

**Control genético y ambiental de los determinantes fisiológicos del
llenado, secado y calidad de granos de maíz en genotipos destinados
para grano o silaje**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

Yésica Daniela Chazarreta

Licenciada en genética - Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de
Buenos Aires - 2018

Lugar de trabajo: Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino, Buenos
Aires, Argentina



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Directora de tesis

María Elena Otegui

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Magister Scientiae (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Doctor (Université Paris XI, UFRS d'Orsay, France)

Co-director

Santiago Alvarez Prado

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario)

Consejero de Estudios

César Gabriel López

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Lomas de Zamora)

Magister Scientiae (Universidad Nacional de Rosario)

Doctor of Philosophy (Oregon State University)

JURADO DE TESIS

JURADO

Aníbal Alejandro Cerrudo

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Magister Scientiae en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

Fernando Ezequiel Miguez

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

M.S. in Crop Sciences (University of Illinois)

M.S. in Applied Statistics (University of Illinois)

Ph.D. in Crop Sciences (University of Illinois)

JURADO

María Verónica Rodríguez

Licenciada en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 15 de JULIO de 2025

AGRADECIMIENTOS

A María Elena Otegui, por haberme recibido con los brazos abiertos desde mi tesis de grado hasta aquí, por acompañarme en la concreción de diferentes proyectos y por su generosidad y enseñanzas.

A Santiago Alvarez Prado, por su enorme ayuda para la realización de esta tesis y por guiarme con tanta paciencia.

A César López, por sus siempre positivos y alentadores comentarios para avanzar en esta tesis.

Al Grupo de Ecofisiología de Cultivos de INTA Pergamino. No encontraré palabras suficientes para expresarles mi infinita gratitud. A Luis, Octa, Juani y Facu por su invaluable ayuda con el trabajo a campo y los valiosos intercambios. A Selvita por las risas. A Lu, por su hermosa amistad. A todos, por hacer más lindo el camino.

Al sistema de educación argentino, cuyas instituciones y profesionales han sido fundamentales en mi formación, así como a las personas e instituciones que promueven y sostienen la investigación y el desarrollo académico y científico en el país. A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, el CONICET, la Fundación Fulbright Argentina y el INTA por las diferentes becas y el financiamiento obtenidos durante el desarrollo de esta tesis.

A Ignacio Ciampitti y a todo su grupo de trabajo en Kansas State University. Gracias por recibirme y por guiarme tanto personal como académicamente.

A Lucila y su familia por su amistad, su cariño y su enorme generosidad sin importar el tiempo ni las distancias.

A Alvaro, por acompañarme durante todo este camino con tanta paciencia y amor.

A todas las personas que, de algún modo u otro colaboraron conmigo:

¡MUCHAS GRACIAS!

As Albus Dumbledore wisely says in *Harry Potter and the Prisoner of Azkaban*,
“*Happiness can be found, even in the darkest of times, if one only remembers to turn on the light*” (J.K. Rowling, 1999).

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Yésica Daniela Chazarreta

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Chazarreta, Y.D., Carcedo, A.J.P., Alvarez Prado, S., Massigoge, I., Amas, J.I., Fernandez, J.A., Ciampitti, I.A., Otegui, M.E. 2023. Enhancing maize grain dry-down predictive models. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 334, 109427. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109427>

Chazarreta, Y.D., Alvarez Prado, S., Giménez, V.D., López, C.G., Carcedo, A.J.P., Ciampitti, I.A., Otegui, M.E. 2024. Yield determination of temperate maize hybrids with different end-uses: An ecophysiological analysis. *Crop Science*. <https://doi.org/10.1002/csc2.21414>

TRABAJOS ENVIADOS PARA SU PUBLICACIÓN EN REVISTAS CON REFERATO

Chazarreta, Y.D., Alvarez Prado, S., Otegui, M.E. 2025. Kernel weight and source/sink ratios in temperate maize hybrids with different end uses under contrasting environments. En primera revisión en *Field Crops Research* [FIELD-D-25-00142R1]. Preprint disponible en <https://doi.org/10.1101/2024.09.06.611734>

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ABREVIATURAS	XIX
RESUMEN	XXI
ABSTRACT	XXII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	23
1. Planteo del problema y revisión de antecedentes	24
1.1. Cambios tecnológicos y efectos sobre el manejo reciente del cultivo de maíz en la Región Pampeana	24
1.2. Usos del maíz en Argentina	26
1.3. Llenado de los granos, relaciones fuente-destino y carbohidratos solubles en tallo	28
1.4. Secado de los granos: Importancia en los planteos productivos y modelos predictivos	32
1.5. Maíz para silaje de planta entera	34
1.6. Objetivos	40
1.7. Hipótesis	41
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA GENERAL Y CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL	44
2. Metodología general y caracterización ambiental	45
2.1. Experimentos a campo	45
2.2. Mediciones	46
2.3. Análisis de datos	47
2.4. Condiciones meteorológicas y fenología	49
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO DE LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO EN HÍBRIDOS CON DIFERENTE USO FINAL	54
3.1. Introducción	55
3.2. Materiales y métodos	57
3.2.1. Mediciones	57
3.2.2. Análisis estadísticos	59
3.3. Resultados	60
3.3.1. Acumulación de biomasa, intercepción de la radiación y eficiencia de uso de la radiación	60
3.3.2. Tasas de crecimiento por planta, eficiencias reproductivas y partición de biomasa	65
3.3.3. Rendimiento en grano: determinantes fisiológicos y componentes numéricos	68
3.3.4. Asociaciones entre rasgos	71

3.4. Discusión	79
3.5. Conclusiones	85
CAPÍTULO 4: LLENADO DE LOS GRANOS Y RELACIONES FUENTE-DESTINO EN HÍBRIDOS DE MAÍZ CON DIFERENTE USO FINAL	87
4.1. Introducción	88
4.2. Materiales y métodos	92
4.2.1. Mediciones	92
4.2.2. Análisis estadísticos	94
4.3. Resultados	96
4.3.1. Llenado de los granos y relaciones fuente-destino	96
4.3.2. Asociaciones entre rasgos	103
4.3.3. Dinámica de los carbohidratos solubles en agua en el tallo	105
4.4. Discusión	109
4.5. Conclusiones	114
CAPÍTULO 5: PREDICCIÓN DEL SECADO DE LOS GRANOS POST-MADUREZ FISIOLÓGICA EN MAÍZ	116
5.1. Introducción	117
5.2. Materiales y métodos	119
5.2.1. Experimentos a campo	120
5.2.2. Mediciones para determinar la humedad de los granos	124
5.2.3. Modelos para describir la humedad de los granos	125
5.2.4. Exploración de las variables explicativas de la variación en k	126
5.2.5. Evaluación de los modelos	127
5.3. Resultados	128
5.3.1. Efecto de las variables meteorológicas sobre el secado de los granos post-madurez fisiológica	128
5.3.2. Evaluación de los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica	132
5.4. Discusión	135
5.5. Conclusiones	138
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIA VERDE, MATERIA SECA, VENTANA DE PICADO Y CALIDAD PARA SILAJES DE PLANTA ENTERA DE MAÍZ	139
6.1. Introducción	140
6.2. Materiales y métodos	143
6.2.1. Mediciones	143
6.2.2. Análisis estadísticos	145

6.3. Resultados	146
6.3.1. Producción de materia verde, materia seca y ventana de picado	146
6.3.2. Calidad de la materia seca para silaje de planta entera	153
6.3.3. Aptitud granífera y silera	160
6.4. Discusión	165
6.5. Conclusiones	170
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES GENERALES	171
7.1. Introducción	172
7.2. Integración de los resultados y contraste de hipótesis	174
7.3. Aportes novedosos de la tesis	190
7.4. Perspectivas a futuro	191
ANEXOS	195
Anexos al Capítulo 3	196
Anexos al Capítulo 4	201
Anexos al Capítulo 5	203
Anexos al Capítulo 6	205
BIBLIOGRAFÍA	208

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Fechas de ocurrencia de los principales eventos fenológicos (R1: silking; R6: madurez fisiológica) y duraciones del intervalo antesis-*silking* (ASI), el período prefloración y el período postfloración de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA para cada año se muestran al final del cuadro. **53**

Cuadro 3.1. Biomasa aérea acumulada, la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi), la fracción de la RFA interceptada por el cultivo ($fRFAi$) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) durante tres períodos diferentes del ciclo de cultivo (VE-V14, V14-R2 y R2-R6) de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA se muestran al final del cuadro. **63**

Cuadro 3.2. Tasa de crecimiento por planta entre emergencia (VE) y V14 (TCP_{VE-V14}), tasas de crecimiento por planta y espiga durante el período crítico (TCE_{V14-R2} y TCE_{V14-R2} , respectivamente), partición de biomasa a la espiga apical durante el período crítico ($PBE_{V14-R2} = TCE_{V14-R2}/TCE_{V14-R2}$), eficiencias reproductivas de espiga y planta y tasa de crecimiento por planta durante el período de llenado efectivo del grano (TCP_{R2-R6}) de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA se encuentran al final del cuadro. **67**

Cuadro 3.3. Medias del rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos (biomasa total aérea e índice de cosecha), y componentes numéricos (número de granos y peso de los granos) de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020) Los resultados del ANVA se encuentran al final del cuadro. **70**

Cuadro 4.1. Medias de las variables evaluadas en los experimentos a campo realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA se presentan al final del cuadro. **98**

Cuadro 4.2. Porcentaje de carbohidratos solubles en agua en el tallo (CHST) en R2 (ca. 15 días post-*silking*), R4 (ca. 30 días post-*silking*), R5 (ca. 45 días post-*silking*) y R6 (ca. 60 días post-*silking*), volumen del tallo en R2 y removilización de CHST de R2 a R6 para los experimentos realizados durante dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados del ANVA se presentan al final del cuadro. **107**

Cuadro 5.1. División del conjunto de datos, sitio, año, nivel de nitrógeno ($kg\ N\ ha^{-1}$), fecha de siembra, híbridos (indicados por su nombre comercial), número de unidades experimentales (n) y fecha de madurez fisiológica de los experimentos utilizados para entrenar y evaluar los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica en maíz. PER, ARG se refiere a Pergamino, Buenos Aires, Argentina y ASH, EE. UU. a Ashland Bottoms, Kansas, EE. UU. **121**

Cuadro 5.2. Variables meteorológicas seleccionadas para explicar las variaciones en el coeficiente de secado de los granos post-madurez fisiológica ajustados para cada ambiente (k_{obs}). La media de cada variable meteorológica se obtuvo como la media de la variable en base diaria durante el período transcurrido desde silking hasta la madurez fisiológica y desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial (14,5%). El acumulado de cada variable se obtuvo acumulando la variable diaria durante el período transcurrido desde silking hasta la madurez fisiológica y desde la madurez fisiológica hasta alcanzar la humedad de cosecha comercial. **127**

Cuadro 5.3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los k observados (k_{obs} ; coeficientes de secado post-madurez fisiológica ajustados para cada ambiente) y las variables meteorológicas calculadas desde *silking* hasta la madurez fisiológica (pre-madurez) y desde la madurez fisiológica hasta la humedad comercial (post-madurez). En negrita, los valores inferiores a $-0,70$ o superiores a $0,70$. Para cada correlación, se indican los valores p . **129**

Cuadro 5.4. Coeficientes de los modelos lineales que explican las variaciones en k_{obs} , incluyendo variables meteorológicas calculadas desde silking hasta madurez fisiológica y desde madurez fisiológica hasta alcanzar la humedad de cosecha. DPV es el déficit de presión de vapor y gl indica los grados de libertad de cada modelo. En negrita se indica el mejor modelo para cada período, que incluye al menos dos variables meteorológicas y presenta menor criterio de información de Akaike corregido (AICc). **130**

Cuadro 6.1. Medias correspondientes a la altura de planta y diámetro de la base del tallo en R2 (15 días post-*silking*), materia verde y materia seca de planta entera y de las fracciones tallo + hojas y espigas y duración de la ventana de picado para los experimentos realizados durante dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados de ANVA se muestran al final del cuadro. **150**

Cuadro 6.2. Medias correspondientes a digestibilidad de la materia seca (MS) de planta entera, MS digestible de planta entera, digestibilidad de la materia seca, fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), proteína y energía de tallo + hojas y espigas, y lignina detergente ácida de la fracción tallo + hojas para los experimentos realizados durante dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados de ANVA se muestran al final del cuadro. **156**

Cuadro A3.1. Parámetros y coeficientes de determinación (R^2) de los modelos alométricos utilizados para la estimación de la biomasa vegetativa y de espigas. **196**

Cuadro A3.2. Coeficientes de correlación correspondientes a las 18 variables incluidas en el análisis de componentes principales: biomasa acumulada, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) acumulada y eficiencia de uso de la radiación (EUR) para los períodos comprendidos entre VE-V14, V14-R2 y R2-R6, la biomasa total aérea, el rendimiento en grano y el índice de cosecha a madurez fisiológica y la temperatura media del aire (T_{media}) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6. **197**

Cuadro A3.3. Probabilidades asociadas de los coeficientes de correlación correspondientes a las 18 variables incluidas en el análisis de componentes principales: biomasa acumulada, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) acumulada y eficiencia de uso de la radiación (EUR) para los períodos comprendidos entre VE-V14, V14-R2 y R2-R6, la biomasa total aérea, el rendimiento en grano y el índice de cosecha a madurez fisiológica y la temperatura media del aire (T_{media}) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6. En negrita los casos con $p < 0,05$. **198**

Cuadro A3.4. Coeficientes de correlación correspondientes a las 16 variables incluidas en el análisis de componentes principales: temperatura media del aire (T_{media}), radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y tasas de crecimiento por planta (TCP) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6, tasa de crecimiento de la espiga (TCE) y partición de biomasa a espiga (PBE) durante el período VE-V14, eficiencias reproductivas de planta y espiga, rendimiento en grano, número de granos y peso de los granos a madurez fisiológica. **199**

Cuadro A3.5. Probabilidades asociadas de los coeficientes de correlación correspondientes a las 16 variables incluidas en el análisis de componentes principales: temperatura media del aire (T_{media}), radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y tasas de crecimiento por planta (TCP) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6, tasa de crecimiento de la espiga (TCE) y partición de biomasa a espiga (PBE) durante el período VE-V14, eficiencias reproductivas de planta y espiga, rendimiento en grano, número de granos y peso de los granos a madurez fisiológica. En negrita los casos con $p < 0,05$. **200**

Cuadro A4.1. Coeficientes de correlación correspondientes a las 8 variables incluidas en el análisis de componentes principales: número de granos por planta (NGP), peso del grano, duración de la fase lag, contenido máximo de agua del grano, tasa de llenado, duración del llenado, relación fuente-destino durante el período crítico (RFD_{V14-R2}) y relación fuente destino durante el período de llenado de los granos (RFD_{R2-R6}). **201**

Cuadro A4.2. Probabilidades asociadas a los coeficientes de correlación correspondientes a las 8 variables incluidas en el análisis de componentes principales: número de granos por planta (NGP), peso del grano, duración de la fase lag, contenido máximo de agua del grano, tasa de llenado, duración del llenado, relación fuente-destino durante el período crítico (RFD_{V14-R2}) y relación fuente destino durante el período de llenado de los granos (RFD_{R2-R6}). En negrita los casos con $p < 0,05$. **201**

Cuadro A4.3. Medias de los efectos principales de la fecha de siembra (temprana y tardía), el nivel de nitrógeno (N0, N250) y el tipo híbrido (granífero, doble propósito y silaje) sobre los carbohidratos solubles en agua en el tallo (CHST) en R2 (ca. 15 días post-*silking*), R4 (ca. 30 días post-*silking*), R5 (ca. 45 días post-*silking*) y R6 (ca. 60 días post-*silking*) expresados en gramos por planta. **202**

Cuadro A5.1. Temperaturas medias, máximas y mínimas del aire promedio, humedad relativa promedio, velocidad del viento promedio, radiación solar promedio, déficit de presión de vapor (DPV) promedio y precipitaciones totales durante el período de secado de los granos post-madurez fisiológica para los experimentos utilizados para entrenar los modelos de secado de los granos. La media histórica para cada variable (desde 1985 a 2021) en Pergamino se muestra entre paréntesis como referencia. **203**

Cuadro A6.1. Coeficientes de correlación correspondientes a las 7 variables incluidas en el análisis de componentes principales: DMS_p , DMS_{t+h} y DMS_e corresponden a la digestibilidad de la materia seca de planta entera, tallo + hojas y espigas respectivamente, FDN, fibra detergente neutra de la fracción tallo + hojas y espigas y temperatura media del aire (T_{media}) durante el llenado efectivo de los granos (R2-R6). **205**

Cuadro A6.2. Probabilidades asociadas de los coeficientes de correlación correspondientes a las 7 variables incluidas en el análisis de componentes principales: DMS_p , DMS_{t+h} y DMS_e corresponden a la digestibilidad de la materia seca de planta entera, tallo + hojas y espigas respectivamente, FDN, fibra detergente neutra de la fracción tallo + hojas y espigas y temperatura media del aire (T_{media}) durante el llenado efectivo de los granos (R2-R6). En negrita los casos con $p < 0,05$. **205**

Cuadro A6.3. Medias correspondientes al inicio, el final y la duración de la ventana de picado expresadas en tiempo térmico. Los datos corresponden a las medias de la fecha de siembra (temprana y tardía), el nivel de nitrógeno (N0 y N250) y el tipo híbrido (grano, doble propósito y silaje) para dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados de ANVA se muestran al final del cuadro. **206**

Cuadro A6.4. Medias correspondientes a digestibilidad de la materia seca (MS) de planta entera, digestibilidad de la materia seca, fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), proteína y energía de tallo + hojas y espigas, y lignina detergente ácida de la fracción tallo + hojas. Los datos corresponden a las medias de la fecha de siembra (temprana y tardía), el nivel de nitrógeno (N0 y N250) y el tipo híbrido (grano, doble propósito y silaje) para dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020), excluyendo al híbrido EXP 1517 *bm3* RR2. **207**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Análisis de conglomerados incluyendo ocho híbridos de maíz agrupados según su tipo de híbrido: grano (naranja), doble propósito (celeste) o silaje (verde). **48**

Figura 2.2. Evolución temporal de la temperatura media del aire (en °C, cuadrados), la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA, en MJ m⁻² d⁻¹, círculos) y las precipitaciones (en mm, barras) durante 2019/2020 (negro) y 2020/2021 (gris). Cada uno de los puntos y barras indican el promedio decadal de la variable. Las barras horizontales inferiores representan la duración de las principales etapas fenológicas del cultivo de maíz para cada ambiente: en verde, el período comprendido entre la siembra y el inicio del período crítico (ca. V14), en amarillo el período crítico (V14-R2) y en naranja el período de llenado de los granos (R2-R6). **51**

Figura 3.1. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden a i) rendimiento en grano, biomasa total aérea e índice de cosecha a la madurez fisiológica, y ii) biomasa total aérea, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) durante tres períodos diferentes: VE-V14, período crítico (V14-R2) y período de llenado efectivo de los granos (R2-R6). Los vectores grises discontinuos representan la temperatura media (Tmedia) y la RFA incidente acumulada (RFA) para los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6. **72**

Figura 3.2. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden a i) rendimiento en grano, número de granos, peso de los granos, ii) tasa de crecimiento por planta (TCP) para tres períodos diferentes: VE-V14, período crítico (V14-R2) y período de llenado efectivo de los granos (R2-R6), iii) partición de biomasa a espiga durante el período crítico (PBEV14-R2) y eficiencias reproductivas de planta y espiga. Los vectores grises discontinuos representan la temperatura media (Tmedia) y la RFA incidente acumulada (RFA) para los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6. **75**

Figura 3.3. Relación entre el número de granos por planta y i) la tasa de crecimiento por planta durante el período de llenado efectivo del grano (TCP_{R2-R6}), y ii) el índice de cosecha. Los paneles de la izquierda corresponden a las fechas de siembra temprana (a y c) y los paneles de la derecha a las fechas de siembra tardías (b y d). Los círculos

representan al tipo de híbrido de grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **78**

Figura 3.4. Relación entre la temperatura media del aire y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) para el período comprendido entre la emergencia y el inicio del período crítico (VE-V14). Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos) bajo dos fechas de siembra (temprana: símbolos de colores oscuros, tardía: símbolos de colores claros). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **81**

Figura 4.1. Esquema que describe a) la acumulación de biomasa por planta y b) la acumulación de materia seca del grano (naranja) y el contenido de agua del grano (azul) en respuesta al tiempo térmico desde de la siembra. En ambas figuras, las flechas negras horizontales indican la duración de las diferentes fases. Para la acumulación de biomasa, las etapas fisiológicas indicadas a lo largo del ciclo son siembra (S), emergencia (VE), catorce hojas (V14), *silking* (R1), *silking* +15 días (R2) y madurez fisiológica (R6). Para la acumulación de materia seca del grano, las etapas indicadas son R1, grano en estado de ampolla (R2), grano lechoso (R3), grano pastoso (R4), grano dentado (R5) y R6. **88**

Figura 4.2. Análisis de conglomerados incluyendo ocho híbridos de maíz agrupados según su tipo de híbrido: grano (naranja), doble propósito (celeste) o silaje (verde). **95**

Figura 4.3. Relación entre el peso del grano y sus determinantes fisiológicos: (a, c) tasa de llenado y (b, d) duración del llenado de los granos. Los paneles superiores corresponden a las fechas de siembra temprana (a, b), y los paneles inferiores a las fechas de siembra tardías (c, d). Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **99**

Figura 4.4. Relación entre a) el contenido máximo de agua del grano y la duración de la fase *lag* y b) la tasa de llenado de los granos y el contenido máximo de agua del grano. Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos) bajo dos fechas de siembra (temprana: símbolos de colores oscuros, tardía: símbolos de colores claros). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **100**

Figura 4.5. Respuesta del peso del grano, la tasa de llenado de los granos y la duración del llenado de los granos a la relación fuente-destino durante el período de llenado efectivo de los granos (R2-R6). Los paneles superiores corresponden a fechas de siembra tempranas (a, b y c), y los paneles inferiores a fechas de siembra tardías (d, e y f). Los círculos representan a los híbridos graníferos, los triángulos de doble propósito y los cuadrados a los híbridos de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹ en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **102**

Figura 4.6. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden al número de granos por planta (NGP), el peso del grano, el contenido máximo de agua del grano, la fase *lag*, la tasa y la duración del llenado de los granos, la relación fuente-destino durante el período V14-R2 (RFD_{V14-R2}) y la relación fuente-destino durante el periodo R2-R6 (RFD_{R2-R6}). **105**

Figura 4.7. Evolución del peso del grano (círculos llenos; eje y izquierdo) y los carbohidratos solubles en agua en el tallo (cuadrados abiertos; eje y derecho) en función del tiempo térmico desde silking de híbridos para grano (a, d, g, j), doble propósito (b, e, h, k) y silaje (c, f, i, l) cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹ en verde) durante dos campañas agrícolas: 2019/2020 (a-c, g-i) y 2020/2021 (d-f, j-l). Los paneles superiores (a-f) corresponden a siembras tempranas y los paneles inferiores (g-l) a siembras tardías. Para el peso del grano, las líneas continuas representan los modelos ajustados. Para los carbohidratos solubles en agua en el tallo, las líneas discontinuas conectan los puntos adyacentes y las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **108**

Figura 5.1. Relación entre el coeficiente de secado post-madurez observado k_{obs} (ajustado de forma independiente para cada ambiente) con a) k_{pre} (calculado incluyendo variables meteorológicas desde silking hasta madurez fisiológica), y b) k_{post} (calculado con variables meteorológicas desde madurez fisiológica hasta humedad de cosecha). Todos los k se calcularon para cada ambiente del conjunto de datos de entrenamiento. Los colores indican las diferentes fechas de siembra. La línea llena indica el ajuste de regresión cuyas métricas se encuentran en la figura y la línea discontinua indica la relación 1:1. **131**

Figura 5.2. Relación entre la humedad de los granos predicha (%) y la humedad de los granos observada (%) ajustando el modelo presentado en la ecuación [5.3] considerando: (a, d) $k = 0,062$, (b, e) k_{pre} calculado incluyendo variables meteorológicas explicativas desde silking hasta madurez fisiológica y (c, f) k_{post} calculado incluyendo variables meteorológicas explicativas desde madurez fisiológica

a humedad de cosecha comercial para el conjunto de datos de evaluación de fechas de siembra tempranas (a, b, c) y tardías (d, e, f), respectivamente. Los diferentes colores representan los sitios incluidos en el análisis (naranja: Ashland Bottoms, KS, EE. UU.; azul: Pergamino, BA, Argentina). La línea discontinua indica la relación 1:1. Las métricas de las validaciones cruzadas se muestran en cada panel. **133**

Figura 5.3. Relación entre los días predichos y observados desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial (14,5%), ajustando el modelo presentado en la ecuación [5.3] considerando a) k_{pre} calculado con variables meteorológicas explicativas desde silking hasta madurez fisiológica y b) k_{post} calculado con variables meteorológicas explicativas desde madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial para las fechas de siembra tempranas (símbolos color rosa) y tardías (símbolos de color celeste), respectivamente. Las diferentes formas representan los sitios incluidos en el análisis (círculos: Pergamino, BA, Argentina, triángulos: Ashland Bottoms, KS, EE.UU.). La línea discontinua indica la relación 1:1. La ecuación de la recta de regresión (línea llena) y las métricas de las validaciones cruzadas se muestran en el panel. **134**

Figura 5.4. Relación entre a) la radiación solar media (en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y b) el déficit de presión de vapor medio (en kPa) pre y post-madurez fisiológica calculados para cada ambiente del conjunto de datos de entrenamiento. Los colores indican diferentes fechas de siembra. En cada panel se muestran los coeficientes de determinación (R^2) y correlación (r). **136**

Figura 6.1. Evolución del porcentaje (%) de materia seca de planta entera en función de los días desde silking (R_1) de híbridos para grano (a, d), doble propósito (b, e) y silaje (c, f) cultivados en dos campañas (2019/2020, paneles a, b y c; 2020/2021, paneles d, e y f en dos fechas de siembra (temprana: símbolos llenos y línea continua; tardía: símbolos vacíos y línea punteada), bajo dos niveles de nitrógeno (N_0 : sin fertilización nitrogenada, en rojo; N_{250} : fertilizado con 250 kg N ha^{-1} , en verde). **149**

Figura 6.2. Relación entre la materia verde y a) la altura de planta en R_2 , y b) el diámetro de la base del tallo en R_2 y la duración de la ventana de picado y c) la altura de planta en R_2 , y d) el diámetro de la base del tallo en R_2 . Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N_0 : sin N añadido, en rojo, N_{250} : 250 kg N ha^{-1} , en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos), en dos fechas de siembra (temprana: símbolos de color oscuro, tardía: símbolos de color claro) en una densidad única de 9 plantas m^{-2} . Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **152**

Figura 6.3. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N_0 : sin N

agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden a digestibilidad de la materia seca de planta entera (DMS_p), digestibilidad de la materia seca de tallo + hojas (DMS_{t+h}), digestibilidad de la materia seca de espigas (DMS_e), FDN de tallo + hojas y FDN de espigas. Los vectores grises discontinuos representan la temperatura media (T_{media}) para los períodos VE-R2 y R2-R6. **159**

Figura 6.4. Respuesta en función del índice ambiental del a) rendimiento en grano, b) la materia verde y c) la digestibilidad de la materia seca de planta entera (DMS_p) para 8 híbridos de maíz de diferente uso final (grano, doble propósito, silaje), cultivados en cuatro ambientes (combinación de dos campañas agrícolas y dos fechas de siembra) y dos condiciones de fertilización nitrogenada (8 combinaciones año × FS × N). Los cuadros en la sección inferior indican el coeficiente b y el R² del ajuste de regresión lineal para cada uno de los híbridos. **163**

Figura 6.5. Relación entre adaptabilidad (*b*) y rendimiento medio de cada híbrido a través de ambientes para a) el rendimiento en grano, b) la materia verde, y c) la digestibilidad de planta entera. Los datos corresponden a los ocho híbridos evaluados (graníferos en naranja, doble propósito en azul y sileros en verde). Las líneas llenas representan el índice ambiental medio de cada variable (vertical) y un índice de adaptabilidad de *b* = 1 (horizontal). **164**

Figura 6.6. Relación entre a) la temperatura media del aire durante el período de llenado efectivo de los granos (R2-R6) y el porcentaje de carbohidratos solubles en tallo (CHST) a los 60 días desde silking, y b) el porcentaje de CHST a los 60 días desde silking y la digestibilidad de la materia seca de la fracción tallo + hojas (DMS_{t+h}). Los círculos representan al tipo de híbrido de grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos), en dos fechas de siembra (temprana: símbolos de color oscuro, tardía: símbolos de color claro). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE). **168**

Figura 7.1. Evolución de la superficie de maíz sembrada en Argentina a) para el período 1970-2022 (<https://datos.magyp.gob.ar/>) y b) bajo siembra tardía (%) entre 2008 y 2022 (adaptado de Otegui et al., 2021). **173**

Figura 7.2. Diagrama de flujo describiendo las relaciones entre los determinantes fisiológicos y numéricos del rendimiento en grano de maíz a nivel de planta y de cultivo para diferentes tipos de híbridos de maíz (cajas color naranja en híbridos para grano, en celeste para doble propósito y en verde para silaje). Las flechas continuas representan relaciones entre variables y las discontinuas indican variables o procesos que regulan dichas relaciones. Letras diferentes dentro de las cajas indican diferencias significativas entre tipos de híbridos con *p* = 0,05, indicando con la letra A el mayor valor obtenido para cada rasgo representado. **183**

Figura 7.3. Respuesta de (a) el rendimiento en grano, (b) la biomasa total aérea, (c) el número de granos, (d) el índice de cosecha, (e) la materia seca digestible de planta entera (MSD_p), (g) la materia seca de la fracción tallo + hojas, y (h) la ventana de picado a las diferencias en la duración del ciclo de cultivo. (f) Relación entre la MSD_p y la materia seca de la fracción tallo + hojas. Los círculos representan al tipo de híbrido de grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos), en dos fechas de siembra (temprana: símbolos de color oscuro, tardía: símbolos de color claro). **189**

Figura A5.1. Gráficos de correlación entre el coeficiente de secado post-madurez observado (k_{obs}) y las variables meteorológicas explicativas calculadas a partir de a) *silking* hasta la madurez fisiológica y b) desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial (14,5%). DPV indica el déficit de presión de vapor. **204**

ABREVIATURAS

A: ambiente
ACP: análisis de componentes principales
ANVA: análisis de la varianza
ASI: intervalo antesis-*silking*
BMR: *Brown-midrib*
CHST: carbohidratos solubles en tallo
CPn: componente principal n
D: híbrido doble propósito
DMS: digestibilidad de la materia seca
DMS_e: DMS de espigas
DMS_p: DMS de planta entera
DMS_{t+h}: DMS de tallos+hojas
DPV: déficit de presión de vapor
EE: error estándar de la media
EUR: eficiencia en el uso de la radiación
FDA: fibra detergente ácida
FDN: fibra detergente neutra
 $fRFA_i$: fracción de RFA incidente que es interceptada por el cultivo
FS: fecha de siembra
G: híbrido granífero
H: tipo de híbrido
H_e: humedad de equilibrio
HR: humedad relativa
IA: índice ambiental
IC: índice de cosecha
 k : coeficiente de secado de los granos post-madurez fisiológica
 k_{obs} : k observados
 k_{pre} : k pre-madurez fisiológica
 k_{post} : k post-madurez fisiológica
LDA: lignina detergente ácida
MS: materia seca
MS_e: MS de las espigas

MS_{t+h}: MS de tallo + hojas

N: nitrógeno

NG: número de granos por m⁻²

NGP: número de granos por planta

PBE: partición de biomasa a espiga

PG: peso individual del grano

R1: floración femenina o *silking*

R2: cuaje de granos

R6: madurez fisiológica

RFA: radiación fotosintéticamente activa incidente

RFAi: RFA interceptada por el cultivo

RFD: relación fuente-destino

RMSE: raíz del error cuadrático medio

RRMSE: raíz relativa del error cuadrático medio

RS: radiación solar

S: híbrido silero

TCE: tasa de crecimiento de espiga durante el período n

TCPn: tasa de crecimiento de planta durante el período n

Tmedia: temperatura media

TT: tiempo térmico

VE: emergencia

Vn: estadio correspondiente a la hoja número n

RESUMEN

En la última década, la posibilidad de atrasar la fecha de siembra en maíz (*Zea mays* L.) promovió la expansión y la diversificación de usos y destinos del cultivo en Argentina. El objetivo de esta tesis fue analizar los factores que determinan la biomasa final, el rendimiento en grano, las dinámicas de llenado y secado de los granos, la producción de materia verde y seca, así como su calidad para la producción de silajes de planta entera, en un conjunto de híbridos comerciales destinados a diferentes usos finales (graníferos, sileros y doble propósito). Se realizaron experimentos a campo bajo condiciones contrastantes de crecimiento generadas por diferentes años, fechas de siembra y niveles de fertilización nitrogenada. Los resultados más relevantes destacan la identificación de los procesos clave que regulan la determinación del rendimiento en grano y la biomasa en híbridos con diferentes usos finales. Asimismo, se estudiaron detalladamente los mecanismos fisiológicos que controlan el peso del grano y los carbohidratos solubles en agua en el tallo (CHST), destacándose la elevada removilización de CHST en siembras tardías, con importantes implicancias para la producción de grano y silaje. Se lograron también avances en la mejora de los algoritmos de predicción del secado de los granos, desarrollando modelos para estimar la pérdida de humedad y el tiempo hasta la humedad de cosecha comercial para una amplia gama de ambientes y fechas de siembra. Por último, se cuantificaron la materia verde y seca, la duración de la ventana de picado y se analizó la calidad de la materia seca para silaje en híbridos con diferentes usos finales, demostrando la influencia de la fecha de siembra y la fertilización nitrogenada sobre estos rasgos. La presente tesis proporciona información valiosa para optimizar el manejo del maíz bajo distintas condiciones productivas.

Palabras Claves: Maíz (*Zea mays* L.), rendimiento en grano, llenado de los granos, carbohidratos solubles en agua en el tallo, secado de los granos, silaje.

ABSTRACT

In the last decade, the possibility of delaying the sowing date in maize (*Zea mays* L.) has promoted the crop expansion and diversification of end uses in Argentina. This thesis aimed to analyze the factors determining the final biomass, grain yield, kernel filling, and grain dry-down dynamics, the production of fresh and dry matter, as well as its quality for whole plant silages in a set of commercial hybrids intended for different end uses (grain, silage, and dual-purpose). Field experiments were conducted under contrasting growing conditions by combining years, sowing dates, and nitrogen fertilization levels. This thesis's most relevant results highlight the identification of key processes that regulate the determination of grain yield and biomass in hybrids with different end uses. In addition, a detailed study of the physiological mechanisms controlling kernel weight and the dynamics of water-soluble carbohydrates in stem (WSCS) was performed, highlighting the high remobilization of WSCS in late sowings, with important implications for grain and silage production. Furthermore, advances in improving current algorithms to predict grain dry-down were achieved, developing a more general model to estimate kernel moisture loss and time to achieve harvest kernel moisture for a wide range of environments and sowing dates. Finally, the quantification of fresh and dry matter, the duration of the chopping window, and the analysis of the quality of the dry matter for silage in hybrids with different end uses demonstrated the influence of the sowing date and nitrogen fertilization on these traits. The results of this thesis provide valuable information to optimize the management of maize crops destined for different end uses under various productive conditions.

Keywords: Maize (*Zea mays* L.), grain yield, kernel filling, water-soluble carbohydrates in stem, grain dry-down, silage.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Planteo del problema y revisión de antecedentes

1.1. Cambios tecnológicos y efectos sobre el manejo reciente del cultivo de maíz en la Región Pampeana

A nivel mundial, el maíz (*Zea mays* L.) es el primer y segundo cultivo en términos de producción y área cosechada respectivamente (FAO, 2023). De manera similar, en Argentina el maíz es el cultivo más importante en producción (55,25 M t, promedio de los últimos 5 años) y el segundo en superficie cosechada (8 M ha, promedio de los últimos 5 años) después de la soja (MAGyP, 2023). Durante varias décadas, la producción de maíz en Argentina se concentró en la subregión más productiva de la región Pampeana, la denominada Pampa Ondulada (32°S-36°S y 58°O-63°O, Hall et al., 1992). Esta región se caracteriza por presentar suelos principalmente Molisoles y precipitaciones superiores a los 800 mm anuales. Los precios favorables de los *commodities*, junto al aumento de la demanda de granos para la exportación y usos industriales y los cambios en las tendencias climáticas, promovieron la expansión de la agricultura a otras áreas usualmente consideradas ‘marginales’ para el cultivo. Estas áreas se caracterizan por su condición de menor disponibilidad hídrica (e.g. al oeste y sudoeste de la Pampa Ondulada), y en ellas previamente predominaba la ganadería sustentada en pasturas (Soriano, 1991).

En la históricamente mayor región productora de maíz de Argentina, descrita como Pampa Ondulada (Hall et al., 1992), el cultivo de maíz se ha sembrado tradicionalmente a principios de la primavera (de mediados de septiembre a mediados de octubre). Esta práctica ubica la floración del cultivo entre la segunda quincena de diciembre y la primera de enero, en coincidencia con alta temperatura y radiación solar (Otegui et al., 2021). En condiciones de buena oferta hídrica (e.g. bajo riego), y utilizando híbridos adaptados a la zona (ca. 80 días a floración) sembrados en alta densidad, se

obtiene la máxima productividad en la región (Otegui et al., 1995, 1996). Sin embargo, aunque la distribución de lluvias es de tipo monzónico (i.e. mayor abundancia durante el verano) y el clima de la región se clasifica como subtropical húmedo con veranos calurosos y húmedos (“Cfa” en la clasificación de Köppen-Geiger), la demanda atmosférica durante el mes de enero suele superar a la oferta hídrica del cultivo (Maddonni, 2012; Otegui et al., 2021). Como consecuencia, en dichas fechas de siembra bajo condiciones de secano se observa la mayor variabilidad interanual de rendimiento, debido a la mayor incidencia de déficit hídrico (Maddonni, 2012). La aparición del maíz Bt en 1997 (Williams et al., 1997) permitió atrasar la fecha de siembra (FS) hacia fines de noviembre-principios de diciembre evitando mermas en el rendimiento por incidencia de las principales plagas insectiles (barrenador del tallo -*Diatraea saccharalis*-, oruga cogollera -*Spodoptera fugiperda*- y oruga de la espiga -*Helicoverpa zea*-).

Los maíces cultivados en fechas tardías generalmente tienen una etapa vegetativa más corta (ca. 60 días a floración), producto de altas temperaturas durante la misma (Mercau y Otegui, 2015; Otegui et al., 1995). La floración ocurre generalmente en febrero, desplazando tanto el período crítico como el período de llenado de los granos hacia el final del verano-principios del otoño, con el consiguiente deterioro del ambiente fototermal (Bonelli et al., 2016; Maddonni, 2012). Como consecuencia, el potencial de rendimiento en estas fechas de siembra es menor, aunque las condiciones hídricas no sean limitantes (Otegui et al., 1996). A pesar de estas tendencias, el principal beneficio de las siembras tardías es que en condiciones de secano disminuyen la variabilidad interanual del rendimiento en grano respecto a las siembras tempranas pues disminuye la probabilidad de ocurrencia de déficits hídricos alrededor de floración (Maddonni, 2012; Otegui et al., 2021). Esto ha permitido que, en la última década, la superficie de maíz tardío + maíz de segunda (i.e. sobre un cultivo antecesor como cebada, trigo o arveja;

Mercau y Otegui, 2015) aumentara desde prácticamente cero en 2008-2009 hasta alcanzar actualmente un ~50% de la superficie total destinada a maíz en Argentina (Bolsa de Cereales, 2023).

1.2. Usos del maíz en Argentina

Tradicionalmente, la mayor parte del maíz cultivado en Argentina ha tenido como destino final su exportación como grano, siendo nuestro país el tercer exportador a nivel mundial (FADA, 2023). Sin embargo, cuando se consideran los datos históricos de utilización de maíz para diversos usos industriales, se verifica que el mercado interno ha aumentado notablemente su consumo (MAGyP, 2023). Esto se relaciona con la evolución de las cadenas de agregado de valor ligadas al empleo de este cereal, principalmente para la producción de carne (tanto para consumo interno como para exportación), la producción de leche y productos para el sector avícola. Con la aparición de los biocombustibles, el maíz se transformó en el principal insumo para la producción de etanol y biogás, sumado a su participación en el desarrollo de nuevos materiales biodegradables como los plásticos a base de ácido poli-láctico (MAIZAR, 2010; Das, 2019). Otros usos que también se han ido destacando con el tiempo (pero no serán objeto de atención en la presente tesis) han sido la molienda seca, la molienda húmeda y la producción de maíz para mercados especiales, siendo Argentina el primer exportador mundial de maíz Flint y pisingallo (MAIZAR, 2017; CAMPI, 2023).

La carne más consumida en el país es la bovina y también es la que manifestó un auge en las exportaciones en diferentes momentos de la última década, con un crecimiento muy por encima del consumo *per cápita* del mercado interno (De Emilio, 2018). Las plantas forrajeras y los cereales son la base de la nutrición de los rumiantes y, dentro de

los cereales adoptados para la producción de forrajes, el maíz es el cultivo más ampliamente utilizado (Barrière et al., 2009). En Argentina, la superficie sembrada con maíz para silaje aumentó de manera significativa desde mediados de la década de 1990, acompañando a la creciente intensificación de los sistemas ganaderos. Entre 2000 y 2010 el consumo de forraje de maíz se incrementó en un 41% en Argentina, un crecimiento alto comparado con el promedio mundial que se ubicó en torno al 15% (MAIZAR, 2010). El avance tecnológico que significó la adopción del silo bolsa permitió que en 20 años la superficie destinada a la producción de maíces para silo se multiplique $\times 20$ y que aumente la participación de los forrajes conservados en la dieta animal, alcanzando un $\sim 20\%$ del área total cultivada con maíz en Argentina (CACF, 2023), que promedió 9,9 M ha en los últimos 5 años. La producción de silaje de maíz ha aumentado constantemente durante los últimos 20 años, no sólo en Argentina sino también en Estados Unidos y algunos países europeos (por ejemplo, Francia, Alemania y el Reino Unido), impulsada por un mayor consumo de productos de origen animal. También ha aumentado el uso del maíz como alimento primario (forraje) para vacas lecheras (Statista, 2023; Karnatam et al., 2023). Durante los últimos años, en Argentina la tendencia descrita se ha visto facilitada por la adopción de la estrategia de fecha de siembra tardía antes descrita, que impulsó la expansión del área productiva de maíz hacia los márgenes de la Región Pampeana húmeda y más allá (Otegui et al., 2021), elevando la superficie desde los constantes 3-4 M ha registrados antes de 2009-2010 hasta los ~ 10 M ha actuales. El desplazamiento de la zona productiva de maíz hacia zonas periféricas a la Región Pampeana, que se encuentran a grandes distancias de los puertos y por ende con un costo de flete que imposibilita la exportación como grano, incrementó el consumo ‘en chacra’ (i.e. alimentación animal) del maíz y/o la producción de biocombustibles en plantas cercanas.

A pesar de los cambios recientes en las prácticas de manejo y la diversificación de usos y destinos del cultivo, la mayor parte de los esfuerzos del mejoramiento genético para el cultivo de maíz realizados para la Región Pampeana Central se han orientado a la obtención de híbridos con comportamiento superior en fechas de siembra tempranas y con destino de cosecha para grano (Otegui et al., 2021).

1.3. Llenado de los granos, relaciones fuente-destino y carbohidratos solubles en tallo

El rendimiento en grano de maíz es un carácter complejo que puede ser descripto en función del producto de sus denominados componentes numéricos: el número de granos cosechados y su peso individual. Aunque el primero es el que explica la mayor parte de las variaciones en rendimiento (Andrade et al., 1996; Otegui, 1995), ambos pueden afectarlo significativamente (Cerrudo et al., 2013; Gambín y Borrás, 2010). Por otra parte, mientras el número de granos es fuertemente influenciado por el ambiente (D'Andrea et al., 2013; Ruiz et al., 2019), el peso del grano es un carácter altamente heredable (Reddy y Daynard, 1983, Sadras, 2007), aunque varía marcadamente entre especies (Gambín y Borrás, 2010), grupos genotípicos dentro de especies (Alvarez Prado et al., 2013; Hisse et al., 2019) y genotipos dentro de un grupo genotípico (Gambín et al., 2007; Borrás et al., 2009).

La acumulación de biomasa en los granos comienza luego de la fertilización de los ovarios y puede dividirse en tres fases: la fase *lag*, el período de llenado efectivo del grano y una etapa de maduración (Bewley y Black, 1985). La fase *lag* es un período relativamente corto caracterizado por un rápido incremento en el contenido hídrico del grano, casi sin acumulación de biomasa (Westgate y Boyer, 1986). Es un período de

activa división celular, donde se define el número de células endospermáticas y amiloplastos, involucrados en la deposición de almidón (Reddy y Daynard, 1983; Jones et al., 1996). El período de llenado efectivo de los granos se caracteriza por una rápida acumulación de biomasa y puede ser descrito a través de dos procesos fisiológicos: la tasa de llenado y la duración de la fase (Egli, 1998). El volumen del grano y el contenido hídrico alcanzan sus mayores valores durante esta fase (Borrás et al., 2003; Gambín et al., 2007) y luego declinan coordinadamente con el incremento en la deposición de biomasa. Durante la tercera y última fase, la tasa de acumulación de biomasa decrece y se establece el peso final del grano (Egli, 1998; Borrás y Otegui, 2001). En este momento, que se conoce comúnmente como madurez fisiológica, los granos alcanzan su máximo peso e ingresan en un estado de quiescencia, seguido por una pérdida neta de agua que depende de las condiciones prevalentes del ambiente (Martinez-Feria et al., 2019; Schmidt y Hallauer, 1966).

El peso final del grano está afectado por las condiciones de crecimiento durante el período de llenado efectivo del grano (Borrás y Otegui, 2001; Cirilo y Andrade, 1996). Los asimilados para el llenado del grano provienen de los carbohidratos generados por la fotosíntesis actual, la absorción de nitrógeno del suelo y la removilización de las reservas almacenadas en los órganos vegetativos (Gastal et al., 2012) en una proporción que varía de acuerdo a la combinación genotipo $\times$ ambiente. Bajo condiciones no limitantes, la fuente de asimilados suele ser suficiente para cubrir la demanda de los granos, con una contribución marginal de la removilización (Sekhon et al., 2016). Bajo esas condiciones, el peso final de los granos no se incrementa demasiado en respuesta a aumentos en la disponibilidad de asimilados por granos (Borrás et al., 2004; Gambín et al., 2008). Por el contrario, el crecimiento del grano es altamente susceptible a limitaciones por fuente durante esta fase (Borrás et al., 2004), las que reducen el peso final por acortamiento del

período de llenado de los granos (Badu-Apraku et al., 1983; Echarte y Tollenaar, 2006; Olmedo Pico y Vyn, 2021). En esta situación, el llenado de los granos puede ser parcialmente sostenido por los carbohidratos solubles del tallo (CHST; Andrade y Ferreiro, 1996; Uhart y Andrade, 1995b), que constituyen las comúnmente denominadas “reservas”. Cuando la relación fuente-destino es baja existe una alta contribución de los CHST al llenado del grano, aunque esta fuente de asimilados es insuficiente para sostener todo su crecimiento. Consecuentemente, el llenado del grano se interrumpe cuando las reservas se agotan y no hay aporte de asimilados por fotosíntesis directa (Rattalino Edreira et al., 2013). Si los procesos de removilización de reservas son excesivos, pueden ocurrir diversos síndromes, como senescencia foliar acelerada, maduración anticipada de granos, quebrado de tallos y vuelco de plantas, y en situaciones extremas la aparente “muerte súbita” del cultivo (Vega et al., 2017).

El atraso en la fecha de siembra produce disminuciones en el rendimiento en grano de maíz, que pueden explicarse por reducciones en i) el número, el tamaño y la actividad de los granos en crecimiento (Otegui et al., 1995; Cirilo y Andrade, 1994b, 1996), ii) la producción de asimilados por la fotosíntesis durante el período de llenado de los granos (Cirilo y Andrade, 1996; Tsimba et al. 2013, Bonelli et al., 2016), y iii) el período de llenado efectivo de los granos y/o la tasa de llenado (Cirilo y Andrade, 1996; Chazarreta et al., 2021). Todas estas son respuestas similares a la observadas en cultivos de maíz creciendo en ambientes de mayor latitud (Kiniry y Otegui, 2000; Bonelli et al., 2016). En esas condiciones, el atraso en la fecha de siembra produce reducciones en la relación fuente-destino que suelen desencadenar aumentos en la removilización de CHST para satisfacer la demanda de los granos (Ruget, 1993; Bonelli et al., 2016).

El suministro de nutrientes, particularmente la disponibilidad de nitrógeno (N), es especialmente importante debido a que influye tanto sobre el peso individual como sobre

el número final de granos (Uhart y Andrade, 1995a, 1995b). El efecto de la disponibilidad de N sobre los determinantes fisiológicos del rendimiento en grano de maíz (i.e. captura de luz, producción de biomasa y partición de biomasa a las estructuras reproductivas) ha sido documentado tanto para híbridos como para líneas endocriadas (Jacobs y Pearson, 1991,1992; Uhart y Andrade, 1995a, 1995b; Rajcan y Tollenaar, 1999; Monneveux et al., 2005; D’Andrea et al., 2006, 2008; 2009; Ciampitti y Vyn, 2011). En estudios recientes también se ha analizado las diferencias genotípicas en la respuesta del peso de los granos ante cambios en la disponibilidad de N en híbridos y líneas endocriadas (Hisse et al., 2019) y el efecto de la interacción FS $\times$ N sobre el rendimiento en grano y la eficiencia del uso del N (i.e. la relación entre el rendimiento en grano del cultivo y el N disponible en el suelo; Maltese et al., 2019). En siembras tardías, tanto el período de barbecho como la etapa previa a la floración suelen transcurrir con temperaturas más altas respecto de las siembras tempranas, lo que favorece la mineralización de la materia orgánica, dando como resultado niveles más elevados de N en el suelo a la siembra (Bruun et al., 2006; Caviglia et al., 2014; Coyos et al., 2018; Maltese et al., 2020). Sin embargo, esos niveles de N a la siembra más elevados no son suficientes para maximizar los rendimientos en grano, dado que el principal factor que limita los rendimientos en siembras tardías a nivel productivo es la fertilización nitrogenada y existen diferencias genotípicas en la respuesta a este nutriente (Gambín et al, 2016). Por lo anteriormente expuesto, resulta relevante profundizar acerca del efecto interactivo de la FS y el N sobre i) los determinantes fisiológicos del llenado de los granos, ii) las relaciones fuente-destino y iii) las dinámicas de utilización de los CHST en híbridos graníferos, doble propósito y sileros. La inclusión de híbridos con diferente uso final permitirá evaluar si las prácticas de manejo (tanto la fecha de siembra como el nivel de N) influenciarán de forma diferencial el llenado de los granos, las relaciones fuente-destino y la utilización de CHST según el tipo de híbrido

considerado, lo cual no sólo impactará sobre el rendimiento en grano, sino que también puede tener grandes implicancias sobre la calidad del material a ensilar (Camarasa et al. 2015).

1.4. Secado de los granos: Importancia en los planteos productivos y modelos predictivos

Desde una perspectiva fisiológica del cultivo, los granos de maíz alcanzan su máximo contenido de agua hacia la mitad del período de llenado de los granos (Borrás et al., 2003; Gambín et al., 2007). Después de este punto, la pérdida de agua de los granos se puede dividir en dos fases: pre y post madurez fisiológica. Durante la primera fase, el desplazamiento de agua en los granos se debe primordialmente al desplazamiento provocado por la deposición de asimilados en estos, y podría entonces interpretarse como una pérdida de agua asociada con el “desarrollo” (i.e. el llenado) del grano (Brooking, 1990). La segunda fase comienza una vez que la planta ha alcanzado la madurez fisiológica (i.e. máximo peso individual del grano), cuando la humedad del grano es aproximadamente del 35-37% (Borrás et al., 2003, 2004). Post madurez fisiológica, la conexión placenta-chalaza colapsa hasta necrosarse y el grano se aísla de la planta madre (Thompson et al., 1968; Maiorano et al., 2014). A partir de entonces, no existe más intercambio de fluidos planta-grano, pero sí grano-atmósfera a través de pérdidas evaporativas desde el propio grano, disminuyendo la tasa de secado respecto de la fase previa. Si bien esta última etapa del secado está fuertemente condicionada por la temperatura y la humedad relativa del aire (Thompson et al., 1968; Nielsen, 2018; Martínez-Feria et al., 2019; Chazarreta et al., 2023), diferencias entre genotipos en la estructura de los granos y/o las espigas pueden afectar la tasa de secado post madurez

fisiológica. Entre estas diferencias se pueden mencionar: el número y el peso de las chalas, el porcentaje de humedad del grano al momento de la aparición de la capa negra (Cavalieri y Smith 1985, Troyer y Ambrose 1971) y/o el grosor y la permeabilidad de los pericarpios de los granos (Prudy y Crane 1967). En los últimos años, en diferentes estudios se propuso la utilización de modelos de secado para mejorar la estimación general de los cambios en la humedad del grano de maíz y la predicción del tiempo de cosecha. Estos modelos incluyen variables tales como las temperaturas diarias máximas y mínimas y las precipitaciones (Piggot et al., 2010), o se basan en los cambios en la humedad de equilibrio de los granos, que varía en función de la humedad y la temperatura. Estos últimos requieren 3 parámetros: el contenido de humedad a madurez fisiológica, un coeficiente de secado post-madurez fisiológica (constante) y el cálculo diario de la humedad de equilibrio (Maiorano et al., 2014, Martínez-Feria et al., 2019). Los cambios actuales en las prácticas de manejo agrícola, particularmente el retraso en la fecha de siembra (Jiang et al., 2020; Ke and Ma, 2021; Norwood, 2001; Otegui et al., 2021), exponen los granos a diversas condiciones ambientales durante la fase de secado. Esto afecta la capacidad de los modelos disponibles, que consideran al coeficiente de secado post-madurez fisiológica como constante para capturar la pérdida de humedad del grano, particularmente en ambientes de siembra tardía (Chazarreta et al., 2021). El retraso de la fecha de siembra del cultivo de maíz no es una práctica exclusiva de Argentina. Durante los últimos años, se ha incrementado en América del Sur (Nóia Júnior and Sentelhas, 2019; Otegui et al., 2021), América del Norte (Norwood, 2001) y China (Jiang et al., 2020). A pesar de la relevancia de la pérdida de humedad post madurez fisiológica en maíz, la mayor parte de los trabajos previos se ha centrado principalmente en el período de llenado de los granos (Borrás y Westgate, 2006; Gambín et al., 2007, Borrás et al., 2009). En Argentina, esta tendencia puede haberse debido a que la mayor parte de los

estudios y programas de mejoramiento de maíz han orientado sus esfuerzos hacia el mejoramiento de híbridos para grano creciendo en ambientes de fechas de siembras tempranas (Otegui et al., 2021), donde alcanzar la humedad comercial (i.e. 14,5%) no impone una restricción en términos productivos. Tal situación es particularmente válida para condiciones ambientales como las de la mayor región productora de los Estados Unidos (i.e. el Corn Belt), pero no para los actuales sistemas de producción de la región Pampeana Central de Argentina. En el primer caso, la época de siembra no abarca más de dos meses y cada día de atraso implica una penalización al rendimiento (Choi et al., 2017). En el segundo, la siembra del cultivo se puede extender hasta cuatro meses sin una clara desventaja en el rendimiento, pero el secado del grano post madurez fisiológica sí puede quedar expuesto a condiciones ambientales desfavorables en el caso de siembras tardías (Chazarreta et al., 2021). Consecuentemente, el desarrollo de modelos que logren simular el contenido de humedad de los granos post madurez fisiológica a través de variables ambientales (e.g. temperatura, humedad relativa) y predecir el momento de cosecha sería una herramienta útil no solamente para nuestra región, sino también para diferentes regiones a nivel global donde el maíz se cultiva en una amplia ventana de fechas de siembra.

1.5. Maíz para silaje de planta entera

La calidad del forraje se define como la capacidad de suministrar nutrientes para apoyar las necesidades nutricionales de los animales vivos (Moore et al., 2020). La calidad del maíz para ensilar está estrechamente relacionada con la cantidad de lignina y la digestibilidad de la pared celular, principalmente del tallo (Barrière et al., 2009). Los parámetros más utilizados para la caracterización de la calidad del silaje son: el porcentaje

de materia seca (MS), la digestibilidad de la MS, la fibra detergente ácida (FDA), la fibra detergente neutra (FDN), y el contenido de lignina y cenizas (Barrière et al., 2009, 2010). El porcentaje de MS se entiende como la diferencia entre el peso fresco y el peso seco de una muestra en relación con el peso fresco total, y permite estimar la proporción relativa de biomasa y de agua contenida en el producto. La digestibilidad de la MS está determinada por las propiedades químicas, biológicas y físicas del forraje y se relaciona con la habilidad de un animal de obtener valor nutricional a partir del mismo (Buxton et al., 1995; Cochran et al., 2007). La FDA es una parte de la pared celular formada por celulosa ligada a lignina y compuestos asociados, tales como quitina o sílice. Esta fracción es un indicador indirecto del grado de digestibilidad del forraje: cuanto más alta, menos digestible. La fibra detergente neutra (FDN) es la pared celular total que está compuesta por la fracción de la FDA más la hemicelulosa. Las ligninas son polifenoles y cumplen un rol muy importante en la integridad estructural de los tejidos: son el componente principal de la resistencia de las células vegetales a la degradación por bacterias y hongos. También previenen el acceso físico de las enzimas microbianas del rumen a los carbohidratos de la pared celular y limitan fuertemente su hidrólisis enzimática (Barrière et al., 2009). Por lo tanto, la ingesta voluntaria del forraje se encuentra positivamente correlacionada con la digestibilidad de la planta y negativamente correlacionada con su contenido de lignina (Blaxter et al. 1961; Hawkins et al. 1964). Por último, la fracción de cenizas está compuesta por minerales (macro y micronutrientes), tanto propios del vegetal como adquiridos del ambiente.

El mejoramiento genético para la resistencia al quebrado y vuelco de plantas ha llevado a que los híbridos presenten tallos con un alto contenido de lignina en la pared celular, lo que disminuye su calidad forrajera. Esta disminución se ve compensada con el crecimiento del componente grano (Pinheiro, 1984; Naharudin et al., 2021). Sin embargo,

dependiendo del cultivar, no siempre un porcentaje mayor de grano implica una mejor calidad del material a ensilar (Bertoia y Aulicino, 2014, Karnatam et al., 2023).

Las plantas de maíz *brown-midrib* (*bmr*) exhiben una pigmentación marrón-rojiza en las nervaduras de las hojas y en la médula del tallo, que se vuelven visibles en el estadio de 4-6 hojas (Barrière y Argillier, 1993). Se han descripto 4 genes *bm* en maíz entre 1924 y 1947 (*bm1*, Jorgenson, 1931; *bm2*, Burnham and Brink, 1932; *bm3*, Emerson, 1935; *bm4*, Burnham, 1947). Los ensayos realizados con líneas e híbridos mutantes para los genes *bm* mostraron que los genotipos BMR tienen contenidos de lignina significativamente reducidos, digestibilidad de la pared celular significativamente más alta y que la digestibilidad de la pared celular es más rápida que en genotipos no-BMR tanto en experimentos *in vitro* (Kuc et al., 1968; Lechtenberg et al., 1972; Chabbert et al., 1994; Jung et al., 2012) como *in vivo*. En los estudios también se verificó un aumento de la ingesta voluntaria de maíces BMR (Gordon y Neudoerffer, 1973; Muller et al., 1972, Weller y Phipps, 1986; Rook et al., 1977, Sommerfeldt et al., 1979; Block et al., 1981; Stallings et al., 1982). Además, un meta-análisis mostró que, a igual contenido de FDN, los silajes de planta entera de genotipos BMR tienen mayor digestibilidad de la FDN que los de genotipos convencionales (Ferraretto y Shaver, 2015). Actualmente, en el mercado argentino se encuentran disponibles híbridos de maíz comerciales BMR (e.g. <https://nuseed.com/ar/cultivo/maiz-bmr/>, <http://speciosa.com.ar/maiz-bmr.html>). Sin embargo, a excepción de algunos escasos informes técnicos comerciales, no existe información acerca del comportamiento de los híbridos BMR comerciales en Argentina en relación con la producción y calidad de la materia seca en diferentes condiciones de crecimiento, como las generadas a través de la combinación de fechas de siembra y niveles de fertilización nitrogenada.

El contenido de materia seca al momento de picado tiene relación directa con la calidad técnica (aptitud del forraje para conservarlo con pérdidas mínimas) y con la calidad biológica del cultivo (aptitud para generar un producto animal: leche o carne) (Martínez-Santamaría et al., 2018). Los valores óptimos de humedad para picar las plantas enteras y confeccionar el silo se encuentran entre el 30-40% de MS, dado que permiten la mayor velocidad y nivel de fermentación (Cone et al., 2007). En términos productivos, resulta importante que esta ventana de picado (i.e. el lapso de tiempo en el cual el cultivo permite ser picado obteniendo máxima producción, alta calidad y un adecuado proceso fermentativo que asegure su conservación) dure el mayor tiempo posible, para permitir al productor ensilar el maíz dentro de este período y obtener un silo de mejor calidad. Así, el secado rápido suele ser un atributo deseable en la producción de maíz para grano (porque permite alcanzar rápidamente la humedad de comercialización del 14,5%), pero no lo es para el silaje. Dado que la ventana de picado de los híbridos con destino a silo está íntimamente relacionada con la velocidad de secado (Martínez-Santamaría, et al., 2018), el orden jerárquico (*ranking*) de genotipos para este destino puede diferir del *ranking* basado exclusivamente en el rendimiento en grano.

Un adelanto o un atraso en el momento del picado ideal se traduce en fuertes pérdidas, no solamente en la cantidad y calidad del forraje cosechado, sino también en la calidad de la conservación. Si se pica anticipadamente (e.g. con humedad mayor al 70%) se resigna aporte del grano a la producción de materia seca, lo que significa pérdidas importantes en la calidad. Por el contrario, un atraso en la cosecha genera una fuerte caída de la calidad del forraje en el lote, ya que gran parte de los hidratos de carbono asimilables por el rumiante se transforman en compuestos más complejos (más pared celular, más lignina), generando una caída en la digestibilidad, sobre todo en el componente vegetativo

(caña + hojas). También se producirá endurecimiento del grano y dificultades en el proceso de compactación (Bertoia, 2010).

El momento de picado para la confección de silajes de planta entera se determina usualmente a través de la observación de la evolución de la línea de leche del grano (Wiesrma et al., 1993). Sin embargo, muchos híbridos modernos presentan una mayor persistencia del área foliar verde (*stay-green*), aún al momento en que los granos alcanzan la madurez fisiológica (e.g. capa negra; Daynard y Duncan, 1969). Esta condición, por la cual el resto de la planta (caña + hojas) presenta senescencia retrasada y se mantiene por más tiempo verde y con mayor contenido de humedad (Bekavac et al., 1998), hace que al ensilar la planta entera se produzcan filtraciones del silo. Además, para un mismo estadio de línea de leche (e.g. 50%; Afuakwa y Crookston, 1984) la humedad de la planta entera puede variar del 50 al 74% (Lauer, 1998); en consecuencia, la línea de leche no es el indicador más preciso para determinar el momento óptimo de picado. Realizar el seguimiento de la evolución de la materia seca de la planta entera durante el período comprendido entre el fin del período crítico (i.e. R2, ca. 15 días postfloración; Ritchie y Hanway, 1982) hasta alcanzar la madurez fisiológica (ca. 35-37% de humedad) sería un método apropiado para evaluar la duración de la ventana de picado y el momento óptimo de picado de las plantas para la confección del silo. El concepto de *ventana de picado* ha sido escasamente documentado y los estudios disponibles sólo analizan genotipos forrajeros (Martínez-Santamaría, 2018) o genotipos forrajeros de una única compañía semillera más un control o *tester* granífero (Algido Coletti, 2019).

Estudios previos demostraron diferencias en la cantidad de materia seca producida por unidad de superficie y la calidad de la misma entre genotipos, fechas de siembra, niveles de fertilización nitrogenada, condiciones ambientales contrastantes y densidades (Cox et al., 1994; Crasta et al., 1997; Cusicanqui y Lauer, 1999; Opsi et al., 2013;

Camarasa et al. 2015, 2016; Lamptey et al., 2018; Romero et al., 2018). Estos estudios, sin embargo, no atendieron a la determinación del momento óptimo de picado para la confección del silo. La influencia de la elección del genotipo, ya sea granífero, doble propósito (genotipos con buen comportamiento tanto para producción de grano como silaje) o sileros (incluyendo BMR), la fecha de siembra y la fertilización nitrogenada sobre la duración de la *ventana de picado* debe aún ser determinada. Este aspecto es aún más crítico para la región templada de Argentina, en la cual la época de siembra es muy extensa y esto conlleva grandes modificaciones en las condiciones ambientales que experimenta el maíz hacia el final de su ciclo, como ya fuera explicado.

Incrementos en la altura de planta, el diámetro de la base del tallo y su densidad, el área foliar y el *stay-green* han sido propuestos como atributos que permiten aumentar los rendimientos y la producción de biomasa lignocelulósica (Lorenz et al., 2010). Comprender el efecto de las variables de manejo (e.g. elección de genotipos, fecha de siembra, fertilización nitrogenada) sobre el rendimiento en grano y sus determinantes ecofisiológicos resulta fundamental en el contexto de siembras escalonadas que exponen al cultivo a condiciones ambientales variables (Gambín et al., 2016; Karnatam et al., 2023). Sin embargo, no existen en la Región Pampeana estudios de caracterización de las variables ecofisiológicas (i.e. evolución de la producción de biomasa aérea y del área foliar, captura de luz, eficiencia en el uso de la radiación) que incluya híbridos graníferos, doble propósito y sileros en ambientes contrastantes generados a partir de diferentes fechas de siembra y niveles de disponibilidad de N. Asociar variables ecofisiológicas con la producción de MS y la calidad de la misma sería de utilidad para asistir a los programas de mejoramiento destinados a maíces para la producción de silajes de planta entera.

1.6. Objetivos

El objetivo general de la presente tesis es analizar los factores que controlan la determinación de la biomasa final, el rendimiento en grano y las dinámicas de llenado y secado de los granos de maíz (*Zea mays* L.) en un conjunto de híbridos comercializados para diferentes usos finales (graníferos, doble propósito y sileros), adaptados a la zona núcleo Pampeana (i.e., norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe) al ser cultivados bajo condiciones contrastantes de crecimiento generadas a través de diferentes años, fechas de siembra y niveles de fertilización nitrogenada. Se evaluará también la producción de materia verde y materia seca y la determinación de su calidad para la generación de silajes de planta entera.

Los objetivos específicos son:

- i. Caracterizar los determinantes fisiológicos del rendimiento en grano y la biomasa total de híbridos graníferos, doble propósito y sileros cultivados en un amplio rango de ambientes generados mediante la combinación de años, fechas de siembra (FS) y niveles de nitrógeno (N). Evaluar asociaciones entre variables ecofisiológicas (e.g. eficiencias de interceptación de luz y de conversión) y ambientales (e.g. oferta de radiación solar, régimen térmico).
- ii. Describir la evolución del peso seco individual del grano (PG), las relaciones fuente-destino y el contenido de CHST en híbridos con diferente destino final cultivados en un amplio rango de ambientes.
- iii. Generar modelos predictivos de la evolución de la humedad de los granos post madurez fisiológica para asistir en la decisión del momento de cosecha para grano (i.e. cuando éste alcanza la humedad comercial del 14,5%). Los modelos generados serán validados mediante un conjunto de datos independiente, que incluirá

información proveniente del ambiente explorado en esta tesis como de otros ambientes templados.

- iv. Caracterizar la evolución de la producción de materia seca, su calidad y la duración de la ventana de picado para la realización de silajes de planta entera.

1.7. Hipótesis

Hipótesis 1. El ambiente de fecha de siembra explorado y la disponibilidad de N impactarán sobre la generación del rendimiento, sus determinantes fisiológicos (biomasa total aérea e índice de cosecha) y sus componentes numéricos (peso y número de granos) de manera diferencial según el genotipo considerado.

Predicción: Al atrasar la fecha de siembra se esperan respuestas similares a las observadas en ambientes de mayor latitud, i.e. disminución del rendimiento en grano por reducciones en el PG, el número de granos o ambos. Se esperan disminuciones en el rendimiento en la condición no fertilizada con N, también dadas por disminuciones en uno o ambos componentes del mismo y de mayor magnitud en siembras tempranas que tardías. Los genotipos desarrollados para diferentes usos finales presentarán diferencias en la determinación de su rendimiento. Por lo tanto, se espera que exista interacción Genotipo $\times$ Ambiente para el rendimiento.

Hipótesis 2. La fecha de siembra y la disponibilidad de N afectarán a los determinantes fisiológicos del llenado de los granos de manera diferencial según el genotipo considerado.

Predicción: Al atrasar la fecha de siembra se esperan respuestas similares a las observadas en ambientes de mayor latitud: reducción del peso del grano dada por disminución de la tasa de llenado, acortamiento del período de llenado de los granos o

una combinación de ambos. Se esperan reducciones en el PG en la condición sin fertilizar con N, dadas por reducciones en la tasa de llenado, la duración o ambas. Los genotipos pertenecientes a diferentes usos finales presentarán diferencias en los determinantes fisiológicos del llenado de los granos. Por lo tanto, se espera que exista interacción Genotipo $\times$ Ambiente para el PG.

Hipótesis 3. El ambiente durante el llenado del grano afectará los CHST a madurez fisiológica.

Predicción: Se espera que las plantas en fecha de siembra tardía presenten menores valores de CHST a madurez fisiológica y exista interacción Genotipo $\times$ Ambiente para este carácter.

Hipótesis 4. El ambiente explorado generará las mayores variaciones en la humedad de los granos post madurez fisiológica. La inclusión de variables meteorológicas a los modelos predictivos de secado post madurez fisiológica actualmente disponibles mejorará su desempeño.

Predicción: En siembras tardías el secado de los granos post madurez fisiológica se situará en ambientes con condiciones declinantes de radiación y temperatura, que provocarán disminución de las tasas de secado, incrementando el tiempo (en días) para alcanzar la humedad de cosecha comercial (14,5%). En cuanto a los modelos de predicción, la identificación y posterior inclusión de variables meteorológicas que afecten a la constante de secado de los modelos de secado post madurez fisiológica actualmente disponibles permitirá mejorar su desempeño para representar con mayor exactitud y precisión la pérdida de humedad y el momento de cosecha en fechas de siembra tardías.

Hipótesis 5. La duración de la ventana de picado para silaje de planta entera será mayor conforme se atrase la fecha de siembra.

Predicción: La tasa de secado de los granos disminuirá (en valor absoluto) al atrasar la fecha de siembra, lo que se traducirá en un mayor tiempo (en días) en el cual el material a ensilar se encontrará dentro del período de contenido de MS óptimo para ser picado. Esta respuesta modificará el *ranking* de los genotipos según la fecha de siembra.

Hipótesis 6. La calidad del material a ensilar dependerá del genotipo y el ambiente.

Predicción: Con respecto al genotipo, se espera que el genotipo BMR presente mayor calidad de la materia seca para la generación de silajes de planta entera. En función del ambiente, los ambientes de fechas de siembra tardías y con menores niveles de N generarán silajes de menor calidad nutricional.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA GENERAL Y CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

2. Metodología general y caracterización ambiental

2.1. Experimentos a campo

Los experimentos a campo se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino (33° 57'S, 60° 34'W) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina, sobre un suelo franco arcilloso limoso (Argiudol Típico). Se llevaron a cabo durante dos campañas agrícolas (2019/2020 y 2020/2021, en adelante años 2019 y 2020, respectivamente) y dos fechas de siembra (2019: 22 de octubre y 19 de diciembre; 2020: 16 de octubre y 18 de diciembre) dentro de cada campaña. Los experimentos sembrados en octubre se consideraron como siembras tempranas y los sembrados en diciembre como siembras tardías. Se utilizaron dos niveles de N, siendo N0 una condición sin N agregado (las parcelas solamente contaron con el N disponible en el suelo) y N250 una condición fertilizada con N hasta alcanzar 250 kg N ha⁻¹ como N de NO₃- en el suelo a la siembra + N del fertilizante. La fertilización se realizó en V5 (Ritchie y Hanway, 1982) de forma manual utilizando urea como fertilizante. Los niveles de N inorgánico (N-NO₃) en los 60 cm superiores del perfil del suelo en el momento de la siembra fueron 97 (2019 temprana), 142 (2019 tardía), 55 (2020 temprana) y 80 kg N ha⁻¹ (2020 tardía). El material genético evaluado consistió en ocho híbridos simples (F1) de maíz genéticamente modificados y comercializados con destino grano (DK 72-10 VT3P, SYN 840 VIP3 y NEXT 22.6 PWU), doble propósito (DUO30 PW) o silaje (EXP 1517 *bm3* RR2, KM 4360 AS-GL Stack, LG 30850 RR2, LG 30853 VT3P). Los híbridos fueron seleccionados entre los más representativos de los genotipos actualmente sembrados en la región para cada propósito. La única excepción fue EXP 1517 *bm3* RR2, un híbrido pre comercial incluido por su característica de nervadura marrón asociada con mayor digestibilidad, que no estaba presente entre los demás.

En cada año, los tratamientos se distribuyeron en un diseño de parcelas subdivididas con tres repeticiones, con la fecha de siembra en las parcelas principales, el N en las subparcelas y genotipo en las sub-subparcelas (de aquí en adelante parcelas). Cada parcela estuvo compuesta por seis surcos separados a 0,52 m de 7 m de longitud. Las parcelas se sembraron manualmente a razón de 3-4 semillas por sitio y se ralearon en V2-V3 para obtener una única densidad de 9 plantas m⁻². Las parcelas contaron con riego complementario por aspersión. Los cultivos se mantuvieron libres de malezas, plagas y enfermedades utilizando los controles químicos recomendados en todos los experimentos.

2.2. Mediciones

Los datos meteorológicos se obtuvieron de una estación meteorológica automática ubicada a menos de 1 km del sitio experimental e incluyeron valores diarios de temperatura media del aire (T_{media}, en °C), radiación solar incidente media (en MJ m⁻² d⁻¹) y precipitación (en mm) durante todo el ciclo de cultivo. La radiación solar se convirtió en radiación fotosintéticamente activa (RFA) multiplicando la primera por 0,45 (Monteith, 1965).

La fecha de emergencia se registró para cada parcela cuando el 50% de las plantas alcanzaron este estado (VE). En el estadio V3, se marcaron cinco plantas consecutivas en el surco central de cada parcela. Se registraron las fechas de antesis y *silking* (R1, al menos un estigma visible en la espiga apical) de cada planta marcada. El intervalo antesis-*silking* (ASI) de cada parcela se calculó como el promedio de los valores de ASI de las plantas individuales, que se obtuvieron a su vez como la diferencia entre las fechas de antesis y *silking* de cada planta marcada.

Las plantas marcadas se cosecharon individualmente en madurez fisiológica (R6) y se secaron en una estufa de aire forzado a 60 °C hasta peso constante para obtener la

biomasa aérea total por planta (en g planta^{-1}), el rendimiento en grano por planta (en g planta^{-1}), el número de granos por planta (NGP) y el peso medio de los granos individuales (en mg, como el cociente entre el rendimiento en grano por planta y el NGP). La biomasa total aérea (en g m^{-2}), el rendimiento en grano (g m^{-2}) y el número de granos por unidad de superficie (NG, en granos m^{-2}) se calcularon multiplicando el promedio de cada variable obtenida por planta en cada parcela por la densidad de plantas. En el caso del rendimiento en grano, además de las 5 plantas marcadas se cosecharon espigas para completar 1 m^2 . El índice de cosecha (IC) se calculó como el cociente entre el rendimiento en grano y la biomasa aérea total por unidad de superficie.

2.3. Análisis de datos

Los datos obtenidos de los diferentes experimentos fueron analizados con diferentes aproximaciones según los objetivos propuestos en cada uno de los capítulos. Para el presente capítulo, se realizó un análisis de conglomerados ($k = 3$, distancia *Euclidean*) para clasificar a los híbridos en su correspondiente tipo (grano, doble propósito o silaje) según un criterio ecofisiológico independiente de la clasificación aportada por la empresa productora de cada uno. El análisis se basó en el rendimiento en grano, la biomasa total aérea, el IC, el número de granos y el peso de los granos, todos registrados a madurez fisiológica. Todas las variables fueron estandarizadas antes de realizar el análisis de conglomerados y la clasificación se realizó mediante el método Jerárquico basado en la vinculación de datos “*por el vecino más próximo*” (enlace simple).

El análisis de conglomerados distinguió tres categorías de híbridos (Fig. 2.1). El coeficiente de correlación cofenética fue 0,765. Las distancias *Euclidean* variaron entre 0,61 y 5,03, con las menores distancias correspondientes al par de híbridos DK 72-10

VT3P y NEXT 22.6 PWU y las mayores al par de híbridos NEXT 22.6 PWU y LG 30853 VT3P. Los híbridos DK 72-10 VT3P, NEXT 22.6 PWU y SYN 840 VIP3 correspondieron a la categoría graníferos, mientras que DUO30 PW y KM 4360 AS-GL Stack podrían considerarse híbridos de doble propósito, y EXP 1517 *bm3* RR2, LG 30850 RR2 y LG 30853 VT3P híbridos con mejor desempeño para silaje. Esta clasificación de los híbridos basada en criterios ecofisiológicos sirvió de marco conceptual para los análisis realizados en diferentes capítulos de la presente tesis.

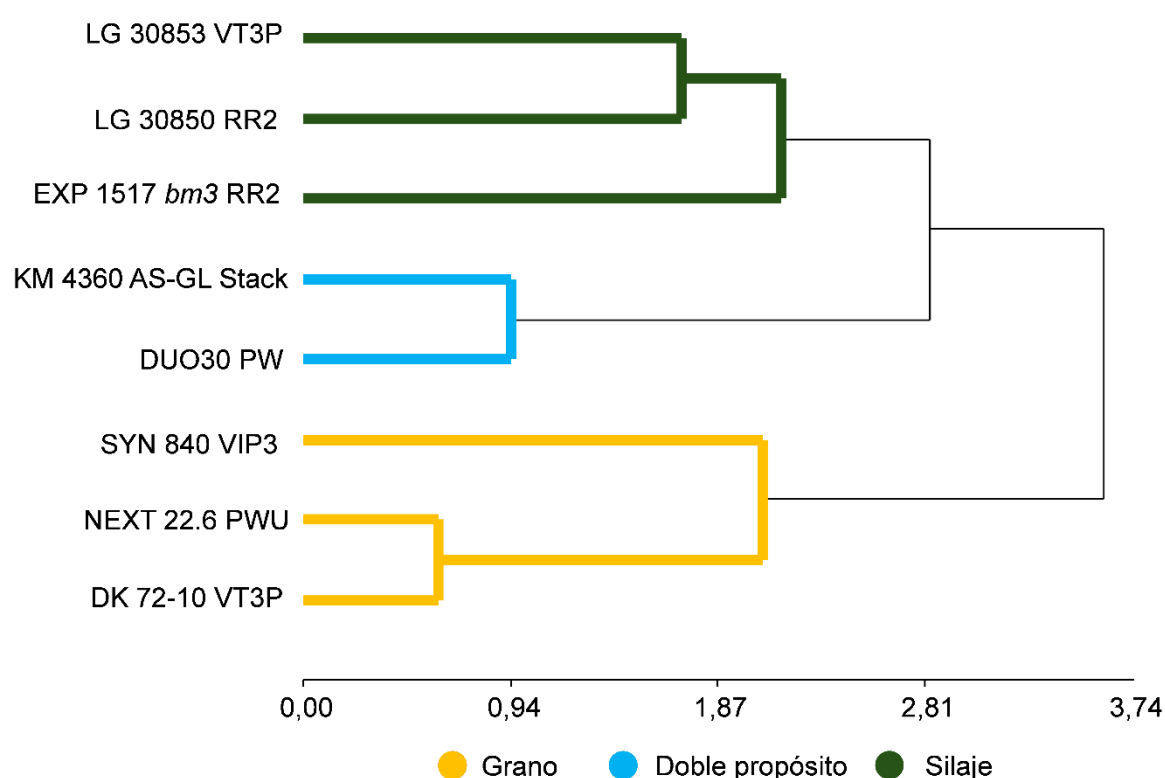


Figura 2.1. Análisis de conglomerados incluyendo ocho híbridos de maíz agrupados según su tipo de híbrido: grano (naranja), doble propósito (celeste) o silaje (verde).

Los datos correspondientes a la fenología se analizaron por separado para cada año experimental mediante análisis de la varianza (ANVA), considerando como fijos los efectos de la fecha de siembra, el N, el tipo de híbrido (H) y sus interacciones. Se realizó una prueba de significancia de tipo 3 para efectos fijos usando $\alpha = 0,05$, y sus medias se compararon mediante el ajuste de Tukey. Los análisis de conglomerados y varianza se

realizaron utilizando Infostat (Di Rienzo et al., 2017). Los gráficos se realizaron utilizando GraphPad Prism versión 9.0.0 (www.graphpad.com).

2.4. Condiciones meteorológicas y fenología

Las siembras tempranas exploraron temperaturas medias más bajas durante el período VE-V14 (21, 6°C en 2019 y 20,0 °C en 2020) respecto de las tardías (23,2 °C en 2019 y 2020), lo que promovió una mayor duración de este período entre las primeras (Fig. 2.2). En consecuencia, la RFA incidente acumulada durante el período VE-V14 fue mayor para las siembras tempranas (577 MJ m⁻² d⁻¹ en 2019 y 634 MJ m⁻² d⁻¹ en 2020) que para las tardías (486 MJ m⁻² d⁻¹ en 2019 y 438 MJ m⁻² d⁻¹ en 2020). Las siembras tempranas exploraron temperaturas medias similares entre campañas durante el período crítico (22,8 °C en 2019 y 22,6 °C en 2020), mientras que la temperatura media durante este período en las siembras tardías fue mayor en 2020 (23,1 °C) que en 2019 (21,8 °C). La RFA incidente acumulada a lo largo del período crítico fue similar entre fechas de siembra en 2019 (355 MJ m⁻² d⁻¹ y 352 MJ m⁻² d⁻¹ para siembras tempranas y tardías, respectivamente) y levemente mayor en las siembras tempranas (389 MJ m⁻² d⁻¹) que en las tardías (336 MJ m⁻² d⁻¹) en 2020. Finalmente, las siembras tempranas exploraron temperaturas medias más altas durante el período de llenado de los granos (22,4 °C en 2019 y 23,1 °C en 2020) que las siembras tardías (19,7 °C en 2019 y 19,6 °C en 2020), acortándose la duración de este periodo para las primeras (Fig. 2.2). Sin embargo, este efecto de la temperatura fue compensado por los mayores niveles de RFA incidente experimentados por las siembras tempranas respecto de las tardías, lo que produjo una mayor RFA incidente acumulada durante el período de llenado de los granos entre las primeras (417 MJ m⁻² d⁻¹ en 2019 y 493 MJ m⁻² d⁻¹ en 2020) que entre las segundas (346

MJ m⁻² d⁻¹ en 2019 y 368 MJ m⁻² d⁻¹ en 2020). En cuanto a las precipitaciones, en 2019 la temporada de crecimiento del cultivo perteneció a una fase neutra del fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur) y 2020 a una fase moderada de *La Niña* (<https://ggweather.com/enso/oni.htm>). Así, la precipitación acumulada durante el ciclo de cultivo (VE-R6) fue mayor en 2019 (455 mm en siembra temprana y 519 mm en tardía) que en 2020 (301 mm y 402 mm, en siembra temprana y tardía respectivamente; Fig. 2.2). El riego suplementario durante el ciclo del cultivo fue de 103, 36, 179 y 131 mm para los ambientes 2019 Temprana, 2019 Tardía, 2020 Temprana y 2020 Tardía, respectivamente.

La duración de las diferentes etapas fenológicas del cultivo varió significativamente según las fechas de siembra (Cuadro 2.1, Fig. 2.2). La floración femenina (R1 o *silking*) se alcanzó durante la última semana de diciembre y la primera semana de enero en fechas de siembra tempranas, mientras que esta etapa tuvo lugar durante la segunda quincena de febrero en fechas de siembra tardías (Cuadro 1, Fig. 2.2). El ASI osciló entre 0,42 y 3,13 días (en valores absolutos) y difirió significativamente entre las combinaciones FS × H en ambos años experimentales y combinaciones N × H en 2020 ($p < 0,05$; Cuadro 2.1). El ASI de los híbridos doble propósito en siembras tempranas fue mayor que el ASI calculado para los otros tipos (150 y 138% en 2019 y 2020 respectivamente) y no hubo diferencias entre los tipos de híbridos en siembras tardías. La condición N0 incrementó el ASI en un 74,2% para los híbridos doble propósito respecto de la condición N250 en 2020.

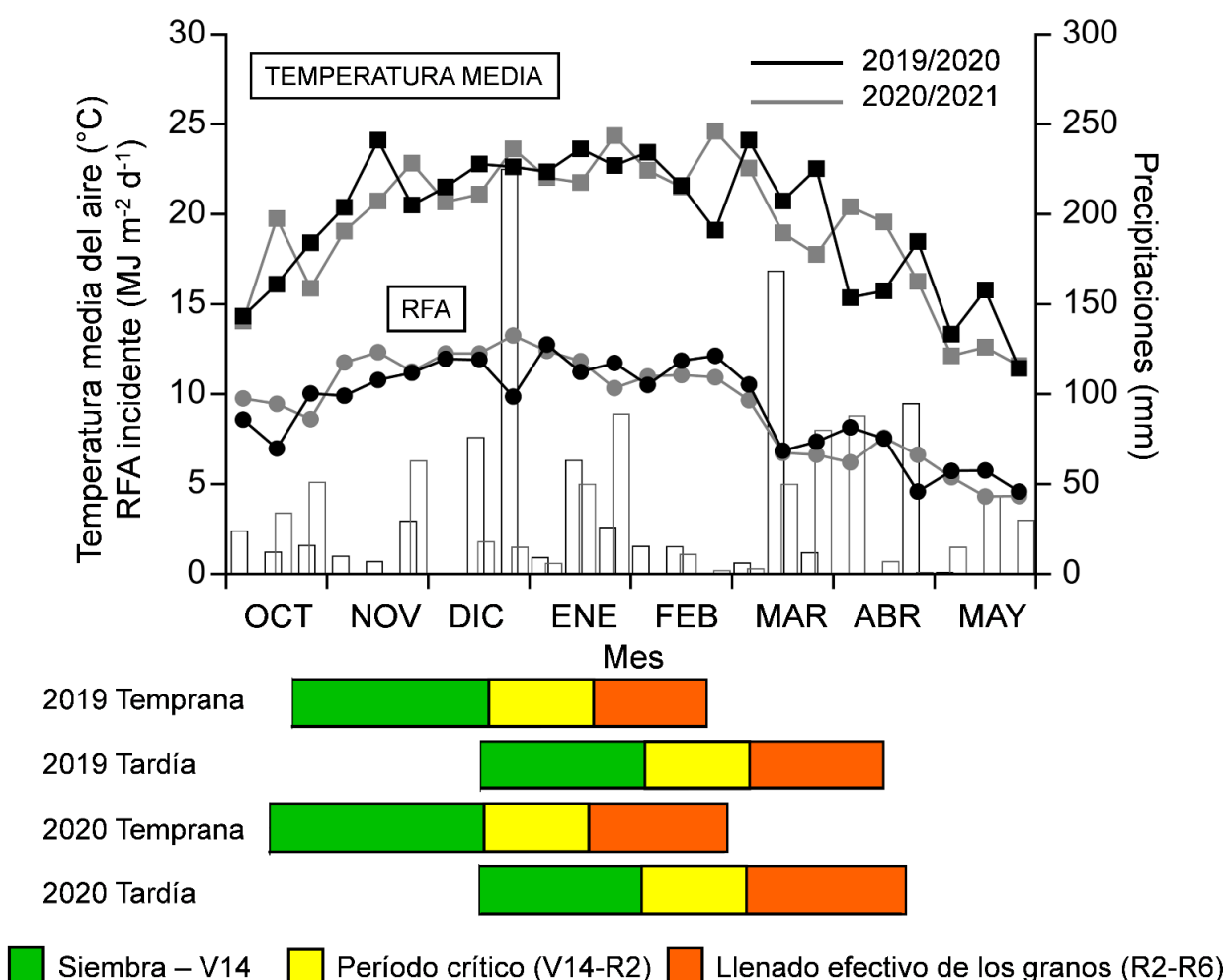


Figura 2.2. Evolución temporal de la temperatura media del aire (en °C, cuadrados), la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA, en MJ m⁻² d⁻¹, círculos) y las precipitaciones (en mm, barras) durante 2019/2020 (negro) y 2020/2021 (gris). Cada uno de los puntos y barras indican el promedio decadal de la variable. Las barras horizontales inferiores representan la duración de las principales etapas fenológicas del cultivo de maíz para cada ambiente: en verde, el período comprendido entre la siembra y el inicio del período crítico (ca. V14), en amarillo el período crítico (V14-R2) y en naranja el período de llenado de los granos (R2-R6).

La duración del período prefloración (desde la siembra hasta R1) osciló entre 59 y 80 días y difirió significativamente entre FS ($p < 0,001$) y tipos de híbridos ($p < 0,001$) en ambos años. El período prefloración presentó una mayor duración en siembras tempranas respecto de las tardías (16,7 y 24,9% para 2019 y 2020 respectivamente). Los híbridos para doble propósito y silaje presentaron una mayor duración del período

prefloración respecto de los híbridos para grano (5,3 y 7,0% para 2019 y 2020 respectivamente).

La madurez fisiológica se alcanzó durante la segunda quincena de febrero y la primera semana de marzo en siembras tempranas, mientras que esta etapa tuvo lugar durante la segunda quincena de abril en siembras tardías (Cuadro 2.1, Fig. 2.2). La duración del período postfloración (de R1 a R6) osciló entre 48 y 68 días y difirió entre niveles de N ($p < 0,01$) y combinaciones FS $\times$ H ($p < 0,01$) en 2019 y entre H ($p < 0,001$) y combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,01$) en 2020. En 2019, la duración del período fue mayor en la condición N250 respecto de la N0 (6,5%) y en los híbridos para doble propósito y silaje respecto de los graníferos (10,4%). En 2020, la duración del período fue mayor para los híbridos sileros respecto de los graníferos (5,7%) y para la condición N250 respecto de la N0 en la siembra temprana (7,6%), sin diferencias entre niveles de N en la siembra tardía.

Cuadro 2.1. Fechas de ocurrencia de los principales eventos fenológicos (R1: *silking*; R6: madurez fisiológica) y duraciones del intervalo antesis-*silking* (ASI), el período prefloración y el período postfloración de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA para cada año se muestran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Fecha de <i>silking</i>	ASI	Duración prefloración (días)	Fecha de madurez fisiológica	Duración postfloración (días)
2019	22-oct	N0	Grano	30-dic	0,64	70	16-feb	48
			Doble propósito	2-ene	1,57	73	19-feb	48
			Silaje	3-ene	0,73	74	22-feb	50
		N250	Grano	29-dic	0,42	69	21-feb	54
			Doble propósito	1-ene	0,67	72	22-feb	52
			Silaje	2-ene	1,47	72	25-feb	54
	19-dic	N0	Grano	16-feb	1,02	59	9-abr	54
			Doble propósito	19-feb	1,57	62	18-abr	60
			Silaje	18-feb	0,82	62	17-abr	59
		N250	Grano	15-feb	1,32	59	11-abr	56
			Doble propósito	19-feb	1,53	63	20-abr	61
			Silaje	19-feb	1,38	63	22-abr	63
2020	16-oct	N0	Grano	28-dic	1,24	74	23-feb	56
			Doble propósito	4-ene	3,13	80	24-feb	54
			Silaje	3-ene	1,16	79	4-mar	60
		N250	Grano	27-dic	0,96	72	24-feb	59
			Doble propósito	1-ene	1,90	78	4-mar	62
			Silaje	1-ene	0,87	78	4-mar	61
	18-dic	N0	Grano	14-feb	1,36	59	19-abr	64
			Doble propósito	18-feb	1,61	63	27-abr	68
			Silaje	18-feb	1,81	63	26-abr	66
		N250	Grano	15-feb	1,31	59	17-abr	61
			Doble propósito	18-feb	1,90	62	23-abr	64
			Silaje	18-feb	1,82	63	26-abr	67
Año 2019								
FS ^a					*	***	***	
N					ns	ns	**	
FS × N					ns	ns	ns	
H					***	***	*	
FS × H					*	ns	*	
N × H					ns	ns	ns	
FS × N × H					ns	ns	ns	
Año 2020								
FS					ns	***	***	
N					*	ns	ns	
FS × N					ns	ns	**	
H					***	***	*	
FS × H					***	ns	ns	
N × H					*	ns	ns	
FS × N × H					ns	ns	ns	

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno

*, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo. Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias significativas con p = 0,05.

CAPÍTULO 3

**ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO DE LA DETERMINACIÓN DEL
RENDIMIENTO EN HÍBRIDOS CON DIFERENTE USO FINAL^{3.1}**

^{3.1}El contenido de este capítulo fue publicado en: Chazarreta, Y.D., Alvarez Prado, S., Giménez, V.D., López, C.G., Carcedo, A.J.P., Ciampitti, I.A., Otegui, M.E. 2024. Yield determination of temperate maize hybrids with different end-uses: An ecophysiological analysis. Crop Science. <https://doi.org/10.1002/csc2.21414>

3.1. Introducción

El uso tradicional del cultivo de maíz en Argentina ha sido la exportación directa como grano, i.e. *commodity*, llegando a convertirse en algunas campañas recientes en el segundo exportador mundial de este cereal (FADA, 2023). Sin embargo, en las últimas décadas, la posibilidad de atrasar la fecha de siembra del cultivo facilitó la expansión del área cultivada con maíz, elevando la superficie del cultivo de las históricas 3-4 millones de hectárea hasta las ~10 millones actuales (MAGyP, 2023) y posibilitó la diversificación de usos y destinos del cultivo. A pesar del notable aumento en el uso de maíz para silaje de planta entera, que se multiplicó $\times 20$ en los últimos 20 años, alcanzando un 20% del área total de maíz cultivado en Argentina (CACF, 2023), tanto los rasgos agronómicos que diferencian a los híbridos graníferos de los doble propósito y sileros como sus implicancias sobre el manejo siguen siendo aún poco comprendidos, particularmente bajo siembras tardías.

El atraso en la fecha de siembra del cultivo de maíz se ha asociado con reducciones en el rendimiento potencial de grano debido a disminuciones en i) el número, el tamaño y la actividad de los granos en crecimiento (Otegui et al., 1995; Cirilo y Andrade, 1994b, 1996), ii) la producción de asimilados por parte de la fotosíntesis durante el período de llenado del grano (Bonelli et al., 2016; Cirilo y Andrade, 1996; Tsimba et al., 2013), y iii) la duración y/o tasa de llenado del grano (Chazarreta et al. ., 2021; Cirilo y Andrade, 1996). Además, el suministro de nutrientes (particularmente la disponibilidad de N) tiene influencia directa tanto en el número final de granos como en su PG (Uhart y Andrade, 1995a, 1995b). Los efectos de la disponibilidad de N sobre el rendimiento en grano y sus determinantes fisiológicos (es decir, intercepción de luz, producción de biomasa y partición de biomasa a estructuras reproductivas) se han documentado ampliamente tanto

para híbridos como para líneas endocriadas destinadas a la producción de granos (Ciampitti y Vyn, 2011, 2012; D'Andrea et al., 2022, 2009, 2008, 2006; Parco et al., 2022; Tollenaar, 1999; Uhart y Andrade, 1995a, 1995b). De manera similar, la interacción entre fecha de siembra $\times$ N ha sido evaluada para este tipo de germoplasma (Maltese et al., 2019), siendo el rendimiento en grano en siembra tardías menos dependiente del N agregado. Sin embargo, aún no se ha determinado el efecto de la interacción fecha de siembra $\times$ N para híbridos de doble propósito y silaje, para los cuales los efectos del N en la calidad de la biomasa total pueden afectar la calidad del silo (de Campos Bernardi et al., 2011; Lawrence et al., 2008; Safdarian et al., 2014).

Finalmente, a pesar de que el silaje de maíz es un uso final globalmente relevante de este cultivo y que la introducción de híbridos genéticamente modificados protegidos contra insectos permitió alargar el período de siembra, la mayoría de las investigaciones fisiológicas y los esfuerzos de mejoramiento realizados en el país se han centrado principalmente en maíz con destino a grano bajo fechas de siembra tempranas (Otegui et al., 2021). Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del presente capítulo es evaluar la determinación del rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos (producción de biomasa e índice de cosecha) y componentes numéricos (número y peso de los granos) en híbridos de maíz destinados a diferentes usos finales (i.e. grano, doble propósito y silaje) bajo distintas fechas de siembra y disponibilidades de N en un ambiente templado de latitud media.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Mediciones

Los experimentos a campo y las determinaciones de fenología, rendimiento en grano, biomasa total aérea, número de granos, PG e IC se realizaron según lo detallado en el Capítulo 2 de la presente tesis.

A partir de las plantas marcadas se determinó la biomasa de planta, en forma alométrica (Maddonni y Otegui, 2004), en cuatro momentos diferentes del ciclo de cultivo: V6, V14 (inicio del período crítico, 15 días pre-*silking*), R1 (*silking*) y R2 (15-días post-*silking*). Para ello se ajustaron modelos entre variables morfométricas y la biomasa correspondiente a partir de muestreos destructivos de otro conjunto de plantas, los cuales fueron luego utilizados para estimar la biomasa de las plantas marcadas a partir de las mismas variables morfométricas medidas sobre ellas. Estas variables incluyeron i) en todas las fechas de muestreo, la altura de planta hasta el último collar visible y el diámetro de la base del tallo (promedio de los valores mínimo y máximo), con los cuales se calculó el volumen de un cilindro, y ii) en R1 y R2, el diámetro máximo de cada una de las espigas visibles. Para el ajuste de los modelos alométricos, se realizaron muestreos destructivos de nueve plantas de cada combinación de FS $\times$ N $\times$ H en V6, V14, R1 y R2, cada una de las cuales se dividió en las fracciones tallo + hojas + panoja y espigas (individualizando cada espiga visible), y se midieron las mismas variables morfométricas (Maddonni y Otegui, 2004). Cada fracción de cada planta se secó individualmente en una estufa de aire forzado a 60 °C hasta peso constante. Se ajustaron modelos i) lineales, entre la fracción [tallo + hojas + panoja] y el volumen del cilindro, y ii) exponenciales, entre la fracción espiga y su diámetro máximo. Finalmente, la biomasa total aérea a madurez fisiológica se determinó por cosecha de las 5 plantas marcadas. Los parámetros de los

modelos alométricos para cada combinación año $\times$ fecha de siembra $\times$ híbrido se muestran en el Cuadro A3.1. La biomasa aérea acumulada en tres períodos (vegetativo: VE-V14; crítico: V14-R2; llenado efectivo del grano: R2-R6) se calculó como la diferencia entre los valores de biomasa aérea acumulada entre los eventos que definían a cada uno de ellos.

La intercepción de la RFA se registró cada 10 a 15 días durante el ciclo del cultivo. La fracción de la RFA incidente que fue interceptada por el cultivo ($fRFA_i$) se estimó utilizando un sensor cuántico lineal de 1 m (Cavadevices, Argentina). Las mediciones se realizaron entre las 11:30 y las 14:30 h, en días despejados, e incluyeron i) una medición por encima del canopy en cada parcela (RFA_A), y ii) el promedio de tres mediciones realizadas inmediatamente debajo de las hojas verdes más bajas de cada parcela (RFA_B), con el sensor centrado diagonalmente a través del surco central (Gallo y Daughtry, 1986). La $fRFA_i$ por el cultivo se calculó de la siguiente manera:

$$fRFA_i = 1 - \frac{RFA_B}{RFA_A} \quad [3.1]$$

Los valores diarios de $fRFA_i$ se estimaron mediante interpolación entre los días de medición utilizando el paquete *locfit* (Loader et al., 2023) en R (R Core Team, 2023). La RFA incidente diaria se multiplicó por la correspondiente $fRFA_i$ para obtener la RFA acumulada interceptada por el cultivo (RFA_i) durante los diferentes periodos (VE a V14, V14 a R2 y R2 a R6), considerando la emergencia como el día 0. La $fRFA_i$ promedio para cada período (VE-V14, V14-R2 y R2-R6) se calculó como el cociente entre la RFA_i y la RFA incidente, para ambas variables como valor acumulado durante el mismo período (Otegui et al., 1995). La eficiencia de uso de la radiación (EUR, en $g\ MJ^{-1}$) se calculó para cada período como la relación entre la biomasa total aérea y la RFA_i , ambas acumuladas durante cada período de interés.

La tasa de crecimiento de cada planta marcada (en $\text{g pl}^{-1} \text{d}^{-1}$) se calculó para el período VE-V14 ($\text{TCP}_{\text{VE-V14}}$), el período crítico ($\text{TCP}_{\text{V14-R2}}$) y el período de llenado efectivo del grano ($\text{TCP}_{\text{R2-R6}}$), en todos casos como el cociente entre la biomasa total aérea acumulada durante el período analizado (es decir, VE-V14, V14-R2 y R2-R6, respectivamente) y el número de días considerados. La tasa de crecimiento de la espiga apical durante el período crítico ($\text{TCE}_{\text{V14-R2}}$, en $\text{g pl}^{-1} \text{d}^{-1}$) se calculó para cada planta marcada de la misma manera, pero utilizando el incremento de biomasa de la espiga entre V14 y R2. Se asumió que la biomasa de la espiga era cero en V14 (Otegui y Bonhomme, 1998). La partición de biomasa a la espiga apical durante el período crítico ($\text{PBE}_{\text{V14-R2}}$) se calculó como la relación entre la $\text{TCE}_{\text{V14-R2}}$ y la $\text{TCP}_{\text{V14-R2}}$. Las eficiencias reproductivas de la planta y de la espiga apical se calcularon como el cociente entre el NGP y la $\text{TCP}_{\text{V14-R2}}$ o la $\text{TCE}_{\text{V14-R2}}$, respectivamente.

3.2.2. Análisis estadísticos

Los datos se analizaron mediante análisis ANVA, según lo detallado en el Capítulo 2 de la presente tesis. La interacción conjunta entre el ambiente (A: año $\times$ fecha de siembra), el N y el H (de acuerdo con la clasificación de los híbridos basada en criterios ecofisiológicos realizada en el Capítulo 2) se analizó mediante análisis de componentes principales (ACP). Se construyeron biplots, donde cada combinación $A \times N \times H$ se representó con un símbolo y los rasgos como vectores desde el origen. Los ANVA y ACP se realizaron utilizando Infostat (Di Rienzo et al., 2017). Los análisis de regresión y gráficos se realizaron utilizando GraphPad Prism versión 9.0.0 (www.graphpad.com).

3.3. Resultados

3.3.1. Acumulación de biomasa, intercepción de la radiación y eficiencia de uso de la radiación

La biomasa acumulada en el período comprendido entre VE y V14 difirió significativamente entre tipos de híbridos en ambos años y entre combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,01$) en 2020 (Cuadro 3.1). En 2020, la condición N250 incrementó la biomasa acumulada en este período respecto de la N0 (22,8%) en la siembra temprana. Los híbridos doble propósito acumularon la mayor cantidad de biomasa entre VE-V14, seguidos por los graníferos y finalmente por los sileros, con los menores valores (Cuadro 3.1). La RFAi acumulada durante este período varió entre combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,05$) en 2019, FS en 2020 ($p < 0,05$) y tipos de híbridos en ambos años ($p < 0,05$ y $p < 0,001$ para 2019 y 2020). La fertilización nitrogenada incrementó un 15,2% la RFAi acumulada en la siembra temprana de 2019, sin efecto en la siembra tardía, mientras que esta variable fue 25,2% mayor en la siembra temprana respecto de la tardía en 2020. Los híbridos para doble propósito y silaje presentaron los mayores valores de RFAi acumulada durante esta etapa respecto de los graníferos (5,5 y 25,1% en 2019 y 2020 respectivamente). La eficiencia de intercepción ($fRFAi$) entre VE y V14 osciló entre 0,36 y 0,51 y difirió entre combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,05$) en 2019 y entre H ($p < 0,001$) en 2020. En 2019, la adición del fertilizante nitrogenado incrementó en 21,1% la $fRFAi$ en la siembra temprana, sin efecto en la tardía mientras que, en 2020, los híbridos doble propósito y sileros presentaron una $fRFAi$ 12,2% superior a los graníferos (Cuadro 3.1). La EUR durante el período VE-V14 osciló entre 1,96 y 5,08 g MJ⁻² y difirió entre fechas de siembra e H en ambos años y entre niveles de N en 2020. Las siembras tardías presentaron valores superiores de EUR durante este período respecto de las tempranas (25,5 y 40,0% en 2019 y 2020 respectivamente). En 2020, la condición N250 incrementó

la EUR en 8,87% respecto de la siembra tardía. En 2019, los híbridos graníferos y doble propósito presentaron una EUR 19,2% mayor que los sileros mientras que, en 2020, el ordenamiento de los híbridos fue graníferos > doble propósito > sileros.

Durante el período crítico (V14-R2), la biomasa acumulada difirió entre FS ($p < 0,01$) y niveles de N ($p < 0,05$) en 2020 y entre combinaciones FS $\times$ H en ambos años (Cuadro 3.1). En 2020, la biomasa acumulada en este período fue 12,5% mayor en la siembra tardía respecto de la temprana y 10,6% mayor en la condición N250 respecto de la N0. Para la siembra temprana de 2019 y tardía de 2020, los híbridos para doble propósito y silaje presentaron una mayor acumulación de biomasa respecto de los graníferos (23,9% y 16,5%, respectivamente). La RFAi acumulada durante el período crítico varió entre FS y H en ambos años, siendo mayor para i) la siembra tardía respecto de la temprana en 2019 (7,1%), ii) la siembra temprana respecto de la tardía en 2020 (9,41%), y iii) los híbridos doble propósito y sileros respecto de los graníferos ambos años (18,2 y 7,8% en 2019 y 2020 respectivamente). La $fRFAi$ media durante el período crítico osciló entre 0,73 y 0,93 y difirió significativamente según las combinaciones de FS $\times$ H en 2019 ($p < 0,01$) y entre FS ($p < 0,05$) y H ($p < 0,001$) en 2020. En la siembra temprana de 2019, la $fRFAi$ resultó 13,3% mayor para los híbridos de doble propósito y silaje respecto de los graníferos, sin diferencias entre tipos de híbridos en siembra tardía. En 2020, fue 4,6% mayor en siembras tardías respecto de las tempranas y 8,4% mayor en los híbridos doble propósito y sileros respecto de los graníferos. La EUR durante el período crítico osciló entre 2,48 g MJ⁻¹ y 5,05 g MJ⁻¹ y difirió entre FS ($p < 0,01$) y niveles de N ($p < 0,05$) en 2020, siendo 20,9% mayor en la siembra tardía respecto de la temprana y 9,9% mayor en la condición N250 respecto de la N0.

Durante el período de llenado efectivo de los granos, la biomasa acumulada osciló entre 301 y 968 g m⁻² y varió entre niveles de N en 2020 ($p < 0,01$) y tipos de híbridos en

ambos años. La acumulación de biomasa durante este período fue 24,7% mayor en la condición N250 respecto de la N0 en 2019 y mayor en los híbridos para grano respecto de los doble propósito y sileros (47,6 y 60,0% para 2019 y 2020 respectivamente; Cuadro 3.1). La RFAi acumulada durante esta etapa osciló entre 198 y 524 MJ m⁻² y difirió entre FS ($p < 0,05$) y niveles de N ($p < 0,05$) en 2019 y entre combinaciones FS $\times$ N $\times$ H en 2020 ($p < 0,01$). En 2019, la RFAi durante esta etapa fue 9,3% mayor en la siembra tardía respecto de la temprana y 13,2% mayor en la condición N250 respecto de la N0. En 2020, las combinaciones Temprana $\times$ N0 $\times$ granífero y Temprana $\times$ N0 $\times$ silero presentaron el menor y mayor valor de esta variable, respectivamente. La *f*RFAi media durante el período de llenado efectivo de los granos osciló entre 0,64 y 0,96 y difirió entre FS ($p < 0,01$) en ambos años, siendo mayor para siembras tardías que tempranas (12,9% y 17,5% para 2019 y 2020, respectivamente). La EUR durante esta etapa osciló entre 0,98 y 2,94 g MJ⁻² y difirió entre niveles de N ($p < 0,05$) en 2020 y entre tipos de híbridos ($p < 0,001$) en ambos años. La EUR resultó superior en: i) la condición N250 respecto de la N0 en 2020 (39,2%) y ii) en los híbridos graníferos respecto de los doble propósito y sileros (54,9 y 57,8% en 2019 y 2020 respectivamente).

Cuadro 3.1. Biomasa aérea acumulada, la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi), la fracción de la RFA interceptada por el cultivo (f RFAi) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) durante tres períodos diferentes del ciclo de cultivo (VE-V14, V14-R2 y R2-R6) de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA se muestran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	VE-V14				V14-R2				R2-R6			
				Biomasa (g m ⁻²)	RFAi acumulada (MJ m ⁻²)	f RFAi	EUR (g MJ ⁻²)	Biomasa (g m ⁻²)	RFAi acumulada (MJ m ⁻²)	f RFAi	EUR (g MJ ⁻²)	Biomasa (g m ⁻²)	RFAi acumulada (MJ m ⁻²)	f RFAi	EUR (g MJ ⁻²)
2019	22-oct	N0	Grano	782	215	0,41	3,68	873	219	0,73	4,00	463	198	0,76	2,35
			Doble propósito	821	214	0,38	3,90	1088	255	0,79	4,27	301	211	0,72	1,43
			Silaje	690	202	0,36	3,51	1133	298	0,76	3,89	364	225	0,75	1,61
		N250	Grano	919	242	0,48	3,79	864	178	0,86	4,86	725	250	0,80	2,93
			Doble propósito	908	250	0,46	3,68	1013	266	0,92	3,81	398	289	0,86	1,38
			Silaje	787	235	0,43	3,26	1071	259	0,90	4,13	420	246	0,72	1,70
	19-dic	N0	Grano	749	149	0,46	5,08	1112	254	0,85	4,39	690	235	0,90	2,94
			Doble propósito	871	177	0,51	4,94	1210	272	0,92	4,45	419	265	0,86	1,58
			Silaje	693	175	0,50	3,99	1165	265	0,90	4,39	402	259	0,90	1,56
		N250	Grano	709	148	0,46	4,81	1097	257	0,87	4,27	516	254	0,85	2,02
			Doble propósito	790	167	0,48	4,80	1200	269	0,91	4,46	441	254	0,82	1,72
			Silaje	636	171	0,49	3,79	1182	263	0,89	4,49	501	284	0,92	1,76
2020	16-oct	N0	Grano	681	241	0,39	2,87	833	336	0,81	2,48	715	469	0,86	1,53
			Doble propósito	706	300	0,42	2,38	883	351	0,85	2,52	475	492	0,84	0,98
			Silaje	629	322	0,46	1,96	1016	358	0,87	2,84	504	524	0,84	0,97
		N250	Grano	779	279	0,45	2,87	1066	327	0,89	3,30	968	445	0,82	2,19
			Doble propósito	907	325	0,47	2,82	1040	375	0,92	2,78	666	430	0,78	1,56
			Silaje	792	344	0,50	2,31	1133	377	0,92	3,01	689	453	0,74	1,53
	18-dic	N0	Grano	812	200	0,39	4,08	999	310	0,86	3,23	883	365	0,93	2,43
			Doble propósito	877	257	0,46	3,42	1155	324	0,90	3,57	430	376	0,96	1,16
			Silaje	770	269	0,48	2,88	1140	333	0,92	3,42	476	374	0,94	1,27
		N250	Grano	848	210	0,41	4,09	1019	315	0,87	3,24	914	347	0,94	2,64
			Doble propósito	926	253	0,45	3,70	1206	326	0,90	3,70	526	353	0,93	1,48
			Silaje	820	256	0,46	3,24	1200	334	0,93	3,60	582	371	0,94	1,56

Año 2019												
FS ^a	ns	**	*	***	**	**	ns	ns	ns	*	**	ns
N	ns	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
FS × N	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
H	***	ns	ns	***	ns	***	***	ns	***	ns	ns	***
FS × H	ns	*	*	ns	*	***	**	ns	ns	ns	ns	ns
N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns
Año 2020												
FS	*	*	ns	***	**	**	*	**	ns	**	**	ns
N	***	ns	ns	*	*	ns	ns	*	**	ns	ns	*
FS × N	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
H	***	***	***	***	***	***	***	ns	***	ns	ns	***
FS × H	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente. ns = no significativo.

3.3.2. Tasas de crecimiento por planta, eficiencias reproductivas y partición de biomasa

La tasa de crecimiento por planta durante el período comprendido entre VE y V14 (TCP_{VE-V14}) osciló entre 1,22 y 2,56 g pl⁻¹ d⁻¹, difirió entre FS ($p < 0,05$) en 2019, entre combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,05$) en 2020 y entre H en ambos años. En 2019, la TCP_{VE-V14} resultó 18,4% mayor en la siembra tardía respecto de la temprana. En 2020, la adición del fertilizante nitrogenado incrementó la TCP_{VE-V14} respecto de la condición N0 (7,4 y 26,8% para siembra temprana y tardía respectivamente). La TCP_{VE-V14} fue superior para los híbridos graníferos y doble propósito respecto de los sileros (20,0 y 14,0% para 2019 y 2020 respectivamente).

La tasa de crecimiento por planta durante el período crítico (TCP_{V14-R2}) osciló entre 3,08 y 4,47 g pl⁻¹ d⁻¹, mostrando diferencias significativas entre FS ($p < 0,001$), niveles de N ($p < 0,05$) y H ($p < 0,001$; Cuadro 3.2) en 2020. En 2020, la TCP_{V14-R2} fue mayor para i) la siembra tardía respecto de la temprana (12,4%), ii) la condición N250 respecto de la N0 (13,5%) y iii) los híbridos doble propósito y sileros respecto de los graníferos (11,9%). La tasa de crecimiento de la espiga apical durante el período crítico (TCE_{V14-R2}) osciló entre 1,40 y 2,47 g pl⁻¹ d⁻¹, y difirió entre combinaciones FS $\times$ N y H en ambos años (Cuadro 3.2). La condición N250 incrementó la TCE_{V14-R2} en las siembras tempranas (17,3% y 18,7% para 2019 y 2020, respectivamente), sin efecto en las tardías. Además, la TCE_{V14-R2} mostró valores superiores para los híbridos graníferos y doble propósito respecto de los sileros (9,2 y 11,2% para 2019 y 2020, respectivamente). La partición de biomasa a espiga durante el período crítico (PBE_{V14-R2}) osciló entre 0,38 y 0,57, y varió significativamente entre combinaciones de FS $\times$ N ($p < 0,01$) en 2019, FS ($p < 0,01$) en 2020 y H en ambos años (Cuadro 3.2), siendo 15,2% mayor en la condición N250 respecto a la N0 en siembras tempranas de 2019 y 6,9% mayor en siembra tardía

respecto de la temprana en 2020. El ordenamiento de los híbridos para esta variable fue granífero > doble propósito > silaje.

La eficiencia reproductiva de la espiga apical osciló entre 202 y 347 granos d g^{-1} y difirió entre FS y tipos de híbridos (Cuadro 3.2). Este rasgo fue mayor en siembras tempranas respecto de las tardías (11,2 y 12,3% en 2019 y 2020, respectivamente) y mayor para híbridos graníferos y sileros respecto de los doble propósito (15,6 y 11,7% para 2019 y 2020, respectivamente). La eficiencia reproductiva de planta osciló entre 100 y 167 granos d g^{-1} , explicada por variaciones entre FS y H (Cuadro 3.2). La eficiencia reproductiva de las plantas fue mayor en los ambientes de siembra temprana respecto de los de siembra tardía (13,0% y 7,1% en 2019 y 2020 respectivamente) y mayor en los híbridos graníferos respecto de los otros dos grupos (19,4 y 26,1% en 2019 y 2020, respectivamente).

La tasa de crecimiento por planta durante el período de llenado efectivo del grano ($\text{TCP}_{\text{R2-R6}}$) osciló entre 0,93 y 2,46 $\text{g pl}^{-1} \text{d}^{-1}$, y difirió significativamente entre FS ($p < 0,05$) en 2019, niveles de N ($p < 0,05$) en 2020 y H en ambos años (Cuadro 3.2). La $\text{TCP}_{\text{R2-R6}}$ fue mayor para i) la siembra temprana respecto de la tardía en 2019 (20,0%), ii) la condición N250 respecto de la N0 en 2020 (26,4), iii) los híbridos graníferos respecto de los otros dos tipos (54,5 y 65,5% en 2019 y 2020, respectivamente).

Cuadro 3.2. Tasa de crecimiento por planta entre emergencia (VE) y V14 (TCP_{VE-V14}), tasas de crecimiento por planta y espiga durante el período crítico (TCE_{V14-R2} y TCE_{V14-R2} , respectivamente), partición de biomasa a la espiga apical durante el período crítico ($PBE_{V14-R2} = TCE_{V14-R2}/TCE_{V14-R2}$), eficiencias reproductivas de espiga y planta y tasa de crecimiento por planta durante el período de llenado efectivo del grano (TCP_{R2-R6}) de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA se encuentran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	TCP _{VE-V14} (g pl ⁻¹ d ⁻¹)	TCP _{V14-R2} (g pl ⁻¹ d ⁻¹)	TCE _{V14-R2} (g pl ⁻¹ d ⁻¹)	PBE _{V14-R2}	Eficiencia reproductiva espigas (granos d g ⁻¹)	Eficiencia reproductiva planta (granos d g ⁻¹)	TCP _{R2-R6} (g pl ⁻¹ d ⁻¹)
2019	Temprana	N0	Grano	1,61	4,08	1,92	0,47	281	130	1,82
			Doble propósito	1,69	4,23	1,84	0,44	245	109	1,22
			Silaje	1,42	4,28	1,94	0,45	267	120	1,46
		N250	Grano	1,89	4,04	2,13	0,53	276	143	2,27
			Doble propósito	1,87	4,31	2,47	0,57	202	116	1,09
			Silaje	1,62	4,24	2,10	0,50	244	121	1,51
	Tardía	N0	Grano	2,11	4,12	2,25	0,55	231	124	1,99
			Doble propósito	2,29	4,48	2,18	0,49	208	101	1,07
			Silaje	1,81	4,32	1,84	0,43	238	101	1,08
		N250	Grano	2,01	4,06	2,06	0,51	247	124	1,41
			Doble propósito	2,06	4,44	2,16	0,49	213	104	1,08
			Silaje	1,65	4,38	1,93	0,44	226	100	1,18
2020	Temprana	N0	Grano	1,45	3,08	1,45	0,49	347	167	1,94
			Doble propósito	1,37	3,27	1,40	0,43	300	128	1,34
			Silaje	1,22	3,76	1,46	0,39	311	121	1,20
		N250	Grano	1,70	3,95	1,77	0,45	330	146	2,46
			Doble propósito	1,82	3,85	1,72	0,45	303	137	1,62
			Silaje	1,56	4,20	1,65	0,39	322	126	1,89
	Tardía	N0	Grano	2,42	3,70	2,06	0,55	280	152	2,03
			Doble propósito	2,36	4,28	1,90	0,45	259	115	0,93
			Silaje	2,07	4,22	1,65	0,39	318	121	0,99
		N250	Grano	2,53	3,77	2,00	0,53	286	151	2,21
			Doble propósito	2,56	4,47	2,01	0,45	256	116	1,19
			Silaje	2,26	4,45	1,68	0,38	304	115	1,27
Año 2019										
FS ^a				*	ns	ns	ns	**	**	*
N				ns	ns	*	*	ns	ns	ns
FS × N				ns	ns	**	**	ns	ns	ns
H				***	ns	*	**	***	***	***
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año 2020										
FS				***	**	***	**	***	*	ns
N				***	*	*	ns	ns	ns	*
FS × N				*	ns	**	ns	ns	ns	ns
H				***	***	*	***	**	***	***
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

3.3.3. Rendimiento en grano: determinantes fisiológicos y componentes numéricos

El rendimiento en grano osciló entre 865 y 1510 g m⁻² y varió significativamente de acuerdo con la interacción FS × N y entre H (Cuadro 3.3). Las siembras tempranas presentaron rendimientos en grano significativamente mayores bajo el nivel N250 respecto del N0 (19,3 y 37,2% en 2019 y 2020, respectivamente). Por el contrario, los niveles de N no difirieron entre sí en siembras tardías ($p > 0,05$). Los híbridos graníferos demostraron consistentemente el mayor rendimiento en grano, seguidos por los híbridos doble propósito y finalmente por los sileros. El número de granos osciló entre 3568 y 5164 granos m⁻² y difirió entre FS en 2019 ($p < 0,05$), combinaciones FS × N ($p < 0,01$) en 2020 y H en ambos años (Cuadro 3.3). El número de granos fue 10,1% superior en la siembra temprana de 2019 respecto de la tardía. La condición N250 incrementó significativamente el número de granos respecto a la N0 en la siembra temprana de 2020 (20,2%), sin efecto del agregado de N en la siembra tardía. El número de granos fue significativamente mayor para los híbridos graníferos respecto de los doble propósito y sileros, los cuales no difirieron entre sí (12,1 y 12,5% en 2019 y 2020). El PG osciló entre 205 y 303 mg y difirió significativamente entre niveles de N y H (Cuadro 3.3). La fertilización nitrogenada incrementó significativamente el PG (7,9% en 2019 y 2020), con mayor efecto en las siembras tempranas respecto de las tardías. Los híbridos para doble propósito exhibieron el PG más alto, seguidos por los graníferos y finalmente por los sileros.

La biomasa total aérea a madurez fisiológica osciló entre 1963 y 2812 g m⁻² y presentó interacción FS × N significativa en 2020 ($p < 0,05$). El agregado de N promovió un aumento del 24,8% en la biomasa total aérea con respecto a la condición N0 en la siembra temprana de 2020 sin efecto en las combinaciones FS × N restantes. Los híbridos

graníferos presentaron una biomasa total aérea mayor que los doble propósito y sileros (4,4% en 2019 y 7,5% en 2020). El IC osciló entre 0,44 y 0,56 y difirió significativamente entre las combinaciones FS $\times$ N y entre los H (Cuadro 3.3). La condición N250 incrementó el IC en las siembras tempranas (10,8% en 2019 y 10,4% en 2020) pero no en las tardías. Los híbridos graníferos presentaron los mayores valores de IC, seguidos por los doble propósito, y por último los sileros.

Cuadro 3.3. Medias del rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos (biomasa total aérea e índice de cosecha), y componentes numéricos (número de granos y peso de los granos) de los experimentos realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020) Los resultados del ANVA se encuentran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Rendimiento en grano (g m ⁻²)	Biomasa total aérea (g m ⁻²)	Índice de cosecha	Número de granos (granos m ⁻²)	Peso de los granos (mg)
2019	Temprana	N0	Grano	1033	2104	0,49	4719	219
			Doble propósito	952	2076	0,46	4063	234
			Silaje	939	2120	0,44	4582	205
		N250	Grano	1312	2372	0,56	5157	255
			Doble propósito	1102	2192	0,50	4452	246
			Silaje	1074	2205	0,49	4535	238
	Tardía	N0	Grano	1083	2205	0,49	4499	241
			Doble propósito	963	2101	0,46	4045	238
			Silaje	865	1963	0,44	3915	221
		N250	Grano	1055	2145	0,49	4481	236
			Doble propósito	1080	2223	0,49	4109	263
			Silaje	892	2021	0,44	3935	227
2020	Temprana	N0	Grano	1121	2229	0,50	4489	249
			Doble propósito	981	2064	0,47	3568	275
			Silaje	988	2149	0,46	4075	245
		N250	Grano	1510	2812	0,54	5164	292
			Doble propósito	1413	2613	0,54	4667	303
			Silaje	1318	2614	0,50	4748	279
	Tardía	N0	Grano	1464	2694	0,54	5058	289
			Doble propósito	1288	2463	0,52	4394	294
			Silaje	1150	2386	0,48	4589	250
		N250	Grano	1450	2782	0,52	5093	285
			Doble propósito	1367	2658	0,51	4606	297
			Silaje	1236	2602	0,48	4544	273
Año 2019								
FS ^a				ns	ns	*	*	ns
N				*	ns	***	ns	*
FS × N				*	ns	**	ns	ns
H				***	*	***	***	***
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns
Año 2020								
FS				*	**	ns	**	ns
N				**	**	***	**	**
FS × N				**	*	***	**	*
H				***	**	***	***	**
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

3.3.4. Asociaciones entre rasgos

Las relaciones entre los diferentes atributos y tratamientos se evaluaron mediante análisis de componentes principales. El primer análisis involucró al rendimiento en grano, la biomasa total aérea en R6 y el índice de cosecha, junto con la biomasa acumulada, la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) para tres subperíodos diferentes (VE-V14, V14-R2 y R2-R6). También se incluyeron las variables climáticas T_{media} y radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada (RFA) de estos subperíodos. Los dos primeros componentes representaron el 66,2% de la variación observada, con el 42,8% para el primer componente principal (CP1) y el 23,4% restante para el segundo (CP2; Fig. 3.1). Los coeficientes de correlación entre las variables y sus probabilidades asociadas se muestran en los Cuadros A3.2 y A3.3, respectivamente.

La variación correspondiente a las variables meteorológicas registradas quedó abarcada principalmente por el CP1, que distinguió entre i) niveles altos de RFA a lo largo del ciclo y mayor T_{media} durante el período de llenado efectivo de los granos hacia valores positivos del eje x , y ii) valores de T_{media} altos durante el período VE-V14 hacia valores negativos del eje x . Las condiciones meteorológicas contrastantes previamente descritas diferenciaron a los ambientes productivos evaluados, con los ambientes de 2019 predominantemente a la izquierda y los correspondientes a 2020 predominantemente a la derecha. Concomitantemente, el CP1 también diferenció entre valores más altos de RFAi acumulada a lo largo del ciclo hacia valores positivos del eje x y valores más altos de EUR durante los períodos VE-V14 y V14-R2 hacia valores negativos del eje x . La T_{media} durante el período crítico acompañó la tendencia hacia valores positivos del eje x , pero con un vector comparativamente más corto, lo que indica un menor efecto relativo en el análisis general.

Figura 3.1. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden a i) rendimiento en grano, biomasa total aérea e índice de cosecha a la madurez fisiológica, y ii) biomasa total aérea, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) durante tres períodos diferentes: VE-V14, período crítico (V14-R2) y período de llenado efectivo de los granos (R2-R6). Los vectores grises discontinuos representan la temperatura media (Tmedia) y la RFA incidente acumulada (RFA) para los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6.

El CP2 distinguió principalmente entre valores altos de EUR durante el período de llenado efectivo de los granos (EUR_{R2-R6}) y de biomasa producida durante los períodos VE-V14 y R2-R6 hacia valores positivos del eje y . El rendimiento en grano junto con sus determinantes fisiológicos (biomasa total aérea e índice de cosecha) en R6 también presentaron valores comparativamente más altos hacia valores positivos del eje y , y hubo una fuerte asociación positiva (vectores en un ángulo muy agudo; Fig. 3.1) entre ellos ($r \geq 0,75$; $p < 0,0001$; Cuadros A3.2 y A3.3). Para todos estos rasgos, los valores relativos más altos generalmente correspondieron a la campaña agrícola 2020 y valores relativos más bajos a la de 2019. Para cada combinación de Año $\times$ FS $\times$ N evaluada, la proyección perpendicular sobre el vector de rendimiento en grano del valor correspondiente a los híbridos graníferos (G) fue siempre superior a la de los de doble propósito (D) y la de los D superior a la de los sileros (S). Los valores más altos correspondieron a los híbridos graníferos, predominantemente durante 2020, y los registros más bajos al tipo silaje, predominantemente durante 2019. Los híbridos de doble propósito mostraron un comportamiento intermedio.

Los rendimientos relativos más bajos correspondieron a las siembras tempranas bajo el tratamiento N0 en ambas campañas agrícolas. Casi todos los datos correspondientes a esta combinación (Temprana $\times$ N0) se ubicaron hacia valores negativos del vector de rendimiento en grano (es decir, hacia valores negativos del eje y). Sin embargo, en siembras tardías, la adición de N no tuvo un efecto claro en la determinación del rendimiento en grano. Por lo tanto, mientras que el rendimiento en grano de todos los híbridos en siembras tempranas dependió de la adición de N como fertilizante para expresar su potencial, en siembras tardías casi no hubo respuesta a la adición del nutriente.

Con respecto a los tipos de híbridos, el desempeño relativo para el rendimiento en grano y sus determinantes fisiológicos bajo cada combinación $A \times N \times H$ evaluada fue siempre grano > doble propósito > silaje. La diferencia entre los híbridos de grano y doble propósito fue mayor que la diferencia entre los híbridos de doble propósito y los de silaje, lo que indica la condición comparativamente más “*silera*” que “*granífera*” de los híbridos de doble propósito, tal como lo había anticipado el análisis de conglomerados (Fig. 2.1).

El segundo análisis de componentes principales involucró al rendimiento en grano y sus componentes numéricos (número de granos y peso de los granos), junto con las tasas de crecimiento por planta (TCP) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6, la tasa de crecimiento de la espiga (TCE) y la partición de biomasa a espiga durante el período crítico (PBE_{V14-R2}), las eficiencias reproductivas de planta y espiga, así como la T_{media} y los niveles de RFA incidente acumulados en estos subperíodos. Los dos primeros componentes representaron el 67,8% de la variación observada, con el 42,5% correspondiente al CP1 y el 25,3% restante al CP2 (Fig. 3.2). Los coeficientes de correlación entre las variables y sus probabilidades asociadas se muestran en los Cuadros A3.4 y A3.5, respectivamente.

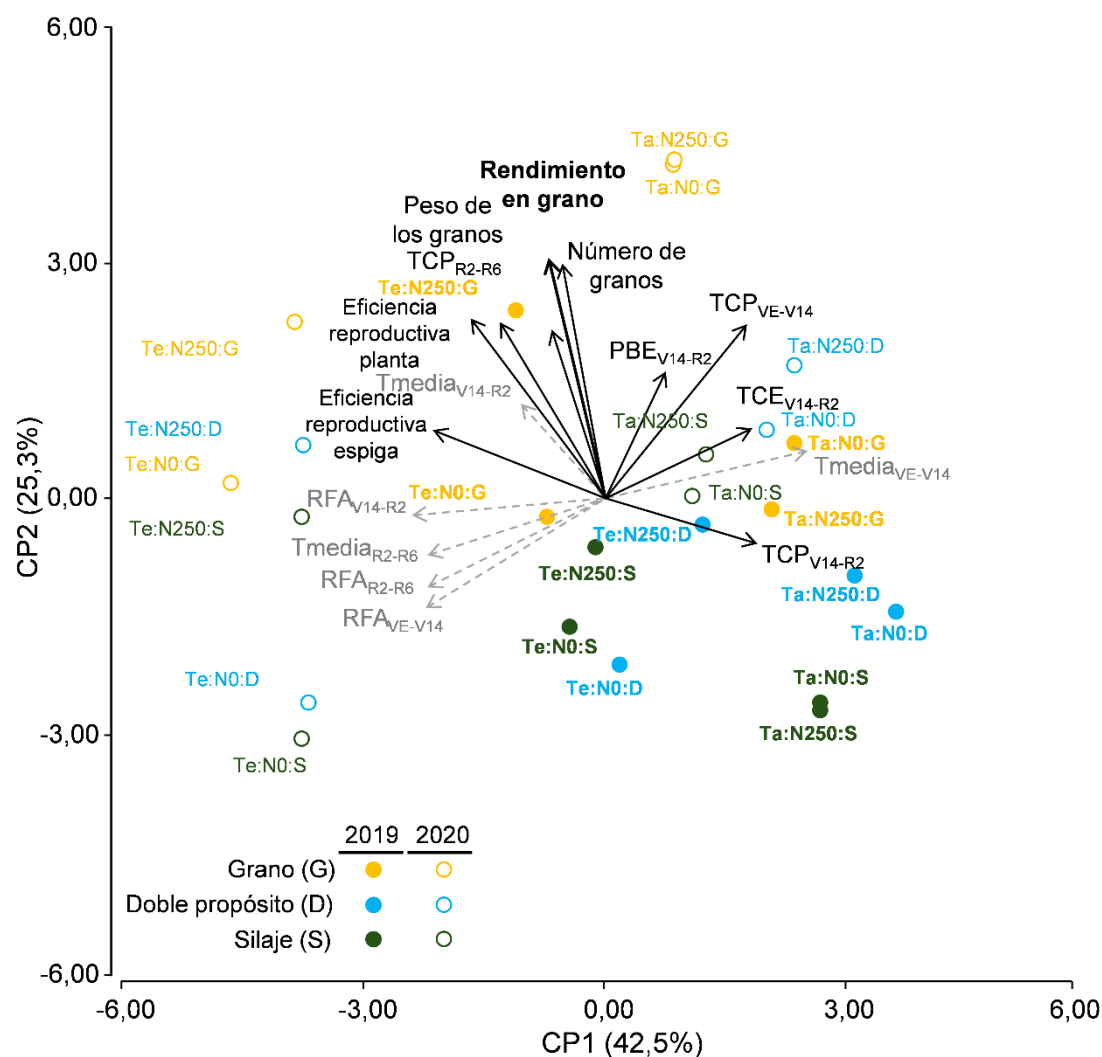


Figura 3.2. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden a i) rendimiento en grano, número de granos, peso de los granos, ii) tasa de crecimiento por planta (TCP) para tres períodos diferentes: VE-V14, período crítico (V14-R2) y período de llenado efectivo de los granos (R2-R6), iii) partición de biomasa a espiga durante el período crítico (PBE_{V14-R2}) y eficiencias reproductivas de planta y espiga. Los vectores grises discontinuos representan la temperatura media (Tmedia) y la RFA incidente acumulada (RFA) para los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6.

Al igual que en el biplot de la Fig. 3.1, las variables meteorológicas se desplegaron principalmente sobre CP1, que distinguió entre i) valores altos de RFA acumulados a lo largo del ciclo y mayor T_{media} durante el período de llenado efectivo de los granos hacia valores negativos del eje x , y ii) valores altos de T_{media} durante el período VE-V14 hacia valores positivos del eje x . Las condiciones meteorológicas contrastantes previamente descritas diferenciaron a los ambientes productivos evaluados, con los de 2019 predominantemente a la derecha y los correspondientes a 2020 predominantemente a la izquierda del eje x . Al mismo tiempo, el CP1 también diferenció entre valores más altos de las tasas de crecimiento de planta y espiga durante el período crítico hacia valores positivos del eje x y valores más altos de eficiencia reproductiva de espiga hacia valores negativos del eje x .

El CP2 abarcó principalmente la variación observada en la eficiencia reproductiva de planta, la partición de biomasa a espiga durante el período crítico y las TCP durante los períodos VE-V14 y R2-R6, con valores relativos más altos de estos rasgos hacia valores positivos del eje y . El rendimiento en grano junto con sus determinantes numéricos (número de granos y peso de los granos) también proyectaron sus valores comparativamente más altos hacia valores positivos del eje y , y se observó una fuerte asociación positiva (vectores en un ángulo muy agudo) entre ellos (Fig. 3.2; $r = 0,80$ y $r = 0,85$ para el número de granos y el peso de los granos, respectivamente; $p < 0,0001$; Cuadros A3.4 y A3.5).

El rendimiento en grano también se asoció positivamente con la eficiencia reproductiva de espiga ($r = 0,45$; $p < 0,05$) y de planta ($r = 0,62$; $p < 0,01$), así como con la TCP_{R2-R6} ($r = 0,58$; $p < 0,01$; Cuadros A3.4 y A3.5). El número de granos también mostró una fuerte asociación positiva con la TCP_{R2-R6} ($r = 0,74$; $p < 0,001$; Cuadros A3.4 y A3.5).

Los rendimientos relativos más bajos estuvieron asociados con la campaña agrícola 2019 y con la combinación de siembras tempranas bajo N0 en ambos años. Casi todos los datos correspondientes a la combinación Temprana $\times$ N0 se ubicaron hacia valores negativos del vector de rendimiento en grano (es decir, hacia valores negativos del eje y). Sin embargo, en siembras tardías, la adición de N no tuvo un efecto claro en la determinación del rendimiento en grano. Por lo tanto, mientras el rendimiento en grano de todos los híbridos en siembras tempranas dependió de la adición de N como fertilizante para expresar su potencial, en siembras tardías casi no hubo respuesta a la adición del nutriente. En cuanto a los tipos de híbridos, su desempeño relativo para los componentes numéricos del rendimiento bajo cada combinación $A \times N \times H$ evaluada fue siempre superior para los graníferos que para los de doble propósito y silaje, mientras que la diferencia entre los dos últimos tipos de híbridos fue menos pronunciada, como ya se comentó para el rendimiento en grano en el biplot anterior (Fig. 3.1) y en el análisis de conglomerados (Fig. 2.1).

Por último, tanto la TCP_{R2-R6} como la partición de biomasa a granos (es decir, el índice de cosecha) mostraron una relación lineal significativa ($p < 0,01$) con el número de granos por planta (Fig. 3.3), tanto en siembras tempranas (Figs. 3.3a y 3.3c) como en siembras tardías (Figs. 3.3c y 3.3d). Sin embargo, el rango explorado en el número de granos por planta fue mayor para las siembras tempranas (449 a 540) que para las tardías (461 a 527). Para las primeras, la mayor parte de la variación en este componente del rendimiento en grano estuvo ligada a la dosis de N, siendo los valores medios mayores para la condición N250 (524 y 540 granos planta⁻¹ para 2019 y 2020 respectivamente) respecto de la condición N0 (495 y 449 granos planta⁻¹ para 2019 y 2020 respectivamente). La dosis de N no afectó los valores medios de número de granos por

planta en siembras tardías (461 y 520 granos planta⁻¹ para N0 en 2019 y 2020 respectivamente y 463 y 527 para N250 en 2019 y 2020 respectivamente).

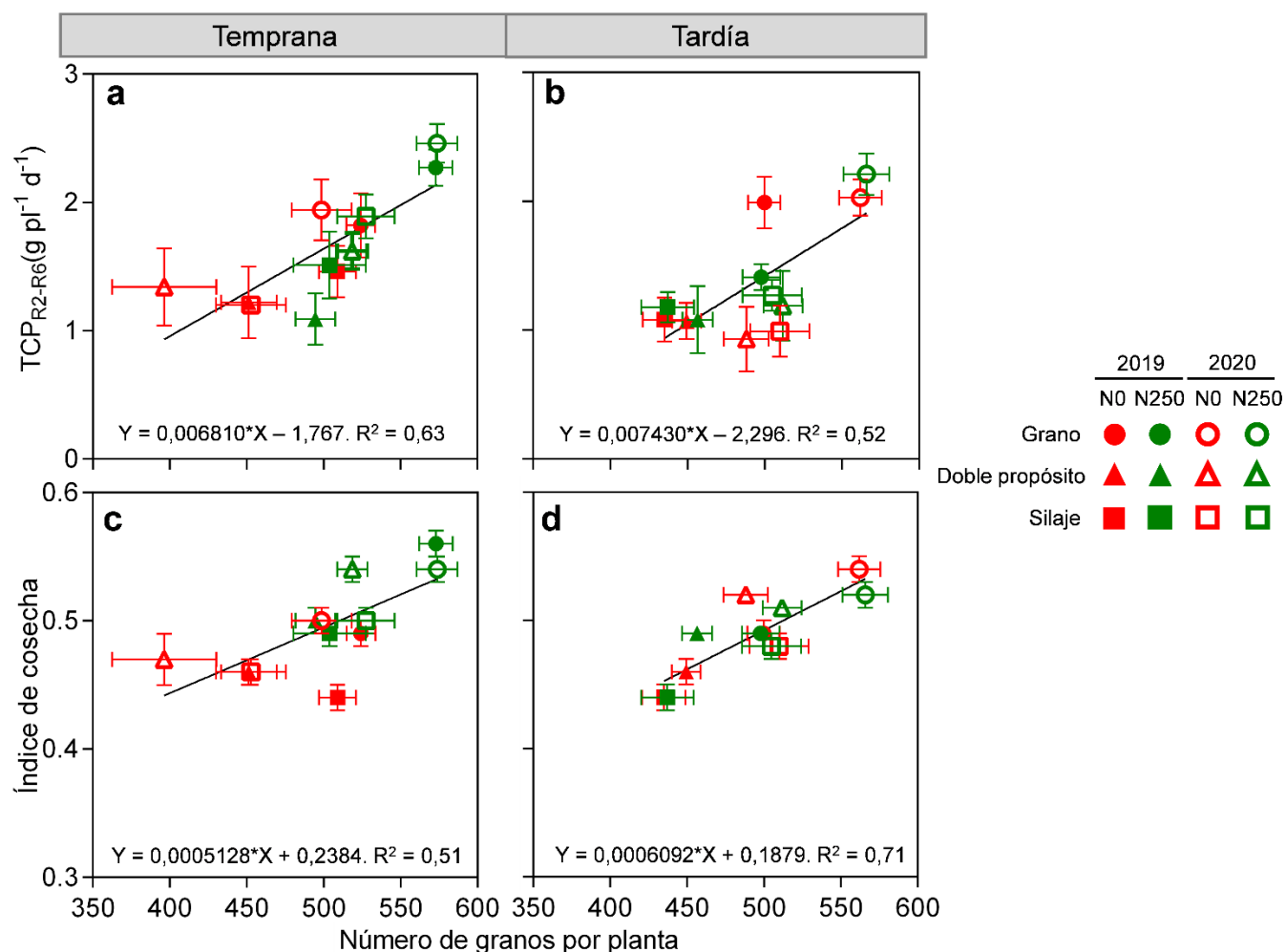


Figura 3.3. Relación entre el número de granos por planta y i) la tasa de crecimiento por planta durante el período de llenado efectivo del grano (TCP_{R2-R6}), y ii) el índice de cosecha. Los paneles de la izquierda corresponden a las fechas de siembra temprana (a y c) y los paneles de la derecha a las fechas de siembra tardías (b y d). Los círculos representan al tipo de híbrido de grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

3.4. Discusión

En el presente capítulo se realizó una clasificación y un análisis ecofisiológico de diferentes híbridos de maíz cultivados en condiciones contrastantes de crecimiento según su aptitud para diversos sistemas de producción. Los resultados del presente capítulo resultan relevantes en el contexto actual del cultivo de maíz en Argentina, marcado por la reciente adopción generalizada de siembras tardías, que promovieron la expansión del cultivo hacia ambientes considerados marginales, aumentando las oportunidades de diversificación del cultivo desde el tradicional destino para grano hacia otros usos, en particular la alimentación animal.

Los ambientes contrastantes generados a través de la combinación de fechas de siembra extremas y niveles de N dentro de cada año ($FS \times N$) permitieron la detección de diferentes respuestas en el desarrollo y crecimiento del cultivo. En siembra tardías, tanto el período de barbecho como la etapa previa a la floración suelen transcurrir con temperaturas más altas respecto de las siembras tempranas, lo que favorece la mineralización de la materia orgánica (Bruun et al., 2006; Caviglia et al., 2014; Coyos et al., 2018; Maltese et al., 2020). En consecuencia, como se observa en el presente capítulo, en siembras tardías el ciclo de cultivo comienza generalmente con una alta disponibilidad de N en el suelo ($N-NO_3^-$). Esta condición podría explicar que los tratamientos de N no presentaron diferencias entre sí ni en su rendimiento en grano, ni en sus determinantes fisiológicos (biomasa e índice de cosecha) ni sus componentes numéricos (número y peso de granos) en siembras tardías. De manera similar, la EUR desde VE hasta el inicio del período crítico (V14) fue mayor para las siembras tardías en comparación con las tempranas (Cuadro 3.1), una tendencia relacionada con las temperaturas más altas (Fig. 3.4) exploradas por el cultivo durante este período en siembras tardías (Andrade et al.,

1993; Bonelli et al., 2016). Además, la TCP_{VE-V14} fue mayor en siembras tardías y bajo condiciones de N250 respecto de las siembras tempranas y las condiciones N0, lo que podría estar relacionado con las temperaturas más altas y la mayor disponibilidad inicial de N en el suelo en siembras tardías. En conjunto, el incremento en la EUR_{VE-V14} genera aumentos en la TCP_{VE-V14} , lo que conduce a una mayor producción de biomasa y absorción de N, dos condiciones que usualmente se registran durante el período de prefloración para las siembras tardías respecto de las tempranas (Maddonni, 2012; Maltese et al., 2019). El acortamiento del período prefloración en las siembras tardías (Cuadro 2.1) fue compensado por el aumento de la radiación solar incidente y la EUR_{VE-V14} , lo que permitió alcanzar altos valores de radiación solar interceptada y tasas de crecimiento vegetativo al inicio del ciclo (Cirilo y Andrade, 1994a). Por el contrario, la EUR durante el período de llenado efectivo de los granos siempre fue menor que en las etapas anteriores (Cuadro 3.1), una tendencia atribuible principalmente a la reducción del N foliar específico a nivel del canopeo durante el proceso de senescencia del cultivo (Muchow, 1988; Muchow y Davis, 1988). Además, la EUR_{R2-R6} no mostró diferencias entre los ambientes de fechas de siembra dentro de cada año (Cuadro 3.1), lo cual concuerda con lo observado en investigaciones anteriores en fechas de siembra comparables (Otegui et al., 1995; Bonelli et al., 2016). Los tratamientos de N no afectaron la EUR en ningún período del ciclo del cultivo (Cuadro 3.1). Efectos negativos de la deficiencia de N sobre la EUR han sido documentados previamente (Curin et al., 2020; Uhart y Andrade, 1995b; Muchow y Davis, 1988). En el presente trabajo, las diferencias en la disponibilidad de N al comienzo del ciclo podrían haber producido una reducción en la expansión de las hojas tempranamente en el ciclo del cultivo (evidenciado en la $fRFAi$ más baja del tratamiento N0 entre VE y V14 respecto del N250), pero no fueron lo suficientemente grandes como para causar la disminución necesaria del N foliar

específico que conduciría a reducciones en la EUR (Sinclair y Horie, 1989; Uhart y Andrade, 1995a).

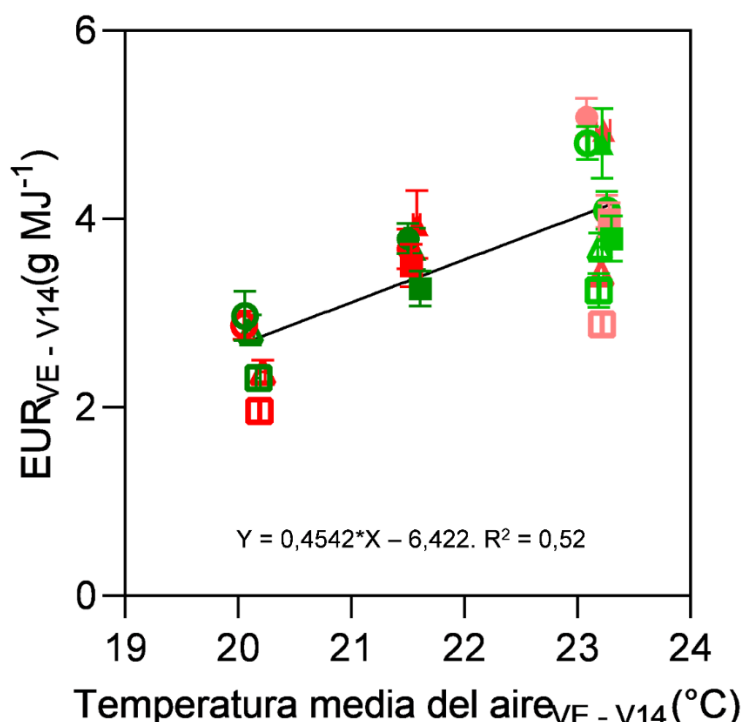


Figura 3.4. Relación entre la temperatura media del aire y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) para el período comprendido entre la emergencia y el inicio del período crítico (VE-V14). Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos) bajo dos fechas de siembra (temprana: símbolos de colores oscuros, tardía: símbolos de colores claros). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

Respecto de los diferentes tipos de híbridos, los mismos se agruparon de acuerdo con su aptitud para diferentes destinos finales en híbridos para grano, doble propósito o silaje según criterios ecofisiológicos. La presente clasificación de los híbridos fue parcialmente diferente a la realizada por las compañías semilleras, donde el híbrido KW 4360 AS-GL Stack se comercializa como híbrido silero y en el presente trabajo, al ser evaluado en ambientes contrastantes, mostró un comportamiento de doble propósito, lo que indica que podría ser empleado no sólo para silaje sino también para destino grano.

Los distintos tipos de híbridos difirieron significativamente en casi todos los rasgos evaluados (18 y 21 de 24 en 2019 y 2020, respectivamente en Cuadros 3.1, 3.2 y 3.3). Los híbridos para doble propósito presentaron un comportamiento más “*silero*” que “*granífero*”, una tendencia respaldada por los análisis de conglomerados (Fig. 2.1) y de componentes principales (Figs. 3.1 y 3.2). Aunque la magnitud de las diferencias entre los tipos de híbridos fue modesta en la mayoría de los casos, ayudó a explicar el diferente desempeño entre ellos. En cuanto al desarrollo del cultivo, los híbridos de doble propósito y silaje presentaron un ciclo de cultivo 5,5% más largo que los de grano (Cuadro 2.1). Un ciclo de cultivo más largo es un atributo deseable para fines de silaje porque permitiría aumentar la duración de la ventana de picado (Bertoia, 2010). Aunque la proporción del ciclo asignada entre los períodos pre- y postfloración fue similar entre los tipos de híbridos, el período reproductivo fue ligeramente más largo respecto de la duración del ciclo total entre los híbridos graníferos que entre los demás, una tendencia generalmente considerada deseable para mejorar el rendimiento en grano (Tollenaar y Lee, 2011).

En cuanto al crecimiento del cultivo, los híbridos de doble propósito acumularon la mayor cantidad de biomasa durante el período comprendido entre VE y V14, una tendencia atribuible a la combinación de una alta EUR (sin diferencias con la de los híbridos graníferos en 2019) con una alta $fRFA_i$, lo que condujo a una alta RFA_i acumulada durante este período (Cuadro 3.1). En cuanto a los híbridos para grano y silaje, la mayor EUR registrada entre los primeros que entre los segundos durante este período (EUR_{VE-V14}) sobre compensó la tendencia opuesta registrada tanto en la $fRFA_i$ como en la RFA_i acumulada (i.e., silaje > grano), lo que resultó en una mayor biomasa acumulada durante este período para los híbridos graníferos respecto de los sileros (Cuadro 3.1). Las diferencias mencionadas en EUR entre estos dos grupos podrían ser explicadas por el hábito de crecimiento. Para los híbridos graníferos, los esfuerzos del mejoramiento se han

centrado en seleccionar plantas más compactas, con hojas más erectas (Lacasa et al., 2022). Esta estructura del canopeo condujo a la mejora de la EUR en los híbridos argentinos (Curin et al., 2020; Luque et al., 2006), vinculada a la mejora en la fotosíntesis a través del canopeo (Loomis y Amthor, 1999), particularmente a nivel de la hoja de la espiga (Cagnola et al., 2021). Por el contrario, la mayor eficiencia de intercepción de la luz y RFAi acumulada (Cuadro 3.1) registradas para los híbridos de silaje están asociadas a un hábito foliar comparativamente más “*planófilo*” (Maddonni y Otegui, 1996). Esta característica podría haber penalizado su EUR (Maddonni et al., 2006). Durante el período crítico, los híbridos para grano presentaron la menor acumulación de biomasa debido a su comparativamente menor eficiencia de intercepción de luz, produciendo una RFAi acumulada comparativamente más baja respecto a los demás híbridos, aunque sin diferencias en la EUR_{V14-R2} entre los tres grupos (Cuadro 3.1). Por el contrario, la EUR_{R2-R6} fue significativamente mayor para los híbridos graníferos que para los de doble propósito y silaje, lo que resultó en una mayor acumulación de biomasa durante este período para los primeros (Cuadro 3.1). La mayor EUR_{R2-R6} de los híbridos graníferos podría estar asociada con una mayor demanda de los destinos (i.e., un mayor número de granos) que se espera que aumente la actividad de la fuente, mientras lo contrario restringiría la fotosíntesis debido a la retroalimentación negativa causada por exceso de fotoasimilados (Sadras et al., 2000; Paul y Foyer, 2001).

Finalmente, los híbridos graníferos superaron en rendimiento a los híbridos de doble propósito y silaje debido a una mayor biomasa total aérea e índice de cosecha a madurez (Cuadro 3.3), siendo el aumento en este último rasgo promovido principalmente por el mayor número de granos, que no fue totalmente compensado por una disminución en peso de estos (Cerrudo et al., 2013; Uribelarrea et al., 2008). El rendimiento en grano estuvo estrechamente relacionado con variaciones tanto en el número de granos (Cuadros

A3.3 y A3.4; Fig. 3.2) como en el PG (Cuadros A3.3 y A3.4; Fig. 3.2). No se encontró relación estadísticamente significativa entre la TCP_{V14-R2} y el número de granos ($r = -0,07$; $p = 0,73535$; Cuadros A3.4 y A3.5). Esta aparente contradicción con trabajos previos debe a que los valores de TCP_{V14-R2} explorados en la presente tesis siempre se encontraron por encima de $3 \text{ g pl}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y dentro del rango que maximiza el número de granos por planta (Andrade et al., 1993, 2002). El mayor rendimiento en grano logrado por los híbridos de doble propósito con respecto a los híbridos de silaje se relacionó con un PG significativamente mayor (Cuadro 3.3). Además, tanto el número de granos como el PG tendieron a aumentar de manera coordinada en ambientes de altos recursos (por ejemplo, 2020 con alta disponibilidad de N; Fig. 3.3), destacando la importancia de ambos componentes numéricos en la determinación del rendimiento en grano (Cerrudo et al., 2013; Gambín y Borrás, 2010). El mayor número de granos observado para los híbridos graníferos estuvo respaldado por una alta TCE_{V14-R2} (grano = doble propósito > silaje), atribuible a su mayor PBE_{V14-R2} (grano > doble propósito > silaje), pero no a diferencias en la TCP_{V14-R2} (silaje = doble propósito > grano). La tendencia descripta promovió mayores eficiencias reproductivas de planta y espiga (D'Andrea et al., 2013; Galizia et al., 2020; Vega et al., 2001). La mayor PBE_{V14-R2} registrada para los híbridos graníferos podría atribuirse a su intervalo antesis-*silking* comparativamente más bajo, indicativo de una mayor sincronía entre la panoja y la espiga apical, lo que conduce a mejorar el número de granos por unidad de superficie (Chinwuba et al., 1961; Edmeades et al., 2000). El mayor NGP de los híbridos graníferos también sostuvo el aumento en la TCP_{R2-R6} (Fig. 3.3). A partir de estos resultados, es posible especular que los híbridos de doble propósito y silaje están más limitados por destinos durante el período de llenado del grano que los graníferos, una condición que restringe la TCP_{R2-R6} (Hisse et al., 2019).

3.5. Conclusiones

Los diferentes destinos del cultivo de maíz definen cambios en el crecimiento y desarrollo entre híbridos con diferente uso final. Los híbridos para doble propósito y silaje presentaron un ciclo total levemente más largo, un atributo que favorecería la aptitud forrajera ya que permitiría extender la duración de la ventana de picado para silaje de planta completa. Los híbridos doble propósito presentaron un comportamiento más “*silero*” que “*granífero*”, y su rendimiento en grano intermedio se alcanzó combinando el peso individual de los granos máximo entre los tres tipos de híbridos con el mismo bajo número de granos característico de los híbridos para silaje. Los híbridos para grano presentaron mayor rendimiento en grano, biomasa total aérea a madurez, número de granos e índice de cosecha en relación con los otros dos tipos como resultado de i) un período postfloración ligeramente más largo a pesar de su duración del ciclo total más corta, lo que indica una partición mayor del ciclo asociada al período reproductivo respecto del vegetativo, un rasgo deseable para mejorar el rendimiento en grano; ii) un mayor NGP que contribuyó al aumento en la tasa de crecimiento por planta durante el período de llenado efectivo de los granos, así como a su mayor índice de cosecha en comparación con los híbridos de doble propósito y silaje; iii) mayor EUR durante el período de llenado efectivo de los granos debido al mayor tamaño de los destinos reproductivos (grano > doble propósito = silaje); iv) mayor partición a espiga durante el período crítico, así como mayor eficiencia reproductiva de la planta respecto a los de doble propósito y silaje. Los resultados del presente capítulo contribuyen colectivamente a mejorar la limitada comprensión de los mecanismos fisiológicos que subyacen a la formación del rendimiento en híbridos de maíz con diferentes usos finales. Su objetivo es ayudar a identificar materiales adecuados para una gama más amplia de ambientes

objetivo y sistemas de producción que se han expandido y diversificado notablemente en Argentina durante los últimos años, facilitados por la siembra del cultivo de maíz en el país en una ventana temporal más extensa.

CAPÍTULO 4

**LLENADO DE LOS GRANOS Y RELACIONES FUENTE-DESTINO EN
HÍBRIDOS DE MAÍZ CON DIFERENTE USO FINAL^{4.1}**

^{4.1}El contenido de este capítulo fue enviado a la revista Field Crops Research para su publicación: Chazarreta, Y.D., Alvarez Prado, S., Otegui, M.E. 2025. Kernel weight and source/sink ratios in temperate maize hybrids with different end uses under contrasting environments. En primera revisión [FIELD-D-25-00142R1]. Preprint disponible en <https://doi.org/10.1101/2024.09.06.611734>

4.1. Introducción

La acumulación de materia seca en los granos comienza después de la fertilización de los ovarios y generalmente se divide en tres fases: la fase *lag*, el período de llenado efectivo de los granos y finalmente una etapa de maduración (Bewley y Black, 1985; Fig. 4.1b). La fase *lag* es un período relativamente corto caracterizado por un rápido aumento en el contenido de agua de los granos, casi sin incrementos en la materia seca (Westgate y Boyer, 1986). Es un período de división celular activa, donde se define el número de células endospermáticas y amiloplastos involucrados en la deposición de almidón (Reddy y Daynard, 1983; Jones et al., 1996). El período de llenado efectivo de los granos se caracteriza por una acumulación rápida de materia seca y puede describirse mediante dos componentes: la tasa de llenado de los granos y la duración de la etapa (Egli, 1998). El volumen del grano y su contenido de agua alcanzan sus valores máximos durante esta fase (Borrás et al., 2003; Gambín et al., 2007) y luego disminuyen coordinadamente con el aumento en la deposición de biomasa (Fig. 4.1b). Durante la tercera y última fase, la tasa de acumulación de biomasa disminuye y se establece el peso final del grano (Egli, 1998; Borrás y Otegui, 2001). En este momento, comúnmente conocido como madurez fisiológica, los granos alcanzan su peso máximo y entran en un estado de quiescencia, seguido de una pérdida neta de agua, que depende principalmente de las condiciones ambientales predominantes (Martinez-Feria et al., 2019; Schmidt y Hallauer, 1966).

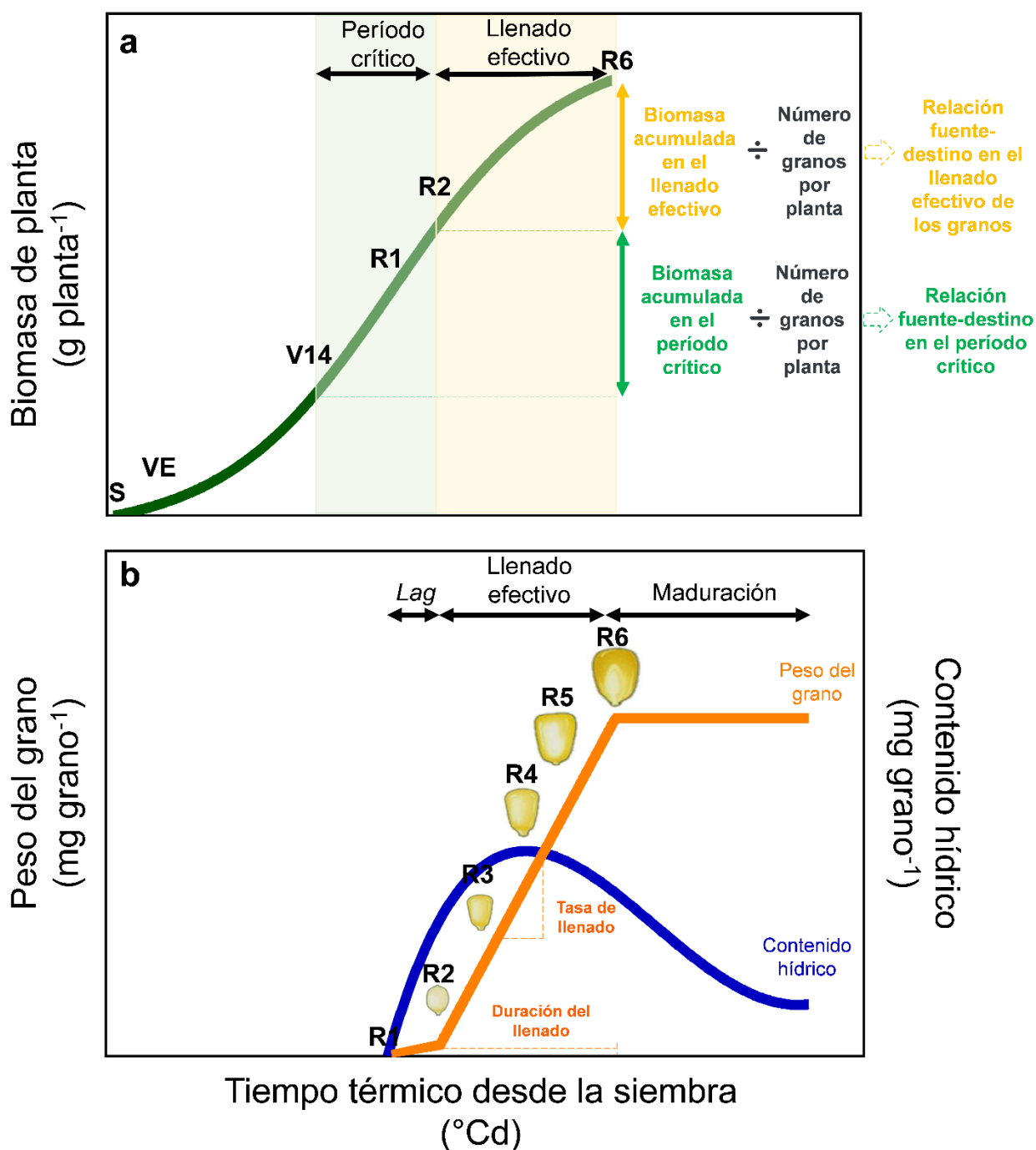


Figura 4.1. Esquema que describe a) la acumulación de biomasa por planta y b) la acumulación de materia seca del grano (naranja) y el contenido de agua del grano (azul) en respuesta al tiempo térmico desde de la siembra. En ambas figuras, las flechas negras horizontales indican la duración de las diferentes fases. Para la acumulación de biomasa, las etapas fisiológicas indicadas a lo largo del ciclo son siembra (S), emergencia (VE), catorce hojas (V14), *silking* (R1), *silking* +15 días (R2) y madurez fisiológica (R6). Para la acumulación de materia seca del grano, las etapas indicadas son R1, grano en estado de ampolla (R2), grano lechoso (R3), grano pastoso (R4), grano dentado (R5) y R6.

El peso final de los granos se ve afectado por las condiciones ambientales exploradas durante el período de llenado efectivo de los granos (Borrás y Otegui, 2001; Cirilo y Andrade, 1996). Los asimilados para el llenado de los granos provienen de los carbohidratos generados por la fotosíntesis actual, la absorción de N desde el suelo y la removilización de las reservas almacenadas en los órganos vegetativos (Gastal et al., 2012) en una proporción que depende de la interacción genotipo $\times$ ambiente. Para maíces en siembras tempranas cultivados en condiciones no limitantes, la principal fuente de asimilados es la fotosíntesis actual, con una contribución marginal de la removilización (Sekhon et al., 2016). Bajo tales condiciones, el peso final de los granos no aumenta significativamente en respuesta a una mayor disponibilidad de asimilados por grano (Borrás et al., 2004; Gambín et al., 2008). Por el contrario, el crecimiento de los granos es altamente susceptible a limitaciones de fuente durante esta fase (Borrás et al., 2004), que reducen frecuentemente el peso final de los granos debido a un acortamiento del período de llenado efectivo (Olmedo Pico y Vyn, 2021; Badu -Apraku et al., 1983; Echarte et al., 2006). Las limitaciones de N durante el ciclo del cultivo impactan negativamente sobre el peso final de los granos (Ruiz et al., 2022) a través de i) reducciones en el número de células endospermáticas producidas durante la fase *lag* (Lemcoff y Loomis, 1994; Olmedo Pico et al., 2021), lo que puede reducir el contenido máximo de agua de los granos (Melchiori y Caviglia, 2008; Nasielski y Deen, 2019) y, en consecuencia, la tasa de llenado (Liu et al., 2011; Wei et al., 2019; Olmedo Pico y Vyn, 2021 ; Ren et al., 2021), o ii) mediante un acortamiento de la duración del llenado efectivo de los granos (Olmedo Pico y Vyn, 2021). En esta situación aumenta notablemente la contribución aparente de reservas hacia los granos en crecimiento, principalmente a través de la removilización de los CHST (Sadras et al., 2020) y el N almacenado en las hojas y tallos (Pan et al., 1986) durante la etapa vegetativa. En

situaciones de relaciones fuente-destino bajas, hay una alta contribución de los CHST almacenados al llenado de los granos (Uhart y Andrade, 1995), aunque esta fuente de asimilados es insuficiente para sostener el crecimiento completo de los granos, que se interrumpe cuando las reservas se agotan y ya no hay contribución directa de la fotosíntesis (Rattalino-Edreira et al., 2014; Andrade y Ferreiro, 1996; Uhart y Andrade, 1995). Estas condiciones son frecuentemente experimentadas por cultivos de maíz creciendo en ambientes caracterizados por una pronunciada caída de temperatura y radiación durante el período de llenado de los granos, como lo son los ambientes de latitudes altas (Ruget, 1993; Kiniry y Otegui, 2000) y/o las fechas de siembra tardías (Cirilo y Andrade, 1996; Bonelli et al., 2016).

A pesar de los cambios en la producción del cultivo de maíz que han tenido lugar en Argentina durante la última década, que involucran el aumento de las siembras tardías y la diversificación de usos y destinos del cultivo (descritos en los Capítulos 1 y 3 de la presente tesis), la mayor parte de los estudios previos se han centrado principalmente en el cultivo de maíz en siembras tempranas con destino a grano (i.e., *commodity*; Otegui et al., 2021). El efecto interactivo FS $\times$ N sobre los determinantes fisiológicos del PG y las relaciones fuente-destino no ha sido suficientemente explorado. El objetivo de este capítulo es evaluar el efecto de la fecha de siembra y la disponibilidad de N sobre i) el peso del grano, ii) sus determinantes fisiológicos (tasa de llenado y duración del llenado de los granos), y iii) la dinámica de CHST durante el período de llenado efectivo de los granos para híbridos de maíz comercializados para grano, doble propósito y silaje.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Mediciones

Los experimentos a campo y las determinaciones de fenología se realizaron según lo detallado en el Capítulo 2 de esta tesis. Los datos climáticos corresponden a los indicados también en ese capítulo. El tiempo térmico diario (en °Cd) se calculó como la diferencia entre la temperatura media diaria del aire (T_{media} , °C) y la temperatura base (T_b , °C). La T_b fue de 8°C previo al *silking* (Ritchie y Nesmith, 1991) y de 0°C post-*silking* (Muchow, 1990). Para los cálculos del tiempo térmico, las temperaturas mínimas diarias inferiores a 8°C se consideraron como 8°C y las máximas diarias superiores a 34°C se consideraron como 34°C (Cicchino et al., 2010).

La estimación de la biomasa para los estadios V14, R2 y R6 y la determinación del NGP en R6 se realizaron según lo descrito en el Capítulo 2. La biomasa aérea acumulada durante el período crítico (V14-R2) se consideró como la diferencia de biomasa aérea total entre R2 y V14 (Fig. 4.1a). La biomasa aérea acumulada durante el período de llenado efectivo de los granos (R2-R6) se calculó como la diferencia entre la biomasa total aérea acumulada entre R6 y R2 (Fig. 4.1a). Las relaciones fuente-destino se calcularon para el período crítico y el período de llenado efectivo de los granos a partir de los datos correspondientes a las plantas marcadas. La relación fuente-destino V14-R2 (RFD_{V14-R2}) se obtuvo como el cociente entre el aumento en la biomasa aérea entre V14 y R2 y el NGP (Fig. 4.1a). La relación fuente-destino R2-R6 (RFD_{V14-R2}) se obtuvo como el cociente entre el aumento en la biomasa aérea entre de R2 y R6 y el NGP (Fig. 4.1a).

En cada una de las parcelas se etiquetaron al menos 15 plantas en su fecha exacta de *silking* (R1). A partir de los 15 días post-*silking* se procedió a muestrear la espiga apical de una planta etiquetada por parcela, con sus respectivas chalas. Cada espiga se

colocó en una bolsa plástica y luego en un contenedor, con el fin de evitar la pérdida de humedad de los granos. Se retiraron las chalas y se tomaron 15 granos de la porción central, los cuales fueron pesados para registrar su peso fresco. Este procedimiento se llevó a cabo cada 7 días pre-madurez fisiológica o 15 días post-madurez fisiológica y hasta alcanzar la humedad de cosecha comercial (14,5%). En los muestreos pre-madurez fisiológica, la extracción de los granos se realizó en una cámara de acrílico saturada a vapor de agua; posteriormente se realizó en condiciones no controladas. Los granos se llevaron a estufa a 70°C hasta verificar constancia en peso (al menos 7 días) y se registró su peso seco.

La dinámica de llenado del grano se describió mediante un modelo bilineal con *plateau* ajustado a la evolución del PG y utilizando el tiempo térmico (TT) desde *silking* como variable de tiempo (Borrás y Otegui, 2001):

$$PG = a + bX \quad \text{para } X \leq c \quad [4.1]$$

$$PG = a + bc \quad \text{para } X > c \quad [4.2]$$

donde X es el TT desde *silking*, a es la ordenada al origen (en mg), b es la tasa de llenado de los granos durante el período de llenado efectivo de los granos (en °Cd) y c es la duración del llenado efectivo de los granos (en TT desde *silking*). El PG máximo fue el PG estimado por el *plateau* del modelo, mientras que el parámetro c representó la fecha de madurez fisiológica (en TT desde *silking*; Fig. 1b). La duración de la fase *lag* (en °Cd) se estimó como el valor del TT donde la Ec. [4.1] interceptó al eje x (es decir, $PG = 0$). El contenido de agua del grano se calculó restando el peso seco del peso fresco del grano. El contenido máximo de agua del grano se calculó para cada combinación año $\times$ FS $\times$ N $\times$ H ajustando un modelo curvilíneo (Ec. [4.3]) según Borrás et al. (2009):

$$CAG = d + e \, TT + f \, TT^{1.5} + g \, TT^2 \quad [4.3]$$

donde CAG es el contenido de agua del grano, TT representa el tiempo térmico desde *silking* y d , e , f , and g son parámetros del modelo.

Los carbohidratos solubles en agua en el tallo (CHST) se midieron cada 15 días, comenzando 15 días después de *silking* (R2) y hasta R6. En cada fecha de muestreo se cortó una planta por parcela a nivel del suelo y se separaron el tallo y las vainas (en adelante, tallo) del resto de la planta. En cada planta muestreada se midieron tanto la altura de la planta hasta el último collar visible como el diámetro en la base del tallo para estimar el volumen del tallo. El tallo de cada planta se secó en estufa a 70°C hasta alcanzar peso constante, se pesó y molió. Los CHST se midieron en extractos de 0,1 g de tejido seco según la metodología de Yemm y Willis (1954). La cantidad de CHST (en gr) se calculó como el producto del peso seco del tallo por la concentración de CHST (Rattalino Edreira et al., 2014). El porcentaje de CHST (%) se calculó como la fracción del peso seco del tallo correspondiente a los CHST. La removilización de CHST entre R2 y R6 (en %) se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{\text{CHST en R2} - \text{CHST en R6}}{\text{CHST en R2}} \times 100 \quad [4.4]$$

4.2.2. Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de conglomerados para clasificar a los híbridos en su correspondiente tipo (grano, doble propósito o silaje) según un criterio ecofisiológico independiente de la clasificación aportada por la empresa productora de cada uno. El análisis se basó en el NGP, el PG (estimado por el *plateau* de la ecuación [4.2]), la tasa y la duración del llenado de los granos, la $\text{RFD}_{\text{V14-R2}}$ y la $\text{RFD}_{\text{R2-R6}}$, siguiendo la metodología detallada en el Capítulo 2. Al igual que el análisis de conglomerados realizado con otras variables presentado en la Fig. 2.1, se distinguieron tres categorías de

híbridos (Fig. 4.2). El coeficiente de correlación cofenética fue de 0,842. Las distancias *Euclidean* variaron entre 1,01 y 5,03, con las menores distancias correspondientes al par de híbridos DK 72-10 VT3P y NEXT 22.6 PWU y las mayores al par de híbridos KM 4360 AS-GL Stack y SYN 840 VIP3. Los híbridos DK 72-10 VT3P, NEXT 22.6 PWU y SYN 840 VIP3 correspondieron a la categoría graníferos, mientras que DUO30 PW y KM 4360 AS-GL Stack podrían considerarse híbridos de doble propósito, y EXP 1517 *bm3* RR2, LG 30850 RR2 y LG 30853 VT3P híbridos con mejor desempeño para silaje. Esta clasificación de los híbridos sirvió de marco conceptual para los análisis realizados en el presente capítulo.

Los datos se analizaron mediante ANVA según lo detallado en el Capítulo 2 de la presente tesis. La relación entre las variables se analizó mediante análisis de regresión. La interacción $A \times N \times H$ sobre las variables de llenado de los granos y relaciones fuente-destino se analizó mediante ACP. Se construyó un biplot donde cada combinación $A \times N \times H$ se representó con un símbolo y los rasgos como vectores desde el origen. Los análisis de regresión y los gráficos se realizaron utilizando GraphPad Prism versión 9.0.0.

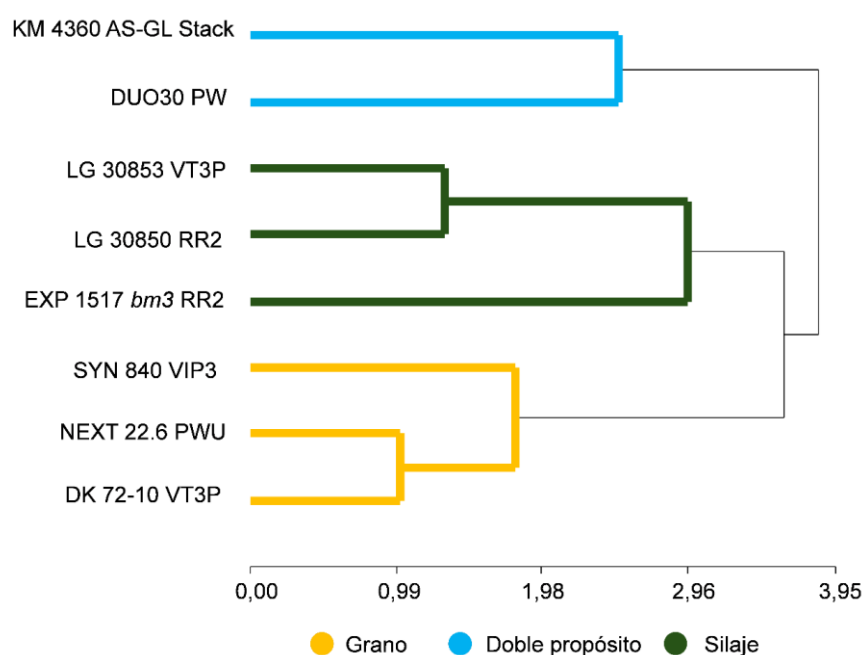


Figura 4.2. Análisis de conglomerados incluyendo ocho híbridos de maíz agrupados según su tipo de híbrido: grano (naranja), doble propósito (celeste) o silaje (verde).

4.3. Resultados

4.3.1. Llenado de los granos y relaciones fuente-destino

El número de granos por planta varió entre 417 y 574 y se detectaron diferencias significativas en este rasgo entre combinaciones FS $\times$ N y entre H (Cuadro 4.1). La adición del fertilizante nitrogenado incrementó el NGP en siembras tempranas, sin efecto en las tardías (5,8 y 18,4% en 2019 y 2020, respectivamente). Los híbridos graníferos presentaron un NGP superior respecto de los híbridos doble propósito y sileros, los cuales no difirieron entre sí (12,1 y 11,9% para 2019 y 2020, respectivamente).

Respecto del PG, registró un rango máximo entre 215 y 327 mg y difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N y H (Cuadro 4.1). El tratamiento con N250 incrementó significativamente el PG respecto al N0, siendo el efecto mayor para las siembras tempranas (17,1 y 13,0% para 2019 y 2020 respectivamente) respecto de las tardías (3,3 y 4,0% para 2019 y 2020, respectivamente; Fig. 4.3). Los híbridos para doble propósito presentaron los mayores PG, seguidos por los graníferos y finalmente por los sileros. En cuanto a los determinantes fisiológicos del PG, la tasa de llenado de los granos osciló entre 0,260 y 0,347 mg °Cd⁻¹ y se detectaron diferencias significativas entre H ($p < 0,001$) en 2019 y entre niveles de N ($p < 0,05$) y combinaciones FS $\times$ H ($p < 0,01$) en 2020 (Cuadro 4.1). En 2019, la tasa de llenado de los híbridos para doble propósito fue 9,4% superior respecto de los otros dos tipos de híbridos. En 2020, la condición N250 incrementó en 3,4% la tasa de llenado respecto de la N0 mientras que el atraso en la FS incrementó en esta variable en los híbridos graníferos un 14,8%. La duración del llenado de los granos osciló entre 1082 y 1403 °Cd y varió entre combinaciones FS $\times$ N en ambos años, FS $\times$ H ($p < 0,01$) en 2019 y N $\times$ H ($p < 0,05$) en 2020. La duración del llenado de los granos fue mayor en condiciones de N250 respecto de N0 en siembras tempranas (9,5

y 8,5% para 2019 y 2020 respectivamente), mientras que la fertilización con N no afectó a la duración del período en siembras tardías. En 2019, el atraso en la fecha de siembra incrementó la duración del llenado de los granos de los híbridos doble propósito (12,0%) y sileros (8,7%), sin efecto en los graníferos. En 2020, la condición N250 incrementó la duración del llenado de los granos en los híbridos doble propósito (8,3%), sin efectos en los otros dos tipos de híbridos. Los aumentos en el peso de los granos se relacionaron lineal y positivamente con los i) aumentos en la tasa de llenado de los granos para las siembras tardías, pero no para siembras tempranas (Figs. 4.3a y 4.3c), y ii) aumentos en la duración del llenado de los granos para las siembras tempranas (Fig. 4.3b) y tardías (Fig. 4.3d).

Cuadro 4.1. Medias de las variables evaluadas en los experimentos a campo realizados durante las campañas agrícolas 2019/2020 (año 2019) y 2020/2021 (año 2020). Los resultados del ANVA se presentan al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Número de granos por planta	Peso del grano (mg)	Duración de la fase <i>lag</i> (°Cd)	Contenido máximo de agua del grano (mg grano ⁻¹)	Tasa de llenado (mg °Cd ⁻¹)	Duación del llenado (°Cd)	RFD _{V14-R2} ^a (mg grano ⁻¹)	RFD _{R2-R6} ^b (mg grano ⁻¹)
2019	Temprana	N0	Grano	524	231	277	168	0,273	1129	167	88
			Doble propósito	451	248	311	182	0,319	1082	241	67
			Silaje	509	215	286	160	0,266	1107	223	71
		N250	Grano	573	278	264	189	0,278	1252	151	127
			Doble propósito	495	281	289	192	0,311	1196	206	81
			Silaje	504	254	286	171	0,272	1233	217	85
	Tardía	N0	Grano	500	261	331	197	0,292	1207	223	139
			Doble propósito	449	285	312	206	0,305	1276	269	92
			Silaje	435	250	326	193	0,280	1230	269	92
		N250	Grano	498	262	318	204	0,300	1164	221	105
			Doble propósito	457	284	295	213	0,291	1276	263	95
			Silaje	437	276	320	197	0,280	1315	272	115
2020	Temprana	N0	Grano	499	271	278	175	0,260	1314	167	142
			Doble propósito	417	277	326	184	0,347	1156	214	112
			Silaje	453	266	302	182	0,277	1290	226	113
		N250	Grano	574	301	294	205	0,288	1326	187	168
			Doble propósito	519	324	303	227	0,307	1399	201	129
			Silaje	528	295	311	208	0,291	1356	217	131
	Tardía	N0	Grano	562	298	312	220	0,301	1357	178	157
			Doble propósito	488	314	324	234	0,296	1384	238	88
			Silaje	510	282	352	198	0,276	1397	225	91
		N250	Grano	566	297	340	224	0,311	1293	181	163
			Doble propósito	512	327	344	240	0,326	1353	237	101
			Silaje	505	305	349	226	0,293	1403	240	116
Año 2019											
FS ^a				*	***	***	***	ns	***	**	**
N				ns	***	*	*	ns	***	ns	ns
FS × N				*	**	ns	ns	ns	***	ns	ns
H				***	***	ns	***	***	ns	***	**
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año 2020											
FS				**	**	**	**	ns	**	**	ns
N				**	***	*	**	*	*	ns	*
FS × N				**	***	ns	ns	ns	**	ns	ns
H				***	***	ns	**	***	ns	***	***
FS × H				ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ms	ns	ns	ns

^aRFD_{V14-R2}: Relación fuente-destino durante el período crítico, ^bRFD_{R2-R6}: Relación fuente-destino durante el período de llenado efectivo de los granos.

*, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

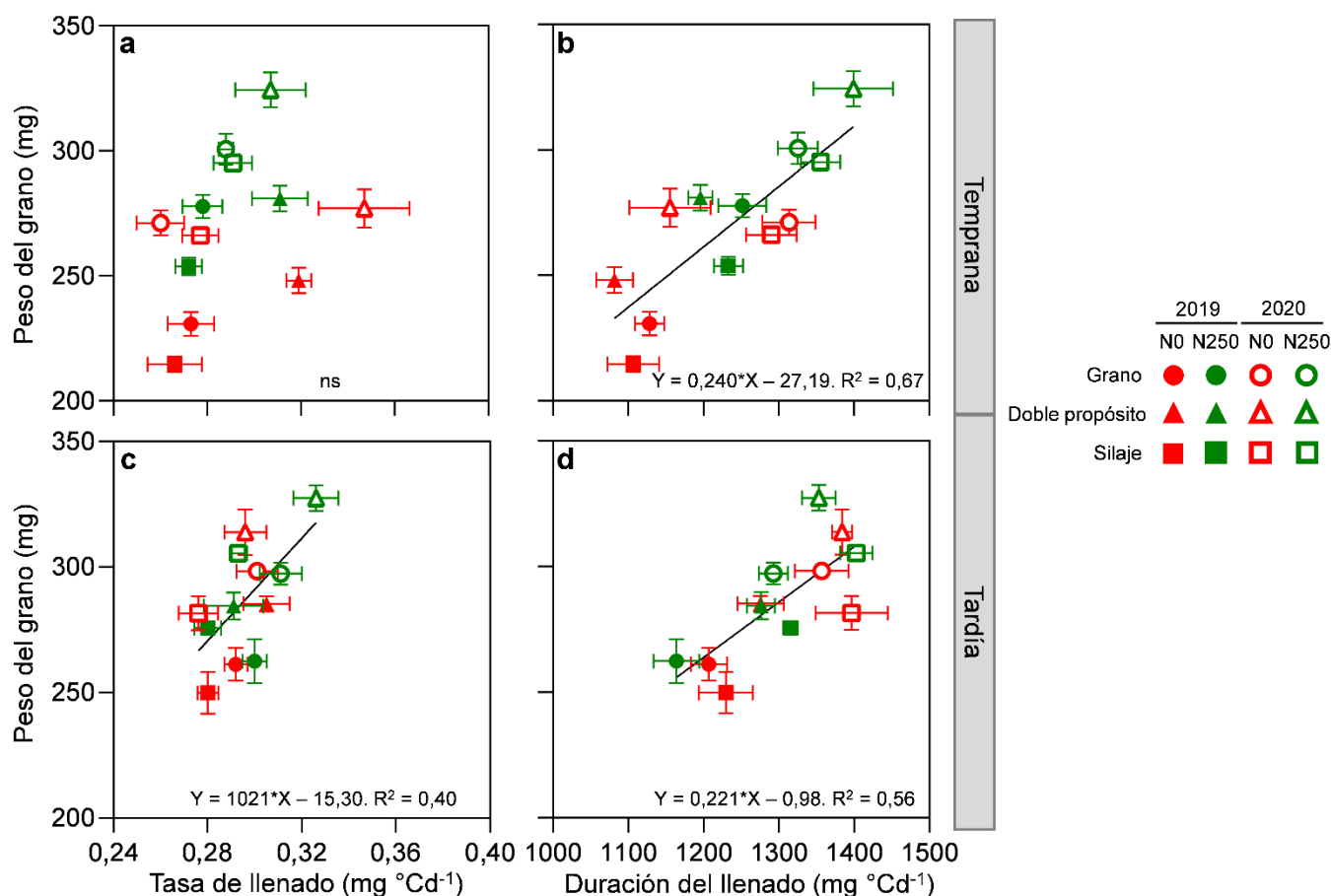


Figura 4.3. Relación entre el peso del grano y sus determinantes fisiológicos: (a, c) tasa de llenado y (b, d) duración del llenado de los granos. Los paneles superiores corresponden a las fechas de siembra temprana (a, b), y los paneles inferiores a las fechas de siembra tardías (c, d). Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los doble propósito y los cuadrados a los sileros cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

La duración de la fase *lag* osciló entre 264 y 352 °Cd y difirió entre FS y niveles de N en ambos años (Cuadro 4.1). La duración de la fase *lag* se incrementó significativamente ante atrasos en la fecha de siembra (11,0 y 11,4% en 2019 y 2020 respectivamente) y en condiciones N250 respecto de la N0 (3,9 y 2,3% en 2019 y 2020 respectivamente). El contenido máximo de agua del grano osciló entre 160 y 240 mg grano⁻¹ y difirió entre FS, niveles de N y H. Este rasgo fue mayor en las siembras tardías

respecto de las tempranas (13,8 y 13,7% en 2019 y 2020) y para la condición N250 respecto de la N0 (5,6 y 11,5% en 2019 y 2020, respectivamente). El orden de los híbridos para esta variable fue doble propósito > grano > silaje. Los incrementos en el máximo contenido de agua del grano se relacionaron lineal y positivamente con los incrementos registrados en la duración de la fase *lag* (Fig. 4.4a), y los aumentos en la tasa de llenado del grano se asociaron lineal y positivamente con los aumentos registrados en el máximo contenido de agua del grano (Fig. 4.4b).

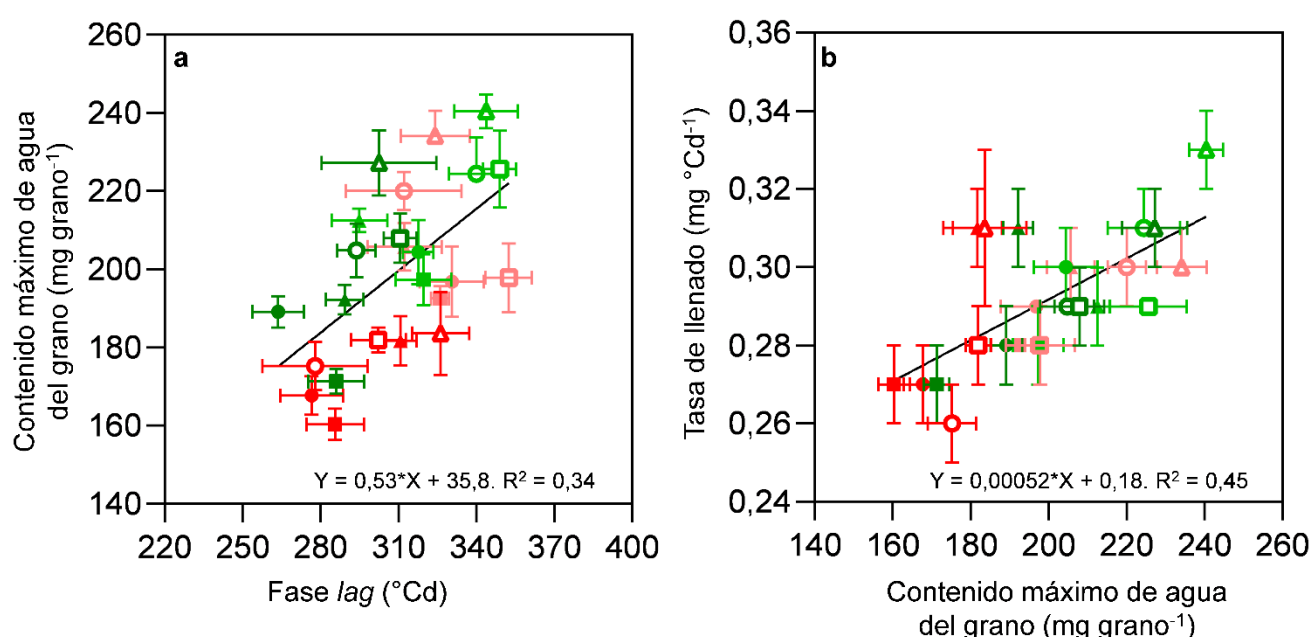


Figura 4.4. Relación entre a) el contenido máximo de agua del grano y la duración de la fase *lag* y b) la tasa de llenado de los granos y el contenido máximo de agua del grano. Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos) bajo dos fechas de siembra (temprana: símbolos de colores oscuros, tardía: símbolos de colores claros). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

La RFD_{V14-R2} osciló entre 151 y 272 mg grano⁻¹ y difirió entre FS y H. La RFD_{V14-R2} fue 25,8% mayor en las siembras tardías respecto de las tempranas (25,8 y 7,15% para 2019 y 2020 respectivamente) y en los híbridos para doble propósito y silaje respecto de

los graníferos (28,6 y 26,2% para 2019 y 2020 respectivamente). La RFD_{R2-R6} osciló entre 67 y 168 mg grano⁻¹ y difirió entre FS ($p < 0,01$) en 2019, tratamientos de N ($p < 0,05$) en 2020 y H en ambos años (Cuadro 4.1). La RFD_{R2-R6} fue 23,0% mayor en la siembra tardía de 2019 y sin diferencias entre fechas de siembra en 2020. El tratamiento N250 incrementó en 14,9% la RFD_{R2-R6} respecto al N0 en 2020. Los híbridos graníferos presentaron una RFD_{R2-R6} superior a la media de otros tipos, que no se diferenciaron entre sí (31,2 y 42,8% en 2019 y 2020 respectivamente). Por último, el peso del grano mostró una relación lineal significativa ($p < 0,05$) y positiva con RFD_{R2-R6} en fechas de siembra tempranas (Fig. 4.5a). Teniendo en cuenta sus determinantes fisiológicos, esta respuesta a la RFD_{R2-R6} no fue impulsada por la tasa de llenado ($p > 0,05$; Fig. 4.5b) sino por la duración del llenado de los granos ($p < 0,01$; Fig. 4.5c). Ni el peso del grano ni sus componentes estuvieron relacionados con la RFD_{R2-R6} en siembras tardías (Fig. 4.5 d, e y f).

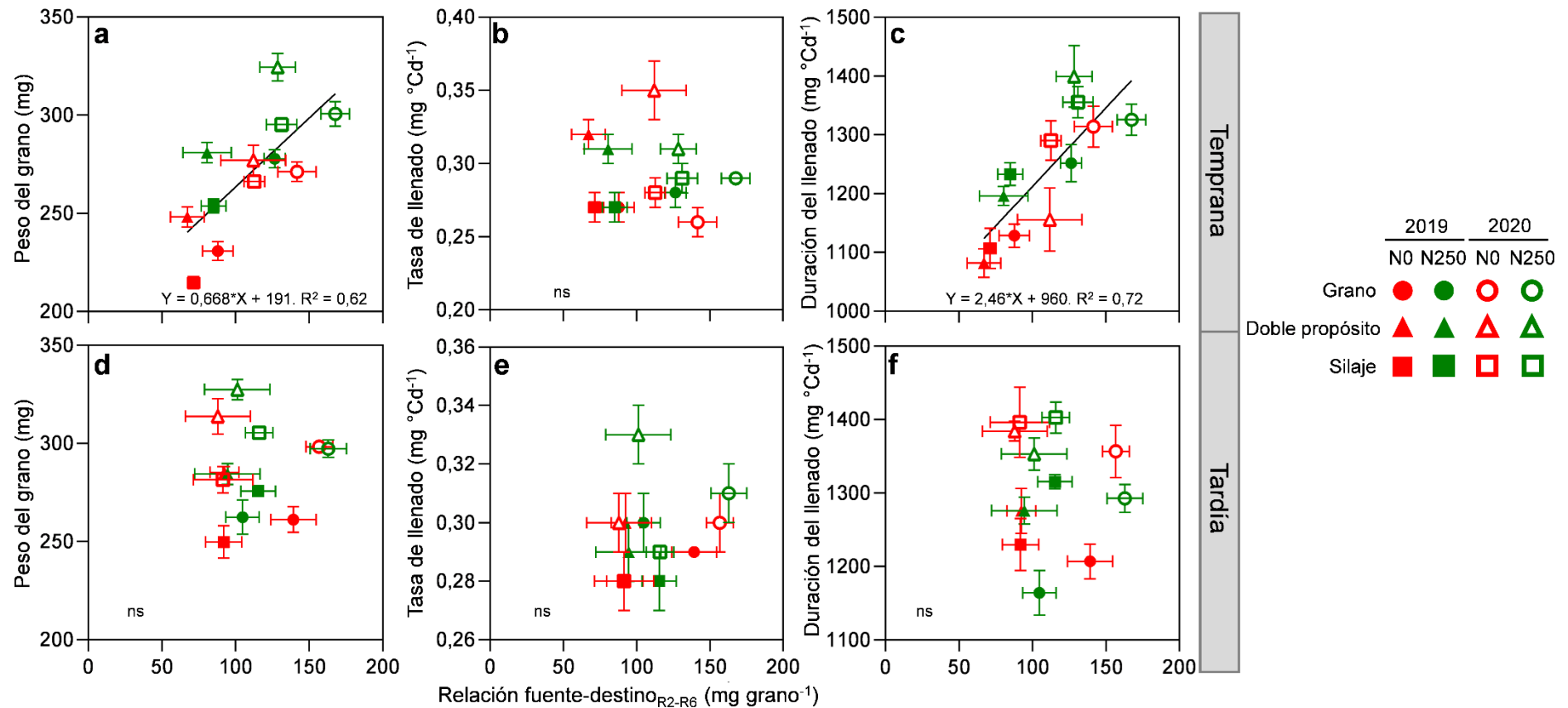


Figura 4.5. Respuesta del peso del grano, la tasa de llenado de los granos y la duración del llenado de los granos a la relación fuente-destino durante el período de llenado efectivo de los granos (R2-R6). Los paneles superiores corresponden a fechas de siembra tempranas (a, b y c), y los paneles inferiores a fechas de siembra tardías (d, e y f). Los círculos representan a los híbridos graníferos, los triángulos de doble propósito y los cuadrados a los híbridos de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹ en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

4.3.2. Asociaciones entre rasgos

Las relaciones entre los diferentes atributos y tratamientos se evaluaron mediante análisis de componentes principales. El análisis integró el NGP, el PG, la duración de la fase *lag*, el contenido máximo de agua en el grano, la tasa de llenado, la duración del llenado, la RFD_{V14-R2} y la RFA_{R2-R6} . Los dos primeros componentes representaron el 72,0% de la variación observada, con el 42,6% para el CP1 y el 30,4% restante para el CP2 (Fig. 4.6). Los coeficientes de correlación entre las variables y sus probabilidades asociadas se muestran en los Cuadros A4.1 y A4.2, respectivamente.

El CP1 abarcó la variación observada en el peso del grano, el contenido máximo de agua del grano y la duración del llenado, con valores comparativamente más altos de estas variables hacia valores positivos del eje x . El CP2 abarcó la variación observada principalmente en ambas RFD, el NGP, la duración de la fase *lag* y del período de llenado de los granos, con valores comparativamente más altos de NGP y RFD_{R2-R6} hacia valores negativos del eje y , y valores comparativamente más altos de las otras tres variables hacia valores positivos del eje y (Fig. 4.6).

El peso del grano presentó i) una asociación positiva fuerte (vectores en ángulo muy agudo; Fig. 4.6) con el contenido máximo de agua del grano ($r = 0,89$, $p < 0,0001$) y la duración del llenado de los granos ($r = 0,82$, $p < 0,0001$), y ii) una asociación positiva menos fuerte (vectores en ángulo agudo moderado; Fig. 4.6) con la duración de la fase *lag* ($r = 0,41$, $p < 0,0001$) y la RFD_{R2-R6} ($r = 0,46$, $p < 0,05$; Cuadros A4.1 y A4.2). La tasa de llenado de los granos tuvo un peso menor en el análisis porque su vector fue el más corto entre todos los rasgos evaluados. El NGP se asoció fuerte y negativamente con la RFD_{V14-R2} ($r = -0,75$, $p < 0,0001$; Cuadros A4.1 y A4.2) y positivamente con la RFD_{R2-R6} ($r = 0,56$, $p < 0,01$; Cuadros A4.1 y A4.2). Las relaciones fuente-destino durante V14-R2 y R2-R6 se asociaron fuerte y negativamente entre ellas ($r = -0,50$, $p < 0,05$; Cuadros

A4.1 y A4.2), una tendencia que fue anticipada por el ANVA (Cuadro 5.1). La correlación entre los componentes del rendimiento en grano (i.e., NGP y PG), así como entre los determinantes fisiológicos del PG (i.e., tasa de llenado de los granos y duración del llenado de los granos) fue casi nula (vectores cercanos a 90°).

Respecto de los ambientes, la mayoría de los datos correspondientes al 2020 se mostraron hacia valores positivos del eje x y los de 2019 se mostraron en la dirección opuesta. Respecto a los híbridos, los graníferos proyectaron sus registros comparativamente mayores hacia valores negativos del eje y , asociados a mayores valores de NGP y RFD_{R2-R6} , mientras que los híbridos para doble propósito y silaje lo hicieron en sentido contrario en asociación con valores más altos de RFD_{V14-R2} . Solo los datos correspondientes al 2020 combinaron altos valores de NGP con altos valores de PG (5 casos ubicados entre las proyecciones positivas de ambos vectores). La mayoría de los casos (4 de 5) correspondieron a la condición N250, particularmente en la siembra temprana de todos los tipos híbridos (3 de 4). La condición opuesta (combinación de valores bajos de NGP y PG) estuvo dominada por los datos de 2019 (4 de 5) de los híbridos para silaje (2 de 5) o doble propósito (2 de 5) bajo N0 (3 de 5), sin una tendencia clara entre fechas de siembra (el peor desempeño correspondió a los híbridos para doble propósito no fertilizados sembrados tempranamente y a los híbridos sileros sembrados tarde ese año).

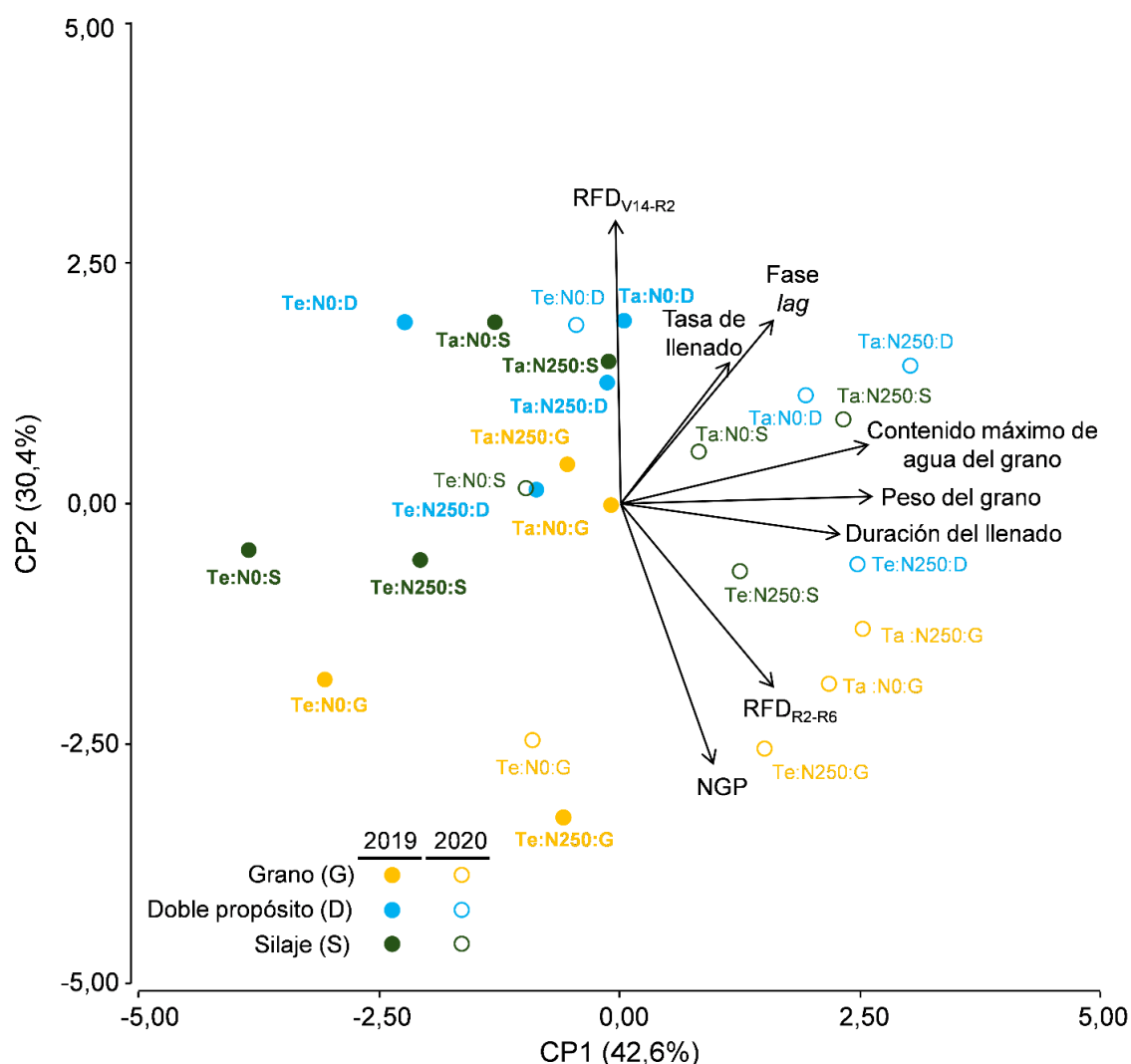


Figura 4.6. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden al número de granos por planta (NGP), el peso del grano, el contenido máximo de agua del grano, la fase *lag*, la tasa y la duración del llenado de los granos, la relación fuente-destino durante el período V14-R2 (RFD_{V14-R2}) y la relación fuente-destino durante el período R2-R6 (RFD_{R2-R6}).

4.3.3. Dinámica de los carbohidratos solubles en agua en el tallo

Comenzando en R2 (ca. R1+15 días), el porcentaje de CHST osciló entre 21 y 32%, difirió entre FS ambos años y entre H en 2019 ($p < 0,01$; Cuadro 4.2). Las siembras

tempranas iniciaron el período de llenado efectivo de los granos con porcentajes de CHST más altos que las tardías (19,4 y 9,2% para 2019 y 2020, respectivamente; Cuadro 4.2, Fig. 4.7). En 2019, los híbridos para silaje presentaron valores 9,4% superiores de CHST en R2 respecto de los doble propósito y graníferos. En el estadio R4 (ca. R1+30 días), el porcentaje de CHST osciló entre 17 y 28% y difirió entre FS en ambos años y entre tratamientos de N en 2019 ($p < 0,01$; Cuadro 4.2). Los valores de CHST fueron más altos para las siembras tempranas respecto de las tardías (16,1 y 28,9% en 2019 y 2020 respectivamente) y 11,0% más altos para la condición N0 respecto de la N250 en 2019 (Cuadro 4.2, Fig. 4.7). Para el estadio R5 (ca. R1+45 días), el porcentaje de CHST osciló entre el 4 y el 22 % y difirió significativamente entre FS. Las siembras tempranas presentaron porcentajes de CHST significativamente mayores en esta etapa respecto de las tardías (76,9 y 40,3% para 2019 y 2020, respectivamente; Cuadro 4.2, Fig. 4.7). Finalmente, el porcentaje de CHST en R6 osciló entre 4 y 18% y difirió significativamente entre FS ($p < 0,05$), donde las siembras tempranas presentaron mayores valores de CHST en R6 respecto de las tardías (134 y 102% en 2019 y 2020 respectivamente). Los datos de CHST en R2, R4, R5 y R6 expresados en g planta⁻¹ se muestran en el Cuadro A4.3.

El volumen del tallo en R2 osciló entre 810 y 1978 cm³, variando entre FS y H ambos años y niveles de N en 2020 ($p < 0,01$; Cuadro 4.2), siendo mayor para: i) las siembras tardías respecto de las tempranas (9,8 y 4,8% en 2019 y 2020 respectivamente) y ii) la condición N250 respecto de la N0 (20,6%) en 2020. El orden entre los tipos de híbridos fue sileros > doble propósito > graníferos. El porcentaje de CHST disminuyó considerablemente durante el período de llenado efectivo de los granos (Fig. 4.7). El porcentaje de removilización de CHST de R2 a R6 osciló entre 30 y 87% y varió significativamente entre FS. En las siembras tardías se removilizó un porcentaje mayor

de CHST de R2 a R6 respecto de las tempranas (32,1 y 67,8% en 2019 y 2020, respectivamente; Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Porcentaje de carbohidratos solubles en agua en el tallo (CHST) en R2 (ca. 15 días post-*silking*), R4 (ca. 30 días post-*silking*), R5 (ca. 45 días post-*silking*) y R6 (ca. 60 días post-*silking*), volumen del tallo en R2 y removilización de CHST de R2 a R6 para los experimentos realizados durante dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados del ANVA se presentan al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Carbohidratos solubles en agua en el tallo (%)				Volumen del tallo en R2 (cm³)	Removilización de CHST entre R2 y R6 (%)
				R2	R4	R5	R6		
2019	Temprana	N0	Grano	27	23	14	14	866	41
			Doble propósito	30	27	14	13	891	30
			Silaje	32	23	16	11	1024	45
		N250	Grano	27	22	10	10	822	33
			Doble propósito	26	21	13	9	880	42
			Silaje	29	21	11	10	1057	49
	Tardía	N0	Grano	24	21	5	4	876	61
			Doble propósito	22	20	9	6	1086	70
			Silaje	26	20	7	6	1196	63
		N250	Grano	25	17	4	4	841	87
			Doble propósito	22	18	10	6	969	54
			Silaje	24	21	8	4	1119	67
2020	Temprana	N0	Grano	30	26	20	18	810	53
			Doble propósito	29	27	22	16	836	57
			Silaje	31	28	19	17	1289	50
		N250	Grano	27	26	22	19	1057	65
			Doble propósito	27	23	20	16	1148	62
			Silaje	27	24	18	15	1459	66
	Tardía	N0	Grano	22	20	11	5	1435	82
			Doble propósito	24	20	15	13	1482	73
			Silaje	23	21	14	11	1581	75
		N250	Grano	21	17	11	5	1383	82
			Doble propósito	22	20	14	8	1945	73
			Silaje	22	22	15	10	1978	82
Año 2019									
FS ^a				**	*	*	**	**	*
N				ns	**	ns	*	ns	ns
FS × N				ns	ns	ns	ns	ns	ns
H				**	ns	ns	ns	***	ns
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año 2020									
FS				***	*	*	***	***	***
N				ns	ns	ns	ns	**	ns
FS × N				ns	ns	ns	ns	ns	ns
H				ns	ns	ns	ns	***	ns
FS × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

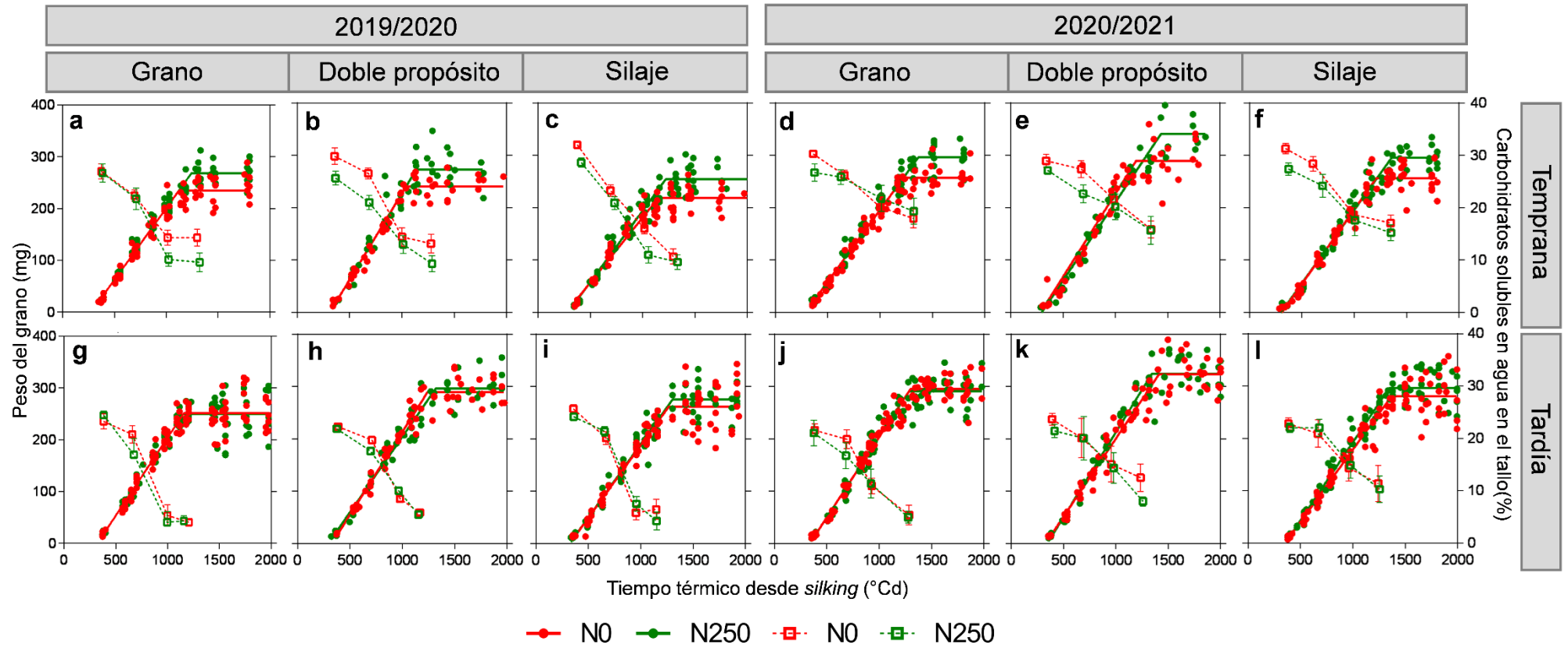


Figura 4.7. Evolución del peso del grano (círculos llenos; eje y izquierdo) y los carbohidratos solubles en agua en el tallo (cuadrados abiertos; eje y derecho) en función del tiempo térmico desde *silking* de híbridos para grano (a, d, g, j), doble propósito (b, e, h, k) y silaje (c, f, i, l) cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N agregado, en rojo; N250: 250 kg N ha⁻¹ en verde) durante dos campañas agrícolas: 2019/2020 (a-c, g-i) y 2020/2021 (d-f, j-l). Los paneles superiores (a-f) corresponden a siembras tempranas y los paneles inferiores (g-l) a siembras tardías. Para el peso del grano, las líneas continuas representan los modelos ajustados. Para los carbohidratos solubles en agua en el tallo, las líneas discontinuas conectan los puntos adyacentes y las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

4.4. Discusión

El presente capítulo integró un conjunto de variables que modulan la determinación del PG para híbridos de maíz con diferente uso final cultivados en ambientes contrastantes. Junto con los determinantes fisiológicos del PG (es decir, tasa y duración del llenado del grano), se analizaron las relaciones fuente-destino durante el período crítico y el período de llenado efectivo de los granos y la dinámica de carbohidratos solubles en agua en el tallo durante el período de llenado efectivo de los granos.

Los ambientes contrastantes generados por la combinación de fechas de siembra y niveles de N dentro de un año (FS $\times$ N) permitieron detectar diferencias en el PG y sus determinantes fisiológicos. La condición N250 incrementó significativamente el PG en todos los ambientes evaluados, pero con menor magnitud en las siembras tardías. El menor impacto de la fertilización con N sobre el PG en siembras tardías podría atribuirse a la alta disponibilidad inicial de N en el suelo (i.e., N-NO₃⁻), asociado a las temperaturas más altas experimentadas por los suelos durante el período de barbecho y la etapa previa a la floración en siembras tardías respecto de las tempranas, condición que favorece la mineralización de la materia orgánica (Bruun et al., 2006; Caviglia et al., 2014; Coyos et al., 2018). Las variaciones en el PG se explicaron principalmente por variaciones en la duración del llenado de los granos ($r = 0,82$; Fig. 4.6), atribuibles a la menor extensión de este período para las condiciones N0 respecto de las N250, una tendencia que fue más pronunciada para las siembras tempranas respecto de las tardías (Fig. 4.3). El acortamiento del período de llenado de los granos podría estar directamente asociado con la escasez de N, que ha sido identificada como uno de los principales factores que contribuyen a las brechas de rendimiento del maíz (Aramburu Merlos et al., 2015; Ciampitti y Vyn, 2014). Un trabajo reciente a nivel de lote de productor demostró que las

restricciones de N pueden limitar el rendimiento alcanzable al reducir el PG, con un efecto casi insignificante sobre el número de granos (Moises et al., 2024). En el presente capítulo se encontraron respuestas similares, donde la fertilización con N solo aumentó el número de granos en una combinación año $\times$ FS, pero incrementó el PG en todos los ambientes evaluados (Cuadro 4.1). Investigaciones previas también sugirieron que la fertilización nitrogenada puede contribuir directamente a la determinación del PG potencial (Paponov et al., 2020) debido a i) un aumento en el número de células endospermáticas durante la fase *lag* y, en consecuencia, en el peso final del grano a madurez (Olmedo Pico et al., 2019), y ii) el contenido de N del tejido vegetativo, que es menor en condiciones de N0 respecto de N250 y puede explicar la mayor parte de las variaciones en el PG en experimentos con diferentes niveles de fertilización nitrogenada (Olmedo Pico et al., 2023). En cuanto a las relaciones fuente-destino, en investigaciones realizadas en un ambiente de mayor latitud de la Región Pampeana húmeda de Argentina, la relación fuente-destino durante el período de llenado efectivo de los granos disminuyó con el atraso en la fecha de siembra y afectó negativamente al PG final (Cirilo y Andrade, 1996; Bonelli et al., 2016). Esta limitación de la fuente se explica principalmente por la caída pronunciada tanto de la temperatura como de la radiación solar durante el llenado efectivo de los granos que ocurre en las siembras tardías en estos ambientes (Cirilo y Andrade, 1996; Tsimba et al., 2013). La mencionada caída en temperatura y radiación solar no ocurrió en similar magnitud en los ambientes de siembra tardía de los presentes experimentos (Fig. 2.2), en concordancia con análisis previos para fechas de siembra tardías similares en la misma región (Mercau y Otegui, 2015). Además, en la Región Pampeana Central, la disminución en irradiancia hacia el equinoccio de otoño es compensada por el alargamiento de la fase R2-R6 promovido por temperaturas más frescas en siembras tardías respecto a tempranas (Otegui et al., 2021), las cuales no llegan

a penalizar a la EUR en igual magnitud que en ambientes de mayor latitud (Andrade et al., 1992; Bonelli et al., 2016).

Los híbridos se agruparon según criterios ecofisiológicos como graníferos, doble propósito o sileros. La presente clasificación fue coincidente con la realizada incluyendo otras variables (Fig. 2.1). El alto PG de los híbridos para doble propósito se logró mediante la combinación del contenido máximo de agua del grano más alto (asociado fuerte y positivamente con el PG, $r = 0,89$; Fig. 4.6) y las tasas de llenado de los granos más altas en siembras tempranas (también asociadas positivamente con el PG; $r = 0.45$; Fig. 4.6, Cuadro 4.1); ambos indicadores de PG potencial alto (Borrás et al., 2003). En cuanto a las diferencias en las relaciones fuente-destino entre los híbridos, durante el período V14-R2, los híbridos para doble propósito y silaje presentaron una mayor acumulación de biomasa respecto de los graníferos en la siembra temprana de 2019 y tardía de 2020 (23,9% y 16,5%, respectivamente), sin diferencias en la acumulación de biomasa entre híbridos en los ambientes restantes. La mayor producción de biomasa de los híbridos de doble propósito y sileros en dos ambientes y la similar producción de biomasa respecto de los graníferos en los ambientes restantes, combinada con un número de granos por planta inferior en todos los casos al de los híbridos graníferos (NGP 12,1 y 11,9% mayor en los híbridos graníferos en 2019 y 2020, respectivamente) resultó en una mayor RFD_{V14-R2} para los híbridos para doble propósito y silaje respecto de los graníferos. Durante el período R2-R6, la acumulación de biomasa fue mayor en los híbridos graníferos respecto de los doble propósito y sileros (47,6 y 60,0% para 2019 y 2020 respectivamente) a través de todos los ambientes. Los valores superiores de biomasa para este período en los híbridos graníferos sobrecompensaron su incrementado NGP respecto de los híbridos doble propósito y sileros, resultando en una RFD_{R2-R6} superior para los híbridos graníferos respecto de los otros dos tipos, que no se diferenciaron entre sí.

Los carbohidratos solubles en agua en el tallo (en %) disminuyeron durante el transcurso del llenado efectivo de los granos para todas las condiciones de cultivo e híbridos evaluados. En investigaciones anteriores (Uhart y Andrade, 1991), utilizando híbridos graníferos cultivados en Balcarce, Argentina (37°45'S, 58°18'O) en densidades de 8,5-9,1 plantas m⁻², no se detectó una disminución en este rasgo en las parcelas control, pero se indicaron reducciones severas en tratamientos bajo sombreado. De manera similar, en una comparación reciente entre un híbrido de maíz antiguo y uno nuevo cultivado en una densidad más baja (6,1-7,6 plantas m⁻²) en Manhattan, KS, EE. UU. (39°08' N, 96°37'O), Fernández et al. (2021) no encontraron una disminución notable en los CHST durante el llenado de los granos, excepto por una mayor removilización de CHST del híbrido antiguo respecto del nuevo al final de este período. Por el contrario, Kruse et al. (2008) estimaron una marcada disminución en los CHST durante el llenado de los granos para todas las fracciones de plantas de varios cultivares utilizados para silaje en latitudes altas (53°18'N, 98°80'E) y alta densidad (9-10 plantas m⁻²) en Hohenschulen, Alemania. Esta aparente controversia puede estar relacionada con las condiciones de genotipo × manejo × ambiente evaluadas en cada caso particular.

En los experimentos a campo desarrollados en el presente capítulo, el nivel observado de CHST (en %) al inicio del período de llenado efectivo de los granos (R2) fue significativamente menor para las siembras tardías que para las tempranas (Cuadro 4.2). El menor porcentaje de CHST en R2 en las siembras tardías no se debió a una cantidad reducida de CHST en términos de peso seco por planta (g planta⁻¹; Cuadro A4.3). En cambio, fue atribuible a un mayor volumen de tallo de las plantas sembradas tardíamente (Cuadro 4.2), lo que promovió una dilución de los CHST cuando se expresaron en porcentaje. La removilización de CHST de R2 a R6 fue mayor en siembras tardías que tempranas, análoga a las fuertes reducciones en CHST reportadas bajo

reducciones en la fuente, realizadas artificialmente mediante defoliación o sombreado durante el período de llenado de los granos (Barnett y Pearce, 1983; Jones y Simmons, 1983; Reed et al., 1988; Tollenaar y Daynard, 1982; Uhart y Andrade, 1991) o en ambientes de alta latitud (Kruse et al., 2008). Las mencionadas condiciones indujeron la removilización de reservas desde el tallo hacia los destinos en crecimiento (granos) generada por la relación desequilibrada entre la demanda de asimilados por los destinos reproductivos y la tasa fotosintética del cultivo (Uhart y Andrade, 1991). Los porcentajes de CHST a lo largo del período de llenado efectivo de los granos fueron ligeramente mayores en los tratamientos no fertilizados con respecto a los fertilizados, lo que podría atribuirse a i) el menor NGP en condiciones N0 que en condiciones N250, lo que produce una menor demanda por parte de los destinos, y ii) una RFD_{R2-R6} mayor para la condición N250 respecto de la N0, lo que resulta en que la fotosíntesis actual sea suficiente para suministrar los asimilados para los granos en crecimiento para la condición N250 pero no para N0 (Fernández et al., 2021; Cuadro 4.2). El porcentaje de CHST a lo largo del período de llenado efectivo de los granos no difirió significativamente entre los tipos de híbridos (Cuadro 4.2). Al comienzo del período efectivo de llenado de los granos, el porcentaje de CHST tendió a ser ligeramente mayor para los híbridos de silaje, una tendencia que podría atribuirse a la presencia en este grupo del híbrido EXP 1517 *bm3* RR2, que es un genotipo BMR. Se han reportado cantidades más altas de glucosa y pentosa entre los híbridos BMR en esta etapa, las cuales son el resultado de mutaciones en la vía biosintética de la lignina (*brownmidrib 1* y *brownmidrib3*) que permiten un fácil acceso a estos carbohidratos (Barrière et al., 1994).

Finalmente, es necesario tener en cuenta el predominio de niveles reducidos de CHST en R6 en siembras tardías tanto para fines graníferos como de silaje. Para fines de producción de granos, las reservas reducidas de los tallos los debilitan y los vuelven

propensos al vuelco (Pendleton y Egli, 1969), en un contexto donde lograr la humedad comercial del grano a cosecha después de la madurez fisiológica generalmente toma ~3 meses (Capítulo 5; Fig. 5.3). Esta limitación representa una seria dificultad para la cosecha mecánica y contribuye a reducciones en el rendimiento final del grano (Pinheiro, 1984) y la calidad. En particular, aumenta la probabilidad de aparición de enfermedades de espiga asociadas con *Fusarium*, lo que eleva los niveles de fumonisinas, con efectos negativos sobre la salud humana y animal documentados a nivel mundial (Dutton, 1996; Camargos et al., 2003; Abbas et al., 2006; Fandohan et al., 2006; Maiorano et al., 2009; Castañares et al., 2019). Para propósitos de silaje, las menores reservas de tallo también podrían estar relacionadas con una baja calidad del silo (es decir, menos digestibilidad) debido a reducciones en la relación entre la CHST y la pared celular (Andrieu et al., 1993), lo cual se discutirá en el Capítulo 6 de la presente tesis. Por lo tanto, los productores deben tener en cuenta atributos de resistencia de raíz y tallo de los híbridos para evitar dificultades agronómicas asociadas con el vuelco y el quebrado de plantas (Bonelli et al., 2016) y también tener cuidado con la calidad del tallo de las plantas de maíz para fines de silaje, particularmente en ambientes de siembra tardía que actualmente representan ~50% del total de la superficie cultivada con maíz en Argentina.

4.5. Conclusiones

El presente capítulo profundizó sobre los mecanismos fisiológicos que subyacen a la determinación del peso del grano y la dinámica de los carbohidratos solubles en agua en el tallo de híbridos de maíz con diferentes usos finales cultivados bajo condiciones ambientales contrastantes. La fertilización nitrogenada necesita ser considerada cuidadosamente, ya que niveles bajos de fertilización pueden impactar negativamente sobre el peso final del grano y, en consecuencia, en el rendimiento en grano, siendo estas

respuestas desfavorables de mayor magnitud para las siembras tempranas que para las tardías. Entre los tipos híbridos, los híbridos para doble propósito presentaron el mayor peso del grano, atribuido a su mayor contenido máximo de agua en el grano, lo que permitió a este tipo de híbrido mantener altas tasas de llenado de los granos en todos los ambientes evaluados. Las siembras tardías presentaron mayor removilización de CHST en comparación con las tempranas. El menor porcentaje de CHST a R6 en siembras tardías tiene implicancias importantes a nivel productivo. Para la producción de granos, estos tallos con reservas agotadas se tornan frágiles, aumentando la susceptibilidad al vuelco y quebrado de plantas y por lo tanto afectando el rendimiento y la calidad del grano. Con respecto al silaje, porcentajes bajos de CHST podrían afectar negativamente el valor nutricional del silaje.

CAPÍTULO 5

**PREDICCIÓN DEL SECADO DE LOS GRANOS POST-MADUREZ
FISIOLÓGICA EN MAÍZ ^{5.1}**

^{5.1}El contenido de este capítulo fue publicado en: Chazarreta, Y.D., Carcedo, A.J.P., Alvarez Prado, S., Massigoge, I., Amas, J.I., Fernandez, J.A., Ciampitti, I.A., Otegui, M.E. 2023. Enhancing maize grain dry-down predictive models. Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 334, 109427. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109427>

5.1. Introducción

El desarrollo de modelos predictivos para estimar la tasa de secado y determinar el momento óptimo de cosecha en maíz es fundamental desde una perspectiva agrícola y operativa. La tasa de secado y la humedad de los granos a madurez fisiológica influyen sobre los costos potenciales de secado, el manejo postcosecha, la calidad de los granos, las secuencias de cultivos y las decisiones de mercado, definiendo en última instancia la rentabilidad (Brooking, 1990; Singh et al., 1998; Maiorano et al., 2009). Identificar el momento óptimo de cosecha es crucial para prevenir pérdidas precosecha relacionadas con el vuelco/quebrado de las plantas causado por la reducción de las reservas del tallo (Rattalino Edreira et al., 2014), así como reducciones en el número y peso de los granos producidas por enfermedades de las espigas que también promueven una disminución en la calidad del grano (Elmore y Roeth, 1999; Parsons y Munkvold, 2010; Kebebe et al., 2015).

Desde una perspectiva fisiológica del cultivo, los granos de maíz alcanzan su máximo contenido de agua hacia la mitad del período de llenado del grano (Borrás et al., 2003; Gambín et al., 2007). Después de este punto, la pérdida de agua del grano se puede dividir en dos fases: pre- y post-madurez fisiológica. Durante la primera fase, el desplazamiento de agua en los granos se logra mediante la deposición de asimilados y podría interpretarse como una pérdida de agua ligada al "desarrollo", i.e. asociada con el llenado del grano (Brooking, 1990). La segunda fase comienza una vez que la planta ha alcanzado la madurez fisiológica, cuando la humedad del grano es aproximadamente del 35-37% (Borrás et al., 2003, 2004). Durante esta fase, la pérdida de agua desde la superficie del grano se produce bajo los mismos principios físicos que controlan la evaporación (Kiesselbach, 1950). Esta fase final podría verse afectada no sólo por las

condiciones ambientales predominantes (Schmidt y Hallauer, 1966, Chazarreta et al., 2021) sino también por características de la planta como el grosor y la permeabilidad del pericarpio, el número de chalas, el ángulo de inserción de las espigas, la longitud de la espiga o el número de hileras (Purdy y Crane, 1967; Troyer y Ambrose, 1971; Kang et al., 1975, 1983; Cavalieri y Smith, 1985; Nielsen, 2018).

Desde una perspectiva de modelización de procesos, el secado de los granos post-madurez fisiológica se ha descrito previamente a través de una respuesta curvilínea negativa a lo largo del tiempo hasta que se alcanza el contenido de humedad de equilibrio (H_e) con el aire circundante (Henderson, 1952; Martínez-Feria et al., 2019). La H_e se define como el contenido de humedad en el que no hay más intercambio de agua entre el material y el aire circundante bajo una presión de vapor determinada (Henderson y Perry, 1966; Earle y Earle, 2004). Tratándose de una función curvilínea negativa, la máxima tasa en valor absoluto se da al inicio del secado post-madurez fisiológica, y va disminuyendo a medida que el grano se seca. Dado el signo negativo de la pendiente, la disminución del contenido de agua del grano de maíz es inversamente proporcional a la cantidad de agua que se debe eliminar, dada por la diferencia entre el contenido de humedad real y la H_e (Henderson y Perry, 1966). La tasa de pérdida de humedad del grano (HG) se ve afectada por el coeficiente de secado de los granos post-madurez fisiológica (k), que indica la resistencia a la difusión del agua y se refiere a la proporción de la humedad disponible restante ($HG - M_e$) que puede intercambiarse en cada momento hasta alcanzar H_e (Martínez-Feria et al., 2019).

En la última década, diferentes estudios propusieron la utilización de modelos de secado para mejorar la estimación general de los cambios en la humedad del grano de maíz y la predicción del tiempo de cosecha (Piggot et al., 2010; Maiorano et al., 2014; Martínez-Feria et al., 2019). Una limitación para esos modelos de secado es la suposición

de que el coeficiente de secado post-madurez fisiológica es un valor constante (Weller y Bunn 1993; Maiorano et al., 2014; Martinez-Feria et al., 2019). Los cambios actuales en las prácticas de manejo agrícola, particularmente el atraso en la fecha de siembra para evitar déficits hídricos durante el período crítico del cultivo (Norwood, 2001; Jiang, 2020; Ke y Ma, 2021; Otegui et al., 2021), exponen los granos a diversas condiciones ambientales durante la fase de secado, lo que afecta la capacidad de los modelos disponibles para capturar la pérdida de humedad del grano. Un estudio reciente (Chazarreta et al., 2021), que comparó fechas de siembra contrastantes, informó que un valor k constante no describe correctamente la pérdida de humedad de los granos de maíz, particularmente en ambientes de siembra tardía. Por lo tanto, los cambios descritos en el ambiente, como las modificaciones en el momento de la siembra, no están bien representados en los modelos de secado actuales.

El presente capítulo evalúa los cambios en el coeficiente de secado de los granos post-madurez fisiológica (k) en función de variables meteorológicas para cuantificar las variaciones en la humedad de los granos de cultivos de maíz en un amplio rango de condiciones ambientales. Los objetivos específicos del capítulo son i) identificar las variables meteorológicas determinantes de las variaciones en el coeficiente de secado de los granos post-madurez fisiológica (k), ii) generar nuevos k basados en variables meteorológicas, y iii) evaluar el nivel de concordancia de los modelos de secado incluyendo los nuevos valores k para predecir cambios en la humedad de los granos post-madurez fisiológica y los días hasta alcanzar la humedad comercial de cosecha comercial (i.e. 14,5%).

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Experimentos a campo

Los datos de humedad de los granos post-madurez fisiológica se obtuvieron de experimentos a campo realizados en la Estación Experimental Pergamino del INTA, BA, Argentina ($33^{\circ}96'S$, $60^{\circ}57'W$), y en Ashland Bottoms, Manhattan, KS, EE. UU. ($39^{\circ}12'N$, $96^{\circ}64'W$). Los datos consistieron en 154 combinaciones híbrido $\times$ ambiente, dadas por la combinación de sitios, años, fechas de siembra, híbridos y dosis de N. El total de los datos experimentales se dividió en dos conjuntos: un conjunto de datos para entrenar a los modelos de secado de los granos y un conjunto de datos para evaluar los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica. Los detalles de los experimentos se muestran en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. División del conjunto de datos, sitio, año, nivel de nitrógeno (kg N ha⁻¹), fecha de siembra, híbridos (indicados por su nombre comercial), número de unidades experimentales (n) y fecha de madurez fisiológica de los experimentos utilizados para entrenar y evaluar los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica en maíz. PER, ARG se refiere a Pergamino, Buenos Aires, Argentina y ASH, EE. UU. a Ashland Bottoms, Kansas, EE. UU.

Conjunto de datos	Sitio	Año	Nitrógeno	Fecha de siembra		Híbridos	n	Madurez fisiológica
Entrenamiento	PER, ARG	2016	200	31-oct	Temprana	AW 190, DK 2F10, DK 664, DK 72-10, DK 73-20	15	7-mar
	PER, ARG	2016	200	28-dic	Tardía	AW 190, DK 2F10, DK 72-10, DK 73-20	12	22-abr
	PER, ARG	2017	250	6-oct	Temprana	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	18-feb
	PER, ARG	2017	200	18-oct	Temprana	AW 190, DK 2F10, DK 664, DK 72-10, DK 73-20	15	22-feb
	PER, ARG	2017	250	8-nov	Temprana	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	7-mar
	PER, ARG	2017	250	12-dic	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	12-abr
	PER, ARG	2017	200	15-dic	Tardía	AW 190, DK 2F10, DK 664, DK 72-10, DK 73-20	15	18-abr
	PER, ARG	2017	250	28-dic	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	28-abr
	PER, ARG	2018	0	19-oct	Temprana	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	22-feb
	PER, ARG	2018	250	19-oct	Temprana	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	26-feb
	PER, ARG	2018	250	20-nov	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	26-mar
	PER, ARG	2018	0	19-dic	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	17-abr
	PER, ARG	2018	250	19-dic	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	21-abr
	PER, ARG	2019	250	14-ene	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	28-may
	PER, ARG	2019	0	21-oct	Temprana	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	17-feb
	PER, ARG	2019	250	21-oct	Temprana	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	20-feb
	PER, ARG	2019	0	18-dic	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	13-abr
	PER, ARG	2019	250	18-dic	Tardía	DK 70-20, DK 72-10, DS 507, NEXT 22.6, SYN 840, SYN 875	18	12-abr
Evaluación	ASH, USA	2017	0	5-may	Temprana	3394, P1151, P1197	9	25-ago
	ASH, USA	2017	218	5-may	Temprana	3394, P1151, P1197	9	23-ago
	ASH, USA	2018	0	24-abr	Temprana	3394, P1197	6	9-ago
	ASH, USA	2018	218	24-abr	Temprana	3394, P1197	6	8-ago
	PER, ARG	2019	0	22-oct	Temprana	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	22-feb
	PER, ARG	2019	250	22-oct	Temprana	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	24-feb
	PER, ARG	2019	0	19-dic	Tardía	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	18-abr
	PER, ARG	2019	250	19-dic	Tardía	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	22-abr
	PER, ARG	2020	0	16-oct	Temprana	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	1-mar
	PER, ARG	2020	250	16-oct	Temprana	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	3-mar
	PER, ARG	2020	0	18-dic	Tardía	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	26-abr
	PER, ARG	2020	250	18-dic	Tardía	DUO30, EXP 1517, KM 4360, LG 30850, LG 30853	15	25-abr
	ASH, USA	2021	70	6-jul	Tardía	P0622AM	4	8-oct

Los datos utilizados para entrenar los modelos de secado de los granos incluyeron

18 ambientes (sitio × año × fecha de siembra × nitrógeno) del sitio Pergamino (n = 309,

Cuadro 5.1). Los experimentos se realizaron en un suelo Argiudol Típico e incluyeron 14

híbridos diferentes (entre históricos y actualmente comercializados en el mercado), una amplia gama de fechas de siembra (desde el 6 de octubre al 14 de enero) y diferentes dosis de N (desde N0, sin N agregado, hasta 250 kg N ha⁻¹ aplicado como urea en V5). Los experimentos sembrados antes del 15 de noviembre se clasificaron como ambientes de fecha de siembra temprana, mientras que los experimentos sembrados después de esa fecha se clasificaron como ambientes de fecha de siembra tardía. Los experimentos se realizaron durante cuatro campañas agrícolas entre 2016 y 2019. La fenología y las condiciones meteorológicas exploradas durante el período de secado de los granos (desde la madurez fisiológica en adelante) en los experimentos utilizados para entrenar los modelos se muestran en el Cuadro A5.1. Brevemente, la madurez fisiológica se alcanzó entre mediados de febrero y principios de marzo en las siembras de octubre, durante marzo en las siembras de noviembre, durante abril en las siembras de diciembre y a finales de mayo en las siembras de enero. Para las siembras de octubre, la temperatura media del aire fue de 18,9°C, la humedad relativa media de 71,9%, la radiación solar media de 15,8 MJ m⁻² d⁻¹ y el déficit de presión de vapor (DPV) medio de 0,64 kPa durante el período de secado de los granos post-madurez fisiológica. El atraso de la fecha de siembra a partir de noviembre posicionó al secado de los granos en condiciones de menores temperaturas medias del aire (17,4, 13,0 y 11,3°C para las fechas de siembra de noviembre, diciembre y enero, respectivamente), radiación solar (8,5, 8,9 y 9,9 MJ m⁻² d⁻¹) y DPV (0,47, 0,29 y 0,22 kPa para las fechas de siembra de noviembre, diciembre y enero, respectivamente), pero de mayor humedad relativa (78,4, 80,6 y 82,5% para las fechas de siembra de noviembre, diciembre y enero, respectivamente).

Los datos para evaluar los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica incluyeron 8 ambientes de Pergamino (n = 120) y 5 de Ashland Bottoms (n = 34, Cuadro 5.1). Los experimentos en Pergamino se llevaron a cabo durante 2019 y 2020

en un suelo Argiudol Típico, e incluyeron 5 híbridos de maíz actualmente comercializados por las compañías semilleras. Las fechas de siembra variaron desde el 16 de octubre al 18 de diciembre y las dosis de N fueron 0 (sin aplicación de fertilizante nitrogenado) o 250 kg N ha⁻¹ (aplicado como urea en V5). Para todos los experimentos realizados en Pergamino (tanto para los conjuntos de datos de entrenamiento como de evaluación), las parcelas se sembraron manualmente colocando de 3 a 4 semillas por sitio y se ralearon en V2-V3 para obtener una densidad única de 9 plantas m⁻², con un espaciamiento entre hileras de 0,52 m. El estrés hídrico se evitó mediante riego suplementario por aspersión. Los experimentos en Ashland Bottoms se realizaron sobre una textura franco-arcillo limosa (Argiudol Aquertico). Los experimentos de 2017 y 2018 en Ashland Bottoms se sembraron el 5 de mayo y el 24 de abril, respectivamente. Los experimentos incluyeron tres híbridos, en una única densidad de 7,6 plantas m⁻² con un espaciamiento entre hileras de 0,76 m y dos dosis de N diferentes, que incluyeron una condición no fertilizada con N y una condición con fertilización nitrogenada de 218 kg N ha⁻¹ dividida en dos o tres aplicaciones (Fernández et al., 2022). El estrés hídrico se evitó mediante el riego por surcos. El experimento de 2021 en Ashland Bottoms se sembró el 6 de julio e incluyó un híbrido en una densidad única de 9,5 plantas m⁻² con un espaciamiento entre hileras de 0,76 m y 70 kg de N ha⁻¹ aplicados como urea en V6. Los experimentos sembrados en abril-mayo se consideraron como ambientes de fecha de siembra temprana y el experimento sembrado en julio se consideró un ambiente de fecha de siembra tardía. Se utilizaron tres repeticiones en todos los experimentos, excepto en el experimento Ashland Bottoms de 2021, que incluyó cuatro repeticiones. Los cultivos se mantuvieron libres de malezas, plagas y enfermedades utilizando los controles recomendados en todos los experimentos.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de una estación automática ubicada a menos de 1 km de ambos sitios experimentales e incluyeron valores diarios de T_{media} (°C), temperaturas medias máximas y mínimas del aire (°C), humedad relativa media (HR), radiación solar media incidente ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), precipitaciones (mm) y velocidad media del viento ($km\ h^{-1}$). El déficit de presión de vapor (en kPa) se obtuvo como la diferencia entre la presión de vapor de saturación (PV) y la presión de vapor real (PVa). La primera se calculó como $PV = 0,611 \exp [(17,27 \times T_{media}) / (T_{media} + 237,3)]$ y la segunda como $PVa = PV \times HR$ (Connor et al., 2011).

5.2.2. Mediciones para determinar la humedad de los granos

En cada parcela, se marcaron al menos 12 plantas en su fecha exacta de *silking*. A partir de 20 días después de *silking* y continuando hasta alcanzar un valor de humedad del grano cercano a la madurez comercial (i.e., 14,5 %), la espiga apical de una planta previamente marcada se cosechó cada siete (para Ashland Bottoms) o diez (Pergamino) días en cada parcela. Inmediatamente, la espiga (espiga + chalas) se colocó en una bolsa de plástico y se transportó al laboratorio en un contenedor aislado. Se tomaron muestras de diez (experimentos de Ashland Bottoms de 2017 y 2021) o quince granos (todos los demás experimentos) de la sección central de cada espiga y se utilizaron para la evaluación inmediata del peso fresco de los granos. El peso seco de los granos se determinó luego de secar los granos en una estufa de aire forzado a 70 °C hasta verificar constancia en peso. Los valores de peso fresco y peso seco de los granos se utilizaron para calcular la humedad de los granos en base húmeda (en %).

5.2.3. Modelos para describir la humedad de los granos

El secado de los granos post-madurez fisiológica se modelizó de acuerdo con la ecuación de Henderson y Perry (1966; Ec. [5.1]), que supone que el cambio en el contenido de humedad durante un período es proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad del grano (HG) y la humedad de equilibrio (H_e) del aire circundante:

$$\frac{dHG}{dx} = -k (HG - H_e) \quad [5.1]$$

donde k es el coeficiente de proporcionalidad de secado post-madurez fisiológica (Martínez-Feria et al., 2019) y H_e es el nivel de humedad en el cual ya no hay intercambio de agua entre los granos y el aire circundante.

El valor diario de H_e se calculó según la ecuación 5.2 (Henderson, 1952):

$$H_e = \left(\frac{\ln\left(1 - \frac{HR}{100}\right)}{-a(T_{media} + b)} \right)^{\frac{1}{c}} \quad [5.2]$$

donde HR es la humedad relativa (%) y T_{media} es la temperatura media (°C), mientras que a , b y c son parámetros específicos del material a secar. Estos parámetros se establecieron para maíz como $a = 0,0001557$, $b = 45,5$ y $c = 2$ (Thompson et al., 1968). La ecuación 5.2 da como resultado valores de H_e expresados en base seca, que posteriormente se convirtieron a base húmeda. Siguiendo lo propuesto por Martínez-Feria et al. (2019), se calculó una media móvil de 3 días de los valores de H_e que fue utilizada para modelizar el secado de los granos (Ec. [5.3]) para evitar cambios rápidos e irreales en la humedad del grano. Las estimaciones se iniciaron en madurez fisiológica.

$$HG(X) = (HG_{MF} - H_e)e^{-kX} + H_e \quad [5.3]$$

donde X son los días posteriores a la madurez fisiológica y HG_{MF} es la humedad de los granos en madurez fisiológica.

Los datos de entrenamiento a nivel ambiental (Año $\times$ Sitio $\times$ Fecha de siembra $\times$ Nitrógeno, considerando el híbrido como aleatorio, Cuadro 5.1) se ajustaron según el modelo para estimar la humedad de los granos post-madurez fisiológica (Ec. [5.3]) con el paquete *nlme* en R (Pinheiro et al., 2022). Se registraron los valores de k ajustados para cada ambiente, en adelante k observados (k_{obs}).

5.2.4. Exploración de las variables explicativas de la variación en k

Se analizó la relación entre los k_{obs} y las variables meteorológicas calculadas para cada ambiente. Las variables meteorológicas incluidas en el análisis se muestran en el Cuadro 5.2 y se calcularon por separado para: i) el período transcurrido entre R1 y R6, en adelante denominado pre-madurez (pre), y ii) desde R6 hasta la madurez de cosecha (i.e. 14,5% de humedad), en adelante denominado post-madurez (post). Los análisis de datos y la generación de figuras se realizaron mediante el software R (R Core Team, 2023). La correlación entre los k_{obs} ajustados para cada ambiente y las variables meteorológicas explicativas se evaluó con el paquete *corrplot* (Wei y Simko, 2021). Se seleccionaron las variables meteorológicas que presentaron correlaciones (r) con k_{obs} inferiores a -0,70 o superiores a 0,70 (Evans, 1996). Los modelos de regresión lineal entre k_{obs} y las variables climáticas seleccionadas se evaluaron utilizando el paquete *lme4* (Bates et al., 2015). Este análisis se realizó de forma independiente para las variables meteorológicas pre y post-madurez. Todas las posibles combinaciones de modelos se evaluaron utilizando el paquete *MuMIn* (Bartón, 2022). Se seleccionaron los mejores modelos lineales (por mayor peso de Akaike) que incluían al menos dos variables meteorológicas para predecir

el valor de k_{pre} (explicado a través de variables meteorológicas pre-madurez) y k_{post} (explicado a través de variables meteorológicas post-madurez).

Cuadro 5.2. Variables meteorológicas seleccionadas para explicar las variaciones en el coeficiente de secado de los granos post-madurez fisiológica ajustados para cada ambiente (k_{obs}). La media de cada variable meteorológica se obtuvo como la media de la variable en base diaria durante el período transcurrido desde *silking* hasta la madurez fisiológica y desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial (14,5%). El acumulado de cada variable se obtuvo acumulando la variable diaria durante el período transcurrido desde *silking* hasta la madurez fisiológica y desde la madurez fisiológica hasta alcanzar la humedad de cosecha comercial.

Variable meteorológica	Unidad	Media	Acumulado
Temperatura media del aire	°C	×	×
Temperatura mínima del aire	°C	×	×
Temperatura máxima del aire	°C	×	×
Humedad relativa media	%	×	
Velocidad del viento	km h ⁻¹	×	
Radiación solar media	MJ m ⁻² d ⁻¹	×	×
Precipitaciones	mm	×	×
Déficit de presión de vapor (DPV)	kPa	×	

5.2.5. Evaluación de los modelos

Usando el conjunto de datos de evaluación (Cuadro 5.1), se evaluó la capacidad del modelo de secado (Ec. [5.3]) para predecir la humedad de los granos post-madurez fisiológica para tres valores de k : i) un valor constante reportado previamente en la literatura ($k = 0,062$, Martínez-Feria et al., 2019), ii) predicho utilizando variables meteorológicas exploradas pre-madurez (k_{pre}) y iii) predicho utilizando variables meteorológicas exploradas post-madurez (k_{post}). La comparación entre los datos de las pruebas de ajuste de los modelos de secado de los granos se realizó por separado para los datos de las fechas de siembra temprana y tardía. Los ajustes de los distintos modelos de secado de los granos se analizaron a través de métricas que incluyeron el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE, %), la raíz relativa error

cuadrático medio (RRMSE, %), la falta de exactitud (porcentaje de falta de exactitud, PLA, %), la falta de precisión (porcentaje de falta de precisión, PLP, %), y la eficiencia de los modelos se evaluó a través de la eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Kling et al., 2012) utilizando el paquete *metrica* (Correndo et al., 2022). Los días desde la madurez fisiológica hasta la madurez de cosecha se determinaron ajustando la ecuación [5.3] incluyendo k_{pre} y k_{post} cuando $\text{HG} = 14,5\%$.

5.3. Resultados

5.3.1. Efecto de las variables meteorológicas sobre el secado de los granos post-madurez fisiológica

Para el período pre-madurez, la temperatura media del aire (0,81), la temperatura media máxima del aire (0,86), la radiación solar media (0,79) y el DPV medio (0,71) presentaron las correlaciones más altas con k_{obs} . Para el período post-madurez, la temperatura media del aire (0,87), la temperatura media mínima del aire (0,80), la temperatura media máxima del aire (0,90), la humedad relativa media (-0,75), la radiación solar media (0,90), el DPV medio (0,86) y la radiación solar acumulada (0,76) mostraron las correlaciones más fuertes con k_{obs} (Cuadro 5.3). Las correlaciones para todas las variables se muestran en la Fig. A5.1.

Cuadro 5.3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los k observados (k_{obs} ; coeficientes de secado post-madurez fisiológica ajustados para cada ambiente) y las variables meteorológicas calculadas desde *silking* hasta la madurez fisiológica (pre-madurez) y desde la madurez fisiológica hasta la humedad comercial (post-madurez). En negrita, los valores inferiores a $-0,70$ o superiores a $0,70$. Para cada correlación, se indican los valores p .

Variable meteorológica	k_{obs}			
	Pre-madurez	valor p	Post-madurez	valor p
Temperatura media del aire	0,81	0,0001	0,87	<0,0001
Temperatura mínima del aire media	0,62	0,0057	0,80	0,0001
Temperatura máxima del aire media	0,86	<0,0001	0,90	<0,0001
Humedad relativa media	-0,45	0,0636	-0,75	0,0004
Velocidad del viento media	0,28	0,2567	-0,46	0,0524
Radiación solar media	0,79	0,0001	0,90	<0,0001
Déficit de presión de vapor medio	0,71	0,0011	0,86	<0,0001
Temperatura media del aire acumulada	-0,19	0,4606	0,55	0,0179
Temperatura mínima del aire acumulada	0,11	0,6764	0,67	0,0024
Temperatura máxima del aire acumulada	0,28	0,2540	0,46	0,0528
Radiación solar acumulada	0,35	0,1496	0,76	0,0002
Precipitaciones acumuladas	-0,19	0,4429	0,05	0,8486

Los resultados de los mejores modelos lineales entre k_{obs} y las variables climáticas meteorológicas seleccionadas desde *silking* hasta la madurez fisiológica y desde madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial se presentan en el Cuadro 5.4. Para los períodos pre- y post-madurez fisiológica, los modelos seleccionados para explicar las variaciones en k_{obs} incluyeron a la radiación solar media (en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y al DPV medio (en kPa) durante el período transcurrido entre el *silking* y la madurez fisiológica y desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha, respectivamente.

k_{pre} y k_{post} se calcularon de la siguiente manera, según los modelos presentados en el Cuadro 5.1:

$$k_{\text{pre}} = -0,038065 + 0,002838 \times \text{Radiación solar media} + 0,023579 \times \text{DPV medio} \quad [5.4]$$

$$k_{\text{post}} = -0,00071 + 0,002038 \times \text{Radiación solar media} + 0,015765 \times \text{DPV medio} \quad [5.5]$$

Cuadro 5.4. Coeficientes de los modelos lineales que explican las variaciones en k_{obs} , incluyendo variables meteorológicas calculadas desde *silking* hasta madurez fisiológica y desde madurez fisiológica hasta alcanzar la humedad de cosecha. DPV es el déficit de presión de vapor y gl indica los grados de libertad de cada modelo. En negrita se indica el mejor modelo para cada período, que incluye al menos dos variables meteorológicas y presenta menor criterio de información de Akaike corregido (AICc).

Período	Modelo	Ordenada al origen	Variable meteorológica					DPV medio (kPa)	gl	Criterio de selección de modelos			
			Temperatura media (°C)	Temperatura mínima media (°C)	Temperatura máxima media (°C)	Radiación solar media (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Humedad relativa media (%)			logLik	AICc	delta	peso
<i>Silking</i> a madurez fisiológica	1	-0,038065				0,002838		0,023579	4	67,00	-122,92	0	0,531
	2	-0,115619			0,005261				3	64,29	-120,86	2,06	0,190
	3	0,01682			-0,003448	0,004436		0,040159	5	67,54	-120,07	2,85	0,128
	4	-0,042123	0,000375			0,002667		0,022564	5	67,03	-119,05	3,87	0,077
	5	-0,09985			0,003952	0,001121			4	65,04	-119,00	3,92	0,075
Madurez fisiológica a humedad de cosecha comercial	1	-0,032029			0,002836				3	67,26	-126,81	0	0,223
	2	-0,002706				0,002811			3	67,05	-126,39	0,43	0,180
	3	-0,00071				0,002038		0,015765	4	67,90	-124,72	2,09	0,078
	4	-0,038574	-0,002981		0,005285				4	67,68	-124,28	2,53	0,063
	5	-0,016246			0,001271	0,001586			4	67,63	-124,19	2,62	0,06
	6	-0,038363		-0,001511	0,003793				4	67,62	-124,17	2,65	0,059
	7	0,020574				0,002502	-0,000255		4	67,58	-124,08	2,73	0,057
	8	-0,022349			0,002094			0,014758	4	67,52	-123,96	2,85	0,054
	9	-0,038035	0,007678	-0,005487					4	67,42	-123,76	3,05	0,049
	10	-0,140486					0,001658	0,095933	4	67,37	-123,66	3,16	0,046
	11	-0,006234	0,000529			0,002397			4	67,35	-123,62	3,20	0,045
	12	-0,007183			0,002541		-0,000238		4	67,31	-123,55	3,27	0,044
	13	-0,00317		0,000166		0,002713			4	67,28	-123,48	3,34	0,042

Posteriormente, k_{obs} , k_{pre} y k_{post} se calcularon para cada ambiente (Año $\times$ Sitio $\times$ Fecha de siembra $\times$ Nitrógeno, Cuadro 5.1) del conjunto de datos de entrenamiento. k_{obs} osciló entre 0,01317 y 0,06725. Los k_{pre} y k_{post} predichos oscilaron entre 0,00541 y 0,05284 y entre 0,01814 y 0,05657, respectivamente. Los k_{pre} y k_{post} predichos se ajustaron correctamente a los valores de k_{obs} ($R^2 = 0,80$, $\text{RMSE} = 0,01$, $\text{RRMSE} = 0,19$ y $R^2 = 0,82$, $\text{RMSE} = 0,01$, $\text{RRMSE} = 0,18$ respectivamente; Fig. 5.1). Al atrasarse la fecha de siembra, los k_{obs} presentaron mayores diferencias (valores menores) respecto a la constante k ($k = 0,062$; Fig. 5.1).

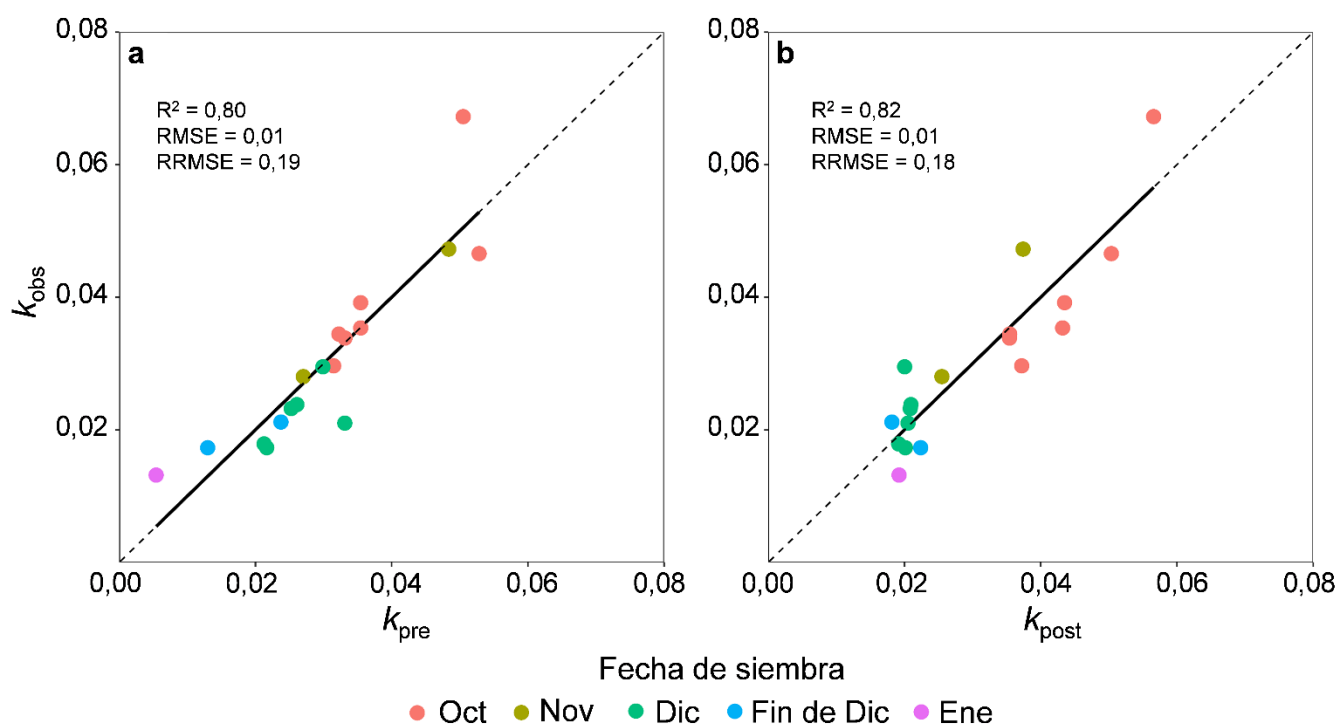


Figura 5.1. Relación entre el coeficiente de secado post-madurez observado k_{obs} (ajustado de forma independiente para cada ambiente) con a) k_{pre} (calculado incluyendo variables meteorológicas desde *silking* hasta madurez fisiológica), y b) k_{post} (calculado con variables meteorológicas desde madurez fisiológica hasta humedad de cosecha). Todos los k se calcularon para cada ambiente del conjunto de datos de entrenamiento. Los colores indican las diferentes fechas de siembra. La línea llena indica el ajuste de regresión cuyas métricas se encuentran en la figura y la línea discontinua indica la relación 1:1.

5.3.2. Evaluación de los modelos de secado de los granos post-madurez

fisiológica

Para el conjunto de datos de evaluación, se ajustaron modelos considerando k constante ($k = 0,062$), k_{pre} y k_{post} para los ambientes de siembra temprana y tardía por separado (Fig. 5.2). Para siembras tempranas, los modelos que consideraron $k = 0,062$, k_{pre} y k_{post} predijeron con precisión la humedad de los granos post-madurez fisiológica ($R^2 = 0.74$, $R^2 = 0.79$ y $R^2 = 0.82$ respectivamente; Figs. 5.2a-c). Los modelos incluyendo k_{pre} y k_{post} permitieron disminuir el RMSE en un 9% y 15% y el RRMSE en un 16% y 21% con respecto al modelo con k constante, respectivamente. Para siembras tardías, los modelos que incluyeron k_{pre} y k_{post} aumentaron la bondad de ajuste en un 15% y un 14%, respectivamente, en relación con el modelo que utiliza un k constante (Figs. 5.2c-e). La inclusión de valores de k variables relacionados con variables meteorológicas redujo tanto el RMSE (de 7,73 considerando k constante a 3,86 y 3,75 incorporando k_{pre} y k_{post} respectivamente) como el RRMSE (de 0,38 considerando k constante a 0,16 y 0,15 incorporando k_{pre} y k_{post} , respectivamente) y aumentó significativamente la eficiencia del modelo de 0,51 a 0,86 y 0,89 (KGE para modelos considerando $k = 0,062$, k_{pre} y k_{post} , respectivamente). El error del modelo cuando se incluyeron k_{pre} y k_{post} , se relacionó principalmente con el porcentaje de falta de precisión (PLP, %) en lugar del porcentaje de falta de exactitud (PLA, %), que representó el mayor porcentaje del error cuando k se mantuvo como un valor constante.

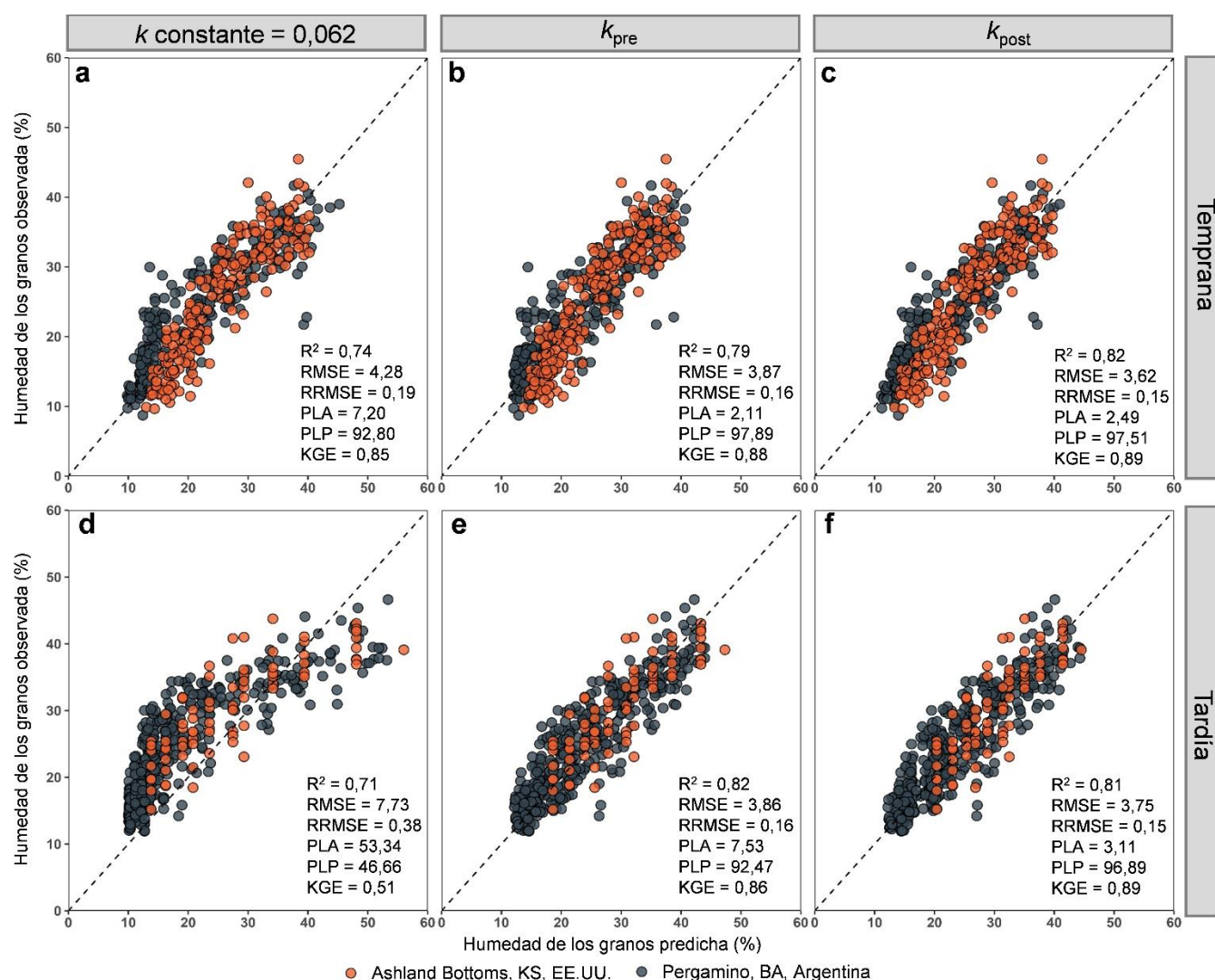


Figura 5.2. Relación entre la humedad de los granos predicha (%) y la humedad de los granos observada (%) ajustando el modelo presentado en la ecuación [5.3] considerando: (a, d) $k = 0,062$, (b, e) k_{pre} calculado incluyendo variables meteorológicas explicativas desde *silking* hasta madurez fisiológica y (c, f) k_{post} calculado incluyendo variables meteorológicas explicativas desde madurez fisiológica a humedad de cosecha comercial para el conjunto de datos de evaluación de fechas de siembra tempranas (a, b, c) y tardías (d, e, f), respectivamente. Los diferentes colores representan los sitios incluidos en el análisis (naranja: Ashland Bottoms, KS, EE. UU.; azul: Pergamino, BA, Argentina). La línea discontinua indica la relación 1:1. Las métricas de las validaciones cruzadas se muestran en cada panel.

Los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica incluyendo k_{pre} (Ec. [5.4]) y k_{post} (Ec. [5.5]), presentaron alta concordancia en la predicción de los días entre la madurez fisiológica y la humedad de cosecha comercial ($R^2 = 0,99$; Fig. 5.3) para fechas de siembras tempranas y tardías. Además, lo que es aún más importante, estos modelos pudieron estimar los días entre madurez fisiológica y humedad de cosecha comercial (14,5%) con un error general inferior al 5% (RRMSE = 0,04 y RRMSE = 0,05 para los modelos que incluyeron k_{pre} y k_{post} , respectivamente), lo que constituye un error de sólo 2,29 ó 3,04 días (para modelos incluyendo k_{pre} y k_{post} respectivamente) entre los valores observados y predichos para los días entre la madurez fisiológica y la humedad de cosecha comercial (Fig. 5.3).

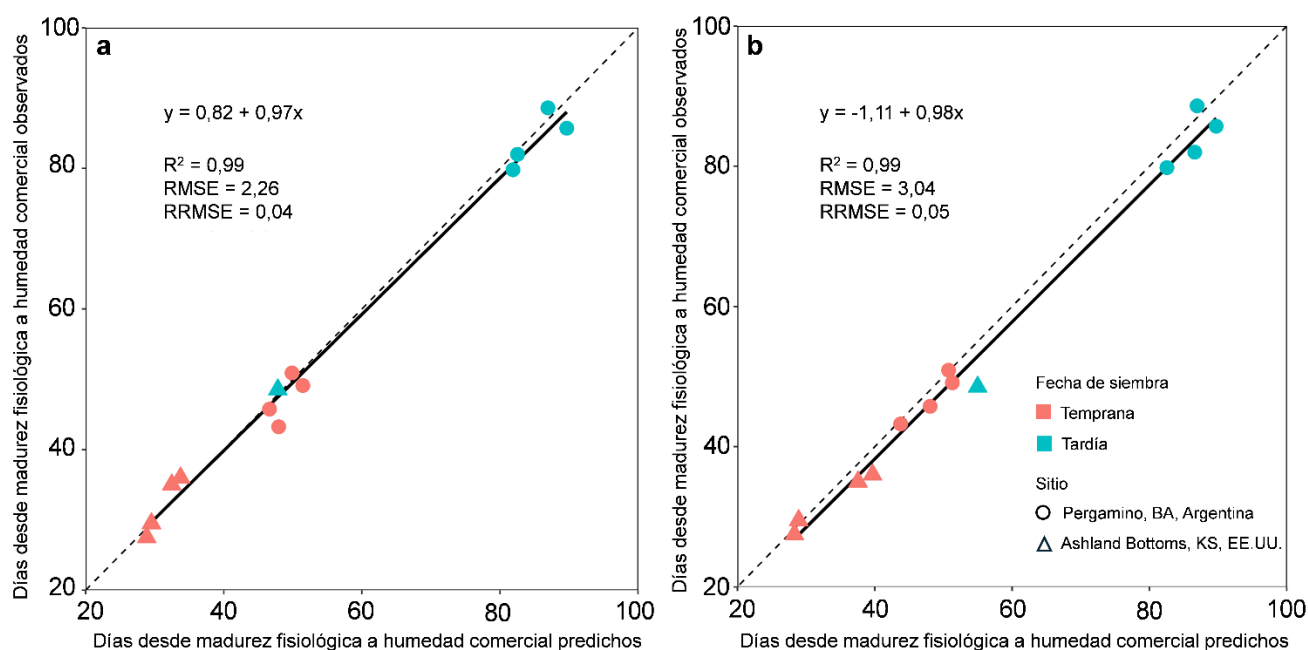


Figura 5.3. Relación entre los días predichos y observados desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial (14,5%), ajustando el modelo presentado en la ecuación [5.3] considerando a) k_{pre} calculado con variables meteorológicas explicativas desde *silking* hasta madurez fisiológica y b) k_{post} calculado con variables meteorológicas explicativas desde madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial para las fechas de siembra tempranas (símbolos color rosa) y tardías (símbolos de color celeste), respectivamente. Las diferentes formas representan los sitios incluidos en el análisis (círculos: Pergamino, BA, Argentina, triángulos: Ashland Bottoms, KS, EE.UU.). La línea discontinua indica la relación 1:1. La ecuación de la recta de regresión (línea llena) y las métricas de las validaciones cruzadas se muestran en el panel.

5.4. Discusión

Este capítulo aporta nueva evidencia sobre los cambios en el secado de los granos atribuidos a la fecha de siembra para el cultivo de maíz, al considerar de manera más precisa las variaciones en el coeficiente k (Maiorano et al., 2014; Martinez-Feria et al., 2019; Gao et al., 2021). Los resultados de este capítulo constituyen una guía para el desarrollo de modelos predictivos para estimar con precisión el tiempo hasta alcanzar la humedad de cosecha comercial utilizando los datos de las condiciones meteorológicas exploradas exclusivamente durante el período de llenado de los granos.

Los estudios previos sobre el secado de los granos se han centrado principalmente en analizar la pérdida de humedad de los granos durante el período de llenado de los granos (Ma y Dwyer, 2001; Borrás y Westgate, 2006; Gambín et al., 2007, Borrás et al., 2009, Alvarez Prado et al., 2013), sin atender el período post-madurez fisiológica (Martínez-Feria et al., 2019; Chazarreta et al., 2021). La temperatura media del aire, el tiempo térmico, la humedad relativa, la radiación solar, la velocidad del viento y las precipitaciones han sido propuestos como factores climáticos clave que gobiernan la tasa de pérdida de humedad de los granos durante el secado post-madurez fisiológica (Hallauer, 1960; Schmidt y Hallauer, 1966; Wellen y Bunn, 1993; Piggot et al., 2010; Wang y Li, 2018), siendo las temperaturas más altas y los menores valores de humedad relativa aceleradores del secado de los granos de maíz (Elmore et al., 2010; Nielsen, 2018; Chazarreta et al., 2021). En el presente capítulo se definieron dos nuevos valores k ajustados (k_{pre} [Ec. 5.4]) y k_{post} [Ec. 5.5] empleando tanto la radiación solar media como el DPV medio como variables meteorológicas clave para predecir el secado de los granos post-madurez fisiológica. La similitud y precisión en la predicción de la humedad de los granos y los días entre madurez fisiológica y humedad de cosecha comercial para los

modelos que incluyen k_{pre} y k_{post} está respaldada por la alta correlación entre la radiación solar ($r = 0,76$) y el DPV ($r = 0,83$) explorados durante los periodos pre y post-madurez fisiológica (Fig. 5.4).

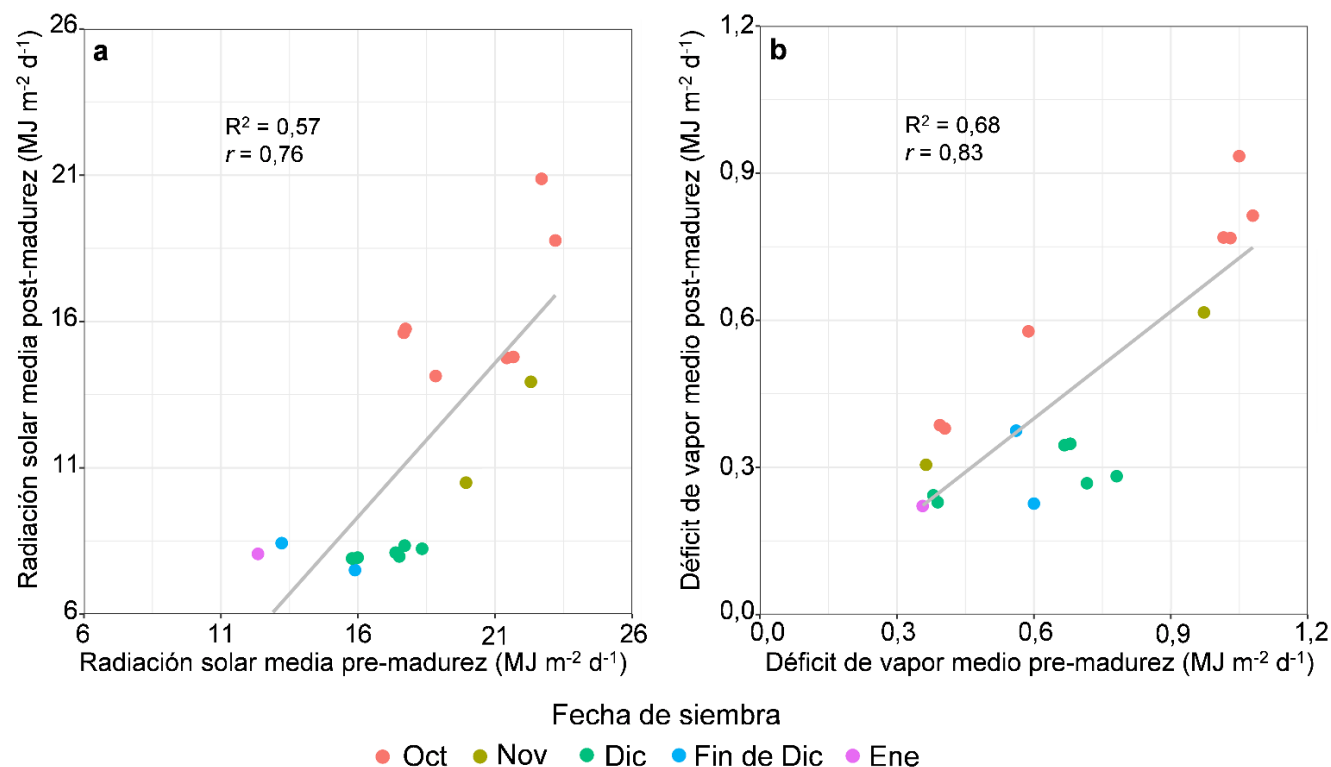


Figura 5.4. Relación entre a) la radiación solar media (en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y b) el déficit de presión de vapor medio (en $\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) pre- y post-madurez fisiológica calculados para cada ambiente del conjunto de datos de entrenamiento. Los colores indican diferentes fechas de siembra. En cada panel se muestran los coeficientes de determinación (R^2) y correlación (r).

La principal ventaja del modelo desarrollado que incluye k_{pre} es la posibilidad de anticipar notablemente la predicción de la fecha de cosecha en función de las condiciones meteorológicas exploradas durante el llenado de los granos. El modelo que incluye k_{pre} (Ec. [5.4]) tuvo un desempeño muy similar respecto del modelo que incluye k_{post} (Ec. [5.5]), basado en información meteorológica post-madurez fisiológica en la predicción de la humedad de los granos (Fig. 5.2) y los días a humedad comercial (Fig. 5.3). La alta precisión del modelo incluyendo variables meteorológicas previas a la madurez fisiológica representa también una ventaja para la inclusión de k_{pre} (Ec. [5.4]) en modelos de simulación de cultivos ampliamente utilizados, como CERES-Maize (Jones y Kiniry,

1986) o APSIM (Holzworth et al., 2014), sin cambios notables en su estructura actual ya que no es necesario incluir datos meteorológicos post-madurez fisiológica.

Los estudios recientes que caracterizan el secado de los granos de maíz post-madurez fisiológica han considerado al k como un valor constante (Maiorano et al., 2014; Martinez-Feria et al., 2019; Gao et al., 2021), logrando predicciones precisas cuando se evalúan genotipos comerciales de maíz cultivados en una ventana estrecha de fechas de siembra. Sin embargo, un estudio reciente que involucra una ventana de siembra más amplia (Chazarreta et al., 2021) y los resultados de este Capítulo resaltan que la humedad de equilibrio (H_e) es insuficiente para representar con precisión las condiciones ambientales en ambientes de fechas de siembra tardías cuando k se considera un valor constante. Si bien los modelos de secado de los granos incluyendo un valor constante de k pueden predecir con precisión la pérdida de humedad de los granos en siembra tempranas (Fig. 5.2a), atrasar la fecha de siembra reduce considerablemente los valores de k (Fig. 5.1a, b), lo que disminuye considerablemente la precisión de los modelos que asumen k como una constante para estimar la pérdida de humedad de los granos (Fig. 5.2d). Este aspecto ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a la creciente adopción de fechas tardías de siembra como práctica de manejo para estabilizar el rendimiento en grano alcanzable en algunas regiones del mundo. Por un lado, las fechas de siembra tardías en ambientes propensos a la sequía tienen como objetivo evitar la escasez de agua alrededor de la floración, así como reducir el uso estacional de agua en los cultivos (Maddonni, 2012; Jiang et al., 2020; Ke y Ma, 2021; Otegui et al., 2021). Por otro lado, el secado de los granos post-madurez fisiológica se convierte en un problema en siembra tardías, donde el secado de los granos ocurre tanto en condiciones con temperatura del aire y radiación solar reducidas y humedad relativa alta (Cuadro A5.1). Estas condiciones climáticas dificultan la pérdida de humedad de los granos (Bonelli et

al., 2016; Chazarreta et al., 2021), lo que destaca la relevancia de los resultados del presente capítulo para estimar el tiempo hasta alcanzar la humedad de cosecha comercial post-madurez fisiológica para estos ambientes.

5.5. Conclusiones

El presente capítulo constituye un avance para mejorar los algoritmos actuales de predicción del secado de los granos de maíz, definiendo un modelo más general para predecir la pérdida de humedad de los granos y el tiempo a humedad de cosecha comercial para una gama amplia de ambientes de fechas de siembra. La inclusión de variables meteorológicas para modelizar el coeficiente de secado post-madurez fisiológica mejoró la predicción de la humedad de los granos, particularmente en ambientes de fechas de siembra tardías, que están aumentando su importancia entre algunos de los principales países productores de maíz, como Brasil, Argentina y China. Los nuevos modelos incluyendo los coeficientes de secado de los granos afectados por variables meteorológicas (k_{pre} y k_{post}) predijeron los días a cosecha con gran precisión (con un error de 2 a 3 días) en una amplia gama de ambientes. Lograr predecir el momento de cosecha con alta precisión utilizando datos climáticos previos a la madurez fisiológica permitiría la inclusión del modelo de secado de los granos propuesto en modelos de simulación de cultivos que ya son ampliamente utilizados sin cambios notables en su estructura actual. Los resultados del presente capítulo proporcionan la base para desarrollar herramientas digitales para estimar el tiempo a cosecha, lo que podría facilitar la logística alrededor de la determinación del momento de cosecha y reducir posibles pérdidas económicas relacionadas con la anticipación o el retraso de la fecha de cosecha óptima.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIA VERDE, MATERIA SECA, VENTANA DE PICADO Y CALIDAD PARA SILAJES DE PLANTA ENTERA DE MAÍZ

6.1. Introducción

A nivel mundial, las principales regiones productoras de maíz para silaje son América del Norte, Europa, la región Asia-Pacífico, América Latina y los países asiáticos de Medio Oriente, siendo dominantes los países de América del Norte con un 40% del mercado. El actual valor del mercado del silaje de maíz fue de US\$ 342 millones en 2022 y se prevé que se incremente hasta US\$ 677 millones para 2032 (Karnatam et al., 2023). En Argentina, la superficie sembrada con maíz para silaje aumentó de manera significativa desde mediados de la década de 1990, como consecuencia de la importante adopción de tecnología que significó la intensificación de los sistemas ganaderos pastoriles y dadas las ventajas que reporta su uso cuando se lo compara con otros forrajes conservados (Carrete y Schneider, 2012). Durante los últimos años, en Argentina, la diversificación de usos y destinos del cultivo se ha visto facilitada por la adopción de la estrategia de fecha de siembra tardía, que permitió elevar la superficie cultivada con maíz hasta los ~10 M ha actuales, de los cuales un ~20% es destinado a silaje (CACF, 2023). En paralelo, la carne bovina también ha manifestado un auge en las exportaciones, con un crecimiento muy por encima del consumo *per cápita* del mercado interno (De Emilio, 2018). Las plantas forrajeras y los cereales son la base de la nutrición de los rumiantes y, dentro de los cereales adoptados para la producción de forrajes, el silaje de maíz es uno de los forrajes conservados más ampliamente usados en la Argentina por la alta producción por hectárea, su buen valor energético y alta palatabilidad (Barrière et al., 2009, Camarasa et al., 2016).

La calidad del maíz para ensilar es analizada comúnmente a través de la cuantificación del porcentaje de materia seca (MS), la digestibilidad de la MS, la fibra detergente neutra (FDN), la fibra detergente ácida (FDA), el contenido de lignina, el porcentaje de proteína y la energía provista por el forraje (Barrière et al., 2009, 2010).

Los valores óptimos de humedad para picar las plantas enteras y confeccionar el silo se encuentran entre el 30-40% de MS, dado que permiten la mayor velocidad y nivel de fermentación (Cone et al., 2007). El momento de picado para silaje de planta entera de maíz, conocido como ventana de picado, es de gran importancia en el sistema de producción de silajes en Argentina. Esta actividad recae en contratistas externos, por lo cual el momento de picado está altamente influenciado por su disponibilidad, la cual a su vez depende fuertemente de las condiciones climáticas. Como consecuencia, normalmente se incurre en pérdidas de calidad por atrasos en el momento óptimo de picado (Bertoia et al., 2010). A pesar de la enorme relevancia de la ventana de picado en el sistema de producción de silajes argentino, este concepto ha sido escasamente documentado (Bertoia et al., 2010; Martinez-Santamaría et al., 2018). En términos productivos, resulta importante que esta ventana de picado presente la mayor duración posible para permitir al productor ensilar el maíz dentro de este período y obtener un silo de mejor calidad. La FDA es una parte de la pared celular formada por celulosa ligada a lignina y compuestos asociados. La FDN es la pared celular total que está compuesta por la fracción de la FDA más la hemicelulosa. La celulosa es el componente principal de la pared celular (Brown et al., 1996). Tiene un grado de polimerización muy alto, determinado por el número de monómeros que componen cada cadena (Brown et al., 1996; Delmer, 1999). Las hemicelulosas son un gran grupo de polisacáridos que se encuentran en la pared celular primaria y secundaria en todas las plantas terrestres y tienen un grado de polimerización mucho menor comparado con el de la celulosa (Xiao et al., 2001). Su naturaleza ramificada hace que la hemicelulosa sea amorfa y relativamente fácil de hidrolizar a sus azúcares constitutivos (Hatfield, 1993). La lignina es un biopolímero aromático que integra la pared celular en todas las plantas vasculares (Xiao et al., 2001) y es el principal compuesto que limita el acceso de las enzimas a los polisacáridos de la

pared celular, reduciendo así la degradabilidad del maíz como forraje (Jung et al., 2000; Torney et al., 2007).

A pesar de que el silaje de maíz consiste en ensilar la planta entera (tallos + hojas + espigas), la mayor parte de los híbridos utilizados para silaje han sido seleccionados únicamente por su producción de grano (Bertoia et al., 2006). Los estudios previos que analizan la producción de MS para silaje de planta entera y su calidad a través de diferentes genotipos, fechas de siembras, condiciones de N y/o densidades (Cox et al., 1994; Crasta et al., 1997; Cusicanqui y Lauer, 1999; Opsi et al., 2013; Camarasa et al., 2015, 2016; Lamprey et al., 2018; Romero et al., 2018) no han atendido a: i) el efecto interactivo de la combinación fecha de siembra $\times$ N sobre la producción de materia verde, MS y su calidad, ii) la determinación del momento óptimo de picado para la confección del silo o iii) la determinación de la calidad de forma independiente de las diferentes fracciones que componen la planta entera (i.e. tallos + hojas, espigas). La influencia de la elección del genotipo, ya sea granífero, doble propósito (genotipos con buen comportamiento tanto para producción de grano como silaje) o silero (incluyendo genotipos BMR), la fecha de siembra y la fertilización nitrogenada sobre la duración de la ventana de picado debe aún ser determinada. Incrementos en la altura de planta y el diámetro de la base del tallo han sido propuestos como atributos que permiten aumentar los rendimientos y la producción de biomasa lignocelulósica (Lorenz et al., 2010). La relación entre las mencionadas variables morfométricas y la producción de materia verde en híbridos con diferente uso final cultivados en ambientes contrastantes de fecha de siembra y fertilización nitrogenada aún no ha sido analizada. Por lo anteriormente expuesto, en el presente capítulo se propone i) evaluar la producción de materia verde, MS, duración de la ventana de picado y calidad de la MS en híbridos de maíz destinados a diferentes usos finales (grano, doble propósito y silaje) cultivados en un ambiente

templado de latitud media bajo distintas fechas de siembra y disponibilidades de N, ii) analizar la relación entre variables morfométricas (altura de planta, diámetro de la base del tallo) y la producción de materia verde para silaje de planta entera, y iii) determinar el orden jerárquico (*ranking*) de los híbridos según su aptitud granífera y silera.

6.2. Materiales y métodos

6.2.1. Mediciones

Los experimentos a campo y las determinaciones de fenología y rendimiento en grano (en kg ha⁻¹) se realizaron según lo detallado en el Capítulo 2 de la presente tesis. Los datos de altura de planta y diámetro de la base del tallo en R2 (15-días post-*silking*) se obtuvieron a partir de las 5 plantas marcadas según lo detallado en el Capítulo 3 de la presente tesis. Los datos correspondientes a los CHST 60 días post-*silking* (en %) se obtuvieron según lo detallado en el Capítulo 4 de la presente tesis.

Comenzando en R2 y finalizando en R6 se realizaron entre 6 y 7 cortes de planta entera de 4 plantas consecutivas (0,44 m²) en cada parcela, con una frecuencia semanal. Las plantas fueron cortadas a una altura de 20 cm desde la superficie del suelo. Las plantas se separaron en dos fracciones: una correspondiente a los tallos y las hojas (en adelante, tallo + hojas) y otra correspondiente a las espigas con sus respectivas chalas (en adelante, espigas). Ambas fracciones fueron inmediatamente pesadas para determinar su peso fresco y luego *chipeadas* y llevadas a estufa a 70°C hasta alcanzar un peso seco constante. Para cada una de las fracciones, los datos correspondientes al peso fresco se utilizaron para calcular la materia verde y los del peso seco para calcular la materia seca. El porcentaje de materia seca para cada fracción se calculó como la proporción de peso seco en relación al peso fresco. El porcentaje de materia seca de planta entera se calculó como

la proporción de peso seco total en relación al peso fresco total (tallo + hojas + espigas). La duración de la ventana de picado se determinó mediante el ajuste de modelos de regresión lineal del porcentaje de materia seca de planta completa en función de los días y el tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) desde *silking* para cada parcela. La ventana de picado óptima para silaje se consideró cuando la materia seca de planta completa se encontró entre el 30 y el 40% (Cone et al., 2007). Posteriormente, se calcularon tanto la materia verde como la materia seca en el momento óptimo para silaje, determinado por la ventana de picado anteriormente calculada, como el promedio de los cortes realizados entre 30-40% de materia seca. La materia verde (en kg ha^{-1}) y la materia seca (en kg ha^{-1}) para cada una de las fracciones y para la planta entera por unidad de superficie se calcularon multiplicando cada variable obtenida por planta por la densidad de plantas y llevando el resultado por m^{-2} a la superficie de una hectárea.

Una submuestra representativa de cada fracción seca fue molida en molino con malla de 1mm. Para determinar las variables de calidad forrajera se utilizó espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) utilizando un NIRS 6500 Foss (Foss NIRS Systems Inc., Silver Spring, MD, EE. UU.), para recolectar los espectros de las muestras molidas en mini platos (100 mm $\times$ 60 milímetros). Las curvas de calibración utilizadas fueron las desarrolladas por el Laboratorio de cereales y forrajes de la FCA-UNLZ (Bertoia y Aulicino, 2014). Para ambas fracciones (tallo + hojas y espigas), se obtuvieron determinaciones de digestibilidad de la materia seca (en %), FDN (en %), FDA (en %), proteína (en %) y energía (Mg kg^{-1} de materia seca). Adicionalmente, para la fracción correspondiente a tallo + hojas también se registró la lignina detergente ácida (LDA, en %). La materia seca digestible de la planta entera (MSD_p), expresada en kg ha^{-1} , se calculó como:

$$\text{MSD}_p = (\text{MS}_e \times \text{DMS}_e) + (\text{MS}_{t+h} \times \text{DMS}_{t+h}) \quad [6.1]$$

donde MS_e corresponde a la MS de las espigas (en $kg\ ha^{-1}$), DMS_e es la digestibilidad de las espigas (en proporción), MS_{t+h} es la materia seca correspondiente a la fracción tallo + hojas y DMS_{t+h} es la digestibilidad de la fracción tallo + hojas (en proporción). La digestibilidad de la planta entera (DMS_p , en %) se calculó como:

$$DMS_p = (MSD_p / MS\ planta\ entera) \times 100 \quad [6.2]$$

donde MSD_p corresponde a la materia digestible de la planta entera (en $kg\ ha^{-1}$) y $MS\ planta\ entera$ es la materia seca total de la planta entera (en $kg\ ha^{-1}$).

6.2.2. Análisis estadísticos

Los datos se analizaron mediante ANVA según lo detallado en el Capítulo 3 de la presente tesis. La relación entre las variables se analizó mediante análisis de regresión. Los análisis de regresión y los gráficos se realizaron utilizando GraphPad Prism versión 9.0.0 (www.graphpad.com). La interacción $A \times N \times H$ sobre las variables de calidad de silo se analizó mediante análisis de componentes principales. Se construyó un biplot donde cada combinación $A \times N \times H$ se representó con un símbolo y los rasgos como vectores desde el origen.

El efecto de la combinación de año $\times$ fecha de siembra $\times$ nitrógeno sobre la aptitud granífera y silera de cada híbrido se estimó a través del análisis de estabilidad y adaptabilidad de Finlay y Wilkinson (1963). Para ello, para cada rasgo de interés (rendimiento, materia verde, y DMS_p) se ajustó la regresión lineal de los valores correspondientes a cada híbrido en cada ambiente respecto al índice ambiental ($IA =$ valor promedio de todos los híbridos en cada ambiente), representando la pendiente (coeficiente b) de dicha relación al índice de adaptabilidad. La estabilidad o predictibilidad de cada híbrido para cada variable de interés se infirió a partir del cociente entre el cuadrado

medio del error (CME) de la regresión correspondiente y el valor medio de la variable ($\bar{y}$) para cada híbrido, y se expresó en forma porcentual según la ecuación 6.3:

$$\text{Estabilidad (\%)} = \left(1 - \frac{\sqrt{\text{CME}}}{\bar{y}}\right) \times 100 \quad [6.3]$$

Finalmente, para cada variable, el comportamiento general de los genotipos también se definió graficando la relación entre el índice de adaptabilidad y el valor promedio de la variable.

6.3. Resultados

6.3.1. Producción de materia verde, materia seca y ventana de picado

La altura de planta en R2 osciló entre 183 y 266 cm y difirió significativamente entre FS y H (Cuadro 6.1). Las plantas fueron significativamente más altas en las siembras tardías (8,5 y 17,9% en 2019 y 2020 respectivamente) y en los híbridos para doble propósito (5,8 y 5,9% en 2019 y 2020 respectivamente) respecto de los graníferos y sileros, que no difirieron entre sí en su altura. El diámetro de la base del tallo en R2 osciló entre 23,11 y 31,75 mm y difirió significativamente a través de las FS ($p < 0,05$) en 2019, combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,05$) en 2020 y entre H ambos años. En 2019, el diámetro de la base del tallo en R2 fue mayor en las FS tardías respecto de las tempranas (3,4%), mientras que, en 2020, la condición N250 incrementó en 9,4% el diámetro de la base del tallo en R2 en la siembra temprana respecto de la N0. Los híbridos sileros presentaron el mayor diámetro de la base del tallo en R2, seguidos por los doble propósito y finalmente los graníferos, con los menores valores (Cuadro 6.1).

La materia verde de planta entera osciló entre 60113 y 111244 kg ha⁻¹ y difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,05$) en 2020 y H en ambos años (Cuadro 6.1). En 2020, la materia verde de planta entera fue 24,4% mayor en la condición

N250 en la siembra temprana respecto de la condición N0, sin diferencias entre niveles de N en la siembra tardía. Los híbridos sileros y doble propósito presentaron una acumulación de materia verde mayor respecto de los graníferos (5,5 y 8,9% en 2019 y 2020 respectivamente). Respecto de las fracciones que componen la materia verde de planta completa, la fracción de tallo + hojas representó entre 35906 y 72563 kg ha⁻¹ y difirió significativamente entre FS ($p < 0,001$) y niveles de N ($p < 0,001$) en 2020 y entre H ambos años. En 2020, la siembra tardía acumuló un 36,4% superior de materia verde en su fracción tallo + hojas respecto de la temprana y la condición N250 incrementó en 13,3% la materia verde de tallo + hojas. Los híbridos sileros y doble propósito acumularon una mayor cantidad de materia verde en su fracción tallo + hojas respecto de los graníferos (11,2 y 12,1% para 2019 y 2020, respectivamente; Cuadro 6.1). La fracción correspondiente a las espigas representó entre 23565 y 38681 kg ha⁻¹ y difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N y H ambos años. La adición del fertilizante nitrogenado incrementó la materia verde de espigas en las siembras tempranas (19,5 y 27,5% en 2019 y 2020 respectivamente), sin efecto en siembras tardías. La materia verde de espigas fue superior para los híbridos de doble propósito respecto de los graníferos y sileros, que no difirieron entre sí (7,9 y 11,2% para 2019 y 2020 respectivamente). La materia verde de planta entera presentó una relación lineal significativa tanto con la altura de planta ($p < 0,0001$; Fig. 6.2a) como con el diámetro de la base del tallo ($p < 0,0001$; Fig. 6.2b) medidos en R2.

La materia seca de planta entera osciló entre 20144 y 31167 kg ha⁻¹ y difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N en 2020 ($p < 0,01$; Cuadro 6.1), donde la condición N250 incrementó en 26,3% la materia seca de planta entera en la siembra temprana sin efectos en la tardía. Respecto de las fracciones que componen la materia seca de planta entera, la fracción tallo + hojas representó entre 9175 y 13519 kg ha⁻¹ y

difirió significativamente entre niveles de N ($p < 0,05$) en 2020 y tipos de híbridos ambos años. En 2020, la condición N250 incrementó en 7,7% la materia seca de la fracción tallo + hojas respecto de la N0. Los híbridos doble propósito y sileros presentaron una acumulación superior de materia seca de tallo + hojas respecto de los graníferos (8,2 y 6,2% en 2019 y 2020 respectivamente). La fracción correspondiente a la materia seca de espigas osciló entre 10206 y 17647 kg ha⁻¹ y difirió significativamente entre combinaciones FS × N ambos años. La adición del fertilizante nitrogenado incrementó significativamente la materia seca de las espigas en las siembras tempranas (35,1 y 40,5% en 2019 y 2020 respectivamente), sin efectos en siembras tardías.

El inicio de la ventana de picado (i.e. 30% de materia seca de planta entera) ocurrió antes en las siembras tempranas (30 y 36 días post-*silking* en 2019 y 2020 respectivamente) en comparación con las siembras tardías (43 y 44 días post-*silking* en 2019 y 2020, respectivamente; Fig. 6.1). De manera similar, el final de la ventana de picado (i.e. 40% de materia seca de planta entera) también ocurrió antes en las siembras tempranas (42 y 51 días post-*silking* en 2019 y 2020 respectivamente) en comparación con las siembras tardías (61 y 73 días post-*silking* en 2019 y 2020 respectivamente; Fig. 6.1). La ventana de picado se extendió entre 11 y 26 días, y difirió significativamente entre combinaciones FS × N y FS × H ambos años (Cuadro 6.1; Fig. 6.1). La ventana de picado presentó una duración mayor en la condición N0 respecto de la N250 en siembras tempranas (15,2 y 13,5% en 2019 y 2020 respectivamente), sin diferencias entre niveles de N en siembras tardías. Los híbridos doble propósito y silaje presentaron una ventana de picado más extensa respecto de los graníferos en siembras tardías, sin diferencias entre H en siembras tempranas (15,0 y 14,5% en 2019 y 2020 respectivamente; Cuadro 6.1). La duración de la ventana de picado presentó una relación lineal significativa tanto con

la altura de planta ($p < 0,0001$; Fig. 6.2c) como con el diámetro de la base del tallo ($p < 0,05$; Fig. 6.2d) medidos en R2.

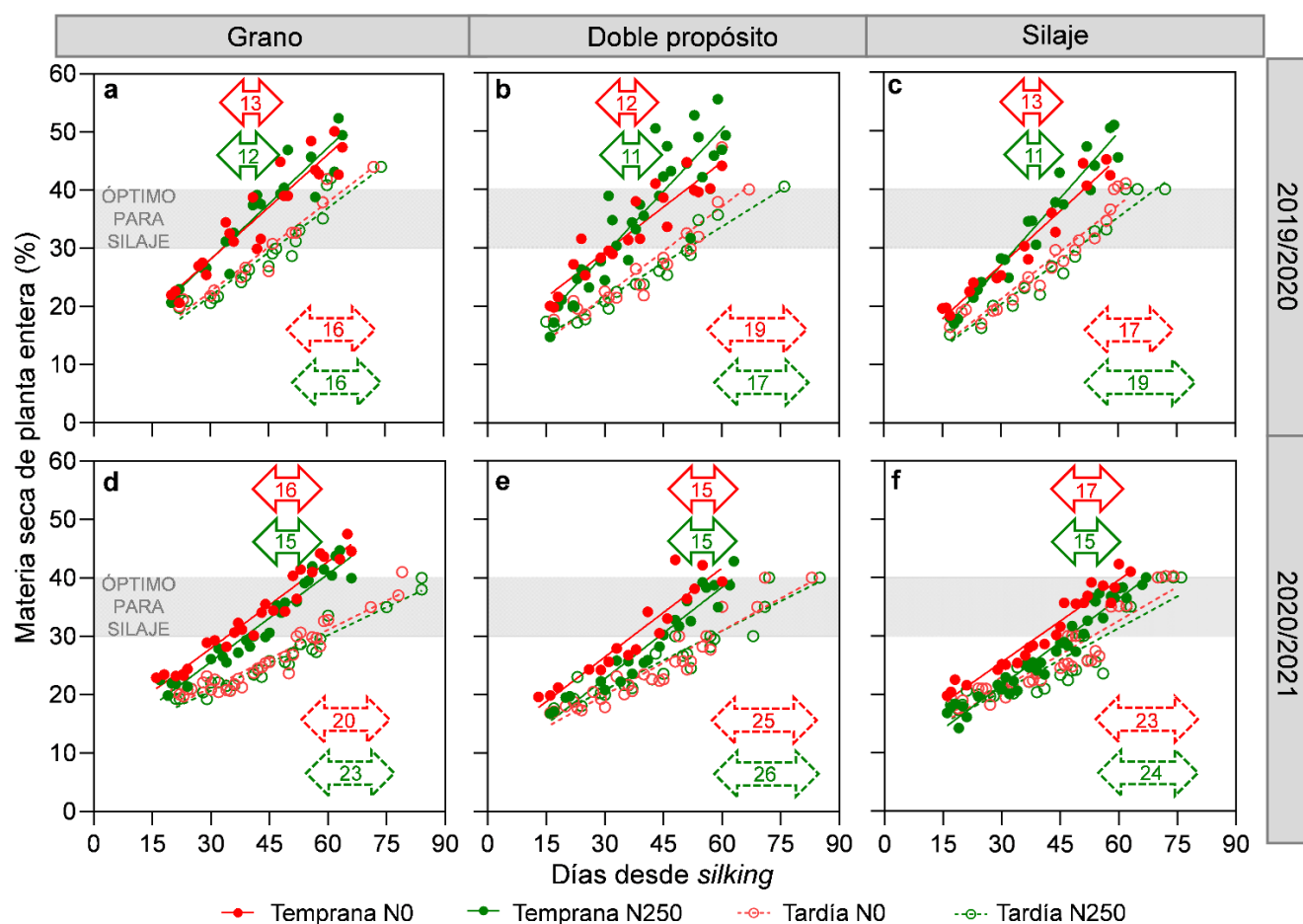


Figura 6.1. Evolución del porcentaje (%) de materia seca de planta entera en función de los días desde *silking* (R1) de híbridos para grano (a, d), doble propósito (b, e) y silaje (c, f) cultivados en dos campañas (2019/2020, paneles a, b y c; 2020/2021, paneles d, e y f en dos fechas de siembra (temprana: símbolos llenos y línea continua; tardía: símbolos vacíos y línea punteada), bajo dos niveles de nitrógeno (N0: sin fertilización nitrogenada, en rojo; N250: fertilizado con 250 kg N ha⁻¹, en verde).

Cuadro 6.1. Medias correspondientes a la altura de planta y diámetro de la base del tallo en R2 (15 días post-*silking*), materia verde y materia seca de planta entera y de las fracciones tallo + hojas y espigas y duración de la ventana de picado para los experimentos realizados durante dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados de ANVA se muestran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Altura de planta (cm)	Diámetro de la base del tallo (mm)	Materia verde total (kg ha ⁻¹)	Materia seca total (kg ha ⁻¹)	Tallo + hojas		Espigas		Ventana de picado (días)
								Materia verde (kg ha ⁻¹)	Materia seca (kg ha ⁻¹)	Materia verde (kg ha ⁻¹)	Materia seca (kg ha ⁻¹)	
2019	Temprana	N0	Grano	185	23,65	60113	20144	35906	9939	24206	10206	13
			Doble propósito	205	25,25	63098	22010	38219	10403	24878	11607	13
			Silaje	194	26,75	62235	21304	38671	10616	23565	10688	12
		N250	Grano	183	24,58	66297	23340	37829	9175	28469	14165	12
			Doble propósito	198	25,16	73578	26114	42838	9877	30741	16237	11
			Silaje	196	26,85	72306	23978	44696	10488	27610	13491	11
	Tardía	N0	Grano	205	23,44	67473	23082	41290	10133	26183	12950	16
			Doble propósito	217	24,56	72344	23320	44019	10554	28325	12765	17
			Silaje	206	26,53	69492	22918	44400	10546	25092	12372	19
		N250	Grano	208	23,11	69767	23151	42798	9891	26969	13260	16
			Doble propósito	219	23,80	74250	24246	46284	10731	27966	13515	19
			Silaje	207	25,72	69213	22178	44000	9960	25213	12217	17
2020	Temprana	N0	Grano	203	23,62	64144	21988	40757	10508	23388	11480	16
			Doble propósito	212	23,45	65834	23010	42156	11956	23678	11054	17
			Silaje	213	26,24	71650	25169	46660	12171	24990	12998	17
		N250	Grano	214	25,53	79911	28049	50211	12085	29700	15964	15
			Doble propósito	228	25,79	87913	31167	54691	13519	33222	17647	15
			Silaje	218	28,90	83088	29429	54129	13119	28958	16310	15
	Tardía	N0	Grano	243	27,40	90288	27188	57588	11410	32700	15778	20
			Doble propósito	266	28,09	101363	26917	65663	11949	35700	14969	23
			Silaje	246	30,51	98463	25894	66963	12144	31500	13750	25
		N250	Grano	250	27,80	95906	27836	61944	12025	33963	15811	23
			Doble propósito	266	28,94	111244	29666	72563	13080	38681	16586	24
			Silaje	247	31,75	99988	26078	69100	11702	30888	14376	26

Año 2019									
FS ^a	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***
N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	**
FS × N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	**
H	***	***	*	ns	**	*	*	ns	*
FS × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año 2020									
FS	***	***	***	ns	***	ns	***	**	***
N	ns	***	**	**	***	**	**	***	ns
FS × N	ns	*	*	**	ns	ns	*	**	*
H	**	***	***	ns	***	**	**	ns	***
FS × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FS × N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

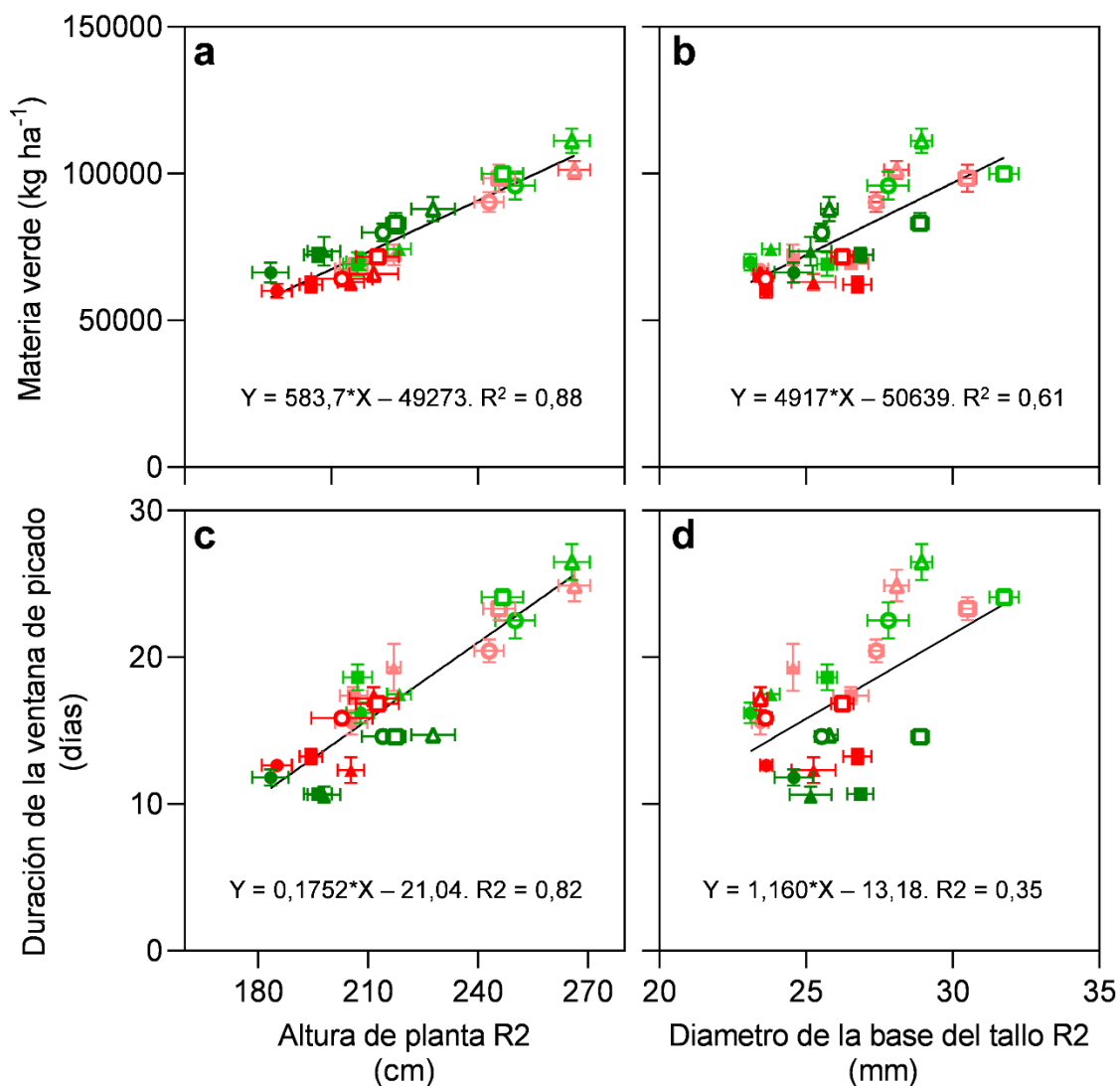


Figura 6.2. Relación entre la materia verde y a) la altura de planta en R2, y b) el diámetro de la base del tallo en R2 y la duración de la ventana de picado y c) la altura de planta en R2, y d) el diámetro de la base del tallo en R2. Los círculos representan al tipo de híbrido para grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha^{-1} , en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos), en dos fechas de siembra (temprana: símbolos de color oscuro, tardía: símbolos de color claro) en una densidad única de 9 plantas m^{-2} . Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

6.3.2. Calidad de la materia seca para silaje de planta entera

La digestibilidad de la materia seca de planta entera (DMS_p) osciló entre 59,8 y 66,1% y difirió significativamente entre FS ($p < 0,05$) en 2020 y entre H ambos años (Cuadro 6.2). En 2020, la DMS_p fue 6,4% mayor en la siembra temprana respecto de la tardía, sin diferencias entre fechas de siembra en 2019. La DMS_p fue levemente mayor en los híbridos para silaje respecto de los híbridos para doble propósito y grano, que no difirieron entre sí (Cuadro 6.2). Respecto de la digestibilidad de las fracciones que componen la planta, la digestibilidad de la materia seca de la fracción tallo + hojas varió entre 33,1 y 46,5% y difirió significativamente entre FS y H (Cuadro 6.2). La DMS_{t+h} fue mayor en siembras tempranas respecto a las tardías (7,2 y 23,5% para 2019 y 2020, respectivamente). Los híbridos sileros presentaron los mayores valores de DMS_{t+h} , seguidos por los de doble propósito y finalmente los graníferos, con los menores valores (Cuadro 6.2). Respecto de la fracción correspondiente a las espigas, su digestibilidad fue mayor a la de la fracción tallo + hojas, oscilando entre 79,7 y 84,5% y difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N ($p < 0,05$) y H ($p < 0,001$) en 2019 y entre FS ($p < 0,05$) en 2020 (Cuadro 6.2). En 2019, la fertilización nitrogenada incrementó en 9,6% la DMS_e en la siembra temprana, sin efecto en la siembra tardía. Los híbridos graníferos presentaron la mayor DMS_e , seguidos por los sileros y finalmente los doble propósito, con los menores valores (Cuadro 6.2). En 2020, la DMS_e fue 2,0% superior en la siembra temprana respecto de la tardía.

La materia seca digestible de planta entera (MSD_p) osciló entre 12453 y 20480 kg ha^{-1} y difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N en 2020 ($p < 0,05$) y entre H ambos años ($p < 0,05$; Cuadro 6.2). Tal como ocurrió con la MS de planta entera, la condición N250 incrementó en 31,1% la MSD_p en la siembra temprana, sin efecto en la

tardía. Respecto de los híbridos, las diferencias en MS de planta entera y DMS_p registradas dieron como resultado diferencias en la MSD_p , que fue levemente mayor para los híbridos de doble propósito y silaje respecto de los graníferos (5,8 y 4,5% para 2019 y 2020 respectivamente).

Para la fracción tallo + hojas, la FDN osciló entre 61,0 y 70,4% difirió entre FS ($p < 0,01$) en 2020 y H en ambos años (Cuadro 6.2). El porcentaje de FDN fue mayor en la siembra tardía de 2020 en relación a la temprana (10,4%), sin diferencias entre fechas de siembra en 2019. Los híbridos para grano presentaron un porcentaje de FDN superior respecto de los híbridos para doble propósito y silaje, que no difirieron entre sí (3,5 y 1,7% para 2019 y 2020 respectivamente). El porcentaje de FDA varió entre 35,8 y 47,2% y difirió entre FS ambos años y entre H en 2019 ($p < 0,05$). El porcentaje de FDA fue mayor en las siembras tardías respecto de las tempranas (6,9 y 21,6% en 2019 y 2020 respectivamente) y 3,8% mayor en los híbridos para grano respecto de los de doble propósito y sileros en 2019. El porcentaje de LDA se encontró entre 4,8 y 6,6% y difirió entre FS en 2020 ($p < 0,01$) y entre H en ambos años. En 2020, la LDA fue mayor en la siembra tardía respecto de la temprana (15,4%) sin diferencias entre FS en 2019. Los híbridos para silaje presentaron un porcentaje de LDA en tallo + hojas menor respecto de los híbridos para grano y doble propósito (Cuadro 6.2). El porcentaje de proteína en la fracción tallo + hojas osciló entre 6,0 y 7,9% y difirió a través de las combinaciones FS $\times$ N y entre H en ambos años. El porcentaje de proteína en tallo + hojas fue superior en la condición N250 respecto de la N0 en siembras tempranas (21,5 y 25,8% para 2019 y 2020, respectivamente), sin observarse diferencias entre niveles de N en siembras tardías. Los híbridos graníferos presentaron valores superiores de proteína en su fracción tallo + hojas respecto de los doble propósito y sileros (6,4 y 7,7% en 2019 y 2020, respectivamente). Los valores de energía de la fracción tallo + hojas se encontraron entre

4,21 y 4,34 Mg kg MS⁻¹ y difirieron entre combinaciones FS × N para ambos años. La energía de tallo + hojas fue mayor en la condición N250 respecto de la N0 en siembras tempranas (2,6 y 1,4% para 2019 y 2020, respectivamente) sin diferencias entre tratamientos de N en siembras tardías.

Para la fracción correspondiente a las espigas, la FDN osciló entre 27,0 y 34,2% y difirió entre tipos de híbridos (Cuadro 6.2). Los híbridos para doble propósito presentaron los mayores valores de FDN respecto de los híbridos graníferos y sileros, los cuales no difirieron entre sí (14,0 y 10,4% para 2019 y 2020, respectivamente). El porcentaje de FDA varió entre 11,2 y 15,1% y difirió entre FS y H. Las siembras tempranas presentaron mayores niveles de FDA respecto de las tardías (4,5 y 5,5% en 2019 y 2020 respectivamente). El orden de los híbridos según su porcentaje de FDA de espigas fue doble propósito > silaje > grano. El porcentaje de proteína en las espigas osciló entre 6,0 y 8,4% y difirió significativamente a través de las combinaciones FS × N y H ambos años (Cuadro 6.2). La adición del fertilizante nitrogenado incrementó el porcentaje de proteína en espigas en las siembras tempranas (25,2 y 18,8% en 2019 y 2020 respectivamente) sin efecto en siembras tardías. Los híbridos para silaje presentaron los mayores valores de proteína en sus espigas respecto de los doble propósito y graníferos, que no difirieron entre sí (7,9 y 3,4% en 2019 y 2020, respectivamente). La energía de la fracción de espigas se encontró entre 4,24 y 4,29 Mg kg MS⁻¹ y difirió significativamente entre FS y tipos de híbridos. La energía de las espigas fue levemente mayor en las siembras tardías respecto de las tempranas (0,7% ambos años) y los híbridos para grano presentaron valores levemente mayores de energía de espigas, seguidos por los doble propósito y sileros, que no difirieron entre sí.

Cuadro 6.2. Medias correspondientes a digestibilidad de la materia seca (MS) de planta entera, MS digestible de planta entera, digestibilidad de la materia seca, fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), proteína y energía de tallo + hojas y espigas, y lignina detergente ácida de la fracción tallo + hojas para los experimentos realizados durante dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados de ANVA se muestran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Planta entera		Tallo + hojas						Espigas				
				Digestibilidad de la MS (%)	MS digestible (kg ha ⁻¹)	Digestibilidad de la MS (%)	FDN (%)	FDA (%)	LDA (%)	Proteína (%)	Energía (Mg/kg MS ⁻¹)	Digestibilidad de la MS (%)	FDN (%)	FDA (%)	Proteína (%)	Energía (Mg/kg MS ⁻¹)
2019	Temprana	N0	Grano	61,8	12453	39,7	67,4	39,7	6,4	6,6	4,21	83,8	27,8	12,0	6,2	4,26
			Doble propósito	62,0	14054	40,5	67,1	39,9	6,1	6,0	4,21	82,0	33,4	14,9	6,0	4,24
			Silaje	63,0	13737	43,3	65,2	38,0	5,5	6,1	4,22	82,4	29,6	13,1	6,5	4,25
		N250	Grano	64,9	15143	41,2	66,5	38,2	6,3	8,1	4,32	80,6	28,8	12,4	7,7	4,25
			Doble propósito	63,3	16535	42,5	64,6	37,6	6,2	7,7	4,32	78,8	34,2	15,1	7,5	4,24
			Silaje	65,1	15612	43,2	65,4	38,6	6,0	6,9	4,34	80,0	30,8	13,3	7,9	4,25
	Tardía	N0	Grano	62,8	14022	36,6	68,4	42,1	6,5	6,7	4,23	83,8	29,3	12,0	7,1	4,29
			Doble propósito	62,5	14961	40,1	66,2	40,1	6,2	6,8	4,27	80,9	33,1	14,3	7,4	4,27
			Silaje	63,2	14480	41,3	65,7	40,1	5,7	6,7	4,28	82,4	29,8	12,1	8,0	4,28
		N250	Grano	61,9	13869	34,7	70,1	44,1	6,6	6,9	4,24	82,8	29,5	12,1	7,4	4,29
			Doble propósito	62,2	15083	40,3	65,7	40,0	6,3	6,8	4,29	80,7	33,7	14,5	7,6	4,26
			Silaje	62,3	13823	40,4	66,5	41,6	5,6	6,3	4,28	81,2	30,0	12,1	8,5	4,28
2020	Temprana	N0	Grano	64,6	14198	43,6	64,0	37,1	5,4	6,2	4,22	84,0	27,0	11,4	6,7	4,26
			Doble propósito	62,9	14476	44,7	62,4	36,7	5,3	5,8	4,21	83,1	32,6	12,3	6,4	4,24
			Silaje	65,9	16589	45,4	63,0	37,1	4,8	5,7	4,23	84,5	27,0	11,9	6,4	4,25
		N250	Grano	64,8	18173	42,1	63,7	38,0	5,9	7,3	4,26	81,5	27,4	11,2	7,8	4,26
			Doble propósito	65,7	20480	44,2	62,0	36,6	5,4	7,4	4,28	82,1	30,8	12,5	7,3	4,24
			Silaje	66,1	19444	46,5	61,0	35,8	4,9	7,5	4,30	81,5	28,6	11,9	8,0	4,25
	Tardía	N0	Grano	61,8	16615	34,3	69,9	44,5	6,6	7,5	4,24	81,2	27,8	11,6	7,6	4,29
			Doble propósito	59,8	16529	33,1	70,4	47,2	6,5	6,2	4,22	81,2	30,0	14,3	7,5	4,27
			Silaje	61,7	15964	38,2	68,6	44,2	5,3	6,6	4,25	80,7	29,1	11,8	8,1	4,28
		N250	Grano	60,6	16877	35,9	68,9	43,3	6,4	7,9	4,27	80,0	27,8	11,7	8,3	4,29
			Doble propósito	61,9	18354	38,1	67,5	41,4	6,3	7,6	4,28	79,7	30,2	13,5	8,2	4,27
			Silaje	60,8	15863	37,5	69,0	44,7	5,5	6,8	4,26	80,0	29,3	12,2	8,4	4,28

Año 2019														
FS ^a	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	*	
N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	**	ns	
FS × N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*	ns	ns	**	ns	
H	ns	*	***	***	*	***	*	ns	***	***	***	***	***	
FS × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
FS × N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Año 2020														
FS	*	ns	***	**	**	**	ns	ns	*	ns	*	**	*	
N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	
FS × N	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	*	ns	
H	ns	*	***	ns	ns	***	***	ns	ns	***	***	**	***	
FS × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
FS × N × H	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

Las relaciones entre los diferentes atributos de calidad y tratamientos se evaluaron mediante análisis de componentes principales. El análisis involucró la DMS_p , la DMS_{t+h} , la DMS_e , la FDN de tallo + hojas y la FDN de espigas, las principales variables que afectan la calidad del silaje. También se incluyeron las variables climáticas temperatura media durante los períodos VE-R2 ($T_{media_{VE-R2}}$) y R2-R6 ($T_{media_{R2-R6}}$). Los dos primeros componentes representaron el 82,0% de la variación observada, con el 61,5% para el CP1 y el 21,5% restante para el CP2 (Fig. 6.3). Los coeficientes de correlación entre las variables y sus probabilidades asociadas se muestran en los Cuadros A6.1 y A6.2, respectivamente.

La variación correspondiente a las variables meteorológicas registradas quedó abarcada principalmente por el CP1, que distinguió entre valores mayores de T_{media} durante el período VE-R2 hacia valores positivos del eje x y valores de T_{media} altos durante el período R2-R6 hacia valores negativos del eje x . Concomitantemente, el CP1 distinguió entre valores altos tanto de DMS_p como de DMS_{t+h} hacia valores negativos del eje x y valores altos de FDN de tallos + hojas hacia valores positivos del eje x . El CP2 distinguió principalmente entre valores altos de FDN de espigas hacia valores positivos del eje y , y valores altos de DMS_e hacia valores negativos de éste.

Las $T_{media_{VE-R2}}$ y la $T_{media_{R2-R6}}$ presentaron una asociación negativa muy fuerte ($r = -0,95$; $p < 0,0001$). La DMS_p estuvo positivamente asociada (vectores en ángulo agudo) con la DMS_{t+h} ($r = 0,83$; $p < 0,0001$) y la $T_{media_{R2-R6}}$ ($r = 0,72$; $p < 0,0001$) y negativamente asociada con la FDN de tallos + hojas ($r = -0,84$; $p < 0,0001$) y la $T_{media_{VE-R2}}$ ($r = -0,76$; $p < 0,0001$). De igual modo, la DMS_{t+h} estuvo positivamente asociada con la $T_{media_{R2-R6}}$ ($r = 0,72$; $p < 0,0001$) y negativamente asociada con la FDN de tallos + hojas ($r = -0,96$; $p < 0,0001$) y la $T_{media_{VE-R2}}$ ($r = -0,80$; $p < 0,0001$). A su vez, la DMS_e se relacionó negativamente con la FDN de espigas ($r = -0,45$; $p < 0,05$).

Las temperaturas contrastantes entre VE-R2 y R2-R6 previamente descriptas diferenciaron a las fechas de siembra evaluadas, con las siembras tardías con mayores valores de temperatura durante el período VE-R2 hacia la derecha y las siembras tempranas con mayores temperaturas durante R2-R6 hacia la izquierda. Las diferencias entre los híbridos se vieron mayoritariamente desplegadas en la CP2, donde los híbridos graníferos tendieron a ubicarse hacia valores negativos del eje, con valores mayores de DMS_e , mientras que los híbridos doble propósito y sileros tendieron a posicionarse hacia valores positivos del eje y .

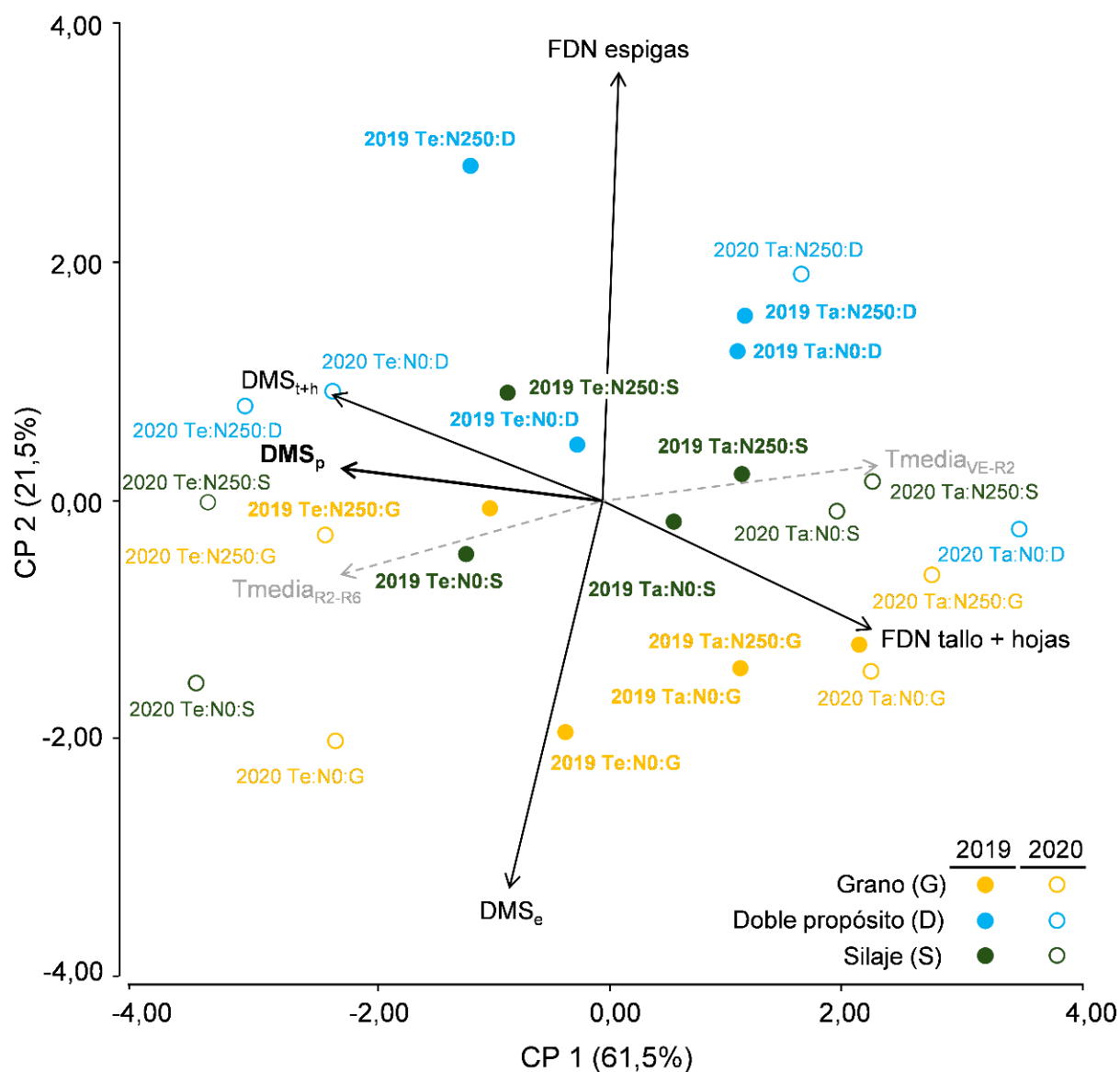


Figura 6.3. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) para ocho híbridos de maíz agrupados en tres tipos (grano en naranja, doble propósito en celeste y silaje en verde) cultivados en diferentes combinaciones de años (2019: símbolos cerrados con etiquetas en negrita; 2020: símbolos abiertos con etiquetas regulares), fechas de siembra (Te: temprana y Ta: tardía) y niveles de N (N0: sin N agregado; N250: 250 kg N ha⁻¹). Los rasgos evaluados representados mediante vectores sólidos negros corresponden a digestibilidad de la materia seca de planta entera (DMS_p), digestibilidad de la materia seca de tallo + hojas (DMS_{t+h}), digestibilidad de la materia seca de espigas (DMS_e), fibra detergente neutra (FDN) de tallo + hojas y FDN de espigas. Los vectores grises discontinuos representan la temperatura media (Tmedia) para los períodos VE-R2 y R2-R6.

6.3.3. Aptitud granífera y silera

El rango de índice ambiental explorado para el rendimiento en grano se encontró entre 9713 y 14134 kg ha⁻¹ (Fig. 6.4a). El rendimiento en grano promedio fue de 11525 kg ha⁻¹. Los híbridos graníferos presentaron i) rendimientos en grano superiores a la media ambiental a través de todas las combinaciones A × N exploradas (Fig. 6.4a), y ii) una buena adaptabilidad (DK 72-10 VT3P > SYN 840 VIP3 > Next 22.6 PWU > 1). Para el rango de ambientes evaluado, en cambio, los híbridos sileros presentaron i) un rendimiento en grano siempre inferior al de los híbridos graníferos (Fig. 6.4.a) y ii) valores menores de adaptabilidad (excepto el EXP 1517 *bm3* RR2). Consecuentemente, la relación entre estas variables (Fig. 6.5a) ubicó claramente a los tres híbridos graníferos en el cuadrante superior derecho y a dos de los tres sileros en el cuadrante inferior izquierdo, mientras los híbridos doble propósito se ubicaron muy cercanos al cruce entre el índice ambiental medio (11525 kg ha⁻¹) y una adaptabilidad de $b=1$. La estabilidad o predictibilidad fue aceptable para todos los genotipos (> 88,5%) y no mostró un patrón asociado al tipo de híbrido. Entre los graníferos, por ejemplo, la predictibilidad fue alta para el híbrido DK 72-10 VT3P (segundo híbrido más estable con un valor de 96,33%) y comparativamente menor para el NEXT 22.6 PWU (tercer híbrido más inestable con un valor de 91,69%). Entre los híbridos sileros, el grupo incluyó para esta variable al más

estable (el LG30850 RR2 con 98,02%) y también al menos estable (el EXP 1517 *bm3* RR2 con 88,48%) de los ocho evaluados, mientras que los doble propósito tuvieron una estabilidad intermedia para el rango evaluado (90,96-94,13%).

El rango de índice ambiental explorado para la materia verde se encontró entre 61655 y 101271 kg ha⁻¹ (Fig. 6.4b). La materia verde promedio fue de 77504 kg ha⁻¹. Respecto de los híbridos, lo más notable fue i) el muy bajo valor que para esta variable presentó el híbrido granífero SYN 840 VIP3, claramente inferior a todos los demás evaluados, que comparativamente fueron mucho más similares entre si (Figs. 6.4b y 6.5b), y ii) la mayor variabilidad intra grupo de los graníferos, que ocuparon tres de los cuatro cuadrantes de la relación adaptabilidad-valor medio respecto a dos cuadrantes entre los sileros y sólo uno entre los doble propósito (Fig. 6.5b). Los doble propósito, además, constituyeron el grupo con mayor rendimiento en materia verde y adaptabilidad, mientras los sileros formaron el grupo más cercano al cruce entre el IA promedio y $b=1$. Cabe destacar i) el buen comportamiento que para esta variable tuvo el híbrido granífero NEXT 22.6 PWU, con una producción de materia verde que en promedio superó a la de los híbridos sileros, y ii) la gran predictibilidad que presentaron todos los híbridos para esta variable, que tuvo en el híbrido EXP 1517 *bm3* RR2 al menos estable (94,45%) y en el híbrido NEXT 22.6 PWU al más estable (96,03%).

Por último, el rango de índice ambiental explorado para DMS_p se encontró entre 60,9 y 65,5% (Fig. 6.4c), siendo la DMS_p promedio de 63,0%. Una particularidad de esta variable respecto a las anteriores fue la tendencia negativa en la relación entre adaptabilidad y valor medio de la variable (Fig. 6.5c). En este sentido se pudo distinguir i) al híbrido para silaje EXP 1517 *bm3* RR2, que presentó la máxima DMS_p media y una baja adaptabilidad, combinación que además lo ubicó por encima del promedio ambiental y de la mayoría de los valores registrados para todos los demás híbridos evaluados a través

de todas las combinaciones $A \times N$ (Fig. 6.4c), ii) la comparativamente baja DMS_p de los otros dos híbridos sileros y del doble propósito KM 4360 AS-GL Stack, que a su vez mostraron una comparativamente alta adaptabilidad para este rasgo (b : 1,116-1.461), y iii) el rango estrecho de DMS_p que presentó el grupo de híbridos graníferos, aunque con una fuerte variación en la adaptabilidad entre ellos (b : 0.734-1.336). Al igual que para la materia verde, la DMS_p mostró un alto valor de estabilidad o predictibilidad (97,03-98,80%).

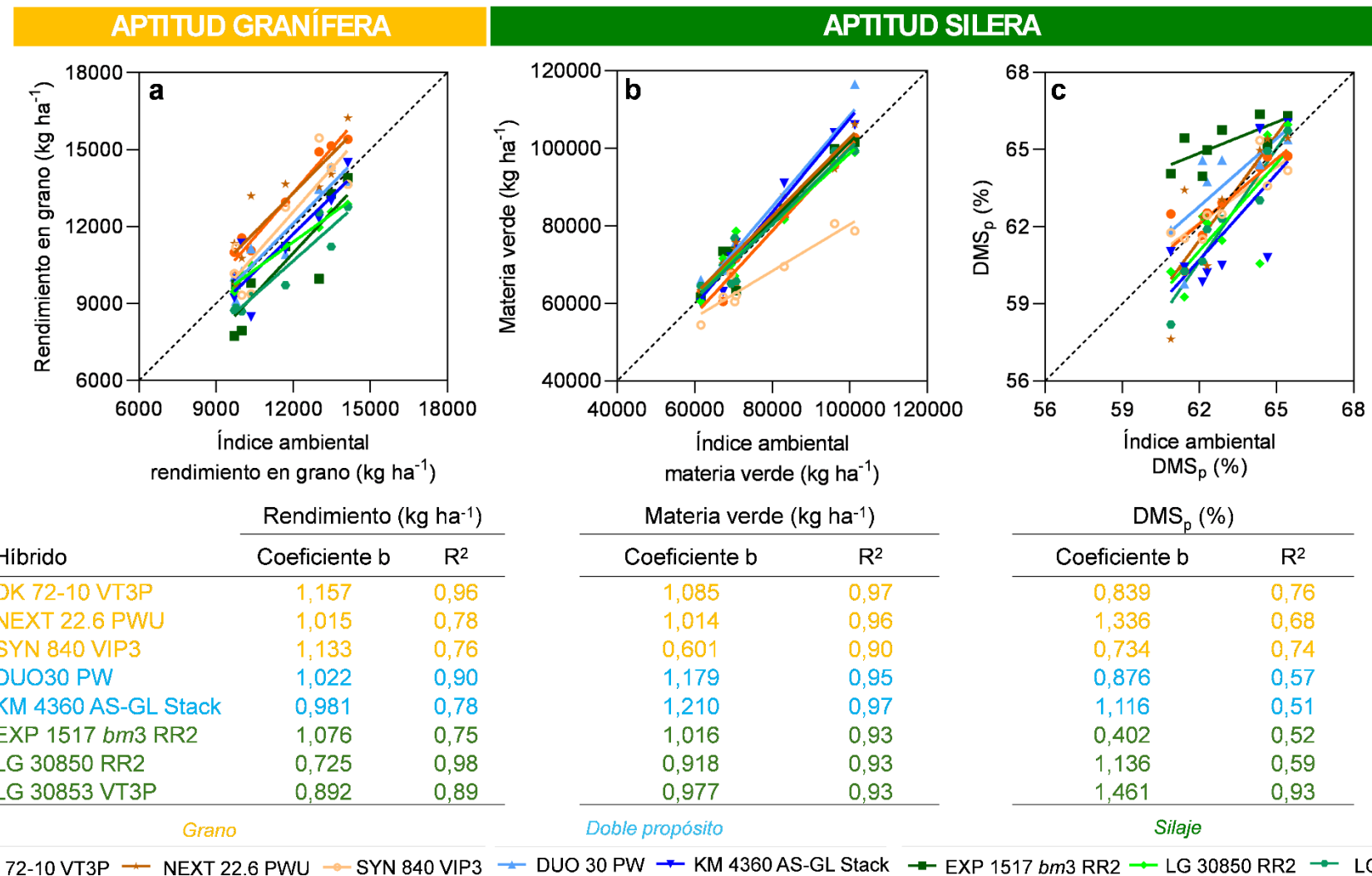


Figura 6.4. Respuesta en función del índice ambiental del a) rendimiento en grano, b) la materia verde y c) la digestibilidad de la materia seca de planta entera (DMS_p) para 8 híbridos de maíz de diferente uso final (grano, doble propósito, silaje), cultivados en cuatro ambientes (combinación de dos campañas agrícolas y dos fechas de siembra) y dos condiciones de fertilización nitrogenada (8 combinaciones año × FS × N). Los cuadros en la sección inferior indican el coeficiente b y el R² del ajuste de regresión lineal para cada uno de los híbridos.

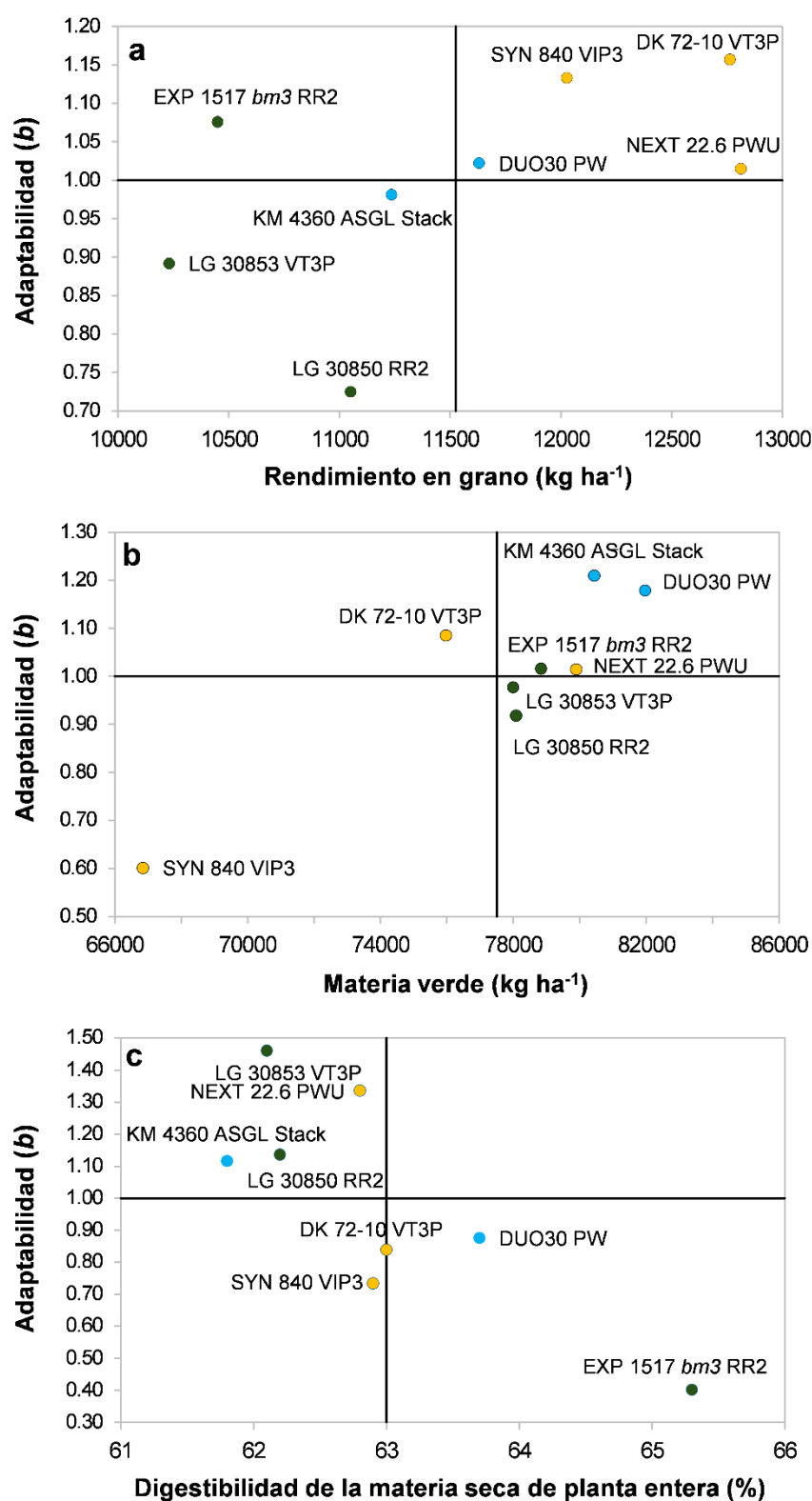


Figura 6.5. Relación entre adaptabilidad (b) y rendimiento medio de cada híbrido a través de ambientes para a) el rendimiento en grano, b) la materia verde, y c) la digestibilidad de la materia seca de planta entera. Los datos corresponden a los ocho híbridos evaluados (graníferos en naranja, doble propósito en celeste y sileros en verde). Las líneas llenas representan el índice ambiental medio de cada variable (vertical) y un índice de adaptabilidad de $b = 1$ (horizontal).

6.4. Discusión

El presente capítulo integra la producción de materia verde y materia seca para silaje de planta entera, la duración de la ventana de picado y la calidad para silaje evaluada en dos fracciones que componen la planta de maíz para híbridos con diferente uso final cultivados en condiciones contrastantes de fecha de siembra y fertilización nitrogenada. Los resultados del presente capítulo son de gran relevancia en el contexto actual de producción del cultivo de maíz en Argentina, donde históricamente se ha atendido principalmente a la producción de híbridos para grano bajo fechas de siembra temprana (Otegui et al., 2021). A pesar de que el silaje de maíz requiere de la planta entera (tallo + hojas + espigas), los híbridos que comúnmente se han utilizado para este fin han sido mejorados únicamente según su desempeño para producir grano (Bertoia et al., 2006).

Los ambientes contrastantes generados a través de la combinación de fechas de siembra y niveles de N dentro de cada año permitieron la detección de diferentes respuestas de crecimiento del cultivo y calidad de la MS para silaje de planta entera. En siembras tardías, las plantas presentaron mayor altura y diámetro de la base del tallo en R2 (Cuadro 6.1) en relación con las siembras tempranas, lo que permitió obtener mayor producción de materia verde durante la ventana de picado (Fig. 6.2). Tanto la altura de planta como el diámetro de la base del tallo son atributos que han sido propuestos previamente para aumentar la producción de biomasa lignocelulósica (Lorenz et al., 2010) y la materia seca final (Pedersen et al., 2020). La adición del fertilizante nitrogenado aumentó la materia verde y la materia seca de planta entera y la de sus fracciones constitutivas (tallo + hojas y espigas) particularmente en siembras tempranas, sin efectos en siembras tardías (Cuadro 6.1). La falta de respuesta a la fertilización nitrogenada en siembras tardías puede asociarse a las mayores temperaturas tanto del período de

barbecho como de la etapa previa a la floración respecto de las siembras tempranas (Fig. 2.2), lo que favorece la mineralización de la materia orgánica (Bruun et al., 2006; Caviglia et al., 2014; Coyos et al., 2018; Maltese et al., 2020). En consecuencia, las siembras tardías comenzaron el ciclo de cultivo con una alta disponibilidad de N en el suelo (N-NO_3^- , Capítulo 2). Los híbridos para doble propósito y silaje presentaron la mayor producción de materia verde y materia seca, debido a la mayor producción de materia verde y, consecuentemente, de MS en su fracción tallo + hojas, sin grandes diferencias ni en la materia verde ni en la MS de la fracción de espigas (Cuadro 6.1). La mayor producción de materia verde en los híbridos doble propósito y sileros se logró mediante estrategias diferentes. Mientras que los híbridos doble propósito lograron altos niveles de materia verde a través de una mayor altura de planta (Fig. 6.2a), los sileros presentaron el mayor diámetro de la base del tallo (Fig. 6.2b).

Respecto de la ventana de picado, las mayores diferencias en su duración se dieron entre fechas de siembra. La ventana de picado comenzó y terminó antes en siembras tempranas, dando como resultado una menor duración respecto de las siembras tardías (Cuadro 6.1; Fig. 6.1). Esta tendencia en siembras tardías se vio favorecida por las menores temperaturas del período R2-R6, pero no fue la única causa ya que se mantuvo cuando el análisis se realizó en función del tiempo térmico (Cuadro A6.3.). Dado que los registros de temperaturas mínimas fueron truncados en 8 °C (Capítulo 4), la constancia en tendencia observada en tiempo térmico no podría atribuirse a un sesgo provocado por temperaturas mínimas por debajo de la temperatura base (Ritchie y NeSmith, 1991). Tampoco se debería al hecho de considerar una temperatura base incorrecta para la etapa ($T_b = 0^\circ\text{C}$ para R2-R6, Muchow, 1990), pues si ésta fuera $T_b > 0^\circ\text{C}$ provocaría un acortamiento proporcionalmente mayor en el tiempo térmico de siembras tardías que de tempranas. Eliminadas estas posibles explicaciones, queda considerar diferencias entre la

temperatura del aire utilizada para la estimación y la temperatura real del órgano de interés. Este aspecto ha recibido atención como factor importante para las etapas tempranas del cultivo (Ritchie y NeSmith, 1991; Stone et al., 1999) pero mucho menos para la etapa de formación del grano, en que arbitrariamente se suele utilizar una $T_b = 0^\circ\text{C}$ para muchas especies (Otero et al., 2021). En ese sentido, es probable que la temperatura en abrigo meteorológico no sea un buen indicador de la temperatura de la espiga (Rattalino y Otegui, 2012) y esto haya tenido un impacto diferencial tanto en el cálculo del TT entre fechas de siembra como para la interacción FS $\times$ Híbrido, considerando que las diferentes alturas de plantas afectan la “rugosidad” del canopeo y con ello la dinámica térmica del mismo (Loomis y Connor, 1992). En este sentido, los híbridos doble propósito y sileros presentaron ventanas de picado ligeramente más largas (en días, Cuadro 6.1) respecto de los híbridos para grano, pues mayores alturas de planta y/o diámetros de la base del tallo (Fig. 6.2) favorecieron su extensión. En resumen, los efectos del ambiente aéreo sobre la extensión diferencial del llenado de los granos entre fechas de siembra y fenotipos de plantas contrastantes requieren de una evaluación más detallada para ser concluyentes respecto a la/s causa/s.

Respecto de la calidad de la MS para silaje, las siembras tardías tendieron a presentar menor DMS_p , dada por una menor DMS_{t+h} , el componente con mayor influencia sobre la DMS_p (Fig. 6.3) a iguales valores de DMS_e (Cuadro 6.2). La mayor DMS_{t+h} en siembras tempranas respecto de las tardías estuvo estrechamente relacionada con la temperatura, tanto previa a R2 como durante el llenado de los granos (Fig. 6.3). Altas temperaturas desde el estadio V7-V8 hasta R2, como las observadas en siembras tardías en la presente tesis, incrementan la deposición de pared celular y reducen la digestibilidad (Struik et al., 1985; Andrieu et al., 1993). La menor digestibilidad observada a altas temperaturas es resultado de la combinación del incremento en la lignificación de la pared

celular y el aumento de la actividad metabólica de la planta (Van Soest, 1994). Por el contrario, temperaturas más altas durante el período de llenado de los granos, como las observadas en siembras tempranas, favorecen un rápido llenado de los mismos que mejora la relación CHST/pared celular por mayor contenido de CHST (Fig. 6.5a) y, consecuentemente se incrementa la digestibilidad de la fracción tallo + hojas (Fig. 6.5b). La fertilización nitrogenada no tuvo efectos significativos ni sobre la DMS_p ni la DMS_{t+h} , pero incrementó la DMS_e y el porcentaje de proteína tanto en la fracción tallo + hojas como en las espigas en siembras tempranas (Cuadro 6.2). Los incrementos en el porcentaje de proteína son coincidentes con los reportados en estudios previos (Breteler, 1976; Zhang et al., 2020).

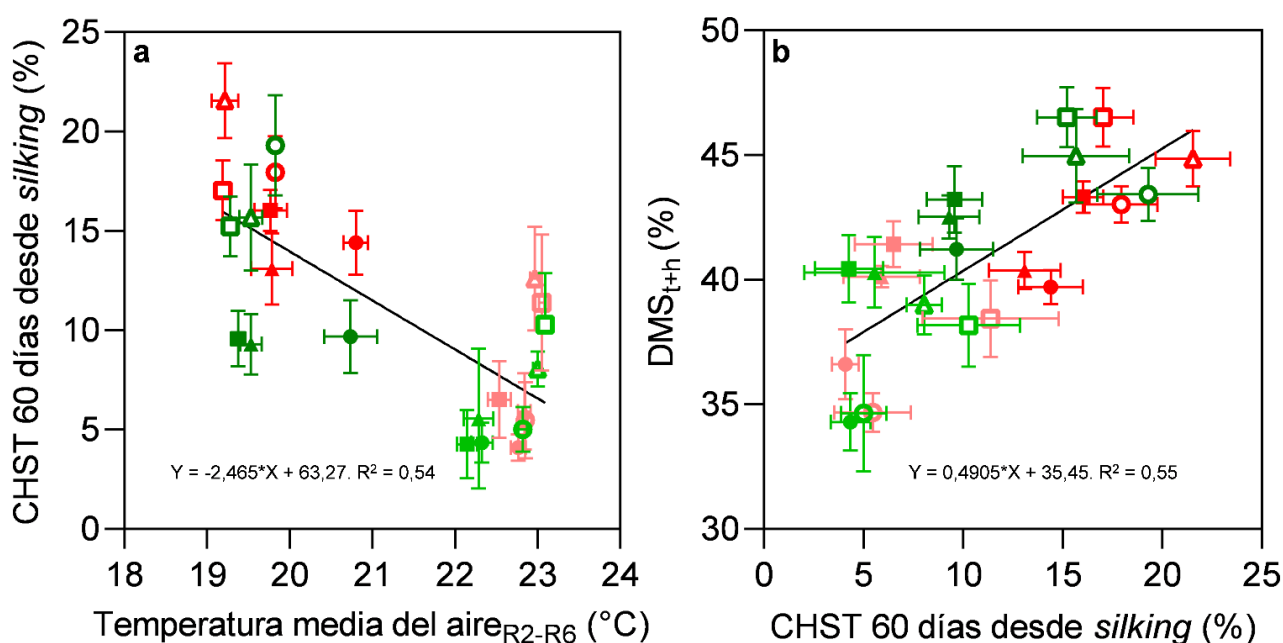


Figura 6.6. Relación entre a) la temperatura media del aire durante el período de llenado efectivo de los granos (R2-R6) y el porcentaje de carbohidratos solubles en tallo (CHST) a los 60 días desde *silking*, y b) el porcentaje de CHST a los 60 días desde *silking* y la digestibilidad de la materia seca de la fracción tallo + hojas (DMS_{t+h}). Los círculos representan al tipo de híbrido de grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos), en dos fechas de siembra (temprana: símbolos de color oscuro, tardía: símbolos de color claro). Las barras en cada símbolo indican el error estándar de la media (EE).

Si bien los híbridos para silaje presentaron una mayor DMS_p al ser evaluados en conjunto (Fig. 6.3), existió para este rasgo una gran variabilidad genotípica al ser analizados individualmente (Figs. 6.4c y 6.5c). La DMS_p fue máxima para el EXP 1517 *bm3* RR2 y el doble propósito DUO30 PW, pero mínima para los otros dos del grupo silero y el doble propósito KM 4360 AS-GL Stack, indicando una gran variabilidad genotípica en la DMS_p entre híbridos del mismo tipo, y la alta DMS_p del híbrido doble propósito DUO30 PW, como fue reportado anteriormente (Camarasa et al., 2019). Al igual que en el presente trabajo, se ha reportado que la concentración de lignina es menor en tallos y hojas de genotipos BMR respecto de genotipos isogénicos no BMR (Fritz et al., 1990), lo que finalmente conduce a la mayor digestibilidad de la fracción tallo + hojas (Cherney et al., 1991). La reducción en la concentración de lignina de los genotipos BMR se atribuye a la capacidad alterada de ciertas enzimas de la vía biosintética de la lignina (Halpin et al., 1998; Bout y Vermeris, 2003). Los cambios químicos en la composición de la lignina también conducen a una mayor accesibilidad a la fibra por parte de las enzimas digestoras (Fritz et al., 1990). Cuando se excluye del análisis al híbrido EXP 1517 *bm3* RR2, la DMS_p se iguala a la de los híbridos doble propósito, aunque los híbridos para silaje continúan manteniendo valores más altos de DMS_{t+h} y más bajos de LDA de la fracción tallo + hojas (Cuadro A6.4).

A pesar de que los híbridos graníferos mostraron el mayor rendimiento en grano a través de todas las combinaciones año $\times$ FS $\times$ N evaluadas y buena adaptabilidad (Figs. 6.4a y 6.5a), solo uno de los 3 híbridos graníferos evaluados presentó mayor producción de materia verde respecto de los híbridos sileros y exploraron un rango muy estrecho de DMS_p . El cambio de *ranking* de los genotipos verificado según se analice el rendimiento en grano, la producción de materia verde o la DMS_p demuestra la relevancia de seleccionar al híbrido en función del ambiente y el destino final del cultivo, ya que el

mejor híbrido para grano no resultó el mejor híbrido para silaje de planta entera (Bertoia et al., 2006). Los resultados del presente capítulo subrayan la significancia del componente tallo + hojas en la producción de silaje, una fracción de la planta que ha recibido menos atención en investigación, que se ha focalizado principalmente en las espigas y la producción de granos (Bertoia y Aulicino, 2014, Karnatam et al., 2023), con el consecuente aumento de la lignificación de los tallos para aumentar la resistencia al vuelco/quebrado de plantas (Pinheiro, 1984; Naharudin et al., 2021).

6.5. Conclusiones

Los diferentes destinos finales del cultivo imponen requerimientos ambientales y fenotípicos contrastantes. En siembras tempranas, las plantas presentaron menores alturas y/o diámetros de la base del tallo, promoviendo la menor producción de materia verde y una menor duración de la ventana de picado. Sin embargo, en estas fechas de siembra se obtuvo la mayor digestibilidad de la materia seca de planta entera, dada por la mayor digestibilidad de la MS de la fracción tallo + hojas, producto del mayor porcentaje de CHST. En siembras tardías, las plantas presentaron mayores alturas y/o diámetros de la base del tallo, lo que propició mayor producción de materia verde y duración de la ventana de picado, pero la materia seca para silaje presentó menor calidad, debido a una reducción importante de la digestibilidad de la MS de la fracción tallo + hojas. La adición del fertilizante nitrogenado tuvo poco impacto sobre la calidad del silaje, pero aumentó considerablemente los porcentajes de proteína en la MS en siembras tempranas. En relación a los diferentes híbridos, se destacó la alta DMS_p del híbrido BMR. Sin embargo, las respuestas para la producción de materia verde y DMS_p presentaron gran variabilidad entre híbridos del mismo grupo, demostrando la importancia de la elección del ambiente y el híbrido según el destino final del cultivo.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES GENERALES

7.1. Introducción

Durante los últimos años, la producción del cultivo de maíz en Argentina experimentó grandes transformaciones a nivel productivo. La superficie dedicada al cultivo se incrementó considerablemente, promediando $9,8 \text{ M ha}^{-1}$ durante las últimas cinco campañas agrícolas (MAGYP, 2023; Fig. 7.1a), un valor muy por encima de las $3\text{--}4 \text{ M ha}^{-1}$ que se sembraron en Argentina entre 1970 y 2010 (Fig. 7.1a). Esta importante expansión del área se dio particularmente hacia regiones anteriormente consideradas como “marginales” para el cultivo (e.g. oeste y el sudoeste de la Pampa Ondulada) y se relaciona principalmente con la posibilidad de diferir la fecha de siembra (Otegui et al. 2021).

Los beneficios de retrasar la fecha de siembra fueron evaluados dentro de la región húmedo-templada de Argentina poco después del lanzamiento del maíz Bt (Otegui *et al.* 2002). Sin embargo, la adopción de las siembras tardías no tuvo lugar hasta después de las campañas 2007/2008 y 2008/2009 en donde dos sequías consecutivas causadas por condiciones climáticas correspondientes a la fase *La Niña* del fenómeno ENOS más razones financieras (precios relativos de granos y retenciones diferenciales) empujaron a replantearse el paradigma y se consideró la adopción de siembras tardías como una forma de evitar la ocurrencia de déficits hídricos alrededor de la floración por parte de los productores (Otegui et al., 2021). La superficie de maíz en siembra tardía más el maíz de segunda (i.e. sobre un cultivo invernal antecesor como cebada, trigo o arveja) aumentó desde prácticamente cero hacia 2008 hasta promediar $\sim 50\%$ de la superficie total destinada a maíz en Argentina durante las últimas 5 campañas agrícolas de forma sostenida (Bolsa de Cereales 2022; Fig. 7.1b).

El desplazamiento de la zona productiva de maíz hacia zonas periféricas a la Región Pampeana, producto de la posibilidad de diferir la fecha de siembra, promovió la diversificación de usos y destinos del cultivo. Debido a que estas nuevas regiones exploradas por el cultivo se encuentran a grandes distancias de los puertos, lo que conlleva un costo de flete que imposibilita la exportación como grano, se incrementó el consumo ‘en chacra’ (i.e. alimentación animal, e.g. uso forrajero o silaje) del maíz y/o la instalación de plantas para su procesamiento industrial en regiones lejanas a los puertos. A pesar de los cambios productivos descritos, la mayor parte de las investigaciones previas se han focalizado principalmente en siembras tempranas con destino a grano y los principales programas de mejoramiento han estado localizados en la tradicional zona maicera del centro de la región templada ($\sim 32^{\circ}50'$ – 35° S y 59° – 63° E) donde la opción de fecha de siembra predominante sigue siendo la temprana (Otegui et al., 2021).

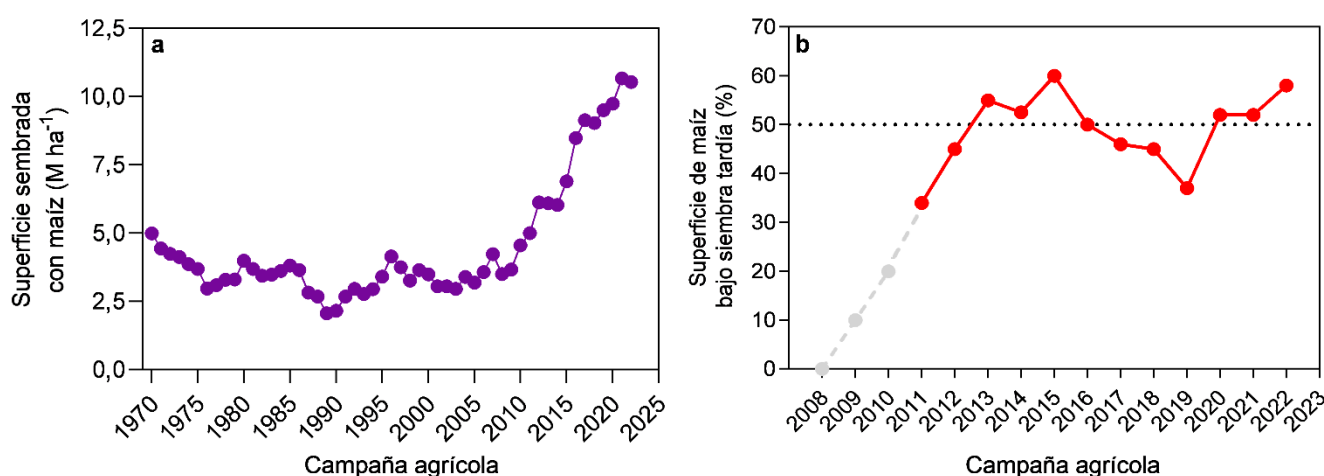


Figura 7.1. Evolución de la superficie de maíz sembrada en Argentina a) para el período 1970-2022 (<https://datos.magyp.gob.ar/>) y b) bajo siembra tardía (%) entre 2008 y 2022 (adaptado de Otegui et al., 2021).

Por lo anteriormente expuesto, se identificó una brecha en el conocimiento que se consideró necesario investigar. En la presente tesis se propuso como objetivo general analizar los factores que controlan la determinación de la biomasa final, el rendimiento en grano y las dinámicas de llenado y secado de los granos de maíz (*Zea mays* L.) en un conjunto de híbridos comercializados para diferentes usos finales (graníferos, doble

propósito y sileros) y adaptados a la zona núcleo Pampeana (i.e., norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe) al ser cultivados bajo condiciones contrastantes de crecimiento generadas a través de diferentes años, fechas de siembra y niveles de fertilización nitrogenada. Además, también se evaluó la producción de materia verde y materia seca y la determinación de su calidad para la generación de silajes de planta entera.

La tesis se estructuró en cuatro capítulos de resultados, cada uno de ellos atendiendo a los diferentes objetivos específicos. En la siguiente sección se exponen los aportes al conocimiento y se contrastan las hipótesis que guiaron los cuatro capítulos de resultados que conforman la tesis, describiendo los hallazgos principales que se desprenden de los resultados obtenidos. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas. Finalmente, se discuten las limitaciones y las implicancias para investigaciones futuras derivadas de la tesis.

7.2. Integración de los resultados y contraste de hipótesis

A lo largo de la tesis se abordaron cuatro objetivos específicos que guiaron los cuatro capítulos de presentación de resultados que la componen.

En el Capítulo 3, se abordó el desarrollo del primer objetivo específico que se planteó “*Caracterizar los determinantes fisiológicos del rendimiento en grano y la biomasa total de híbridos graníferos, doble propósito y sileros al ser cultivados en un amplio rango de ambientes generado mediante la combinación de años, fechas de siembra y niveles de N. Evaluar asociaciones entre variables ecofisiológicas (e.g. eficiencias de intercepción de luz y de conversión) y ambientales (e.g. oferta de radiación solar, régimen térmico)*”. En principio, los híbridos fueron clasificados en su correspondiente tipo de acuerdo con criterios ecofisiológicos, independientemente de la

clasificación brindada por la compañía semillera (Fig. 2.1). Esto permitió determinar que, aunque el híbrido KW 4360 AS-GL Stack se comercializa con objetivo silero, en la presente tesis mostró un comportamiento de doble propósito al ser evaluado en ambientes contrastantes, lo que sugiere que podría utilizarse tanto para silaje como para la producción de grano. Los análisis multivariados (tanto el análisis de conglomerados como el de componentes principales) mostraron que los híbridos doble propósito presentaron un comportamiento más “*silero*” que “*granífero*” a través de todas las condiciones evaluadas (Figs. 2.1, 3.2 y 3.3). La interacción entre la fecha de siembra y el nivel de N fue significativa tanto para el rendimiento en grano como sus determinantes fisiológicos (biomasa total aérea e índice de cosecha) y sus componentes numéricos (peso y número de granos; Cuadro 3.3). Las siembras tempranas presentaron rendimientos de grano significativamente mayores bajo N250 que en N0. Por el contrario, los niveles de N no difirieron entre sí en siembras tardías. Esta tendencia se repitió para los determinantes fisiológicos y los componentes numéricos del rendimiento. Los diferentes tipos de híbridos presentaron diferencias en su rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos y sus componentes numéricos independientemente del ambiente y el nivel de N considerado (Cuadro 3.3).

Respecto de la construcción del rendimiento en grano, se analizó una serie de rasgos tanto a nivel de planta individual como de cultivo, que se integran en la Fig. 7.2. La captura de la radiación y su posterior conversión en biomasa fueron evaluadas para tres subperiodos: VE-V14, V4-R2 y R2-R6. La RFAi acumulada fue significativamente menor para los híbridos de grano respecto de los híbridos doble propósito y sileros entre VE-V14 y V14-R2, sin diferencias entre tipos de híbridos durante R2-R6. La mayor RFAi acumulada fue producto de mayor i) $fRFAi$ para los híbridos doble propósito y sileros durante VE-V14 y V14-R2 respecto de los graníferos, y ii) duración del período

prefloración en los híbridos doble propósito y sileros respecto de los graníferos (Cuadro 2.1) que dio como resultado una mayor duración de ciclo para los primeros respecto de los segundos (Fig. 7.2). Respecto de la eficiencia de conversión de la RFAi en biomasa, analizada a través de la EUR, para el período comprendido entre VE-V14 se observó interacción $FS \times H$ (Cuadro 3.1). En 2019, los híbridos graníferos y doble propósito presentaron una EUR mayor que los sileros en siembras tardías sin diferencias entre H en siembras tempranas. En 2020 los graníferos aventajaron a los sileros en EUR, pero los de doble propósito no difirieron respecto de los otros dos tipos de híbridos en siembras tempranas y el ordenamiento de los híbridos en la siembra tardía fue granífero > doble propósito > silero. Durante el período V14-R2 los diferentes tipos de híbridos no presentaron diferencias en su EUR, mientras que la EUR entre R2-R6 fue significativamente más alta para los híbridos graníferos respecto de los doble propósito y sileros. Como resultado, la biomasa acumulada entre V14-R2 fue mayor para los híbridos doble propósito, seguidos por los graníferos y por último por los de silaje, entre V14-R2 mayor para los híbridos doble propósito y sileros respecto de los graníferos y finalmente mayor entre R2-R6 para los graníferos respecto de los otros tipos (Cuadro 3.1, Fig. 7.2).

Las diferencias en la biomasa acumulada por los diferentes tipos de híbridos dieron lugar a diferencias en la TCP para cada subperíodo evaluado. La TCP_{VE-V14} fue mayor para los híbridos graníferos y doble propósito respecto de los sileros, mientras que los híbridos doble propósito y sileros presentaron mayor TCP_{V14-R2} . Para el período V14-R2 también se analizó la TCE y la partición de la biomasa a espiga. La TCE_{V14-R2} fue significativamente mayor para los híbridos graníferos y doble propósito, mientras que para la PBE_{V14-R2} el orden fue graníferos > doble propósito > sileros (Cuadro 3.2; Fig. 7.2). Finalmente, la mayor biomasa acumulada por los híbridos para grano entre R2-R6 dio lugar a una TCP_{R2-R6} superior respecto de los doble propósito y sileros. Como

resultado de las diferencias en la captura y conversión de la radiación interceptada en biomasa, los híbridos graníferos demostraron consistentemente el mayor rendimiento en grano, seguidos por los híbridos doble propósito y finalmente por los de silaje, debido a una mayor biomasa total aérea e índice de cosecha a madurez fisiológica. Los índices de cosecha más altos que presentaron los híbridos graníferos respecto de los otros tipos fue promovido principalmente por el mayor número de granos, que no fue totalmente compensado por una disminución en el peso individual (PG) de estos. El mayor NGP de los híbridos para grano contribuyó al aumento en la TCP_{R2-R6} , así como a su mayor índice de cosecha en comparación con los híbridos de doble propósito y silaje. El mayor rendimiento en grano logrado por los híbridos de doble propósito con respecto a los híbridos de silaje se relacionó con un PG significativamente mayor para igual NG respecto de los híbridos para silaje. Por lo tanto, no existe evidencia para rechazar la **hipótesis 1**, que establece que *“El ambiente de fecha de siembra explorado y la disponibilidad de N impactarán sobre la generación del rendimiento, sus determinantes fisiológicos (biomasa total aérea e índice de cosecha) y sus componentes numéricos (peso y número de granos) de manera diferencial según el genotipo considerado”*. Sin embargo, las predicciones realizadas acerca de las respuestas a observar fueron parcialmente incorrectas. La predicción relacionada con la **hipótesis 1** indicaba *“Al atrasar la fecha de siembra se esperan respuestas similares a las observadas en ambientes de mayor latitud, i.e. disminución del rendimiento en grano por reducciones en el PG, el número de granos o ambos”*. Los resultados del Capítulo 3 permitieron demostrar que el atraso en la fecha de siembra no generó disminuciones en el rendimiento en el año 2019, y que el rendimiento en grano fue ligeramente superior en la siembra tardía respecto de la temprana en 2020. Respecto de los componentes numéricos, el número de granos fue significativamente menor en las siembras tardías respecto de las tempranas en 2019, sin

diferencias en 2020, mientras que no existieron diferencias en el PG entre fechas de siembra en ninguno de los dos años, siendo ligeramente superior en las siembras tardías respecto de las tempranas. Esta discrepancia respecto a los resultados previos encontrados en siembras tardías en ambientes de mayor latitud puede deberse a que el ambiente de radiación y temperatura explorado por las siembras tardías no fue tan perjudicial para la latitud evaluada en esta tesis respecto de las más altas donde se han observado previamente esas respuestas (Cirilo y Andrade, 1996; Tsimba et al., 2013, Bonelli et al., 2016). Los resultados de la presente tesis estuvieron en concordancia con análisis previos para fechas de siembra tardías similares para la región del presente estudio (Mercau y Otegui, 2015). Respecto de la predicción que indicaba *“se esperan disminuciones en el rendimiento en la condición no fertilizada con N, también dadas por disminuciones en uno o ambos componentes del mismo y de mayor magnitud en siembras tempranas que tardías”*, se verificó esta tendencia. Por último, respecto a la predicción que planteaba que *“...los genotipos desarrollados para diferentes usos finales presentarán diferencias en la determinación de su rendimiento. Por lo tanto, se espera que exista interacción Genotipo $\times$ Ambiente para el rendimiento”*, no se verificó esta respuesta. Se verificó interacción fecha de siembra $\times$ tipo de híbrido en sólo 3 de los 24 rasgos analizados (fRFAi V14-R2 en 2019 y EUR_{VE-V14} y biomasa acumulada V14-R2 ambos años) e interacción FS $\times$ N $\times$ H en sólo 1 de los 24 rasgos analizados (RFAi acumulada R2-R6 en 2020).

En el Capítulo 4, se abordó el desarrollo del segundo objetivo específico: *“Describir la evolución del PG, las relaciones fuente-destino y el contenido de CHST en híbridos con diferente destino final al ser cultivados en un amplio rango de ambientes”*. Los resultados mostraron diferencias entre combinaciones FS $\times$ N y tipos de híbridos en la determinación del PG. La condición N250 incrementó significativamente el PG en

todos los ambientes evaluados, pero con menor magnitud en las siembras tardías. Los híbridos doble propósito presentaron el mayor PG, seguidos por los graníferos y finalmente los sileros. Por lo tanto, no se encontró evidencia para rechazar la **hipótesis 2** *“La fecha de siembra y la disponibilidad de N afectarán a los determinantes fisiológicos del llenado de los granos de manera diferencial según el genotipo considerado”*. Sin embargo, las predicciones realizadas fueron parcialmente incorrectas. Respecto de la predicción que plantea *“Al atrasar la fecha de siembra se esperan respuestas similares a las observadas en ambientes de mayor latitud: reducción del peso del grano dada por disminución de la tasa de llenado, acortamiento del período de llenado de los granos o una combinación de ambos”*, se verificó que ocurrió lo opuesto. Al atrasar la fecha de siembra se incrementó el peso de los granos, debido a que en siembras tardías la tasa de llenado fue igual que en las siembras tempranas, pero se extendió significativamente la duración del período de llenado de los granos (Cuadro 4.1). Esto se debió a que, en el ambiente de la presente tesis, si bien tanto la temperatura como la radiación durante el período de llenado de los granos fueron menores en siembras tardías, esa caída fue de menor magnitud que en ambientes de latitudes más altas. Lo observado ratifica las predicciones sustentadas en modelos de simulación para fechas de siembra tardías similares en la misma región (Mercau y Otegui, 2015). Respecto de la fertilización nitrogenada, la predicción indicaba *“Se esperan reducciones en el PG en la condición sin fertilizar con nitrógeno, dadas por reducciones en la tasa de llenado, la duración o ambas”*, tendencia que fue constatada. La condición N0 presentó i) menor PG a través de todos los ambientes evaluados, y ii) menor duración del llenado de los granos en siembras tempranas (Cuadro 4.1). Respecto de los genotipos, la predicción planteaba que *“Los genotipos pertenecientes a diferentes usos finales presentarán diferencias en los determinantes fisiológicos del llenado de los granos. Por lo tanto, se espera que exista*

interacción Genotipo × Ambiente para el PG”, fue parcialmente correcta. Los genotipos pertenecientes a diferentes usos finales presentaron diferencias en su PG y sus determinantes fisiológicos, pero no se verificó interacción Fecha de siembra × Tipo de híbrido. Los híbridos para doble propósito presentaron los mayores PG, seguidos por los híbridos graníferos y finalmente por los sileros, independientemente del ambiente evaluado.

Respecto de las relaciones fuente-destino, para la RFD_{V14-R2} se verificaron diferencias significativas entre fechas de siembras y tipos de híbridos y para la RFD_{R2-R6} entre fechas de siembra, condiciones de N y tipos de híbridos. La RFD_{V14-R2} fue mayor en las siembras tardías respecto de las tempranas ambos años, mientras que la RFD_{R2-R6} fue mayor en la siembra tardía respecto de la temprana en 2019, sin diferencias entre fechas de siembra en 2020. El tratamiento N250 incrementó la RFD_{R2-R6} respecto al N0 únicamente en el año 2020. Las diferencias en las relaciones fuente-destino entre los híbridos se explicaron tanto por diferencias en la acumulación de biomasa V14-R2 y R2-R6 como en el número de granos (Fig. 7.2). Los híbridos para doble propósito y silaje presentaron una RFD_{V14-R2} mayor que los graníferos, debido a la mayor acumulación de biomasa en el período V14-R2 combinada con número de granos inferior respecto de los híbridos graníferos, mientras que se verificó la tendencia opuesta para la RFD_{R2-R6} , que fue superior para los híbridos graníferos debido a su incrementada producción de biomasa entre R2-R6 que sobrecompensó su mayor número de granos respecto de los otros tipos, que no se diferenciaron entre sí.

En el Capítulo 4, también se analizó la dinámica de CHST durante el período de llenado efectivo de los granos, determinándolos en 4 momentos: 15, 30, 45 y 60 días *post-silking*. Dentro de los resultados más importantes, cabe destacar que las siembras tardías iniciaron el llenado efectivo de los granos (R2, ca. 15 días *post-silking*) con un porcentaje

de CHST menor a las siembras tempranas, debido a sus mayores volúmenes del tallo, lo que generó dilución de los CHST, que fueron iguales a los de las siembras tempranas cuando se cuantificaron en biomasa por planta (Cuadro 4.2; Cuadro A4.3). El porcentaje de CHST disminuyó considerablemente durante el llenado efectivo de los granos (Fig. 4.7) y las siembras tardías removilizaron un porcentaje significativamente mayor de CHST de R2 a R6 respecto de las tempranas, mientras que la removilización de CHST de R2 a R6 fue mayor bajo la condición N250 que bajo la condición N0 (Cuadro 4.2). La mayor removilización de CHST durante el período R2-R6 en siembras tardías no pareció estar relacionada con su contribución de asimilados al llenado de los granos, ya que no se verificó asociación entre el peso del grano ni sus componentes con la RFD_{R2-R6} (Fig. 4.5 d, e y f). La mayor removilización de CHST en siembras tardías podría deberse a una mayor respiración de mantenimiento, influenciada por las temperaturas elevadas registradas en las etapas iniciales del cultivo (Fig. 2.2) y por el mayor tamaño de las plantas respecto de las siembras tempranas. En particular, la materia verde de la fracción tallo + hojas fue significativamente superior en las siembras tardías respecto de las tempranas (10,3 % y 36,4 % para 2019 y 2020 respectivamente; Cuadro 6.1). Por lo tanto, no hay evidencia para rechazar la **hipótesis 3 que plantea** *“El ambiente durante el llenado del grano (R2-R6) afectará los CHST a madurez fisiológica”*. Respecto de la predicción planteada *“Se espera que las plantas en fecha de siembra tardía presenten menores valores de CHST a madurez fisiológica y exista interacción Genotipo × Ambiente para este carácter”*, fue parcialmente correcta. En principio, se constataron mayores valores de removilización en siembras tardías durante el período R2-R6, lo que dio como resultado menores porcentajes de CHST en las siembras tardías respecto de las tempranas en R6. Este resultado tiene importantes implicancias a nivel productivo, tanto para la producción de grano como de silajes. Para la producción de granos, estos tallos

con reservas agotadas se tornan frágiles, aumentando la susceptibilidad al vuelco y quebrado de plantas y por lo tanto afectando el rendimiento y la calidad del grano (Bonelli et al., 2016). Con respecto al silaje, porcentajes bajos de CHST afectan negativamente el valor nutricional del silaje (Fig. 6.5). Respecto a la segunda parte de la predicción, no se verificó interacción $FS \times H$, ni para el porcentaje de CHST en ninguno de los 4 momentos evaluados ni para la removilización de CHST entre R2 y R6 (Cuadro 4.2; Fig. 7.2). Diferencias en el porcentaje de CHST entre tipos de híbridos solo fueron observadas al inicio del período de llenado efectivo de los granos (Cuadro 4.2), una tendencia que podría atribuirse a la presencia en este grupo del híbrido BMR EXP 1517 *bm3* RR2, que generaría aumentos en las concentraciones de glucosa y pentosa en esta etapa (Barrière et al., 1994).

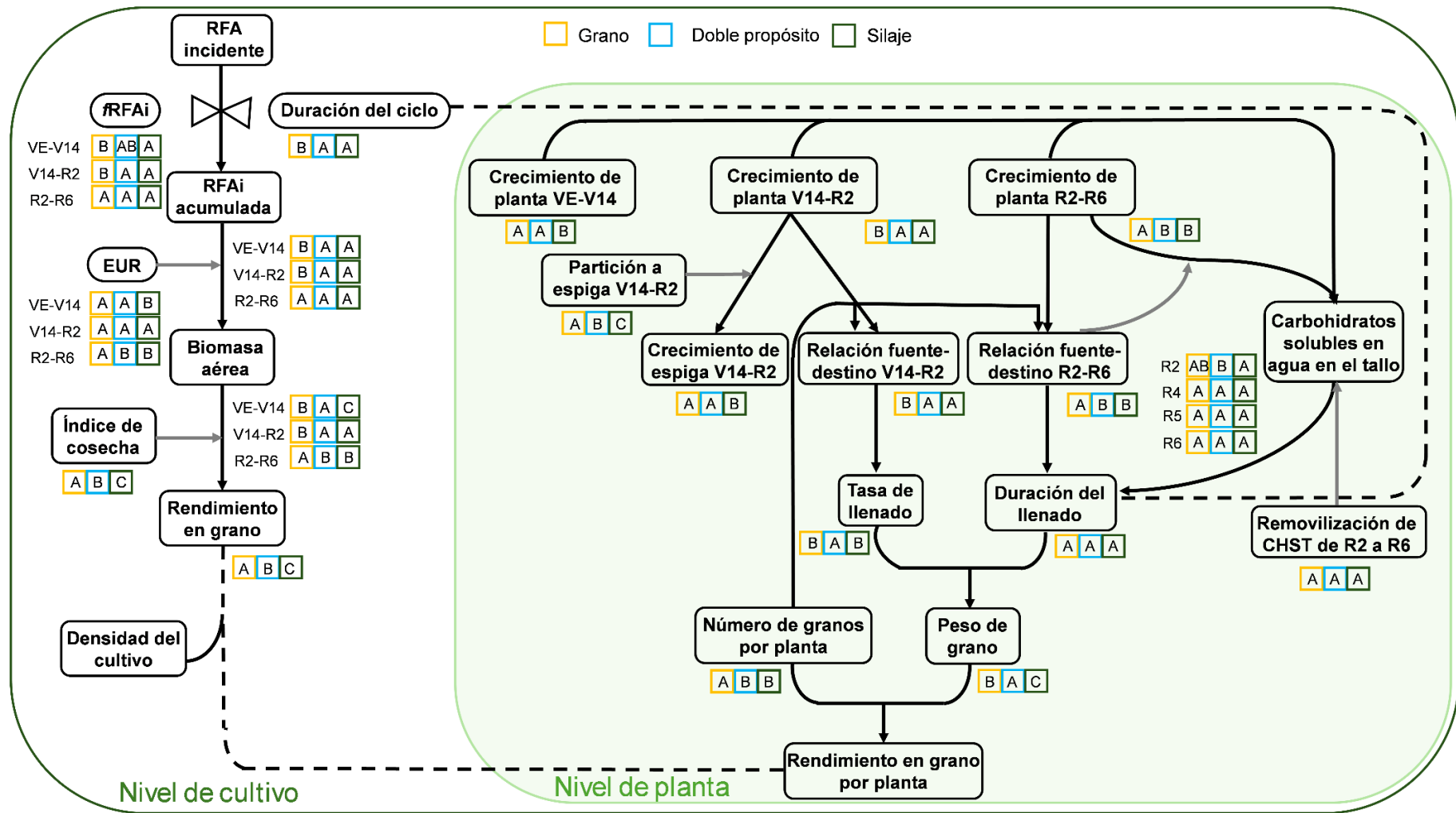


Figura 7.2. Diagrama de flujo describiendo las relaciones entre los determinantes fisiológicos y numéricos del rendimiento en grano de maíz a nivel de planta y de cultivo para diferentes tipos de híbridos de maíz (cajas color naranja en híbridos para grano, en celeste para doble propósito y en verde para silaje). Las flechas continuas representan relaciones entre variables y las discontinuas indican variables o procesos que regulan dichas relaciones. Letras diferentes dentro de las cajas indican diferencias significativas entre tipos de híbridos con $p = 0,05$, indicando con la letra A el mayor valor obtenido para cada rasgo representado.

En el Capítulo 5 se abordó el desarrollo del tercer objetivo específico: “*Generar modelos predictivos de la evolución de la humedad de los granos post madurez fisiológica para asistir en la decisión del momento de cosecha para grano, i.e. cuando éste alcanza la humedad comercial (i.e. 14,5%). Los modelos generados serán validados mediante un conjunto de datos independiente, que incluirá información proveniente del ambiente explorado en esta tesis como de otros ambientes templados*”. Para el desarrollo de este capítulo, se contó con datos experimentales correspondientes a 154 combinaciones híbrido $\times$ ambiente, dadas por la combinación de sitios, años, fechas de siembra, híbridos y dosis de N, que se dividieron en un conjunto de datos de entrenamiento y otro de evaluación de los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica analizados (Cuadro 5.1). Inicialmente, basados en resultados provenientes de un trabajo previo que indicaba que k no era un valor constante (Chazarreta et al., 2021), se ajustaron valores de k variables (k_{obs}) para cada ambiente (Año $\times$ Sitio $\times$ Fecha de siembra $\times$ N, considerando el híbrido como aleatorio) del conjunto de datos de entrenamiento. Los k_{obs} ajustados para cada ambiente permitieron verificar que efectivamente k no era un valor constante y que se alejaba considerablemente de $k = 0,062$ (Martinez-Feria et al., 2019) conforme se atrasó la fecha de siembra. Luego, se evaluó la correlación entre los k_{obs} y variables meteorológicas de cada ambiente que fueron calculadas para los períodos pre- y post-madurez fisiológica (Cuadro 5.3). Se seleccionaron las variables meteorológicas que presentaron altas correlaciones con k_{obs} y se ajustaron modelos de regresión lineal entre k_{obs} y las variables meteorológicas seleccionadas de forma independiente para las variables meteorológicas pre- y post-madurez (Cuadro 5.4). A partir de ello, se construyeron dos nuevos coeficientes k (k_{pre} y k_{post}) basados en la radiación solar media (en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y el DPV medio (en kPa) explorados durante el período transcurrido entre el *silking* y la madurez fisiológica y desde la madurez fisiológica hasta la humedad de

cosecha, respectivamente (ecuaciones [5.4] y [5.5]). Posteriormente, se evaluó la capacidad de predecir la humedad de los granos post-madurez fisiológica de los modelos de secado de los granos incluyendo $k = 0,062$, k_{pre} y k_{post} con los datos provenientes del conjunto de datos de evaluación. Para siembras tempranas, los modelos que incluyeron k_{pre} y k_{post} permitieron disminuir el RMSE y el RRMSE con respecto al modelo con k constante, respectivamente (Figs. 5.2a-c). Para siembras tardías, la inclusión de valores de k variables relacionados con variables meteorológicas aumentó la bondad de ajuste de las regresiones, redujo tanto el RMSE como el RRMSE y aumentó significativamente la eficiencia del modelo (Figs. 5.2d-f). Además, se evaluó la capacidad de los nuevos modelos incluyendo k_{pre} y k_{post} para predecir los días entre la madurez fisiológica y la madurez comercial, presentando una alta concordancia ($R^2 = 0,99$; Fig. 5.3) para fechas de siembras tempranas y tardías, con un error general de sólo 2,29 ó 3,04 días (para modelos incluyendo k_{pre} y k_{post} , respectivamente) entre los días observados y predichos entre la madurez fisiológica y la humedad de cosecha comercial (Fig. 5.3). Por lo anteriormente expuesto, no se encontró evidencia para rechazar la **hipótesis 4** “*El ambiente explorado generará las mayores variaciones en la humedad de los granos post madurez fisiológica. La inclusión de variables meteorológicas a los modelos predictivos de secado post madurez fisiológica actualmente disponibles mejorará su desempeño*”, verificándose el cumplimiento de sus predicciones asociadas. Los resultados del Capítulo 5 representan un avance importante en la definición de modelos de secado de los granos más generales. Por un lado, porque son válidos para un mayor número de ambientes que los modelos previos que consideraban un valor constante de k (Weller y Bunn 1993; Maiorano et al., 2014; Martinez-Feria et al., 2019). Por otro lado, porque no requieren de datos climáticos posteriores a la madurez fisiológica, lo cual permitiría una más fácil incorporación en los modelos de simulación de cultivos más utilizados actualmente.

En el Capítulo 6, se abordó el desarrollo del cuarto y último objetivo específico: *“Caracterizar la evolución de la producción de materia seca, su calidad y la duración de la ventana de picado para la realización de silajes de planta entera”*. A partir de muestreos sucesivos de planta entera, se ajustaron modelos lineales a la evolución del porcentaje de MS de planta entera y se determinó el momento óptimo para silaje (30-40 % MS planta entera; Cone et al., 2007), comúnmente conocido como ventana de picado. Posteriormente, se calcularon tanto la materia verde como la MS durante la ventana de picado de planta entera, tallo + hojas y espigas. Finalmente, a partir de la MS para cada una de las fracciones, se evaluaron diferentes atributos relacionados a la calidad del material a ensilar.

La ventana de picado para silaje de planta entera ocurrió y finalizó antes en las siembras tempranas que en las tardías, dando como resultado una duración de la ventana menor en las primeras respecto de las segundas. Además, difirió significativamente entre combinaciones FS $\times$ N y FS $\times$ H ambos años (Cuadro 6.1; Fig. 6.1). La ventana de picado presentó una duración mayor en la condición N0 respecto de la N250 en siembras tempranas, sin diferencias entre niveles de N en siembras tardías. Los híbridos doble propósito y sileros presentaron una ventana de picado más extensa respecto de los graníferos en siembras tardías, sin diferencias entre H en siembras tempranas (Cuadro 6.1). Los resultados obtenidos no permiten rechazar la **hipótesis 5**: *“La duración de la ventana de picado para silaje de planta entera será mayor conforme se atrasa la fecha de siembra”*, verificándose el cumplimiento de sus predicciones asociadas.

Respecto de la calidad de la MS para silaje de planta, se analizaron diferentes variables. Para la planta entera se determinó la DMS_p, mientras que para las fracciones tallo + hojas y espigas, se obtuvieron determinaciones de digestibilidad de la MS, FDN, FDA, proteína y energía. Adicionalmente, para la fracción tallo + hojas también se

registró la LDA. La DMS_p difirió significativamente entre FS y H. En 2020, la DMS_p fue mayor en la siembra temprana respecto de la tardía, sin diferencias entre fechas de siembra en 2019. La menor DMS_p de las siembras tardías estuvo dada por una menor DMS_{t+h} , el componente con mayor influencia sobre la DMS_p (Fig. 6.3) a iguales valores de DMS_e (Cuadro 6.2). La mayor DMS_{t+h} en siembras tempranas respecto de las tardías estuvo estrechamente relacionada con la temperatura, tanto previa a R2 como durante el llenado de los granos (Fig. 6.3). Las temperaturas más altas durante el período de llenado de los granos exploradas por las siembras tempranas favorecieron un rápido llenado de los granos que mejoró la relación carbohidratos solubles en tallo/pared celular (por mayor contenido de CHST; Fig. 6.5a) y, consecuentemente, incrementaron la digestibilidad de la fracción tallo + hojas (Fig. 6.5b). La fertilización nitrogenada incrementó la DMS_e en la siembra temprana de 2019 y el porcentaje de proteína tanto en la fracción tallo + hojas como en las espigas en siembras tempranas de ambas campañas, sin efecto en las tardías (Cuadro 6.2). La DMS_p fue muy diferente entre híbridos clasificados dentro de un mismo grupo. Aunque se pudo destacar al híbrido para silaje EXP 1517 *bm3* RR2, que presentó la máxima DMS_p media superando tanto al promedio ambiental como a la mayoría de los valores registrados para los demás híbridos evaluados en todas las combinaciones año $\times$ FS $\times$ N (Fig. 6.4c), los otros dos híbridos sileros junto con el doble propósito KM 4360 AS-GL Stack presentaron una DMS_p comparativamente más baja. Esto sugiere que las clasificaciones de los híbridos proporcionadas por las compañías semilleras permiten anticipar tendencias en algunas variables (e.g., rendimiento en grano) pero no en la calidad de la materia seca de planta completa para silaje, donde se observa un rango limitado de variación a través de los ambientes y una gran variabilidad dentro de los grupos de híbridos. Los resultados obtenidos no permiten rechazar la **hipótesis 6**: “La

calidad del material a ensilar dependerá del genotipo y el ambiente”, verificándose el cumplimiento de sus predicciones asociadas.

Finalmente, a partir de los resultados generados en los diferentes capítulos, se analiza aquí el impacto de las diferencias en longitud del ciclo entre los diferentes híbridos sobre la generación del rendimiento en grano y la producción de materia seca digestible para silaje. La duración del ciclo a través de todos los ambientes fue de 122, 128 y 129 días en promedio para los híbridos graníferos, doble propósito y sileros respectivamente. Estas diferencias representaron un aumento del 5,03% y 6,27% en la duración del ciclo de los híbridos para doble propósito y silaje, respectivamente, en comparación con los graníferos. Los híbridos para grano presentaron mayor rendimiento en grano, biomasa total aérea a madurez, número de granos e índice de cosecha en relación con los otros dos tipos. Ninguna de las variables anteriormente mencionadas guardó relación con la duración total del ciclo de cultivo (Fig. 7.3a-d). Por lo tanto, el mayor rendimiento en grano de los híbridos graníferos respecto de los otros dos tipos se dio como resultado de su incrementado número de granos respecto de los otros dos tipos, la mayor partición de la biomasa hacia las estructuras reproductivas y la mayor eficiencia de conversión de la radiación en biomasa, particularmente durante el llenado de los granos, que no guardaron relación con la duración del ciclo. Respecto de la producción de materia seca para silaje de planta entera, se encontró una relación lineal positiva entre la longitud del ciclo y la MSD_p (Fig. 7.3d), promovida por una mayor producción de materia seca en la fracción tallo + hojas (Fig. 7.3e), que también se asoció positivamente con la longitud del ciclo (Fig. 7.3f). De este modo, la duración del ciclo es clave en la producción de materia seca digestible para ensilar, debido principalmente a un aumento de la biomasa en la fracción tallo + hojas, aunque no impacta sobre la duración de la ventana de picado (Fig. 7.3g). Integrando la generación de rendimiento en grano y la producción de materia seca

digestible para silajes de planta entera para los diferentes híbridos evaluados en la presente tesis, podemos concluir que mientras que la duración del ciclo no influyó sobre las diferencias registradas en rendimiento en grano, sí explicó las diferencias en materia seca digestible, sin afectar la duración de la ventana de picado.

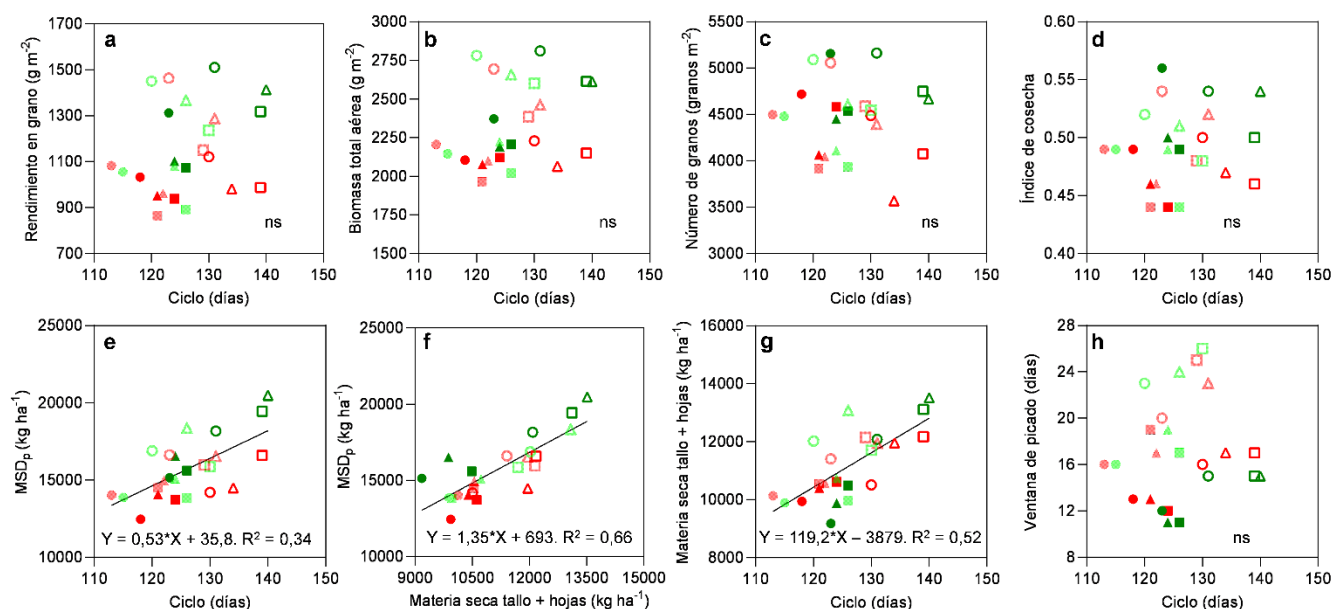


Figura 7.3. Respuesta de (a) el rendimiento en grano, (b) la biomasa total aérea, (c) el número de granos, (d) el índice de cosecha, (e) la materia seca digestible de planta entera (MSD_p), (g) la materia seca de la fracción tallo + hojas, y (h) la ventana de picado a las diferencias en la duración del ciclo de cultivo. (f) Relación entre la MSD_p y la materia seca de la fracción tallo + hojas. Los círculos representan al tipo de híbrido de grano, los triángulos a los de doble propósito y los cuadrados a los de silaje cultivados bajo diferentes niveles de nitrógeno (N0: sin N añadido, en rojo, N250: 250 kg N ha⁻¹, en verde) durante dos campañas agrícolas (2019: símbolos cerrados; 2020: símbolos abiertos), en dos fechas de siembra (temprana: símbolos de color oscuro, tardía: símbolos de color claro).

7.3. Aportes novedosos de la tesis

Los resultados obtenidos a lo largo de la tesis destacan la importancia de la elección del ambiente, las prácticas de manejo y el tipo de híbrido de acuerdo con el objetivo de producción, particularmente focalizando en la producción de granos o silajes de planta entera. Los hallazgos resultan de gran relevancia en el contexto de los cambios significativos que ha experimentado la producción del cultivo de maíz durante la última década. Los aportes más novedosos de la presente tesis se pueden resumir en:

1. Un análisis ecofisiológico integrador de los procesos que regulan la determinación del rendimiento en grano y la producción de biomasa para híbridos con diferente uso final (clasificados según criterios ecofisiológicos como graníferos, doble propósito y sileros) cultivados en una amplia gama de ambientes, demostrando que los diferentes destinos del cultivo de maíz definen cambios en el crecimiento y desarrollo del cultivo entre híbridos con diferente uso final.
2. El análisis profundo de los mecanismos fisiológicos que subyacen a la determinación del peso del grano y la dinámica de los CHST mostró las diferencias en su acumulación entre fechas de siembra, condiciones de N y tipos de híbridos, demostrando la elevada removilización de CHST en siembras tardías, con importantes implicancias productivas tanto para la producción de grano (i.e. tallos con más propensión a vuelco/quebrado), como para silaje (i.e. menor calidad del tallo para la alimentación animal).
3. Avances sustantivos en la mejora de los algoritmos actuales de predicción del secado de los granos de maíz, definiendo un modelo más general para predecir la pérdida de humedad de los granos y el tiempo a humedad de cosecha comercial para una gama amplia de ambientes de fechas de siembra.

4. Cuantificación de la producción de materia verde, materia seca, y análisis de la calidad de la materia seca para silaje en híbridos con diferente uso final cultivados en ambientes contrastantes realizado por separado sobre dos fracciones (tallo + hojas y espigas) constitutivas de la planta entera. Cuantificación de la duración de la ventana de picado (un concepto escasamente documentado previamente) para diferentes tipos de híbridos cultivados en ambientes contrastantes. Se demostró la influencia del ambiente explorado y la fertilización nitrogenada sobre cada uno de estos rasgos, con grandes implicancias a nivel productivo. Se identificaron atributos como la altura de planta, el diámetro de la base del tallo y la incorporación de mutaciones *bmr* para la mejora tanto en la producción de materia verde, la extensión de la ventana de picado y la calidad de la materia seca para silajes de planta completa.

7.4. Perspectivas a futuro

Los resultados obtenidos en la presente tesis han generado información ecofisiológica con importantes implicancias productivas para el cultivo de maíz. A continuación, se discuten algunas de las limitaciones sobre los resultados obtenidos, y se plantean posibles líneas de investigación futura.

Los resultados obtenidos acerca de la generación del rendimiento, las dinámicas de llenado de los granos y relaciones fuente-destino y la evaluación de producción de materia seca y su calidad se realizó sobre experimentos que incluyeron dos años, dos fechas de siembra dentro de cada año, dos niveles de N y ocho híbridos (3 graníferos, 2 doble propósito y 3 sileros), todos cultivados en un sitio bajo riego suplementario. La ampliación del número y la diversificación de los ambientes experimentales permitiría

explorar otras respuestas en cada uno de los rasgos evaluados y posiblemente contribuiría a encontrar interacciones genotipo $\times$ ambiente que no fueron posibles de detectar en la mayor parte de las variables analizadas en esta tesis. Los ambientes a explorar deberían incluir condiciones en seco, posibilidad de explorar niveles más bajos de N en el suelo a la siembra (que fueron elevados en la presente tesis y no permitieron encontrar diferencias entre tratamientos de N en la mayor parte de las variables analizadas en siembras tardías) e incluir una mayor variedad de densidades de siembra (una única densidad explorada en el presente trabajo). Las investigaciones futuras también podrían incluir un número mayor de genotipos dentro de cada tipo de híbrido analizado y de otros tipos de híbridos con usos alternativos al grano (e.g. forrajeros o híbridos para producción de biomasa lignocelulósica para biocombustibles). El uso aparente de reservas del tallo entre R2 y R6 fue simulado para 18 escenarios productivos para Pergamino, BA, Argentina a través de 41 campañas agrícolas (1970-1971 a 2011-2012) utilizando DSSAT-CERES Maize (disponible en <https://doi.org/10.1101/2024.09.06.611734>). Las simulaciones abarcaron nueve combinaciones de agua disponible en el suelo $\times$ N para fechas de siembra tempranas (15 de septiembre) y tardías (15 de diciembre). Las condiciones de agua disponible en el suelo incluyeron: i) riego, con el suelo siempre en capacidad de campo $> 90\%$, ii) seco, iniciando con todo el perfil (180 cm) a capacidad de campo al momento de la siembra, y iii) seco, iniciando con todo el perfil a 50 % capacidad de campo al momento de la siembra. Para cada régimen hídrico, se evaluaron tres condiciones de N del suelo: i) sin restricción de N y ii) sin N agregado durante el ciclo y niveles iniciales de N del suelo en los 45 cm superiores según lo establecido por los análisis de suelo en nuestros experimentos (es decir, 55 ó 97 kg N ha⁻¹ en siembras tempranas y 80 ó 142 kg N ha⁻¹ en siembras tardías). Si bien las mencionadas simulaciones no forman parte de los resultados de la presente tesis por falta de espacio y

por no ser parte de ninguno de los objetivos e hipótesis propuestos inicialmente, sus resultados derivados sugieren que el agua disponible a la siembra puede no ser el principal impulsor de las diferencias esperadas en los niveles de uso aparente de reservas durante el llenado de los granos en seco. Las tendencias estimadas en este rasgo fueron impulsadas principalmente por las condiciones de crecimiento contrastantes creadas por las fechas de siembra, la fertilización con N y las condiciones iniciales de N en el suelo.

Los resultados presentados en esta tesis permiten afirmar que las reservas de CHST participan sustancialmente del metabolismo de las plantas durante el llenado de granos, particularmente en siembras tardías, con importantes implicancias prácticas tanto para la producción de grano como de silaje. Las diferencias genotípicas en la removilización de reservas durante el llenado de los granos han sido identificadas como un atributo constitutivo de la tolerancia a estrés en el cultivo de trigo (Blum et al., 1994; Blum, 1998; Yang et al., 2002; Tahir y Nakata, 2005). Sin embargo, en la presente tesis los diferentes híbridos analizados no mostraron diferencias en el porcentaje de CHST en ninguno de los cuatro momentos de evaluación entre R2 y R6 (Cuadro 4.2), a excepción de diferencias muy pequeñas en R2 asociadas con la inclusión del genotipo EXP 1517 *bm3* RR2. No obstante, estudios previos en maíz demuestran la existencia de variabilidad genética para las reservas de CHST (Daynard et al., 1969; Widstrom et al., 1984; Fernandez et al., 2021). En este sentido, resultaría interesante evaluar las dinámicas de removilización durante el llenado de los granos en genotipos de maíz con diferente capacidad de reservas de CHST y también evaluar la respuesta de los mismos ante diferentes situaciones de estrés durante el llenado de granos. A su vez, se espera que los genotipos con mayor porcentaje de CHST durante el llenado de los granos presenten mayor digestibilidad de materia seca de la fracción tallo + hojas (la fracción con mayor influencia sobre la digestibilidad de la planta entera), lo que tendría importantes

implicancias en la mejora del valor nutricional del silaje. Respecto de la digestibilidad de la materia seca para silajes de planta entera, resultaría de gran interés en términos productivos su caracterización a través de todo el período R2-R6 y un mayor número de determinaciones de calidad de la MS para silaje dentro de la ventana óptima de picado para ajustar el momento óptimo de silaje combinando el porcentaje óptimo de humedad con la materia seca de mejor calidad para ensilar.

Respecto de los modelos de secado de los granos post-madurez fisiológica, entre las cuestiones a considerar para mejorar la capacidad predictiva de los modelos presentados en esta tesis (incluyendo k_{pre} (Ec. [5.4]) o k_{post} (Ec. [5.5]) en lugar de un valor k constante) y su amplitud, se encuentran el número y las características de los sitios de evaluación, que en la presente tesis están limitados a un rango de latitudes y prácticas de manejo acotadas (por ejemplo, densidad de plantas). De manera similar, la falta de condiciones de estrés exploradas durante el llenado de los granos, como golpes de calor, sequía o heladas (condiciones que pueden interrumpir el llenado de los granos), y el número limitado de genotipos comerciales evaluados pueden identificarse como limitaciones potenciales. Las investigaciones futuras deberían centrarse en i) ampliar el conjunto de datos existente, ii) trabajar en el desarrollo de una plataforma interactiva que conecte el modelo actual con datos meteorológicos en tiempo real para desarrollar una herramienta digital que ayude a determinar el número de días para alcanzar la humedad comercial y asista a los productores/agrónomos en la toma de decisión del momento de cosecha y iii) la incorporación del modelo de secado de los granos incluyendo k_{pre} en modelos de simulación de cultivos como CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986) o APSIM (Holzworth et al., 2014).

ANEXOS

Anexos al capítulo 3

Cuadro A3.1. Parámetros y coeficientes de determinación (R^2) de los modelos alométricos utilizados para la estimación de la biomasa vegetativa y de espigas.

Año	Fecha de siembra	Híbrido	Estimación de la biomasa vegetativa			Estimación de la biomasa de espigas		
			a	b	R^2	c	d	R^2
2019	Temprana	DK 72-10 VT3P	0,147	12,215	0,79	0,573	0,083	0,89
		DUO30 PW	0,120	27,989	0,79	0,488	0,088	0,90
		EXP 1517 <i>bm3</i> RR2	0,118	13,744	0,88	0,452	0,092	0,94
		KM 4360 AS-GL Stack	0,145	22,141	0,80	0,881	0,069	0,90
		LG 30850 RR2	0,105	27,661	0,71	0,308	0,098	0,88
		LG 30853 VT3P	0,123	17,104	0,84	0,477	0,087	0,88
		NEXT-22.6 PWU	0,139	20,167	0,73	0,283	0,106	0,91
		SYN 840 VIP3	0,154	10,215	0,81	0,204	0,127	0,78
2019	Tardía	DK 72-10 VT3P	0,152	13,472	0,82	0,429	0,092	0,95
		DUO30 PW	0,134	14,645	0,81	0,449	0,090	0,96
		EXP 1517 <i>bm3</i> RR2	0,112	17,994	0,84	0,240	0,107	0,91
		KM 4360 AS-GL Stack	0,174	3,700	0,81	0,414	0,090	0,86
		LG 30850 RR2	0,125	17,527	0,79	0,253	0,105	0,91
		LG 30853 VT3P	0,129	13,140	0,87	0,320	0,097	0,92
		NEXT-22.6 PWU	0,159	11,977	0,80	0,563	0,084	0,88
		SYN 840 VIP3	0,142	17,625	0,83	0,381	0,099	0,93
2020	Temprana	DK 72-10 VT3P	0,105	31,641	0,87	0,306	0,104	0,87
		DUO30 PW	0,106	27,789	0,86	0,381	0,097	0,76
		EXP 1517 <i>bm3</i> RR2	0,083	27,644	0,86	0,255	0,105	0,94
		KM 4360 AS-GL Stack	0,123	20,573	0,86	0,404	0,093	0,91
		LG 30850 RR2	0,102	21,087	0,91	0,262	0,102	0,91
		LG 30853 VT3P	0,097	23,930	0,91	0,204	0,106	0,88
		NEXT-22.6 PWU	0,121	22,905	0,90	0,361	0,099	0,91
		SYN 840 VIP3	0,121	21,340	0,89	0,433	0,097	0,90
2020	Tardía	DK 72-10 VT3P	0,078	32,480	0,83	0,311	0,095	0,96
		DUO30 PW	0,078	25,585	0,92	0,326	0,096	0,83
		EXP 1517 <i>bm3</i> RR2	0,068	27,272	0,85	0,213	0,106	0,88
		KM 4360 AS-GL Stack	0,092	23,435	0,91	0,502	0,082	0,87
		LG 30850 RR2	0,077	22,285	0,92	0,205	0,104	0,86
		LG 30853 VT3P	0,073	23,892	0,93	0,211	0,102	0,92
		NEXT-22.6 PWU	0,081	27,977	0,78	0,221	0,105	0,88
		SYN 840 VIP3	0,076	27,926	0,92	0,360	0,095	0,95

Cuadro A3.2. Coeficientes de correlación correspondientes a las 18 variables incluidas en el análisis de componentes principales: biomasa acumulada, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) acumulada y eficiencia de uso de la radiación (EUR) para los períodos comprendidos entre VE-V14, V14-R2 y R2-R6, la biomasa total aérea, el rendimiento en grano y el índice de cosecha a madurez fisiológica y la temperatura media del aire (Tmedia) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6.

	VE-V14			V14-R2			R2-R6			Biomasa total	Rendimiento en grano	Índice de cosecha	VE-V14		V14-R2		R2-R6	
	Biomasa	RFAi	EUR	Biomasa	RFAi	EUR	Biomasa	RFAi	EUR				Tmedia	RFA	Tmedia	RFA	Tmedia	RFA
Biomasa _{VE-V14}	1,00																	
RFAi _{VE-V14}	0,17	1,00																
EUR _{VE-V14}	0,20	-0,90	1,00															
Biomasa _{V14-R2}	0,06	-0,26	0,33	1,00														
RFAi _{V14-R2}	-0,10	0,69	-0,66	0,12	1,00													
EUR _{V14-R2}	0,14	-0,69	0,72	0,34	-0,88	1,00												
Biomasa _{R2-R6}	0,13	0,18	-0,09	-0,31	0,25	-0,34	1,00											
RFAi _{R2-R6}	-0,15	0,71	-0,72	-0,26	0,82	-0,86	0,41	1,00										
EUR _{R2-R6}	0,17	-0,37	0,46	-0,22	-0,49	0,39	0,59	-0,45	1,00									
Biomasa total	0,52	0,42	-0,20	0,05	0,47	-0,39	0,75	0,40	0,28	1,00								
Rendimiento en grano	0,59	0,40	-0,16	-0,11	0,36	-0,35	0,79	0,38	0,35	0,97	1,00							
Índice de cosecha	0,63	0,31	-0,06	-0,38	0,09	-0,22	0,70	0,25	0,44	0,75	0,90	1,00						
Tmedia _{VE-V14}	0,15	-0,70	0,72	0,59	-0,35	0,53	-0,17	-0,48	0,13	-0,03	-0,09	-0,17	1,00					
RFA _{VE-V14}	-0,17	0,76	-0,80	-0,40	0,44	-0,53	-0,12	0,47	-0,39	-0,10	-0,08	-0,06	-0,92	1,00				
Tmedia _{V14-R2}	0,39	0,53	-0,50	-0,40	0,15	-0,32	0,08	0,16	-0,03	0,38	0,39	0,36	-0,33	0,36	1,00			
RFA _{V14-R2}	-0,34	0,52	-0,54	-0,42	0,38	-0,47	0,18	0,51	-0,15	-0,10	-0,05	0,03	-0,88	0,77	-0,14	1,00		
Tmedia _{R2-R6}	-0,13	0,50	-0,52	-0,63	0,09	-0,31	0,05	0,19	0,04	-0,13	-0,05	0,10	-0,93	0,85	0,34	0,77	1,00	
RFA _{R2-R6}	-0,04	0,87	-0,83	-0,41	0,53	-0,59	0,28	0,64	-0,19	0,27	0,30	0,30	-0,88	0,85	0,31	0,79	0,72	1,00

Cuadro A3.3. Probabilidades asociadas de los coeficientes de correlación correspondientes a las 18 variables incluidas en el análisis de componentes principales: biomasa acumulada, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) acumulada y eficiencia de uso de la radiación (EUR) para los períodos comprendidos entre VE-V14, V14-R2 y R2-R6, la biomasa total aérea, el rendimiento en grano y el índice de cosecha a madurez fisiológica y la temperatura media del aire (Tmedia) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6. En negrita los casos con $p < 0,05$.

	VE-V14			V14-R2			R2-R6			Biomasa total	Rendimiento en grano	Índice de cosecha	VE-V14		V14-R2		R2-R6	
	Biomasa	RFAi	EUR	Biomasa	RFAi	EUR	Biomasa	RFAi	EUR				Tmedia	RFA	Tmedia	RFA	Tmedia	R
Biomasa _{VE-V14}																		
RFAi _{VE-V14}	0,42792																	
EUR _{VE-V14}	0,35490	1,32E-09																
Biomasa _{V14-R2}	0,77794	0,22785	0,12042															
RFAi _{V14-R2}	0,64293	0,00020	0,00042	0,58007														
EUR _{V14-R2}	0,51625	0,00017	0,00008	0,10552	1,45E-08													
Biomasa _{R2-R6}	0,54562	0,40753	0,68688	0,13613	0,24202	0,10078												
RFAi _{R2-R6}	0,48699	0,00011	6,95E-05	0,21721	1,20E-06	6,92E-08	0,04935											
EUR _{R2-R6}	0,42623	0,07406	0,0249	0,30931	0,01420	0,06146	0,002442	0,02642										
Biomasa total	0,00918	0,04125	0,3386	0,80167	0,01904	0,05803	2,46E-05	0,05065	0,18883									
Rendimiento en grano	0,00250	0,05194	0,4495	0,60160	0,08572	0,09114	5,35E-06	0,06952	0,08886	1,67E-14								
Índice de cosecha	0,00088	0,13662	0,7792	0,06795	0,67396	0,30314	0,00013	0,23253	0,03343	2,04E-05	3,51E-09							
Tmedia _{VE-V14}	0,48755	0,00013	7,49E-05	0,00229	0,08982	0,00791	0,43726	0,01663	0,53506	0,89474	0,67682	0,42633						
RFA _{VE-V14}	0,42986	1,59E-05	3,08E-06	0,05392	0,03132	0,00793	0,58814	0,02174	0,05682	0,65541	0,70090	0,79266	2,25E-10					
Tmedia _{V14-R2}	0,06179	0,00842	0,01356	0,05140	0,49107	0,13002	0,72751	0,46768	0,89865	0,06573	0,06035	0,08318	0,12056	0,08163				
RFA _{V14-R2}	0,10100	0,00953	0,00621	0,03857	0,07003	0,01950	0,40152	0,01147	0,48695	0,63127	0,80877	0,89178	1,55E-08	1,14E-05	0,50785			
Tmedia _{R2-R6}	0,54266	0,01261	0,00967	0,00087	0,69157	0,14228	0,81072	0,37209	0,86635	0,54019	0,83363	0,62882	2,93E-11	1,84E-07	0,09881	1,04E-05		
RFA _{R2-R6}	0,85289	4,83E-08	6,76E-07	0,04912	0,00717	0,00227	0,19273	0,00079	0,38522	0,21003	0,15725	0,15176	1,12E-08	1,39E-07	0,14711	3,84E-06	7,22E-05	

Cuadro A3.4. Coeficientes de correlación correspondientes a las 16 variables incluidas en el análisis de componentes principales: temperatura media del aire (Tmedia), radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y tasas de crecimiento por planta (TCP) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6, tasa de crecimiento de la espiga (TCE) y partición de biomasa a espiga (PBE) durante el período VE-V14, eficiencias reproductivas de planta y espiga, rendimiento en grano, número de granos y peso de los granos a madurez fisiológica.

	VE-V14		V14-R2		R2-R6												
	Tmedia	RFA	Tmedia	RFA	Tmedia	RFA	TCP _{VE-V14}	TCP _{V14-R2}	TCE _{V14-R2}	PBE _{V14-R2}	Eficiencia reproductiva planta	Eficiencia reproductiva espiga	TCP _{R2-R6}	Rendimiento en grano	Número de granos	Peso de los granos	
Tmedia _{VE-V14}	1,00																
RFA _{VE-V14}	-0,92	1,00															
Tmedia _{V14-R2}	-0,33	0,36	1,00														
RFA _{V14-R2}	-0,88	0,77	-0,14	1,00													
Tmedia _{R2-R6}	-0,93	0,85	0,34	0,77	1,00												
RFA _{R2-R6}	-0,88	0,85	0,31	0,79	0,72	1,00											
TCP _{VE-V14}	0,77	-0,79	-0,04	-0,74	-0,78	-0,59	1,00										
TCP _{V14-R2}	0,57	-0,41	-0,17	-0,56	-0,48	-0,45	0,37	1,00									
TCE _{V14-R2}	0,53	-0,55	-0,17	-0,54	-0,31	-0,55	0,49	0,56	1,00								
PBE _{V14-R2}	0,21	-0,38	-0,07	-0,24	-0,02	-0,34	0,33	-0,10	0,77	1,00							
Eficiencia reproductiva planta	-0,44	0,17	0,40	0,31	0,38	0,39	-0,04	-0,78	-0,26	0,31	1,00						
Eficiencia reproductiva espiga	-0,58	0,45	0,43	0,48	0,39	0,64	-0,30	-0,63	-0,81	-0,48	0,68	1,00					
TCP _{R2-R6}	-0,37	0,05	0,20	0,28	0,40	0,30	-0,05	-0,48	-0,01	0,37	0,81	0,46	1,00				
Rendimiento en grano	-0,09	-0,08	0,39	-0,05	-0,05	0,30	0,49	-0,18	0,01	0,16	0,62	0,45	0,58	1,00			
Número de granos	-0,06	-0,17	0,47	-0,15	0,08	0,15	0,33	-0,07	0,21	0,34	0,67	0,37	0,74	0,80	1,00		
Peso de los granos	-0,10	0,04	0,22	0,05	-0,12	0,35	0,46	-0,22	-0,18	-0,04	0,39	0,39	0,25	0,85	0,38	1,00	

Cuadro A3.5. Probabilidades asociadas de los coeficientes de correlación correspondientes a las 16 variables incluidas en el análisis de componentes principales: temperatura media del aire (Tmedia), radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y tasas de crecimiento por planta (TCP) durante los períodos VE-V14, V14-R2 y R2-R6, tasa de crecimiento de la espiga (TCE) y partición de biomasa a espiga (PBE) durante el período VE-V14, eficiencias reproductivas de planta y espiga, rendimiento en grano, número de granos y peso de los granos a madurez fisiológica. En negrita los casos con $p < 0,05$.

	VE-V14		V14-R2		R2-R6						Eficiencia reproductiva planta	Eficiencia reproductiva espiga	TCP _{R2-R6}	Rendimiento en grano	Número de granos	Peso de los granos
	Tmedia	RFA	Tmedia	RFA	Tmedia	RFA	TCP _{VE-V14}	TCP _{V14-R2}	TCE _{V14-R2}	PBE _{V14-R2}						
Tmedia _{VE-V14}																
RFA _{VE-V14}	2,25E-10															
Tmedia _{V14-R2}	0,12056	0,08163														
RFA _{V14-R2}	1,55E-08	1,14E-05	0,50785													
Tmedia _{R2-R6}	2,93E-11	1,84E-07	0,09881	1,04E-05												
RFA _{R2-R6}	1,12E-08	1,39E-07	0,14711	3,84E-06	7,22E-05											
TCP _{VE-V14}	1,26E-05	4,02E-06	0,83642	3,17E-05	7,42E-06	0,0023										
TCP _{V14-R2}	0,00355	0,04853	0,43815	0,00478	0,01687	0,0289	0,07876									
TCE _{V14-R2}	0,00827	0,00540	0,43299	0,00656	0,13863	0,0049	0,01571	0,00483								
PBE _{V14-R2}	0,32115	0,06949	0,75738	0,25843	0,90963	0,0995	0,11007	0,63063	1,26E-05							
Eficiencia reproductiva planta	0,02946	0,43685	0,05298	0,14149	0,06339	0,0598	0,84836	6,04E-06	0,21285	0,14256						
Eficiencia reproductiva espiga	0,00280	0,02735	0,03587	0,01802	0,06230	0,0008	0,15740	0,00106	1,45E-06	0,01842	0,00025					
TCP _{R2-R6}	0,07833	0,82390	0,34122	0,17893	0,05514	0,1604	0,83394	0,01761	0,95410	0,07614	1,77E-06	0,02265				
Rendimiento en grano	0,67682	0,70090	0,06035	0,80877	0,83363	0,1572	0,01513	0,41064	0,97137	0,44308	0,00127	0,02749	0,00319777			
Número de granos	0,76499	0,41474	0,02054	0,49069	0,70551	0,4781	0,11249	0,73535	0,31487	0,10736	0,00038	0,07113	3,24E-05	2.60E-06		
Peso de los granos	0,64530	0,84545	0,29381	0,80211	0,56872	0,0971	0,02391	0,30218	0,39145	0,84200	0,06075	0,06275	0,246670091	1.13E-07	0.07063	

Anexos al capítulo 4

Cuadro A4.1. Coeficientes de correlación correspondientes a las 8 variables incluidas en el análisis de componentes principales: número de granos por planta (NGP), peso del grano, duración de la fase *lag*, contenido máximo de agua del grano, tasa de llenado, duración del llenado, relación fuente-destino durante el período crítico (RFD_{V14-R2}) y relación fuente destino durante el período de llenado de los granos (RFD_{R2-R6}).

	NGP	Peso del grano	Fase <i>lag</i>	Contenido máximo de agua del grano	Tasa de llenado	Duración del llenado	RFD _{V14-R2}	RFD _{R2-R6}
NGP	1,00							
Peso del grano	0,27	1,00						
Fase <i>lag</i>	-0,20	0,41	1,00					
Contenido máximo de agua del grano	0,23	0,89	0,59	1,00				
Tasa de llenado	-0,20	0,45	0,44	0,47	1,00			
Duración del llenado	0,29	0,82	0,38	0,71	-0,07	1,00		
RFD _{V14-R2}	-0,75	-0,01	0,48	0,18	0,14	0,03	1,00	
RFD _{R2-R6}	0,56	0,46	0,07	0,35	0,02	0,46	-0,50	1,00

Cuadro A4.2. Probabilidades asociadas a los coeficientes de correlación correspondientes a las 8 variables incluidas en el análisis de componentes principales: número de granos por planta (NGP), peso del grano, duración de la fase *lag*, contenido máximo de agua del grano, tasa de llenado, duración del llenado, relación fuente-destino durante el período crítico (RFD_{V14-R2}) y relación fuente destino durante el período de llenado de los granos (RFD_{R2-R6}). En negrita los casos con $p < 0,05$.

	NGP	Peso del grano	Fase <i>lag</i>	Contenido máximo de agua del grano	Tasa de llenado	Duración del llenado	RFD _{V14-R2}	RFD _{R2-R6}
NGP								
Peso del grano	0,20941							
Fase <i>lag</i>	0,35079	0,04741						
Contenido máximo de agua del grano	0,28227	0,000000004	0,00267					
Tasa de llenado	0,35315	0,02675	0,03131	0,02189				
Duración del llenado	0,17036	0,000001	0,06790	0,00010	0,73666			
RFD _{V14-R2}	0,00002	0,96571	0,01808	0,40430	0,50587	0,89387		
RFD _{R2-R6}	0,00450	0,02410	0,75511	0,09503	0,92637	0,02328	0,01185	

Cuadro A4.3. Medias de los efectos principales de la fecha de siembra (temprana y tardía), el nivel de nitrógeno (N0, N250) y el tipo híbrido (granífero, doble propósito y silaje) sobre los carbohidratos solubles en agua en el tallo (CHST) en R2 (ca. 15 días post-*silking*), R4 (ca. 30 días post-*silking*), R5 (ca. 45 días post-*silking*) y R6 (ca. 60 días post-*silking*) expresados en gramos por planta.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Carbohidratos solubles en agua en el tallo (g planta ⁻¹)			
				R2	R4	R5	R6
2019	Temprana	N0	Grano	21	17	10	11
			Doble propósito	23	21	10	8
			Silaje	27	19	11	7
		N250	Grano	19	17	7	7
			Doble propósito	19	16	8	6
			Silaje	22	16	8	7
	Tardía	N0	Grano	21	19	4	2
			Doble propósito	22	15	6	4
			Silaje	23	16	7	3
		N250	Grano	21	14	5	2
			Doble propósito	19	14	8	2
			Silaje	21	16	6	3
2020	Temprana	N0	Grano	27	27	17	16
			Doble propósito	26	29	18	15
			Silaje	36	31	18	14
		N250	Grano	26	28	24	16
			Doble propósito	27	26	20	15
			Silaje	28	26	15	14
	Tardía	N0	Grano	27	21	12	4
			Doble propósito	26	24	17	11
			Silaje	28	22	12	7
		N250	Grano	24	18	10	4
			Doble propósito	31	24	16	9
			Silaje	26	24	18	7
Año 2019							
FS ^a				ns	*	ns	**
N				ns	*	ns	ns
FS × N				ns	ns	ns	ns
H				*	ns	ns	ns
FS × H				ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns
Año 2020				ns	*	*	**
FS				ns	ns	ns	ns
N				ns	ns	ns	ns
FS × N				ns	ns	ns	ns
H				ns	ns	ns	ns
FS × H				ns	ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

Anexos al capítulo 5

Cuadro A5.1. Temperaturas medias, máximas y mínimas del aire promedio, humedad relativa promedio, velocidad del viento promedio, radiación solar promedio, déficit de presión de vapor (DPV) promedio y precipitaciones totales durante el período de secado de los granos post-madurez fisiológica para los experimentos utilizados para entrenar los modelos de secado de los granos. La media histórica para cada variable (desde 1985 a 2021) en Pergamino se muestra entre paréntesis como referencia.

Año	Nitrógeno	Fecha de siembra	<i>Silking</i>	Madurez fisiológica	Temperatura media del aire (°C)	Temperatura media mínima del aire (°C)	Temperatura media máxima del aire (°C)	Humedad relativa media (%)	Velocidad media del viento (km h ⁻¹)	Radiación solar media (MJ m ⁻² d ⁻¹)	DPV medio (kPa)	Precipitaciones totales (mm)
2016	200	31-oct	12-ene	7-mar	19,2 (19,9)	13,7 (13,7)	24,6 (26,2)	74,3 (71,9)	7,1 (8,5)	14,1 (17,3)	0,58 (0,67)	253 (163)
2016	200	28-dic	26-feb	22-abr	13,6 (11,8)	8,3 (6,2)	18,9 (17,4)	76,5 (79,0)	9,3 (9,0)	8,4 (9,8)	0,37 (0,29)	172 (168)
2017	250	6-oct	29-dic	18-feb	19,9 (21,7)	11,6 (15,3)	28,3 (28,1)	64,4 (69,1)	7,9 (8,3)	19,4 (19,8)	0,83 (0,83)	37 (183)
2017	200	18-oct	5-ene	22-feb	19,8 (21,1)	11,6 (14,7)	27,9 (27,4)	65,6 (70,2)	7,6 (8,3)	18,0 (18,9)	0,80 (0,77)	83 (198)
2017	250	8-nov	17-ene	7-mar	19,6 (18,5)	13,1 (12,4)	25,9 (24,7)	73,5 (73,7)	8,5 (8,5)	13,9 (15,7)	0,62 (0,58)	294 (239)
2017	250	12-dic	11-feb	12-abr	12,9 (12,7)	7,7 (7,0)	18,0 (18,4)	81,3 (78,8)	8,5 (8,8)	8,3 (10,3)	0,29 (0,31)	194 (175)
2017	200	15-dic	17-feb	18-abr	13,8 (12,9)	8,6 (7,2)	18,8 (18,6)	82,4 (78,8)	8,1 (8,7)	8,1 (10,3)	0,27 (0,31)	307 (141)
2017	250	28-dic	26-feb	28-abr	13,9 (11,9)	8,7 (6,3)	19,2 (17,5)	80,9 (79,5)	8,6 (8,9)	8,8 (9,5)	0,33 (0,28)	234 (125)
2018	0	19-oct	4-ene	22-feb	17,6 (18,4)	11,2 (12,2)	24,0 (24,5)	81,7 (73,7)	7,4 (8,4)	14,4 (15,7)	0,45 (0,58)	271 (340)
2018	250	19-oct	4-ene	26-feb	16,8 (17,5)	10,5 (11,5)	23,2 (23,5)	82,3 (74,6)	7,6 (8,5)	13,5 (14,8)	0,42 (0,54)	230 (342)
2018	250	20-nov	25-ene	26-mar	15,3 (14,6)	9,2 (8,8)	21,3 (20,3)	83,3 (77,4)	8,5 (8,7)	10,5 (11,7)	0,31 (0,38)	181 (241)
2018	0	19-dic	16-feb	17-abr	13,6 (12,8)	8,0 (7,1)	19,1 (18,5)	84,6 (78,8)	8,7 (8,7)	8,3 (10,2)	0,24 (0,31)	164 (147)
2018	250	19-dic	16-feb	21-abr	13,6 (12,6)	7,9 (6,9)	19,3 (18,2)	85,2 (79,1)	8,7 (8,7)	8,4 (10,0)	0,23 (0,30)	163 (135)
2019	250	14-ene	18-mar	29-may	11,3 (10,4)	5,6 (4,6)	17,0 (16,2)	82,5 (78,7)	9,8 (9,3)	8,7 (9,6)	0,22 (0,26)	95 (86)
2019	0	21-oct	31-dic	17-feb	19,7 (20,5)	12,6 (14,1)	26,7 (26,8)	67,6 (70,9)	6,7 (8,5)	15,6 (18,2)	0,77 (0,73)	202 (277)
2019	250	21-oct	31-dic	20-feb	19,6 (20,3)	12,5 (14,0)	26,7 (26,6)	67,6 (71,2)	6,6 (8,5)	15,7 (17,9)	0,77 (0,71)	187 (264)
2019	0	18-dic	17-feb	13-abr	12,1 (12,2)	6,2 (6,5)	18,4 (17,9)	75,9 (78,7)	9,3 (9,0)	7,9 (10,2)	0,35 (0,30)	115 (194)
2019	250	18-dic	17-feb	12-abr	12,5 (12,7)	6,4 (6,9)	18,8 (18,3)	76,1 (78,8)	9,0 (8,8)	8,7 (10,23)	0,35 (0,31)	110 (177)

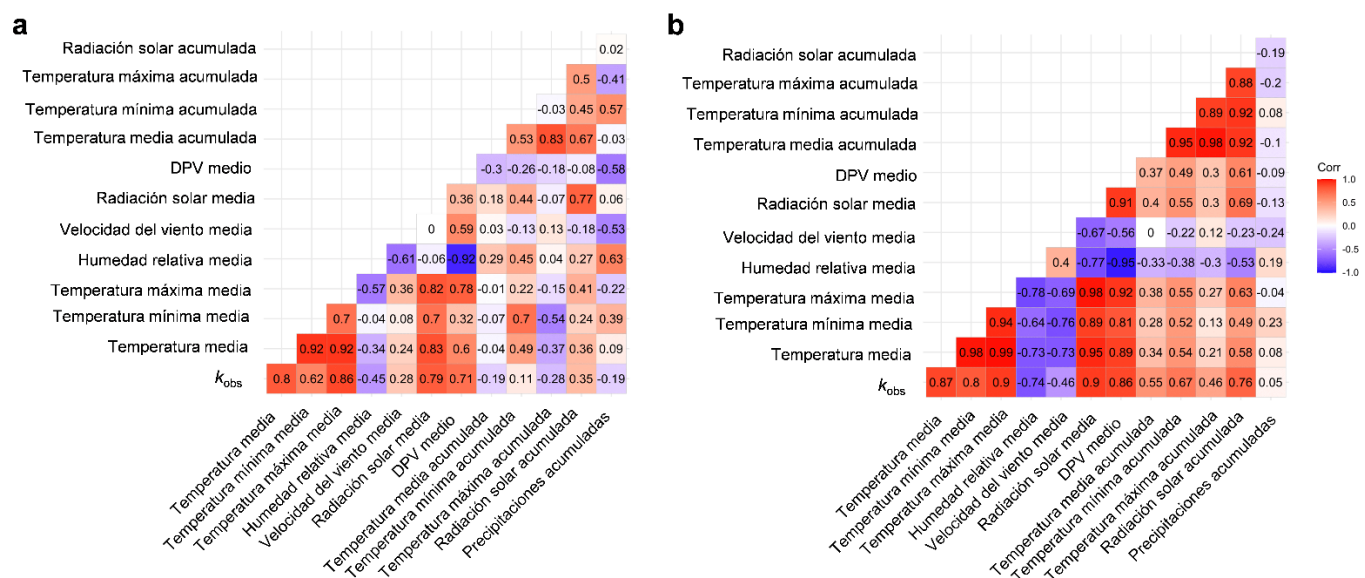


Figura A5.1. Gráficos de correlación entre el coeficiente de secado post-madurez observado (k_{obs}) y las variables meteorológicas explicativas calculadas a partir de a) *silking* hasta la madurez fisiológica y b) desde la madurez fisiológica hasta la humedad de cosecha comercial (14,5%). DPV indica el déficit de presión de vapor.

Anexos al capítulo 6

Cuadro A6.1. Coeficientes de correlación correspondientes a las 7 variables incluidas en el análisis de componentes principales: DMS_p , DMS_{t+h} y DMS_e corresponden a la digestibilidad de la materia seca de planta entera, tallo + hojas y espigas respectivamente, FDN, fibra detergente neutra de la fracción tallo + hojas y espigas y temperatura media del aire (T_{media}) durante el llenado efectivo de los granos (R2-R6).

	DMS_p	DMS_t	FDN tallo + hojas	DMS_e	FDN espigas	$T_{media_{VE-R2}}$	$T_{media_{R2-R6}}$
DMS_p	1,00						
DMS_{t+h}	0,83	1,00					
FDN tallo + hojas	-0,84	-0,96	1,00				
DMS_e	0,17	0,16	-0,13	1,00			
FDN espigas	-0,08	0,10	-0,15	-0,45	1,00		
$T_{media_{VE-R2}}$	-0,76	-0,80	0,79	-0,29	0,11	1,00	
$T_{media_{R2-R6}}$	0,72	0,72	-0,69	0,39	-0,09	-0,95	1,00

Cuadro A6.2. Probabilidades asociadas de los coeficientes de correlación correspondientes a las 7 variables incluidas en el análisis de componentes principales: DMS_p , DMS_{t+h} y DMS_e corresponden a la digestibilidad de la materia seca de planta entera, tallo + hojas y espigas respectivamente, FDN, fibra detergente neutra de la fracción tallo + hojas y espigas y temperatura media del aire (T_{media}) durante el llenado efectivo de los granos (R2-R6). En negrita los casos con $p < 0,05$.

	DMS_p	DMS_{t+h}	FDN tallo + hojas	DMS_e	FDN espigas	$T_{media_{VE-R2}}$	$T_{media_{R2-R6}}$
DMS_p							
DMS_{t+h}	3,98E-07						
FDN tallo + hojas	2,26E-07	4,09E-13					
DMS_e	0,42083459	0,467723113	0,557456295				
FDN espigas	7,08E-01	6,29E-01	4,89E-01	0,025848618			
$T_{media_{VE-R2}}$	1,63E-05	3,12E-06	3,61E-06	0,171457305	0,613534657		
$T_{media_{R2-R6}}$	6,38E-05	8,07E-05	2,10E-04	0,057974833	6,64E-01	1,69E-12	

Cuadro A6.3. Medias correspondientes al inicio, el final y la duración de la ventana de picado expresadas en tiempo térmico. Los datos corresponden a las medias de la fecha de siembra (temprana y tardía), el nivel de nitrógeno (N0 y N250) y el tipo híbrido (grano, doble propósito y silaje) para dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020). Los resultados de ANVA se muestran al final del cuadro.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Inicio de la ventana de picado (°Cd)	Fin de la ventana de picado (°Cd)	Ventana de picado (°Cd)
2019	Temprana	N0	Grano	888	1333	444
			Doble propósito	761	1261	500
			Silaje	841	1211	370
		N250	Grano	764	1153	389
			Doble propósito	740	1045	306
			Silaje	833	1147	315
	Tardía	N0	Grano	958	1356	397
			Doble propósito	1055	1521	466
			Silaje	1044	1491	447
		N250	Grano	1007	1424	417
			Doble propósito	1086	1568	482
			Silaje	1109	1605	496
2020	Temprana	N0	Grano	857	1338	481
			Doble propósito	872	1344	472
			Silaje	913	1413	500
		N250	Grano	942	1405	463
			Doble propósito	1085	1558	472
			Silaje	1098	1579	481
	Tardía	N0	Grano	1422	2200	778
			Doble propósito	1959	2959	1000
			Silaje	2001	3335	1333
		N250	Grano	1442	2219	778
			Doble propósito	1778	2778	1000
			Silaje	1715	2715	1000
Año 2019						
FS ^a				***	**	*
N				ns	ns	ns
FS × N				ns	ns	*
H				*	ns	ns
FS × H				ns	**	ns
N × H				ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns
Año 2020						
FS				***	***	**
N				ns	ns	ns
FS × N				ns	ns	ns
H				***	**	*
FS × H				ns	ns	ns
N × H				ns	ns	ns
FS × N × H				ns	ns	ns

^aFS: fecha de siembra, H: tipo de híbrido, N: nitrógeno. *, **, *** Significativo a valores p de 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente. ns = no significativo.

Cuadro A6.4. Medias correspondientes a digestibilidad de la materia seca (MS) de planta entera, digestibilidad de la materia seca, fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), proteína y energía de tallo + hojas y espigas, y lignina detergente ácida de la fracción tallo + hojas. Los datos corresponden a las medias de la fecha de siembra (temprana y tardía), el nivel de nitrógeno (N0 y N250) y el tipo híbrido (grano, doble propósito y silaje) para dos campañas agrícolas (años 2019 y 2020), excluyendo al híbrido EXP 1517 *bm3* RR2.

Año	Fecha de siembra	Nitrógeno	Tipo de híbrido	Planta entera	Tallo + hojas						Espigas				
				Digestibilidad de la MS (%)	Digestibilidad de la MS (%)	FDN (%)	FDA (%)	LDA (%)	Proteína (%)	Energía (Mg/kg MS ⁻¹)	Digestibilidad de la MS (%)	FDN (%)	FDA (%)	Proteína (%)	Energía (Mg/kg MS ⁻¹)
2019	Temprana	N0	Grano	61,8	36,6	68,4	39,7	6,4	6,5	4,21	83,8	27,8	12,0	6,2	4,26
			Doble propósito	62,0	40,1	66,2	39,9	6,1	6,6	4,21	82,0	33,4	14,9	6,0	4,24
			Silaje	62,0	40,1	65,9	37,7	5,8	6,0	4,22	82,4	29,6	13,1	6,5	4,25
		N250	Grano	61,8	34,7	70,1	38,2	6,3	7,3	4,32	80,6	28,8	12,4	7,7	4,25
			Doble propósito	64,9	40,3	65,7	37,6	6,2	8,1	4,32	78,8	34,2	15,1	7,5	4,24
			Silaje	65,1	38,8	66,4	39,1	6,4	7,7	4,31	80,0	30,8	13,3	7,9	4,25
	Tardía	N0	Grano	62,8	39,7	67,4	42,1	6,5	6,7	4,23	83,8	29,3	12,0	7,1	4,29
			Doble propósito	61,9	40,5	67,1	40,1	6,2	6,7	4,27	80,9	33,1	14,3	7,4	4,27
			Silaje	62,5	42,9	64,6	40,4	6,1	6,8	4,27	82,4	29,8	12,1	8,0	4,28
		N250	Grano	61,9	41,2	66,5	44,1	6,6	6,7	4,24	82,8	29,5	12,1	7,4	4,29
			Doble propósito	61,5	42,5	64,6	40,0	6,3	6,9	4,29	80,7	33,7	14,5	7,6	4,26
			Silaje	62,2	41,4	66,1	41,8	6,3	6,8	4,27	81,2	30,0	12,1	8,5	4,28
2020	Temprana	N0	Grano	64,6	43,6	69,9	37,1	5,4	6,2	4,22	84,0	32,6	11,6	6,7	4,26
			Doble propósito	62,9	44,7	70,4	36,7	5,3	5,8	4,21	83,1	30,8	14,3	6,4	4,24
			Silaje	66,3	45,1	68,6	37,0	5,2	5,8	4,24	84,5	30,2	11,8	6,4	4,25
		N250	Grano	64,8	42,1	68,9	38,0	5,9	7,3	4,26	81,5	30,0	11,7	7,8	4,26
			Doble propósito	65,7	44,2	67,5	36,6	5,4	7,4	4,28	82,1	29,3	13,5	7,3	4,24
			Silaje	65,8	47,3	69,3	34,6	5,2	7,7	4,31	81,5	29,1	12,2	8,0	4,25
	Tardía	N0	Grano	59,8	34,3	64,0	44,5	6,6	7,5	4,24	81,2	28,6	11,4	7,6	4,29
			Doble propósito	59,8	33,0	62,4	47,2	6,5	6,2	4,22	81,2	27,8	12,3	7,5	4,27
			Silaje	61,8	37,0	62,4	43,7	5,9	7,1	4,25	80,7	27,8	11,9	8,1	4,28
		N250	Grano	60,6	35,9	63,7	43,3	6,4	7,9	4,27	80,0	27,4	11,2	8,3	4,29
			Doble propósito	59,2	38,1	62,0	41,4	6,3	7,6	4,28	79,7	27,0	12,5	8,2	4,27
			Silaje	61,87	35,3	59,5	45,4	6,0	7,2	4,24	80,0	27,0	11,9	8,4	4,28

BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, H.K., Cartwright, R.D., Xie, W., Thomas Shier, W., 2006. Aflatoxin and fumonisin contamination of corn (maize, *Zea mays*) hybrids in Arkansas. *Crop Protection* 25 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.02.009>
- Abendroth, L.J., R.W. Elmore, M.J. Boyer, and S.K. Marlay. 2011. Corn Growth and Development. PMR 1009. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa.
- Afuakwa, J.J., Crookston, R.K., 1984. Using the Kernel Milk Line to Visually Monitor Grain Maturity in Maize 1. *Crop Sci.* 24, 687–691. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400040015x>
- Algido Coletti, E. 2019. Manejo Agronómico del silaje: Ventana y Momento de Picado. Disponible en <https://www.kws.com/ar/es/archiv/consultoria/comunicado-tecnico/manejo-agronomico-del-silaje-ventana-y-momento-de-picado/>
- Alvarez Prado, S., Gambín, B.L., Daniel Novoa, A., Foster, D., Lynn Senior, M., Zinselmeier, C., Otegui, M.E., Borrás, L., 2013. Correlations between parental inbred lines and derived hybrid performance for grain filling traits in maize. *Crop Sci.* 53, 1636–1645. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.01.0035>
- Alvarez Prado, S., López, CG., Gambín, BL., Abertondo, VJ., Borrás, L., 2013. Dissecting the genetic basis of physiological processes determining maize kernel weight using the IBM (B73×Mo17) Syn4 population. *Field Crops Res.* 145:33–43.
- Ammalahti, E., Brunow, G., Bardet, A., Robert, D., Kilpelainen, I.J. 1998. Identification of side-chain structures in a poplar lignin using three-dimensional HMQC-HOHAHA NMR spectroscopy. *J Agric Food Chem.* 46:5113–5117. <https://doi.org/10.1021/jf980249o>
- Andrade, F. H., Echarte, L., Rizzalli, R., Della Maggiora, A., Casanovas, M. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42(4), 1173–1179. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1173>
- Andrade, F. H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39(2), 453–459. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200026x>
- Andrade, F.H., Cirilo, A.G., Uhart, S.A., Otegui, M.E. 1996. *Ecofisiología del cultivo de Maíz*. Editorial La Barrosa-EEA INTA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp.
- Andrade, F.H., Ferreiro, M.A., 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48, 155–165.
- Andrade, F.H., Uhart, S.A., Cirilo, A., 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Res.* 32, 17–25. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90018-I](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90018-I)
- Andrieu, J., Demarquilly, C., Dardenne, P., Barrière, Y., Lila, M., Maupetit, P., Rivière, F., Femenias, N., 1993. Composition and nutritive value of whole maize plants fed fresh to sheep. I. Factors of variation. *Annales de Zootechnie* 42, 221–249. <https://doi.org/10.1051/animres:19930301>
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercu, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Res.* 184, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Badu-Apraku, B., Hunter, RB., Tollenaar, M., 1983. Effect of temperature during grain filling on whole plant and grain yield in maize (*Zea mays* L.). *Can. J. Plant Sci.* 63:357–363. <https://doi.org/10.4141/cjps83-040>
- Barnett, K.H., Pearce, R.B., 1983. Source-Sink Ratio Alteration and Its Effect on Physiological Parameters in Maize 1. *Crop Sci.* 23, 294–299. <https://doi.org/10.2135/cropsci1983.0011183x002300020028x>
- Barrière, Y., Mèchin, V., Denoue, D., Bauland, C., Laborde, J. 2010. QTL for Yield, Earliness, and Cell Wall Quality Traits in Topcross Experiments of the F838 × F286 Early Maize RIL Progeny. *Crop Sci.* 50:1761-1772.

- Barrière, Y., Mèchin, V., Riboulet, C., Guillaumie, S., Thomas, J., Bosio, M., Fabre, F., Goffner, D., Pichon, M., Lapierre, C., Martinant, JP. 2009. Genetic and genomic approaches for improving biofuel production from maize. *Euphytica* 170:183–202.
- Barrière, Y., Argillier, O. 1993. Brown-midrib genes of maize: a review. *Agronomie, EDP Sciences*, 13(10), pp.865-876.
- Barrière, Y., Argillier, O., Chabbert, B., Tollier, M.T. and Monties, B. 1994. Breeding silage maize with brown-midrib genes. Feeding value and biochemical characteristics 3. *Agronomie* 14:15–25.
- Barrière, Y., Guillaumie, S., Pichon, M., Emile, JC. 2009. Breeding for Silage Quality Traits in Cereals. En “Handbook of plant breeding”. Vol.3 “Cereals”. Editado por Marcelo J.Carena. pp 367-414.
- Bartón, K. 2022. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.46.0, <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B.M., Walker, S.C., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* 67. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- Bekavac, G., Stojakovic, M., Jockovic, D., Bocanski, J., Purar, B. 1998. Path analysis of stay-green trait in maize. *Cereal Res. Commun.* 26:161–167.
- Bertoia, L., López, C., Burak, R., 2006. Biplot analysis of forage combining ability in maize landraces. *Crop Sci* 46, 1346–1353. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.09-0336>
- Bertoia, L.M. 2010. Momento de picado en maíz: ¿Productores versus contratistas? Sitio argentino de Producción Animal. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_reservas/reservas_silos/152-picado.pdf
- Bertoia, L.M., Aulicino, M.B., 2014. Maize forage aptitude: Combining ability of inbred lines and stability of hybrids. *Crop Journal* 2, 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.07.002>
- Bewley, JD., Black, M. 1985. *Seeds: Physiology of development and germination*. Plenum, New York, NY.
- Blaxter, KL., Wainman, FW., Wilson, RS. 1961. The regulation of food intake by sheep. *Anim. Prod.* 3:51–61.
- Block E., Muller LD., Griel LC., Garwood JR., Garwood, DL. 1981. Brown-midrib-3 corn silage and heat extruded soybeans for early lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 64:1813-1825.
- Blum, A., 1998. Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilisation (Reprinted from *Wheat: Prospects for global improvement*, 1998). *Euphytica* 100, 77–83.
- Blum, A., Sinmena, B., Mayer, J., Golan, G., Shpiler, L., 1994. Stem reserve mobilisation supports wheat-grain filling under heat stress. *Funct. Plant Biol.* 21, 771-781. <https://doi.org/10.1071/PP9940771>
- Bolsa de Cereales. 2023. Informe cierre de campana Maíz 2022/23. <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes>
- Bonelli, L.E., Monzon, J.P., Cerrudo, A., Rizzalli, R.H., Andrade, F.H., 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. *Field Crops Res.* 198, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.003>
- Borrás, L., Otegui, M.E., 2001. Maize kernel weight response to postflowering source - Sink ratio. *Crop Sci.* 41, 1816–1822. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1816>
- Borrás, L., Slafer, G.A., Otegui, M.E., 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: A quantitative reappraisal. *Field Crops Res.* 86, 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.002>
- Borrás, L., Westgate, M. 2006. Predicting maize kernel sink capacity early in development. *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.03.001>
- Borrás, L., Westgate, M.E., Otegui, M.E., 2003. Control of kernel weight and kernel water relations by post-flowering source-sink ratio in maize. *Ann Bot* 91. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg090>
- Borrás, L., Zinselmeier, C., Senior, M.L., Westgate, M.E., Muszynski, M.G., 2009. Characterization of grain-filling patterns in diverse maize germplasm. *Crop Sci.* 49, 999–1009. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.08.0475>
- Bout, S., Vermerris, W. 2003. A candidate-gene approach to clone the sorghum brown midrib gene encoding caffeic acid O-methyltransferase. *Mol. Gen. Genomics* 269: 205–214.

- Breteler, H., 1976. Nitrogen fertilization, yield and protein quality of a normal and a high-lysine maize variety. *J Sci Food Agric* 27, 978–982. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740271016>
- Brooking, I.R., 1990. Maize ear moisture during grain-filling, and its relation to physiological maturity and grain-drying. *Field Crops Res.* 23, 55–68. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90097-U](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90097-U)
- Brown Jr R.M., Saxena, I.M., Kudlicka, K. 1996. Cellulose biosynthesis in higher plants. *Trends Plant Sci.* 1:149156.
- Bruun, T.B., Mertz, O., Elberling, B., 2006. Linking yields of upland rice in shifting cultivation to fallow length and soil properties. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.012>
- Burnham CR., Brink RA. 1932. Linkage relations of a second brown midrib gene (bm2) in maize. *J Am Soc Agron* 24:960-963.
- Buxton, DR., Mertens, DR., Moore, KJ. 1995. Forage quality for ruminants: plant and animal considerations. *Prof. Anim. Sci.* 11: 121–131.
- CACF. Cámara Argentina de Contratistas Forrajeros. 2023. <https://www.ensiladores.com.ar/>
- Cagnola, J.I., Parco, M., Rotili, D.H., Ploschuk, E.L., Curin, F., Amas, J.I., Luque, S.F., Maddonni, G.A., Otegui, M.E., Casal, J.J., 2021. Artificial selection for grain yield has increased net CO₂ exchange of the ear leaf in maize crops. *J. Exp. Bot.* 72, 3902–3913. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab119>
- Camarasa, J.N., Barletta, P.F. 2019. Evaluación de híbridos de maíz para ensilaje en tres campañas. *RTA Vol. 10. N°40.*
- Camarasa, J.N., Barletta, P.F., Bertín, OD. 2015. Fechas de siembra temprana y tardía en maíces para ensilaje. *RTA Vol.10. N°1.*
- Camarasa, J.N., Barletta, P.F., Bertín, OD. 2016. Comparación de híbridos de maíz para ensilaje en dos campañas. *RTA Vol. 10. N°31.*
- Camargos, S.M., Valente Soares, L.M., Sawazaki, E., Bolonhezi, D., Castro, J.L., Bortolotto, N., 2003. Accumulation of fumonisins B1 and B2 in freshly harvested Brazilian commercial maize at three locations during two nonconsecutive seasons. *Mycopathologia* 155, 219–228. <https://doi.org/10.1023/A:1021167925337>
- CAMPI. 2023. Cámara Argentina de Maíz Pisingallo. https://popchamber.com.ar/?page_id=72&lang=es
- Carpita, N.C. 1996. Structure and Biogenesis of the Cell Walls of Grasses. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 47(1): 445-476. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.47.1.445>
- Carrete, J.R., Scheneiter, O. 2012. Maíz para silaje. En “Bases para el manejo del cultivo de maíz”. ISBN:978-987-679-141-0
- Castañares, E., Martínez, M., Cristos, D., Rojas, D., Lara, B., Stenglein, S., Dinolfo, M.I., 2019. Fusarium species and mycotoxin contamination in maize in Buenos Aires province, Argentina. *Eur J Plant Pathol* 155, 1265–1275. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01853-5>
- Cavaleri, A.J., Smith, O.S., 1985. Grain Filling and Field Drying of a Set of Maize Hybrids Released From 1930 to 1982 1. *Crop Sci.* 25, 856–860. <https://doi.org/10.2135/cropsci1985.0011183X002500050031>
- Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M., Sadras, V.O., 2014. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. *Field Crops Res.* 168, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.08.005>
- Cerrudo, A., Di Matteo, J., Fernandez, E., Robles, M., Pico, L.O., Andrade, F.H., 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop Pasture Sci* 64, 580–587. <https://doi.org/10.1071/CP13201>
- Chabbert B., Tollier MT., Monties B., Barrière Y., Argillier, O. 1994. Biological variability in lignification of maize. Part 2: Expression of the brown midrib bm2 mutation. *J Sci Food Agric*, 64:455-460.
- Chazarreta, Y.D., Amas, J.I., Otegui, M.E., 2021. Kernel filling and desiccation in temperate maize: Breeding and environmental effects. *Field Crops Res.* 271, 108243. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108243>
- Cherney, J.H., Cherney, D.J.R., Akin, D.E., and Axtell, J.D. (1991). Potential of brown-midrib, low lignin mutants for improving forage quality. *Adv. Agron.* 46:157–198.

- Chinwuba P.M., C.O. Grogan y M.S. Zuber. 1961. Interactions of detasseling, sterility and spacing on yield of maize hybrids. *Crop Sci.* 24: 1141-1145. <https://doi.org/10.2135/cropsci1961.0011183X000100040015x>
- Choi, Y.S., Gim, H.J., Ho, C.H., Jeong, S.J., Park, S.K., Hayes, M.J., 2017. Climatic influence on corn sowing date in the Midwestern United States. *International Journal of Climatology* 37, 1595–1602. <https://doi.org/10.1002/joc.4799>
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Res.* 121, 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.009>
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2014. Understanding global and historical nutrient use efficiencies for closing maize yield gaps. *Agron. J.* 106, 2107–2117. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0025>
- Cicchino, M., Rattalino Edreira, J.I., Otegui, M.E., 2010. Heat stress during late vegetative growth of maize: effects on phenology and assessment of optimum temperature. *Crop Sci.* 50, 1432–1436. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.07.0400>
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1994a. Sowing date and maize productivity: I.Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34, 1039–1043. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040037x>
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1994b. Sowing date and maize productivity: II.Kernel number determination. *Crop Sci.* 34, 1044–1046. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040038x>
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36, 325–331. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600020019x>
- Cochran, R.C., Coblenz, W.K., Vanzant, E.S. 2007. Animal methods for evaluating forage quality. In: *Forages: The Science of Grassland Agriculture*, 6e (eds. R.F Barnes, C.J. Nelson, K.J. Moore and M. Collins), 541–552. Ames, IA: Blackwell Publishing Professional.
- Cone, J.W., Van Gelder, A.H., Van Schooten, H.A., Groten, J.A.M. 2007. Effects of forage maize type and maturity stage on in vitro rumen fermentation characteristics. *Wageningen Journal of Life Sciences.* 55: 139-154.
- Connor, D.J., Loomis, R.S., Cassman, K.G., 2011. Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems, *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems.* <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974199>
- Correndo A, Moro Rosso L, Schwalbert R, Hernandez C, Bastos L, Nieto L, Holzworth D, Ciampitti I. 2022. *metrica: Prediction Performance Metrics.* R package version 2.0.1, <https://CRAN.R-project.org/package=metrica>.
- Cox, W.J., Cherney, J.H., Cherney, D.J.R., Pardee, W.D. 1994. Forage Quality and Harvest Index of Corn Hybrids under Different Growing Conditions. *Agron J.* 86:277-28.
- Coyos, T., Borrás, L., Gambin, B.L., 2018. Site-specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown Maize in Central Argentina. *Agron. J.* 110, 1544–1553. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0520>
- Crasta, O.R., Cox, W.J., Chernet, J.H. 1997. Factors Affecting Maize Forage Quality Development in the Northeastern USA. *Agron. J.* 89:251-256.
- Curin, F., Severini, A.D., González, F.G., Otegui, M.E., 2020. Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crops Res.* 246, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107683>
- Cusicanqui, J.A., Lauer, J.G. 1999. Plant Density and Hybrid Influence on Corn Forage Yield and Quality. *Agronomy Journal*, 91(6), 911.
- D’Andrea, K.E., Otegui, M.E., Cirilo, A.G., Eyherabide, G., 2006. Genotypic variability in morphological and physiological traits among maize inbred lines - Nitrogen responses. *Crop Sci.* 46, 1266–1276. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0195>
- D’Andrea, K.E., Otegui, M.E., Cirilo, A.G., Eyherabide, G.H., 2009. Ecophysiological traits in maize hybrids and their parental inbred lines: Phenotyping of responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Res.* 114, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.016>

- D'Andrea, K.E., Otegui, M.E., Cirilo, A.G., Eyherabide, G.H., 2013. Parent-Progeny Relationships between Maize Inbreds and Hybrids: Analysis of Grain Yield and Its Determinants for Contrasting Soil Nitrogen Conditions. *Crop Sci.* 53, 2147–2161. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.02.0111>
- D'Andrea, K.E., Parco, M., Maddonni, G.Á., 2022. Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: II. Growth per plant, biomass partitioning to apical and sub-apical ears during the critical period and kernel setting. *Field Crops Res.* 284. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108557>
- D'Andrea, K.E., Otegui, M.E., Cirilo, A.G., 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105:228–239.
- Das, S.K. 2019. Biodegradable plastics: ecofriendly plastics. *Journal of Medicinal Plants Studies* 2019; 7(2): 103-105.
- Daynard, T.B., Duncan, W.G., 1969. The Black Layer and Grain Maturity in Corn. *Crop Sci.* 9, 473–476. <https://doi.org/10.2135/cropsci1969.0011183x000900040026x>
- Daynard, T.B., Tanner, J.W., Hume, D.J., 1969. Contribution of Stalk Soluble Carbohydrates to Grain Yield in Corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci.* 9, 831–834. <https://doi.org/10.2135/cropsci1969.0011183x000900060050x>
- de Campos Bernardi, A.C., de Souza, G.B., Polidoro, J.C., Paiva, P.R.P., de Mello Monte, M.B., 2011. Yield, quality components, and nitrogen levels of silage corn fertilized with urea and zeolite. *Commun Soil Sci Plant Anal* 42, 1266–1275. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.571980>
- De Emilio, M. 2018. El futuro del maíz argentino. El camino trazado es hacia el agregado de valor. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_el_futuro_del_maiz_argentino_30-07-2018.pdf.
- Delmer, D.P. 1999. Cellulose biosynthesis: exciting times for a difficult field of study. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50:245-276.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2017. InfoStat Version. URL. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Cordoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Dutton, M.F., 1996. Fumonisin, mycotoxins of increasing importance: Their nature and their effects. *Pharmacol Ther* 70, 137–161. [https://doi.org/10.1016/0163-7258\(96\)00006-X](https://doi.org/10.1016/0163-7258(96)00006-X)
- Earle, R., Earle, M., 2004. Unit Operations in Food Processing. The New Zealand Institute of Food Science & Technology (Inc.) (Web Edition – Accessed: 29 September 2022).
- Echarte, L., Andrade, F.H., Sadras, V.O., Abbate, P.E., 2006. Kernel weight and its response to source manipulations during grain filling in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Res.* 96: 307–312.
- Echarte, L., Tollenaar, M., 2006. Kernel set in maize hybrids and their inbred lines exposed to stress. *Crop Sci.* 46, 870–878. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0204>
- Edmeades G.O., J. Bolanos, A. Elings, J.M. Ribaut, M. Banziger y M.E. Westgate. 2000. The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. *Physiology and Modeling Kernel Set in Maize*. Wiley. p. 43-73. <https://doi.org/10.2135/cssaspecpub29.c4>
- Egli, D.B. 1998. *Seed Biology and the Yield of Grain Crops*. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Elmore, R. W., Roeth, F. W. 1999. Corn kernel weight and grain yield stability during post-maturity drydown. *Journal of Production Agriculture*, 12(2), 300–305. <https://doi.org/10.2134/jpa1999.0300>
- Elmore, R., Abendroth, L. 2010. In-Field Drydown Rates and Harvest. Iowa Integrated Crop Management News, Iowa State University. <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2010/09/field-drydown-rates-and-harvest>.
- Emerson, R.A. 1935. Cornell University. Agric. Exp. Stn. Memoir No. 180.
- Evans, J. D. 1996. *Straightforward statistics for the behavioral sciences*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing.
- FADA. Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina. 2023. Monitor de exportaciones agroindustriales. Año 2022. <https://fundacionfada.org/informes/>

- Fandohan, P., Gnonlonfin, B., Hell, K., Marasas, W.F.O., Wingfield, M.J., 2006. Impact of indigenous storage systems and insect infestation on the contamination of maize with fumonisins. *Afr J Biotechnol* 5, 546–552.
- FAO. Food and Agriculture Organisation. 2023. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Fernández, J. A., Messina, C. D., Salinas, A., Prasad, P. V., Nippert, J. B., Ciampitti, I. A. 2022. Kernel weight contribution to yield genetic gain of maize: a global review and US case studies. *Journal of Experimental Botany*, 73(11), 3597–3609. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac103>
- Fernandez, J.A., Messina, C.D., Rotundo, J.L., Ciampitti, I.A., 2021. Integrating nitrogen and water-soluble carbohydrates dynamics in maize: A comparison of hybrids from different decades. *Crop Sci.* 61, 1360–1373. <https://doi.org/10.1002/csc2.20338>
- Ferraretto, L.F., Shaver, R.D. 2015. Effects of whole-plant corn silage hybrid type on intake, digestion, ruminal fermentation, and lactation performance by dairy cows through a meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 98:2662–2675
- Finlay, K., Wilkinson, G. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 14:742–754.
- Fischer, K.S., Palmer, F.E., 1984. Tropical maize, in: Goldsworthy, P.R., Fischer, N.M. (Eds.), *The Physiology of Tropical Field Crops*. Wiley, Chichester, pp. 213–248.
- Fritz, J.O., Moore, K.J., Jaster, E.H. 1990. Digestion kinetics and cell wall composition of brown midrib sorghum × sudangrass morphological components. *Crop Sci.* 30: 213–219.
- Galizia, L.A., Munaro, E.M., Cirilo, A.G., Otegui, M.E., D’Andrea, K.E., 2020. Phenotypic plasticity for biomass partitioning in maize: genotype effects across a range of environments. *Field Crops Res.* 256, 107914. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107914>
- Gallo, K.P., Daughtry, C.S.T., 1986. Techniques for Measuring Intercepted and Absorbed Photosynthetically Active Radiation in Corn Canopies 1. *Agron. J.* 78, 752–756. <https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800040039x>
- Gambín, B.L., Borrás, L., 2010. Resource distribution and the trade-off between seed number and seed weight: A comparison across crop species. *Ann. Appl. Biol.* 156, 91–102. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00367.x>
- Gambín, B.L., Borrás, L., Otegui, M.E., 2007. Kernel water relations and duration of grain filling in maize temperate hybrids. *Field Crops Res.* 101, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.001>
- Gambín, B.L., Borrás, L., Otegui, M.E., 2008. Kernel weight dependence upon plant growth at different grain-filling stages in maize and sorghum. *Aust. J. Agric. Res.* 59, 280–290. <https://doi.org/10.1071/AR07275>
- Gambín, B.L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi, L. 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems* 146:11–19.
- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J., 2012. *improve nitrogen-use efficiency*, Second Edi. ed, *Crop Physiology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6/00008-X>
- Gordon A.J., Neudoerffer T.S. 1973. Chemical and in vivo evaluation of a brown midrib mutant of *Zea mays*. I. Fiber, lignin and amino-acid composition and digestibility for sheep. *J Sci Food Agric* 24: 565–577.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M., Cullot, J. Ph. 1992. Field–crop systems of the Pampas. En: Pearson C.J. (ed) *Ecosystems of the world. Field crops ecosystems*. Elsevier Scientific, Amsterdam, pp 413–450.
- Hallauer, A.R., Russell, W.A., 1961. Effects of Selected Weather Factors on Grain Moisture Reduction from Silking to Physiologic Maturity in Corn 1. *Agron. J.* 53, 225–229. <https://doi.org/10.2134/agronj1961.00021962005300040006x>
- Halpin, C., Holt, K., Chojek, J. 1998. Brown-midrib maize (bm1) – a mutation affecting the cinnamyl alcohol dehydrogenase gene. *Plant J.* 14:545–553.
- Hatfield, R.D. 1993. Cell Wall Polysaccharide Interactions and Degradability. En *Forage Cell Wall Structure and Digestibility*. <https://doi.org/10.2134/1993.foragecellwall.c12>
- Hawkins, G.E., Parr, G.E., Little, J.A. 1964 Composition, intake, digestibility and prediction of digestibility of coastal Bermudagrass hay. *J. Dairy Sci.* 47:865–870.

- Henderson, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, 33, 29-32.
- Henderson, S.M., Perry, R., 1966. *Agricultural Process Engineering*, 2nd ed. AVI Publishing Company, Westport-Conn.
- Hisse, I.R., D'Andrea, K.E., Otegui, M.E., 2019. Source-sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: Responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Res.* 230, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.011>
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J.P., Whitbread, A.M., Hunt, J., van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., Keating, B.A., 2014. APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environ. Model. Softw.* 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Jacobs, B.C., Pearson, C.J., 1991. Potential yield of maize, determined by rates of growth and development of ears. *Field Crops Res.* 27, 281–298. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90067-6)
- Jacobs, B.C., Pearson, C.J., 1992. Pre-flowering growth and development of the inflorescences of maize: I. Primordia production and apical dome volume. *J. Exp. Bot.* 43, 557–563. <https://doi.org/10.1093/jxb/43.4.557>
- Jiang, W., Thapa, S., Jessup, K.E., Hao, B., Hou, X., Marek, T., Becker, J., Bell, J., Xue, Q., 2020. Corn response to later than traditional planting dates in the Texas High Plains. *Crop Sci.* 60, 1004–1020. <https://doi.org/10.1002/csc.2.20042>
- Jones, R.J., Schreiber, B.M.N., Roessler, J.A., 1996. Kernel sink capacity in maize: Genotypic and maternal regulation. *Crop Sci.* 36, 301–306. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600020015x>
- Jones C.A., Kiniry J.R. 1986. *CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development*. College Station: Texas A&M University Press.
- Jones, R.J., Simmons, S.R., 1983. Effect of Altered Source-Sink Ratio on Growth of Maize Kernels 1. *Crop Sci.* 23, 129–134. <https://doi.org/10.2135/cropsci1983.0011183x002300010038x>
- Jorgenson, L.R. 1931. Brown midrib in maize and its lignage relations. *J Am Soc Agron* 23:549-557.
- Jung, H.J.G., Jorgensen, M.A., Linn, J.G., Engels, F.M. 2000. Impact of accessibility and chemical composition on cell wall polysaccharide degradability of maize and lucerne stems. *J. Sci. Food Agric.* 80(3): 419-427. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200002\)80:3<419::AID-JSFA544>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200002)80:3<419::AID-JSFA544>3.0.CO;2-I)
- Jung, H.G., Samac, D.A., Sarath, G. 2012. Modifying crops to increase cell wall digestibility. *Plant Sci.* 185–186:65–77.
- Kang, M.S., Colbert, T.R., Zuber, M.S., Horrocks, R.D., 1975. Grain moisture loss as related to dry down rates in corn. *Am. Soc. Agron. Abstr.* p. 57.
- Kang, M.S., Zuber, M.S., Krause, G.F., 1983. Path coefficient analyses of grain yield and harvest grain moisture in maize. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 60: 253--256. p. 57.
- Karnatam, K.S., Mythri, B., Un Nisa, W., Sharma, H., Meena, T.K., Rana, P., Vikal, Y., Gowda, M., Dhillon, B.S., Sandhu, S., 2023. Silage maize as a potent candidate for sustainable animal husbandry development—perspectives and strategies for genetic enhancement. *Front Genet* 14, 1–24. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1150132>
- Ke, F., Ma, X., 2021. Responses of maize hybrids with contrasting maturity to planting date in Northeast China. *Sci Rep* 11, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95328-5>
- Kebebe, A. Z., Reid, L. M., Zhu, X., Wu, J., Woldemariam, T., Voloaca, C., & Xiang, K. 2015. Relationship between kernel drydown rate and resistance to gibberella ear rot in maize. *Euphytica; Netherlands Journal of Plant Breeding*, 201(1), 79–88. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1185-2>

- Kiesselbach, T.A. 1950. Progressive Development and Seasonal Variations of the Corn Crop 53.
- Kiniry, JR., Otegui, ME. 2000. Processes Affecting Maize Grain Yield Potential in Temperate Conditions. En: Otegui, M.E. y Slafer, G.A. (eds). Physiological bases for maize improvement. Food Products Press, The Haworth Press. pp 31-46.
- Kruse, S., Herrmann, A., Kornher, A., Taube, F., 2008. Genotypic and environmental variation in water soluble carbohydrate content of silage maize. *Field Crops Res.* 106, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.11.009>
- Kuc J, Nelson OE, Flanagan P. 1968. Degradation of abnormal lignins in the brown midrib mutants and double mutants of maize. *Phytochemistry (Oxf)* 7:1345-1346.
- Lacasa, J., Ciampitti, I.A., Amas, J.I., Curín, F., Luque, S.F., Otegui, M.E., 2022. Breeding effects on canopy light attenuation in maize: A retrospective and prospective analysis. *J. Exp. Bot.* 73, 1301–1311. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab503>
- Lamptey, S., Yeboah, S., Lingling, Li. 2018. Response of Maize Forage Yield and Quality to Nitrogen Fertilization and Harvest Time in Semi-arid Northwest China. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry.* 1(2): 1-10.
- Lauer, J. 1998. Corn kernel milk stage and silage harvest moisture. Proceedings of the 1998 Forage Symposium. Disponible en <http://corn.agronomy.wisc.edu/AA/A018.aspx> (Accedido el 26.08.2020).
- Lawrence, J.R., Ketterings, Q.M., Cherney, J.H., 2008. Effect of nitrogen application on yield and quality of silage corn after forage legume-grass. *Agron J* 100, 73–79. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0071>
- Lechtenberg VL., Muller LD., Bauman LF., Rhykerd CL., Barnes RF.1972. Laboratory and in vivo evaluation of inbred and F2 populations of brown-midrib mutants of *Zea mays* L. *Agron J* 64, 657-680.
- Lemcoff, J.H., Loomis, R.S., 1994. Nitrogen and density influences on silk emergence, endosperm development, and grain yield in maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Res.* 38, 63–72. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90001-9)
- Liu, K.; Ma, B.L.; Luan, L.; Li, C. Nitrogen, phosphorus, and potassium nutrient effects on grain filling and yield of high-yielding summer corn. *J. Plant Nutr.* 2011, 34, 1516–1531. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.585208>
- Loader, C., Sun, J., Technologies, L., Liaw, C. 2023. Package locfit. <https://CRAN.R-project.org/package=locfit>
- Long, S.P., Zhu, X.G., Naidu, S.L., Ort, D.R., 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell Environ.* 29, 315–330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>
- Loomis, R.S., Amthor, J.S., 1999. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. *Crop Sci.* 39, 1584–1596. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961584x>
- Loomis, R.S., Connor, D.J. 1992. *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems.* Cambridge University Press, Cambridge, 32-59. <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9781139170161>
- Lorenz, AJ., Coors, JG., De Leon, N., Wolfrum, EJ., Hames, BR., Sluiter, AD., Weimer, PJ. 2010. Characterization, genetic variation, and combining ability of maize traits relevant to the production of cellulosic ethanol. *Crop Sci.* 49(1):85–98.
- Luque, S.F., Cirilo, A.G., Otegui, M.E., 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Res.* 95, 383–397. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.007>
- Ma, B. L. and Dwyer, L. M. 2001. Maize kernel moisture, carbon and nitrogen concentrations from silking to physiological maturity. *Can. J. Plant Sci.* 81: 225-232. <https://doi.org/10.4141/P00-073>
- Maddonni, G.A., 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107, 325–345. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0478-9>
- Maddonni, G.A., Cirilo, A.G., Otegui, M.E. 2006. Row Width and Maize Grain Yield. *Agron. J.* 98, 1532-1543. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0038>

- Maddonni, G.A., Otegui, M.E. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Res.* 48, 81-87. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00035-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00035-4).
- Maddonni, G.A., Otegui, M.E., 2004. Intra-specific competition in maize: Early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Field Crops Res.* 85, 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00104-7)
- MAGyP. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2023. <https://www.magyp.gob.ar/datosabiertos/>
- Maiorano, A., Fanchini, D., Donatelli, M., 2014. MIMYCS.Moisture, a process-based model of moisture content in developing maize kernels. *Eur. J. Agron.* 59, 86–95.
- Maiorano, A., Reyneri, A., Magni, A., Ramponi, C., 2009. A decision tool for evaluating the agronomic risk of exposure to fumonisins of different maize crop management systems in Italy. *Agric Syst* 102, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.06.003>
- MAIZAR, 2010. “Serie de estudios sectoriales: Caso del maíz”. Disponible en <http://www.maizar.org.ar/documentos/maiz-informe-final.pdf>.
- MAIZAR, 2017. La cadena del maíz Flint y la molienda seca. Disponible en <https://www.maizar.org.ar/vertext.php?id=527>
- Maltese, N.E., Maddonni, G.A., Melchiori, R.J.M., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P., 2020. Crop nitrogen status of early- and late-sown maize at different plant densities. *Field Crops Res.* 258, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107965>
- Maltese, N.E., Melchiori, R.J.M., Maddonni, G.A., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P., 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Res.* 231, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.007>
- Martinez-Feria, R.A., Licht, M.A., Ordóñez, R.A., Hatfield, J.L., Coulter, J.A., Archontoulis, S.V. 2019. Evaluating maize and soybean grain dry-down in the field with predictive algorithms and genotype-by-environment analysis. *Sci. Rep.* 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43653-1>
- Martínez-Santamaría, A., Borlandelli, MS., Bertoia, L. 2018. Variabilidad de la duración del período en híbridos de maíz para silaje. XI Congreso Nacional de Maíz. 21-24 de Agosto de 2018. Pergamino. Argentina.
- Melchiori, R.J.M., Caviglia, O.P., 2008. Maize kernel growth and kernel water relations as affected by nitrogen supply. *Field Crops Res.* 108, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.05.003>
- Mercau, J.L., Otegui, M.E., 2015. A Modeling Approach to Explore Water Management Strategies for Late-Sown Maize and Double-Cropped Wheat-Maize in the Rainfed Pampas Region of Argentina 5, 351–373. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel5.c13>
- Moises, C., Andrade, F.H., Monzon, J.P., Reussi Calvo, N.I., Cerrudo, A., 2024. Nitrogen deficiency in maize fields of the Southern Pampas does not affect kernel number but reduces weight per kernel. *Field Crops Res.* 312, 109394. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109394>
- Monneveux, P., Zaidi, P.H., Sanchez, C., 2005. Population density and low nitrogen affects yield-associated traits in tropical maize. *Crop Sci.* 45, 535–545. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0535>
- Monteith, J.L., 1965. Radiation and crops. *Experimental Agriculture*, 1(4), pp.241-251.
- Moore, KJ., Lenssen, AW., Fales, SL. 2020. Factors Affecting Forage Quality. In: *Forages: The Science of Grassland Agriculture*, Volume II, Seventh Edition. Edited by Kenneth J. Moore, Michael Collins, C. Jerry Nelson and Daren D. Redfearn. Chapter 38.
- Muchow, R.C., 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. I. Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops Res.* 18: 1-16. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(88\)90055-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(88)90055-X)
- Muchow, R.C., Davis, R., 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18: 17-30. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(88\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(88)90056-1)
- Muchow, RC., 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Res.* 23: 145–158.

- Muller LD., Barnes FR., Bauman LF., Colenbrander VF. 1971. Variation in lignin and other structural components of brown midrib mutant of maize. *Crop Sci.* 11:413-415
- Naharudin, N.S., Abu Sin, M., Saleh, G., 2021. Genetic Variance and Correlation of Forage Yield and Quality Traits in Tropically Adapted Maize. *Sains Malays* 50, 45–52. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5001-05>
- Nasielski, J., Deen, B., 2019. Nitrogen applications made close to silking: Implications for yield formation in maize. *Field Crops Res.* 243, 107621. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107621>
- Nielsen, R.L. Field drydown of mature corn grain. *Corny News Network - Purdue University* 2018. Disponible en <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/GrainDrying.html>
- Nóia Júnior, R.S., Sentelhas, C.P. 2019. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Nino Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems.* 173, 254-267. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>
- Norwood, C.A., 2001. Dryland corn in western Kansas: Effects of hybrid maturity, planting date, and plant population. *Agron J* 93, 540–547. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.933540x>
- Olmedo Pico, L.B., Savin, R., Schussler, J.R., Vyn, T.J., 2023. Late-vegetative and reproductive-stage nitrogen determinants of kernel weight in maize. *European Journal of Agronomy* 148, 126872. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126872>
- Olmedo Pico, L.B., Vyn, T.J., 2021. Dry matter gains in maize kernels are dependent on their nitrogen accumulation rates and duration during grain filling. *Plants* 10. <https://doi.org/10.3390/plants10061222>
- Olmedo Pico, L.B., Zhang, C., Vyn, T.J., 2021. The central role of ear nitrogen uptake in maize endosperm cell and kernel weight determination during the lag period. *Field Crops Res.* 273, 108285. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108285>
- Opsi, F., Fortina, R., Borreani, G., Tabacco, E., López, S. 2013. Influence of cultivar, sowing date and maturity at harvest on yield, digestibility, rumen fermentation kinetics and estimated feeding value of maize silage. *Journal of Agricultural Science.* 151:740–753.
- Otegui, M.E., 1995. Prolificacy and grain yield components in modern Argentinian maize hybrids. *Maydica* 40, 371–376.
- Otegui, M.E., Bonhomme, R., 1998. Grain yield components in maize I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Res* 56, 247–256. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00093-2)
- Otegui, M.E., Nicolini, M.G., Ruiz, R.A., Dodds, P.A., 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron J* 87, 29–33. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700010006x>
- Otegui, M.E., Riglos, M., Mercu, J.L., 2021. Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *J. Exp. Bot.* 72, 5180–5188. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab139>
- Otegui, M.E., Ruiz, R.A., Petrucci, D., 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Res* 47, 167–174. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00031-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00031-7)
- Otero, E.A., Miralles, D.J., Benez-Arnold, R.L. 2021. Development of a precise thermal time model for grain filling in barley: A critical assessment of base temperature estimation methods from field-collected data. *Field Crops Res.* 260, 108003. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108003>
- Pan, W.L., Camberato, J.J., Jackson, W.A., Moll, R.H., 1986. Utilization of Previously Accumulated and Concurrently Absorbed Nitrogen during Reproductive Growth in Maize. *Plant Physiol.* 82, 247–253. <https://doi.org/10.1104/pp.82.1.247>
- Paponov, I.A., Paponov, M., Sambo, P., Engels, C., 2020. Differential Regulation of Kernel Set and Potential Kernel Weight by Nitrogen Supply and Carbohydrate Availability in Maize Genotypes Contrasting in Nitrogen Use Efficiency. *Front. Plant Sci.* 11, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00586>
- Parco, M., D'Andrea, K.E., Maddonni, G.Á., 2022. Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: I. Plant growth, biomass allocation and development of apical and

- sub-apical ears from floral induction to silking. *Field Crop. Res.* 284. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108553>
- Parsons, M.W., Munkvold, G.P., 2010. Associations of planting date, drought stress, and insects with *Fusarium* ear rot and fumonisin B1 contamination in California maize. *Food Addit. Contam. - Part A Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.* 27, 591–607. <https://doi.org/10.1080/19440040903456337>.
- Paul, M.J., Foyer, C.H., 2001. Sink regulation of photosynthesis. *J. Exp. Bot.* 52, 1383–1400. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.360.1383>
- Pendleton, J.W., Egli, D.B., 1969. Potential Yield of Corn as Affected by Planting Date. *Agron. J.* 61, 70–71. <https://doi.org/10.2134/agronj1969.00021962006100010024x>
- Piggott, S., 2010. Simulation of corn in-field drydown. Master of Science Thesis, Biosystems Engineering, Michigan State University, 59 pp.
- Pinheiro J, Bates D, R Core Team. 2022. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-157, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Pinheiro, ME. 1984. Stover forage quality and stalk strength relationships in corn, *Zea mays* L. Retrospective Theses and Dissertations. 8209. <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/8209>
- Purdy, J.L., Crane, P.L., 1967. Influence of Pericarp on Differential Drying Rate in “Mature” Corn (*Zea mays* L.) 1. *Crop Sci.* 7, 379–381. <https://doi.org/10.2135/cropsci1967.0011183X000700040031x>
- R Core Team. 2023. <https://cran.r-project.org/>
- Rajcan, I., Tollenaar, M., 1999. Source: Sink ratio and leaf senescence in maize: II. Nitrogen metabolism during grain filling. *Field Crops Res.* 60, 255–265. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00143-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00143-9)
- Rattalino Edreira, J.I., Mayer, L.I., Otegui, M.E., 2014. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Kernel growth, water relations and assimilate availability for grain filling. *Field Crops Res.* 166, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.018>
- Rattalino Edreira, J.I., Otegui, M.E., 2012. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Res.* 130, 87–98. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.009>
- Rattalino Edreira, J.I., Otegui, M.E., 2013. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: A novel approach for assessing sources of kernel loss in field conditions. *Field Crops Res.* 142, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.009>
- Reddy, VM., Daynard, TB. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica* 28:339-355.
- Reed, A.J., Singletary, G.W., Schussler, J.R., Williamson, D.R., Christy, A.L., 1988. Shading Effects on Dry Matter and Nitrogen Partitioning, Kernel Number, and Yield of Maize. *Crop Sci.* 28, 819–825. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183x002800050020x>
- Ren, H., Jiang, Y., Zhao, M., Qi, H., Li, C., 2021. Nitrogen Supply Regulates Vascular Bundle Structure and Matter Transport Characteristics of Spring Maize Under High Plant Density. *Front. Plant Sci.* 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.602739>
- Ritchie, J.T., Nesmith, D.S., 1991. Temperature and Crop Development, in: *Modeling Plant and Soil System.* pp. 5–29. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c2>
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J. 1982. How a Corn Plant Develops. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service. Special Report No. 48, 1-21.
- Romero, L., Cutrin, A., Gagliotti, M. 2018. Evaluación de híbridos para silajes: fechas y calidades. *Información Técnica de Producción Animal* 2018. Publicación Miscelánea Año VI - N° 4. ISSN en línea 2314-312656-62.
- Rook JA., Muller LD., Shank DB.1977. Intake and digestibility of brown midrib corn silage by lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 60:1894-1904
- Ruget, F. 1993. Contribution of storage reserves during grain-filling of maize in Northern European conditions. *Maydica*, 38 (1): 51-59.
- Ruiz, A., Archontoulis, S. V., Borrás, L., 2022. Kernel weight relevance in maize grain yield response to nitrogen fertilization. *Field Crops Res.* 286. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108631>

- Ruiz, M.B., D'Andrea, K.E., Otegui, M.E., 2019. Phenotypic plasticity of maize grain yield and related secondary traits: Differences between inbreds and hybrids in response to contrasting water and nitrogen regimes. *Field Crops Res.* 239, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.004>
- Sadras, V.O. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Res.* 100:125–138. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.004>
- Sadras, V.O., Echarte, L., Andrade, F.H., 2000. Profiles of Leaf Senescence During Reproductive Growth of Sunflower and Maize. *Ann. Bot.* 85, 187–195. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.1013>
- Sadras, V.O., Fereres, E., Borrás, L., Garzo, E., Moreno, A., Araus, J.L., Fereres, A., 2020. Aphid Resistance: An Overlooked Ecological Dimension of Nonstructural Carbohydrates in Cereals. *Front. Plant Sci.* 11, 1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00937>
- Safdarian, M., Razmjoo, J., Dehnavi, M.M., 2014. Effect of Nitrogen Sources and Rates on Yield and Quality of Silage Corn. *J Plant Nutr* 37, 611–617. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.867986>
- Schmidt, J.L., Hallauer, A.R., 1966. Estimating Harvest Date of Corn in the Field 1. *Crop Sci.* 6, 227–231. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183x000600030003x>
- Sekhon, R.S., Breitzman, M.W., Silva, R.R., Santoro, N., Rooney, W.L., De Leon, N., Kaeppler, S.M., 2016. Stover composition in maize and sorghum reveals remarkable genetic variation and plasticity for carbohydrate accumulation. *Front. Plant Sci.* 7, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00822>
- Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review. *Crop Sci.* 29, 90–98. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010023x>
- Singh, V., Haken, A.E., Paulsen, M.R., Eckhoff, S.R., 1998. Starch Yield Sensitivity of Maize Hybrids to Drying Temperature and Harvest Moisture Content. *Starch - Stärke* 50, 181–183. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-379X\(199805\)50:5<181::AID-STAR181>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-379X(199805)50:5<181::AID-STAR181>3.0.CO;2-J)
- Sommerfeldt J.L., Shingoethe D.J., Muller L.D. 1979. Brown midrib corn silage for lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 62:611-1618.
- Soriano, A. 1991. Río de la Plata grasslands. In: Coupland RT (ed) *Ecosystems of the world. Natural grasslands*. Elsevier Scientific, Amsterdam, pp 367–407.
- Stallings CC., Donaldson BM., Thomas JW., Rossman, EC. 1982. In vivo evaluation of brown-midrib corn silage by sheep and lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 65:1945-1949.
- Statista, 2023. Production of corn for silage in the U.S. from 2001 to 2023. Retrieved from: <https://www.statista.com/statistics/190886/production-of-corn-for-silage-in-the-us->.
- Stone, P.J., Sorensen, I.B., Jamieson, P.B. 1999. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperate climate. *Field Crops Res.* 63, 169-178. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00033-7)
- Struik, P.C. 1983. Physiology of forage maize in relation to its production and quality. Doctoral thesis, Wageningen, pp 252.
- Tahir, I.S.A., Nakata, N., 2005. Remobilization of nitrogen and carbohydrate from stems of bread wheat in response to heat stress during grain filling. *J Agron Crop Sci.* 191, 106–115. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00127.x>
- Thompson, T., Peart, R., Foster, G., 1968. Mathematical simulation of corn drying – a new model. *Trans. ASAE* 11, 582–586.
- Tollenaar, M., Daynard, T.B., 1982. Effect of Source-Sink Ratio on Dry Matter Accumulation and Leaf Senescence of Maize. *Can. J. Plant Sci.* 62, 855–860. <https://doi.org/10.4141/cjps82-128>
- Tollenaar, M., Lee, E. A. 2011. 2 strategies for enhancing grain yield in maize. *Plant breeding reviews*, 34(4), 37-82.
- Torney, F., Moeller, L., Scarpa, A., Wang, K. 2007. Genetic engineering approaches to improve bioethanol production from maize. *Curr. Opin. Biotechnol.* 18(3): 193-199. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2007.03.006>
- Troyer, A.F., Ambrose, W.B., 1971. Plant Characteristics Affecting Field Drying Rate of Ear Corn1. *Crop Sci.* 11, 529. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100040019x>

- Tsimba, R., Edmeades, G.O., Millner, J.P., Kemp, P.D., 2013. The effect of planting date on maize grain yields and yield components. *Field Crops Res.* 150, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.028>
- Uhart, S., Andrade, F., 1991. Source-sink relationships in maize grown in a cool-temperate area. *Agronomie* 11, 863–875. <https://doi.org/10.1051/agro:19911004>
- Uhart, S.A., Andrade, F.H., 1995. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. *Crop Sci.* 35, 183–190. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500010034x>
- Uhart, S.A., Andrade, F.H., 1995a. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35, 1376–1383. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050020x>
- Uhart, S.A., Andrade, F.H., 1995b. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Sci.* 35, 1384–1389. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050021x>
- Uribealarea, M., Cárcova, J., Borrás, L., Otegui, M.E., 2008. Enhanced kernel set promoted by synchronous pollination determines a tradeoff between kernel number and kernel weight in temperate maize hybrids. *Field Crops Res.* 105, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.09.002>
- Van Soest, P.J. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant*. 2nd Edition, Cornell University Press, Ithaca, 476.
- Vega, C.R.C., Andrade, F.H., Sadras, V.O., 2001. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. *Field Crops Res.* 72, 163–175. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00172-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00172-1)
- Vega, C.R.C., Sadras, V.O., Andrade, F.H., Uhart, S.A., 2000. Reproductive allometry in soybean, maize, and sunflower. *Ann. Bot.* 85, 461–468. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.1084>
- Vega, C.R.C., Razquín, C.J., Ogando, F.A., Santillán Hatala, C. 2017. Marco conceptual para la interpretación fisiológica de respuesta del maíz a la fecha de la siembra. En: El mismo maíz, un nuevo desafío: Compendio primer congreso de maíz tardío. Lucas Borrás y Sergio Uhart editores. Libro digital, PDF Archivo Digital: descarga y online ISBN 978-987-98384-3- 3.
- Wang, J., Dong, X., Xiao, Y., Liu, Q., Zhang, D., Han, J., Liu, Y., Gao, G., Liu, Z., Sun, H. 2020. Analysis of kernel dry down process after physiological maturity of spring maize based on diffusion theory in the North China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 28(4), 545–557. <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190906>
- Wang, K., Li, S. 2017. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(11), 2027–2035. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2017.11.008>
- Wei, S., Wang, X., Li, G., Qin, Y., Jiang, D., Dong, S., 2019. Plant density and nitrogen supply affect the grain-filling parameters of maize kernels located in different ear positions. *Front. Plant Sci.* 10, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00180>
- Wei, T., Simko, V. 2021. R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92). Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wellen, C.L., Bunn, J.M. 1993. Drying Rate Constants for Yellow Dent Corn as Affected by Fatty Acid Ester Treatments. *American Society of Agricultural Engineers*. Vol 36 (6): 1815–1819.
- Weller RF., Phipps RH. 1986. The feeding value of normal and brown midrib-3 maize silage. *J Agric Sci* 106: 31–35. <https://doi.org/10.1017/S0021859600061682>
- Westgate, M.E., Boyer, J.S., 1986. Water Status of the Developing Grain of Maize 1. *Agron J* 78, 714–719. <https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800040031x>
- Williams, W.P., Sagers, J.B., Hanten, J.A., Davis, F.M., Buckley, P.M. 1997. Transgenic corn evaluated for resistance to fall armyworm and Southwestern corn borer. *Crop Sci.* 37:957–962.
- Widstrom, N.W., Bagby, M.O., Palmer, D.M., Black, L.T., Carr, M.E., 1984. Relative Stalk Sugar Yields among Maize Populations, Cultivars, and Hybrids. *Crop Sci.* 24, 913–915. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183x002400050020x>

- Xiao et al., 2001. Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice Straw. *Polymer Degradation and Stability* 74 (2001) 307–319. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00163-X)
- Yang, J., Sears, R.G., Gill, B.S., Paulsen, G.M., 2002. Genotypic differences in utilization of assimilate sources during maturation of wheat under chronic heat and heat shock stresses: Utilization of assimilate sources by wheat under heat stresses. *Euphytica* 125, 179–188. <https://doi.org/10.1023/A:1015882825112>
- Yemm, E.W., Willis, A.J., 1954. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochem. J.* 57, 508–514. <https://doi.org/10.1042/bj0570508>
- Zhang, L., Liang, Z. yuan, He, X. ming, Meng, Q. feng, Hu, Y., Schmidhalter, U., Zhang, W., Zou, C. qin, Chen, X. ping, 2020. Improving grain yield and protein concentration of maize (*Zea mays* L.) simultaneously by appropriate hybrid selection and nitrogen management. *Field Crops Res.* 249, 107754. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.1077>