

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN LA TOLERANCIA Y
RECUPERACIÓN AL ESTRÉS HÍDRICO (POR EXCESO O DÉFICIT), EN DOS
CULTIVARES DE CEBADA CERVECERA

por

Santiago PÓLVORA HERMIDA
Iván STIRBULOV PIPPOLO

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2017

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Esteban Hoffman

.....

Ing. Agr. MSc. Luis Viega

.....

Ing. Agr. Nicolás Fassana

Fecha: 25 de setiembre de 2017

Autores:

Santiago Pólvora Hermida

.....

Iván Stirbulov Pippolo

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representa la finalización de una etapa muy importante en nuestras vidas profesionales y personales. Queremos agradecer profundamente el apoyo incondicional de nuestras familias que han sido un pilar fundamental en el transcurso de nuestra carrera así como también a los profesores tutores de tesis que nos guiaron en la realización del presente trabajo. Queremos mencionar al Ing. Agrónomo Nicolás Fassana por la ayuda incondicional y predisposición así como también a los profesores Esteban Hoffman y Luis Viega en las correcciones correspondientes y en la cuota de paciencia y dedicación. Por otra parte agradecer a compañeros que de una manera u otra colaboraron en el trabajo de campo como Marcelo Hornos, Matías Briossi y Pablo Buganni.

TABLA DE CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| PÁGINA DE APROBACIÓN..... | II |
| AGRADECIMIENTOS..... | III |
| LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES..... | VI |
| | |
| 1. <u>INTRODUCCIÓN</u> | 1 |
| | |
| 2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> | 2 |
| 2.1. CULTIVO DE CEBADA EN EL URUGUAY..... | 2 |
| 2.2. ANTECEDENTES NACIONALES SOBRE EL EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN CEBADA..... | 2 |
| 2.3. EXCESO HÍDRICO..... | 3 |
| 2.3.1. <u>Dinámica del oxígeno y respuesta vegetal al anegamiento</u> | 4 |
| 2.3.2. <u>Clasificación según resistencia al anegamiento</u> | 6 |
| 2.3.3. <u>Mecanismos de tolerancia al anegamiento</u> | 6 |
| 2.3.4. <u>Regulación hormonal de plantas tolerantes al déficit de O₂</u> | 7 |
| 2.3.5. <u>Síntomas de anegamiento</u> | 7 |
| 2.4. EFECTOS DEL EXCESO HÍDRICO SOBRE EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO..... | 8 |
| 2.4.1. <u>Déficit hídrico</u> | 10 |
| 2.4.1.1 Cuantificación del estatus hídrico en plantas..... | 11 |
| 2.4.1.2 Déficit hídrico en la planta..... | 11 |
| 2.4.1.3 Disminuciones en el rendimiento causadas por déficit hídrico..... | 12 |
| 2.5. <u>ESTRÉS TÉRMICO</u> | 14 |
| 2.5.1. <u>Efecto de las altas temperaturas en pre – anthesis</u> | 15 |
| 2.5.2. <u>Efecto de las altas temperaturas en pos – anthesis</u> | 16 |
| 2.5.3. <u>Efecto de la temperatura en situaciones de anegamiento</u> | 16 |
| | |
| 3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> | 18 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO..... | 19 |
| 3.1.1 <u>Ubicación y descripción del experimento</u> | 19 |
| 3.1.2 <u>Manejo realizado</u> | 19 |
| 3.1.3 <u>Variedades</u> | 20 |
| 3.2 DETERMINACIONES..... | 20 |
| 3.2.1 <u>En suelo</u> | 20 |

| | |
|--|----|
| 3.2.1.1 Humedad de suelo..... | 20 |
| 3.2.2 <u>En planta</u> | 20 |
| 3.2.2.1 Componente del rendimiento, tallos y fertilidad de tallos..... | 20 |
| 3.2.2.2 Biomasa, rendimiento en grano y componentes a cosecha..... | 20 |
| 3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO..... | 21 |
| 4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> | 23 |
| 4.1 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE HÍDRICO DEL SUELO..... | 23 |
| 4.2 EFECTO DEL RÉGIMEN HÍDRICO SOBRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES..... | 24 |
| 4.3 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO Y EFECTOS DEL RÉGIMEN TÉRMICO..... | 32 |
| 4.3.1 <u>Efectos del régimen térmico</u> | 36 |
| 4.4 CAMBIO EN LA RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PERÍODO DE ESTRÉS Y EL PERÍODO DE RECUPERACIÓN POS ESTRÉS HÍDRICO..... | 39 |
| 4.5 RESPUESTA AL CAMBIO EN LAS CONDICIONES HÍDRICAS Y TÉRMICAS EN FUNCIÓN DE LA VARIEDAD..... | 42 |
| 5. <u>CONCLUSIONES</u> | 50 |
| 6. <u>RESUMEN</u> | 51 |
| 7. <u>SUMMARY</u> | 52 |
| 8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> | 53 |

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

| Cuadro No. | Página |
|--|---------------|
| 1. Análisis de varianza para el rendimiento en grano por planta del efecto del régimen hídrico en función del año..... | 25 |
| 2. Biomasa a cosecha, índice de cosecha y rendimiento en grano por planta según tratamiento hídrico..... | 27 |
| 3. Promedio de número de granos por planta y peso de grano según tratamiento hídrico..... | 30 |
| 4. Efecto del régimen hídrico sobre el número de espigas por planta y el número de granos por espiga..... | 32 |
| 5. Temperaturas medias por etapa fenológica y períodos de tratamiento..... | 35 |
| 6. Influencia de los tratamientos térmicos en los períodos 1 y 2 para el rendimiento y sus componentes..... | 37 |
| 7. Efecto de los tratamientos térmicos durante el período de recuperación (TT2) sobre los componentes principales del rendimiento..... | 38 |
| 8. Componentes del análisis de varianza para la interacción tratamiento hídrico por tratamiento térmico en el periodo 1..... | 41 |
| 9. Influencia del cultivar sobre el rendimiento y sus componentes según el régimen hídrico y térmico..... | 43 |
| 10. Variación del rendimiento en grano y sus componentes determinantes según el cultivar..... | 45 |
| 11. Nodos de regresión y componentes determinantes del rendimiento para cada uno de ellos..... | 48 |

Figura No.

| | |
|--|----|
| 1. Izquierda: invernáculo abierto (ambiente); derecha: invernáculo cerrado(cálido)..... | 19 |
| 2. Evolución del contenido de humedad del suelo en peso para los tres tratamientos hídricos..... | 24 |
| 3. Rendimiento en grano por planta según régimen hídrico..... | 25 |
| 4. Rendimiento por planta en función de la biomasa producida según el régimen hídrico para ambos años | 26 |
| 5. Rendimiento y peso de grano en función del número de granos por planta..... | 29 |
| 6. Rendimiento según tratamiento hídrico, en función del número de granos por planta..... | 30 |
| 7. Evolución de la temperatura durante el ciclo del cultivo, año 2013..... | 34 |
| 8. Evolución de la temperatura durante el ciclo del cultivo, año 2014..... | 34 |
| 9. Rendimiento relativo por planta en función del cambio en la T°C durante el período de estrés y recuperación, según tratamiento hídrico para el promedio de los años evaluados..... | 40 |
| 10. Respuesta en términos de rendimiento relativo al tratamiento control hídrico combinado con el tratamiento térmico ambiente, en función de la T°C durante el tratamiento térmico..... | 42 |
| 11. Respuesta en términos de rendimiento para cada variedad, en función de la interacción con el régimen hídrico y térmico en el periodo 2..... | 45 |
| 12. Árbol de clasificación y regresión rendimiento en grano por planta para el conjunto factores evaluados..... | 46 |
| 13. Rendimiento en grano por planta ordenado en función de las bases del árbol de clasificación y regresión..... | 47 |

1. INTRODUCCIÓN

La cebada (*Hordeum vulgare* L) ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en importancia entre los cereales, después del trigo, maíz y arroz. La razón de su importancia se debe a su amplia adaptación ecológica y a su diversidad de aplicaciones. Junto con el trigo son los principales cereales de invierno en cuanto a superficie sembrada en el Uruguay, presentando un área sembrada total de trigo y cebada de 423.000 hectáreas en el año 2015 de las cuales 330.000 correspondieron a trigo y las 93.000 restantes a cebada (MGAP. DIEA, 2016).

Durante los últimos 15 años en el Uruguay se ha llevado a cabo una importante expansión agrícola, impulsada principalmente por el auge del cultivo de soja. Como consecuencia, los sistemas productivos pasaron de ser agrícola ganaderos a ser agrícolas, teniendo a la soja como cultivo dominante, produciendo un cambio en las fechas de siembras y nuevas áreas de menor aptitud incorporadas al área agrícola. Esto llevó a los cultivos de cebada y trigo hacia ambientes más restrictivos.

Los cultivos como trigo y cebada, por tanto, han pasado a ser sembrados en suelos de menor fertilidad natural, menor capacidad de almacenar agua, menor drenaje interno, lo que incrementa la frecuencia de condiciones de excesos y déficit hídricos. Ello seguramente explique el aumento de la variabilidad de rendimientos entre años y dentro del año (Hoffman et al., 2014).

Es por tanto relevante conocer cómo se comportan los cultivos y cultivares ante diferentes situaciones de riesgo hídrico.

El presente trabajo plantea como objetivo principal estudiar el comportamiento de dos cultivares de cebada contrastantes en cuanto a la susceptibilidad varietal al estrés hídrico (dos cultivares que no son sembrados en la actualidad pero conocidos a nivel de producción por su distinto comportamiento al exceso hídrico), frente a situaciones hídricas contrastantes al inicio del encañado, sometidos a dos condiciones térmicas diferentes durante el periodo de estrés hídrico y de recuperación pos estrés.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CULTIVO DE CEBADA EN URUGUAY

La cebada es un cultivo con una larga historia agrícola en nuestro país, siendo el segundo cultivo de invierno en importancia productiva (Hoffman et al., 2008).

Según MGAP.DIEA (2016), para el período que abarca desde el año 2002 hasta el 2016 el área sembrada para el cultivo ha presentado varias oscilaciones. El año 2002 parte de un valor de 102.800 ha⁻¹, presentando años con menos área como el 2005/2006 y 2010/11 con 78.100 ha⁻¹ y 61.960 ha⁻¹ respectivamente. Se han registrado máximos de 140.900 ha en 2009/10. En cuanto a rendimiento promedio, tomando el mismo periodo de evaluación, se observa un incremento muy importante. Mientras a inicios del siglo XXI la media oscilaba por debajo de los 3000 kg ha⁻¹, la zafra 2015 fue record nacional con 3820 kg ha⁻¹ (MGAP.DIEA, 2016).

La evolución del cultivo y sus rendimientos, han estado muy asociadas a transformaciones tecnológicas, volviendo a la cebada en términos de manejo independiente al trigo, con tecnologías ajustadas a sus requerimientos (Hoffman y Castro, 2012).

2.2 ANTECEDENTES NACIONALES SOBRE EL EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN CEBADA

En Uruguay, las precipitaciones en los meses de invierno generalmente superan la demanda por parte del cultivo; sumado a la predominancia de suelos diferenciados con un horizonte B pesado y relativamente impermeable conforman las condiciones para que se den frecuentes excesos hídricos temporarios (Díaz, 2005). El mismo autor señala que la cebada es particularmente sensible al exceso de agua. La dificultad de crecer y desarrollarse en suelos parcialmente anegados puede apreciarse cuando se siembra cebada en bajos o zonas planas y ocasionalmente el problema puede presentarse en una proporción importante de la chacra.

En trabajos iniciados en 2006 en Facultad de Agronomía, el exceso hídrico en estadios tempranos (Z3.0-Z3.4) provocó pérdidas de potencial del orden de 28% en cebada (Hoffman et al., 2009).

En el 2007, de 8 cultivares evaluados todos fueron afectados por un corto periodo de anegamiento durante el encañado (8 días), con pérdidas de

rendimiento medias del 30%. La magnitud de las pérdidas variaron entre 14 y 36 % entre cultivares (Hoffman et al., 2008).

Para años sin aparentes condiciones extremas de exceso hídrico, Díaz (2005) concluye que el 23% de la variación del rendimiento de cebada estuvo explicado por la tolerancia al anegamiento de los distintos cultivares.

2.3 EXCESO HÍDRICO

A nivel mundial el exceso hídrico afecta 10% del área global terrestre, y es uno de los más importantes problemas en la producción de los cultivos agrícolas (Setter y Waters, 2003).

Es de esperar entonces que los mejoradores de zonas con ocurrencia de excesos hídricos consideren entre sus objetivos la obtención de cultivares tolerantes al anegamiento, ya que se ha reportado variabilidad genética en este carácter.

En Uruguay el balance de agua del suelo determina un período de déficit típico en verano seguido de uno de recarga de agua del suelo durante el invierno. Se carece de una estación seca definida y en promedio llueve todo el año, la mayor determinante del contenido hídrico del suelo es la evapotranspiración, dependiente de la demanda atmosférica, que al ser mínima durante los meses de invierno permite una recarga del contenido hídrico en esta época. Bajo estas condiciones, en las que normalmente transcurre la etapa vegetativa y parte importante de la etapa reproductiva de los cultivos de invierno, pueden ocurrir períodos de anegamiento de lo que se espera efectos negativos a nivel de la generación y concreción del potencial (Hoffman et al., 2001).

Por tanto, sabiendo que la cebada es una especie susceptible al exceso hídrico y que además existen diferencias varietales de tolerancia frente al mismo, es importante caracterizar y generar información sobre los diferentes cultivares sembrados como se intenta en el presente trabajo.

Según lo expresado por Cannell, citado por Hoffman et al. (2001), en promedio en Uruguay con 30 a 50 días de suelos mojados, en suelos de drenaje moderado es probable que se generen situaciones de reducido contenido de O₂ en suelo.

Esta situación es consecuencia de los problemas derivados del exceso de precipitaciones y pueden agravarse en condiciones de chacras con problemas de drenaje (suelos pesados muy diferenciados, suelos arenosos sobre cretácico,

zonas bajas, chacras viejas y/o con limitantes físicas derivadas del manejo del laboreo), independientemente del sistema de laboreo.

El anegamiento como también se conoce al exceso hídrico, consiste en el exceso de agua en el suelo, con la consecuente sustitución prolongada de la fase gaseosa del suelo por una fase líquida (Pardos, 2004).

En suelos con buen drenaje, esta condición es breve y el agua procedente de la lluvia, se va perdiendo por infiltración en capas de suelo más profundas, quedando el agua capilar, la más eficazmente disponible para las raíces (Russell, citado por Pardos, 2004).

Si la conductividad hidráulica del suelo es suficientemente alta y el drenaje no está impedido, el agua más superficial, suficientemente aireada, al atravesar el suelo puede suministrar suficiente oxígeno para las plantas, y más aún, en condiciones de temperaturas bajas (Russell, citado por Pardos, 2004).

El anegamiento del suelo no origina cambios en el potencial hídrico de las plantas, en consecuencia, no produce un estrés primario de potencial hídrico. Sólo afecta a la planta a través de un estrés secundario, inducido por el exceso de agua. El primer efecto secundario del anegamiento es la pérdida de nutrientes minerales y metabolitos intermedios por lavado de las raíces. El segundo estrés tiene lugar al generarse en las raíces falta de oxígeno, poco soluble y difusible en el agua (hipoxia e incluso anoxia), exceso de CO₂ y sobreproducción de etileno. Sustancias tóxicas como etanol, acetaldehído y compuestos cianógenos son también consecuencia del encharcamiento de las raíces (Pardos, 2004).

2.3.1 Dinámica del oxígeno y respuesta vegetal al anegamiento

La capacidad aire de un suelo (volumen de suelo ocupado por aire) y la conductividad del agua del horizonte problema, determinan el riesgo potencial de un suelo de verse sometido a condiciones de anaerobiosis. Los valores críticos son de 10% y 0.6 mm/h de capacidad aire y conductividad hidráulica respectivamente (Dodwell et al., Gardener et al., citados por Ernst, 1996). Durán y Kaplan, García y Kaplan, citados por Ernst (1996), expresan que la capacidad aire para suelos diferenciados del Uruguay, están por debajo de estos límites y por lo tanto la probabilidad de que se den situaciones de escases de oxígeno son elevadas.

El anegamiento del suelo genera distintos niveles de disponibilidad de oxígeno y su disminución puede variar desde pocas horas a días. Con temperaturas elevadas este proceso es más rápido (Beldford et al., Trought y

Drew, citados por Hoffman et al., 2001), en la medida que los microorganismos del suelo aumentan su actividad respiratoria y del mayor consumo a nivel radicular (Currie, citado por Ernst, 1996).

Los distintos niveles de disminución causan procesos denominados hipoxia (bajo contenido de O₂) o anoxia (anaerobiosis, Larcher, citado por Hoffman et al., 2001).

Hipoxia se refiere a un nivel de oxígeno por debajo del óptimo y ocurre en suelos pobremente drenados o durante periodos cortos de inundación. La anoxia se refiere a la completa falta de oxígeno que ocurre luego de un periodo muy prolongado de inundación. Todas las plantas son capaces de soportar periodos cortos de anoxia y en general dichos periodos se dan de forma gradual, desde una situación de normoxia (adecuada cantidad de oxígeno en el suelo), hipoxia y después anoxia. De esta manera es que las plantas tienen la posibilidad de aclimatarse a la escasez de oxígeno antes de llegar a condiciones letales (Drew, 1997).

Trabajos realizados en ambientes controlados han identificado la falta de O₂ a nivel radicular como la principal causa del pobre desarrollo vegetativo en los cereales sometidos al exceso hídrico.

Las raíces normalmente obtienen suficiente oxígeno para la respiración aeróbica directamente de los espacios gaseosos del suelo. Los poros llenos de gas de suelos bien drenados y bien estructurados permiten la difusión del O₂ gaseoso hasta profundidades de varios metros. Si el suelo está inundado o encharcado, pobremente drenado, el agua entra por los poros y bloquea la difusión del O₂ en fase gaseosa. El oxígeno disuelto difunde tan lentamente en el agua estancada que sólo unos pocos centímetros de suelo cerca de la superficie permanecen oxigenados (Beldford, citado por Hoffman et al., 2001).

La deficiencia de oxígeno origina una serie de cambios físicos, químicos y biológicos en el suelo, entre los que cabe destacar: la producción de sustancias tóxicas (ácidos orgánicos, hidrocarburos gaseosos, por ejemplo metano, dióxido de carbono y sulfuros), así como de etileno; y la pérdida de compuestos solubles de nitrógeno y desequilibrio en otros nutrientes debido a la actividad anaeróbica microbiana (Walker, citado por Pardos, 2004).

2.3.2 Clasificación según respuesta al anegamiento

Existen diferencias en las respuestas a la duración del exceso hídrico por parte de distintas especies en su capacidad de aclimatación.

Distintos autores clasifican a las especies en tres categorías según la sensibilidad a la falta de O₂. Plantas adaptadas, hidrófilas (ejemplo arroz), plantas tolerantes (trigo, cebada) y plantas sensibles (entre las cuales se ubica la soja) al anegamiento. El primer grupo, desarrolla mecanismos que le confieren resistencia al anegamiento por períodos prolongados. El segundo, logran sobrevivir a períodos breves, mientras que el tercer grupo es el de mayor susceptibilidad al estrés (Bray et al., 2000).

Si no ocurre aclimatación a déficit de O₂, el balance hídrico se ve afectado, posiblemente debido a reducción en la permeabilidad al agua en los tejidos radiculares y un descenso del contenido hídrico de la parte aérea. Plantas tolerantes a la falta de O₂, generalmente presentan cierre estomático para evitar el estrés por falta de agua (Kramer y Boyer, citados por Hoffman et al., 2001).

En cuanto a la absorción y translocación de nutrientes, también se ve afectada por la menor disponibilidad de energía y modificaciones en la superficie de absorción radicular al provocarse muerte de raíces y engrosamiento de las raíces principales (Bray et al., 2000).

2.3.3 Mecanismos de tolerancia al anegamiento

Ninguna planta superior puede sobrevivir sin acceso a oxígeno molecular, y la variación en las consecuencias han sido atribuidas a factores como la especie, duración del anegamiento y severidad del mismo, entre otras (Pardos, 2004).

Las plantas pueden tolerar el anegamiento mediante mecanismos que implican el transporte y suministro de oxígeno a los órganos sumergidos en el agua (Armstrong et al., citados por Pardos, 2004), dichos mecanismos se pueden resumir en:

- _ Aumento del número de raíces adventicias en las capas de suelo más superficiales del suelo y aumento en la porosidad radicular.

_ Formación de aerénquima en raíces, que facilita el transporte longitudinal de gases entre órganos, causa una reducción en la demanda de oxígeno por unidad de volumen en el órgano en que se forma y permite la acumulación de aire.

_ Reducción de la tasa metabólica y el uso de carbohidratos de reserva (almidón y sacarosa) en periodos de latencia como substratos respiratorios.

_ Fermentación alcohólica, reserva de carbohidratos, tolerancia al shock pos-anoxia y regulación hormonal.

2.3.4 Regulación hormonal de plantas tolerantes al déficit de O₂

Debido al desorden provocado por la falta de O₂ el balance hormonal también se ve afectado, tanto en la parte aérea como radicular.

En raíces, se afecta la síntesis de citoquininas y giberelinas, modificando la translocación de dichas hormonas hacia la parte aérea (Taiz y Zeiger, citados por Hoffman et al., 2001). La menor síntesis o translocación de citoquininas desde la raíz y la acumulación de auxinas en los tallos, provocan una relación de auxina/citoquinina alta promoviendo la dominancia apical y el menor macollaje en el caso de cereales (Taiz y Zeiger, citados por Hoffman et al., 2001).

También bajo estas condiciones de déficit de O₂ en raíz, se promueve la síntesis de ACC, precursor del etileno. Al mismo tiempo, la conversión de ACC a etileno (por intermedio de la ACC-oxidasa), se bloquea y el ACC es exportado hacia la parte aérea donde en condiciones de aerobiosis se convierte en etileno (Bray et al., 2000). Como consecuencia aumenta el nivel de etileno en la parte aérea y se produce la epinastia (curvatura causada por la expansión celular de las células adaxiales de la hoja).

La epinastia, afecta el ángulo foliar reduciendo la absorción de luz y enlenteciendo la pérdida de agua por transpiración en plantas donde la absorción de agua por las raíces está limitada por la anoxia (Kramer y Boyer, citados por Hoffman et al., 2001).

2.3.5 Síntomas de anegamiento

El primer síntoma de daños por anegación es un cierre estomático. Con el cierre de las estomas, la absorción pasiva de agua por la planta disminuye, disminución a la que se añade la de la absorción activa por falta de oxígeno en

el córtex radicular. Asimismo, el movimiento del agua a distancia, vía xilema, mayoritariamente por flujo de masa, también decrece (Kozlowski, citado por Pardos, 2004).

Fenotípicamente los perjuicios que ocasiona el anegamiento se manifiestan en epinastia, clorosis foliar y muerte radicular. En algunas especies se produce la formación de raíces adventicias cercanas a la línea de agua lo que se debe al efecto de altas concentraciones de etileno, las que también estimulan la formación de aerénquima. Este tejido, permite la aireación del sistema radicular posibilitando a algunas especies tolerar por un tiempo más prolongado las consecuencias del anegamiento (Kramer y Boyer, citados por Hoffman et al., 2001).

2.4 EFECTOS DEL EXCESO HÍDRICO SOBRE EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

El rendimiento potencial en cultivos de invierno (trigo y cebada) se define en etapas tempranas del ciclo a través de los componentes número de tallos y primordios de espiguillas que sean capaces de generar un grano. La concreción del rendimiento entonces, estará determinada por la sobrevivencia de tallos, fertilidad de los mismos, y del número de flores que lleguen a concretar un grano al momento de la anthesis, así como del tamaño y peso que logren durante la etapa de llenado (Hoffman et al., 2001).

El número máximo de tallos.m² se alcanza entorno a Z 3.0 (comienzo del encañado, Hoffman et al. 2001, Miralles et al. 2014). Posteriormente y hasta la floración se produce la muerte de la mayor parte de los macollos generados, variando con el propio número de macollos máximos y el cultivar. El crecimiento en este período está estrechamente relacionado con la tasa de sobrevivencia final de cada tallo (Abate et al., Slafer et al., citados por Hoffman et al., 2001).

Los factores climáticos y de manejo determinantes del crecimiento durante el encañado (temperatura, balance hídrico, radiación, disponibilidad de N, etc.), inciden directamente en la proporción de tallos que logran una espiga a cosecha (Hoffman et al. 2001, Miralles et al. 2009). Es así que el estrés, tanto en la etapa de generación neta de macollos, como durante la fase de muerte, determina grandes variaciones en las espigas a cosecha.

En cuanto al número potencial de granos, se determina entre Z2.2 a Z3.3 aproximadamente y como expresan Hoffman et al. (2001) la variación en el número final de granos por espigas en cebada, es explicada en un 40% por el número máximo de primordios alcanzados en Z3.3 y en un 60% por el porcentaje

de aborto de espiguillas. La tasa de crecimiento por planta durante la etapa de concreción del número de granos (Z3.3-Z4.9), se asocia linealmente con el porcentaje de fertilidad de las espiguillas. Estos resultados muestran la importancia de las fases pre antesis en la concreción del número final de granos por espiga.

Los trabajos publicados por Miralles et al. (2014), que tuvieron como objetivo identificar el periodo crítico de susceptibilidad al exceso hídrico y cuantificar los efectos en los componentes del rendimiento para trigo y cebada concluyen que: el periodo de inicio de elongación del tallo hasta antesis fueron los más sensibles al anegamiento en términos de disminución de rendimiento. Dicho resultado se explicó por una menor tasa de crecimiento durante el encañado lo cual determinó un aumento en la mortalidad de tallos, derivando en una menor biomasa total en antesis.

Lo antes mencionado concuerda con lo expresado por Ernst (1996), quienes expresan que para cultivos de cebada de muy alto potencial la disminución de la tasa de crecimiento 30 días pre antesis reduce el rendimiento final en 20 kg de grano por cada kg de reducción en la tasa diaria de crecimiento. Esta reducción puede agudizarse como consecuencia de la falta de nitrógeno (Cha y Durán, citados por Hoffman et al., 2001) y oxígeno a nivel radicular durante el encañado (Beldford, citado por Hoffman et al., 2001).

En cebada se sabe que el número de espigas por m² es el principal componente que explica las variaciones en número de granos. Los resultados publicados por Miralles et al. (2014), muestran que el número de espigas explica el 96% de la variación en número de granos.

Concretamente la variación en número de granos por espigas en cebada debido a la aplicación de diferentes tratamientos de anegamiento fue de 10 a 20 granos por espiga, comparando con el trigo el cual varió de 10 a 45 granos por espiga, esto confirma la baja plasticidad de la especie en cuanto a la variación en número de granos frente a un estrés hídrico y su menor peso en la determinación del rendimiento frente al número de espigas en dichas condiciones (Miralles et al., 2014). De la misma publicación se desprende que también hay un efecto depresivo en tamaño y peso de grano a causa del anegamiento. Provocado por una disminución en el tamaño de los carpelos así como en el número de células endospermáticas, coincidiendo así con lo ya planteado por Ernst, citado por Hoffman et al. (2001), en donde expresan que la falta de oxígeno a nivel radicular durante el llenado de grano puede llegar a determinar pérdidas importantes de rendimientos por fallas en la concreción del potencial a través de la reducción en el peso de grano. La magnitud de las pérdidas se verá

fuertemente condicionadas por el material genético y su susceptibilidad al anegamiento tardío.

En síntesis los efectos del estrés por exceso hídrico pueden ser directos o indirectos. Los efectos directos se reflejan en una reducción de tallos y por ende espigas por m², reducción del tamaño de las espigas, del peso y clasificación de los granos, llegando en casos muy extremos a una senescencia anticipada con pérdidas totales de rendimiento. Los efectos indirectos pueden darse a través de pérdidas de rendimiento debido a un ambiente más favorable para el desarrollo de enfermedades. Esto sumado a los efectos directos pueden a la vez determinar pérdidas significativas de calidad del grano a cosecha (Hoffman et al., 2001).

2.4.1 Déficit hídrico

Según Hanson y Hitz, citados por Moreno (2009), una tercera parte de la superficie terrestre se considera como árida o semiárida mientras que la mayoría de la superficie restante está sujeta a periodos temporales de déficit hídrico como el caso de Uruguay. Por lo tanto la escasez de agua constituye un factor limitante y de importancia en el crecimiento de las plantas y determinación del rendimiento de los cultivos.

El estrés por déficit hídrico o por sequía se produce en las plantas en respuesta a un ambiente escaso en agua, en donde la tasa de transpiración excede a la absorción de agua.

Las plantas, a lo largo de su desarrollo experimentan algún grado de estrés por déficit hídrico el cual puede ser resultado de bajas precipitaciones, baja capacidad de retención de agua del suelo, exceso de salinidad, temperaturas extremas frías o calientes, baja presión de vapor atmosférico o una combinación de dichos factores (Nilsen y Orcutt, citados por Moreno, 2009).

Mazza et al., citados por Lamarca et al. (2010), definen el concepto de sequía como un fenómeno ambiental, meteorológico, que comprende la falta de lluvias durante un periodo suficiente como para ocasionar el agotamiento parcial o total del agua disponible en el suelo y producir daños en los vegetales.

La tolerancia a la sequía o déficit hídrico de las especies cultivadas está asociada al grado en que estas regulan el contenido de agua y el potencial hídrico foliar durante el estrés. La capacidad de una planta para mantener su estado hídrico a medida que el potencial de agua del suelo disminuye, constituye su adaptación al déficit hídrico (Mazza et al., citados por Lamarca et al., 2010).

2.4.1.1 Cuantificación del estatus hídrico en plantas

Según lo expresado por Barrs y Weatherley, citados por Ortiz (2003) el estado hídrico de la planta se cuantifica normalmente como el contenido relativo de agua (CRA), potencial hídrico y sus componentes. El CRA es la expresión más usada para medir el nivel de agua de un tejido. Es una medida del contenido de agua del tejido respecto del total de agua que este puede almacenar, se expresa como porcentaje y permite conocer el estado hídrico de la planta. Se relaciona con el potencial hídrico porque este y sus componentes, potencial de presión y de solutos son función del volumen de agua del protoplasma. El potencial hídrico está compuesto por la suma de los potenciales osmótico (presencia de sustancias disueltas), de presión (debido a la presencia de pared celular) y de matriz (debido a la fuerza adsorción que ejercen las paredes de los conductos sobre las moléculas de agua).

Cuando las plantas se encuentran en condiciones de déficit y pierden agua su potencial hídrico disminuye en forma simultánea a su potencial de turgencia y osmótico. Sin embargo en plantas que poseen ajuste osmótico el descenso del potencial hídrico no genera una pérdida repentina de turgencia ya que son capaces de acumular sustancias osmóticas en forma activa que disminuyen el potencial osmótico temporalmente minimizando los daños y permitiendo que las células continúen su crecimiento (Acevedo et al., citados por Ortiz, 2003).

2.4.1.2 Déficit hídrico en la planta

Mazza et al., citados por Lamarca et al. (2010), explican la generación de déficit hídrico poniendo como ejemplo a una planta creciendo en una maceta llevada a capacidad de campo y luego expuesta a condiciones naturales sin re suministro de agua. Al estar el suelo a capacidad de campo es de esperar que el $\Psi_{\text{suelo}} = \Psi_{\text{hoja}} = -0,03$ MPa. Al iniciar el día, la luz promueve la apertura estomática, por tanto comienza la evaporación de agua y decae el potencial hídrico de la hoja. Esto genera un gradiente negativo, la tensión generada se transmite por las paredes del xilema produciéndose así la absorción de agua por la raíz (potencial mátrico) debido a la creciente demanda atmosférica. Después del medio día la demanda atmosférica comienza a decaer y hacia la tarde se produce el cierre progresivo de estomas disminuyendo la transpiración. Debido al gradiente de potencial que se había generado entre la hoja-raíz-suelo, continua la absorción a tasa elevada superando a la transpiración, gracias a esta diferencia se va recuperando el potencial hídrico de la hoja y en algún momento de la noche se vuelve a una situación en donde el $\Psi_{\text{suelo}} = \Psi_{\text{raíz}} = \Psi_{\text{hoja}}$. Si ocurre una situación de déficit y no se genera un re suministro hídrico, el potencial de agua

del suelo al inicio será menor, reflejando la extracción de agua que se produjo durante el día. Debido a la gran diferencia entre los potenciales de hoja y suelo, la transpiración se reduce al máximo pero la planta sigue perdiendo agua y el valor de potencial hídrico del suelo continua disminuyendo. Si en este momento no existe una reposición de agua se puede llegar hasta el punto de no recuperar la turgencia durante la noche.

Como respuesta al déficit hídrico la planta pone en marcha una serie de mecanismos para tratar de contrarrestarlo y poder sobrevivir al estrés, algunos de estos mecanismos son el aumento del crecimiento radicular en busca de agua en el suelo, ajuste osmótico, regulación de la conductancia estomática, regulación del contenido de agua, variación en la eficiencia de transpiración (Mazza et al., citados por Lamarca et al., 2010).

El estrés por déficit hídrico provoca en la planta un menor crecimiento celular, una menor área foliar, una reducción de la fotosíntesis, una menor producción de biomasa, obteniendo como consecuencia un menor rendimiento de los cultivos (Acevedo et al., citados por Lamarca et al., 2010).

2.4.1.3 Disminuciones en el rendimiento causadas por déficit hídrico

Los efectos del déficit hídrico sobre el rendimiento pueden variar desde un ligero aumento, prácticamente no tener ningún efecto, hasta distintos rangos de reducción del rendimiento, e incluso pérdida de la cosecha (Ferreles et al., citados por Lamarca et al., 2010).

En cuanto a los componentes del rendimiento la cantidad de granos por espiga es particularmente sensible al estrés que se presenta durante el período que va del comienzo de la elongación del tallo hasta el final de la antesis, cuando el estrés puede limitar la cantidad de flores fértiles producidas y la proporción de flores polinizadas y cuajadas. Durante el período de llenado de los granos, el rendimiento también se reduce cuando el déficit hídrico es lo suficientemente intenso como para inhibir la asimilación, provocando una disminución del peso por grano. En casos de sequías en fin de ciclo, comunes en los climas templados, es más probable que la pérdida de rendimiento sea el resultado combinado de menos granos debido al aborto de los embriones jóvenes en desarrollo, y peso reducido por grano (Marti et al., 2015).

Además de reducir la apertura estomática y la fotosíntesis, la sequía en etapas de concreción del rendimiento también acelera la senescencia foliar, y por ende del ciclo, provocando que la translocación de asimilados hacia el grano se detenga antes de lo normal. Por consiguiente, el índice de cosecha se reduce

porque la biomasa vegetativa se forma en su mayoría en la primera parte de la estación de crecimiento del cultivo, cuando el agua no es una limitante, mientras que la biomasa del grano se deriva en gran medida de la asimilada durante la parte final del ciclo (Marti et al., 2015).

El rendimiento también se ve afectado significativamente por sequías durante la primera parte del período de llenado del grano, cuando se determina el tamaño potencial del grano y la cantidad de granos puede disminuir por el aborto de los embriones en desarrollo. Antes del comienzo de la elongación del tallo, los efectos perjudiciales del déficit hídrico se deben al mal establecimiento del cultivo y/o al lento desarrollo de los macollos. Tanto el mal establecimiento del cultivo como el lento desarrollo del canopeo reducen la radiación captada, la fotosíntesis, y por ende, la tasa de acumulación de biomasa. El lento desarrollo de los macollos también reduce la cantidad de espigas por unidad de área de suelo (Marti et al., 2015).

Hoffman et al. (2008), realizaron un trabajo comparando el comportamiento de distintos cultivares en cebada cervecera frente al estrés hídrico (anegamiento y déficit) durante la etapa de encañado. Para un estrés de 8 días, a partir de Z31-Z32; en promedio para todos los cultivares evaluados, existió un mayor efecto en la depresión del rendimiento por planta para exceso hídrico (-30%), mientras que el estrés hídrico por déficit, redujo el rendimiento por planta en un 18%.

Existió un efecto significativo del estrés hídrico sobre el componente número de granos/planta. Esta reducción fue explicada por una caída en el número de espigas (-21% para exceso hídrico y -10% para déficit hídrico), no encontrándose efecto sobre el peso de los granos.

Por otra parte González, citado por Lamarca et al. (2010) evaluó el comportamiento de varios cultivares de cebada de importancia comercial en regiones de clima mediterráneo frente a déficit hídrico suspendiendo el suministro de agua a partir de Z4.1 hasta fin de ciclo. Los resultados obtenidos de dicho experimento expresan que la reducción en el rendimiento en grano en condiciones de estrés respecto al control es importante, entre 35 a 40% para el total de años evaluados, exhibiendo más variabilidad los genotipos estudiados en condiciones de estrés que en condiciones normales. Los caracteres fenológicos y agronómicos que más influyeron en la mejora del rendimiento en condiciones de sequía son: la precocidad, duración del llenado del grano, el peso de mil granos y el índice de cosecha.

En México, López-Castañeda (2011) evaluó el comportamiento en términos de rendimiento en grano y biomasa a cosecha de varios cultivares de

cebada en situación de sequía con respecto a un control hídrico. La condición de sequía se generó en etapas tempranas del cultivo. Se suprimió el aporte de agua 15 días posteriores a la siembra hasta la antesis donde el cultivo contó con un nuevo suministro de agua de 40 mm en el período antesis- madurez fisiológica.

Los resultados obtenidos expresan que el menor rendimiento en grano observado en sequía en comparación con el control, estuvo acompañado de una menor biomasa a cosecha. El rendimiento en grano estuvo positiva y significativamente asociado con la biomasa en el tratamiento control ($R^2=0.74$, $P\leq 0,0001$) y sequía ($R^2=0.67$, $P\leq 0,0001$). Estos resultados sugieren que en condiciones favorables de humedad se mantiene una alta tasa de crecimiento en el período crítico del cultivo y se logra una buena acumulación de materia seca que se mantiene durante la etapa antesis-madurez fisiológica (Villegas et al., citados por López-Castañeda, 2011), mientras que en sequía las reservas acumuladas en el tallo antes de la floración constituyen la principal fuente de fotoasimilados para el llenado del grano (Villegas et al., citados por López-Castañeda, 2011)

Con respecto a los componentes del rendimiento evaluados por López-Castañeda (2011), la diferencias en rendimiento en grano, biomasa total a cosecha y número de granos por m^2 son para el promedio de los 6 cultivares estudiados -19%, -10% y -16% respectivamente para el tratamiento de sequía en comparación con el control.

2.5 ESTRÉS TÉRMICO

El estrés térmico generalmente es definido como el aumento en la temperatura por encima de un determinado umbral, por un período de tiempo suficiente para causar efectos deletéreos irreversibles sobre el desarrollo y crecimiento de los cultivos, reduciendo de esta forma, el rendimiento y/o la calidad de los mismos (Wahid et al., citados por Hoffman et al., 2011).

Los efectos del estrés térmico sobre el rendimiento dependen del estado fenológico del cultivo, genotipo, duración, severidad y combinación con otro tipo de estrés como puede ser el estrés hídrico, enfermedades, entre otros.

Se ha llegado a calcular que la reducción en el rendimiento en los cereales de invierno debido a las altas temperaturas en el período de llenado de los granos podría llegar a 10-15 % (Wardlaw y Wrigley, Tewolde et al., citados por Hoffman et al., 2011).

Los cultivos pueden estar expuestos durante su período de crecimiento a dos posibles situaciones de estrés diferentes con respecto al régimen térmico, crónico (temperaturas altas durante todo el periodo, 25-32°C) o intermitente (temperaturas muy elevadas durante 3 a 5 días, 33-40°C).

El efecto primario de la ocurrencia de temperaturas más altas que las óptimas es el aumento en la tasa de desarrollo de los cultivos y como consecuencia, la reducción en la duración de las etapas de crecimiento en días calendarios. Según cuanto se acorte una determinada etapa de crecimiento, será el efecto final sobre el rendimiento de las distintas estructuras del cultivo vegetativas o reproductivas y la cantidad de recursos que el cultivo será capaz de captar (agua, nutrientes, radiación).

2.5.1 Efecto de las altas temperaturas en pre – anthesis

Durante este periodo, el principal efecto de las altas temperaturas es la reducción del número de granos por unidad de superficie debido a un acortamiento de las fases ontogénicas a través de la aceleración de la tasa de desarrollo. Dicha disminución se dará en mayor o menor medida según la severidad del estrés y el tipo de estructuras en formación que se vea afectada (Hoffman et al., 2011).

Existen distintos trabajos que han evaluado estos efectos y surgen como conclusiones que: el mayor efecto deletéreo de altas temperaturas sobre el rendimiento del cultivo resultará si ocurre el estrés durante el período crítico de la determinación del número de granos. Se encontró una reducción en el número de granos por unidad de superficie de 4% por cada grado de aumento en la temperatura en los 30 días previos a la floración (Fisher, citado por Hoffman et al., 2011). Altas temperaturas durante el desarrollo floral pueden resultar en polen infértil y aborto de granos (Dawson y Wardlaw, citados por Hoffman et al., 2011).

Por otra parte el peso de los granos, si bien aún no hay granos en la planta, también puede ser afectado en el periodo inmediato previo floración debido a una reducción del tamaño de las estructuras reproductivas más específicamente los carpelos ya que el peso potencial de los granos está determinado, al menos en parte, por el tamaño de los ovarios (que luego de la fecundación formarán el pericarpio del fruto, Calderini et al., citados por Hoffman et al., 2011).

2.5.2 Efecto de las altas temperaturas en pos – antesis

Es ampliamente conocido que períodos sustanciales con moderadamente altas temperaturas durante el período de llenado de los granos reduce el rendimiento a través de la reducción del peso individual de los granos (Sofield et al., Chowdhury y Wardlaw, citados por Hoffman et al., 2011).

Temperaturas moderadamente altas (25 a 32°C) durante todo este período provocarán un aumento en la tasa de llenado de los granos incrementándose también la tasa de desarrollo reduciendo la duración del período. Las altas temperaturas determinan una disminución en el peso de los granos de magnitudes variables (entre 3 y 30%) dependiendo del genotipo, el ambiente y la duración e intensidad de las altas temperaturas. Por ejemplo, en trigo se ha encontrado una reducción entre el 3% al 5% en el peso de grano por cada grado de aumento en la temperatura por encima de los 15°C durante el período de llenado de grano en experimentos en condiciones controladas y a campo (Wardlaw y Wrigley, citados por Hoffman et al., 2011).

Por otra parte, temperaturas moderadamente altas durante el llenado de los granos, también pueden afectar la composición de los mismos. Existe un incremento en el porcentaje de proteína en el grano cuando la temperatura aumenta de 15 a 30°C. Esto ocurre porque tanto la cantidad de almidón y de proteína acumulada en los granos se reduce con el incremento de la temperatura, pero la cantidad de almidón acumulada se reduce relativamente más que la cantidad de proteína (Jenner et al., citados por Hoffman et al., 2011), debido a que la acumulación de carbohidratos en los granos en crecimiento se encuentra limitada por la fuerza de fosa (Slafer y Savin, Borrás et al., citados por Hoffman et al., 2011), que disminuye con estos estreses térmicos, mientras que la acumulación de proteínas está limitada por la fuente de nitrógeno (Dreccer et al., Savin et al., citados por Hoffman et al., 2011).

2.5.3 Efecto de la temperatura en situaciones de anegamiento

El oxígeno disponible en el suelo anegado se agota con rapidez pudiendo variar desde pocas horas a días. Con temperaturas elevadas este proceso es aún más rápido (Beldford et al., Trought y Drew, citados por Hoffman et al., 2001), en la medida que el O₂ en suelo se agota más rápidamente debido a la mayor actividad respiratoria de los microorganismos aeróbicos y del consumo a nivel radicular (Currie, citado por Ernst, 1996).

Cuando la temperatura del suelo es menor a 10 °C, la tasa de desaparición del O₂ del suelo es menor, dado por una reducida actividad radicular, así como por el bajo consumo de O₂ por parte de los microorganismos (Currie, citado por Ernst, 1996). Esto trae como consecuencia junto a la menor tasa de crecimiento de la parte aérea y una extensión del período de adaptación, un menor efecto negativo del exceso hídrico. Sucede lo inverso cuando el suelo supera los 14 °C (Currie, citado por Ernst, 1996).

Miralles et al. (2014) en su trabajo para identificar el período de mayor susceptibilidad al anegamiento en cebada, evaluaron dos situaciones diferentes en cuanto al régimen térmico debido a las fechas de siembra utilizadas. Se realizaron fechas tempranas y tardías para la región (de principios de julio y principios de setiembre respectivamente) donde la temperatura promedio durante el ciclo del cultivo fue 4,3°C mayor en la fecha de siembra tardía. En este trabajo no se analizó específicamente la interacción generada entre el estrés hídrico y la temperatura pero los resultados fueron más negativos en las fechas de siembra más tardías por un efecto agravante de la temperatura, un acortamiento del ciclo y una menor radiación acumulada. Los rendimientos se redujeron en un 40% con respecto al control para las fechas de siembra tempranas mientras que para las fechas tardías la reducción fue de 70% con respecto al control. El aumento de la temperatura en las fechas de siembra tardías pudo haber aumentado la tasa de agotamiento de O₂ del agua en el suelo mediante el aumento de la demanda biológica de O₂ en las raíces y microorganismos (Collaku y Harrison, citados por Miralles et al., 2014). A su vez Miralles et al. (2014) expresan que exponer al cultivo a condiciones más estresantes aumentó la respuesta negativa en términos de rendimiento pero no modificó la duración de la etapa más sensible al anegamiento (30-40 días previos a la antesis).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

3.1.1 Ubicación y descripción del experimento

El ensayo fue realizado en las instalaciones de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, ruta 3 Km 363, en la unidad de invernáculos y telados de la misma, durante los inviernos de los años 2013-2014.



Figura 1. Izquierda: invernáculo abierto (ambiente); derecha: invernáculo cerrado (cálido).

En el trabajo se evaluó el comportamiento de dos cultivares de cebada cervecera (Norteña Daymán y Norteña Carumbé), bajo tres condiciones hídricas y dos temperaturas diferentes durante 10 días a partir de Z32-33 y durante 15 días de recuperación pos estrés hídrico. Los tratamientos hídricos fueron; a) control (C), que consistió en consumo de agua según la demanda del cultivo (manteniendo una napa de 2 cm en la base de los tubos), b) sequía (S), se realizó mediante la suspensión de riego desde el comienzo al final de los tratamientos, y c) anegado (A), consistió en el anegamiento impuesto por la inundación desde abajo hacia arriba y manteniendo una capa de agua de 2 cm por encima de las macetas durante los 10 días de tratamiento. Los tratamientos hídricos comenzaron el 2/9 y el 19/8 para 2013 y 2014 respectivamente.

Los dos tratamientos térmicos, abarcaron dos sub-períodos. El primero fue realizado durante los 10 días de estrés hídrico, denominado como tratamiento térmico 1 (TT1). El segundo se ubicó en los 15 días posteriores al primer período, tratamiento térmico 2 (TT2). Los tratamientos térmicos se realizaron en un telado

abierto con telado de nylon (Figura 1, izquierda), tratamiento ambiente. Para los tratamientos cálidos se mantuvieron las plantas dentro de un invernáculo de vidrio que se mantiene cerrado durante la noche, con una temperatura que en promedio se ubica entre 2 y 3°C por encima de la del telado (Figura 1, derecha).

3.1.2 Manejo realizado

Los ensayos fueron cultivados en tubos de 18 cm de diámetro y 40 cm de profundidad. El sustrato utilizado fue una mezcla de tierra y arena en una proporción 2/3 de tierra y 1/3 de arena.

La siembra se realizó el 1/7 para el ensayo de 2013 y el 18/6 en 2014. Se colocaron 10 semillas por tubo y mediante raleo, fueron seleccionada las 5 plantas nacidas el mismo día por tubo.

Tanto para 2013 como para 2014, se realizó una fertilización con el equivalente a 150 kg/ha de 18-46-0. Se realizó también un tratamiento cura semilla, con la aplicación de 250 cc/100 g de semilla de Envió+, cura semillas fungicida de amplio espectro, de contacto y sistémico compuesto por una mezcla principios activos en distintas proporciones, metalaxil (50 g/l), tiram (100 g/l) y carbendazim (250 g/l) a una dosis de 12,5 g, 25 g y 62,5 g respectivamente en 250 cc cada 100 g de semilla. También se aplicaron 50 cc/100g de semilla de Abril50 compuesto por iprodione, fungicida de contacto con un espectro más reducido pero que asegura una buena protección frente a mancha en red y borrosa, en una concentración de 500 g/l lo que equivale a una aplicación de 25 g cada 100 g de semilla.

Las re-fertilización para ambos años se realizó con una dosis equivalente a 40 Kg de N por ha en Z22 y 50 Kg de N equivalente por ha a Z30. Las fechas en que ocurrieron dichos estadios fueron el 1 de agosto y el 19 de julio para Z22 en 2013 y 2014 respectivamente. Y para Z30 el 22 de agosto y el 10 de agosto para 2013 y 2014 respectivamente.

En cuanto al manejo de enfermedades se realizaron aplicaciones de Opera, fungicida de acción sistémica preventivo, curativo y erradicante (pyraclostrobin 13,3% + epoxiconazole 5%) cada 20 días de modo de mantener un ambiente libre de enfermedades. El control de malezas se realizó de forma manual cuando fue necesario.

3.1.3 Variedades

Las variedades evaluadas fueron Norteña Carumbé (NC) y Norteña Daymán (ND). Dichos cultivares son de ciclo medio-corto y medio para NC y ND, respectivamente, de similar respuesta al fotoperiodo y alto potencial de rendimiento (German et al., 2000).

3.2 DETERMINACIONES

3.2.1 En suelo

3.2.1.1 Humedad de suelo

La humedad de suelo se determinó mediante la diferencia de peso de la muestra fresca y luego de secada en estufa a 105°C por 48 hs. Se realizaron 5 determinaciones, según tratamiento y variedad. Los momentos fueron 5 días previos al comienzo de los tratamientos hídricos, al inicio de los mismos, 5 días después, 10 días después y 15 días después.

3.2.2 En planta

3.2.2.1 Componente del rendimiento, tallos y fertilidad de tallos

Alrededor de Z30, previo al comienzo de los tratamientos se realizó un conteo de tallos por tubo. Luego, en Z47 al momento de la antesis se llevó a cabo un conteo de espigas por tubo, de modo de poder estimar la fertilidad de tallos.

3.2.2.2 Biomasa, rendimiento en grano y componentes a cosecha

Al momento de cosecha se determinó la biomasa total de la parte aérea, pesando todas las muestras cortadas a la base de los tallos. Luego de cosechada la biomasa total, se procedió a la trilla de las espigas para obtener el rendimiento en granos por tubo. Con este dato y el de número de espigas por tubo se calculó el rendimiento por espiga.

El peso de mil granos se realizó mediante conteo y peso de 3 sub muestras de 100 granos cada una. Con el dato de rendimiento por espiga y el peso de grano se calcularon los granos por espiga.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de los datos generados se realizaron los análisis de varianza para cada año y cada variable estudiada. En los casos donde las diferencias fueron significativas se realizó el test de separación de medias por Tukey. El diseño experimental utilizado fue un modelo multifactorial cuyos factores son; año, cultivar (Cvr), tratamiento hídrico (EH), tratamiento térmico durante el estrés hídrico (TT1), tratamiento térmico en periodo de recuperación (TT2).

Se utilizaron dos modelos estadísticos para el análisis de las variables, uno cuando se tomaron los años por separado y otro en conjunto. Para los mismos se realizaron pruebas de normalidad (Q-Q plot y Shapiro Wilkins) y homogeneidad de varianzas con el objetivo de comprobar el ajuste del modelo planteado para cada variable analizada. Para comprobar la homogeneidad de varianzas se realizó un gráfico de dispersión de residuos en función de los valores predichos observando la distribución de los puntos. Cuando el patrón de puntos es aleatorio se comprueba la homogeneidad de las varianzas.

Modelo estadístico para los años por separado:

$$Y_{ijk1k2r} = \mu + v_i + \psi_j + T_{k1} + T_{k2} + v\psi_{ij} + VT_{ik1} + VT_{ik2} + \psi T_{jk1} + \psi T_{jk2} + T_{k1k2} + \epsilon_{ijk1k2r}$$

Modelo estadístico para los años en conjunto:

$$Y_{aijk1k2r} = \mu + \beta_a + v_i + \psi_j + T_{k1} + T_{k2} + \beta v_{ai} + \beta \psi_{aj} + \beta T_{ak1} + \beta T_{ak2} + v\psi_{ij} + VT_{ik1} + VT_{ik2} + \psi T_{jk1} + \psi T_{jk2} + T_{k1k2} + \epsilon_{aijk1k2r}$$

Donde:

$Y_{aijk1k2r}$ es el valor que resulta de la variable medida.

μ es la media general de cada experimento.

β_a es el efecto del año.

v_i es el efecto del i-ésimo cultivar.

ψ_j es el efecto del i-ésimo tratamiento hídrico.

T_{k1} es el efecto del i-ésimo tratamiento térmico en el período 1.

T_{k2} es el efecto del i-ésimo tratamiento térmico en el período 2.

βv_{ai} es el efecto de la interacción entre el año y el cultivar.

$\beta \psi_{aj}$ es el efecto de la interacción del año con el tratamiento hídrico.

βT_{ak1} es el efecto de la interacción del año con el tratamiento térmico durante el período 1.

βT_{ak2} es el efecto de la interacción del año con el tratamiento térmico durante el período 2.

$v\psi_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el cultivar y el tratamiento hídrico.
 vT_{ik1} es el efecto de la interacción entre el cultivar y el tratamiento térmico durante el período 1.

vT_{ik2} es el efecto de la interacción entre el cultivar y el tratamiento térmico durante el período 2.

ψ_{Tjk1} es el efecto de la interacción entre los tratamientos hídricos y el tratamiento térmico durante el período 1.

ψ_{Tjk2} es el efecto de la interacción entre los tratamientos hídricos y el tratamiento térmico durante el período 2.

T_{k1k2} es el efecto de la interacción entre los dos tratamientos térmicos.

$\varepsilon_{aijk1k2r}$ es el error experimental.

Para la mayor parte del análisis de datos se utilizó el programa de análisis estadístico INFOSAT (versión 2009). Para la construcción de árboles de regresión se utilizó el programa SAS.JMP.Statistical.Discovery.v8.0-Null.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizarán los efectos de los tratamientos hídricos y térmicos sobre el rendimiento y sus componentes principales, así como los efectos que pudieron influir sobre el resultado, como el año o particularidades con respecto al manejo del cultivo.

4.1 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO

A continuación se analiza la evolución del contenido de humedad del suelo entre años para los tratamientos hídricos realizados (Figura 2).

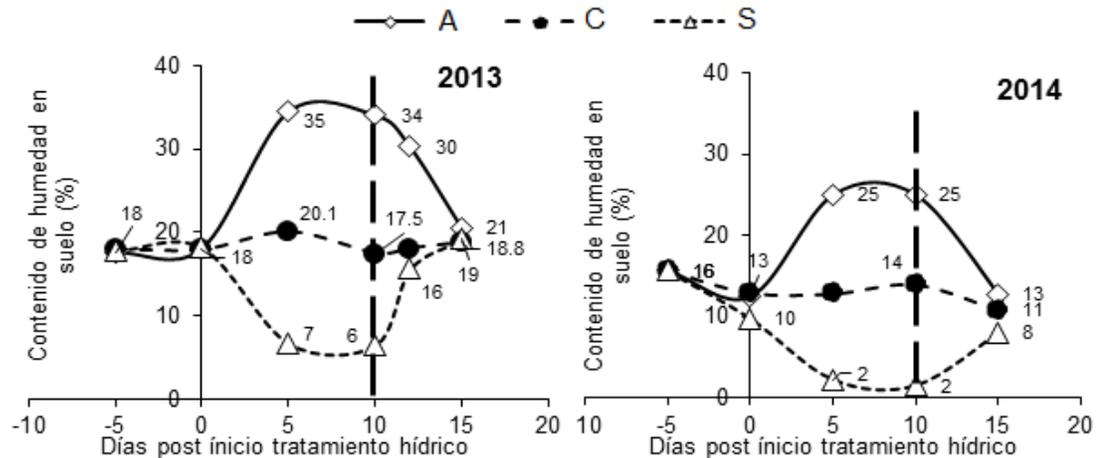


Figura 2. Evolución del contenido de humedad del suelo en peso para los tres tratamientos hídricos

Si bien no se comparan estadísticamente, para los dos años existieron diferencias considerables en la evolución del contenido de humedad en suelo. Para el 2013 la humedad en suelo fue mayor a la del 2014. El manejo del agua para ambos años fue igual; La composición textural del suelo puede haber estado involucrada en las diferencias observadas. Así como también las temperaturas medias en los 30 días previos al inicio de los tratamientos (Cuadro 5). Cabe mencionar que en el presente ensayo no se pudo estimar el contenido hídrico a capacidad de campo, pero se esperaría que el tratamiento control hídrico haya presentado los valores de CC para cada tipo de suelo utilizado. Tomando como referencia los trabajos de Hansen et al. (1979), que expresan que la capacidad de campo depende de la textura de cada suelo y que un suelo franco se encuentra dentro de un rango de 18 a 26% de CC podríamos pensar que el suelo utilizado en 2013 sería de tipo franco. Por otra parte, un suelo franco arenoso se

ubica dentro de un rango que va desde 10 a 18% por lo que el suelo utilizado en 2014 se ubicaría en la clasificación de tipo franco arenoso.

4.2 EFECTO DEL RÉGIMEN HÍDRICO SOBRE EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES

A continuación se presenta la influencia directa de los tres regímenes hídricos evaluados sobre el rendimiento en grano (Cuadro 1). Se muestran los resultados del análisis de varianza para los tratamientos hídricos, de los años por separado y en conjunto.

Cuadro 1. Análisis de varianza para el rendimiento en grano por planta del efecto del régimen hídrico en función del año

| Año | CM | F | P-valor | DMS ^{&} | CV (%) |
|-----------|-------|-------|---------|----------------------|--------|
| 2013 | 22,9 | 10,31 | 0,0002 | 1,037 | 28,1 |
| 2014 | 31,22 | 16,9 | <0,0001 | 0,942 | 14,8 |
| 2013-2014 | 50,7 | 25,7 | <0,0001 | 0,68 | 19,4 |

&.- Tukey 5%

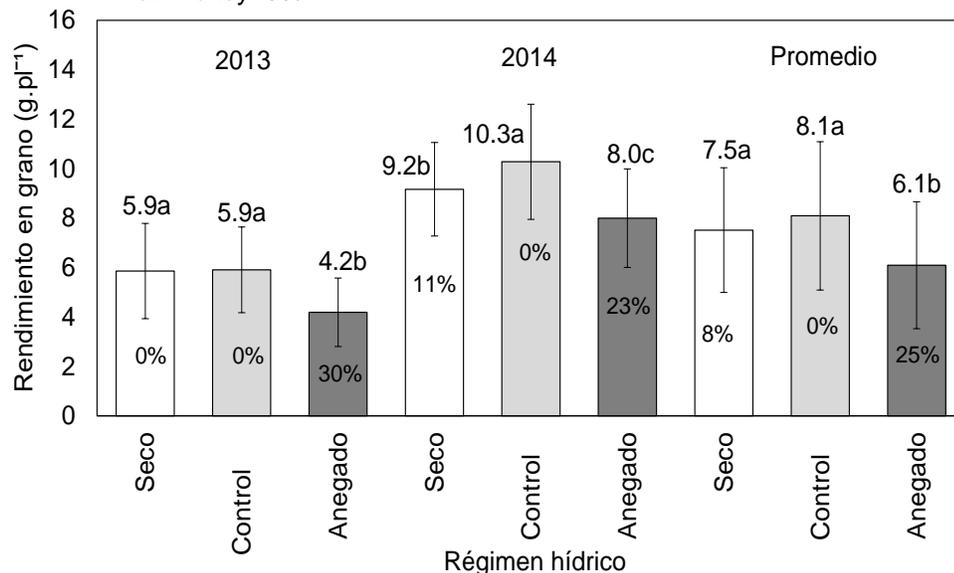


Figura 3. Rendimiento en grano por planta según régimen hídrico, para el promedio de los años y cada año en particular. Valores con distinta letra, implican diferencias estadísticas dentro del año o para el conjunto y disminución del mismo con respecto al control para el año 2013, 2014 y para el promedio de ambos

Al analizar el efecto de los regímenes hídricos en promedio de ambos años podemos observar que el rendimiento fue significativamente menor para el tratamiento de exceso hídrico y que no hubo diferencias importantes entre los

tratamientos sequía y control. En promedio para los dos años el anegamiento implicó una disminución del rendimiento por planta de 25% con respecto al control, y el tratamiento con déficit hídrico un 8%. Esto coincide con los trabajos realizados por Hoffman et al. (2009), que indican que el anegamiento en estadios tempranos del encañado provocó pérdidas de potencial de rendimiento del orden del 28% en cebada.

Cuando analizamos los años por separado se aprecia que en el año 2013 los rendimientos fueron inferiores, un 43% menor en relación al 2014. Para este mismo año la magnitud del efecto del anegamiento fue mayor presentando una disminución de 30% con respecto al control mientras que en el año 2014 la disminución fue de 23%. En el tratamiento de sequía, en el año 2013 no se registran diferencias con respecto al control, en el año 2014 existió una caída significativa del rendimiento por planta de 11% del tratamiento con déficit hídrico en relación al control. Para el año 2014 la magnitud de la pérdida, coincide con los resultados de Hoffman et al. (2008), en donde el estrés hídrico por sequía durante 8 días posteriores a Z 32 redujo el rendimiento en un 18% mientras que el anegamiento presentó una reducción de 30%.

Los componentes determinantes del rendimiento son el número de granos por unidad de área y el peso de los mismos así como la variabilidad en función de la biomasa total producida por el cultivo y su índice de cosecha (Hoffman et al., 2011). En la siguiente figura se presenta en general para ambos años la variabilidad del rendimiento en grano por planta en función del total de biomasa producida a cosecha para los tres regímenes hídricos evaluados.

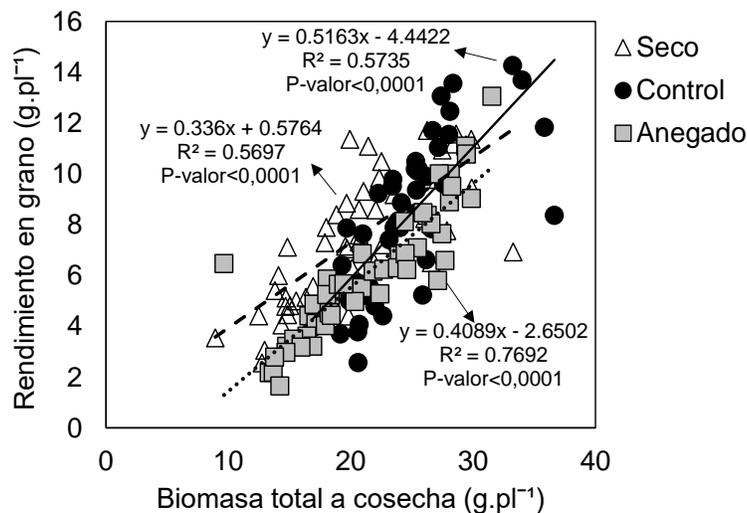


Figura 4. Rendimiento por planta en función de la biomasa producida según el régimen hídrico para ambos años

El rendimiento en grano presentó una correlación alta y positiva con la biomasa generada para las tres condiciones hídricas. Las diferencias surgen de la relación con el índice de cosecha.

Como se observa, para el anegamiento la variación del rendimiento por planta aparece más fuertemente determinado por la variación en la biomasa total producida ($R^2 = 76\%$). Mientras que para los tratamientos control y déficit hídrico este valor es inferior ($R^2 = 60\%$) (Figura 4). Los mínimos y máximos valores de biomasa a cosecha fueron notoriamente más bajos en el tratamiento anegado y en el tratamiento seco se observan rendimientos altos con valores bajos de biomasa lo que sugiere una compensación por parte del índice de cosecha (Cuadro 2). En cuanto a la situación de anegamiento estos resultados reafirman los obtenidos por Miralles et al. (2014) donde las variaciones en el rendimiento debido a condiciones de anegamiento alrededor de la antesis fueron fuertemente explicadas por cambios en la biomasa en trigo y cebada ($R^2 = 95\%$) para el total de los datos de ambas especies. Por otro lado para la condición de sequía estos resultados coinciden con los obtenidos por Lamarca et al. (2010) donde el tratamiento de sequía disminuyó los niveles de biomasa pero no resintió el índice de cosecha mientras que el exceso afectó a ambos componentes.

Cuadro 2. Biomasa a cosecha, índice de cosecha y rendimiento en grano por planta, según tratamiento hídrico para los dos años evaluados y el promedio de ambos

| Año | Biomasa a cosecha (g.MS.pl ⁻¹) | | | IC (%) | | | Rendimiento (g.pl ⁻¹) | | |
|----------------|---|-------|---------|---------|---------|---------|--------------------------------------|---------|------------------|
| | 2013 | 2014 | 2013/14 | 2013 | 2014 | 2013/14 | 2013 | 2014 | 2013/14 |
| Seco | 16,2b | 24,9 | 20,64b | 35,3a | 37,1a | 36,2a | 5,8a | 9,2b | 7,5 ^a |
| Control | 21,7a | 26,8 | 24,2a | 27,0b | 38,3a | 32,6b | 5,9a | 10,2a | 8,9 ^a |
| Anegado | 16,6b | 26,0 | 21,39b | 25,2b | 30,3b | 27,7c | 4,19b | 8,0c | 6,0b |
| Media Gral. | 18,16 | 26 | 22,1 | 29,1 | 35,23 | 32,1 | 5,3 | 9,1 | 7,4 |
| CM | 218,40 | 21,20 | 4416,67 | 707,9 | 446,2 | 869,82 | 22,98 | 31,22 | 50,79 |
| F | 40,05 | 1,90 | 20,22 | 14,05 | 13,32 | 21,02 | 10,31 | 16,98 | 25,74 |
| P-valor | <0,0001 | 0,15 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0002 | <0,0001 | <0,0001 |
| DMS (*) | 1,623 | - | 7,159 | 4,934 | 4,023 | 3,115 | 1,037 | 0,950 | 0,680 |
| CV (%) | 12,80 | 12,85 | 13,37 | 24,30 | 16,40 | 19,97 | 28,07 | 14,82 | 19,42 |

*Valores con distintas letras dentro de columnas, difieren entre si Tukey, $\alpha 5\%$.

En este cuadro se observa en promedio y para cada año el rendimiento en grano, biomasa total e índice de cosecha.

En el año 2013 los tratamientos de sequía y anegado generaron la misma biomasa y fueron significativamente inferiores, en un 25% con respecto al control. En el 2014 la biomasa generada no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos hídricos. Si bien la tendencia de generación de biomasa fue la misma para los tratamientos hídricos en los dos años evaluados, en promedio en el año 2014 la generación de biomasa fue un 31% superior al 2013 lo que explica gran parte de las diferencias en rendimiento presentadas entre años.

Cuando se analiza el índice de cosecha, en el 2013 se revierten los resultados y el tratamiento seco, que fue el que sistemáticamente generó menos biomasa, es el que presentó un índice de cosecha significativamente superior al control y el exceso hídrico, los cuales no presentaron diferencias entre sí. El tratamiento seco presentó un IC 10% superior al promedio del control y anegado.

Para el año 2014, la biomasa generada por el tratamiento seco fue inferior pero no fue estadísticamente diferente al control. A su vez en este año el índice de cosecha del régimen seco fue igual al control, estadísticamente distinto del anegado.

Por otra parte, para los dos años, bajo condiciones de anegamiento se resiente la producción de biomasa siendo significativamente menor en el año 2013 con respecto al control, sin diferencias importantes para el año 2014. El índice de cosecha del tratamiento anegado presentó una importante disminución en los dos años evaluados. Las diferencias en rendimiento fueron explicadas mayormente por la biomasa y el índice de cosecha para el año 2013, y por el índice de cosecha para el año 2014.

Estos resultados concuerdan con los trabajos de Miralles et al. (2014), en donde el cultivo de cebada evidenció una gran sensibilidad a las condiciones de exceso hídrico durante el período de encañado, explicado por una disminución en la biomasa generada y en el índice de cosecha; y reafirma el concepto de tolerancia frente al anegamiento descrito por Setter y Waters (2008) donde expresan que para mantener rendimientos en grano aceptables en condiciones de anegamiento, un cultivo tolerante mantiene altas tasas de crecimiento y acumulación de biomasa en relación con las condiciones no inundadas (suelo normalmente drenado) evidenciando también la susceptibilidad de la cebada bajo estas condiciones. A su vez, parte de la reducción de biomasa pudo haber estado explicada por lo que concluyen Marti et al. (2015) en cuanto a que los daños del anegamiento reducen la biomasa a nivel radicular, la acumulación de carbohidratos en los tallos y tienen un efecto residual una vez terminado el estrés sobre la translocación hacia los granos

En resumen, bajo condiciones de exceso hídrico el cultivo vio resentida de manera muy importante la generación de biomasa y su índice de cosecha, aunque puede que en años de elevada productividad, como el 2014, la biomasa presente diferencias mínimas con respecto al control. Para los dos años evaluados la biomasa generada por el exceso hídrico tiende a superar al déficit.

En general los resultados muestran la existencia de una reducción en la biomasa producida y una compensación a través del índice de cosecha para las situaciones de déficit hídrico, manteniéndose un rendimiento medio que incluso en el año 2013 fue igual al control. En condiciones de exceso hídrico este mecanismo no se da y además de la biomasa a cosecha también se resiente el índice de partición, lo cual explica el rendimiento significativamente menor para los dos años evaluados. Se registró una caída del 24 % en la biomasa para el año 2013 y solo un 2% en el índice de cosecha mientras que en el año 2014 no existieron diferencias importantes en la generación de biomasa pero si una caída del 8% en el índice de cosecha con respecto al control. Estos resultados confirman los obtenidos por Lamarca et al. (2010) donde la disminución en la biomasa por efectos del anegamiento fue del orden del 23 % y el índice de cosecha presentó una caída de 5 %.

A continuación se presenta el efecto de los tratamientos hídricos sobre los principales componentes del rendimiento en grano.

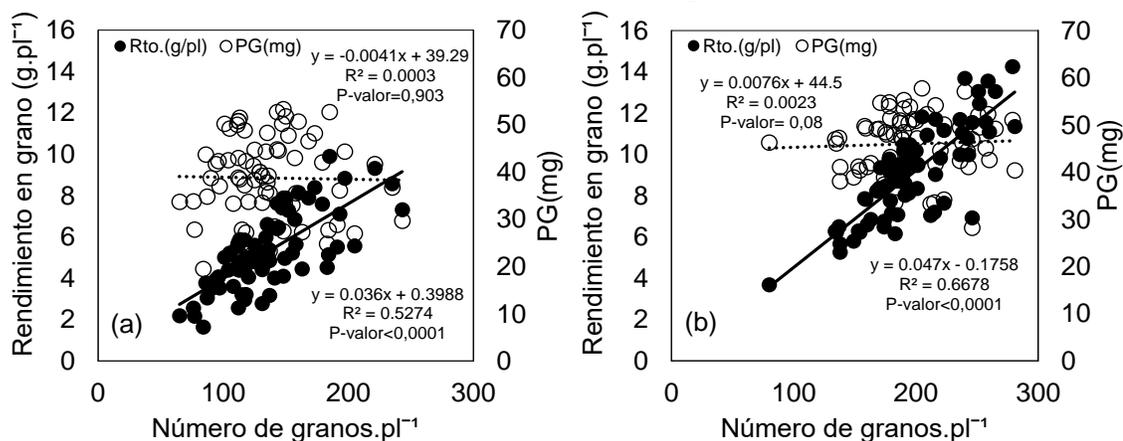


Figura 5. Rendimiento y peso de grano en función del número de granos por planta para el año 2013 (a) y 2014 (b).

Como se observa (Figura 5) la variación del rendimiento por planta está explicado mayormente por la variación del número de granos por planta (NGP) para ambos años (R² de 0,53 y 0,66 para los años 2013 y 2014 respectivamente), sin que en promedio el peso de grano (PG) fuese afectado por el NGP. Para las condiciones experimentales el mayor potencial de rendimiento del 2014, obedece

a un mayor NGP y PG superior. En promedio el NGP en el 2014 fue un 33% mayor que el del año 2013. En cuanto al PG en promedio hubo un 15% a favor del año 2014. El NGP, resultó ser el principal componente de rendimiento como era de esperarse.

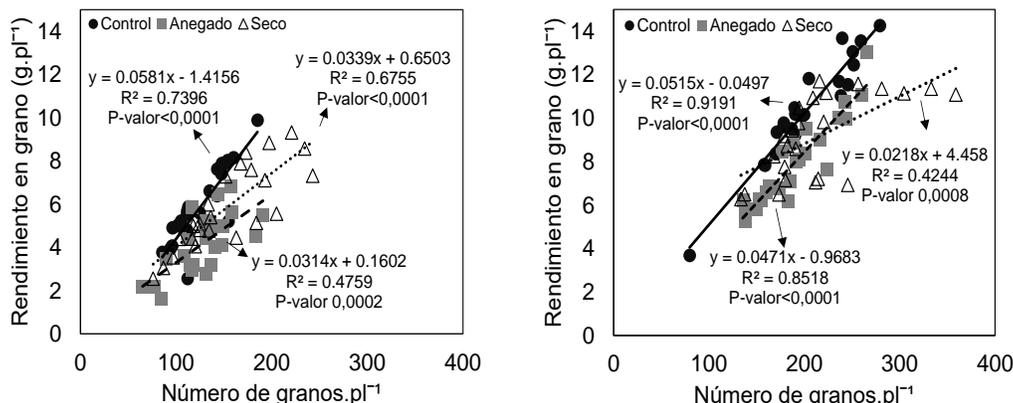


Figura 6. Rendimiento según tratamiento hídrico, en función del número de granos por planta para los años 2013 (a) y 2014 (b).

De ésta figura, podemos extraer que para igual NGP, con estrés hídrico (sea por déficit o por probable exceso), el PG en el mejor de los casos es igual al control. En el año 2013, el año con menor potencial dado el menor NGP, es claro el efecto sobre todo del anegamiento temprano sobre el PG. Si bien no se analizan estadísticamente las diferencias entre los términos de las ecuaciones lineales, el coeficiente b del anegado, en relación al testigo en el 2013, se ubica 46 % por debajo como resultado de la caída del PG. Esto en promedio puede apreciarse para ambos años (Cuadro 3).

Cuadro 3. Promedio de número de granos por planta y peso de grano según tratamiento hídrico para los años evaluados y el promedio de los mismos.

| Componente | NGP | | | PG(mg) | | |
|------------|--------|--------|----------|---------|---------|-------------------|
| | 2013 | 2014 | Promedio | 2013 | 2014 | Promedio |
| Año | 2013 | 2014 | Promedio | 2013 | 2014 | Promedio |
| Seco | 153a | 215 | 185a | 38,1b | 43,6b | 40,9b |
| Control | 126b | 198 | 163b | 46,2a | 51,0a | 48,6 ^a |
| Anegado | 128b | 190 | 159b | 32,4c | 41,8b | 37,1c |
| Promedio | 136 | 201 | 169 | 38,9 | 45,5 | 42,2 |
| CM | 5620,8 | 3889,6 | 8868,6 | 1160,13 | 584,48 | 1671,3 |
| F | 5,44 | 2,63 | 6,98 | 31,9 | 27,77 | 55,72 |
| P-valor | 0,007 | 0,0811 | 0,0014 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| MDS (*) | 22,357 | - | 17,27 | 4,189 | 3,240 | 2,653 |
| CV (%) | 23,66 | 19,01 | 21,08 | 15,50 | 10,08 | 12,98 |

*Valores con distintas letras dentro de columnas, difieren entre si Tukey, $\alpha 5\%$.

Si bien es mayor el efecto negativo del anegamiento sobre el PG en promedio, el PG también se vio afectado bajo condiciones de déficit hídrico, aunque en el año 2013, podría ser consecuencia del mayor NGP (Cuadro 3). Estos resultados no coinciden con los obtenidos por Hoffman et al. (2008), Lamarca et al. (2010) donde el PG no fue afectado por los tratamientos hídricos en experimentos muy similares realizados en la Facultad de Agronomía.

A pesar de generar una biomasa igual o superior al déficit como se veía anteriormente (Cuadro 2) y un número de granos igual al control, el rendimiento en grano por planta del anegado siempre fue inferior en promedio y para cada uno de los años, debido a la caída del índice de cosecha, por un PG que se vio resentido, a pesar de lo temprano del estrés. Esto evidencia lo que expresa Calderini et al. (2001) en cuanto a que hay efecto sobre el peso potencial de los granos frente a condiciones de anegamiento inmediatamente previo a la floración y esto ocurre principalmente por el efecto depresivo sobre el desarrollo de los carpelos que darán lugar al pericarpio del grano. Coincide y reafirma lo que expresan Lizana y Calderini (2013), Marti et al. (2015) en cuanto a que existe una fuerte relación entre el tamaño de los carpelos florales al momento de la polinización y el peso final de los granos tanto en trigo como en cebada. Marti et al. (2015) además expresan que distintos tratamientos de anegamiento en trigo desde inicios del encañado hasta la antesis principalmente afectaron el crecimiento de la espiga reduciendo el número de granos y espiguillas fértiles, no afectando la eficiencia de fructificación. Por otra parte como lo expresa (Dunstone y Evans, Millet y Pinthus, citados por Castro et al., 2011), el volumen y el contenido hídrico máximo del grano se determina en el momento inmediato previo a la antesis y en este sentido trabajos de Lizana y Calderini (2013) han encontrado que el largo de grano muestra una estrecha asociación con el peso final de grano y que dicha variable se determina con anterioridad al volumen, y aún antes que el contenido hídrico máximo. De este modo, es posible especular que un mayor peso y tamaño de carpelos en antesis permitiría un mayor volumen de grano especialmente mediado por el largo de grano.

Continuando con el análisis de los componentes del rendimiento se muestra el efecto de los tratamientos hídricos sobre el número de espigas y el tamaño de las mismas.

Cuadro 4. Efecto del régimen hídrico sobre el número de espigas por planta y el número de granos por espiga para cada año.

| Año | 2013 | | 2014 | |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| | Esp.pl ⁻¹ | Gr.esp ⁻¹ | Esp.pl ⁻¹ | Gran.esp ⁻¹ |
| Seco | 7,5b | 20,6a | 10,6b | 20,6a |
| Control | 9,2a | 14,2b | 10,0b | 20,0a |
| Anegado | 9,8a | 13,1b | 12,0a | 16,0b |
| Media Gral. | 8,8 | 15,9 | 10,9 | 18,8 |
| CM | 34,0 | 391 | 23,4 | 151,7 |
| P-valor | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0003 |
| MDS(*) | 0,711 | 2,529 | 0,773 | 2,798 |
| CV (%) | 11,64 | 22,8 | 10,25 | 21,31 |

*Valores con distintas letras dentro de columnas, difieren entre si Tukey, α 5%.

Miralles et al. (2014) en concordancia con Hoffman et al. (2001), en cebada expresan que el componente que explica en mayor medida la variación en número de granos por unidad de superficie es el componente número de espigas. En promedio el número de espigas por planta fue un 20% superior para el año 2014 y el tamaño de las mismas también con un número de granos por espiga un 16% mayor. En el año 2013, como se venía observando (cuadro 3), el número de granos por planta en el tratamiento seco fue el mayor. Del cuadro 4, surge que este resultado deriva de un mayor número de granos por espiga ya que el número de espigas por planta fue significativamente menor al control. En el anegado fueron iguales al control el número de espigas y su tamaño. Durante el año 2014 sin diferencia de los tratamiento hídricos sobre el NGP, los sub-componentes espigas y granos por espiga varían compensándose en el anegado en relación al control y tratamiento seco.

Por lo tanto para el año 2013 se pudo observar un mecanismo de compensación del tratamiento seco a través del aumento en el tamaño de las espigas lo que generó un mayor NGP. En el año 2014, en cambio, se efectuó un aumento del número de espigas con un menor tamaño de las mismas y los tratamientos no difirieron en el NGP. Cultivares como Norteña Carumbé y Laisa bajo condiciones de anegamiento en la etapa inicial del encañado vieron afectado su NGP debido a una reducción significativa del número de espigas por planta y el número de granos por espiga (Lamarca et al., 2010). Por otra parte Estanduela Quebracho en el mismo experimento explicó la caída del NGP por una reducción en el número de granos por espiga siendo el número de espigas igual al tratamiento control. Los resultados del presente trabajo reafirman los obtenidos por Lamarca et al. (2010) en cuanto a los comportamientos diferenciales de los cultivares frente al anegamiento.

Miralles et al. (2014) encontraron que en condición de anegamiento durante la etapa de encañado el número de espigas por planta fue el principal subcomponente afectado por el anegamiento en la cebada con pérdidas de alrededor de 50% con respecto al control. Por lo tanto las espigas por planta fueron el componente principal que explicó la variación en el número de granos por planta, ya que el número de granos por espiga se redujo ligeramente solo en el tallo principal. En el presente experimento no hubo concordancia con estos resultados ya que el número de espigas por planta presentó un aumento promedio de 13% con respecto al control y si hubo un efecto depresivo del número de granos por espiga que presentó una caída del 15% promedio.

El menor número de granos por espiga registrado en el tratamiento anegado podría estar explicado por lo que señalan Trought y Drew, citados por Hoffman et al. (2001) en cuanto a que el estrés hídrico en la etapa de encañado para el cultivo de cebada cervecera cause efectos directos como la macho esterilidad o esterilidad de las espiguillas.

4.3 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO Y EFECTOS DEL RÉGIMEN TÉRMICO

A continuación se describe el ciclo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha para los años 2013 y 2014, en donde se muestra la evolución de las temperaturas promedio diarias detallando los estadios fenológicos más importantes y los períodos donde fueron aplicados los tratamientos hídricos y térmicos. Es importante observar las diferencias térmicas que se presentaron entre años y analizar de qué manera puede haber influido en las distintas etapas del cultivo, sobre los tratamientos realizados, y finalmente sobre los rendimientos obtenidos.

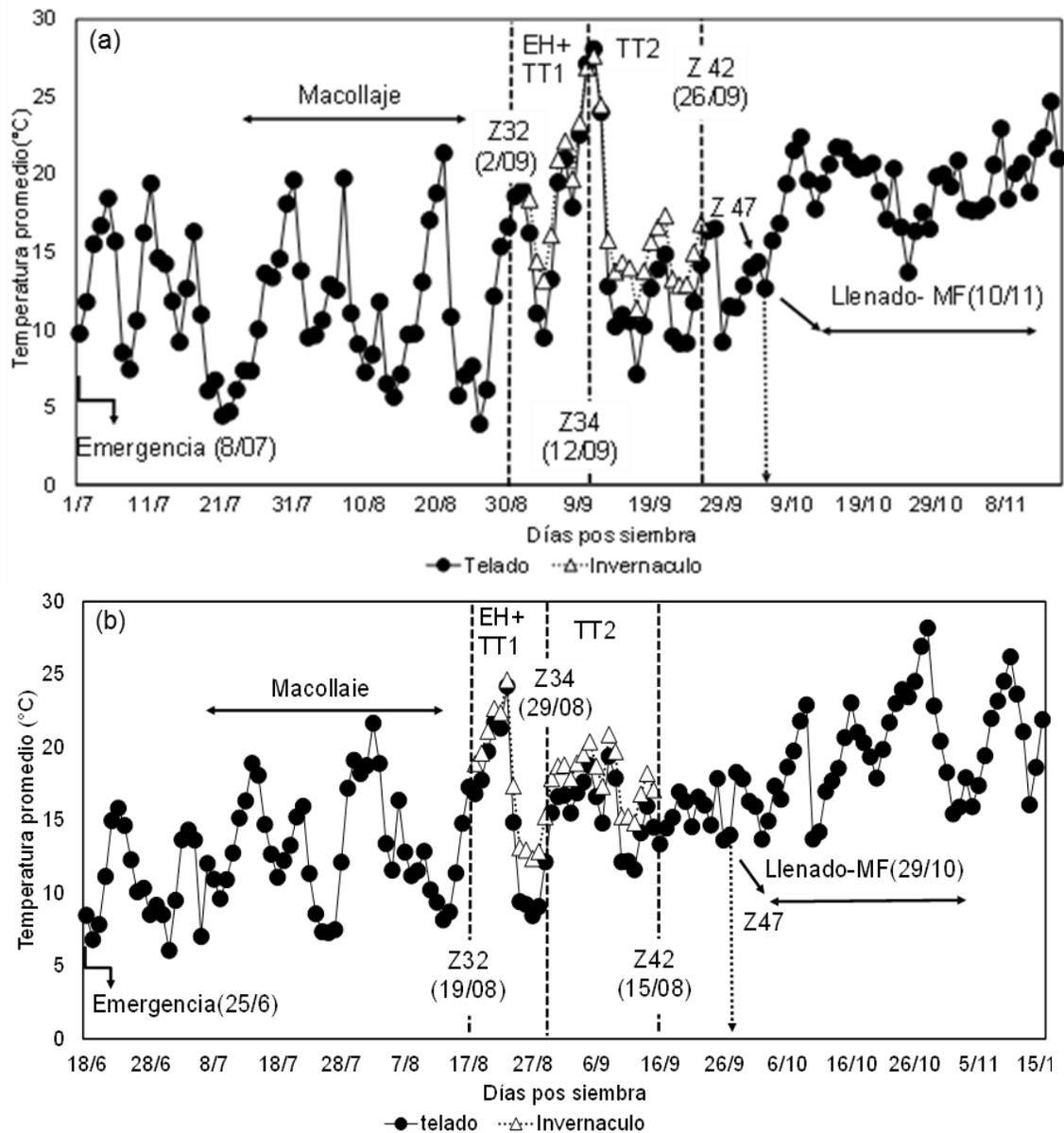


Figura 7. Evolución de la temperatura durante el ciclo del cultivo para los años (a) 2013 y (b) 2014

A modo de resumen en el cuadro 5 se presentan los promedio de las temperaturas en diferentes sub-períodos para los distintos tratamientos térmicos para ambos años.

Cuadro 5. Temperaturas medias por etapa fenológica y períodos de tratamiento para los años evaluados

| Año | 2013 | | 2014 | | Promedio | |
|-----------------------|----------------------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| Tratamiento térmico * | Ambiente cálido | | Ambiente cálido | | Ambiente cálido | |
| Sub período | ----- Temperatura °C ----- | | | | | |
| Siembra – emergencia | 12,9 | | 11,9 | | 12,4 | |
| Emergencia - Z. 32 | 11,6 | | 13,5 | | 12,5 | |
| TT1 (Z.32-Z.34)** | 19,1 | 20,6 | 15,4 | 17,9 | 17,3 | 19,3 |
| TT2 (Z.34-Z.42)*** | 12,8 | 15,1 | 15,5 | 17,8 | 14,3 | 16,5 |
| Z 41-42 – MF | 18,3 | | 18,9 | | 18,6 | |

*cálido= invernáculo y ambiente=telado** Abarca 10 días a pos Z. 32, y hay tratamientos de estrés hídricos combinados con dos tratamientos térmicos

*** Abarca 15 días pos Z. 41-42, es el periodo de recuperación pos estrés hídrico con dos tratamientos térmicos diferentes

Como se observa en el Cuadro 5 y Figuras 7 y 8, para los dos años en el período que va desde la siembra hasta Z32 se registraron temperaturas moderadas las cuales se encontraron alrededor del óptimo para la etapa de macollaje (aunque el año 2014, se ubicó por encima del óptimo). Hoffman et al. (2009), expresan que la temperatura óptima para la producción de macollos se encontraría alrededor de los 11.5 °C. Si las temperaturas se encuentran muy por debajo del óptimo el macollaje se reduce debido al enlentecimiento de la tasa de desarrollo y por tanto aparición de los macollos. A medida que la temperatura es mayor al óptimo se reduce el tiempo de aparición de los macollos por lo que se reduciría el macollaje debido a un acortamiento de la etapa y se incrementarían las diferencias entre los macollos y la planta madre. Como expresa Ernst (1996), para trigo y cebada respectivamente, este comportamiento se asocia a la competencia temprana por luz. Cuando la cobertura del suelo es muy temprana (Zadocks 22 – 23) debido a temperaturas cálidas al inicio del ciclo los macollos más jóvenes muestran tasas de crecimiento menores debido a la competencia en relación al tallo principal, comprometiendo su fertilidad, inclusive su sobrevivencia y este comportamiento varía con el cultivar. Siguiendo esta línea Hoffman et al. (2008) concluyen que el crecimiento temprano no se relaciona con un mayor rendimiento en grano, sobre todo en años de temperaturas cálidas.

A partir del periodo 1 y hasta el fin del periodo 2 se registraron las diferencias más importantes de temperatura entre los años.

En el 2013, la primera etapa del encañado (TT1) registró altas temperaturas, mientras que en el 2014 las temperaturas fueron más frescas. Esto en parte podría estar asociados a las diferencias en la fecha de siembra entre años. En el 2013 el período 1 (TT1) comenzó el 2 de setiembre y registró una temperatura promedio de 19,1°C, mientras que en 2014 se inició el 18 de agosto y tuvo una temperatura promedio de 15,4 °C , para los diez días de duración de este período. Tomando en cuenta que la temperatura óptima para trigo y cebada en el período de encañado es de 15°C (Chowdury y Wardlaw, citados por Castro et al., 2011), todos los tratamientos en este período estuvieron por encima de la misma a excepción del ambiente en el año 2014. El efecto predominante de las temperaturas más cálidas durante las etapas ontogénicas del cultivo es acelerar la tasa de desarrollo y por tanto acortar la duración de las etapas. Se podría esperar que en el año 2013 la primera etapa de concreción del rendimiento haya sido más corta que para el 2014.

Según Fisher, citado por Hoffman et al. (2001) por cada grado de aumento de la temperatura durante el período crítico que transcurre 30 días previos a floración hay una disminución del número de granos por metro cuadrado de un 4%. A su vez, trabajos de Calderini et al. (2001), concluyen que el peso del grano sería afectado por altas temperaturas en pre-antesis principalmente como consecuencia de una reducción en el peso de los carpelos. Por lo tanto se puede esperar que en el año 2013 el rendimiento haya sido afectado por la temperatura previa a la antesis a través del acortamiento de la etapa que va desde Z31-32 hasta Z47 y a su vez un efecto directo afectando el tamaño de carpelos y por tanto una disminución del peso de los granos.

Para el período 2 (TT2), desde Z34 a Z41-42 se registran grandes diferencias entre los dos años en cuanto a régimen térmico. El año 2013 la temperatura fue de 12,8 °C, observándose entonces un cambio brusco en la temperatura, ya que el primer período transcurre con temperaturas altas para el cultivo y cambia a un régimen de temperaturas más bajas con una caída de 6°C en promedio en TT2.

Por otra parte, en el año 2014, no se registraron cambios significativos de la temperatura ente el TT1 y TT2 (Cuadro 5).

Wardlaw y Wrigley, citados por Castro et al. (2011) clasificaron las temperaturas en el período de llenado de grano como temperaturas moderadamente altas durante todo el período (25 a 32°C) y altas temperaturas (33 a 40°C). Por lo tanto durante el período de llenado de grano las temperaturas no habrían tenido efecto negativo en ninguno de los años, en promedio 18,3 °C en 2013 y 18,9°C en 2014.

Para ambos años y los dos períodos, el tratamiento cálido, significó cambios diferentes entre años y período, modificándose la temperatura desde 1.5 a 2.5 °C, sobre las temperaturas medias del tratamiento térmico ambiente.

En base a lo antes mencionado podemos caracterizar dos situaciones bien distintas en cuanto a régimen térmico durante el periodo que transcurre 30 días previos a la floración y que abarca parte de la etapa crítica del cultivo. En el año 2013 podemos decir que no fue un año bueno desde el punto de vista térmico dados los cambios bruscos desde temperaturas cálidas a frescas, y la propia elevada temperatura del TT1. El año 2014 podríamos caracterizarlo desde el punto de vista térmico, como un mejor ambiente para el cultivo de cebada cervecera y en parte en estas diferencias podría radicar parte de la explicación de las diferencias en rendimiento en grano antes analizadas.

4.3.1 Efectos del régimen térmico

En el siguiente capítulo se analizan los efectos del régimen térmico en los períodos 1 y 2 (TT1 y TT2) independientemente del régimen hídrico, sobre el rendimiento y sus componentes (Cuadro 6).

Cuadro 6. Influencia de los tratamientos térmicos en los períodos 1 y 2 para el rendimiento y sus componentes, para el promedio de los años y cada uno por separado

| | | RE.pl ⁻¹ | MST.pl ¹ | IC % | NGP.pl ⁻¹ | PG (mg) | Esp.pl ⁻¹ |
|----------|---------------|---------------------|---------------------|--------|----------------------|------------|----------------------|
| Año | Trat. térmico | -----P-valor----- | | | | | |
| Promedio | TT1 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | TT2 | <0,0001 | 0,0004 | 0,0037 | <0,0001 | ns | 0,038 |
| 2013 | TT1 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | TT2 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 2014 | TT1 | 0,032 | ns | 0,044 | ns | ns | ns |
| | TT2 | <0,0001 | 0,0024 | 0,0001 | <0,0001 | ns | 0,0007 |

El incremento de la temperatura de 2 °C en el período 1 (durante el estrés hídrico), para el promedio de ambos años no tuvo un efecto sobre el rendimiento en grano y componentes principales. Igual efecto, para el año de temperaturas altas y menor potencial (año 2013). Para el año de mayor potencial y temperaturas entorno a los 15° C (2014), el incremento de 2.5°C, afectó significativamente al RE (P valor = 0.03). En cambio, se puede apreciar que el tratamiento térmico durante el período 2 (periodo posterior al estrés hídrico o período de recuperación, coincidente con el subperíodo más sensible del crítico (Miralles et al., 2014) para el promedio de los años, explicado por el impacto en

el año 2014 fue significativo para todas las variables excepto para el peso del grano. La ausencia de respuesta en el año 2013, a diferencia del 2014, puede estar explicado porque las variaciones de temperaturas se dieron dentro de temperaturas más bajas (12,8 a 15,1°C), mientras que en el 2014, el cambio de temperatura mayor a los 2°C ocurre por encima de los 15°C.

Cuadro 7. Efecto de los tratamientos térmicos durante el período de recuperación (TT2) sobre los componentes principales del rendimiento para los dos años evaluados

| ----- 2013 ----- | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|----------------|-------|-------|---------|--------|--------|
| Período 2(TT2) T°C | Ambiente 12,8 | Cálido 15,1 | CM | F | P-valor | CV (%) | |
| RE(g.pl ⁻¹) | 5,6 | 5,0 | 3,62 | 1,63 | 0,20 | 28,07 | |
| MST(g.MS.pl ⁻¹) | 18,7 | 17,7 | 20,16 | 3,7 | 0,06 | 12,81 | |
| IC (%) | 29,4 | 28,8 | 5,12 | 0,10 | 0,75 | 24,36 | |
| NGP | 139 | 133 | 636 | 0,62 | 0,43 | 23,66 | |
| PG(mg) | 39,3 | 38,4 | 16,92 | 0,47 | 0,49 | 15,49 | |
| Esp.pl ⁻¹ | 8,6 | 8,9 | 0,68 | 0,65 | 0,42 | 11,6 | |
| Granos.esp ⁻¹ | 16,2 | 15,6 | 7,35 | 0,56 | 0,45 | 22,8 | |
| ----- 2014 ----- | | | | | | | |
| Período 2(TT2) T°C | Ambiente 15,5 | Cálido 17,8 | CM | F | P-valor | DMS(*) | CV (%) |
| RE(g.pl ⁻¹) | 10,4a | 7,9b | 111,2 | 60,5 | <0,0001 | 0,64 | 14,82 |
| MST(g.MS.pl ⁻¹) | 27,2a | 24,7b | 115,8 | 10,39 | 0,002 | 1,57 | 12,85 |
| IC (%) | 38,2a | 32,3b | 609,6 | 18,2 | 0,0001 | 2,73 | 16,4 |
| NGP | 227a | 177b | 44253 | 29,92 | <0,0001 | 18,16 | 19,01 |
| PG(mg) | 46,0 | 45,0 | 20,4 | 0,97 | 0,329 | - | 10,08 |
| Esp.pl ⁻¹ | 11,3a | 10,3b | 16,1 | 12,96 | 0,0007 | 0,525 | 10,25 |
| Granos.esp ⁻¹ | 20,3a | 17,3b | 150 | 9,27 | 0,0036 | 1,9 | 21,31 |

*Valores con distintas letras dentro de filas, difieren entre si Tukey, α5%.

En el año 2013, con una variación de temperatura desde 12,8 hasta 15,1°C no se registra impacto alguno. Para el 2014, el incremento de temperatura en el período de recuperación desde los 15.5°C hasta los 17.8 °C, condujo a una disminución de un 24%. La caída del rendimiento en grano equivalente casi a 10 % por cada 1°C de incremento térmico por sobre los 15.5°C, que estuvo asociado a la reducción significativa de la biomasa total y el IC, estuvo explicada por la reducción del NGP (-22%), sin cambios en el PG. Esto coincide con lo que concluyen Hoffman et al. (2001), en cuanto a que temperaturas cálidas durante el período crítico de concreción del número de granos, el efecto primario es la reducción del número de granos por unidad de superficie explicado por un aumento del aborto de flores y generación de polen infértil; en este sentido se reafirma lo expresado por Fisher, citado por Hoffman et al. (2011) en cuanto a

que existe una reducción en el número de granos por unidad de superficie de 4% por cada grado de aumento en la temperatura en los 30 días previos a la floración y que altas temperaturas durante el desarrollo floral pueden resultar en polen infértil y aborto de granos (Dawson y Wardlaw, citados por Hoffman et al., 2011).

Por otra parte, el peso del grano no presentó diferencias que puedan ser atribuidas a los tratamientos térmicos ni el TT1, ni en el TT2. Si bien hay evidencias de que las altas temperaturas en el período previo a la antesis pueden afectar el tamaño de las estructuras reproductivas disminuyendo el tamaño de los ovarios los cuales conformarán el pericarpio del fruto y así el peso final del grano (Calderini et al., 2001), en este experimento y considerando el efecto único del tratamiento térmico durante el período de recuperación no hubo efecto significativo, en promedio de los dos cultivares de cebada evaluados.

4.4 CAMBIO EN LA RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PERÍODO DE ESTRÉS Y EL PERÍODO DE RECUPERACIÓN POS ESTRÉS HÍDRICO

En este capítulo se analizarán las interacciones de los tratamientos hídricos y térmicos que tuvieron mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo. El modelo planteado incluyó interacciones de primer grado debido a que las interacciones de segundo grado no fueron en ningún caso significativas sobre el rendimiento y por lo tanto no se tuvieron en cuenta para el análisis. Igualmente, para el promedio de los años evaluados fue pertinente analizar la interacción de segundo grado generada entre los tratamientos hídricos y los térmicos del experimento (EH*TT1*TT2) y describir las tendencias observadas.

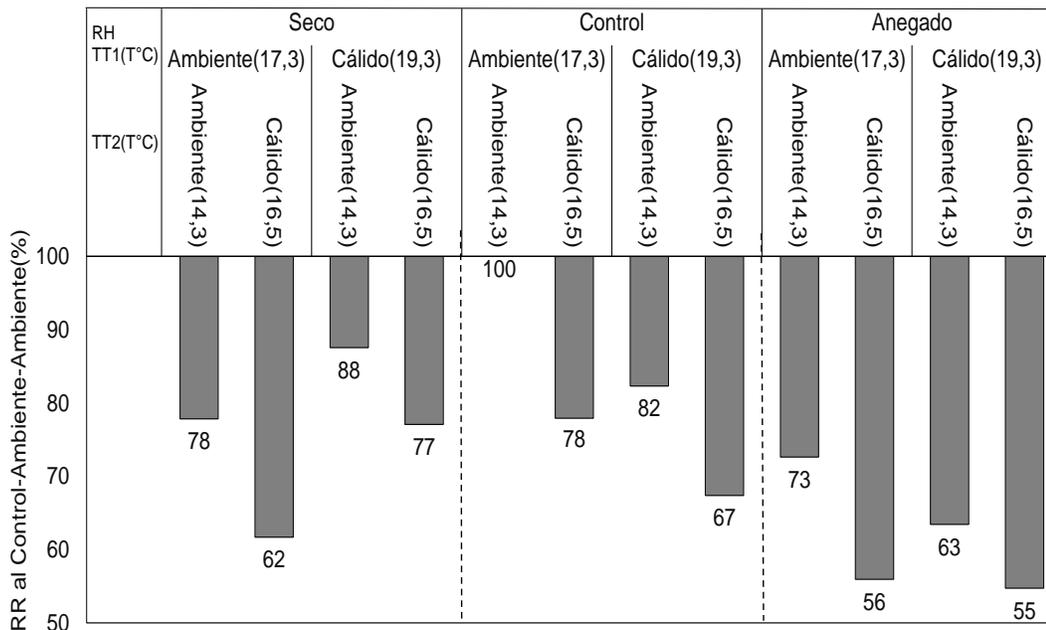


Figura 8. Rendimiento relativo por planta en función del cambio en la T°C durante el período de estrés y recuperación, según tratamiento hídrico para el promedio de los años evaluados

Se puede observar (Figura 9), que siempre el incremento de la temperatura en el período de recuperación condujo a una mayor disminución del rendimiento con respecto al tratamiento control ambiente-ambiente. A su vez la disminución del rendimiento se vio notoriamente acentuado por el régimen hídrico y como era esperado al tratarse de cebada las situaciones de anegamiento fueron las que arrojaron la mayor caída de RE. Si bien no hay trabajos que contemplen la interacción aquí analizada, Miralles et al. (2014) coinciden con estos resultados ya que evaluando los efectos del anegamiento durante la etapa de encañado

encontraron que las disminuciones de rendimiento por el régimen hídrico fueron agravadas a medida que se retrasó la fecha de siembra, y fechas de siembra más tardías presentaron mayores disminuciones de rendimiento por un efecto combinado del anegamiento, el aumento de la temperatura y el aumento en la duración del fotoperiodo. Plantas que en el periodo 1 fueron sometidas a tratamientos cálidos, fueron capaces de soportar mejor, o variar menos su rendimiento en grano cuando siguieron expuestas a temperaturas cálidas lo que podría sugerir un mecanismo de adaptación térmica desde etapas tempranas.

Independientemente de a que tratamiento hídrico fue sometido el cultivo, para plantas que fueron expuestas a temperatura ambiente en el periodo 1, frente a temperaturas cálidas en el periodo 2 significó un descenso de 18,3% en rendimiento. Cuando el periodo 1 transcurrió con temperatura cálida, y se mantuvo el mismo régimen térmico durante el periodo 2, provocó un descenso inferior (11,3%).

En el siguiente cuadro se muestra el efecto de la interacción entre los tratamientos hídricos y térmicos durante el período 1 sobre el rendimiento en grano por planta para cada uno de los años evaluados.

Cuadro 8. Componentes del análisis de varianza para la interacción tratamiento hídrico por tratamiento térmico en el periodo 1.

| TH*TT1 | CM | F | P-valor | DMS | CV (%) |
|--------|-------|------|---------|-------|--------|
| 2013 | 11,76 | 5,28 | 0,008 | 1,799 | 28,07 |
| 2014 | 9,88 | 5,37 | 0,0074 | 1,634 | 14,82 |

El análisis de varianza realizado para cada año por separado muestra un efecto significativo de la interacción entre los tratamientos hídricos y los tratamientos térmicos durante el período 1 (Z32-Z34). Como se observó anteriormente el efecto individual del TT1 no fue importante por lo que cabe esperar que la significancia de la interacción esté mayormente dada por el efecto del régimen hídrico.

Por otra parte, la interacción de los tratamientos hídricos con los tratamientos térmicos en el período 2 (Z34-Z42), presentó un valor de P de 0,58 y 0,88 para los años 2013 y 2014 respectivamente por lo tanto no fue significativa en ningún caso.

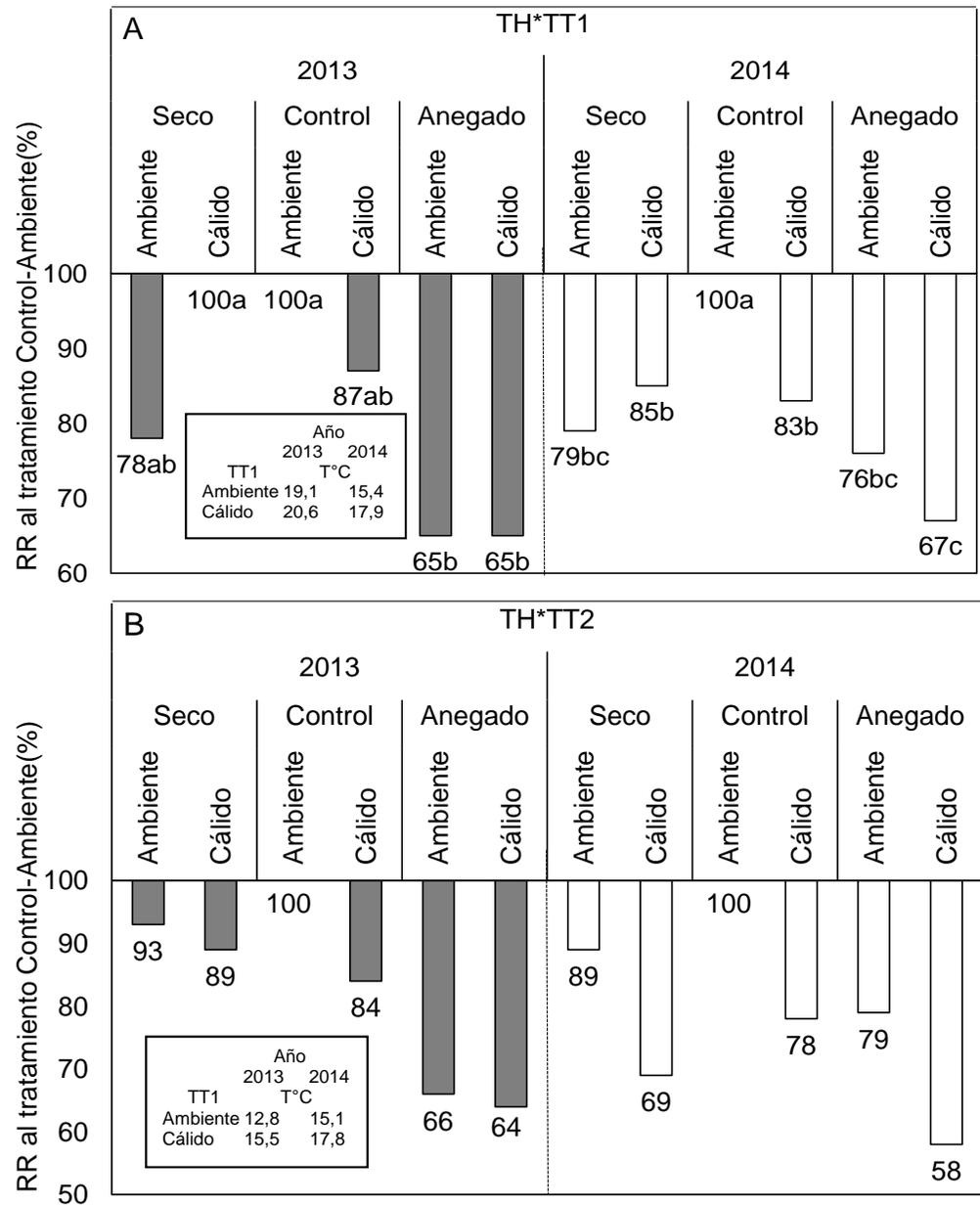


Figura 9. Respuesta en términos de rendimiento relativo al tratamiento control hídrico combinado con el tratamiento térmico ambiente, en función de la T°C durante el tratamiento térmico 1 (A), y térmico 2 (B)

Se puede ver la interacción de primer grado entre el tratamiento hídrico y el térmico en el primer periodo (Figura 9A). Si analizamos dentro de cada tratamiento hídrico, las diferencias dadas por la variación de temperatura en el periodo 1 son escasas. Por lo tanto, salvo excepciones dadas por la temperatura en el año 2014 para el régimen control donde pesaron las diferencias de temperatura, el tratamiento térmico en el periodo 1 no hace variar significativamente el rendimiento.

En la interacción del estrés hídrico con la temperatura durante el período 2 (Figura 9B) se puede observar que para el año 2013, donde las temperaturas en el periodo 2 variaron dentro de un rango de temperaturas frescas (12,8 a 15,1°C), los efectos de cambiar de ambiente a cálidos son escasos. Pero si se observa la tendencia parece clara en cuanto a que las plantas que se recuperan en temperaturas más frescas los rendimientos tienden a ser mayores. Para el año 2014 en cambio, donde las temperaturas en el mismo periodo variaron en un rango de temperaturas más cálidas (de 15,5 a 17,8°C), si se observan diferencias importantes por efecto de la temperatura.

4.5 RESPUESTA AL CAMBIO EN LAS CONDICIONES HÍDRICAS Y TÉRMICAS EN FUNCIÓN DE LA VARIEDAD

En este capítulo se analizará el comportamiento de los dos cultivares evaluados en este ensayo, y como éstos responden de manera diferente a los tratamientos hídricos y térmicos. A continuación se analiza en base al análisis de varianza para el promedio de los años, la influencia del cultivar.

Cuadro 9. Influencia del cultivar sobre el rendimiento y sus componentes según el régimen hídrico y térmico

| Fuente de variación | | RE | MST | IC (%) | NGP ⁻¹ | PG(mg) |
|---------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|---------|-------------------|---------|
| | | (g.pl ⁻¹) | (g MS.pl ⁻¹) | | | |
| | | P-valor | | | | |
| 2013 | Variedad*RH | ns | ns | ns | 0,0325 | ns |
| | Variedad*TT2 | ns | ns | ns | ns | ns |
| | Variedad | 0,0119 | ns | 0,0006 | ns | <0,0001 |
| 2014 | Variedad*RH | ns | ns | ns | ns | 0,0203 |
| | Variedad*TT2 | ns | ns | ns | ns | ns |
| | Variedad | 0,0001 | ns | 0,022 | ns | <0,0001 |
| Promedio | Variedad*RH | ns | ns | ns | 0,0095 | ns |
| | Variedad*TT2 | ns | ns | 0,028 | ns | ns |
| | Variedad | <0,0001 | ns | <0,0001 | ns | <0,0001 |

El efecto principal del cultivar fue significativo sobre el rendimiento en grano para los dos años y como se observa en el cuadro 9 este efecto estuvo explicado por el cambio en el IC, consecuencia de las diferencias observadas en el PG. Las interacciones, entre el cultivar y el régimen hídrico y térmico por separado para el RE, para cada uno de los años, no resultaron significativas. Estos resultados no coinciden con los obtenidos por Lamarca et al. (2010) ya que en su trabajo la interacción entre el cultivar y el estrés hídrico fue significativa para el rendimiento al igual que Hoffman et al. (2008). Cabe mencionar que en dichos trabajos los cultivares en evaluación superaban en cantidad a los del presente experimento.

Lamarca et al. (2010) expresan que existen cultivares sesgados hacia un buen comportamiento frente a condiciones de exceso hídrico como puede serlo INIA Arrayán y por otra parte cultivares sesgados hacia un mal comportamiento frente a las mismas condiciones como Norteña Carumbé e INIA Aromo. Si bien la interacción entre cultivar y régimen hídrico para el presente experimento no resultó significativa, el comportamiento varietal de Norteña Carumbé coincide con lo expresado por Lamarca et al. (2010) ya que frente a condiciones de estrés tanto por déficit como por anegamiento siempre resintió de manera importante su rendimiento con respecto a Daymán.

Por otra parte tomando en cuenta la biomasa e índice de cosecha los resultados si concuerdan con los expresados por los autores ya mencionados previamente, donde la biomasa no fue significativa para la interacción Variedad*RH mientras que el índice de cosecha fue el único componente significativo. En cuanto al NGP también presentó concordancia con el trabajo de Lamarca et al. (2010) ya que fue significativo para la interacción presentando las mayores disminuciones en el tratamiento anegado pero encontrando un comportamiento diferencial según el cultivar. A su vez tampoco se encontró una relación entre el NGP y el PG por lo que no hubo mecanismos de compensación.

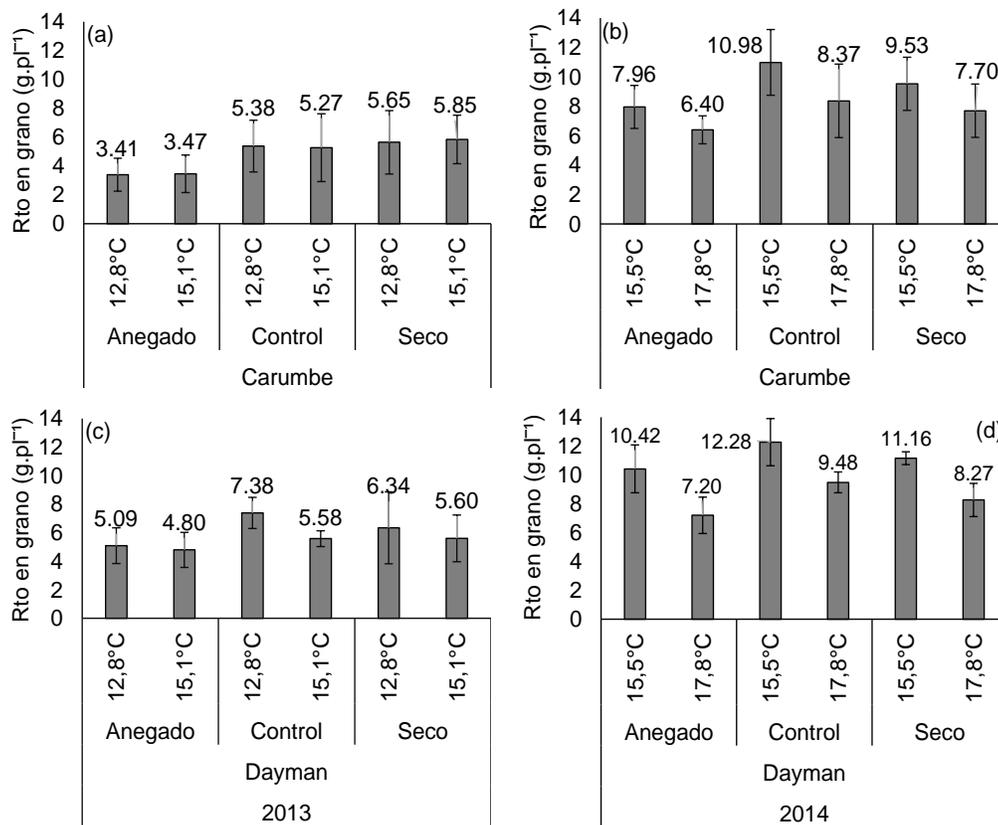


Figura 10. Rendimiento en grano para cada variedad, en función de la interacción con el régimen hídrico y térmico en el periodo 2, para cada año (a y c - 2013, b y d – 2014)

Ambas variedades fueron muy afectadas por el anegamiento como fue analizado anteriormente, resintiendo el RE al exponerlas a temperaturas cálidas durante la recuperación pos estrés hídrico (sobre todo por encima de los 15.5 °C). Aunque la interacción no fue significativa, Daymán, que expresó mejor comportamiento que Carumbé para ambos años, evidencia una mayor pérdida absoluta de RE frente a la mayor temperatura durante el período de recuperación. Sin embargo el rendimiento final, es superior a Carumbé.

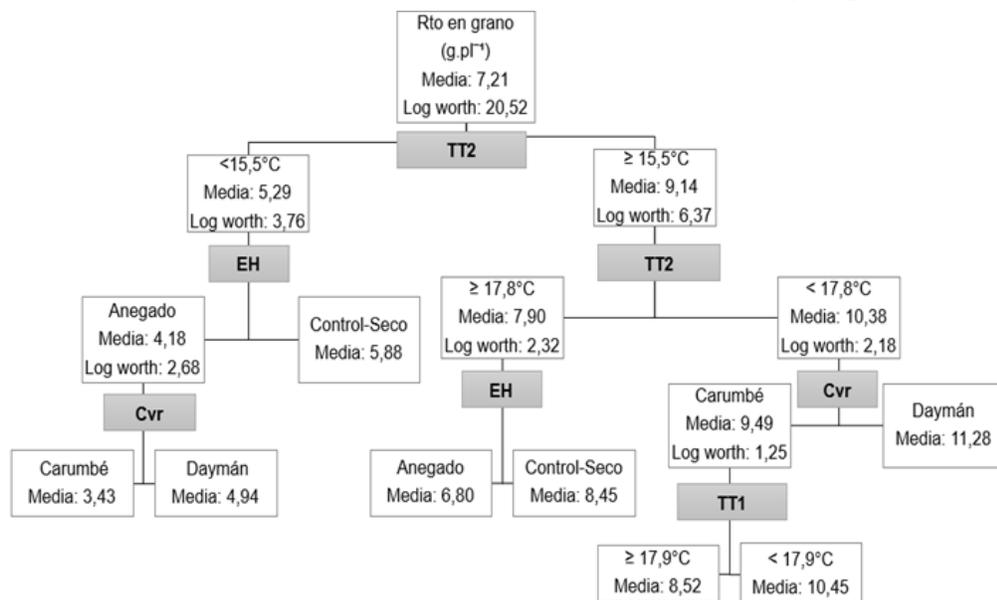
Cuadro 10. Variación del rendimiento en grano y sus componentes determinantes según el cultivar, para cada uno de los años y en promedio

| | 2013 | | 2014 | | Promedio | |
|---------------------------|--------|---------|--------|---------|----------|---------|
| | Daymán | Carumbé | Daymán | Carumbé | Daymán | Carumbé |
| RE(g.pl ⁻¹) | 5,8a | 4,8b | 9,8a | 8,5b | 7,8a | 6,6b |
| MST (g.pl ⁻¹) | 18,3 | 18,1 | 26,6 | 25,3 | 22,3 | 21,9 |
| IC (%) | 32,23a | 26,03b | 36,9a | 33,6b | 34,5a | 29,8b |
| NGP | 137 | 134 | 205 | 198 | 171,9 | 166,8 |
| PG(mg) | 42,1a | 35,7b | 47,9a | 43,1b | 45,0a | 39,3b |

*Valores con distintas letras dentro de filas, difieren entre si Tukey, α5%.

En promedio el RE de Daymán fue un 16% superior al de Carumbé y esta diferencia se atribuye principalmente las diferencias en el índice de cosecha, resultado de un PG significativamente superior. Si bien la biomasa y el número de granos no presentaron diferencias estadísticas, también Daymán supera a Carumbé.

Como resultado final que permite analizar la variación total del RE, en función de EH, los cambios térmicos durante el período uno y dos, para ambos cultivares, y el efecto año, como fuente de variación de la temperatura, se presenta para el RE los resultado del análisis de clasificación y regresión.



EH- Régimen de estrés hídrico; TT1- Tratamiento térmico durante el período de estrés;

TT2- Tratamiento térmico durante el período de recuperación; Cvr- Cultivar

Figura 11. Árbol de regresión y clasificación del rendimiento en grano por planta para el conjunto de factores evaluados

Como se observa en el árbol la primera variable que muestra efecto significativo sobre el rendimiento en grano fue la temperatura durante el período de recuperación (desde Z 34 a Z 42). El RE se incrementó un 24% cuando las temperaturas en el período de recuperación se ubicaron por encima de los 15,5°C pero sin sobrepasar los 17,8°C como ocurrió en el año 2014. Para este mismo período, cuando las temperaturas estuvieron por debajo de 15,5°C como sucedió en el 2013, el aumento de temperatura en el periodo de recuperación no resultó de importancia sobre el rendimiento. A este nivel el RE siguió disminuyendo asociado al anegamiento temprano. En este sentido, la magnitud de pérdida de rendimiento del anegado con respecto a los tratamientos control y seco fue de 30%. En esta situación el cultivar cobra importancia, y cuando es más susceptible como en el caso de Carumbé, el rendimiento fue un 31% menor respecto a Daymán. Con temperaturas entre Z 34 y Z 42 ubicadas dentro del óptimo, el mayor RE, se logró solo cuando el cultivar sembrado es de mayor potencial (Daymán), superando en un 16% a Carumbé el cual también condicionó su desempeño por la temperatura al inicio del encañado (Z 32-34).

El ordenamiento de los factores relevantes en cuanto a la variación del RE, se puede visualizar ordenando el total de la variación en función de los valores medios de las bases del árbol de clasificación y regresión (Figura 13), donde se muestra el orden de las bases del árbol según la temperatura media del período de recuperación (TT2). Las temperaturas <15,5°C ocurrieron en el año 2013 donde el tratamiento térmico no fue significativo mientras que en el año 2014 las temperaturas durante el período 2 fueron >15,5°C y los mayores rendimientos se dieron cuando no superaron los 17,8°C, siendo un rango de temperatura donde la variación generada presentó una influencia importante sobre el rendimiento del cultivo. Los impactos sobre los componentes del RE los podemos analizar (Cuadro 11).

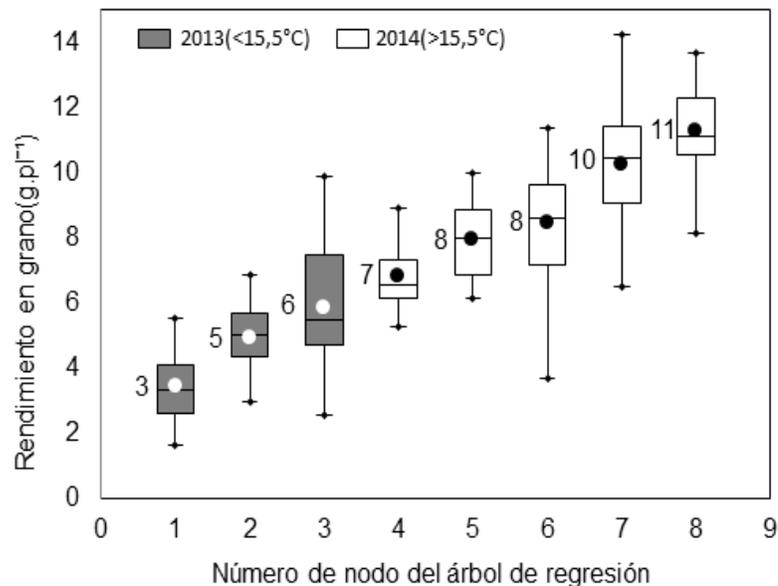


Figura 12. Rendimiento en grano por planta ordenado en función de las bases del árbol de clasificación y regresión

Cuadro 11. Nodos de regresión y componentes determinantes del rendimiento para cada uno de ellos

| Nodo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| TT2*(°C) | <15,5 | <15,5 | <15,5 | ≥15,5 | ≥15,5 | ≥15,5 | ≥15,5 | ≥15,5 |
| Cvr** | C | D | - | - | - | C | C | D |
| TH*** | A | A | S-C | A | S-C | - | - | - |
| TT1****(°C) | - | - | - | - | - | ≥ 17,9 | < 17,9 | - |
| TT2* | - | - | - | ≥17,8 | ≥17,8 | < 17,8 | < 17,8 | < 17,8 |
| RR (%) | 30 | 44 | 52 | 60 | 75 | 76 | 93 | 100 |
| Rend por pl (g.pl ⁻¹) | 3,43 | 4,94 | 5,84 | 6,80 | 8,45 | 8,52 | 10,45 | 11,26 |
| Biomasa (gMS.pl ⁻¹) | 16,3 | 17,0 | 19,0 | 24,6 | 29,9 | 24,8 | 26,9 | 27,6 |
| IC (%) | 20,5 | 29,9 | 31,1 | 27,7 | 26,9 | 34,7 | 38,2 | 41,1 |
| No. De granos/pl | 117 | 140 | 140 | 162 | 205 | 185 | 223 | 238 |
| PG (mg) | 29,4 | 35,3 | 42,2 | 41,9 | 38,9 | 46,5 | 46,4 | 48,2 |

TT2*tratamiento térmico 2, durante la recuperación 15 días pos estrés hídrico. Cvr**cultivar, Carumbé (C), Daymán (D).

TH***tratamiento hídrico, control (C), seco (S), anegado (A).

TT1****tratamiento térmico 1, simultáneo al tratamiento hídrico.

Se distinguen dos grupos de rendimiento que marcan un rango térmico definido donde la temperatura tuvo efectos importantes. Cuando en el período 2 el rango de temperatura se ubica entre 15,5°C a 17,8°C, como ocurrió en el año 2014, se registraron los mejores rendimientos explicados mayormente por un buen IC y PG. Dentro de este rango, cuando el cultivar fue Daymán se registró el mayor rendimiento. En esta condición el régimen térmico en el período 1 y el estrés hídrico no tuvieron importancia. En cambio, cuando el cultivar fue Carumbé también hubo incidencia de la temperatura en la etapa inicial del encañado generando un buen rendimiento cuando esta fue menor a los 17,9°C.

Cuando el régimen térmico en el período 2 superó los 17,8°C cobra importancia el régimen hídrico registrándose un mejor comportamiento en las situaciones de sequía y control explicado por una mayor generación de biomasa y un mayor NGP con respecto al anegado. Bajo anegamiento el IC y PG fueron mayores a los tratamientos control y seco.

El otro está determinado por temperaturas inferiores a 15,5°C durante el período 2, como ocurrió durante el año 2013. Para este año el rango de variación de temperaturas durante el TT2 desde 12,8 a 15,5°C no tuvo importancia sobre el rendimiento el cual estuvo determinado por el régimen hídrico y en este sentido los tratamientos control y seco superaron el rendimiento del anegado.

En el año 2014, de mayor potencial de rendimiento para el cultivo, cuando la temperatura superó los 17,8°C en el período 2 se registraron los peores rendimientos en grano explicados por un menor IC y PG y dentro de estos nodos (4 y 5) las diferencias de rendimiento se vieron explicadas por el estrés hídrico. Bajo condiciones de anegamiento el rendimiento fue inferior a los tratamientos control y seco explicado mayormente por una menor generación de biomasa y un N° de granos inferior.

Para finalizar se puede destacar que cuando se presentan años contrastantes desde el punto de vista térmico, y se generan diferentes condiciones hídricas el rendimiento en grano se ve afectado de manera significativa. Tanto en años donde las condiciones hídricas y térmicas se dan en la zona de confort para el cultivo (tratamiento control 2014), como en otros donde las condiciones no son favorables (tratamiento anegado 2013), se observa un comportamiento diferencial del cultivar. Donde N.Daymán supera significativamente en rendimiento a N.Carumbé. Esto explicado principalmente por el IC y el PG.

5. CONCLUSIONES

Las variaciones del rendimiento en grano en respuesta al estrés hídrico al inicio del período crítico, fueron significativas (p -valor $<0,0001$). El anegamiento, en promedio para ambos años (2013 y 2014), provocó una caída en el rendimiento en grano del 25 % con respecto al control, explicado por una disminución de la producción de biomasa (12%) tanto como del índice de cosecha (5%). El déficit hídrico no presentó en promedio diferencias significativas con el tratamiento control. El rendimiento en grano del año 2014, fue un 45% superior al 2013 y el efecto negativo del anegamiento sobre el rendimiento en grano fue menor en el 2014, en relación al observado en el 2013 (30% y 23% para el año 2013 y 2014, respectivamente).

El rendimiento en grano de la variedad Norteña Daymán fue superior al de Norteña Carumbé en un 26%, frente a todas las situaciones de estrés impuestas en el experimento, explicado fundamentalmente por el peso de grano e índice de cosecha.

La temperatura jugó un papel importante sobre la determinación del rendimiento en el período previo a la antesis del cultivo (Z34-Z42) (TT2). El aumento de temperatura durante el TT2 desde los 15,5°C hasta los 17,8°C tuvo efecto significativo sobre el rendimiento en grano ($P < 0,0001$), en promedio para los dos años, independientemente del estrés hídrico, del TT1 (Z 32 a Z34) y la variedad. En este sentido, en el año 2013, con una variación de temperatura desde 12,8°C hasta 15,1°C no se registró efectos de la temperatura sobre el rendimiento por planta y sus componentes. Para este año el estrés hídrico fue determinante del rendimiento en grano, en donde el anegamiento redujo el rendimiento un 30% con respecto al control y en estas condiciones N.Daymán presentó un rendimiento un 31% por encima de N.Carumbé. En el 2014, el incremento de temperatura durante el período Z 34 – Z 42, desde los 15,5°C hasta los 17,8°C, llevo al mayor rendimiento por planta, sin influencia alguna del estrés hídrico impuesto. Cuando la temperatura superó los 17,8 °C se registró una disminución promedio de un 24% del rendimiento en grano. Bajo estas condición el estrés hídrico por anegamiento también fue relevante independientemente del cultivar, asociado a una reducción significativa de la biomasa total y el IC, explicada por la reducción del NGP (-22%), sin cambios en el PG. Bajo estas condiciones térmicas, el anegamiento disminuyó el rendimiento en grano un 20% con respecto a los tratamientos control y seco. La caída del rendimiento en grano observada y adjudicadas al efecto individual de la temperatura equivalió casi al 10 % por cada 1°C de incremento térmico por sobre los 17,8°C.

Se comprobó que el estrés hídrico por anegamiento se vio agravado considerablemente cuando las temperaturas sobrepasaron los 17,8°C durante el

período comprendido entre Z34 y Z42. Cuando el rango térmico se encontró dentro del rango óptimo (entre 15,5°C y 17,8°C), no existió efecto significativo del estrés hídrico.

6. RESUMEN

La cebada es un cultivo con una larga historia agrícola en nuestro país, siendo el segundo cultivo de invierno en importancia productiva. Durante los últimos 15 años en el Uruguay se ha llevado una importante expansión agrícola, impulsada principalmente por el auge del cultivo de soja. Los sistemas productivos pasaron de ser agrícola ganaderos a ser agrícolas, teniendo a la soja como cultivo dominante. Los cultivos como trigo y cebada comenzaron a convivir con suelos de menor fertilidad natural, menor capacidad de almacenar agua, menor drenaje interno, lo que incrementa la probabilidad de ocurrencia de condiciones de excesos y déficit hídricos. Ello seguramente explique el aumento de la variabilidad de rendimientos entre años y dentro del año. En el presente trabajo se planteó como objetivo analizar el efecto del estrés hídrico y la interacción del mismo con dos temperaturas distintas en dos cultivares de cebada cervecera durante el encañado para los años 2013 y 2014. Se generaron condiciones de anegamiento (A), sequía (S) y control hídrico (C) las cuales fueron combinadas con dos temperaturas (ambiente y cálido) durante el estrés (Z32-Z34), denominado tratamiento térmico 1 (TT1) y posteriormente se sometió a un segundo tratamiento térmico (TT2) durante un período de recuperación (Z34-Z42). Los años fueron distintos desde el punto de vista térmico y en este sentido el 2014 se presentó como un año de mayor potencial para el desarrollo del cultivo. El rendimiento obtenido en promedio en el año 2013 estuvo un 45% por debajo del 2014. Los resultados mostraron un efecto significativo del estrés hídrico sobre el rendimiento en grano (P -valor $<0,0001$) generando una caída promedio de 25% del rendimiento del tratamiento anegado con respecto al control y un 8% del tratamiento de sequía, explicados mayormente por una disminución de biomasa e índice de cosecha. Se comprobó que la temperatura juega un papel importante sobre el rendimiento del cultivo en el período previo inmediato a la antesis. En este sentido, los tratamientos hídricos en combinación con los térmicos no presentaron efectos relevantes mientras que el tratamiento térmico durante el período de recuperación mostró tener un efecto individual importante sobre la determinación del rendimiento durante el año 2014 (P -valor $<0,0001$) donde la variación de temperatura ambiente-cálido fue desde los 15,5°C hasta los 17,8°C con una disminución del 24% en el rendimiento en grano asociado a la reducción significativa de la biomasa total y el IC, explicada por la reducción del NGP (-22%), sin cambios en el PG. En un rango de temperaturas ambiente-cálido de 12,8°C hasta 15,1°C los efectos en el rendimiento no fueron significativos. El cultivar Norteña Daymán mostró superioridad en rendimiento frente a Norteña Carumbé en todos los tratamientos evaluados y registró un rendimiento un 26% mayor.

Palabras clave: Cebada; Estrés hídrico; Estrés térmico; Déficit hídrico; Exceso hídrico.

7. SUMMARY

Barley is a crop with a long agricultural history in our country, being the second winter crop in productive importance. During the last 15 years in Uruguay, a major agricultural expansion has been carried out, driven mainly by the soybean growing boom. As a consequence, the productive systems went from agricultural cattle ranchers to agricultural ones, with soybeans as the dominant crop, with new areas of lesser ability incorporated into the agricultural area. Crops such as wheat and barley coexist with soils of lower natural fertility, less capacity to store water, less internal drainage, which increases the probability of occurrence of excess conditions and water deficits. This is likely to explain the increase in yield variability between years and within the year. The objective of this work was to analyze the effect of water stress and its interaction with two different temperatures in two breeding barley cultivars during the plots for the years 2013 and 2014. Flood conditions (A), drought (S) and water control (C), which were combined with two temperatures (ambient and warm) during stress (Z32-Z34), called heat treatment 1 (TT1) and subsequently subjected to a second heat treatment (TT2) during one Period of recovery (Z34-Z42). The years were different from the thermal point of view and in this sense the 2014 was presented as a year of greater potential for the development of the crop. The average yield in 2013 was 45% below 2014. The results showed a significant effect of water stress on grain yield (P-value <0.0001), resulting in an average fall of 25% in yield of the waterlogged treatment with respect to the control and 8% of the treatment of drought, explained mainly by a decrease of biomass and crop index. It was found that temperature plays an important role on crop yield in the immediate pre-anthesis period. In this sense, the water treatments in combination with the thermal treatments did not present any relevant effects, whereas the heat treatment during the recovery period showed an important individual effect on the performance determination during the year 2014 (P-value <0.0001) Where the warm-room temperature variation was from 15.5 ° C to 17.8 ° C with a 24% decrease in grain yield associated with a significant reduction of total biomass and CI, explained by the reduction of NGP (-22%), without changes in PG. In an ambient-warm temperature range of 12.8 ° C to 15.1 ° C the effects on yield were not significant. The Norteña Daymán cultivar showed superiority in performance against Norteña Carumbé in all evaluated treatments and recorded a yield of 26% higher.

Keywords: Barley; Water stress; Thermal stress; Water deficit; Excess water.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Bray, E.; Bailey-Serres, J.; Weretilnky, E. 2000. Response to abiotic stresses. In: Buchanan, B.; Gruissem, W.; Jones, R. L. eds. Biochemistry and molecular biology of plants. Maryland, USA, American Society of Plant Physiologists. pp. 1051-1104.
2. Calderini, D. F.; Savin, R.; Abeledo, L. G.; Reynolds, M. P.; Slafer, G. A. 2001. The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica*. pp. 199-204.
3. Díaz Lago, J. E. 2005. Tolerancia a exceso hídrico; un nuevo objetivo para el programa de mejoramiento genético de cebada. Montevideo, INIA. 27 p. (Actividades de Difusión no. 404).
4. Drew, M. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism; injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 48: 223-250.
5. Ernst, O. 1996. Principales resultados obtenidos en siembra directa de cultivos graníferos. In: Curso de Actualización para Profesionales (1996, Paysandú, UY). Textos. Paysandú, s.e. pp. 1-6.
6. Hansen, V. E.; Israelsen, O. W.; Stringham, G. E. 1979. Irrigation principles and practices. 4th. ed. New York, Wiley. 417 p.
7. Hoffman, E.; Ernst, O.; Viega, L.; Benítez, A.; Olivo, N.; Borghi, E. 2001. Efectos del exceso hídrico en los cultivos de invierno. Uruguay. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. 18 p.
8. _____; Viega, L.; Baeten, A.; Lamarca, A.; Lamarca, M.; Wornicov, S. 2008. Respuesta de siete cultivares de trigo al déficit y exceso hídrico durante el encañado. *Cangüé*. no. 31: 17-25.
9. _____; _____; Cadenazzi, M.; Benitez, A.; Gestido, V.; Mesa, P.; Fernandez, R.; Baeten, A.; Glison, N. 2009. Bases morfo-fisiológicas que justifican el manejo diferencial de cultivares de trigo y cebada en Uruguay. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. p.irr.

10. _____.; Castro, A.; Viega, L. 2011. Limitaciones para la productividad de trigo y cebada. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 37-53.
11. _____.; _____. 2012. Cambios en la fecha de siembra en los cultivos de invierno en Uruguay; implicancias sobre el rendimiento y el riesgo. Cangüé. no. 32: 16-21.
12. Lamarca, A.; Lamarca, M.; Wornicov, S. 2010. Caracterización de la susceptibilidad varietal al estrés provocado por el exceso y déficit hídrico en 8 cultivares de cebada cervecera y 7 cultivares de trigo pan. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 136 p.
13. Lizana, X. C.; Calderini, D. F. 2013. Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination; considerations for the climatic change scenarios of Chile. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*. 151: 209-221.
14. López-Castañeda, C. 2011. Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. (en línea). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14 (3): s.p. Consultado 20 dic. 2015. Disponible en <http://www.scielo.org.mx>
15. Marti, J.; Savin, R.; Slafer, G. A. 2015. Wheat yield as affected by length of exposure to waterlogging during stem elongation. Lleida, Spain, University of Lleida. 26 p.
16. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2104. Agricultura-cereales y oleaginosos. Área sembrada País. Cebada cervecera; serie histórica. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 17 oct. 2016. Disponible en [http:// www.mgap.gub.uy](http://www.mgap.gub.uy)
17. Miralles, D.; Abeledo, G.; De San Celedon, R. 2014. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant and Soil*. 378: 265-277.

18. Moreno, P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico; una revisión. (en línea). *Agronomía Colombiana*. 27: 177-191. Consultado 11 nov. 2015. Disponible en <http://www.revistas.unal.edu.co>
19. Ortiz, M.; Silva, H.; Silva, P.; Acevedo, E. 2003. Estudio de parámetros hídricos en trigo (*Triticum aestivum* L.) y su uso en selección de genotipos resistentes a sequía. *Revista Chilena de Historia Natural*. 76: 219-233.
20. Pardos, J. 2004. Respuestas de las plantas al anegamiento de suelos. *Investigación Agraria*. 56: 101-107.
21. Setter, T. L.; Waters, I. 2003. Review of prospect for germplasm improvement for waterlogging in wheat, barley and oats. *Plant and Soil*. 253: 1-34
22. _____; _____. 2008. Review of wheat improvement for waterlogging tolerance in Australia and India; the importance of anaerobiosis and element toxicities associated with different soils. (en línea). *Annals of Botany*. 103 (2): 221-235. Consultado 15 nov. 2015. Disponible en <http://www.academic.oup.com>