del municipio de Laja perteneciente a la Provincia Los Andes del departamento de La Paz. Geográficamente se encuentra localizado con las siguientes coordenadas: 16°31'17" latitud sur y 68°18'29" longitud Oeste y una altitud de 3860 msnm (Google Earth, 2013).

3.2. Características Edafoclimáticas

La localidad de Kallutaca presenta una temperatura media anual de 8.4°C, una máxima media de 15.7°C y mínima media de -2.0°C (GAML, 2006), la humedad relativa ambiental promedio alcanza el 35% con una precipitación pluvial en rango de variación entre 600-650 mm-año⁻¹ y más del 50% de estas precipitaciones se distribuyen durante los meses de diciembre a febrero (SENAMHI, 2009).

El suelo presenta acumulación de restos vegetales y está conformada por arenas, arcillas y limos. Suelos superficiales de formación aluvial con problemas de drenaje y poco contenido de materia orgánica inferior a 4%, presenta también suelos con afloramientos de sales explicado por Krüger (1992) como fenómeno que se producen cuando la capa de agua freática rica en sales se encuentra a menor del metro y medio de profundidad, los rangos de conductividad eléctrica varían entre 0.8 a 8.76 dS*m⁻¹ y el pH es moderadamente básico próximos a 7.8 en escala logarítmica (Datos obtenidos en campo).

3.3. Materiales

3.3.1. Material genético en estudio

El material genético empleado fue de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero: Diez líneas seleccionadas de la Prueba de Rendimiento de Trigo Primavera Elite (32nd

ESWYT y 33rd ESWYT), diez líneas seleccionadas de la Prueba de Rendimiento de Trigo Semi-Árido (19th SAWYT y 20th SAWYT) y como testigo se adoptó el cultivar Tepoca, variedad comercial boliviana de mayor estabilidad que funge de control en los ensayos establecidos por el Programa Nacional de Trigo (PN-Trigo-INIAF).

Las líneas avanzadas precoces provienen del departamento de Cochabamba como resultado de una selección de los ensayos y/o pruebas mencionadas desde su introducción del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF).

Cuadro 3. Nombre de crusa e historial de selección de líneas avanzadas precoces de trigo harinero, ensayadas en la Estación Experimental de Kallutaca en la gestión agrícola 2013-14.

Id	Línea	Nombre de crusa	Historial de selección	Entrada
1	Tepoca	Tepoca T-89		T
2	45-33E	UP2338*2/VIVITSI/3/FRET2/TUKURU//FRET2/4/MISR 1	CMSS06B00848T-099TOPY-099ZTM-099NJ-099NJ-12WGY-0B	145
3	41-33E	NAC/TH.AC//3*PVN/3/MIRLO/BUC/4/2*PASTOR/5/KACHU/6/KACHU WBLL1*2/KURUKU/6/CNDO/R143//ENTE/ME	CMSS06B00734T-099TOPY-099ZTM-099Y-099M-25WGY-0B	141
4	43-33E	XI_2/3/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)/4/WEAVER/5/2*JANZ/7/WBLL1*2/KURUKU	CMSS06B00802T-099TOPY-099ZTM-099Y-099M-12WGY-0B	143
5	44-33E	UP2338*2/VIVITSI/3/FRET2/TUKURU//FRET2/4/MISR 1	CMSS06B00848T-099TOPY-099ZTM-099NJ-099NJ-7WGY-0B	144
6	1-33E	Tepoca T-89		101
7	24-32E	FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ*2/6/PVN//CAR422/ANA/5/BOW/CROW//BUC/PVN/3/YR/4/TRAP#1	CGSS05B00132T-099TOPY-099M-099NJ-6WGY-0B	124
8	27-32S	FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ*2/5/KIRITATI	CGSS05B00141T-099TOPY-099M-099NJ-099NJ-11WGY-0B	127
9	15-32E	FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ/5/PFAU/WEAVER//BRAMBLING	CMSS05B00480S-099Y-099M-099Y-099ZTM-22WGY-0B	115
10	13-32E	WBLL1//UP2338*2/VIVITSI	CMSS05B00054S-099Y-099M-099Y-099ZTM-8WGY-0B	113
11	29-32E	FRET2/KUKUNA//FRET2/3/YANAC/4/FRET2/KIRITATI	CGSS05B00155T-099TOPY-099M-099NJ-099NJ-6WGY-0B	129
12	9-20S	D67.2/PARANA 66.270//AE.SQUARROSA (320)/3/CUNNINGHAM/4/VORB	CMSA06M00431S-040ZTM-040ZTY-31ZTM-04Y-0B	309
13	4-20S	W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBLL1	PTSS02B00102T-0TOPY-0B-0Y-0B-11Y-0M-0SY	304
14	3-20S	VOROBAY	CMSS96Y02555S-040Y-020M-	303

			050SY-020SY-27M-0Y	
15	10-20S	H45/4/KRICHAUFF/FINSI/3/URES/PRL//BAV9 2	CMSA06M00501S-040ZTM- 040ZTY-11ZTM-0Y-0B	310
16	6-20S	BOW/VEE/5/ND/VG9144//KAL/BB/3/YACO/4/C HIL/6/CASKOR/3/CROC_1/AE.SQUARROSA (224)//OPATA/7/PASTOR//MILAN/KAUZ/3/BA V92	CMSA04M01201T-050Y- 040ZTP0M-040ZTY-040ZTM- 040SY-6ZTM-01Y-0B	306
17	25-19S	SOKOLL*2/ROLF07	CMSA05Y01226T-040M-040ZTP0Y- 040ZTM-040SY-22ZTM-04Y-0B	325
18	22-19S	SOKOLL*2/TROST	CMSA05Y01186T-040M-040ZTP0Y- 040ZTM-040SY-12ZTM-03Y-0B	322
19	4-19S	W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBLL1	PTSS02B00102T-0TOPY-0B-0Y- 0B-11Y-0M-0SY	304
20	36-19S	MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92/4/WBLL1*2/K UKUNA	CMSA04M00040S-040ZTB- 040ZTY-040ZTM-040SY-2ZTM-03Y- 0B	336
21	42-19S	SOKOLL*2/3/PASTOR//MUNIA/ALTAR 84	CMSA04M01131T-050Y- 040ZTP0M-040ZTY-040ZTM- 040SY-24ZTM-04Y-0B	342

Fuente: INIAF (2013).

3.3.2. Material de gabinete

En esta instancia fue imprescindible un ordenador para el vaciado de datos del libro de campo, dispositivos de almacenamiento de información y paquetes (software) estadísticos de: Sistema de Análisis Estadístico SAS Inc. Institute 9.1, Paquete Estadístico para Ciencias Sociales SPSS versión 18 y software comercial de estadística y grafica S-PLUS 2000 Profesional, para el análisis de datos, así también otros materiales de escritorio y de papelería.

3.3.3. Material de campo

Para el preparado del suelo se empleó un tractor agrícola con implementos: arado de discos y rastra. Asimismo, se utilizaron estacas de madera, cinta métrica, lienzas, rastrillo, picotas y letreros para identificación de entradas. Para proteger las unidades experimentales del ganado se construyó una cerca con callapos de eucalipto, clavos, alambre de púas, además para la cosecha se requirió hoz, bolsas de yute, marbetes, marcadores indelebles y para la identificación de enfermedades se empleó lupa 40x y cámara fotográfica.

3.3.4. Materiales de Laboratorio

Estos fueron materiales empleados en la manipulación de semillas, ya sea para determinar la densidad de semillas o el rendimiento de las entradas entre los más comunes: Sobres de papel, bobinas plásticas de 11*2 cm para contener la semilla por surco de cada entrada, embudo, balanza de precisión (0.001 g), tara y vernier.

3.4. Metodología

3.4.1. Desarrollo del ensayo

La investigación se llevó en ambientes de la Estación Experimental de Kallutaca a campo abierto, con las siguientes actividades:

1.- Preparado del suelo: Comprendió el roturado a 30 cm de profundidad, desterronado, limpieza, nivelado y replanteo de unidades experimentales. El abonamiento para la siembra fue de $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con compost (0.46-0.1-0.4) para favorecer la estructura del suelo, fertilidad y la retención de humedad. Cubriendo parte del requerimiento óptimo 87-56-40 del cultivo (Agamennoni, Vanzolini y Rivas, 2010).

2.- Siembra: La siembra se realizó el 7 de septiembre en la tarde, en surcos de 4 metros a choro continuo con distancia entre surcos de 25 cm, a una profundidad de 2-5 cm y una densidad de 10 gramos por surco equivalente a $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

3.- El manejo: Comprendió la suplementación del riego a razón de $2\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ por durante 24 días; en las fases iniciales del cultivo, más propiamente para la emergencia e inicio del macollaje. Se realizaron deshierbes manuales en macollaje, antesis y llenado del grano.

Se realizó también la aplicación de fertilización química en la etapa de espiga hinchada de acuerdo a las recomendaciones de Agamennoni, Vanzolini y Rivas (2010), empleando para ello: $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de FDA (18-46-0) y $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ UREA (46-0-0). Esta aplicación también es recomendada por el Programa Nacional de Trigo de INIAF, no solo se buscó cubrir los requerimientos del cultivo sino también disminuir la incidencia de enfermedades foliares ya que se ha verificado la acción de UREA en el suelo en desmedro de estos.

4.- La cosecha: Se realizó cuando la planta alcanzó la madurez fisiológica presentando follaje de color amarillo paja (grano difícil de marcar con la uña). Se adoptó la forma de

corte manual con hoz. El material cosechado se emparvo para completar el secado hasta el punto de desgrane, se realizó la trilla manualmente y venteado para la obtención del grano.

3.4.2. Diseño experimental

La investigación se condujo bajo el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), con un total de 21 tratamientos correspondientes a líneas avanzadas precoces de trigo harinero con repeticiones en 3 bloques.

Por lo que el modelo lineal aditivo fue el siguiente:

$$X_{ij} = \mu + \beta_j + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

X_{ij} = Variable de respuesta debido al efecto de la i -ésima línea avanzada precoz de trigo harinero en el j -ésimo bloque.

μ = Media general.

τ_i = Efecto de la i -ésima línea avanzada precoz de trigo harinero.

β_j = Efecto del j -ésimo bloque.

ϵ_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental.

3.4.3. Variables de respuesta

3.4.3.1. Variables de adaptabilidad

3.4.3.1.1. Número de macollos por planta

La aparición del primer macollo coincide con la aparición de la cuarta hoja, con la quinta hoja el segundo macollo, etc. Con estos antecedentes se realizó un conteo mecánico de macollos de al menos 10 plantas por línea, tomando en cuenta para tal efecto plantas con competencia completa, cuando se detectó el segundo nudo en la elongación del tallo fase 3.2 de la escala Zadoks, Chankg y Konzak (1974), ya que alcanzado esta fase la planta deja de emitir macollos fértiles.

3.4.3.1.2. Número de tallos por metro cuadrado

Se realizó el conteo de macollos de las plantas generados en un metro lineal del surco para cada línea y sus repeticiones en cada bloque, en la etapa de espigado, cuidando de tomar en cuenta surcos centrales dentro de cada línea. Este valor obtenido del conteo como número de tallos por metro lineal fue expresado en número de tallos por metro cuadrado dividiéndolo sobre la distancia entre surcos.

3.4.3.1.3. Atura de planta

La altura planta se determinó para cada línea y sus repeticiones midiendo el macollo principal de al menos diez plantas generalmente es el más vigoroso tomando en cuenta plantas con competencia completa, esta medida fue desde la base del tallo hasta el ápice de la espiga excluyendo barbas, cuando la planta ha alcanzado madurez fisiológica y manejando la unidad de medida centímetros.

3.4.3.1.4. Precocidad

La precocidad de las líneas se determinó de acuerdo al número de días en que alcanzo cada estado fenológico hasta la floración. Haciendo énfasis en fases fenológicas de días a espigado y floración, ya que los genes de precocidad intrínseca influyen solo hasta estas fases bajo los siguientes multiestados: 1= Muy Tardío; 2 = Tardío; 3 = Intermedio; 4 = Precoz; 5 = Muy Precoz.

3.4.3.1.5. Reacción a acame

La reacción a acame de las líneas se determinó simulando la fuerza que ejercen los vientos fuertes sobre la planta y la misma fuerza que vate los tallos, de acuerdo a su tiempo de estabilización y observaciones adicionales en campo se determinó la reacción acame en los siguientes multiestados: 1= Muy Susceptible; 2 = susceptible; 3 = moderadamente tolerante; 4 = tolerante; 5 = muy tolerante.

3.4.3.1.6. Reacción a desgrane

La reacción a desgrane en líneas se determinó de acuerdo al grado de derrame de semillas de las espigas por factores abióticos adversos, la presencia de intensas granizadas posibilito determinar la reacción a desgrane en los siguientes multiestados: 1=

Muy Susceptible; 2 = susceptible; 3 = moderadamente tolerante; 4 = tolerante; 5 = muy tolerante

3.4.3.1.7. Tolerancia a sequía

La tolerancia a sequia fue determinada durante las fases de hoja bandera extendida y la fase de llenado de grano, fases en los que no fueron asistidos con riego determinándose la tolerancia a sequia bajo los siguientes multiestados: 1= Muy Susceptible; 2 = susceptible; 3 = moderadamente tolerante; 4 = tolerante; 5 = muy tolerante.

3.4.3.1.8. Tolerancia a Roya

La tolerancia a roya de las diferentes líneas se determinó de acuerdo a la severidad de la enfermedad en hojas, tallos, vaina y espiga en las plantas bajo los siguientes multiestados: 1= Muy Susceptible (severidad mayor a 30%); 2 = susceptible (severidad entre 16 y 30%); 3 = moderadamente tolerante (severidad entre 6 a 15%); 4 = tolerante (severidad entre 1-5%); 5 = muy tolerante (Sin síntomas visibles).

3.4.3.2. Variables de comportamiento fenológico

3.4.3.2.1. Días a emergencia

Los días a emergencia fueron establecidos para cada línea de trigo, cuando el número de las plantas emergidas alcanzo el 50%, para ello se dispuso una cinta métrica sobre el surco central despreciando 50 centímetros de los extremos y a cada cinco centímetros se contabilizo plantas emergidas y el valor obtenido se dividió sobre el número de observaciones, hasta alcanzar el objetivo.

3.4.3.2.2. Días a espigado

Los días a espigado fueron establecidos para cada línea de trigo, cuando el 50% de las plantas alcanzaron la emergencia completa de la inflorescencia fase 5.9 de la escala Zadoks, Chankg y Konzak (1974), tomando en cuenta plantas del surco central y despreciando 50 centímetros de los extremos.

3.4.3.2.3. Días a floración

Los días a floración fueron establecidos para cada línea de trigo, cuando el 50% de las plantas alcanzaron la fase de antesis completa 6.9 de la escala Zadoks, Chankg y Konzak (1974), tomando en cuenta plantas del surco central y despreciando 50 centímetros de los extremos.

3.4.3.2.4. Días a madurez fisiológica

Los días a madurez fisiológica fueron establecidos para cada línea de trigo, cuando el 50% de las plantas alcanzaron la fase de cariopse duro (no se marca con la uña) 9.2 de la escala Zadoks, Chankg y Konzak (1974), anotándose en muchos casos la fase modal.

3.4.3.3. Variables componentes del rendimiento

3.4.3.3.1. Número de plantas por metro cuadrado

Se realizó el conteo de plantas en un metro lineal del surco para cada línea y sus repeticiones en cada bloque, cuidando de tomar en cuenta surcos centrales dentro de cada línea. Este valor obtenido del conteo como número de plantas por metro lineal fue expresado en número de plantas por metro cuadrado dividiéndolo sobre la distancia entre surcos.

3.4.3.3.2. Número de espigas por metro cuadrado

El número de espigas por metro cuadrado de cada línea fue determinado a partir del conteo de espigas viables de un metro lineal y dividido sobre el valor de la distancia entre surcos, tomando en cuenta el efecto borde y plantas de competencia completa. Preferentemente este dato es tomado antes de la cosecha de las líneas.

3.4.3.3.3. Número de granos por espiga

El número de granos por espiga para cada línea fue determinado, a partir del conteo de granos de al menos de diez espigas tomados al azar del surco central despreciando extremos del mismo.

3.4.3.3.4. Número de espiguillas por espiga

Para determinar el número de espiguillas por espiga de cada línea se muestreó al menos diez espigas del surco central evitando muestrear plantas sin competencia completa, se realizó el conteo de espiguillas, por lo general cada espiguillas produce tres granos.

3.4.3.3.5. Peso de mil granos

El peso de mil granos de las líneas se determinó en el laboratorio, se realizó el conteo de mil granos sin discriminar grano alguno y posteriormente se obtuvo el peso de las mismas en la balanza analítica de precisión (0.001 g). Consideraciones importantes son que el grano pesado debe tener una humedad inferior a 14%.

3.4.3.3.6. Área foliar

El área foliar de las líneas fue determinada de al menos 5 hojas banderas mediante el producto de las medidas ancho por largo por factor de corrección de 0.746, cuidando para las muestras el efecto borde. El dato fue tomado cuando la planta alcanza la fase de antesis completa.

3.4.3.3.7. Rendimiento en grano

El rendimiento en grano para las líneas se determinó una vez cosechado, trillado y liberado de toda impureza el grano, se obtuvo el peso de granos con una humedad inferior a 14% y para obtener el rendimiento en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ se empleó la siguiente ecuación adecuada de acuerdo a la densidad de siembra:

$$\text{Rendimiento } (\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}) = \frac{\text{peso(g) total de grano cosechado en unidad experimental}}{\text{N}^{\circ} \text{ de surcos} * \text{longitud de surco(m)} * \text{distancia entre surcos(m)}} * 10$$

3.4.3.4. Variables “Morfología de espiga”

3.4.3.4.1. Longitud de espiga

La longitud de espiga se determinó de al menos diez plantas con competencia completa muestreadas del surco central para cada línea de trigo, se midió la longitud de la espiga desde el punto de inserción hasta el ápice, excluyendo arista.

3.4.3.4.2. Longitud de arista

La longitud de arista fue determinada para las diferentes líneas de trigo, midiendo la estructura de la arista en la parte media de la espiga. Se tomaron para tal efecto diez muestras con competencias completa para cada línea en la fase de llenado de grano.

3.4.3.4.3. Posición de espiga

La posición de espiga en las líneas de trigo se determinó a simple observación en la madurez fisiológica y tomando en cuenta en muchos casos la posición modal bajo los siguientes estados: 1 = Recto; 5 = Curvado.

3.4.3.4.4. Densidad de espiga

La densidad de espiga en líneas de trigo se determinó con la observación a tras luz de las espigas. Pudiéndose observar de esta manera espacios entre espiguillas, este dato se tomó en la madurez fisiológica clasificándose bajo los siguientes multiestados: 1 = Muy Laxa; 2 = Laxa; 3 = moderadamente compacta; 4 = Compacta; 5 = Muy compacta.

3.4.3.5. Variables “calidad de grano”

3.4.3.5.1. Peso hectolítrico

El peso hectolitrico para las líneas se determinó a partir del pesaje de los granos de trigo (con humedad aproximada de 14%) en un volumen conocido lo que es equivalente a la densidad o peso volumétrico, el mismo valor se llevó a $\text{kg}\cdot\text{hl}^{-1}$.

3.4.3.5.2. Tipo de grano

El tipo de grano para las líneas de trigo se determinó de acuerdo al llenado de grano a simple observación clasificándose bajo los siguientes multiestados: 1 = muy chupado; 2 = chupado; 3 = casi lleno; 4 = lleno; 5 = Muy lleno.

3.4.3.5.3. Tamaño del grano

Esta variable fue determinado en el laboratorio para ello se empleó un vernier para medir en milímetros la longitud del grano, sin discriminación alguno de grano y luego se clasifico las líneas bajo el siguiente multiestado: 1 = grano pequeño (< 6 mm); 3 = grano mediano (6 – 7 mm); 5 = grano grande (> 7 mm).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Factor ambiente

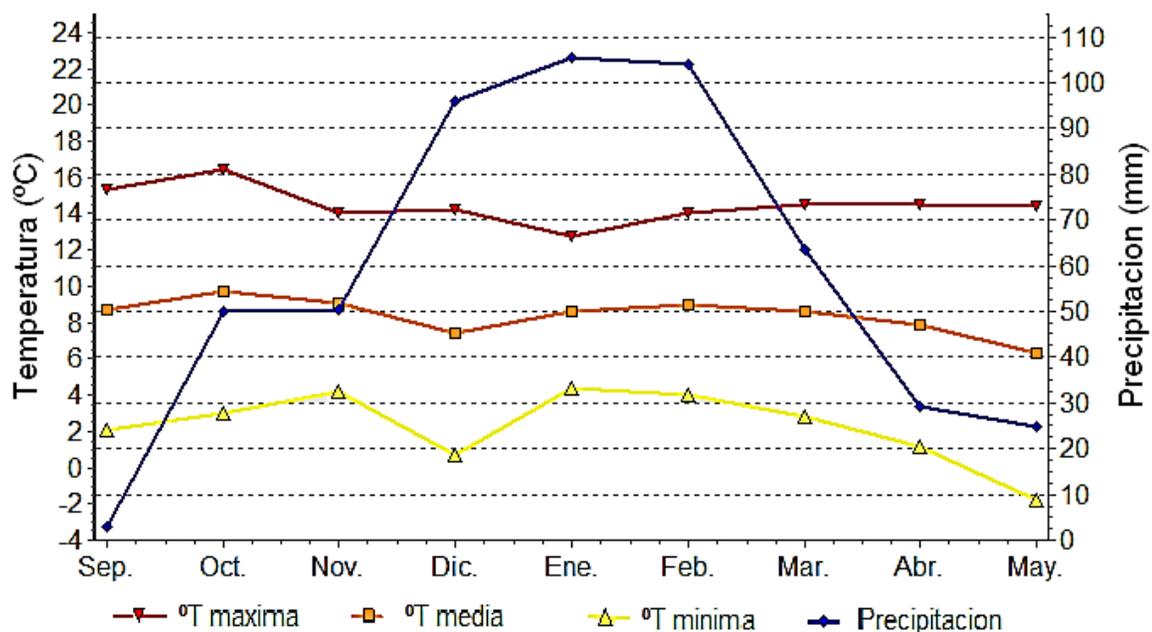


Figura 7. Datos mensuales de precipitación acumulada (mm), temperatura máxima promedio (°C), temperatura media (°C) y temperatura mínima promedio (°C), en la adaptabilidad de líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca, gestión agrícola 2013-14. Elaborado en base a datos diarios de la Estación Agrometeorológica Automática de la Estación Experimental de Kallutaca y SENAMHI (2014).

El comportamiento climático (figura 7) descrito durante la gestión agrícola 2013-2014 como factor determinante para la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, se describió en base a variables climáticas de precipitación y temperaturas, además de registros adicionales de eventos climáticos típicos del altiplano norte de heladas y granizadas. Factores climáticos determinantes en el crecimiento y desarrollo de trigo en el altiplano norte de Bolivia.

La precipitación acumulada total fue de 507 mm durante el ciclo del cultivo desde 7 de septiembre de 2013 a primera semana de mayo de 2014, dentro del rango óptimo señalado por AEMP (2012) para el desarrollo de trigo. Sin embargo, las precipitaciones desde los 0 dds a 24 dds del mes septiembre apenas alcanzaron el 2.8 mm siendo insuficiente esto para la germinación de semillas ya que para tal efecto se requieren una

humedad del suelo próximo al 80%, asimismo las precipitaciones en los meses de octubre y noviembre no alcanzaron los niveles requeridos y fueron resueltas a través de la suplementación de riego a capacidad de campo, tanto para la emergencia como para el macollamiento.

En tanto las precipitaciones altas registradas en los meses de diciembre, enero y febrero permitieron condiciones favorables para llenado de grano y asimismo las precipitaciones de diciembre y enero provocaron un alto porcentaje (20 a 40%) de macollamiento tardío en líneas precoces, la persistencia de las precipitaciones altas y días nublados durante el mes de marzo y parte de abril prolongo el ciclo vegetativo de las líneas, otros efectos negativos fueron el enmohecimiento de espigas y germinación de los granos en espiga de líneas precoces.

Las temperaturas bajo cero registradas en los primeros días de diciembre provocaron emergencia de espigas deformes, espigas atrapadas, espigas decoloradas o blancas, enrollamiento de hoja bandera, con mayor efecto negativo sobre las líneas muy tardías. Tres eventos de helada fueron registrados en marzo, como resultado se obtuvo granos chupados de los macollos tardíos. En la figura 7, se evidencia un descenso de temperatura mínima a partir de febrero aumentando las probabilidades de eventos de helada para los meses posteriores del ciclo del cultivo para las líneas tardías, al respecto AEMP (2012) menciona que las temperaturas óptimas se encuentran en rango de 10 a 25°C para temperatura media, 3°C para la temperatura mínima y de 30 a 33°C para la temperatura máxima.

Otro factor determinante fueron los eventos de granizadas registrados en tres oportunidades durante el ciclo del cultivo con efectos negativos significativos directos sobre el rendimiento en grano final. El primero evento de granizada se registró en la etapa de macolla (28 de octubre) el mismo provoco mortandad de macollos, deshoje y lesiones mecánicas considerables predisponiendo a las líneas de trigo a enfermedades foliares. Dos eventos de granizada de alta intensidad fueron registrados en la etapa final de llenado de grano (19 de febrero y 28 de marzo) para líneas precoces e intermedias y otra para líneas tardías y muy tardías, provocando el derrame de grano de las espigas y destrucción mecánica de otras espigas, las pérdidas en grano ascendieron en torno al 14%.

4.2. Estadística descriptiva del ensayo

Cuadro 4. Resumen descriptiva variables de adaptabilidad, Comportamiento Fenológico, Componentes de rendimiento, morfología de espiga y calidad de grano para 15 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

Variables	Media	SD	Curtosis	Sesgo	Mínimo	Máximo
Adaptabilidad						
Altura Planta (cm)	86.6	7.9	0.2	-0.4	68.0	104.1
Macollos-planta [†]	6.0	1.2	-0.2	-0.5	3.0	8.0
Número de Tallos (m ²)	726.6	142.5	0.3	-0.7	464.0	1012.0
Precocidad (1-5) [†]	2.6	1.1	0.3	-0.3	1.0	5.0
Reacción Acame (1-5) [¶]	4.5	0.6	-0.8	-0.3	3.0	5.0
Reacción Desgrane (1-5) [¶]	2.8	1.1	-0.4	-1.0	1.0	4.0
Roya (1-5) [¶]	3.3	0.7	0.3	0.2	2.0	5.0
Tolerancia a Sequía (1-5) [¶]	3.1	1.3	-0.5	-1.1	1.0	5.0
Comportamiento Fenológico						
Días a Emergencia	10.6	0.5	-0.6	-1.7	10.0	11.0
Días a Espigado	87.9	1.8	0.5	1.2	84.0	94.0
Días Floración	94.2	2.7	0.1	0.6	88.0	100.0
Días a Madurez	203.9	12.7	0.3	0.8	177.0	236.0
Componentes de Rendimiento						
Rendimiento en grano (Kg·ha ⁻¹)	1412.1	471.9	0.4	-0.2	549.5	2501.9
Número de Espigas (m ²)	614.8	117.8	0.4	-0.6	400.0	880.0
Número de Granos· Espiga ⁻¹	25.6	5.4	-0.2	0.2	10.0	38.0
Área Foliar (cm ²)	20.1	4.2	0.2	-1.1	13.5	27.6
Número de Plantas (m ²)	81.0	10.1	1.2	1.9	66.0	115.0
Número Espiguillas·Espiga ⁻¹	18.6	3.2	-0.3	-0.9	15.0	21.0
Peso de Mil Granos (g)	43.0	4.2	-0.2	-0.5	32.2	50.5
Morfología de Espiga						
Longitud de Espiga (cm)	8.6	0.7	0.5	-0.1	7.3	10.5
Longitud de Arista (cm)	5.9	0.7	-0.1	-0.1	4.3	7.8
Densidad de Espiga (1-5) [¶]	3.5	0.8	0.1	-0.3	2.0	5.0
Posición de Espiga (1-5) [§]	2.1	1.0	0.9	1.2	1.0	5.0
Calidad grano y otras						
Peso Hectolitrico (kg·hl ⁻¹)	77.0	3.5	0.2	-0.7	70.3	84.5
Tipo de Grano (1-5) [£]	3.6	0.7	0.6	-0.6	3.0	5.0
Tamaño de Grano (1-5) [‡]	3.9	0.8	0.4	-1.4	3.0	5.0

¶Muy Susceptible=1; Muy tolerante=5

† Muy Tardío=1; Muy Precoz=5

‡ Grano pequeño =1 (< 6 mm); grano mediano=3 (6 – 7 mm); grano grande=5 (> 7 mm)

¶ Muy laxa=1; Muy compacta=5

§ Recto=1; Curvado = 5

£ Muy chupado=1; Muy lleno=5

Una alta variabilidad en comportamiento se ve reflejado en el cuadro 4, para la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, asimismo los datos

cuantitativos a ser analizados cumplen con parámetros de normalidad, de acuerdo a los valores de sesgo y curtosis próximos a cero. Conocida la función de distribución es posible proseguir con el análisis de estadística paramétrica.

Los variables cualitativas ordinales en estudio reflejados en el cuadro 4; muestran también cierta tendencia hacia el estado intermedio 3, ya que los promedios en estas variables en su gran mayoría no superan la media de 4. Sin embargo las variables ordinales densidad de espiga, tipo de grano, tamaño de grano y reacción acame con valores promedios entre 3.5 a 4.5 reflejan características positivas importantes de las diferentes líneas avanzadas precoces a considerar.

El rendimiento medio en grano del ensayo alcanzó $1.4\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una amplitud de variación de 0.5 a $2.5\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ entre unidades experimentales de las líneas y sus diferentes réplicas en bloque. Entre los variables componentes de rendimiento en el ensayo se evidencia un promedio alto de 614.8 espigas por metro cuadrado con variaciones igualmente importante de 400 a 880 espigas, un factor favorable desde un punto de vista cuantitativo y por otro lado la variable número de plantas por metro cuadrado en el ensayo alcanzo un promedio de 81.03 y su amplitud de variación fue de 66 a 115 plantas.

Una interpretación preliminar de estas varianzas importantes para las diferentes variables parecen indicar que estamos frente capacidades distintas de adaptabilidad de las líneas y/o simplemente estas variaciones podrían deberse a la variación entre replicas, el mismo será analizado más adelante.

4.3. Evaluación del comportamiento Fenológico

Es evidente que la principal herramienta para la adaptabilidad y rendimiento del trigo reside en el conocimiento de las duraciones de las diferentes etapas vegetativas, reproductivas y de llenado de grano que están asociados a requerimientos ambientales. El ciclo de vida del cultivo como producto de la duración en tiempo de cada fase y el mismo a la vez producto de las complejas interacciones entre el genotipo (factores internos) y el ambiente (factores externos) es lo que se conoce como la fenología del cultivo.

Las investigaciones actualmente en este campo se han profundizado ampliamente con el empleo de herramientas moleculares, biotecnológicas, fisiología vegetal y otras.

Sin embargo muchas de estas técnicas aún no están disponibles y otras resultan complejas, por lo que la presente se limita a variables fenológicas fáciles de medirse en campo.

Cuadro 5. Análisis de varianza para variables de comportamiento fenológico: Días a emergencia (DE), Días a espigado (ESP), Días a floración (DF) y Días a madurez fisiológica (DM), para 21 líneas precoces de trigo harinero, en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

F.V.	GL	CUADRADOS MEDIOS							
		DE	p > F	ESP	p > F	DF	p > F	DM	p > F
Bloque	2	1.16**	0.003	20.57**	<.0001	1.44 ns	0.433	3.47619ns	0.672
Línea	20	0.26 ns	0.134	5.25**	0.0003	15.28**	0.004	105**	<.0001
Error	40	0.18		1.49		3.51		8.68	
R ²		0.52		0.71		0.69		0.86	
%C.V.		3.94		1.39		1.99		1.94	

** : Altamente significativo.

* : Significativo

ns: No significativo.

%CV: Coeficiente de variación

R²: Coeficiente de determinación.

De acuerdo al Cuadro 5, del análisis de varianza para variables de comportamiento fenológico se verifica diferencias altamente significativas entre líneas avanzadas precoces de trigo harinero para variables: Días a espigado, días a floración y días a madurez, no así para días a emergencia. Lo que implica en contexto general un comportamiento estadísticamente diferenciado de las líneas avanzadas precoces de trigo harinero, para variables días a espigado ($p=0.0003$), días a floración ($p=0.004$) y días a madurez fisiológica ($p<.0001$) y además de ello la variabilidad dentro de líneas se muestra bastante baja.

En la figura 8, del análisis comparativo de medias de rango múltiple de Duncan a nivel de significancia de 5%, se identificó los diferentes agrupamientos o grupos de líneas para variables fenológicas.

La variable días a espigado o días a emergencia completa de espiga dividió en cuatro grupos las líneas estudiadas, en el último grupo (D) sobresalió la línea 15-32E con media de 85 días a espigado, otro grupo (C) lo constituyeron las líneas 29-33E y 45-33E con 86 días a espigado. En tanto el primer grupo (A) sobresalen las líneas 25-19S, 1-33E y Tepoca (testigo) que alcanzaron esta fase tardíamente en 90 días después de la siembra (dds desde ahora).

El comportamiento de las líneas para la variable días a antesis completa fue similar al comportamiento mostrado por las líneas para la variable días a emergencia completa de espiga, sin embargo las líneas fueron divididas en cinco grupos distintos, el primer grupo (A) se redujo a cuatro líneas 9-20S, 1-33E, 25-19S y Tepoca, confirmando un comportamiento tardío ya que completaron esta fase superando los 97 dds.

Las diferencias observadas en la figura 8, para días a espigado y días a antesis completa entre las líneas avanzadas precoces de trigo se pueden atribuir a la constitución genética distinta de las líneas para la respuesta al fotoperiodo, vernalización y temperatura. Sin embargo el fotoperiodo base requerido por el trigo es de 10 a 16 horas por día por lo que

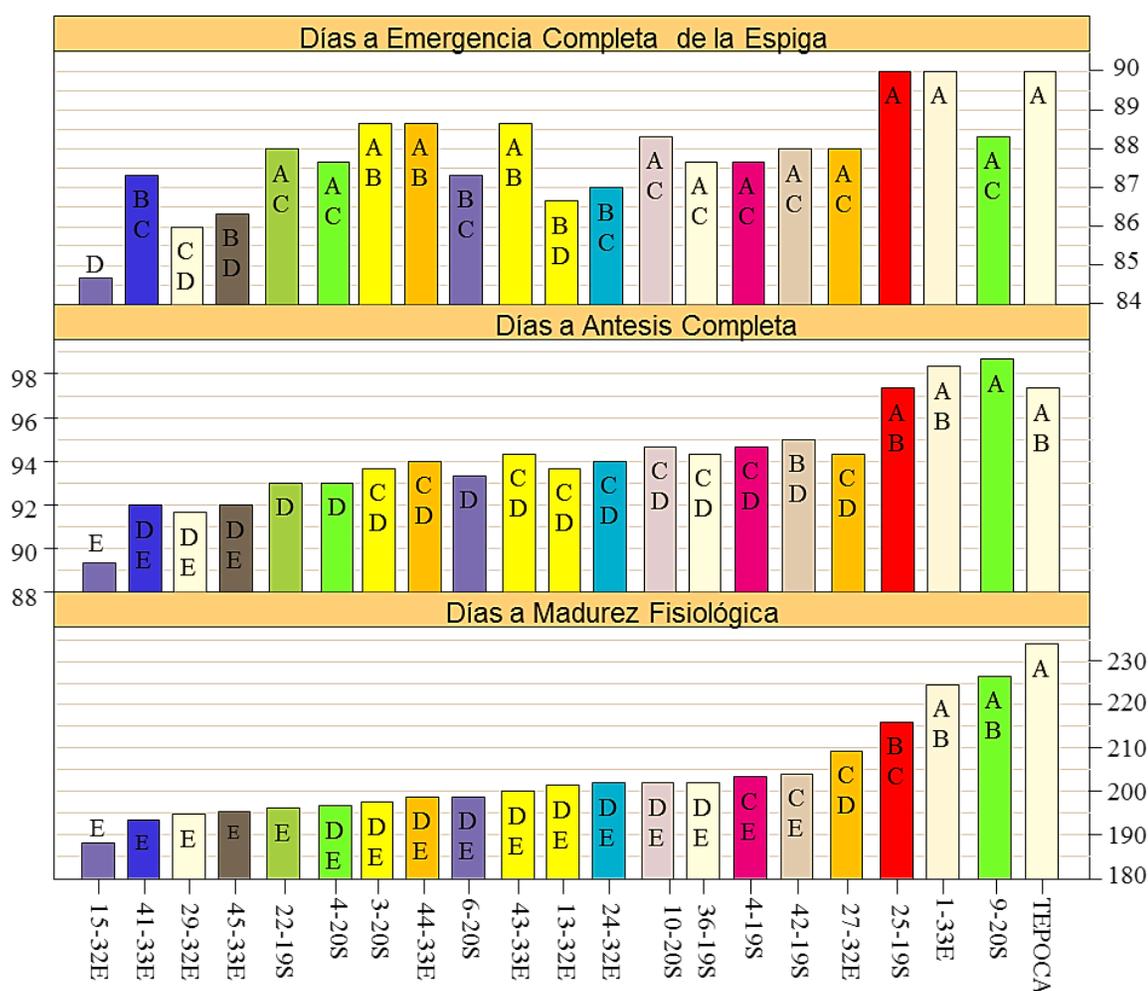


Figura 8. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables de comportamiento fenológico: Días a la espiga, Días a antesis completa y días a madurez fisiológica, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Por lo general es satisfecho, así como la vernalización (de acuerdo a la figura 7) dado que la temperatura media se encuentra en rango óptimo de 3 a 11°C.

En tanto la temperatura *per se* afecta las características del desarrollo en forma universal (todas las variedades y todas las fases son sensibles a ella) (Reynolds et al., 2013), pudiendo ser responsable de estas diferencias entre líneas, además de los genes involucrados con la precocidad intrínseca que influyen en el ciclo del cultivo hasta la floración una vez satisfecho los requerimientos de fotoperiodo y vernalización.

Miralles (2004) reafirma de manera categórica que la duración de las distintas etapas ontogénicas del cultivo, están reguladas por tres factores determinantes: Temperatura, fotoperiodo (duración del día) y vernalización (requerimiento de horas de frío). Además señala que el conocimiento de las respuestas del cultivo a estas variables ambientales, permite caracterizar la adaptabilidad de los diferentes cultivares a las distintas zonas productivas.

Por otro lado las diferencias de las líneas avanzadas precoces de trigo harinero, entre el más precoz y el más tardío en días a espigado y floración están en rango de 6 a 8 días respectivamente, estas diferencias aparentemente pequeñas reflejan una selección anterior para precocidad por INIAF a pesar de ello de acuerdo a Rebetzke *et al.* (2010), incluso un rango relativamente pequeño en la floración muestra efectos indeterminados en las características relacionadas con el rendimiento de grano.

En tanto la madurez fisiológica de las líneas avanzadas precoces de trigo harinero fue distinguido en cinco grupos (ver figura 8) por el análisis comparativo de Duncan, Tepoca (testigo) y las líneas 9-20S y 1-33E alcanzaron la madurez fisiológica entre 225 a 235 dds, en contraposición la línea 15-32E alcanzo en 188 dds la madurez fisiología dentro del grupo E, reflejando líneas diferentes.

El ciclo de vida de las líneas avanzadas precoces de trigo harinero fue muy extendido hasta completar la madurez fisiológica en condiciones de la Estación Experimental de Kallutaca, a pesar de ello se distinguieron líneas importantes. Es evidente un tiempo de duración mayor de la etapa comprendida entre la antesis y la madurez fisiológica, la misma representa entre el 50% (90 días) a 60%(154 días) de ciclo de vida, cuando se conoce que en ambientes altamente productivos esta comprende máximo 50 días (30%).

Reynolds *et al.* (2013), al respecto señala que la tasa de desarrollo post-antesis hasta la madurez en trigo no es sensible al fotoperiodo ni a la vernalización, y sólo parece responder positivamente a la temperatura *per se*. Entonces es lógico este comportamiento de las líneas dado que el comportamiento climático (ver figura 7) no favoreció, registrándose a partir de noviembre (90 dds) temperaturas medias inferiores a 9°C. Otro factor determinante fueron las lluvias persistentes en la última etapa de llenado de grano (no permite senescencia de espigas y tallos) y días nublados (baja tasas fotosintéticas).

4.4. Comparación de variables de adaptabilidad

Las variables de adaptabilidad son propias del genotipo y de acuerdo al ambiente el comportamiento de los genotipos será variable, están implicados por lo general en la expresión de estas variables genes menores y en un menor grado genes mayores, la vigorosidad, rusticidad y precocidad de las plantas en campo se verá reflejada por variables altura planta, número de macollos, factores de tolerancia abiótico y biótico. Siendo estas determinantes porque afectaran directamente al rendimiento.

Cuadro 6. Análisis de varianza para variables de adaptabilidad: Número de macollos por planta (NM), altura planta (AP) y número de tallos por metro cuadrado (NTM) de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

F.V.	GL	CUADRADOS MEDIOS					
		AP	p > F	NM	p > F	NTM	p > F
Bloque	2	170.70**	0.001	0.78 ns	0.434	9404.59 ns	0.486
Línea	20	138.07**	<.0001	2.40 **	0.004	36382.02**	0.002
Error	40	19.65		0.91		12815.57	
R ²		0.8		0.58		0.59	
%C.V.		5.12		15.99		15.58	

** : Altamente significativo.

* : Significativo

ns: No significativo.

%CV: Coeficiente de variación

R²: Coeficiente de determinación.

De acuerdo al análisis de varianza (ver cuadro 6) se evidencia diferencias altamente significativas entre líneas para: Altura planta ($p > 0.0001$), número de macollos por planta ($p > 0.004$) y para el número de tallos por metro cuadrado ($p > 0.002$). Se refleja una alta variabilidad entre líneas muy importante para cualquier programa de mejoramiento, además de ello los valores de coeficiente de variabilidad para altura planta se encuentran en rangos confiables y reflejan también credibilidad.

La variabilidad alta dentro de líneas para número de macollos por planta y número de tallos por metro cuadrado posiblemente están asociadas a un grado distinto de disponibilidad de nutrientes y la capacidad de retención de humedad del suelo de las unidades experimentales, producto de ello se observan altos valores de coeficientes de variación para número de macollos por planta (15.99) y número de tallos por metro cuadrado (15.58) a pesar de ello estos valores se encuentran en rangos aceptables.

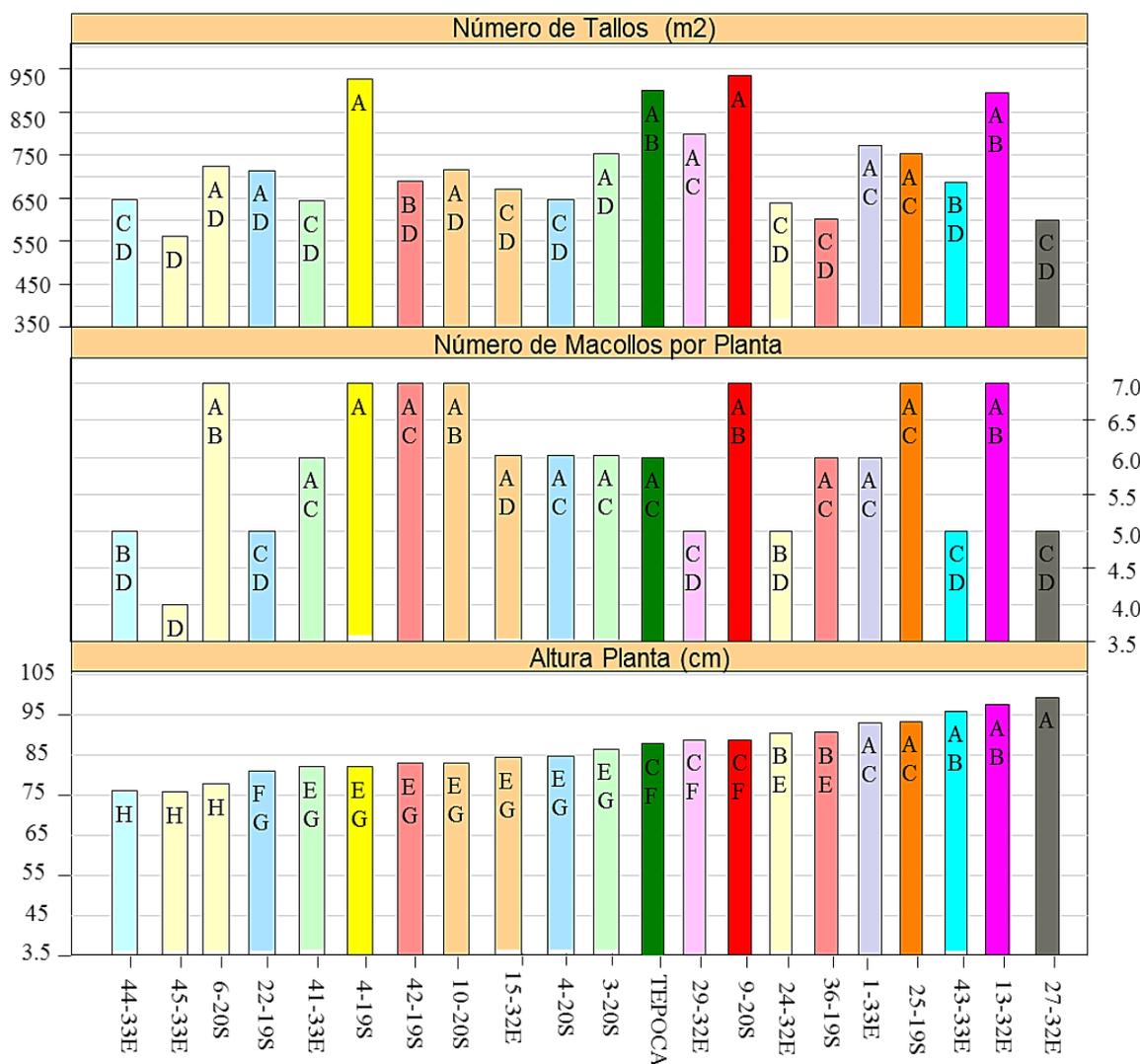


Figura 9. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables de adaptabilidad: Número de tallos por metro cuadrado, número de macollos y altura planta. En la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

El análisis comparativo de medias de Duncan al nivel de significancia de 5% (ver figura 9) para el número de macollos por planta agrupó a las líneas avanzadas precoces de trigo harinero en cuatro, sobresalen en el primer grupo las líneas 4-19S, 9-20S, 6-20S, 25-19S, 10-20S y 13-32E con número de macollos por planta superior a 6.

La variable número de macollos por planta mostrado en la figura 9, corresponde a macollos potenciales y no a macollos efectivos ya que estos se consolidan una vez formado espigas fértiles en la etapa reproductiva, y de acuerdo a Reynolds *et al.* (2013), aún hasta el espigado con la aparición de nuevas hojas se forman macollos; sin embargo, señala también que debido a que es durante esta fase que la competencia intra- y/o inter-planta por los recursos llega a ser más fuerte, se reduce la disponibilidad de asimilados para el crecimiento de todos los macollos potenciales causando mortandad de macollos por lo general en orden inverso a lo que han aparecido.

La prueba de promedios Duncan a nivel de significancia de 5% (figura 9) para el número de tallos por metro cuadrado evidencia diferencias individuales entre líneas muy importantes para esta variable, consolidándose cuatro grupos dominados por valores altos en promedio; el primer grupo(A) agrupa los promedios superiores a 700 tallos por metro cuadrado, en los que sobresalen las líneas 9-20S y 4-19S, seguido por la línea 13-32E y la variedad comercial Tepoca que funge de testigo.

Los altos valores para el número de tallos por metro cuadrado están influidos por las variables número de plantas por metro cuadrado y número de macollos por planta, y tendrán también un efecto directo sobre el rendimiento en grano. Sin embargo, el alto valor de número de tallos por metro cuadrado sufrirá reducciones significativas puesto que el tiempo de duración de la fase reproductiva y en especial de la fase de elongación del tallo fue reducida, en consecuencia la proporción de macollos muertos y abortos de primordios florales (o ambos) será también altas por falta de biomasa requerida para la formación de espigas, y la cantidad final de granos será disminuida. (Slafer *et al.*, 2001; Miralles y Slafer, 2007).

Para la altura de planta (figura 9) la diferencia entre promedios fueron más marcada distinguiéndose ocho grupos comandados por las líneas 27-32E, 13-32E, 1-33E, 43-33E y 25-19S, considerándose las líneas de porte alta con una altura que varía entre 94 a 100 cm. Otro grupo a considerar son las líneas 36-19S, 24-32E, 10-20S, 15-32E, 29-32E, 3-20S, 4-19S, 4-20S, 41-33E, 42-19S, 9-20S y testigo Tepoca, con alturas de planta que

varían de 83 a 93 cm considerándose las de porte intermedia, en tanto que las líneas de porte baja fueron 44-33E, 45-33E y 6-20S con altura inferiores a 77 cm.

En cuanto a la altura planta, desde la revolución verde se viene trabajando en trigo con genes de plantas semienanas y esto ha permitido significativas ganancias en rendimiento en grano; al respecto Fisher (2007), concluyó de sus investigaciones con introducciones de genes de plantas enanas en trigo que las plantas con un promedio de 0.7-1m de altura son más productivas y asimismo el reparto de asimilados es más equilibrado entre el tallo y la espiga, produciéndose mejores índices de cosecha.

Por tanto las líneas avanzadas precoces de trigo harinero ensayadas estarían todas comprendidas en este rango, sin embargo muchos autores también señalan que la altura planta debe adecuarse a través de la manipulación genética a los diferentes ambientes, esto reduciría significativamente la brecha entre el rendimiento real y potencial.

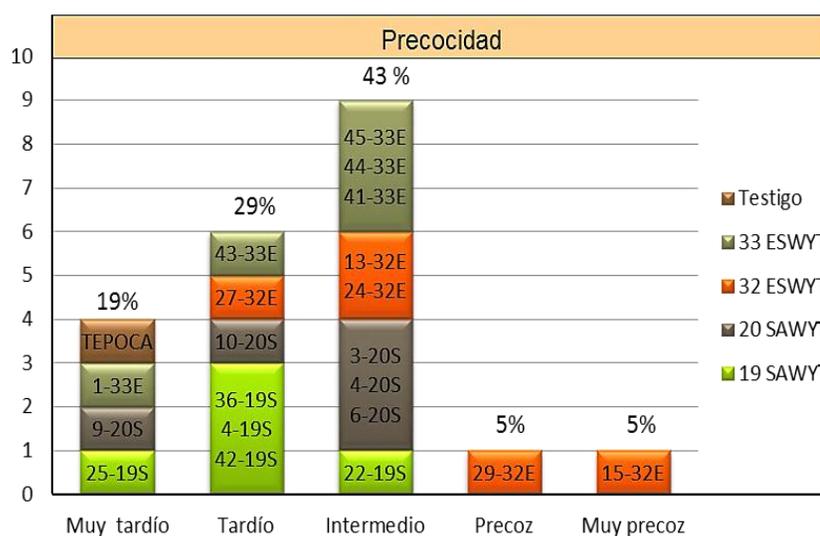


Figura 10. Frecuencias porcentuales para variable precocidad, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Evaluado en campo las variables de comportamiento fenológico de las líneas y verificando los resultados arrojados por el análisis comparativo de medias Duncan para días a floración y madurez fisiológica, se evidencia de manera clara en la figura 10, líneas muy tardías: Tepoca, 1-33E, 9-20S y 25-19S que representa a un 19% de población estudiada, líneas tardías: 43-33E, 27-32E, 10-20S, 36-19S, 4-19S y 42-19S representando el 29%, líneas intermedias: 45-33E, 44-33E, 41-33E, 13-32E, 24-32E, 3-20S, 4-20S, 6-20S y 22-

19S representando 43%, se identificó a la línea 29-32E como precoz y como muy precoz a la línea 15-32E que representan el 9% de la población, en concordancia al criterio de Autrique (2014) que señala que el rango entre una línea precoz y tardío es por lo general 30 días.

Asimismo las líneas SAWYT y Tepoca mostraron un comportamiento tardío. En tanto las líneas ESWYT se inclinaron ligeramente hacia un comportamiento precoz.

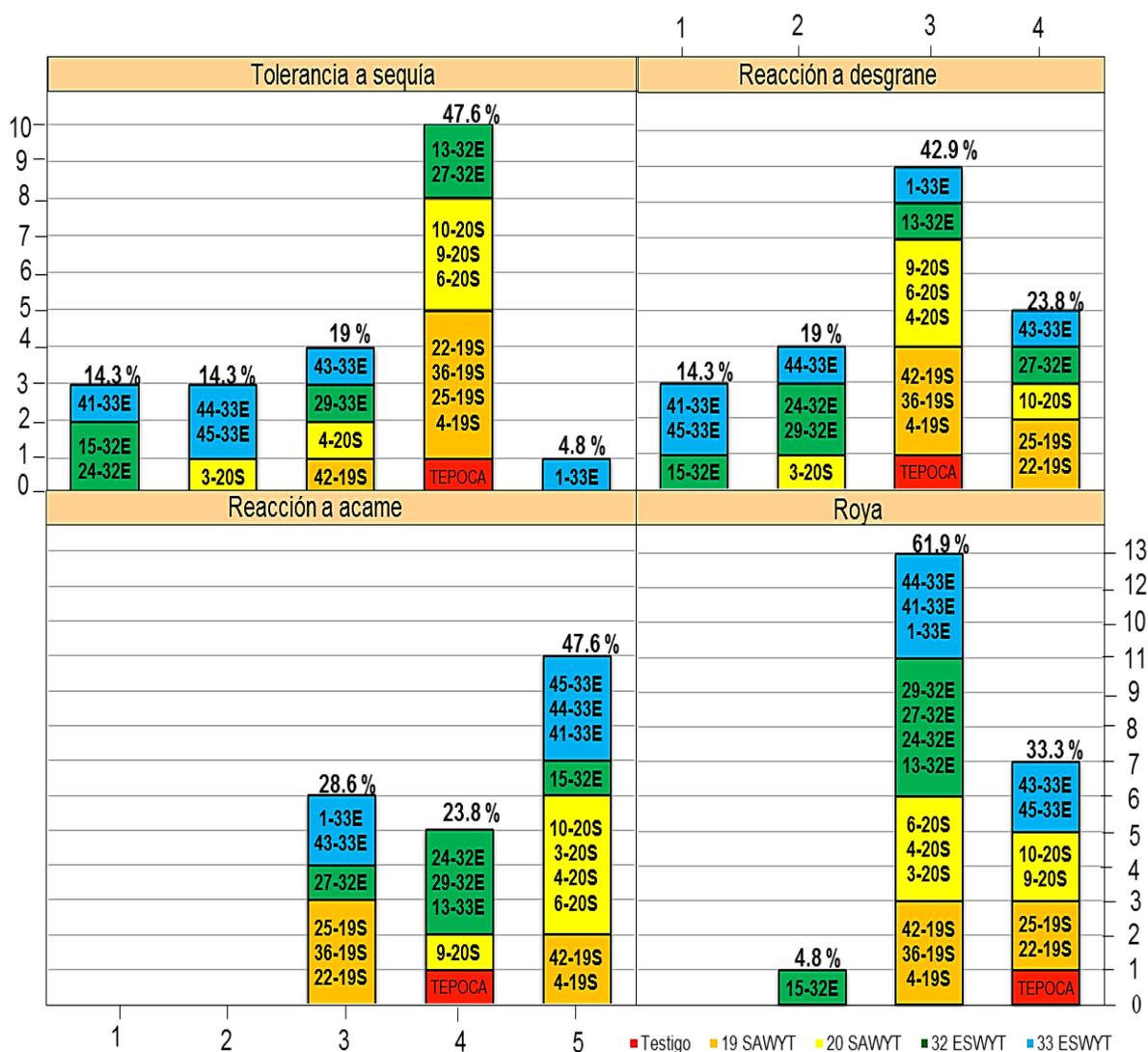


Figura 11. Frecuencias porcentuales de variables cualitativas ordinales de adaptabilidad: Tolerancia a sequía, reacción a desgrane, reacción acame y roya. En la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

De acuerdo a la figura 11, las líneas tolerantes a sequía fueron del 47.6% que incluyeron el 70% de líneas SAWYT, 20% de líneas ESWYT y testigo. La línea 1-33 ESWYT mostró una mayor tolerancia a sequía y en tanto las líneas muy susceptibles a sequía correspondieron también a líneas ESWYT (figura 11). Este comportamiento es predecible porque el propósito de las líneas SAWYT son los ambientes semiáridos y en tanto las líneas ESWYT están destinadas a ambientes de riego.

Al respecto Williams *et al.* (1999), Lawlor y Cornic (2002), señalan que la sequía induce la disminución del contenido de agua en las hojas, aumenta el cierre estomático, disminuyendo el abastecimiento de CO₂ en las células del mesófilo y, como consecuencia, ocurre una disminución de la tasa fotosintética de la hoja y de esta manera comprometería el rendimiento en grano.

Para la variable reacción a acame el 100% de las líneas se concentró entre moderadamente tolerantes y muy tolerantes, de los cuales el 47.6% fueron muy tolerantes a acame, 23.8% tolerantes y un 28.6% mostraron un comportamiento moderadamente tolerante al acame.

De acuerdo a Reynolds *et al.* (2013), cualquier estrategia exhaustiva para mejorar el potencial de rendimiento del trigo debe incluir la resistencia al acame ya que los cultivos con mayor rendimiento (rendimiento más pesado) necesitarán plantas más fuertes. El acame en el trigo puede reducir el rendimiento hasta en un 80% así como la calidad del grano (Easson *et al.*, 1993; Berry *et al.*, 2004).

Para la variable reacción a desgrane (figura 11), un 76.2% de las líneas fueron agrupado entre líneas muy susceptibles, susceptibles y moderadamente tolerantes para la variable reacción a desgrane. Las líneas 43-33, 27-32E, 10-20S, 25-19S y 22-19S constituyeron el 23.8% de líneas tolerantes a desgrane, en tanto las líneas 15-32E, 45-32E y 41-32E mostraron un comportamiento muy susceptibles a desgrane, asimismo ninguna línea mostro total tolerancia a desgrane.

Las condiciones ambientales del altiplano norte son muy favorables para ensayos con objetivos de selección de líneas tolerantes a factores abióticos, tales como las granizadas de alta intensidad y heladas, por tanto las líneas avanzadas precoces de trigo sobresalientes deben también ser tomados en cuenta en esa dimensión.

Para la variable tolerancia a Roya (figura 11), correspondiente a la Roya de la hoja el 61.9% de las líneas mostraron una moderada tolerancia, un 33.3% mostro ser tolerante y es resto mostro ser susceptible.

El material genético empleado distribuido por CIMMYT, posee los genes que otorgan resistencia a las royas de la hoja y del tallo constituyen un ejemplo de la variabilidad genética proporcionados por los parientes silvestres del trigo. Hasta los 90, se habían detectado unos 20 genes únicos de la resistencia a la roya del tallo y 12 de la resistencia a la roya de la hoja en ocho gramíneas silvestres emparentadas, en comparación con 21 genes de la resistencia a la roya del tallo y 23 de la resistencia a la roya de la hoja encontrados en el trigo mismo (Skovmand y Rajaram, 1990).

4.5. Comparaciones de variables “morfología de Espiga”

Las variables de morfología de espiga corresponden a la estructura floral de la espiga, muchos autores han señalado a estas estructuras como fuentes de pequeñas variaciones para la tolerancia a factores abióticos, biótico y así también en su conjunto como estructuras con propiedades fotosintéticas.

Cuadro 7. Análisis de varianza para variables de morfología de espiga: Longitud de espiga (LE); longitud de arista (LA). En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.

F.V.	GL	CUADRADOS MEDIOS			
		LE	p > F	LA	p > F
Bloque	2	3.28**	<.0001	0.34 ns	0.4046
Línea	20	0.82**	0.0003	0.84*	0.0118
Error Experimental	40	0.226		0.365	
R ²		0.716		0.546	
%C.V.		5.503		10.232	

** : Altamente significativo.

* : Significativo

ns: No significativo.

%CV: Coeficiente de variación

R²: Coeficiente de determinación

El análisis de varianza para variables de morfología de espiga (ver cuadro 9) muestra diferencias altamente significativas entre líneas (p=0.0003) para la variable longitud de espiga y diferencias significativas (p=0.0118) para la longitud de arista.

Las variaciones en morfología de espiga observadas en campo de las diferentes líneas, se verifican con el análisis de varianza, estas variables probablemente están asociadas a mecanismos de adaptabilidad propios de los genotipos y por tanto influirán al rendimiento en grano final.

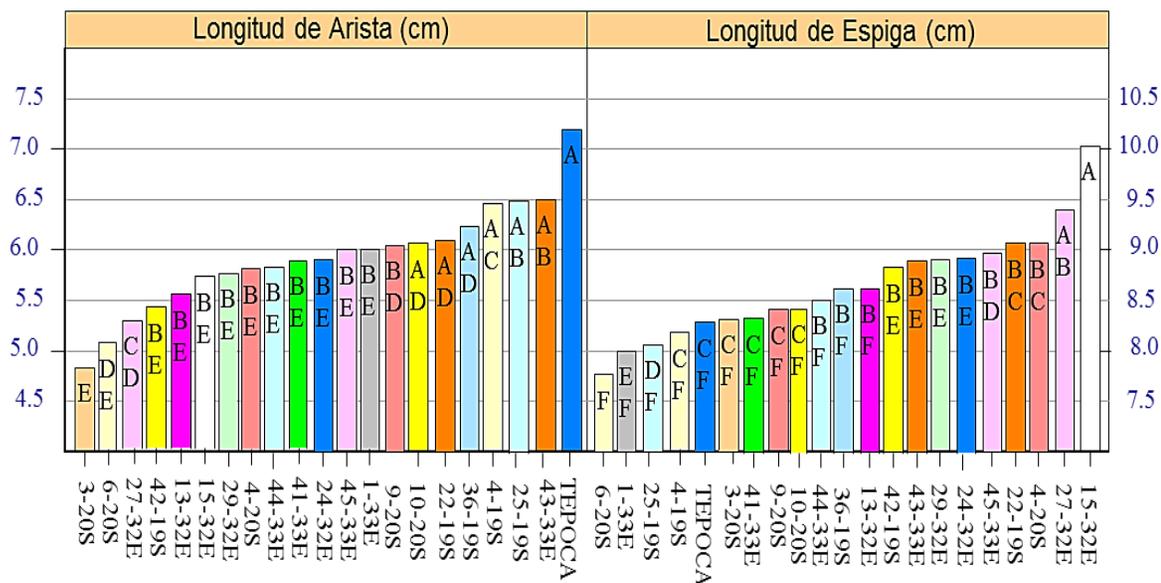


Figura 12. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables de morfología de espiga: Longitud de espiga y longitud de arista, en la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero. Determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

De la figura 12, la longitud de espiga de las líneas fue agrupada en siete grupos por el análisis de comparativo de medias Duncan. Las líneas sobresalientes con mayor longitud de espiga fueron: 15-32E y 27-32E con 10 y 9.4 cm, respectivamente; en el segundo grupo se agrupan once líneas con longitudes de espiga entre 8.5 a 9.4 cm, el tercero agrupo líneas con longitud de espiga de 8.2 a 9.04 cm y Tepoca con 8.3 cm.

Para la longitud de arista las líneas comparadas fueron distinguida en cinco grupos (figura 12) el primer grupo correspondió a líneas 43-33E, 25-19S, 4-19S, 22-19S, 10-20S y Tepoca con longitud de arista entre 6 a 7.25 cm. La línea con longitud de arista más reducida fue 3-20S con 4.8 cm. La presencia y/o longitud de arista como una estructura fuente de variabilidad debe ser considerada en los programas de mejoramiento en especial en altiplano en donde su presencia y longitud parecen favorecer el desgrane en eventos de granizada y a si mismo se han evidenciado que en trigos sin aristas, el agua

se escurre más rápidamente y en una forma mucho más efectiva que en un trigo con aristas (King y Richards ,1984) por lo tanto, reduce la tasa de germinación en la espiga.

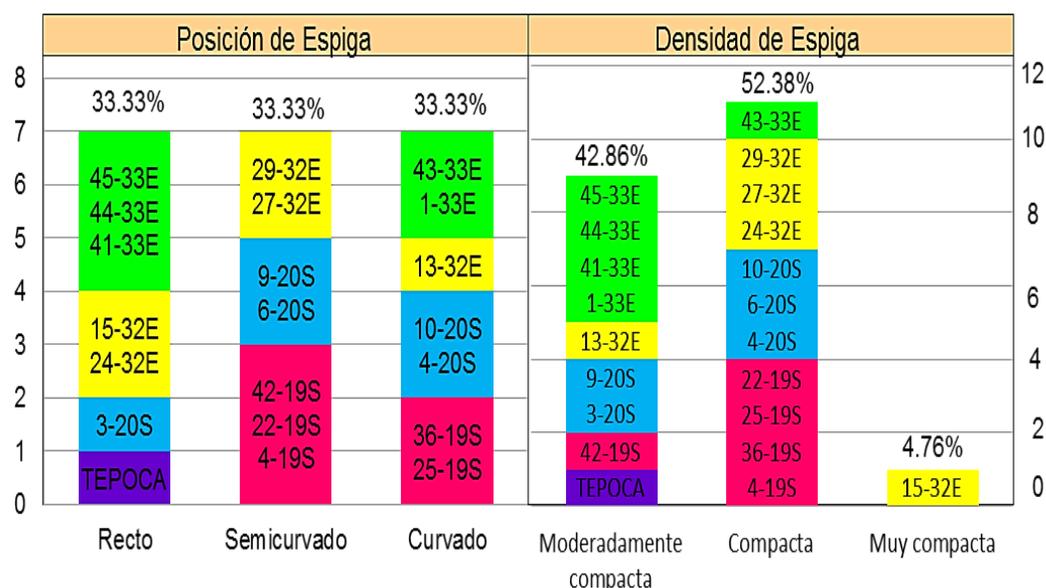


Figura 13. Análisis porcentual para variables de la morfología de espiga: Posición de espiga y densidad de espiga, en la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero. Determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

La posición de espiga presentada por las líneas fue del 33.33% de espigas recto, 33.33% de espigas semicurvadas y 33.33% de espigas curvadas. En donde el 90% de las líneas SAWYT presentaron espigas entre semicurvados y curvado (figura 13). El comportamiento en campo sugiere tomar en cuenta líneas con posición de espiga semicurvado y curvado puesto que estas estructuras mostraron una ligera resistencia al desgrane en eventos de granizada respecto a espiga recto.

Las líneas que presentaron espigas moderadamente compactas fueron del 42.86%, un 52.38% líneas presentaron espiga compactas y un 4.78% presento espiga muy compacta correspondiente a la línea 15-32E, en tanto el testigo comercial presento una morfología de espiga moderadamente compacta.

Las líneas de alto rendimiento 9-20S y 13-32E presentaron densidad de espiga moderadamente compacta, en tanto las líneas también de alto rendimiento 10-19S y 22-19S presentaron una densidad de espiga compacto, asimismo las cuatro líneas presentaron una posición de espiga entre semicurvado y curvado.

4.6. Comparación de variables componentes de rendimiento y rendimiento

Las variables componentes de rendimiento son un conjunto de variables y por intermedio de estas de acuerdo a Slafer *et al.* (2002), se puede interpretar el rendimiento como producto de estos componentes y cada uno de estos componentes estarían asociados a una o más de las fases de desarrollo vegetativo, reproductivo o de llenado del grano de la planta, así mismo los mismos autores señalan que los componentes ecofisiológicos son los más adecuadas para interpretar los rendimientos, sin embargo estos nuevos componentes son muy difíciles de adoptar para cualquier programa de mejoramiento y por tanto la simplicidad de determinación de los componentes numéricos del rendimiento permitirá las comparaciones planteadas.

Cuadro 8. Análisis de varianza para variables componentes de rendimiento: Número de planta por metro cuadrado (NPM); Número de espiguillas por espiga (NEE); Área foliar (AF); Peso de mil granos. En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

F.V.	GL	CUADRADOS MEDIOS							
		NPM	p > F	NEE	p > F	AF	p > F	PMG	p > F
Bloque	2	173.6**	0.0014	1.62 ns	0.398	160.75**	<.0001	35.24**	0.0059
Línea	20	254.2**	<.0001	1.72**	0.008	19.24*	0.0299	38.32**	<.0001
Error	40	22.2		6.89		9.58		6.03	
R ²		0.86		0.57		0.65		0.78	
%C.V.		5.82		7.06		15.42		5.71	

** : Altamente significativo.

* : Significativo

ns: No significativo.

%CV: Coeficiente de variación

R²: Coeficiente de determinación.

El análisis de varianza para variables componentes cuantitativos del rendimiento (Cuadro 8), evidencio la existencia de diferencias altamente significativas entre líneas que implica un comportamiento diferenciado para variables número de plantas por metro cuadrado ($p < 0.0001$), número de espiguillas por espiga ($p = 0.008$) y peso de mil granos ($p < 0.0001$), y diferencias significativas para área foliar (0.0299). Es evidente una alta variabilidad entre líneas para las variables significativas.

Del análisis comparativo de medias de Duncan (figura 14) para variables componentes cuantitativos de rendimiento, la variable número de plantas por metro cuadrado alcanzado por las líneas se distinguido en síes grupos, el primer grupo (A) fue exclusiva para la línea 13-32E con 109 plantas por metro cuadrado. El segundo grupo fue conformado por las

líneas 27-32E, 1-33E y 9-20S con 96, 92 y 88 plantas por metro cuadrado, respectivamente. En tanto el último grupo (F) de líneas no superó 77 plantas·m⁻² y el testigo Tepoca se ubicó entre el tercer y penúltimo grupo con 81 plantas por metro cuadrado. Esta variable puede ser regulada por la densidad de siembra y la viabilidad de semillas, pudiéndose establecer el primer componente de rendimiento en la siembra, al respecto Grupcheck (2012), señala que para obtener altos rendimientos el número de plantas establecidas debe comprender entre 200 a 400 plantas·m⁻², en tanto Kosina *et al.* (2013), señalan que lo óptimo requerido es de 170-220 plantas·m⁻². Una alta densidad de plantas puede favorecer las enfermedades, así también al encamado pero reduce los efectos de las malezas en razón de una mejor competencia, un hecho muy importante en algunas regiones.

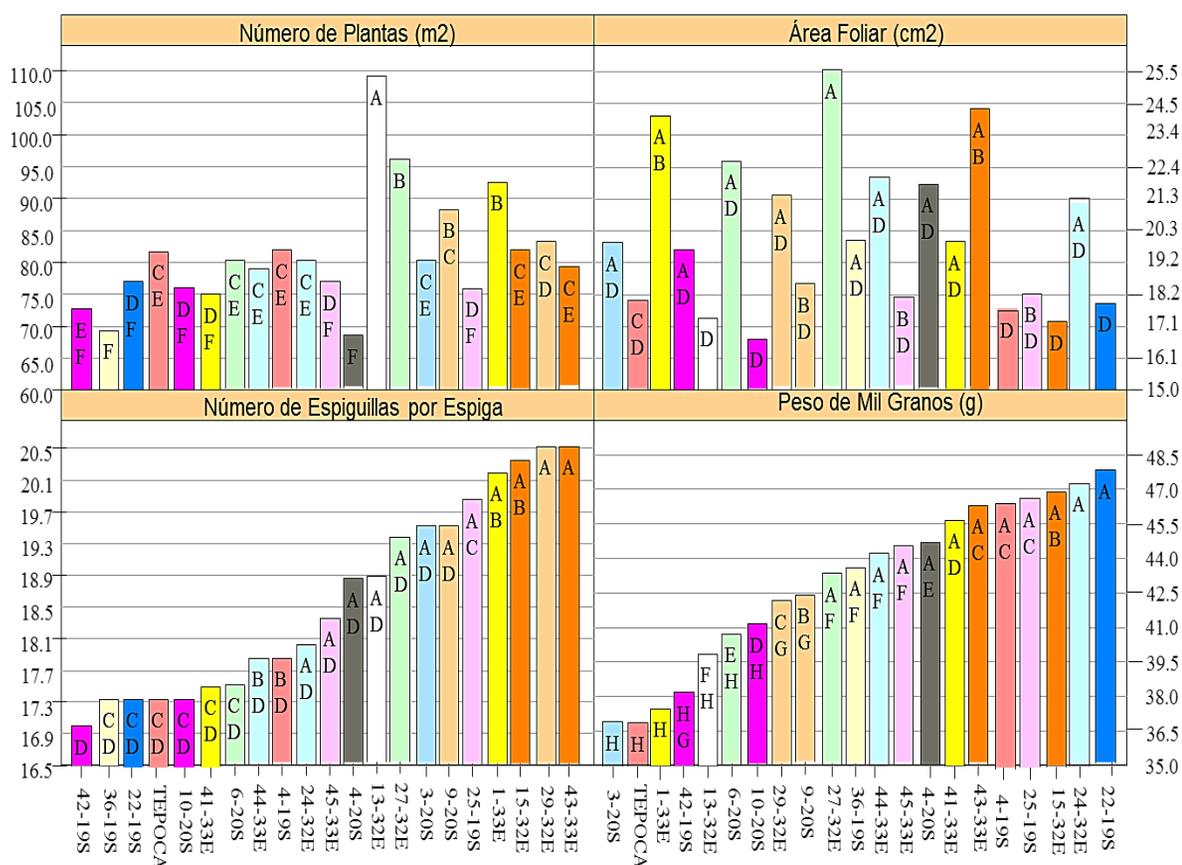


Figura 14. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables componentes cuantitativas del rendimiento: Número de planta por metro cuadrado, Número de espiguillas por espiga, Área foliar y Peso de mil granos. En la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Para área foliar (figura 14) de la hoja bandera las líneas fueron agrupadas en cuatro grupos distintos, nueve líneas se distinguieron con áreas foliares entre 19 a 25 cm², destacando en el mismo grupo las líneas 27-32E, 1-33E y 43-33E. En el otro extremo en grupo cuatro (D) la línea 10-20S con 16.7 cm² fue la que menor área foliar alcanzó, compartiendo el grupo con 16 líneas y Tepoca (testigo). Las diferencias entre grupos de líneas para área foliar son muy importantes puesto que la hoja bandera aporta nitrógeno entre el 70 a 90% y asociadas al número de hojas por macollo influirán directamente al rendimiento por ser también estas unidades fotosintéticas, y de acuerdo a Ray y Sinclair (1998), las reducciones y/o diferencias en biomasa (tallos, hojas=área foliar) entre líneas, indican también líneas con grado distinto de tolerancia a sequía.

El número de espiguillas por espiga (ver figura 14) fue distinguido en cuatro grupos diferentes en donde el primer grupo (A) fue constituido por líneas de 18 a 20 espiguillas por espiga entre los que destacan las líneas 1-33, 15-32, 29-32 y 43-33E. En tanto la variedad comercial Tepoca se ubicó en el cuarto grupo con 17 espiguillas por espiga. Por lo general en ambientes de alto rendimiento las espigas están compuestas de 15 a 30 espiguillas, y cada espiguilla se compone de 2 a 6 flores en forma de granos, las líneas avanzadas precoces evidentemente mostraron un buen número de espiguillas por espiga. Sin embargo, su verdadera importancia radica con el número de granos que aporte cada espiguilla a la espiga. El número real de espiguillas es determinado por la longitud de la fase reproductiva, al respecto Rahman *et al.* (1977), señalan también que existe una correlación positiva entre la longitud de la fase vegetativa y el número de espiguillas por espiga; y alargar la duración de la etapa vegetativa tardía induciría más espiguillas por espiga.

La variable peso de mil granos (figura 14), mostró diferencias individuales entre líneas avanzadas precoces de trigo harinero en base a prueba de Duncan a nivel de significancia de 5%; se distinguieron en ocho grupos, el primer grupo agrupó líneas entre de 43 a 47 gramos de mil granos, destacando en el grupo las líneas 22-19S, 24-32E y 15-32E. En tanto las líneas del último grupo (H) con pesos inferiores a 37gramos de mil granos fueron 1-33E, 3-20S y Tepoca. Los pesos de mil granos de diferentes líneas se encuentran superiores a 30 gramos aceptables o/y buenos, esto es atribuible a los genotipos y a la acción de las bajas temperaturas ya que muchos autores han evidenciado que las altas temperaturas deprimen los pesos de los granos (Kosina *et al.*, 2013), asimismo Savin y Slafer (1991), señalan una clara ausencia de respuesta del peso

de los granos por defoliaciones, remociones parciales de granos, sombreo, y otras manipulaciones de las relaciones fuente-destino cuando las mismas se realizan posteriormente a antesis, pero antes del inicio del crecimiento de los granos.

Cuadro 9. Análisis de varianza para variables componentes cuantitativos del rendimiento y rendimiento en grano: Número espigas por metro cuadrado (NEM); Número de granos por espiga (NGE); Rendimiento en grano (RDTO). En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

F.V.	GL	CUADRADOS MEDIOS					
		NEM	p > F	NGE	p > F	RDTO	p > F
Bloque	2	5816.0 ns	0.57	34.0 ns	0.180	1066335.7**	<.0001
Línea	20	21822.72*	0.02	49.7**	0.005	449189.2**	<.0001
Error	40	10296.97		19.0		67222.5	
R ²		0.52		0.58		0.81	
%C.V.		16.50		16.99		18.36	

** : Altamente significativo. * : Significativo ns: No significativo.

%CV: Coeficiente de variación R²: Coeficiente de determinación.

Del análisis de varianza (Cuadro 9), para variables componentes numéricos de rendimiento y rendimiento en grano, se verificó la existencia de diferencias altamente significativas entre líneas para la variable número de granos por espiga ($p=0.005$) y el rendimiento en grano ($p<0.0001$), también se encontró diferencias significativas para número de espigas por metro cuadrado ($p=0.02$). La variabilidad asociada al rendimiento entre líneas fue muy alta, así mismo la variabilidad dentro de líneas para los tres variables fue también alta sin embargo estos valores se encuentran en rangos aceptables.

De acuerdo a la figura 15, del análisis comparativo de medias Duncan la variable número de espigas por metro cuadrado fue agrupado en tres grupos distintos. Las líneas con número de espigas por metro cuadrado entre 520 a 780 conformaron el primer grupo, entre las líneas más sobresalientes fueron: 9-20S, 13-32E y 4-19S con número de espigas superior a 700. Esta variable está directamente asociado al número de plantas $\cdot m^{-2}$ y al rendimiento en grano, al respecto Faiguenbaum citado por Cropocheck (2012), indica como óptimo el rango entre 550 a 600 espigas $\cdot m^2$ a cosecha en condiciones hídricas limitantes, y entre 650 a 720 en situaciones en que no existan restricciones hídricas. Así mismo los diferentes especialistas en fisiología vegetal han determinado que entre -20 y 10 días de antesis se establece el número efectivo de espigas fértiles.

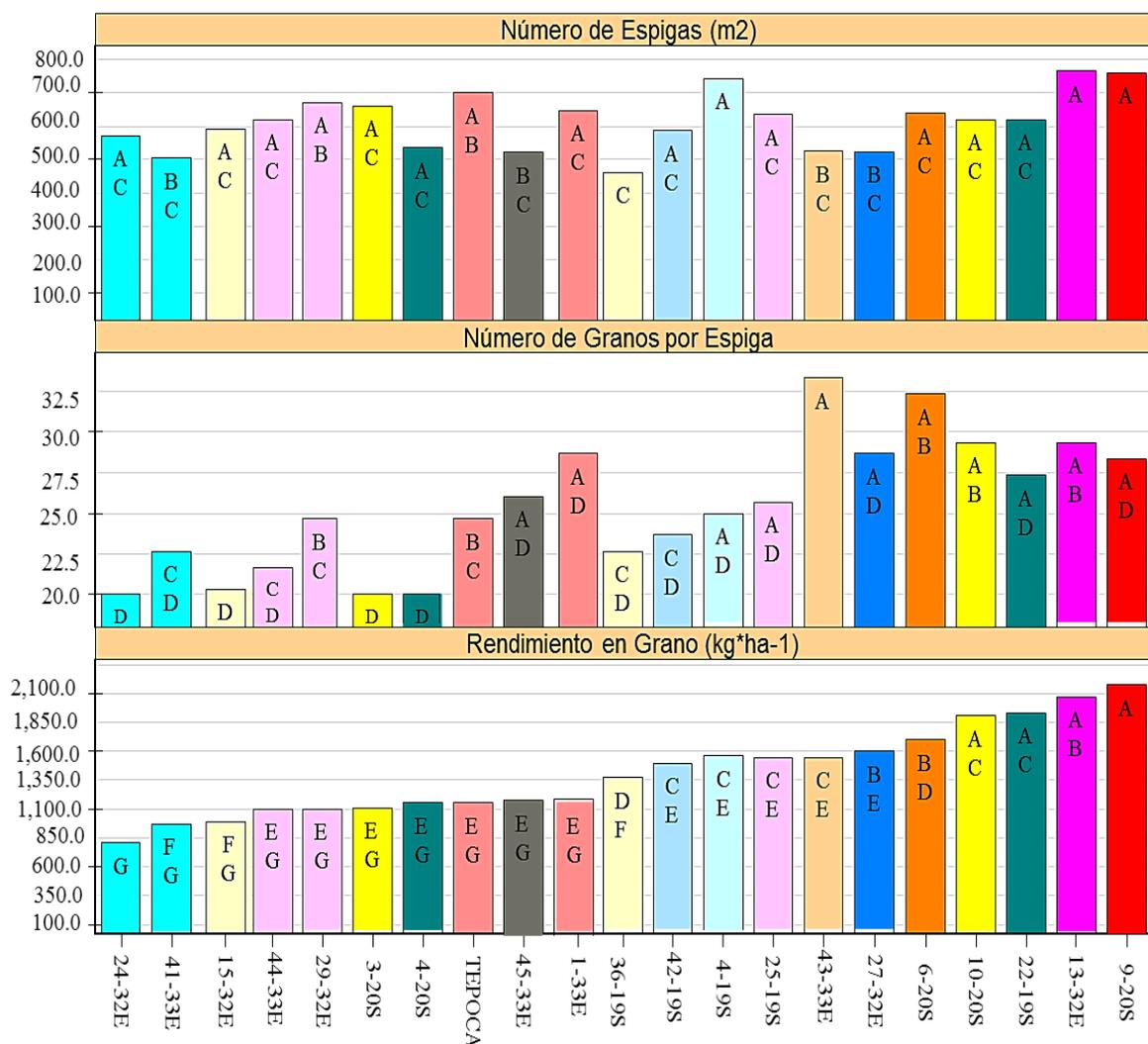


Figura 15. Análisis comparativo Duncan (Alfa=0.05) para variables componentes cuantitativos del rendimiento y rendimiento en grano: Número espigas por metro cuadrado, Número de granos por espiga, Rendimiento en grano. En la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero, determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestión agrícola 2013-14.

Para el número de granos por espiga (figura 15) el análisis comparativo de medias Duncan distinguió cuatro grupos, las líneas 43-33E, 6-20S, 13-32E, 10-20S, 1-33E, 9-20S y 27-32E sobresalen para el primer grupo con rango de 28 a 33 granos por espiga. En tanto las líneas 15-32E, 24-32E, 3-20S y 4-20S con 20 granos por espiga fueron agrupadas en el último grupo. De los resultados es evidente una baja fertilidad basal y apical de las espigas observadas en campo, puesto que el rango óptimo varía entre 35 a 50 granos por espiga (Kosina *et al.*, 2013), en concordancia con estas observaciones Davies *et al.* (2005), han planteado para mejorar el número de granos un mejor

entendimiento la participación de hormonas reguladoras y las señales de la planta que podría ser la vía para explicar la interacción de la fertilidad de la espiga con el medio ambiente y su fundamento genético.

Es importante recordar que el número de granos se había identificado en la revolución verde como el más importante sin embargo trabajar directamente con ella trajo muchos intentos fallidos (Reynolds *et al.*, 2013), entonces la fisiología vegetal llevo a los fitomejoradores a considerar un balance complejo de los componentes.

Del análisis comparativo de medias Duncan el rendimiento en grano (figura 15) fue agrupado en siete grupos, el primer grupo agrupo las líneas con más alto rendimiento 9-20S línea muy tardío, 13-32E línea intermedia, 22-19S línea intermedia y 10-20S línea tardía con rendimientos de 2176, 2072, 1935 y 1904.8 Kg*ha⁻¹, respectivamente; pudiéndose notar que las líneas corresponde a un ciclo vegetativo tardío e intermedio. El cuarto grupo (D) agrupo líneas con rendimientos intermedios de 1698.3 a 1373.9 Kg*ha⁻¹ correspondiente a las líneas 6-20S, 27-32E, 4-19S, 25-19S, 43-33E, 42-19S y 36-19S. En tanto el último grupo (G) agrupo las líneas con rendimientos bajos de 1201.1 a 804.8 Kg*ha⁻¹ correspondientes a las líneas 1-33E, 45-33E, 4-20S, 3-20S, 44-33E, 29-32E, 15-32E, 41-33E, 24-32E y Tepoca.

Las diferentes líneas avanzadas precoces de trigo harinero en condiciones de la Estación Experimental de Kallutaca reflejan importantes valores en rendimiento en grano, aún más si se consideran los promedios en rendimientos inferiores a 700 kg*ha⁻¹ en parcelas del agricultor del altiplano, sin embargo aún distan del rendimiento potencial en condiciones de la Estación Experimental por el comportamiento mostrado en componentes de rendimiento.

4.7. Calidad del grano y otras características

Los nuevos paradigmas de mejoramiento contemplan entre sus objetivos la calidad de grano, el rendimiento en grano históricamente en los diferentes programas de mejoramiento ha mostrado una asociación negativa con las variables que constituyen la calidad; sin embargo, actualmente CIMMYT ha desechado este concepto logrando obtener a través de una alta diversidad de germoplasma cultivares de alto rendimiento y alta calidad de proteína (Guzmán, 2014). Entre los más importantes la calidad nutricional, calidad de molienda y calidad industrial ya han sido abordados ampliamente.

Las líneas SAWYT y ESWYT empleados en la presente investigación poseen en su mayor porcentaje un color de grano blanco (Guzmán, 2014), y el mismo autor señala que el color blanco es bien valorado para la panificación.

Cuadro 10. Análisis de varianza para peso hectolitrico (PH), en la adaptabilidad de 21 líneas precoces de trigo harinero. Determinados en la Estación Experimental de Kallutaca durante la gestion agricola 2013-14.

F.V.	GL	CUADRADOS MEDIOS	
		PH	p > F
Bloque	2	131.270000**	<.000100
Línea	20	9.850000 ns	0.271100
Error Experimental	40	7.913646	
R ²		0.592115	
%C.V.		3.653267	

** : Altamente significativo.

* : Significativo

ns: No significativo.

%CV: Coeficiente de variación R²: Coeficiente de determinación

El análisis de varianza realizado para la variable peso hectolitrico (ver cuadro 10) no detecto diferencias estadísticas significativas ($p=0.2711$) entre líneas para dicho variable, la variable presento una media general de $77 \text{ kg}\cdot\text{hl}^{-1}$ y una variación de 70.3 a $84.5 \text{ kg}\cdot\text{hl}^{-1}$ (cuadro 4) por lo que la calidad de los granos de trigo cosechado es buena, a pesar de no haberse detectado diferencias para las líneas, los granos cosechados de líneas precoces poseen un mayor peso hectolitrico (no significativo) respecto a líneas tardías, entre ellos las líneas 15-32E, 13-32E y 29-32E alcanzaron valores de peso hectolitrico de 79.96 , 79.67 y $78.79 \text{ hl}\cdot\text{Kg}^{-1}$, respectivamente.

La figura16, evidencia un porcentaje acumulado entre granos de tamaño mediano y granos de tamaño grande del 100%, de los cuales el 71.43% correspondieron a granos medianos y el 28.57% a granos grandes, las líneas precoces especialmente presentan granos de tamaño grande, en tanto los granos producto de macollamiento tardío no fueron considerados por presentar granos chupados como tampoco fueron considerados en el rendimiento en grano. La variable tamaño de grano a menudo estará influido por los requerimientos hídricos y la humedad durante el llenado del grano y de acuerdo a Kosino *et al.* (2013), el grano de trigo típicamente pesa 30-60 mg (es decir, 30-60 g por 1000 granos) dependiendo de la variedad y las condiciones de cultivo.

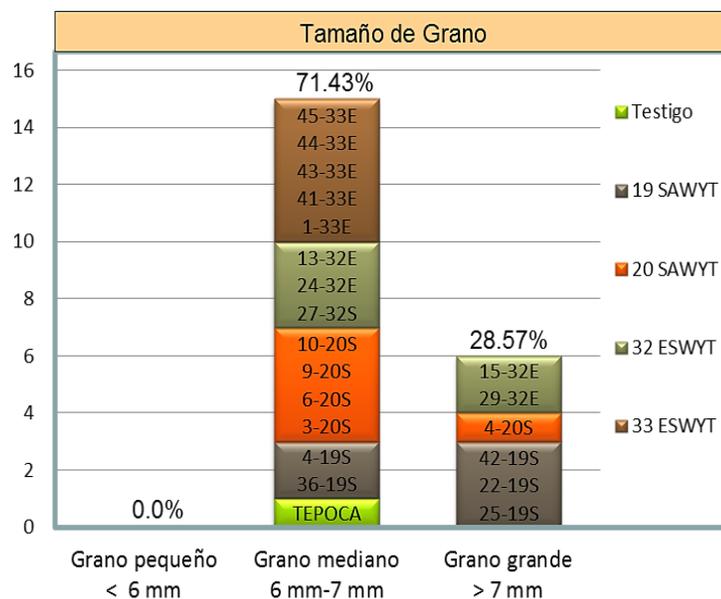


Figura 16. Análisis porcentual del variable tamaño de grano, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, determinado en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

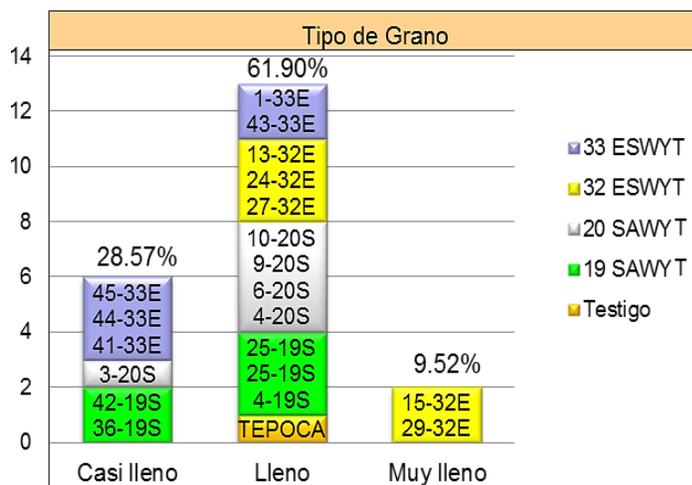
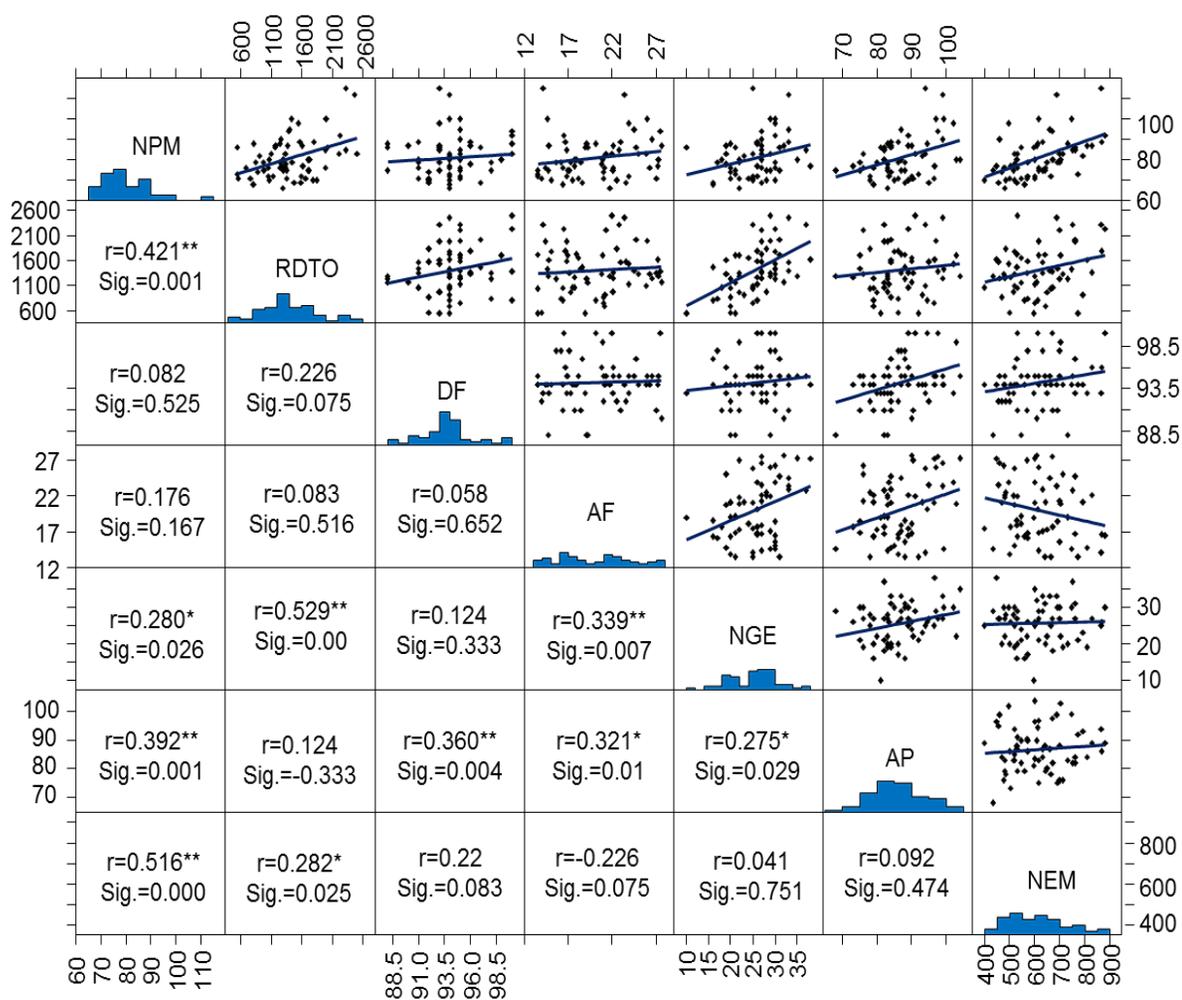


Figura 17. Análisis porcentual para variable tipo de grano, en la adaptabilidad 21 de líneas avanzadas precoces de trigo harinero. Determinado en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

De acuerdo a la figura 17, el 28.57% de las líneas presentaron granos casi llenos, el 61.90% de las líneas presentaron granos llenos y el 9.52% líneas presentaron granos muy llenos correspondientes a las líneas precoces 15-32E y 29-32E.

Las líneas de alto rendimiento en grano 9-20S, 13-32E, 22-19S y 10-20 presentaron granos llenos, no se consideraron los granos producto de macollos tardíos que casi en un 100% presentaron granos chupados y muy chupados. El llenado depende también de la etapa de llenado de grano y cualquier déficit hídrico tendera a reducir el llenado de grano, además de ello otros factores determinantes que van a influir negativamente sobre el llenado de grano son las bajas temperaturas típicas en del altiplano y enfermedades foliares.

4.8. Asociación de variables



** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral) * . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Figura 18. Matriz de dispersión y coeficiente de correlación lineal Pearson de variables cuantitativas, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Se asumen importantes asociaciones entre variables cuantitativas (figura 18) de acuerdo al coeficiente de correlación de Pearson. Las correlaciones más destacadas para el rendimiento en grano fueron las siguientes: Una asociación positiva altamente significativa ($r=0.529$) con la variable componente de rendimiento número de granos por espiga, número de plantas por metro cuadrado ($r=0.421$) y una asociación positiva significativa ($r=0.282$) con número de espigas por metro cuadrado. Consecuentemente se verifica una asociación positiva significativa ($r=0.280$) entre el número de granos por espiga y número de plantas por metro cuadrado. Las asociaciones positivas entre el rendimiento y los componentes de rendimiento reflejan la validez del análisis de estas variables para la identificación de genotipos promisorios; asimismo una asociación positiva entre el número de granos por planta y número de plantas $\cdot m^{-2}$ señala la necesidad de aumentar la densidad de siembra para aumentar a través del número de granos por planta el rendimiento.

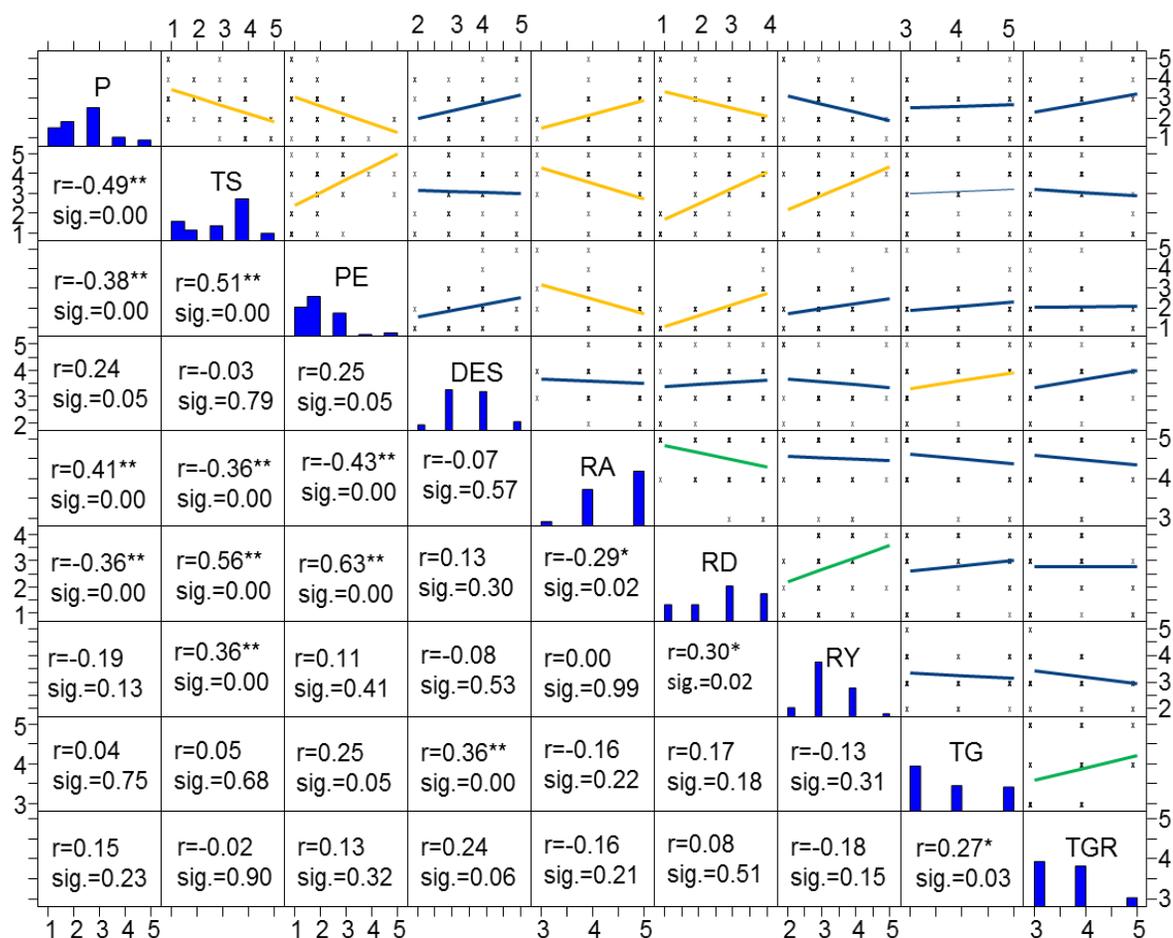
Las líneas que presentaron una mayor altura de planta también fueron las que más días tardaron en alcanzar la antesis (tardías) estableciéndose una asociación positiva altamente significativa ($r=0.360$), además la altura de planta se asoció positivamente con variables componentes de rendimiento de número de granos por espiga ($r=0.275$), número de plantas por metro cuadrado ($r=0.392$) y área foliar $=0.321$ (figura 18).

Las correlaciones no paramétricas (figura 19) evidencian que las líneas precoces estudiadas en condiciones del Altiplano Norte tienden a ser susceptibles a la sequía verificándose una asociación negativa altamente significativa ($r=-0.49$) entre la precocidad y tolerancia a sequía. Se sabe bien que las líneas precoces difieren con las líneas tardías en orden fisiológico, un ejemplo de ello es que requieren un menor índice heliotérmico sin embargo no se sabe que sus requerimientos hídricos difieran de las líneas tardías.

La precocidad mostró también estar asociada negativamente con la variable reacción a desgrane ($r=-0.36$), posición de espiga ($r=-0.38$) y mostro una asociación positivamente con la variable reacción a acame ($r=0.41$). La asociación negativa de precocidad con la variable reacción al desgrane no implica que las líneas tardías sean tolerantes a granizada sino que refleja que el evento de granizada se presentó en la fase más vulnerable para la líneas precoces y no así para las líneas tardías, en tanto la otras asociaciones positivas con posición de espiga y reacción a acame favorecen a las líneas precoces.

Una asociación positiva significativa evidente esperado se ratifica entre la variable tamaño de grano y tipo de grano ($r=0.27$), las líneas avanzadas precoces de trigo harinero que expusieron granos llenos también presentaron granos grandes.

Asimismo, las líneas que mostraron cierta tolerancia a roya se mostraron también tolerantes a sequía, estableciéndose una asociación positivamente altamente significativa ($r=0.35$) entre estas variables. Estas asociaciones positivas para la variable tolerancia a sequía y roya, pueden estar directamente reflejando el comportamiento de genotipos que en su historial de cruzamiento contienen a parientes silvestres como *Aegilops squarrosa* (cuadro 3).



** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Figura 19. Matriz de dispersión y correlación lineal no paramétrica de Spearman para variables cualitativas, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

4.9. Modelos predictivos del Rendimiento en grano de trigo

El rendimiento en grano de líneas avanzadas precoces de trigo harinero está explicado por una serie de variables, con directa e indirecta participación. Empleando el método de regresión lineal múltiple es posible generar modelos predictivos, en donde el rendimiento en grano como variable dependiente será explicado en función a variables independientes preferentemente cuantitativos continuos.

Para la construcción de la ecuación del rendimiento en grano, a partir de un análisis de regresión lineal múltiple, se optó por la técnica de “Stepwise” o selección de variables por pasos sucesivos “paso a paso”. La finalidad perseguida fue buscar de entre todas las posibles variables explicativas aquellas que más y mejor expliquen el rendimiento en grano sin que ninguna de ellas sea combinación lineal de las restantes. Este procedimiento implica que: (1) en cada paso solo se introduce aquella variable que cumple unos criterios de entrada; (2) una vez introducida, en cada paso se valora si alguna de las variables cumplen criterios de salida; y (3), en cada paso se valora la bondad de ajuste de los datos al modelo de regresión lineal y se calculan los parámetros del modelo verificado en dicho paso. El proceso se inicia sin ninguna variable independiente en la ecuación de regresión y el proceso concluye cuando no queda ninguna variable fuera de la ecuación que satisfaga el criterio de selección (garantiza que las variables seleccionadas son significativas) y/o el criterio de eliminación (garantizar que una variable seleccionada no es redundante).

El análisis de varianza (cuadro 11), nos permite valorar los diferentes modelos predictivos para el rendimiento en grano de líneas avanzadas precoces de trigo harinero, la variabilidad total descompuesta entre la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad residual contrastada con la hipótesis nula de que R^2 es igual a 0, la pendiente de la recta de regresión es igual a 0, ó lo que es lo mismo, la hipótesis de que las dos variables están incorrelacionadas es rechazada para los cinco modelos predictivos obtenidos. De esta manera podemos considerar que los resultados obtenidos con la muestra son generalizables a la población a la que pertenece la muestra, asimismo el modelo más adecuado es el modelo cinco, con una alta determinación.

Cuadro 11. Análisis de varianza para modelos predictivos del rendimiento obtenidos por regresión lineal empleando el método de pasos sucesivos, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Modelo		GL	SC	CM	F	Sig.	R ²
1	Regresión	1	3862100.594	3862100.594	23.693	.000 ^a	0.280
	Residual	61	9943255.641	163004.191			
	Total	62	13805356.235				
2	Regresión	2	4980400.911	2490200.456	16.931	.000 ^b	0.361
	Residual	60	8824955.324	147082.589			
	Total	62	13805356.235				
3	Regresión	3	5932025.728	1977341.909	14.818	.000 ^c	0.430
	Residual	59	7873330.507	133446.280			
	Total	62	13805356.235				
4	Regresión	4	6703389.826	1675847.457	13.686	.000 ^d	0.486
	Residual	58	7101966.409	122447.697			
	Total	62	13805356.235				
5	Regresión	5	7272872.139	1454574.428	12.692	.000 ^e	0.527
	Residual	57	6532484.096	114604.984			
	Total	62	13805356.235				

a. Variables predictoras: Constante, NGE

b. Variables predictoras: Constante, NGE, NPM

c. Variables predictoras: Constante, NGE, NPM, NEE

d. Variables predictoras: Constante, NGE, NPM, NEE, PMG

e. Variables predictoras: Constante, NGE, NPM, NEE, PMG, NM

f. Variable dependiente: RDT0.

En la estimación de coeficientes de regresión (B), componentes de la ecuación de regresión lineal múltiple para el rendimiento en grano de líneas avanzadas precoces de trigo harinero (cuadro 12), se evidencio la existencia de significancia entre el rendimiento en grano y las diferentes variables componentes del modelo indicados por los valores de probabilidad menores a 0.05 asociados al estadístico T (Sig. t), para los diferentes modelos obtenidos.

El modelo predictivo más adecuado para el rendimiento de grano en kg·ha⁻¹ (Cuadro 12) de líneas avanzadas precoces de trigo harinero constituye el modelo cinco:

$$RDT0 = -1456.145 + 40.548NGE + 17.481NPM -76.475NEE + 30.257PMG + 85.269NM$$

Cuadro 12. Modelo predictivo del rendimiento en grano obtenidos por regresión lineal múltiple empleando el método de pasos sucesivos, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Modelo	Coefficientes de regresión B	Error típ.	t	Sig.
Constante	-1456.145	757.987	-1.921	.060
Número de Granos por Espiga	40.548	8.572	4.730	.000
Número de Plantas por m ²	17.481	4.572	3.823	.000
Número de Espiguillas por Espiga	-76.475	27.226	-2.809	.007
Peso de Mil Granos	30.257	10.618	2.850	.006
Número de Macollos	85.269	38.252	2.229	.030

4.10. Análisis exploratorio

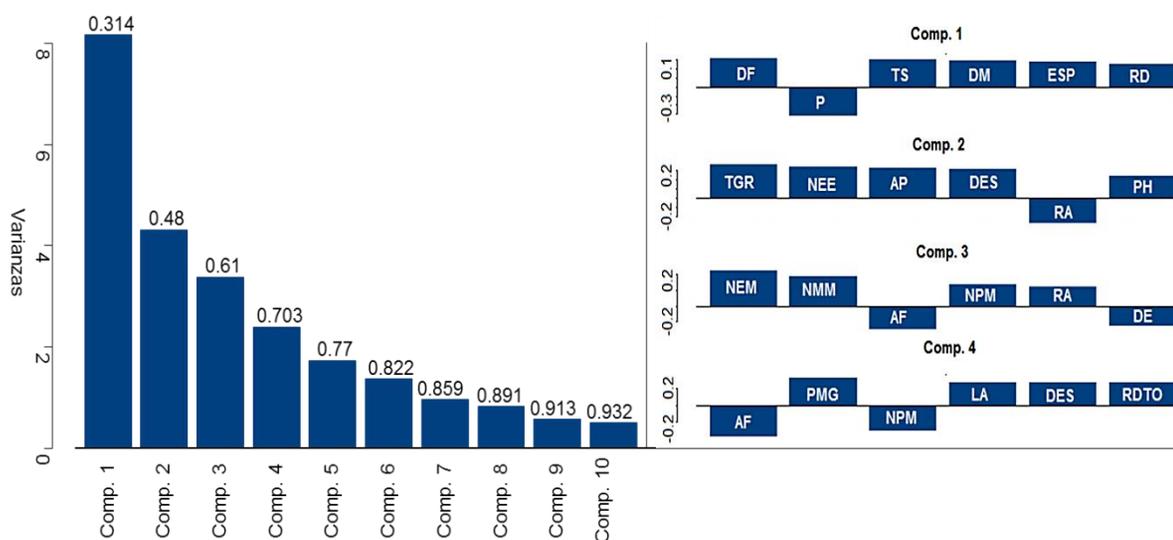


Figura 20. Importancia relativa de los componentes principales y pesos de las variables originales por componente, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

La varianza total o la información total de los componentes principales en base a 26 variables evaluadas de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero, fue explicada en un 70% de varianza acumulada por los cuatro primeros componentes principales (figura 20), considerando el criterio de Cliff (1988).

El primer componente principal explica el 31.4 % de varianza total, contenido en mayor grado en variables de comportamiento fenológico con peso positivo de: Días a floración,

días a espigado, días a madurez y precocidad con peso negativo, además participan variables de adaptabilidad de reacción a desgrane y tolerancia a sequia con peso positivo.

El segundo componente principal explica el 16.6% de varianza relativa y una varianza acumulada de 48%, expresado en mayor grado por las variables de: Tipo de grano, número de espiguillas por espiga, altura planta, densidad de espiga y peso de mil granos con peso positivo y reacción a acame con peso negativo (figura 20).

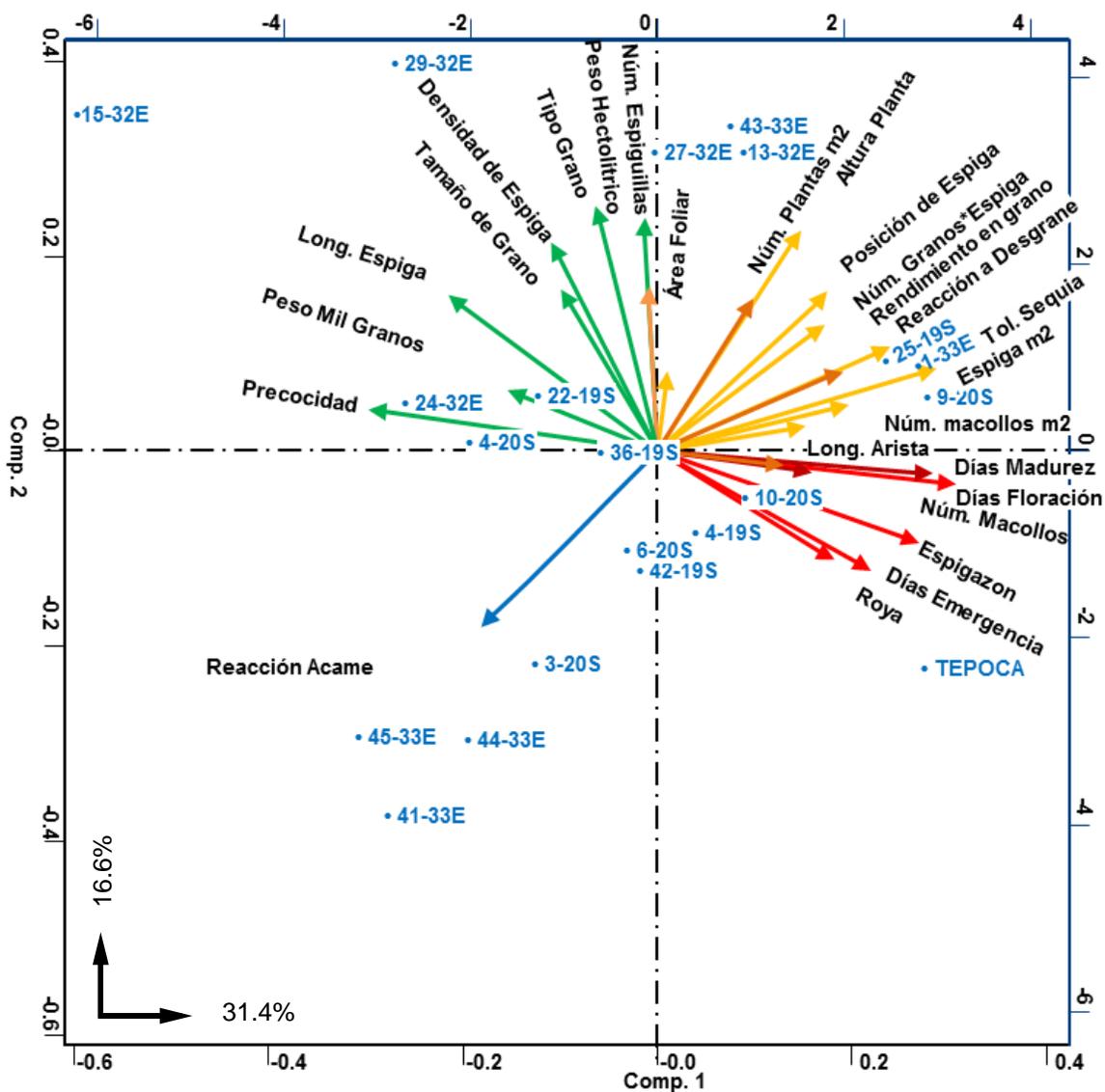


Figura 21. Análisis de componentes principales: BIplot de interacción de variables y líneas, en la adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca 2013-14.

Tercer componente principal explica el 13% de varianza relativa y una varianza acumulada de 61%, implica variables: Número de espigas por metro cuadrado, número de macollos por metro cuadrado, número de plantas por metro cuadrado y reacción a acame con peso positivo, área foliar y días a emergencia con peso negativo (figura 20).

Finalmente un cuarto componente con importancia relativa de 9% y una varianza acumulada del 70%, está implicado en mayor grado a variables: Área foliar y número de plantas por metro cuadrado con pesos negativos, peso de mil granos, longitud de arista, densidad de espiga y rendimiento con pesos positivos (figura 20).

La figura 21, muestra la representación gráfica BIPLLOT para dos componentes principales, generados a partir de una matriz de base de datos de doble entrada (de ahí BIPLLOT), en donde las filas correspondieron a líneas avanzadas precoces de trigo harinero y las columnas a variables de respuesta representados por sus vectores propios.

De acuerdo a la figura 21, el primer componente principal está asociado a variables fenológicas y su implicancia con algunos variables de adaptabilidad separa líneas precoces de las tardías, en donde claramente las líneas de trigo harinero 25-19S, 1-33E, 9-20S y Tepoca mostraron un comportamiento muy tardío en condiciones del altiplano norte y a la vez se muestran tolerantes a sequía y tolerantes a desgrane en contraposición a las líneas 15-32E, 29-32E y 24-32E que mostraron un comportamiento precoz y alta susceptibilidad a sequía y desgrane.

El segundo componente principal está asociado a variables de morfología de espiga, calidad de grano y adaptabilidad, que separa líneas susceptibles a acame 43-33E, 27-32E y 13-32E con características de calidad de grano y buena morfología de espiga, de líneas 45-32E, 41-32E, 44-32E, 3-20S y 6-20S tolerantes a acame pero de baja calidad de grano y un porte mediano. Por otro lado, el segundo componente principal profundiza también las diferencias entre las líneas de comportamiento precoz y tardío, en donde las líneas precoces se inclinan hacia un comportamiento tolerante a reacción acame siendo plantas de porte mediano, mayor calidad de grano y una morfología de espiga con características superiores respecto a líneas tardías.

5. CONCLUSIONES

En respuesta a los objetivos planteados y en base a los resultados obtenidos se tiene las siguientes conclusiones:

- La fenología de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero en la Estación Experimental de Kallutaca muestra un ciclo de vida del cultivo muy largo que comprende a ocho meses de septiembre a abril. El desarrollo de las fases fenológicas de las líneas avanzadas precoces de trigo harinero hasta la floración se muestran tardías respecto a ambientes templados, como producto de las bajas temperaturas medias y su efecto colateral sobre los complejos fisiológicos y metabólicos, asimismo las bajas precipitaciones durante los primeros meses de desarrollo vegetativo permiten un alargamiento de tiempo de las diferentes fases vegetativas.

La etapa más crítica sigue siendo entre -20 a 10 días de antesis, en tanto el fase del llenado de grano comprendido entre el post-antesis hasta la madurez fisiológica del cultivo es la que más retardación sufre en condiciones de la Estación Experimental de Kallutaca prolongándose hasta en más de cuatro meses, siendo las principales características ambientales influyentes: Presencia de sequias durante los primeros días post-antesis y después precipitaciones de alta intensidad, temperaturas medias promedios bajas (efectos negativos sobre complejos metabólicos, fisiológicos y otros), días nublados y bajo radiación solar incidente (efectos negativos sobre la fotosíntesis).

- En la comparación del comportamiento agronómico y componentes de rendimiento de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero se identificaron genotipos superiores al testigo comercial Tepoca en características agronómicas, morfológicas de espiga, calidad de grano y rendimiento en grano, las líneas más sobresalientes en rendimiento en grano fueron las siguientes: 9-20S, 13-32E, 22-19S y 10-20S con rendimientos de 2176, 2072, 1935 y 1904,8 kg·ha⁻¹, respectivamente. En tanto las líneas con características

destacables de morfología de espiga y calidad de grano fueron las siguientes: 15-32E, 29-32E, 43-33E y 27-32E.

- Se puede señalar que existe una buena adaptabilidad de las líneas avanzadas precoces de trigo harinero en condiciones del altiplano norte de La Paz, pero el producto final esperado como rendimiento de grano aceptable, estará condicionado por un ambiente hostil con fluctuaciones de temperatura extremas mínimas, precipitación localizada, granizadas de alta intensidad, sequías y otras.

En conclusión de los resultados se destaca la adaptabilidad de las siguientes líneas avanzadas precoces de trigo harinero: 15-32E, 29-32E, 13-32E, 43-33, 4-19S, 9-20S, 6-20S, 10-20S y 22-19S.

- Las variables de adaptabilidad entre ellos la precocidad considerada como una característica genotípica valiosa contra el cambio climático aún necesita ser estudiada profundamente en sus condiciones genéticas; al respecto, en la presente concluimos que en condiciones de la Estación Experimental de Kallutaca, para sembrar líneas precoces como mecanismo de evasión a los factores climáticos adversos es claramente determinante primero elegir una fecha de siembra adecuada considerando la variabilidad climática mencionada, una siembra tardía de las líneas precoces permitirá escapar de la sequía pero no de las heladas, ni granizadas corriendo el riesgo de obtener granos chupados y espigas desgranados. En contraposición la siembra de las líneas precoces juntamente con cultivares tardías expondrá a la línea precoz a todas las adversidades climáticas antes mencionadas, además de ello las precipitaciones y la humedad ambiental en los últimos meses no permitirán la madurez fisiológica del cultivo prolongando su ciclo y obligándonos a cosecharla juntamente con las tardías, también serán más afectadas por las plagas y enfermedades.

Los resultados de la presente investigación como unidad de la red nacional de ensayos establecidos en todo en territorio nacional desde 2010 hasta la actualidad (2014) por el Programa Nacional de Trigo (PN-Trigo) dependiente de INIAF, contribuyen con un grano de arena al objetivo grande de generar cultivares de alto potencial de rendimiento con amplia adaptación, tolerancia a los factores bióticos, abióticos y calidad.

6. RECOMENDACIONES

Las conclusiones asumidas en la presente investigación nos permiten realizar limitadas recomendaciones (puesto que de una sola gestión agrícola no se puede generalizar convenientemente) sobre la base de análisis estadísticos y observaciones en campo.

- De optar la fecha de siembra los primeros meses de septiembre con cultivares tardías y/o precoces, se recomienda proyectar infraestructura de riego, ya que es inminente una sequía en la fase vegetativa y post-antesis.
- Para las líneas avanzadas precoces de trigo harinero se recomienda dar continuidad a la investigación realizada considerando épocas y/o fechas de siembra, y considerarlas como material genético que nos permita la mitigación y adaptación al cambio climático.
- Se recomienda priorizar en los programas de mejoramiento del trigo para el altiplano los factores climáticos adversos de heladas y granizadas, además de sequía. Asimismo, revalorizar el conocimiento tradicional practicado por los agricultores aimaras para la evasión de eventos climáticos de helada y granizada.
- Se recomienda considerar en los programas de mejoramiento de trigo localidades del altiplano productores de ganado bovino, ya que en estas condiciones los trigos de doble propósito (grano-forraje) son valorados; y asimismo, en estas localidades priman precipitaciones altas y en consecuencia el trigo genera mucha biomasa.
- Respecto al manejo referida a la fertilización del suelo se recomienda realizar esta actividad empleando abonos orgánicos y/o realizar aportes combinados entre lo químico-orgánico, puesto que los suelos del altiplano poseen bajos niveles de materia orgánica y los fertilizantes químicos contribuyen al compactado de los suelos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AEMP (Autoridad de Fiscalización y Control Social de Empresas, BO). 2012. Estudio de la harina de trigo. La Paz-Bolivia. p.6
- Agamennoni, Vanzolini y Rivas. 2010. Manejo de suelos y cultivos. INTA Ascansubi- Argentina.p.1
- Aquino y Burgos. 2012. Exigencias bioclimáticas de una colección de trigos precoces. Maracay – Venezuela. 222p.
- Autrique, E. 2014. Socialización de cultivares de trigo desarrollados por el PN-Trigo, INIAF. Tiquipaya-Cochabamba.
- Barron, C., Surget, A., Rouau, X., 2007. Relative amounts of tissues in mature wheat (*triticum aestivum* L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition. *Journal of Cereal Science* 45, 88-96.
- Berry, PM., Sterling, M., Spink, JH., Baker, CJ., Sylvester-Bradley, R., Mooney, SJ., Tams, AR. y Ennos, AR. 2004. Understanding and reducing lodging in cereals. *Advances in Agronomy* 84, 217–271.
- Buck, H., Complementary strategies to raise wheat yield potential symposium CIMMYT, El Batán, México, Nov. 10-13, 2009
- Cliff, N. R. 1988. The eigenvalues-greater-than-one rule and the reliability of components. *Psychological Bulletin*, 103, 276-279.
- Cnidus.2009. *Biología Evolutiva: El Huerto Evolutivo*. (En línea). Consulta:15 Julio 2014, <http://lacienciaysusdemonios.com>
- Cropcheck. 2012. *Manual de Recomendaciones Cultivo de Trigo*. Chile. 27p.
- Davies, WJ., Kudoyarova, G. y Hartung, W. 2005. Long distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediate on of the plant's response to drought. *Journal of Plant Growth Regulation* 24, 285–295.

- Dubcovsky, J. y Dvorak, J. 2007. Genome Plasticity a Key Factor in the Success of Polyploid Wheat Under Domestication. *Science* 29 June 2007: Vol. 316. no. 5833, pp. 1862 – 1866 DOI: 10.1126/science.1143986
- Dvorak, J. et al. 1998. The structure of the *Aegilops tauschii* genepool and the evolution of hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 1998, vol. 97, no4, pp. 657-670
- Easson, DL., White, EM. y Pickles, SJ. 1993. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 121, 145–156.
- FAO.2006. Cariograma de trigo harinero *Triticum aestivum* L. (En línea). Consulta: 4 Agosto 2013, <http://www.fao.org/docrep/006/y4011e/y4011e0x.htm>.
- Fernández-Calvín, B. y Orellana, J.1990. High molecular weight glutenin subunit variation in the Sitopsis section of *Aegilops*. Implications for the origin of the B genome of wheat. *Heredity* (1990) 65, 455–463; doi:10.1038/hdy.117
- Fischer, R.A. 2007. The importance of grain of kernel number in wheat. A reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Res.* doi:10.1016/j.fcr.2007.04.002.
- Gautier, M.F.; Aleman, M.-E.; Guirao, A.; Marion, D.; Joudrier, P. 1994. *Trilicum aeshlivum* puroindolines, two basic cysteinrich seed proteins: cDNA analysis and developmental gene expression. *Pl. Mol. Biol.* 25: 43-57.
- Giroux, M.J.; Morris, C.F. 1997. A glycine to serine change in puroindoline bis associated with wheat grain hardness and low level 01 starch surface Iriabilin. *Theor. Appl. Gene!*. 95:857-864
- Gomez, L. 2001. Manejo tecnificado del cultivo de trigo en la sierra. p.1 – 20.
- Google Earth.2013. Coordenadas geográficas de Estación Experimental de Kallutaca. Consulta: 12 agosto 2006, <http://earth.google.com>
- Grubial. 2011. La evolución del trigo a través de los tiempos. (En Línea). Consulta: 22 Julio 2014, [blogspot.com: http://grubial.blogspot.com](http://grubial.blogspot.com).

- Guzmán, C. 2014. Socialización de cultivares de trigo desarrollados por el PN-Trigo, INIAF. Tiquipaya-Cochabamba.
- Han, F. P. et al. 2003. Rapid genomic changes in interspecific and intergeneric hybrids and allopolyploids of Triticeae. *Genome* 46: 716–723 (2003)
- Herbas, R. 2008. El Estado de Situación del trigo en Bolivia y el contexto internacional. CIPCA.
- Hoogendoorn, J. 1985. The basis of variation in date of ear emergence under field conditions among the progeny of a cross between two winter wheat varieties. *Journal of Agricultural Science* 104, 493–500
- INFOAGRO. 2013. El cultivo del trigo: Trigos precoces y tardíos. (En línea). Consulta: 19 septiembre 2013, www.infoagro.com.
- INIAF.2013. Programa Nacional de Trigo: Proyecto de Innovación Servicio Agrícolas (PISA).
- Jobet, C., Zuñiga, J., & Campos, Q. 2009. Mejoramiento molecular del trigo para calidad industrial. PROYECTO FONDEF, 7.
- Kilian, B. et al. 2007. Independent Wheat B and Genome Origins in Outcrossing Aegilops Progenitor Haplotypes. *Molecular Biology and Evolution* 2007 24(1):217-227
- King, R.W.; Richards, R.A. 1984. Water uptake in relation to preharvest sprouting damage in wheat: ear characteristics. *Australian Journal of Agric. Research* 35:327.
- Kosina, P.; Bell, M.; Ceja, J.; Jones. J. 2013. Doctor Trigo: Densidad óptima de siembra. CIMMYT. (En Línea) Consulta: 22 Julio 2014, <http://www.cimmyt.org/>
- Krüger, H. R.1992. *Manejo de suelos que sufrieron inundación temporaria*. EEA Bordenave.
- Lawlor, DW. y Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell and Environment* 25, 275–294.

- Levy, A. A. y Feldman, M. 2002. The Impact of Polyploidy on Grass Genome Evolution. *Plant Physiol*, December 2002, Vol. 130, pp. 1587-1593
- Lillemo, M.; Morris, CF. 2000. A leucine to proline mutation in puroindoline bis frequently present in hard wheats from Northern Europe. *Theoretical and Applied Genetics* 100:1100-1107.
- Lombardo L.A., M.M Nisi, M. Helguera. Efecto de la precocidad sobre la floración en una población segregante de rils de trigo pan. XLII Congreso Argentino de Genética – Salta, 20 al 23 de Octubre de 2013.
- Lopes MS, Reynolds MP, Manes Y, Singh RP, Crossa J, Braun HJ .2012. Genetic yield gains and changes in associated traits of CIMMYT spring bread wheat in a “historic” set representing 30 years of breeding. *Crop Sci* 52:1123–1131
- MACA. 2004. Estudio de identificación mapeo y análisis competitivo de la cadena productiva de trigo. La Paz-Bolivia. p.2
- MacRitchie, F. 1994. El papel de proteínas polímeras en la funcionabilidad harinera. En proteínas de la semilla de Trigo: Los aspectos moleculares y funcionales. Bitervo, Italia.
- Mamani, R. 2004 Evaluación de 10 variedades de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) en el altiplano central de Bolivia. Tesis de grado para optar el grado de ingeniero agrónomo. UMSA. La Paz – Bolivia. 110p.
- Martin, G. 2003. Cultivo del trigo. Cátedra de Forrajes y Cereales – FAZ - UNT.
- Miller, B., Afework, S., Pomeranz, Y., Bruinsma, B., & Cabina, G. 1982. Midiendo la dureza del trigo. *El mundo de la comida de cereal*. 27, 61-64.
- Miller, R., & Hosney, R. 1997. Factores responsables en harina de trigo duro para la reducción de galletas. *Cereal Chem*. 74, 330-336.
- Miralles, D. J. 2004. Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de Trigo. Mar del Plata: INTA Rafaela.

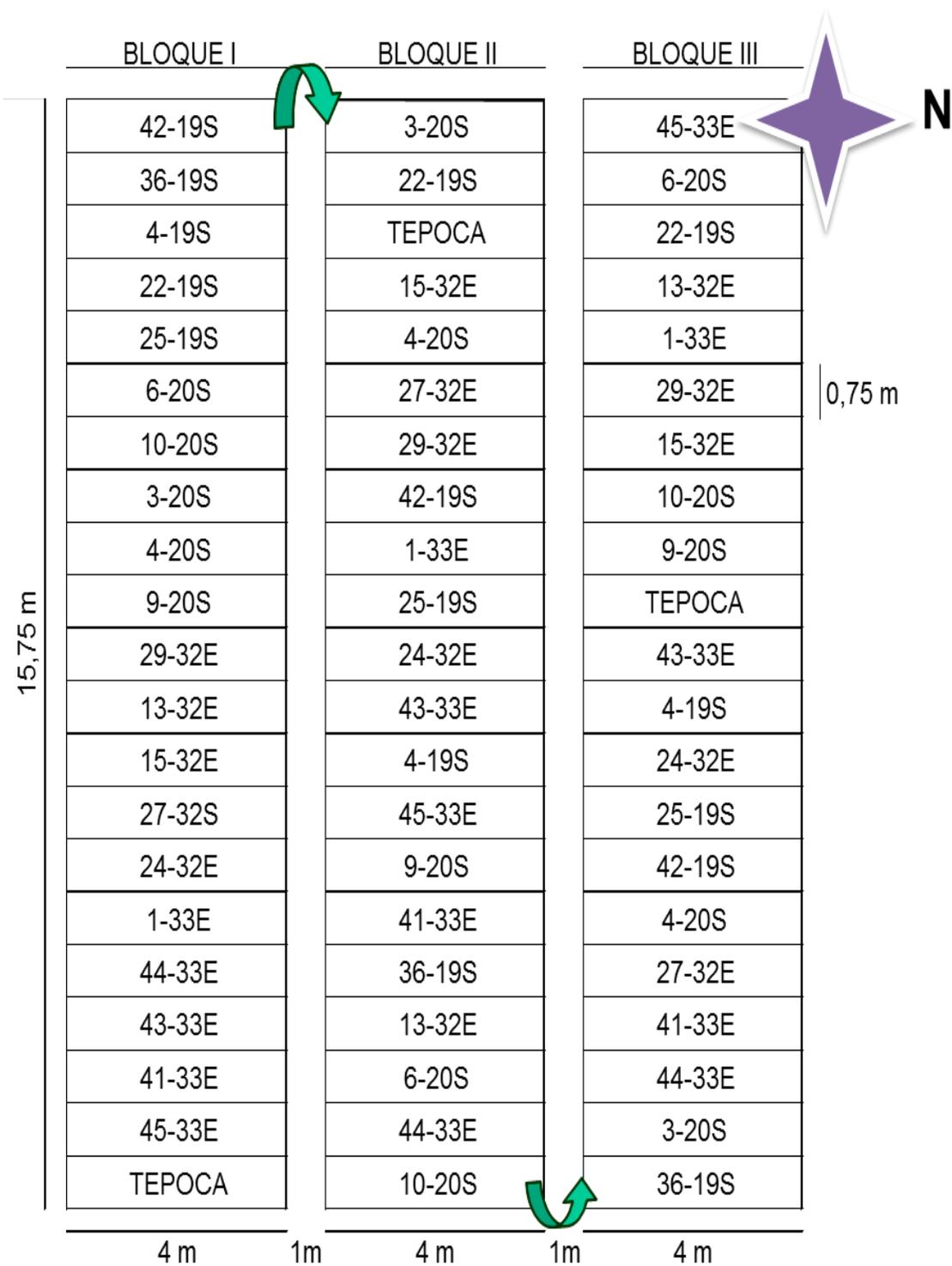
- Miralles, DJ. y Slafer, GA. 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *Journal of Agricultural Science* 145, 139–149.
- Miro y Bertolasi. 2009. Apoyo a los Procesos de Apertura e Integración al Comercio Internacional. ATN/ME-9565-RG BID-FOMIN: Tendencias del Mercado Internacional del Trigo. p.17.
- Moñocopa, L. 2012. Adaptabilidad de veinticinco líneas de trigo harinero (*Triticum aestivum*) en condiciones del altiplano norte del departamento de La Paz. Tesis Lic. Ing. Agr. Bolivia, Universidad Pública de El Alto. p. 30-55
- Morris CF.; Lillemo M.; Simeone MC.; Giroux MJ.; Babb SL.; Kidwell KK. 2001 Prevalence of puroindolines grain hardness genotypes among historically significant North American spring and winter wheats. *Crop Science* 41: 218-228.
- Nevo, E. et al. 2002. Evolution of wild emmer and wheat improvement. Springer Verlag 2002, Hardcover XXII + 364 pp. 59 figs., 85 tabs. ISBN 3540417508
- Nuttonson, M.Y. 1955. Wheat-climatic relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photothermal requirements of wheat. Washington, DC, American Institute of Crop Ecology.
- Ormachea. 2009. Soberanía y seguridad alimentaria en Bolivia: Políticas y estado de situación. Saavedra / CEDLA. La Paz, Bolivia. p.100
- Özkan, H. et al. 2002. AFLP Analysis of a Collection of Tetraploid Wheats Indicates the Origin of Emmer and Hard Wheat Domestication in Southeast Turkey. *Molecular Biology and Evolution* 19:1797-1801 (2002).
- Pedros y Cierco. 2012. Manual de buenas prácticas del modelo productivo catalán de trigo transferido al altiplano boliviano: Fomento a la transferencia tecnológica y de conocimiento a la fundación PROINPA en la cosecha del trigo. Potosi-Bolivia. p.19
- Percival, J. 1921. The wheat plant. A monograph. New York, NY, USA, E.P. Dutton & Company.

- Petersen, G. et al. 2006. Phylogenetic relationships of *Triticum* and *Aegilops* and evidence for the origin of the A, B, and D genomes of common wheat (*Triticum aestivum*). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 39 (2006) 70–82.
- Quispe, F. y Marza, F. 2012. Identificación de genotipos promisorios de trigo en el altiplano norte de Bolivia. *Biosfera*, I, 80-85.
- Rahman, M.S., Wilson, J.H. & Aitken, V. 1977. Determination of spikelet number in wheat. II. Effect of varying light level on ear development. *Austr. J. Agric. Res.*, 26: 575–581.
- Rajaram S, Borlaug, van Ginkel M. 2002. Food and agriculture organization of the United Nations: CIMMYT international wheat breeding. Roma. 156p.
- Rajaram S, van Ginkel M, Fischer RA. 1995. CIMMYT's wheat breeding mega-environments (ME). In: Proceedings of the 8th international wheat genetics symposium, July 19–24, 1993, Beijing.
- Ray, J. y Sinclair, T. 1998. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. *Journal of Experimental Botany* 49, 1381–1386.
- Rebetzke, G.J., Condon, AG. y Richards, RA. 2010. Genomic regions for canopy temperature and their genetic association with stomatal conductance and grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Functional Plant Biology* (submitted).
- Reynolds M.P., Pask A.J.D., Mullan D.M. y Chávez-Dulanto P.N. (Eds.) .2013. *Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para mejorar la adaptación del cultivo*. México, D.F.: CIMMYT.
- Ruiz Camacho. 1981. *Cultivo del Trigo y la Cebada*. Bogotá: Temas de Orientación Agropecuaria. ISBN 0049-3333. Bogotá-Colombia. s.p.
- Ruiz, Cotrina y De Neef. 2005. *Manual técnico del cultivo de trigo en la sierra: Plagas y enfermedades*. Cajamarca-Perú. p.15.

- Sanchez, J., .2008. Análisis ecofisiológico y molecular del impacto de la mejora genética del trigo duro en ambiente mediterráneo sobre la formación del rendimiento y la acumulación de aminoácidos y proteína. Tesis Doctoral. Granada. p.32
- Saunders, D.A. & Hettel, G.P., eds. 1994. Wheat in heatstressed environments: irrigated, dry areas and rice-wheat farming systems. Mexico, DF, CIMMYT.
- Savin, R.; Slafer, G.A. 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. *Journal of Agricultural Science* 116,1-7.
- Scarth, R. and Law, C.N. 1983. The location of the photoperiod gene Ppd2 and an additional genetic factor for ear emergence time on chromosome 2B of wheat. *Heredity* 51, 607-619.
- SENAMHI. 2014. SISMET Base de datos: Datos Mensuales (En línea). Consulta: 20 agosto 2014. <http://www.senamhi.gob.bo/sismet/index.php>
- Sharma RP, Crossa J, Velu G, Huerta-Espino J, Vargas M, Payne TS, Singh RP .2012. Genetic gains for grain yield in CIMMYT spring bread wheat across international irrigated environments. *Crop Sci* 52:1-12
- Skovmand, B. y S. Rajaram. 1990. Utilization of genetic resources in the improvement of wheat. En: *Wheat Genetic Resources: Meeting Oiverse Needs*. J.P. Srivastava y A.B. Damania, eds., pp. 259-268. John Wiley and Sons Ud., West Sussex, England.
- Skovmand, B., G. Varughese y G.P. Hettel. 1992. Los recursos genéticos de trigo en el CIMMYT: Su conservación, enriquecimiento y distribución. CIMMYT D.F. México.s.p.
- Slafer G.A., Miralles D.J., Savin R., Whitechurch E.M. y Gonzalez F.G. 2003. "Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo". En: Satorre, E., Benech-Arnold, R., Slafer, G.A., de la Fuente, E., Miralles, D., Otegui, M.E., y Savín, R. (eds), Editorial Facultad de Agronomía. p. 101-134. ISBN 950-29-0713-2
- Slafer, G.A.; Savin, R.; Calderini, O.F.; Miralles, O.J. 2002. Bases fisiológicas para el manejo y mejoramiento de cebada. En: *Actas del 111 Congreso Latinoamericano de Cebada*, INIA, Colonia -Uruguay, en prensa.

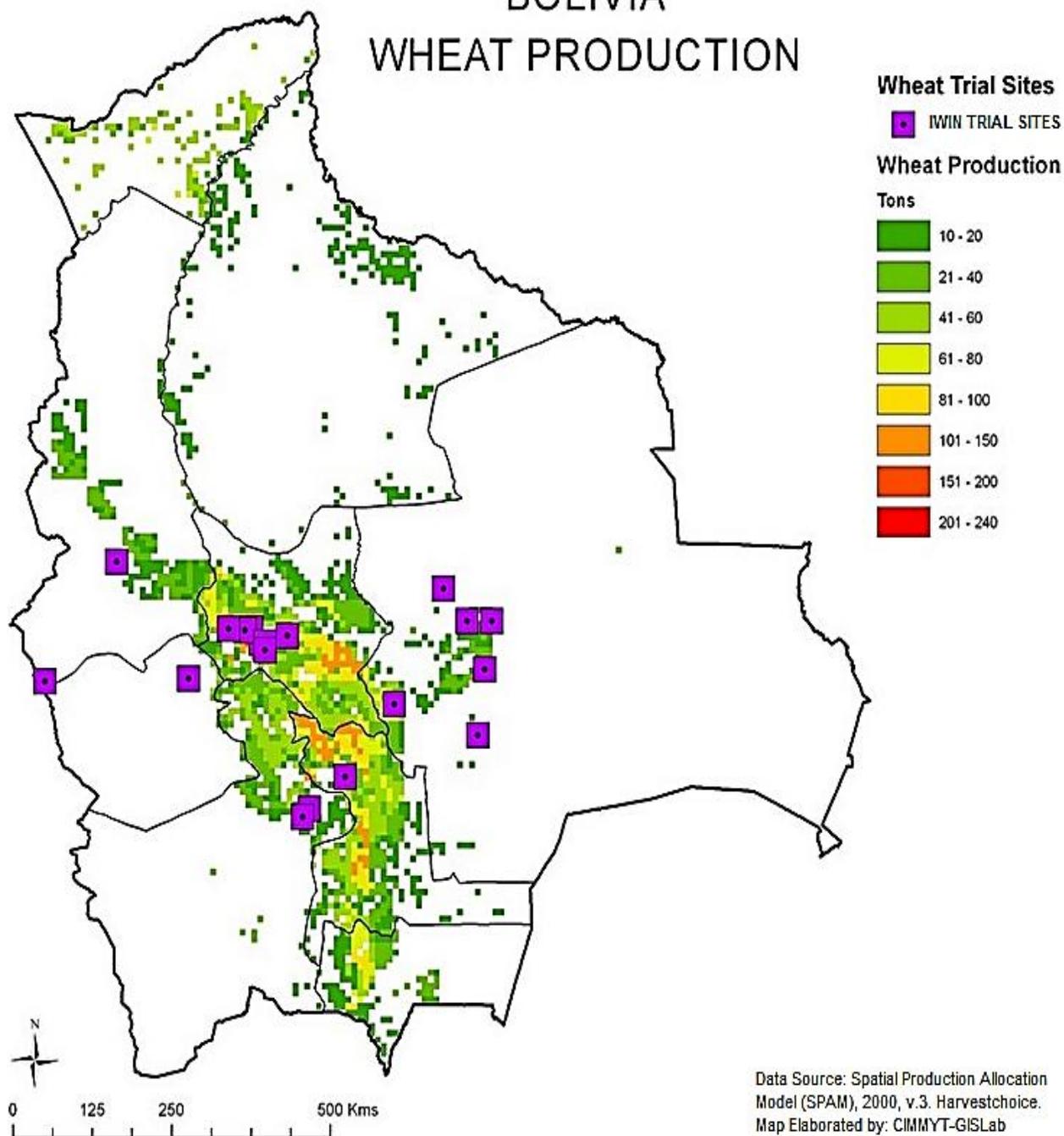
- Slafer, GA., Abeledo, LG., Miralles, DJ., González, FG. y Whitechurch, EM. 2001. Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. *Euphytica* 119, 191–197.
- Trethowan, R. 2006. Seminario: Definiendo ambientes de crecimiento de trigo y seleccionando a los mejores padres. CIMMYT
- Trethowan, RM., Hodson, D., Braun, H-J. y Pfeiffer, WH. 2005. Wheat breeding environments. In: Dubin, J., Lancan, MA. y Morris, ML. (Eds.) *Impacts of International Wheat Breeding Research in the Developing World, 1988–2002*. p 4–11. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Trethowan, RM., Reynolds, MP., Ortiz-Monasterio, JI. y Ortiz, R. 2007. The genetic basis of the green revolution in wheat production. *Plant Breeding Reviews* 28, 39–58.
- van Beem J, Mohler V, Lukman R, van Ginkel M, William M, Crossa J, and. Worland AJ. 2005. Analysis of Genetic Factors Influencing the Developmental Rate of Globally Important CIMMYT Wheat Cultivars. *Crop Science*, 45, 2113–2119.
- Velu, G., Singh R. P. 2013. Phenotyping in Wheat Breeding. *International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT)*. Mexico DF , Mexico e-mail: velu@cgiar.org
- Wang, J., van Ginkel, Trethowan y Pfeiffer . 2003. Documentation of the cimmyt wheat breeding programs. Wheat Program, CIMMYT, Apdo. Postal 6-641, 06600 Mexico, D.F., Mexico
- Wikipedia. 2013. *Triticum aestivum* L. (En línea). Consulta: 20 septiembre 2013, www.Wikipedia.org.
- Williams, M.H., Rosenqvist, E. y Buchhave, M. 1999. Response of potied miniature roses (*Rosa × hybrida*) to reduced water availability during production. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 74, 301–308.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res. (Oxf.)* 14, 415-421.
- Zeballos, H., Riveros, V., & Baldivia, J. 2011. Seguridad alimentaria en Bolivia. (F. Milenio, Ed.). (En línea). Consulta: 7 septiembre 2013, www.fundacion.milenio.org.

8. ANEXOS



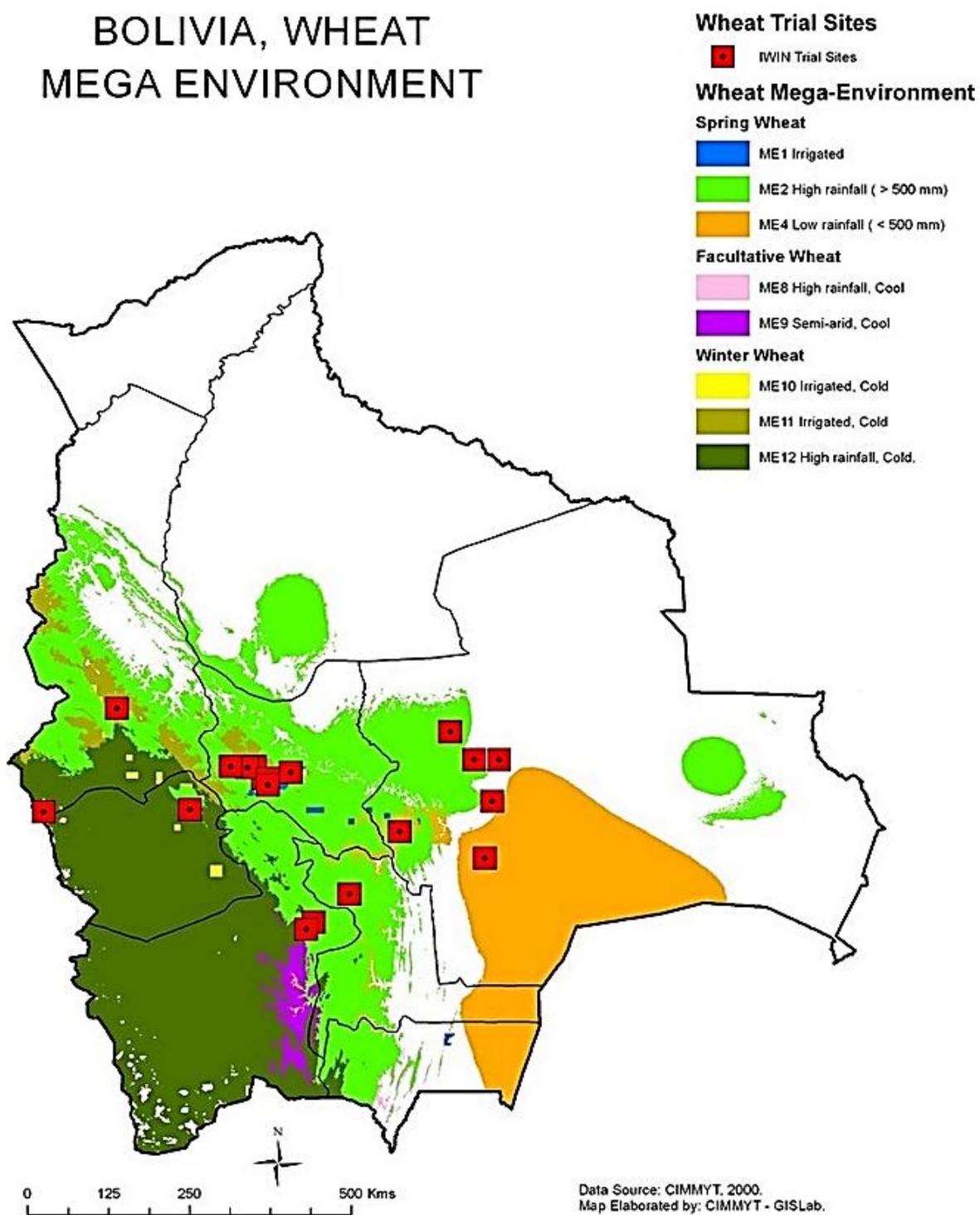
Anexo 1. Croquis del experimento

BOLIVIA WHEAT PRODUCTION

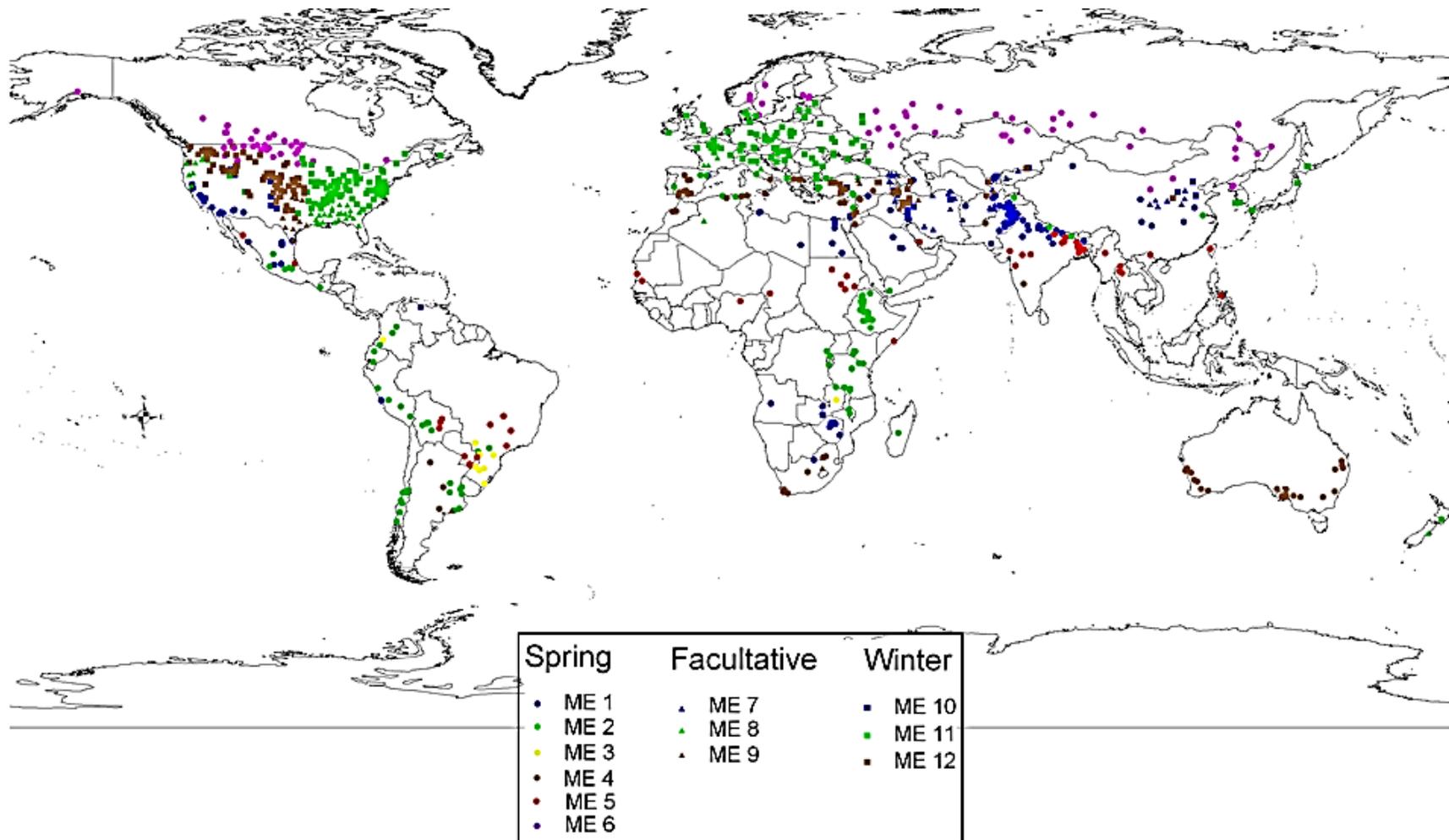


Anexo 2. Producción de trigo en Bolivia.

BOLIVIA, WHEAT MEGA ENVIRONMENT

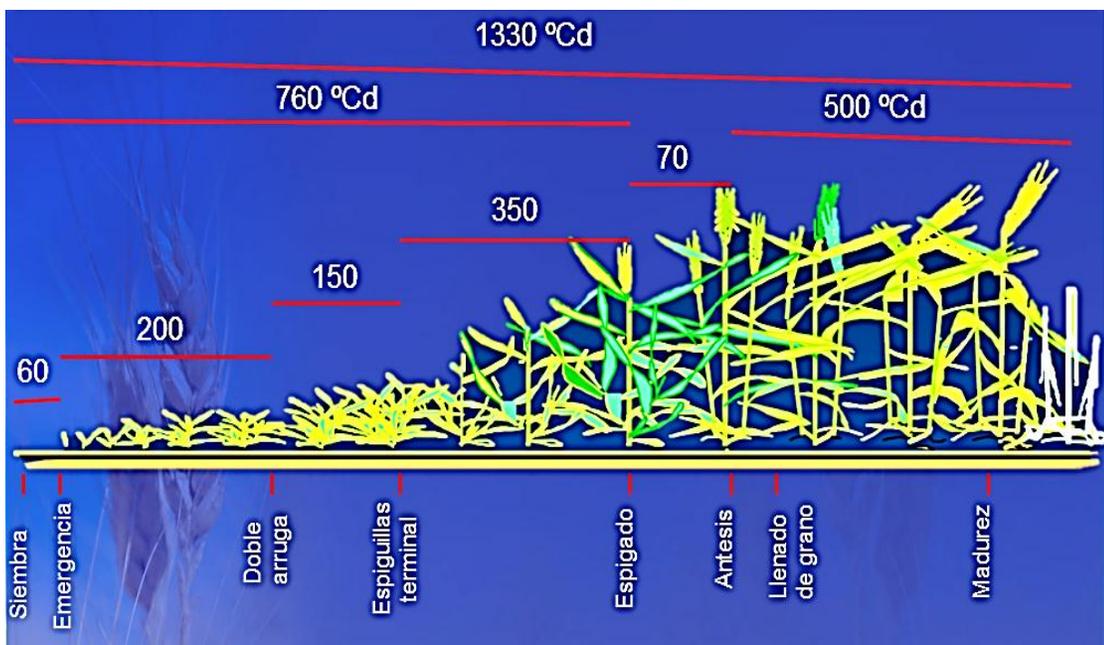


Anexo 3. Mapa de distribución de Mega-Ambientes de trigo en Bolivia definido por CIMMYT.

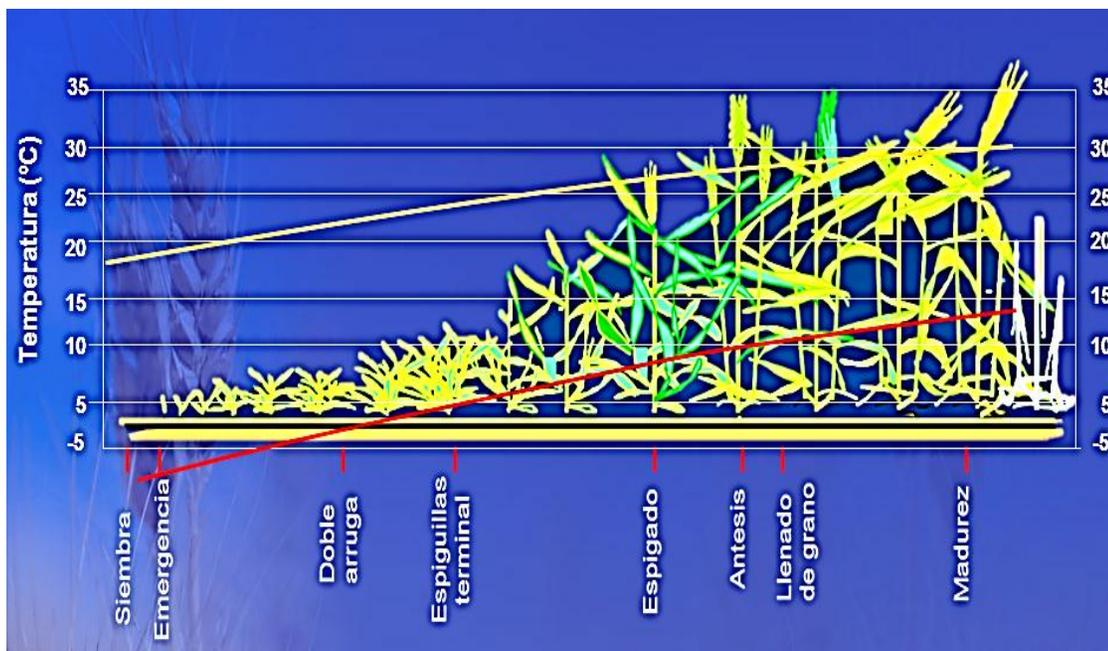


Anexo 4. Mega-Ambientes definidos por CIMMYT, para mejoramiento y producción del trigo en el mundo.

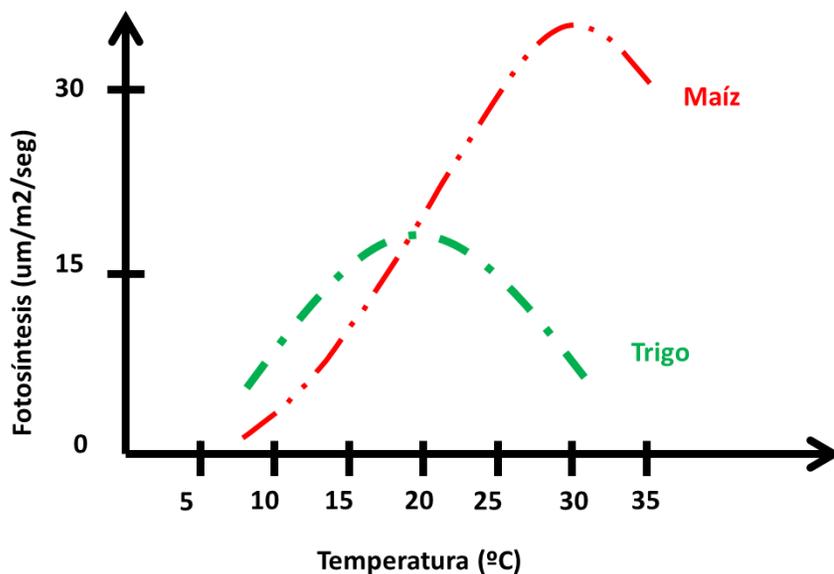
Fuente: CIMMYT (2014), <http://wheatatlas.org>



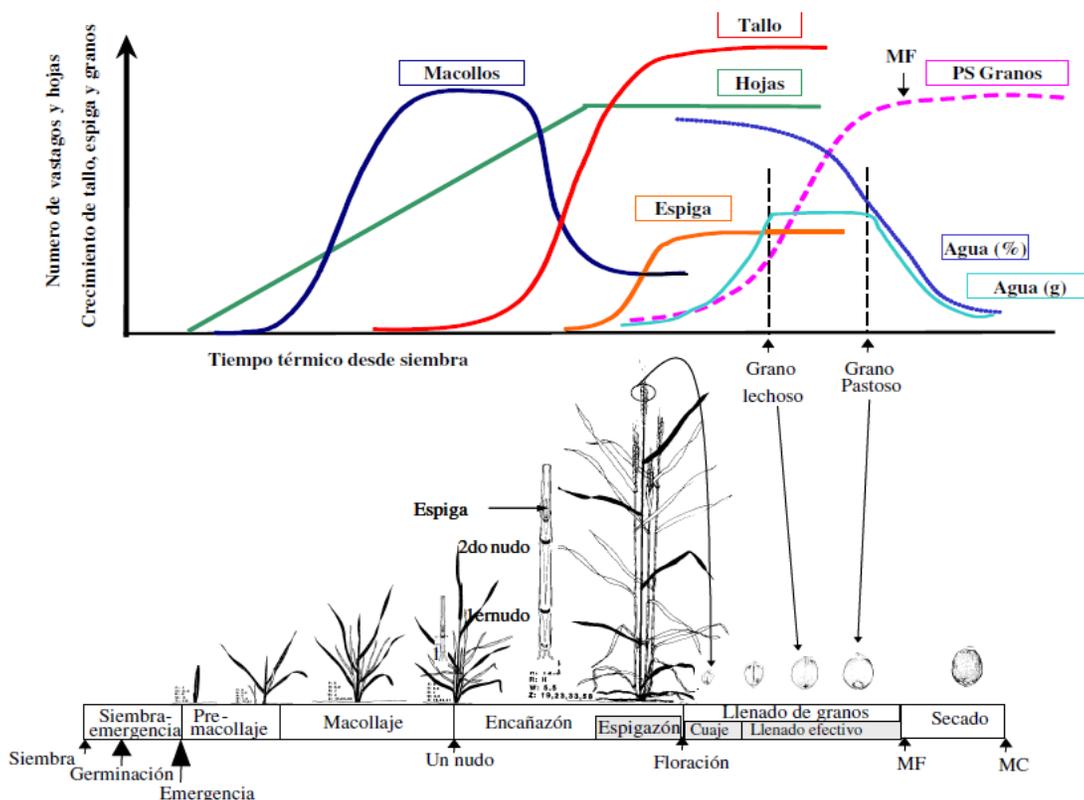
Anexo 5. Mínimo tiempo térmico requerido en las fases de desarrollo



Anexo 6. Cambios de las temperaturas base y óptima de acuerdo a las fases de desarrollo



Anexo 7. Temperatura y Fotosíntesis de la hoja (Adaptado de Larcher, 1980).



Anexo 8. Diagrama esquemático de algunos de los cambios más relevantes en la morfología externa del cultivo a lo largo de su ciclo de desarrollo (Slafer *et al.*, 2003).