



Caracterización y análisis de distintas especies de trigos ancestrales



Gabriela Sofia Ferraro

Universidad Nacional del Sur

Docente tutor: Dr. Pandolfo, Claudio Ezequiel

Docentes consejeros: Dr. Presotto, Alejandro Daniel y Dra. Ureta, María Soledad

Asesor externo: Ing. Agr. Natalia Belén Suarez

Agosto 2025





Agradecimientos

A mis hijos, Bianca y Alejo, razón y motor de cada uno de mis pasos, por bancarme en este desafío tan complejo. Ojalá este logro les sirva de ejemplo e inspiración para perseguir y cumplir sus propios sueños.

A Diego, mi compañero de vida, por su amor, admiración y quien ha sido mi apoyo incondicional en todo momento.

A mis padres, Silvia y Carlos, por su cariño y disposición constante para ayudarme en todo momento.

A Leo, por su cariño, apoyo y ayuda durante todos estos años de estudio y por hacerme sentir siempre parte de su familia.

A la Universidad Nacional del Sur, y en especial al Departamento de Agronomía, por el espíritu único que lo caracteriza y su calidez humana, que hizo de mi experiencia académica un recorrido enriquecedor tanto en lo profesional como en lo personal, además de brindarme una formación de excelencia. Extiendo mi agradecimiento a todos los docentes que me acompañaron a lo largo de mi paso por la universidad, quienes, con su sabiduría, paciencia y dedicación, contribuyeron de manera invaluable al conocimiento adquirido durante estos años.

A los amigos que hicieron que esta etapa sea única, con largas horas de cursada, estudio, de mate y viajes, compartiendo el mismo compromiso y entusiasmo por la agronomía.

A Nato, por cruzarse en mi camino, y brindarme con generosidad su apoyo y sabiduría, acompañándome en cada paso hasta culminar esta etapa.

A Claudio, por su constante predisposición y apoyo para realizar este trabajo respetando los tiempos que necesitaba.

A Sole, por su vocación, pasión y dedicación. Sus clases de genética lograron que un tema tan complejo se volviera divertido e interesante, despertando en mí un profundo interés por el mejoramiento, que orientó mi carrera universitaria y mi futura profesión.

A Alejandro, gran docente de esta carrera, y excelente persona quien siempre estuvo a disposición y me guió durante el proceso.



Índice

Agradecimientos	2
Índice	3
Introducción	4
Objetivos	9
Hipótesis:	9
Materiales y métodos	9
Descripción del material biológico	9
Diseño experimental	12
Análisis estadístico	14
Resultados	14
Altura	14
Número de macollos	15
Días a floración	16
Número de espiguillas.....	17
Número de granos por espiga	17
Análisis de componentes principales con variables de rendimiento	18
Análisis de componentes principales con total de variables	20
Discusión por especie	22
EINKORN.....	22
EMMER.....	24
ESPELTA.....	26
Conclusión	28
Bibliografía	30



Introducción

El trigo, junto con el maíz y el arroz, se encuentra entre los "tres grandes" cultivos de cereales, con más de 700 millones de toneladas cosechadas anualmente (FAO). Sin embargo, es inigualable en cuanto a su distribución geográfica, ya que se cultiva desde los 67° de latitud norte en Escandinavia y Rusia hasta los 45° de latitud sur en Argentina, incluyendo regiones elevadas en los trópicos y subtropicales (Feldman, 1995).

Es un alimento fundamental para la humanidad. A nivel mundial, miles de millones de personas dependen de él para una parte sustancial de su dieta. Debido a su alto contenido de almidón, que oscila entre el 60-70% en la harina integral y el 65-75% en la harina blanca, es una excelente fuente de energía. A pesar de que su contenido proteico es relativamente bajo (8-15%), su importancia en la nutrición humana radica en la cantidad consumida. Por lo tanto, su valor nutricional no debe subestimarse, especialmente en los países subdesarrollados, donde el pan, los fideos y otros derivados representan una proporción sustancial de la dieta (Golik, 2022).

El género *Triticum* consta de seis especies agrupadas en tres secciones según su nivel de ploidía:

- I. **Sección Monococcon** (diploides) incluye a:
 - A. *Triticum monococcum* y
 - B. *Triticum urartu* Tumanian ex Gandilyan, ambas con genoma AA.
- II. **Sección Dicoccoidea** (tetraploides) incluye a:
 - A. *Triticum turgidum* L. (genoma AABB) y
 - B. *Triticum timopheevii* (genoma AAGG).
- III. **Sección Triticum** (hexaploides) incluye a:
 - A. *Triticum aestivum* (genoma AABBDD) y
 - B. *Triticum zhukovskyi* (genoma AAAAGG).

En los estudios sobre el origen del trigo, fue muy importante la publicación en 2012 de la secuencia genómica completa del *Triticum aestivum*. Como primer punto se confirmó que el origen del genoma hexaploide tiene seis copias de genes en lugar de dos y es cinco veces más grande que el genoma humano. El mapa genético se consideraba un imposible dado su tamaño y la gran cantidad de secuencias repetitivas que contiene, sin embargo, el equipo internacional de investigadores del CSHL (Laboratorio Cold Spring Harbor) fue quien consiguió realizar el primer análisis del genoma en su totalidad. El mapa genético completo ha permitido conocer más detalles sobre su evolución a partir de variedades ancestrales (Zavala Páramo, 2013).

La tierra natal de *Triticum* y *Hordeum* se encuentra en el suroeste de Asia, y se estima que el momento de divergencia de los linajes del trigo y la cebada fue hace 13 millones de años (Gaut, 2002). La aloploidización mediante hibridación con una especie del género *Aegilops* fue la principal fuerza que condujo a la diversificación durante la evolución de las especies de *Triticum* (Tsunewaki, 2009) (Fig. 1). Las especies diploides con genoma AA (*T.*



monococcum y *T. urartu*) divergieron hace menos de un millón de años (Huang et al., 2002). Las tetraploides (genoma AABB y AAGG), en cambio, divergieron hace menos de medio millón de años, mediante hibridación entre *T. urartu* y *Aegilops speltoides* Tausch (genoma SS). En este proceso, se cree que ocurrieron dos eventos de hibridación independientes: uno asociado con el origen de *T. turgidum* (genoma AABB) y el otro con el origen de *T. timopheevii* (genoma AAGG) (Sarkar y Stebbins 1956, Shands y Kimber 1973, Chapman et al. 1976, Dvorak 1976, Dvorak et al. 1988, 1993, Ogihara y Tsunewaki 1988, Noda y Ge 1989, Dvorak y Zhang 1990, Miyashita et al. 1994, Huang et al. 2002, Kilian et al. 2007a). (Fig. 1)

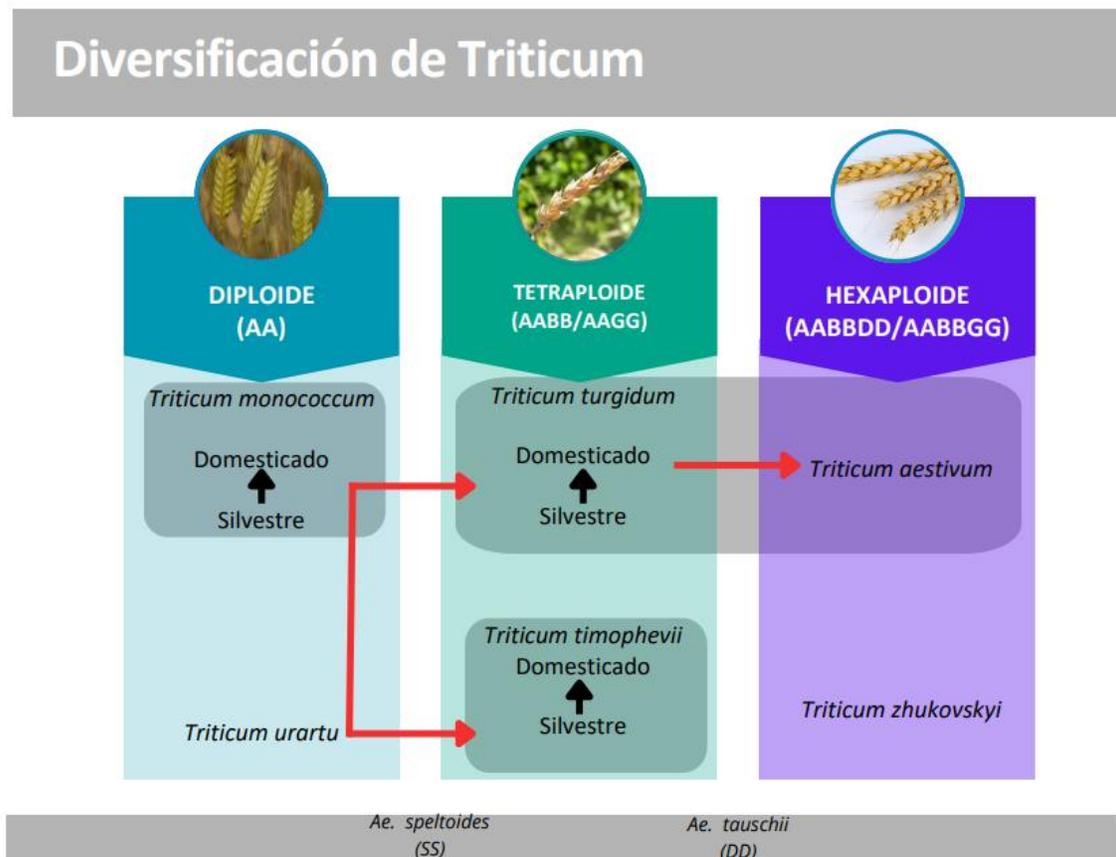


Figura 1. Resumen de la diversificación del género *Triticum*. Las flechas rojas indican los eventos de aloploidización de la especie *Aegilops* (mostrada en la parte inferior), mientras que la flecha verde indica el evento de aloploidización de la especie *Triticum*. Las flechas negras verticales indican los eventos de domesticación. Adaptado de Yoshihiro Matsuoka, 2011, *Evolution of Polyploid Triticum Wheats under Cultivation: The Role of Domestication, Natural Hybridization and Allopolyploid Speciation in their Diversification*, *Plant Cell Physiol*, volumen 52 (5), 750-764.

Durante el desarrollo de la agricultura, hace unos 10.000 años, se domesticaron los trigos tetraploides *Triticum turgidum* y *Triticum timopheevii*, cuyas formas cultivadas comenzaron a expandirse en la región conocida como la "Media Luna Fértil" (Feldman 2001, Salamini et al. 2002) (Figura 2). Esta zona abarca el Mediterráneo oriental, el sureste de Turquía, el norte de Irak, el oeste de Irán y regiones vecinas de Transcaucasia (Feldman, 2001; Salamini et al., 2002). Se estima que el cultivo del trigo se inició en el contexto de la Revolución Neolítica,



cuando las sociedades humanas comenzaron la transición de la caza y recolección hacia una vida agrícola sedentaria. En este periodo también fue domesticado el trigo diploide *Triticum monococcum*.

Los trigos hexaploides surgieron mediante hibridaciones naturales entre los cultivares tetraploides y especies diploides del género *Aegilops*. Se cree que *T. aestivum* (genoma AABBDD) se originó a partir de la hibridación entre *T. turgidum* y *Aegilops tauschii* (genoma DD) probablemente en un área del sur del Mar Caspio hoy en día Irán (Gepts, 2018). El genoma D le proporcionó al trigo la adaptabilidad a las duras condiciones ambientales de Asia Central, así como las proteínas que mejoraron las propiedades de la harina para la elaboración del pan, mientras que *T. zhukovskyi* (genoma AAAAGG) se formó por la hibridación entre *T. timopheevii* y *T. monococcum* en el Transcáucaso. Hasta la fecha, no se conocen formas silvestres de *T. aestivum* ni *T. zhukovskyi*, lo que confirma su origen cultivado (Kihara 1966, Dorofeev 1966, Dvorak et al. 1993).

Desde su origen, el trigo se expandió hacia el este de Asia y hacia el oeste, llegando a Europa hace unos 7.000 años. La hibridación natural entre *T. turgidum* y *Ae. tauschii* produjo híbridos triploides fértiles (F1), que luego experimentaron duplicaciones genómicas hasta alcanzar la hexaploidía. Este cambio puede haberse dado por meiosis no reduccional en gametos o por duplicación cromosómica somática. (Golik, 2022)

Los cultivos de trigo adquirieron varios rasgos morfológicos y fisiológicos distintivos respecto a sus ancestros silvestres, conocidos como "rasgos de domesticación". Estos tres rasgos principales son: (1) granos de mayor tamaño, (2) pérdida de la dispersión natural de semillas, los estudios genéticos indican que esto se debe a dos alelos recesivos en los cromosomas 3A y 3B, que dan lugar a un "raquis no frágil" y (3) trilla libre: caracterizada por glumas suaves y semillas sin cáscara, facilitando la cosecha. La mutación del alelo *Q* fue clave en este fenotipo y ocurrió una sola vez en la historia evolutiva del trigo (Jantasuriyarat et al., 2004; Simons et al., 2006; Dubcovsky & Dvorak, 2007).

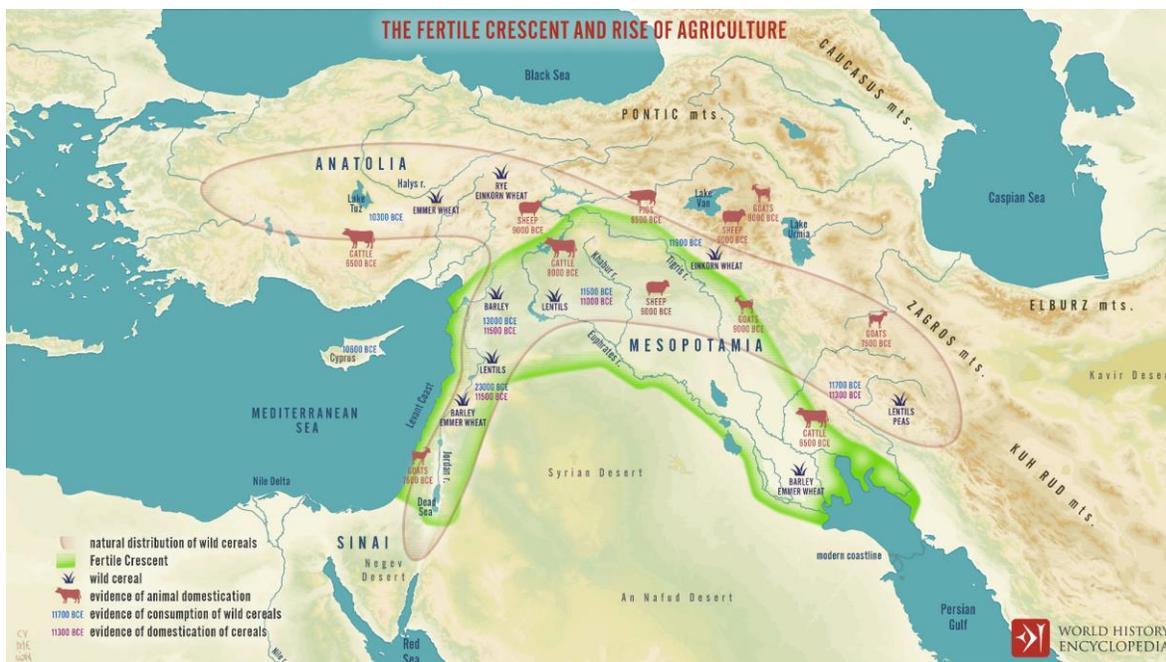


Figura 2. Representación del Creciente Fértil. Fuente: Gilo, T. (s.f.). *Creciente Fértil*. En *Enciclopedia de la Historia del Mundo*. Recuperado de <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-17/creciente-fertil/>

La introducción del cultivo en Argentina se remonta a la llegada de los primeros colonos, fue evolucionando hasta convertirse en una de las principales producciones del país en la actualidad.

El término trigo se refiere a los cereales cultivados y silvestres que pertenecen al género *Triticum*. El cereal, es destinado principalmente a la fabricación de pan y pastas. Una de las características clave que le ha otorgado ventaja sobre otros cultivos de clima templado es la capacidad única de sus harinas para formar masas con gluten, lo que permite la producción de una amplia gama de productos horneados, pastas y otros alimentos procesados (Shewry, 2009).

Actualmente, alrededor del 95% del trigo cultivado a nivel mundial es trigo harinero hexaploide (*T. aestivum*), mientras que el 5% restante corresponde al trigo duro tetraploide (*T. durum*), mejor adaptado al clima mediterráneo seco. A su vez, aún se cultivan pequeñas cantidades de especies antiguas como *Triticum monococcum* (einkorn), *Triticum dicoccum* (emmer) y *Triticum spelta* (espelta), en diversas regiones del mundo. Estos trigos ancestrales han sido reintroducidos en la agricultura ecológica debido a su valor nutricional y su mayor resistencia a enfermedades y condiciones adversas.

El trigo espelta (*Triticum spelta*) es un buen ejemplo de un trigo ancestral que ha recobrado importancia en los últimos años. Se diferencia fenotípicamente del trigo pan por presentar mayor altura y un grano vestido, lo que le confiere una protección natural contra patógenos y hongos como *Fusarium*, responsable de la síntesis de micotoxinas. Estudios realizados por el INTA y la CEI Barrow han demostrado que el trigo espelta presenta diferencias significativas en su ciclo de floración, sanidad y fertilidad de las espiguillas en comparación con el trigo pan, lo que resalta la necesidad de mejorar su rendimiento y adaptación



agronómica. En términos de calidad comercial e industrial, el trigo espelta presenta mayor contenido de gluten (>24.5%), elasticidad en las masas y un mayor volumen de pan, además de mayores niveles de fibra y minerales esenciales como fósforo y sodio. Su grano vestido facilita la obtención de harinas integrales con alto valor nutricional, contribuyendo a la inocuidad alimentaria y a la sostenibilidad agrícola (Di Pane, Mir, Ormando, y Molfese, 2024)

El mejoramiento genético del trigo espelta debe enfocarse en la reducción de la altura de la planta para minimizar el vuelco y en el aumento del rendimiento por superficie. Asimismo, la creciente preferencia de los consumidores por cereales integrales y productos con alto valor nutricional ha impulsado la demanda de trigos ancestrales, abriendo nuevas oportunidades para su aprovechamiento comercial.

En Argentina, la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) ha desempeñado un papel clave en el mejoramiento genético del trigo, con casi cinco décadas de investigación. Gracias al contacto con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), se ha logrado una mayor variabilidad de germoplasma, permitiendo la obtención de cultivares con mejor rendimiento, resistencia al vuelco y mayor tolerancia a enfermedades. En 2013, la implementación de tecnologías como la obtención de haploides duplicados ha permitido reducir el tiempo de desarrollo de nuevas variedades de 15 a sólo 9 años, mientras que el uso de marcadores moleculares ha optimizado la selección genética, permitiendo marcar partes específicas del ADN (Leandro Ortiza y Alejandro Masagué, 2024).

Se prevé que el aumento en la producción continuará y que la herramienta genética seguirá siendo importante para el desarrollo de nuevos cultivares con mayores rendimientos o mejor adaptados para el cultivo en áreas marginales o no tradicionales. En este sentido, existen limitantes, ya que el material genético de los trigos cultivados ha sido utilizado dentro de los métodos convencionales de mejoramiento hasta casi su límite (Golik, 2022). Ello ha traído aparejada una reducción en la variación genética de los trigos cultivados, que no solo dificulta la obtención de cultivares de mayor rendimiento, sino que también acrecienta la vulnerabilidad de la producción frente a factores adversos. Por lo tanto, es fundamental explorar fuentes alternativas de variabilidad, como la incorporación de genes de especies silvestres y ancestrales que puedan conferir adaptabilidad a distintos ambientes, resistencia a enfermedades o mejoras en la calidad del grano, asegurando la sostenibilidad de la producción triguera frente a los desafíos futuros.

Es fundamental también considerar la importancia económica de este cereal, que desempeña un papel estratégico en la economía argentina, con la provincia de Buenos Aires aportando el 50% de la producción nacional. La cadena triguera genera aproximadamente el 10% del empleo agroindustrial del país. Las exportaciones promedian más de 10 millones de toneladas anuales, equivalentes a aproximadamente US\$ 2,600 millones, posicionando a Argentina como el octavo exportador mundial de trigo. Dado su impacto resulta esencial la implementación de políticas integrales que fomenten la investigación y el desarrollo de cultivos resilientes y de alta calidad (Bolsa de Comercio de Rosario, 2025).

En este contexto, el estudio de los genes ancestrales del trigo resulta esencial para el desarrollo de cultivares con mayor rendimiento, mejor calidad nutricional y resistencia a condiciones ambientales desfavorables. La preservación y el aprovechamiento de la



diversidad genética del trigo representan herramientas clave para afrontar los desafíos del cambio climático y contribuir a la seguridad alimentaria a nivel global. Alimentar a la población mundial en 2050 representa uno de los mayores desafíos de la humanidad, ya que se espera que la población supere los 9.000 millones de personas. Un dato relevante es que entre 1975 y 2022 se duplicó el número de habitantes de 4 a 8 mil millones. Esto sigue en constante aumento y es un reto y una responsabilidad para nosotros, como profesionales agrónomos, incrementar significativamente la producción de alimentos. Dado que la expansión de tierras cultivables no es viable, ya que, todas las tierras cultivables están en uso y la utilización de insumos agrícolas, como fertilizantes y pesticidas, se ha vuelto costoso y ambientalmente problemático, la principal vía de mejora radica en el aumento de la productividad de los cultivos.

La conservación del germoplasma de variedades primitivas aún presentes podría ayudar a mitigar la pérdida de diversidad genética. No obstante, para enriquecer de manera significativa el acervo genético del trigo, es fundamental recurrir a los amplios recursos genéticos que ofrecen sus parientes silvestres. Estas especies emparentadas con el trigo, capaces de cruzarse con variedades domesticadas, pueden aportar características deseables, como una mayor calidad y cantidad de proteínas en el grano, resistencia a plagas, sequías, encamado, temperaturas extremas y salinidad. Incluso, algunas especies pueden contribuir a mejorar el rendimiento del cultivo.

El aprovechamiento de estos recursos genéticos requiere la aplicación de métodos adecuados que permitan transferir genes específicos sin arrastrar ADN indeseable. En este sentido, estudios como el presente trabajo, que buscan comparar y caracterizar diferentes especies, resultan fundamentales para orientar estrategias de mejoramiento.

Objetivos

1. Caracterizar fenotípicamente una colección de genotipos pertenecientes a tres especies de trigo ancestral —*einkorn*, *emmer* y *espelta*— mediante el análisis de rasgos morfológicos en distintas etapas del desarrollo vegetal y reproductivo.
2. Comparar las características observadas en los trigos ancestrales con las de cultivares modernos para determinar su potencial uso en programas de mejora genética.

Hipótesis:

Los trigos ancestrales presentan una variabilidad morfológica significativa en sus estructuras vegetativas y reproductivas, lo que permite su caracterización fenotípica y diferenciación respecto a los cultivares modernos de trigo pan y candeal. Esta caracterización constituye una base útil para su identificación, conservación y potencial aprovechamiento en programas de mejoramiento genético.



Materiales y métodos

Descripción del material biológico

En este estudio se analizaron y caracterizaron las espigas y los granos provenientes de una colección de trigo obtenida del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), que cuenta con un total de 100 ejemplares. Las especies incluidas en la colección fueron tres, con 13 subespecies:

Diploides:

- *Triticum monococcum*:
 - *Triticum monococcum* subsp. *aegilopoides*
 - *Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*

Tetraploides:

- *Triticum turgidum*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *carthlicum*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccoides*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *dicoccon*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *durum*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *palaeocolchicum*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *polonicum*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *turanicum*
 - *Triticum turgidum* L. subsp. *turgidum*

Hexaploides:

- *Triticum aestivum*
 - *Triticum aestivum* L. subsp. *aestivum*
 - *Triticum aestivum* L. subsp. *compactum*
 - *Triticum aestivum* L. subsp. *macha*
 - *Triticum aestivum* L. subsp. *spelta*
 - *Triticum aestivum* L. subsp. *sphaerococcum*



Todas las subespecies fueron sembradas en el ensayo; sin embargo, las silvestres no lograron mantener sus granos adheridos al raquis, por lo que no fueron incluidas en el análisis. En algunos casos, la cantidad de granos obtenida fue insuficiente, por lo que se reservó el material para realizar una multiplicación y repetir el ensayo el próximo año a mayor escala. Por estas razones, de las tres especies iniciales, únicamente se analizaron una subespecie de cada una: *Triticum monococcum* subsp. *monococcum*, *Triticum turgidum* subsp. *dicoccon* y *Triticum aestivum* subsp. *spelta* (conocidas como trigo *einkorn*, *emmer* y *espelta*, respectivamente). Se tomaron de la misma colección como subespecies control a *Triticum turgidum* subsp. *durum* (trigo candeal) y *Triticum aestivum* subsp. *aestivum* (trigo pan).

T. monococcum subsp. *monococcum*:

- El trigo *einkorn* domesticado es una de las primeras formas de trigo cultivado por el ser humano y representa un hito clave en la historia de la agricultura. Derivado de su ancestro silvestre (*T. monococcum* subsp. *aegilops*), se distingue por haber adquirido rasgos morfológicos y genéticos asociados a la domesticación, como el raquis no frágil, que evita la dispersión espontánea de las espiguillas, y una mayor uniformidad y tamaño de grano, lo cual facilita su cosecha y procesamiento (Dubcovsky & Dvorak, 2007; Pourkheirandish & Komatsuda, 2007). Esta subespecie fue domesticada en la región del Creciente Fértil, en el sureste de Turquía (región de Karacadağ).

El *einkorn* domesticado se caracteriza por espigas compactas con raquis no frágil, granos más grandes y con mayor contenido nutricional que su contraparte silvestre, y trilla difícil, ya que los granos permanecen cubiertos por las glumas, aunque en menor grado que en las formas silvestres. Genéticamente, se trata de un diploide con genoma AA ($2n = 14$) (Ling et al., 2018; Avni et al., 2017). A pesar de haber sido reemplazado en gran parte por trigos tetraploides y hexaploides más productivos, como *T. durum* y *T. aestivum*, el *einkorn* domesticado se sigue cultivando en algunas regiones montañosas de Europa y Asia por su valor nutricional, rusticidad y resistencia a enfermedades (Zaharieva & Monneveux, 2006; Giancaspro et al., 2022).

T. turgidum subsp. *dicoccon*:

- El trigo *emmer* domesticado (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccon*) es un trigo tetraploide (AABB, $2n=28$) producto de la hibridación entre *Triticum urartu* y un pariente cercano de *Aegilops speltoides* (Dvorak et al., 1993; Özkan et al., 2001). Su raquis no es frágil, siendo más adecuado para la recolección y granos cubiertos por glumas. Fue un cereal clave en la agricultura del Neolítico y Edad del Bronce, cultivado ampliamente en el Levante, Anatolia y Europa sudoriental, aunque su uso declinó frente a trigos más fáciles de procesar como *T. durum* (Nesbitt & Samuel, 1996). En la actualidad representa menos del 1% de la producción mundial de trigo, sigue utilizándose en la elaboración de panes, sémola, sopas tradicionales y, en algunas regiones, para la producción de *focaccia* y pasta (Faris, 2014).

T. turgidum subsp. *durum*:



- Conocido como trigo candeal o trigo duro, es tetraploide (genoma AABB, $2n=28$) y se caracteriza por tener espigas con raquis no frágil, granos sin glumas adheridas (trilla libre), lo que facilita significativamente la cosecha y procesamiento (Salamini et al., 2002). Evolucionó a partir del *emmer* domesticado y surgió hace aproximadamente 7500 años en la región oriental del Mediterráneo. Representa entre el 5 y 7% de la producción mundial de trigo y es ampliamente utilizado en la producción de pasta debido a su molienda específica que genera sémola en lugar de harina (Matsuoka, 2014). El color es más amarillento debido a su alto contenido en carotenoides, le da un tono dorado a las pastas. La sémola es de mayor grosor que la harina, tiene un alto valor de proteína pero con un gluten más rígido y menos elástico, siendo así perfectos para que las pastas no se pasen en la cocción. Además se lo utiliza en la preparación de panes densos como el *pane di Altamura* en Italia o la *focaccia*.

T. aestivum subsp. *aestivum*:

- Es un trigo hexaploide (genoma AABBDD, $2n=42$) resultado de una hibridación natural entre el trigo tetraploide (*Triticum turgidum*) y la especie *Aegilops tauschii* (genoma D). Es la variedad más cultivada a nivel mundial, utilizada para la producción de harina y pan, ya que contiene gluten, es decir, una red compuesta de proteínas llamadas gliadinas (que aportan extensibilidad a las masas) y gluteninas (las cuales imparten cohesividad, para resistir el amasado), que le dan al trigo pan su peculiar aptitud para formar masas leudadas, que retienen los gases formados durante la fermentación. Se generan así panes de gran volumen, miga esponjosa y corteza de buen color. Se caracteriza por espigas con raquis no frágil, granos libres de glumas (trilla libre).

T. aestivum subsp. *spelta*:

- Conocida como espelta, es una variedad hexaploide (AABBDD, $2n=42$) estrechamente relacionada con el trigo común, pero que conserva características primitivas, como glumas más adheridas y espigas más densas que dificultan la trilla (trigo cubierto o *hulled wheat*) (Dubcovsky & Dvorak, 2007). Originado a partir del trigo pan mediante hibridación con *emmer*, Aunque su producción es menor que la del trigo común, la espelta está ganando interés en la agricultura ecológica y mercados de alimentos saludables por su perfil nutricional y sabor característico (Hübner et al., 2013). Aunque contiene gluten, su composición proteica difiere de la del trigo común. Las gliadinas y gluteninas de la espelta generan una red de gluten menos tenaz y elástica, lo que puede facilitar la digestión para algunas personas sensibles (Hübner et al., 2013; Ruibal-Mendieta et al., 2005). Sus tallos son de mayor longitud, por lo tanto susceptible al encamado.

Diseño experimental

El ensayo se llevó a cabo durante el año 2024 en los invernaderos del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur, en Bahía Blanca. El 13 de junio, se realizó



la pregerminación de 54 genotipos de trigo en bandejas alveoladas plásticas, bajo condiciones controladas de 20 °C, con un fotoperíodo de 12 horas de luz diaria y riego hasta alcanzar capacidad de campo.

El 18 de junio, las plántulas germinadas fueron trasplantadas a macetas individuales. En cada maceta se colocaron dos repeticiones del mismo genotipo.

A continuación, se detalla la distribución de macetas por grupo:

- **Controles:**
 - Trigo pan (*T. aestivum subsp. aestivum*): dos genotipos (AES 1 y AES 2), sembrados en 10 macetas (5 de cada una).
 - Trigo candeal (*T. turgidum subsp. durum*): seis genotipos sembrados en 30 macetas, con 5 macetas por genotipo: DUR 2, DUR 3, DUR 5, DUR 6, DUR 7 y DUR 8.
- **Material experimental:**
 - *Einkorn* (*T. monococcum subsp. monococcum*): cinco genotipos (MON 1 a MON 5) sembrados en 21 macetas: MON 1 (4 macetas), MON 2 (5), MON 3 (3), MON 4 (5), MON 5 (4).
 - *Emmer* (*T. turgidum subsp. dicoccon*): diez genotipos, con 5 macetas por genotipo, totalizando 50 macetas: DCO 1, DCO 2, DCO 3, DCO 4, DCO 5, DCO 6, DCO 8, DCO 9, DCO 10 y DCO 12.
 - *Espelta* (*T. aestivum subsp. spelta*): siete genotipos (SPE 1, 2, 4, 6, 8, 11 y 12), sembrados en 31 macetas: SPE 1 (5 macetas), SPE 2 (2), SPE 4 (5), SPE 6 (5), SPE 8 (4), SPE 11 (5), SPE 12 (5).

Se registraron el porte y la fecha de floración de cada planta. La cosecha se realizó el 13 de diciembre, recolectando cada repetición en bolsas de papel. Se efectuó un corte en el tallo, conservando la espiga, el tallo y la hoja bandera completos.

En el laboratorio se registraron los siguientes caracteres morfológicos:

- **Características de la planta:** altura total, número de macollos y porte.
- **Características de la hoja bandera:** longitud y ancho de la lámina, presencia de pubescencia en la aurícula y en la lámina.



- **Características de la floración y fructificación:** posición de la espiga, longitud y densidad de la espiga, tipo de aristas, color y pubescencia de las glumas, número de espiguillas por espiga y número de granos por espiga.
- **Características del grano:** color y forma del grano, longitud y ancho, textura del endosperma y peso de mil granos.

Para llevar a cabo estas mediciones, las espigas de las plantas fueron trilladas individualmente, analizando cada una de sus partes en el momento del procesamiento. Los granos obtenidos, se pesaron para estimar su peso de mil granos y se conservaron en sobres de papel con el fin de utilizarlos para siembra en el siguiente año, permitiendo así la continuidad de los estudios.

Análisis estadístico

En primer lugar, para evaluar distintas variables, se realizaron análisis de varianza (ANOVA). Aquellos que resultaron significativos fueron analizados posteriormente mediante el test de comparaciones múltiples de Tukey. Además, se llevó a cabo un análisis multivariado mediante gráficos de componentes principales (PCA). Todos los análisis se realizaron utilizando los programas *InfoStat* y *Microsoft Excel*.

Resultados

Altura

El análisis de varianza reveló diferencias significativas en la altura promedio entre subespecies ($F = 9.34$, con un valor de $p < .0001$, lo que indicó que al menos una subespecie difirió significativamente de las otras en cuanto a la altura media.

La prueba de Tukey (Figura 3) mostró que el trigo *einkorn* (MON) se diferenció significativamente del *emmer* (DCO), espelta (SPE) y candeal (DUR), pero no del trigo pan (AES).

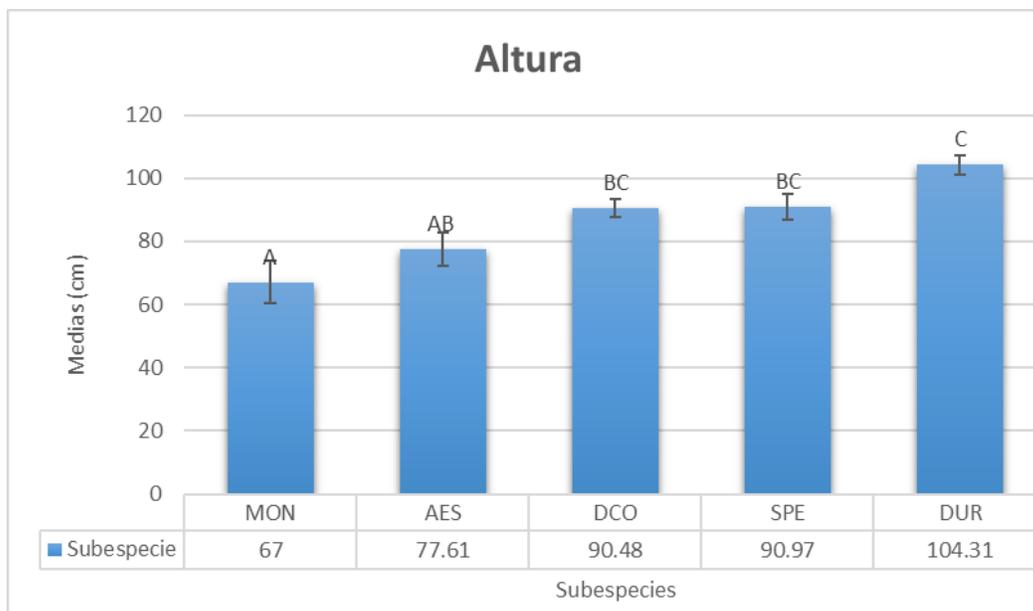


Figura 3.

Altura promedio (cm) por subespecie. Letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ($p < .05$).

El trigo emmer y espelta tuvieron una altura superior, aunque no significativa, respecto al trigo pan (AES), como era esperable, por ser trigos más antiguos, la mayoría de las variedades actuales poseen genes de enanismo (Rht), los cuales aumentaron la partición a la espiga, por lo tanto, su rendimiento y la tolerancia al vuelco debido a una reducción de la altura. El trigo einkorn, fue similar al trigo pan y significativamente menor al trigo candeal

Número de macollos

Se identificaron diferencias significativas entre subespecies en cuanto al número de macollos por planta ($F = 7.96, p < .001$). El análisis de Tukey (Figura 4), mostró que los controles AES y DUR presentaron la menor cantidad de macollos, con diferencias significativas en comparación con las subespecies espelta y *einkorn*. Asimismo, ambos controles exhibieron una similitud parcial con el trigo *emmer*.

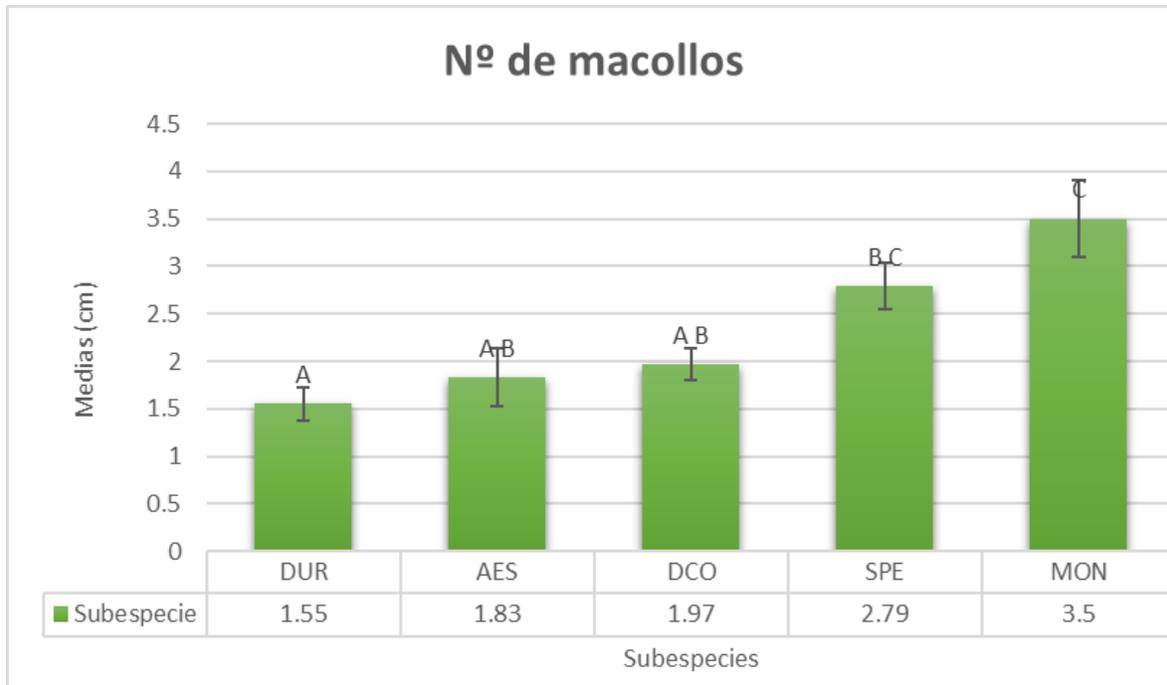


Figura 4.

Número promedio de macollos por subespecie. Letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ($p < .05$).

La menor cantidad de macollos en DUR y AES, puede relacionarse a la domesticación y posterior mejoramiento que redujo el número de macollos y espigas, para centrar la asignación de recursos en el tallo principal. El mayor macollaje observado en *T. monococcum*, significativamente superior al de *T. dicoccon*, podría estar asociado a una menor competencia por recursos debido al menor tamaño de planta.

Días a floración

Según el registro de los días hasta la floración, el análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias altamente significativas entre las subespecies ($F = 23.21$, $p < 0.001$). El test de Tukey (Figura 5) resultó en que SPE y AES presentaron los valores más bajos, con diferencias significativas respecto a *emmer* y *einkorn*. El trigo candeal, mostró una similitud parcial con SPE, AES, y también con DCO, pero no con el trigo einkorn, el cual presentó el mayor número promedio de días a floración y se diferenció significativamente del resto de las subespecies.

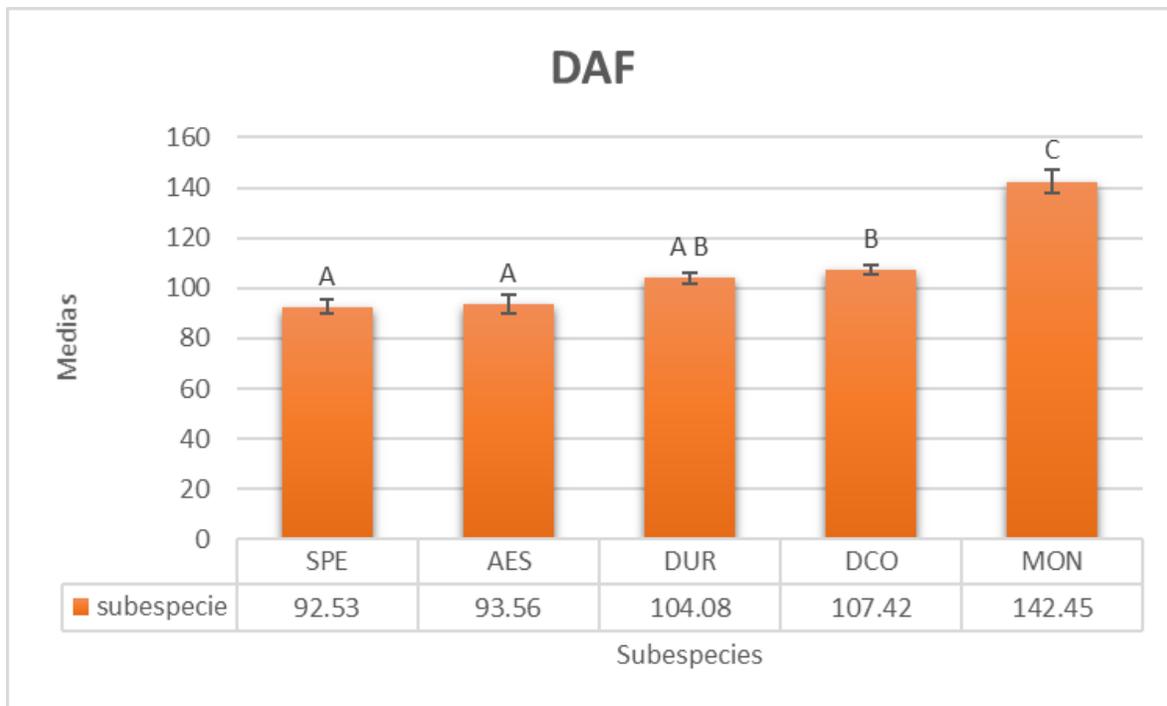


Figura 5.

Promedio de días a floración por subespecie. Letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ($p < .05$).

El trigo *einkorn* mostró una floración significativamente más tardía que el resto de las especies, lo cual es coherente con su menor grado de domesticación y su ciclo vegetativo más prolongado.

En cambio, los trigos hexaploides (*T. aestivum* y *T. spelta*), con un mayor grado de domesticación, presentaron una floración significativamente más temprana, lo que refleja una estrategia de desarrollo más acelerada, posiblemente seleccionada durante el proceso de mejoramiento genético. Las especies tetraploides (*T. durum* y *T. dicoccon*) se ubicaron en una posición intermedia, aunque el trigo candeal no tuvo diferencias significativas respecto a los hexaploides.

Número de espiguillas

Se detectaron diferencias significativas entre subespecies en el número de espiguillas ($F = 3.05$, $p = .02$). La prueba de Tukey (Figura 6) reveló que DCO presentó el menor número promedio de espiguillas, diferenciándose estadísticamente del trigo pan, que mostró el valor más alto. Por su parte, el trigo candeal, espelta y *einkorn* exhibieron valores intermedios, sin diferencias significativas respecto a DCO ni a AES.

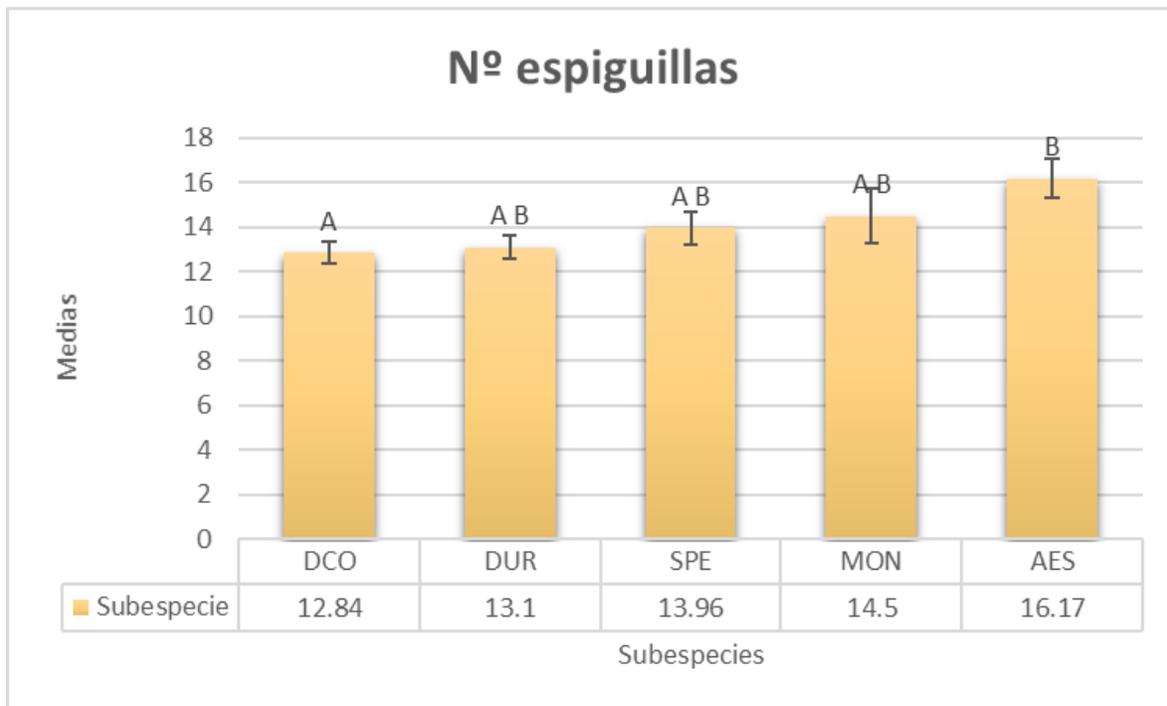


Figura 6.

Número promedio de espiguillas por subespecie. Letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ($p < .05$).

El menor número de espiguillas observado en el *emmer* podría estar asociado a su menor tamaño de espiga, mientras que el valor más alto registrado en el trigo pan refleja una mayor eficiencia en la producción de granos, posiblemente como resultado de la selección artificial. Resulta llamativo que el trigo *einkorn* presente uno de los promedios más altos en número de espiguillas; probablemente, al tener un solo grano por espiguilla, la espiga de *einkorn* puede alojar una mayor cantidad de espiguillas, lo que explicaría este resultado. Las posiciones intermedias observadas en espelta y candeal podrían deberse a un menor grado de mejoramiento genético o a diferencias en los patrones de ramificación del raquis.

Número de granos por espiga

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas entre las subespecies ($F = 6.03$, $p < 0.001$). Según la prueba de Tukey (Figura 7) MON presentó el valor promedio más bajo, diferenciándose significativamente del trigo pan, pero no de *emmer*, candeal ni espelta. DCO y DUR no mostraron diferencias significativas ni con MON ni con SPE, pero sí con AES. Por su parte, SPE presentó una media superior, sin diferencias significativas respecto al trigo pan, que exhibió el promedio más alto.

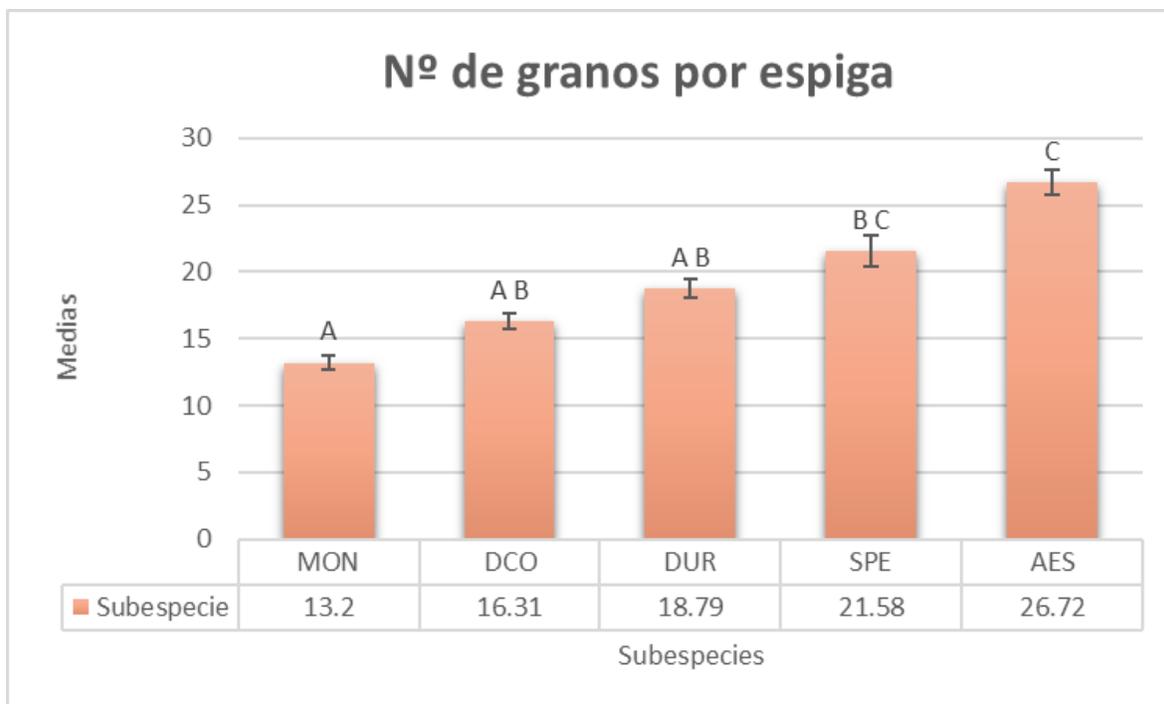


Figura 7.

Número promedio de granos por espiga por subespecie. Letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ($p < .05$).

Como era esperable, el trigo pan mostró el mayor número de granos por espiga, seguido del espelta. Ambas subespecies hexaploides presentaron valores significativamente superiores al resto, lo que refuerza la idea de que los trigos con mayor grado de domesticación, especialmente el trigo pan, han sido seleccionados para maximizar la fertilidad y el llenado de espiguillas, aspectos clave en su rendimiento agrícola.

El trigo *emmer* y trigo candeal con valores intermedios, sugieren un rendimiento reproductivo moderado, coherente con su nivel evolutivo intermedio y su condición tetraploide. En cambio, el *einkorn* presentó el menor número promedio de granos por espiga, lo que indica una baja eficiencia reproductiva. Este resultado concuerda con su mayor duración hasta la floración y probablemente se relaciona con su menor grado de domesticación y su arquitectura floral más primitiva.

Análisis de componentes principales con variables de rendimiento

En segundo lugar, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) utilizando únicamente las variables que generan el rendimiento: número de macollos, número de espiguillas y número de granos por espiguilla como se puede ver en la Tabla 1. El objetivo fue caracterizar cuáles subespecies presentaron mayor potencial de rendimiento. Los dos primeros componentes explicaron conjuntamente el 96 % de la variabilidad total observada (CP1 = 58 %; CP2 = 38 %). El primer componente (CP1) se asoció principalmente con el número de granos por espiga y el número de espiguillas, mientras que se relacionó de forma



negativa con el número de macollos. Esto sugiere una posible oposición entre la producción reproductiva y el desarrollo vegetativo. El segundo componente (CP2) estuvo influenciado especialmente por el número de macollos y el número de espiguillas, indicando que este eje representa más bien características estructurales de la planta. En conjunto, el PCA permitió diferenciar a las subespecies evaluadas según dos dimensiones principales: una asociada al rendimiento reproductivo y otra a la arquitectura vegetativa.

Tabla 1

Variables de rendimiento en los dos primeros componentes principales

Variables	Cp1	Cp2
Nº de macollos	-0.4	0.78
Nº de espiguillas	0.55	0.62
Nº de granos	0.74	-0.04

El análisis de componentes principales permitió identificar patrones claros entre las subespecies de trigo en cuanto a su estrategia productiva (Figura 8). *AES* se ubicó en el extremo positivo de CP1, asociado a un alto número de granos por espiguilla y espiguillas, lo que indica un fuerte enfoque reproductivo. En contraste, *MON* se situó en el extremo superior de CP2, asociado principalmente al número de macollos, reflejando una estrategia más vegetativa que reproductiva.

Las subespecies tetraploides (*DCO* y *DUR*) se ubicaron de forma opuesta. Por su parte, *SPE* presentó una posición intermedia, combinando moderadamente ambas dimensiones.

Este patrón refuerza la idea de que el grado de domesticación y ploidía influye fuertemente en el balance entre arquitectura vegetativa y capacidad reproductiva, siendo las subespecies hexaploides más orientadas al rendimiento, y las diploides más centradas en el desarrollo estructural.

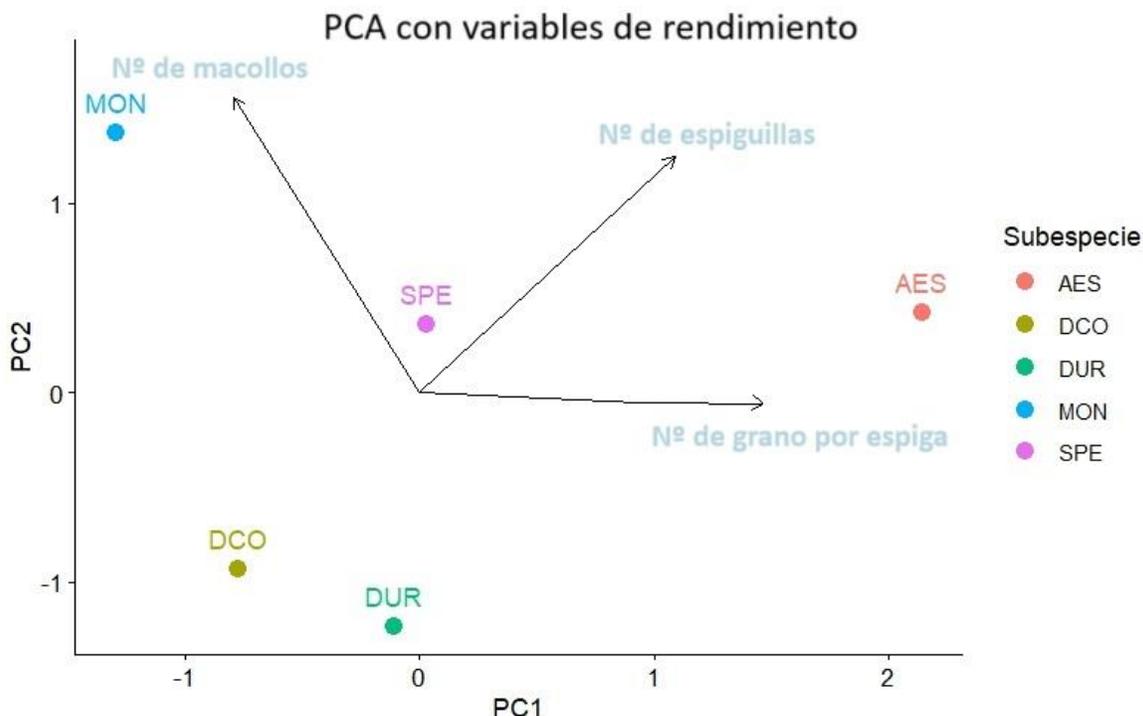


Figura 8

Biplot de los dos primeros componentes principales según variables de rendimiento.

Análisis de componentes principales con total de variables

Por último, se realizó un análisis multivariado considerando la totalidad de las variables evaluadas, con el objetivo de caracterizar de manera integral las subespecies estudiadas (Tabla 2). Los dos primeros componentes principales explicaron en conjunto el 77 % de la variabilidad total observada (CP1 = 40 %; CP2 = 37 %). El CP1 se asoció positivamente, principalmente, con el número de macollos (0.52) y los días a floración (0.56), mientras que mostró asociación negativa con el número de granos por espiga (-0.48), la altura de planta (-0.40) y, en menor medida, con el número de espiguillas (-0.04). Esta distribución se refleja en el Gráfico 9, donde los valores positivos de CP1 se sitúan hacia la derecha y los negativos hacia la izquierda. El CP2 presentó asociaciones positivas con el número de espiguillas (0.58) y el número de granos por espiga (0.31), hacia arriba en el gráfico; y asociaciones negativas con el área (-0.44), el perímetro (-0.46) y la altura (-0.37), hacia abajo.

**Tabla 2**

Variables totales en los dos primeros componentes principales

Variables	CP1	CP2
Altura	-0.4	-0.37
Nº de macollos	0.52	0.12
Días a floración	0.56	0.04
Nº de espiguillas	-0.04	0.58
Nº de granos por espiga	-0.48	0.31
Área	0.13	-0.44
Perímetro	0.01	-0.46

En el biplot (Gráfico 9) se observa al trigo *einkorn* (MON), claramente separado en el cuadrante superior derecho, asociado a un mayor número de macollos, más días a floración y un mayor número de espiguillas. Por otro lado, el trigo *emmer* (DCO) se ubicó en la parte inferior del gráfico (valores negativos de PC2), asociado a mayor altura, mayor área y perímetro de grano. El trigo pan (AES) se posicionó en el cuadrante superior izquierdo, caracterizado por un mayor número de granos por espiga y espiguillas, pero con un menor número de días a floración.

Las subespecies trigo candeal (DUR) y trigo espelta (SPE) se localizaron más próximas al centro del gráfico, reflejando valores más equilibrados en la mayoría de las variables. *DUR* presentó un promedio de mayor altura, más granos por espiga, así como mayor área y perímetro. En cambio, *SPE* presentó un perfil equilibrado, con una tendencia moderada a mayor altura, mayor número de granos por espiga y más espiguillas, aunque sin destacar de forma marcada en comparación con las demás subespecies.

En conjunto, la distribución de las subespecies en el plano definido por CP1 y CP2, que explican el 77 % de la variabilidad total, permite diferenciar de manera clara los perfiles morfo-fenológicos característicos de cada grupo, constituyendo una herramienta estadística interesante para su caracterización.

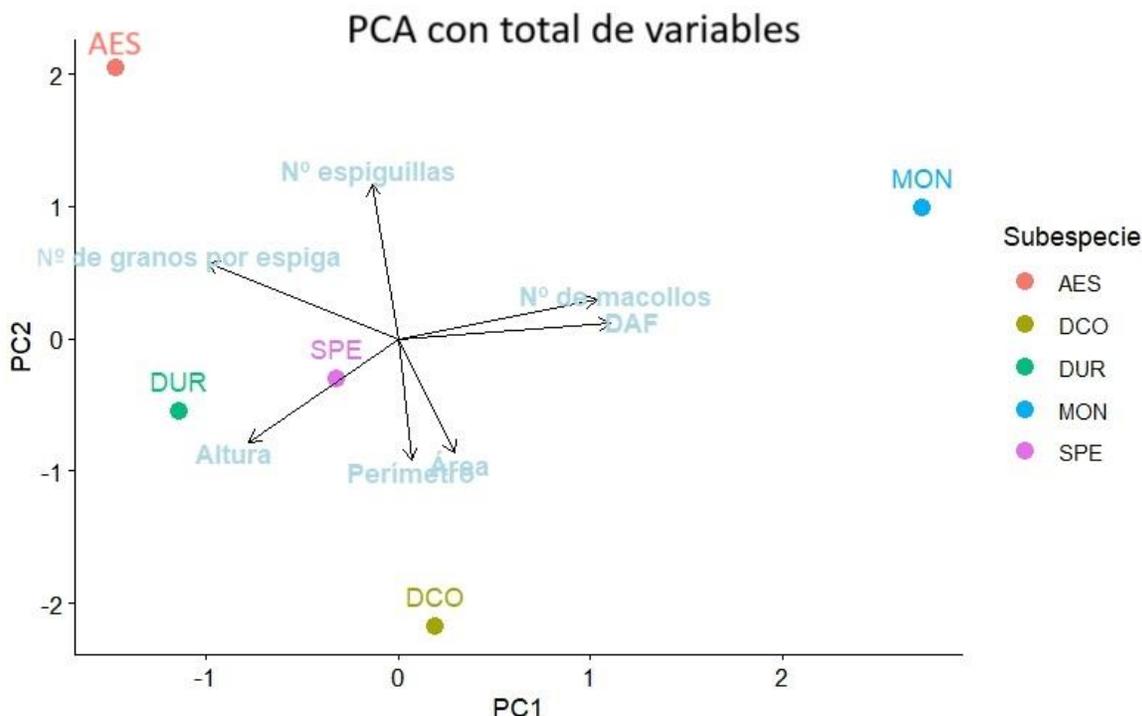


Figura 9

Biplot de los dos primeros componentes principales según variables totales.

Discusión

EINKORN

El *einkorn* (*Triticum monococcum* subsp. *monococcum*) fue la primera subespecie de trigo domesticada y se cultivó durante siglos antes de ser reemplazada por variedades de trilla libre (Zaharieva y Monneveux, 2014). En comparación con su forma silvestre (*T. monococcum* subsp. *aegilops*), presenta mayor tamaño y un raquis no frágil que evita la pérdida de granos al madurar. Forma parte del grupo de trigos vestidos, junto con *T. turgidum* subsp. *dicoccon* y *T. aestivum* subsp. *espelta*, caracterizados por glumas que permanecen adheridas al grano tras la trilla. Actualmente, su cultivo se limita a zonas montañosas aisladas de pocos países, aunque el interés por esta especie ha resurgido por sus cualidades nutricionales, su adaptación a sistemas de bajos insumos y su alta resistencia a plagas y enfermedades, atributos de valor para la agricultura ecológica.

Einkorn presentó la menor altura promedio, sin diferenciarse significativamente de *Triticum aestivum*. Probablemente por su genética más simple, al ser diploide posee menos vigor y un menor tamaño en general (Shan & Osborne, 2024). La reducción de altura puede aportar ventajas agronómicas, como mayor estabilidad y eficiencia en el uso de recursos, además de una posible resistencia superior a la podredumbre de la corona por *Fusarium* (FCR). Esta



resistencia podría estar relacionada con una mayor densidad y menor elongación celular, lo que dificultaría la degradación de la pared celular por enzimas fúngicas (Kazan & Gardiner, 2010). Por ello, la estatura reducida de *einkorn* podría ser una característica útil en programas de mejoramiento orientados a cultivares de menor altura.

En concordancia con lo descrito por Zaharieva y Monneveux (2014), en el presente estudio el trigo *einkorn* presentó el mayor número de macollos entre las subespecies evaluadas, superando significativamente a *T. aestivum* subespecie *aestivum*, confirmando su tendencia a una alta capacidad de macollaje. Este comportamiento sugiere que algunos genotipos de *einkorn* podrían tener un mayor potencial de ramificación basal bajo ciertas condiciones ambientales o de manejo, lo cual podría explorarse en programas de mejoramiento genético orientados a la rusticidad y adaptación: la capacidad de macollar ofrece mayor seguridad de cosecha frente a plagas agrícolas o sequía que causen mortalidad de plántulas o del tallo principal, permite salvar irregularidades en la siembra.

En cuanto a los días hasta la floración, *einkorn* registró el ciclo más largo y se diferenció significativamente de todas las demás subespecies. La regulación del tiempo de floración está determinada por tres grupos de genes: Vrn (vernalización), Ppd (fotoperiodo) y Eps (precocidad per se) (Arjona Rodríguez, 2019, p. 13). Es probable que entre los genotipos analizados existieran distintas combinaciones de estos genes, lo que habría contribuido a este resultado.

La cantidad de espiguillas por espiga, está determinada, en gran parte por la genética y el resto por el ambiente. El *einkorn*, a pesar de ser una especie ancestral, parece tener una genética favorable que promueve la formación de un alto número de espiguillas, ya que su promedio en este estudio fue de los más altos, y no mostró diferencias significativas con el trigo candeal ni con el trigo pan. Dado que el número potencial de espiguillas se define durante la etapa de macollaje; cuanto más se prolonga esta fase, mayor es la cantidad de espiguillas que pueden formarse. Esto sugiere que la etapa vegetativa más larga que evidenció el *einkorn* también podría tener relación con la cantidad de espiguillas formadas.

En cambio, el número de granos por espiga fue el más bajo de todas las subespecies, diferenciándose de *T. aestivum* subsp. *aestivum* pero no de *T. turgidum* subsp. *durum*. Este resultado es coherente con el significado del término alemán “*einkorn*” (“un grano”), en referencia a la presencia de un único grano por espiguilla.

El análisis de componentes principales permitió identificar las variables que explicaron la mayor variabilidad en el rendimiento de las subespecies estudiadas.

Al considerar el análisis multivariado con todas las variables, esta especie se posicionó de manera notablemente separada del resto. Esta diferenciación se debió a su alto número de espiguillas y macollos, así como a una mayor duración hasta la floración. Además, presenta



características de menor altura y un menor número de granos por espiga en comparación con las otras especies analizadas.

Estos resultados sugieren que la productividad de esta especie está más influenciada por la arquitectura de la planta y su desarrollo fenológico, que por la cantidad de granos individualmente considerados.

EMMER

El trigo *emmer* fue ampliamente cultivado en la antigüedad, especialmente en Egipto. En la actualidad, constituye un cultivo menor, limitado principalmente a zonas aisladas y marginales. Su principal valor radica en su capacidad para producir rendimientos aceptables en suelos pobres y en su resistencia a enfermedades fúngicas, como la roya del tallo, frecuente en ambientes húmedos (Zaharieva et al., 2010).

Se caracteriza por poseer cáscaras envolventes persistentes, glumas resistentes y un raquis que se desarticula por encima de la espiguilla al alcanzar la madurez (Humphries, 1980). Las espigas son densas, comprimidas lateralmente y, por lo general, aristadas. El pedicelo es corto; las espiguillas son aplanadas en el interior y suelen contener dos flores. Los granos pueden ser rojos o blancos, largos y delgados, con extremos agudos (Leonard & Martin, 1968).

En el presente estudio, este trigo mostró valores intermedios tanto de altura como de macollaje, sin diferencias significativas respecto al resto de las subespecies, excepto frente a *einkorn*. Diversos autores han señalado que *emmer* posee características agronómicas valiosas, como el macollaje, y que la presencia del alelo *Rht-B1b* en ciertos cultivares puede reducir la altura (Bhagwat et al., 2006), lo cual podría favorecer un mayor número de macollos. Esta relación podría deberse a un equilibrio entre el porte y la capacidad de generar tallos secundarios, lo que explicaría que ambos valores sean intermedios, y lo que también podría contribuir a un balance entre resistencia al acame e interceptación de radiación solar.

En cuanto a los días hasta floración, *emmer* presentó un valor intermedio-alto, sin diferencias significativas con el trigo candeal, pero sí con el resto de las subespecies, probablemente debido a su parentesco más cercano con esta última. Vavilov (1964) distinguió entre accesiones muy tempranas, particularmente aquellas procedentes de Yemen e India, y accesiones tardías provenientes de regiones montañosas de Europa occidental. De forma complementaria, Dorofeev et al. (1979) indicaron que la mayoría de las razas locales de trigo *emmer* corresponden a tipos de primavera, con excepción de algunas poblaciones de Europa occidental. Estos antecedentes concuerdan con los resultados obtenidos en el presente estudio y refuerzan la importancia de considerar este rasgo en la eventual incorporación de *T. turgidum* subsp *dicoccon* en programas de mejora genética.



En cuanto a su número de espiguillas, fue el menor valor, aunque sólo diferenciándose significativamente de *Triticum aestivum* subsp. *aestivum*. Este resultado puede estar relacionado con la sensibilidad al fotoperíodo y la acción de genes como Ppd1. La insensibilidad al fotoperíodo, conferida por alelos dominantes de Ppd, acorta la fase vegetativa y la duración de la iniciación de espiguillas, reduciendo así su número (Thomas & Vince, 1997; Major, 1980; Flood & Halloran, 1986; Evans, 1987; Dowla, 2018). En este sentido, el menor número de espiguillas observado podría deberse a adaptaciones históricas del *emmer* a ciclos cortos, en los que se prioriza la estabilidad reproductiva frente a la maximización de espiguillas.

En el número de granos por espiga, obtuvo valores superiores a *einkorn* y significativamente inferiores a *T. aestivum* subsp. *aestivum*. Esta diferencia puede explicarse por la morfología floral: en *T. turgidum* subsp. *dicoccon*, las espiguillas suelen contener sólo dos flores fértiles, permitiendo hasta dos granos por espiguilla, en cambio, en el trigo pan suelen ser entre cinco o seis, mientras que en *Triticum monococcum* subsp. *monococcum* predomina la presencia de una sola flor fértil.

En conjunto, el análisis de los resultados multivariados indicó que *T. turgidum* subsp. *dicoccon* presenta un perfil morfo-fisiológico equilibrado, con rasgos de interés potencial para programas de mejoramiento, especialmente orientados a ambientes marginales o de bajo insumo. Su ciclo intermedio-alto, porte moderado, buena capacidad de macollaje y morfología de espiguilla con dos flores fértiles constituyen características susceptibles de ser combinadas con otras subespecies para optimizar tanto la producción como la estabilidad del rendimiento.

En términos productivos, el menor número de granos por espiga podría verse compensado por un mayor peso individual de grano o por un incremento en el macollaje, factores que deben evaluarse en conjunto para estimar con precisión el potencial de rendimiento (Bhagwat et al., 2006; Zaharieva et al., 2010).

El resultado del ACP podría indicar un menor potencial de rendimiento en los genotipos de *Triticum turgidum* subsp. *dicoccon* en el contexto de las variables analizadas. Se distinguió por tener menor altura y menor número de espiguillas, pero mayor área y perímetro en los granos en comparación con las otras subespecies.

ESPELTA

El trigo espelta es un pariente cercano del trigo pan hexaploide, cultivado principalmente en Europa Central, un importante centro de diversidad genética para esta subespecie (Muller et al., 2018). Este antiguo cultivo de trigo vestido está despertando un renovado interés debido a la creciente demanda de productos saludables y diversos en la dieta (Longin et al., 2016, 2023). En comparación con el trigo pan, presenta un rendimiento agronómico superior en



condiciones ecológicas adversas o de bajos insumos, lo que lo hace adecuado para sistemas de producción marginales y orgánicos (Konvalina et al., 2014; Magistrali et al., 2020).

En cuanto a su altura, el trigo espelta fue ligeramente mayor que el trigo pan o candeal, aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Se observó que macolló significativamente más que el trigo pan, el trigo candeal y el trigo *emmer*, aunque menos que el *einkorn*. Estos resultados difieren parcialmente de lo reportado en la literatura, donde se menciona que la espelta tiene una capacidad de macollaje menor debido a su genética más antigua y a su adaptación a condiciones menos intensivas (Hidalgo, 2006; Calderini et al., 2012).

Esta diferencia podría explicarse por las condiciones ambientales y el manejo agronómico bajo los cuales se llevó a cabo el estudio. El macollaje es un rasgo altamente influenciado por factores externos como la densidad de siembra, la disponibilidad de nutrientes y la humedad (Calderini et al., 2012). Además, pudo influir la diversidad genética dentro de la subespecie, y las diferencias entre líneas con mayor capacidad de macollaje. En este contexto, hay que considerar que entre los genotipos analizados se encontraban accesiones provenientes de distintas regiones de España, Italia, Argentina, Alemania, Afganistán y Checoslovaquia.

En cuanto a los días de floración, el trigo espelta no mostró diferencias significativas con el trigo pan y el trigo candeal. Dentro de este grupo, la espelta fue el más precoz, aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa. En cambio, el *einkorn* y el *emmer* presentaron un ciclo fenológico significativamente más largo, floreciendo más tarde que las demás subespecies. Estos resultados coinciden con estudios previos que señalan que los trigos antiguos, como el *einkorn* y el *emmer*, suelen tener ciclos de desarrollo más largos en comparación con variedades más modernas o adaptadas, como el trigo pan y la espelta (Hidalgo, 2006; Calderini et al., 2012).

En cuanto al número de espiguillas por espiga, el trigo espelta no mostró diferencias significativas respecto a ninguna de las subespecies evaluadas, ubicándose en un valor intermedio. En el número de granos por espiga, se observó un incremento progresivo desde el *einkorn*, seguido por el trigo *emmer*, el trigo candeal, la espelta y finalmente el trigo pan con el valor más alto. La espelta se diferencia significativamente del *einkorn*, pero no presentó diferencias significativas con las otras subespecies, mostrando valores similares a los controles, lo que indica una mayor capacidad productiva en comparación con las subespecies diploides y tetraploides más primitivas. Por lo tanto, la diferencia en el número de granos por espiga entre las subespecies estudiadas podría explicarse en función de su nivel de ploidía y estructura floral. El trigo espelta y el trigo pan, ambos hexaploides, mostraron los valores más altos de granos por espiga, mientras que el trigo candeal presentó valores intermedios, y el *einkorn* (diploide) y *emmer* (tetraploide más primitivo que el candeal) los valores más bajos. Esta tendencia es coherente con estudios previos que asocian el mayor



nivel de ploidía con una mayor capacidad productiva debido a la mayor complejidad genética y número de copias génicas (Feldman & Levy, 2012; Dubcovsky & Dvorak, 2007). Además, la cantidad de granos también está influenciada por la estructura de las espiguillas, ya que el trigo pan y espelta poseen varias flores fértiles por espiguilla (cinco o seis), en contraste con el einkorn que usualmente tiene una sola flor fértil por espiguilla, limitando así el número de granos potenciales (Shewry & Hey, 2015). En conjunto, estas características morfológicas y genéticas explican por qué las subespecies hexaploides presentaron una mayor producción de granos por espiga en comparación con las subespecies diploides y tetraploides.

En ambos análisis de componentes principales, sugirieron que la espelta presentó valores intermedios para la mayoría de las variables analizadas, sin asociación marcada con aquellas que explican la mayor parte de la variabilidad (como número de granos, número de espiguillas, número de macollos, altura, área o perímetro). En consecuencia, la espelta se caracterizó por un perfil productivo y morfológico equilibrado, sin rasgos extremos que lo distinguan de forma clara respecto a las demás subespecies. Esto refuerza la idea de que, dentro del conjunto de germoplasma evaluado, la espelta presenta una adaptación generalista, manteniendo un desempeño estable sin especializarse en un único rasgo de rendimiento.

Aunque en el presente estudio no se evaluaron parámetros de calidad nutricional ni tecnológica, es importante destacar que el trigo espelta posee cualidades reconocidas en la literatura que lo diferencian de otras subespecies. Diversos trabajos han reportado que presenta un mayor contenido de proteínas, minerales (como zinc y hierro) y compuestos bioactivos, así como un perfil de gluten distinto, lo que lo hace adecuado para la elaboración de productos con valor agregado y con mejor digestibilidad en ciertos consumidores (Escarnot et al., 2010; Ruibal-Mendieta et al., 2005). Asimismo, el espelta es apreciado en panificación y en la producción de pastas y galletas por conferir aromas y texturas particulares, contribuyendo a su creciente demanda en mercados de nicho y en sistemas de producción orgánica o artesanal. En este sentido, su perfil equilibrado en las variables productivas, evidenciado en este trabajo, sumado a sus atributos de calidad, refuerza su potencial como cultivo alternativo de alto valor.

Conclusiones

Caracterización agronómica

- El trigo *einkorn* presentó el mayor número de macollos y una elevada cantidad de espiguillas, probablemente asociada a su prolongado período hasta la floración. Su rendimiento se encuentra más condicionado por su fenología y número de macollos que por el número total de granos por espiga.
- El trigo *emmer* mostró valores intermedios y equilibrados en la mayoría de las variables evaluadas, aunque se destacó por registrar una menor cantidad de



espiguillas y granos por espiga. En el análisis de componentes principales se ubicó alejado del resto de las subespecies, debido principalmente a su mayor área y perímetro de grano.

- El trigo espelta presentó un perfil también equilibrado, con valores altos en la mayoría de las variables, salvo en los días hasta la floración, donde resultó ser el más precoz. Estos atributos lo posicionan como la subespecie más semejante a los cultivares comerciales de trigo pan y candeal.

Comparación con trigo pan y candeal

Los cultivares de trigo pan y candeal presentaron valores elevados en número de granos por espiga y rendimiento esperado, confirmando su superior desempeño productivo. El trigo espelta se situó productivamente más próximo a estos trigos comerciales que *einkorn* y *emmer*.

El PCA evidenció una separación parcial entre las subespecies, con *einkorn* y *emmer* ocupando posiciones extremas, mientras que espelta se agrupó más cerca de trigo pan y candeal, lo que refuerza su similitud productiva.

Confirmación de hipótesis

Se acepta la hipótesis de que existen diferencias entre *einkorn*, *emmer* y espelta en relación con trigo pan y candeal en variables morfológicas y de rendimiento, con una tendencia a menor productividad en subespecies diploides y tetraploides frente a hexaploides.



Bibliografía

- Arjona Rodríguez, J. M. (2019). *Photoperiod response as a driver of flowering time in spring durum wheat and its influence on productivity, and environmental adaptability* [Tesis doctoral, Universitat de Lleida].
- Avni, R., Nave, M., Barad, O., Baruch, K., Twardziok, S. O., Gundlach, H., ... & Distelfeld, A. (2017). Wild emmer genome architecture and diversity elucidate wheat evolution and domestication. *Science*, 357(6346), 93–97.
- Biscalsaque, G., Ruppel, C., & Gorriti, M. (2024). Importancia de la cadena triguera en la economía provincial y nacional. *Revista MDA*, 5(1), 37–41.
- Bolsa de Comercio de Rosario. (2025). *Informe semanal: Análisis de la situación económica* [PDF].
- Buerstmayr, H., Ban, T., & Anderson, J. A. (2011). QTL mapping and marker-assisted selection for Fusarium head blight resistance in wheat: A review. *Plant Breeding*, 130(1), 1–26.
- Calderini, D. F., Dreccer, M. F., & Slafer, G. A. (2012). Genetic improvement in wheat yield and associated traits. *Euphytica*, 164(3), 289–308.
- Calderini, D. F., Slafer, G. A., & Savin, R. (2012). Fisiología del trigo. En: *Trigo: Producción, Mejora y Uso*. Editorial XYZ.
- Calderini, D. F., Slafer, G. A., & Savin, R. (2012). Genetic basis of adaptation in wheat: Development and flowering time. *Journal of Experimental Botany*, 63(10), 3599–3610.
- Cattaneo, L., Cucciuffo, O., & Amarilla, M. (2024). Políticas de innovación y diversificación productiva en cultivos de invierno. *Revista MDA*, 5(1), 13–20.
- Di Pane, L., Mir, G., Ormando, L., & Molfese, G. (2024). Trigos antiguos y nichos de mercado diferenciados. *Revista MDA*, 5(1), 26–39.
- Dubcovsky, J., & Dvorak, J. (2007). Genome plasticity: A key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science*, 316(5833), 1862–1866.
- Dvorak, J., di Terlizzi, P., Zhang, H. B., & Resta, P. (1993). The evolution of polyploid wheats: Identification of the A genome donor species. *Genome*, 36(1), 21–31.
- Escarnot, E., Jacquemin, J. M., Agneessens, R., & Paquot, M. (2010). Comparative study of the content and profiles of macronutrients in spelt and wheat, a review. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 14(4), 567–579.
- Faris, M. A. (2014). Ancient grains and their modern uses: Emmer wheat as a functional food ingredient. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 16–23.
- Feldman, M., & Sears, E. (1981). Los recursos genéticos del trigo silvestre. *Investigación y Ciencia*, (Marzo), 50–61.



- Feldman, M., & Levy, A. A. (2012). Genome evolution in allopolyploid wheat—a revolutionary reprogramming followed by gradual changes. *Journal of Genetics and Genomics*, 39(9), 539–546.
- Giancaspro, A., Mangini, G., Blanco, A., & Gadaleta, A. (2022). The contribution of ancient wheat species to the development of new wheat cultivars. *Genes*, 13(1), 109.
- Golik, S. I., & Simón, M. R. (2022). Trigo: origen, sistemática, importancia. En *Cereales de invierno*. Edulp.
- Hidalgo, A. (2006). Trigo espelta: Cultivo y aprovechamiento. Editorial ABC.
- Hidalgo, A. (2006). Caracterización fenológica y morfológica de trigos antiguos y modernos. *Revista de Fitotecnia Argentina*, 11(2), 53–60.
- Hidalgo, A. (2006). Durum wheat: Quality in pasta making. *Cereal Foods World*, 51(2), 14–18.
- Hübner, F., Arendt, E. K., & Zannini, E. (2013). Wheat and other Triticeae: Sources and properties. En E. K. Arendt & F. Dal Bello (Eds.), *Gluten-free cereal products and beverages* (pp. 45–72). Elsevier.
- Kazan, K., & Gardiner, D. M. (2010). Fusarium crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum* in cereal crops: Recent progress and future prospects. *Molecular Plant Pathology*, 11(3), 329–337.
- Khlestkina, E. K., Röder, M. S., & Börner, A. (2010). Mapping genes controlling anthocyanin pigmentation in the glume and pericarp of wheat. *Euphytica*, 171, 65–69.
- Konvalina, P., et al. (2014). Agronomic performance of spelt wheat under low-input conditions. *Agronomy Journal*, 106(5), 1783–1790.
- Konvalina, P., Capouchová, I., Stehno, Z., & Moudrý, J. (2014). Agronomic characteristics of the spring forms of hulled wheat species in organic farming. *Plant, Soil and Environment*, 60(2), 71–77.
- Longin, C. F. H., et al. (2016). Renewed interest in spelt wheat: Nutritional quality and agronomic potential. *Food Chemistry*, 213, 63–71.
- Longin, C. F. H., Würschum, T., & Czedik-Eysenberg, A. (2016). Wheat landraces as genetic resources for grain quality improvement. *Plant Breeding*, 135(4), 397–405.
- Longin, C. F. H., Ziegler, J., Schweiggert, R., Koehler, P., & Carle, R. (2016). Comparative study of hulled (einkorn, emmer, and spelt) and naked wheats (durum and bread wheat): Physicochemical properties and sensory quality of pasta. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(9), 3265–3274.
- Longin, C. F. H., et al. (2023). Advances in spelt wheat research: Genetic diversity and breeding. *Journal of Cereal Science*, 110, 103562.
- Longin, C. F. H., Würschum, T., & Leiser, W. L. (2023). The revival of ancient wheats: Opportunities and challenges for breeding and cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1164200.



- Ling, H. Q., Ma, B., Shi, X., Liu, H., Dong, L., Sun, H., ... & Yu, J. (2018). Genome sequence of the progenitor of wheat A subgenome *Triticum urartu*. *Nature*, 557(7705), 424–428.
- Maes, W. H., Steppe, K., De Pauw, D. J. W., Samson, R., & Lemeur, R. (2001). Temperature changes of glumes and florets in wheat: Influence of glume pubescence. *Field Crops Research*, 69(1), 31–41.
- Magistrali, A., Perenzin, M., Vaccino, P., & Brandolini, A. (2020). Performance of ancient wheat species and landraces in organic and low-input agricultural systems. *Agronomy*, 10(6), 891.
- Magistrali, C., et al. (2020). Organic farming and spelt wheat: Yield and quality analysis. *Organic Agriculture*, 10(2), 189–199.
- Marcussen, T., Sandve, S. R., Heier, L., Spannagl, M., Pfeifer, M., Jakobsen, K. S. & Olsen, O.-A. (2014). Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat. *Science*, 345(6194), 1250092.
- Matsuoka, Y. (2011). The evolution of polyploidy-derived intraspecific differentiation of wheat and its implications for wheat breeding. *Plant Cell Physiology*, 52(5), 750–764.
- Matsuoka, Y. (2014). Evolution of polyploid *Triticum* wheats under cultivation: The role of domestication, natural hybridization and allopolyploid speciation in their diversification. *Plant Cell Physiology*, 55(7), 1172–1182.
- McIntosh, R. A., Yamazaki, Y., Dubcovsky, J., Rogers, W. J., Morris, C., Appels, R., & Xia, X. C. (2013). *Catalogue of gene symbols for wheat: 2013 supplement*. *Annual Wheat Newsletter*, 59, 260–276.
- Mengarelli, R. (s.f.). *Rendimiento agronómico y valor genético de cepas seleccionadas de trigo diploide, Triticum monococcum*. Repositorio Digital UNS.
- Moshe, F., & Sears, E. (1981). Los recursos genéticos del trigo silvestre. *Investigación y Ciencia*, (Marzo), 50–61.
- Muller, M., et al. (2018). Genetic diversity of spelt wheat in Central Europe. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(2), 345–360.
- Muller, T., Schittenhelm, S., & Diepenbrock, W. (2018). Performance of spelt and bread wheat under contrasting management regimes. *European Journal of Agronomy*, 94, 10–18.
- Nesbitt, M., & Samuel, D. (1996). From staple crop to extinction? The archaeology and history of the hulled wheats. En S. Padulosi, K. Hammer, & J. Heller (Eds.), *Hulled Wheats* (pp. 41–100). International Plant Genetic Resources Institute.
- Ortiz, G., & Masague, J. (2024). Mejoramiento genético vegetal de cereales de invierno. *Revista MDA*, 5(1), 30–32.
- Özkan, H., Brandolini, A., Schäfer-Pregl, R., & Salamini, F. (2001). 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(10), 1797–1801.

- Pinedo, A., Seain, M., & Serrano, R. (2024). Actualidad, desafíos y agregado de valor en el cultivo de trigo. *Revista MDA*, 5(1), 8–12.
- Pourkheirandish, M., & Komatsuda, T. (2007). The importance of barley genetics and domestication in understanding the domestication of wheat. *The Plant Cell*, 19(9), 2991–2997.
- Ruibal-Mendieta, N. L., Delacroix, D. L., Mignolet, E., Pycke, J.-M., Marques, C., Rozenberg, R. & Meurens, M. (2005). Spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) as a source of breadmaking flours and bran with low technological quality but interesting nutritional and antioxidant properties. *Food Chemistry*, 93(4), 613–620.
- Salamini, F., Özkan, H., Brandolini, A., Schäfer-Pregl, R., & Martin, W. (2002). Genetics and geography of wild cereal domestication in the Near East. *Nature Reviews Genetics*, 3(6), 429–441.
- Shan, Y., & Osborne, C. P. (2024). Diversification of quantitative morphological traits in wheat. *Annals of Botany*, 133(3), 413–426. <https://doi.org/10.1093/aob/mcad202>
- Shavrukov, Y., Kurishbayev, A., Jatayev, S., Shvidchenko, V., Zotova, L., Koekemoer, F. & Langridge, P. (2017). Early flowering as a drought escape mechanism in plants: How can it aid wheat production? *Frontiers in Plant Science*, 8, 1950.
- Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202.
- Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(6), 1537–1553.
- Simons, K. J., Fellers, J. P., Trick, H. N., Zhang, Z., Tai, Y. S., Gill, B. S., & Faris, J. D. (2006). Molecular characterization of the major wheat domestication gene Q. *Genetics*, 172(1), 547–555.
- Trethowan, R. M., Reynolds, M. P., Ortiz-Monasterio, J. I., & Ortiz, R. (1998). The influence of glume pubescence on floret temperature of wheat under freezing conditions. *Euphytica*, 103(1), 1–6.
- Vallega, V. (1992). Rendimiento agronómico y valor genético de cepas seleccionadas de trigo diploide, *Triticum monococcum*. *Euphytica*, 61, 13–23.
- Wang, Y., et al. (2024). Conocimientos genómicos sobre el origen y la evolución de la espelta (*Triticum spelta* L.) como un valioso acervo genético para el mejoramiento moderno del trigo. *Comunicaciones de la planta*, 5(5), 100883.
- Zaharieva, M., & Monneveux, P. (2006). Spontaneous crosses in wild wheat improve drought tolerance. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 53(6), 1199–1204.
- Zavala Páramo, M. G. (2013). El trigo: una quimera que necesita genes. *Revista Saber Más*, 82(11), 14–16.



- Zhao, D., Wang, Y., Hu, H., Li, J., & Zhang, X. (2022). Photoperiodic regulation of flowering time by CRYPTOCHROME and CONSTANS in wheat. *Plant Physiology*, 188(4), 2122–2135.