

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Instituto de Ciencias Agrícolas
Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias



**VALIDACIÓN DE DOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE
BIOMASA EN TRITICALES FORRAJEROS EN EL VALLE DE
MEXICALI B.C.**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTA

JOSÉ LUIS VELASCO LÓPEZ

DIRECTOR: DR. ROBERTO SOTO ORTIZ

CODIRECTOR: DR. ALEJANDRO JAVIER LOZANO DEL RÍO

La presente tesis "Validación de dos métodos de estimación de biomasa en triticales forrajeros en el valle de Mexicali B. C." realizada por el C. José Luis Velasco López, dirigida por el Dr. Roberto Soto Ortiz, ha sido evaluada y aprobada por el Comité Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Comité Particular

Dr. Roberto Soto Ortiz
Director de Tesis

Dr. Alejandro Javier Lozano del Río
Codirector de Tesis

Dr. Carlos Enrique Ail Catzim
Sinodal

Dr. Onécimo Grimaldo Juárez
Sinodal

Dra. Silvia Mónica Avilés Marín
Sinodal

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Roberto Soto Ortiz** por la oportunidad de realizar esta investigación bajo su dirección, además de sus contribuciones en este estudio.

Al **Dr. Javier Lozano del Río** por todo el tiempo que ha dedicado en mi formación profesional quien desde la licenciatura ha dado el ejemplo de trabajo constante, orientado siempre a la calidad de resultados, por su valiosa amistad en todo momento.

Al **Dr. Carlos Enrique Ail Catzim** por su asesoría durante la estancia de mis estudios doctorales y su amistad.

Al **Dr. Onécimo Grimaldo Juárez** por su apoyo para llevar a cabo estos estudios.

A la **Dra. Silvia Mónica Avilés Marín** por compartir sus conocimientos durante mis estudios.

Al **Instituto de Ciencias Agrícolas** por la facilidad del uso de sus instalaciones para realizar los experimentos en este estudio.

Al **Dr. Karim Ammar** del **Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo**, por permitir conocer su programa de mejoramiento de trigos duros y triticales en México además de los recursos para terminar este estudio.

A la **Universidad Autónoma de Baja California** por los recursos obtenidos mediante la 1^{era} Convocatoria especial de apoyo a proyectos de investigación Modalidad Nuevo Profesor de Tiempo Completo 2013 y 2014 que permitió llevar a cabo este estudio.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por permitirme realizar parte de mi formación doctoral en sus instalaciones.

DEDICATORIA

*Este logro en mi formación profesional se lo dedico
a mi madre María Idalia López Solís, por su
fortaleza y cariño para acompañarme durante
toda mi vida.*

ÍNDICE DEL CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DEL CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE CUADROS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	3
OBJETIVOS.....	3
3.1. Objetivo general	3
3.2. Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO III.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Producción de triticale en México.....	4
2.2. Origen de triticale	5
2.3. Tipos de triticales	5
2.4. Características de triticale para forraje y grano	6
2.5. Ajuste fenológico de las plantas	6
2.6. Relación de los componentes de biomasa con rendimiento de grano	7
2.7. Métodos de evaluación de biomasa en cereales de grano pequeño	7
2.8. Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI).....	8
2.9. Características del GreenSeeker Handheld®	9

2.10. Imágenes satelitales	9
2.11. Índices de vegetación derivados de fotografías digitales (pic-vis)	10
2.12. Usos de las cámaras convencionales en las mediciones de área verde del cultivo	11
CAPÍTULO IV	12
ARTÍCULO 1	12
Rendimiento de biomasa y grano en variedades de triticales en el valle de Mexicali	12
ARTÍCULO 2	30
Relación de índices fotográficos y NDVI con la producción de biomasa seca en triticales en el valle de Mexicali	30
CAPÍTULO V	47
CONCLUSIONES GENERALES	47
LITERATURA CITADA	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Datos climáticos en que se desarrollaron las variedades en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16, ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California.	19
Cuadro 2. Comparación de medias para biomasa seca, por contrastes ortogonales por tipos de crecimiento de triticales.	23
Cuadro 3. Rendimiento promedio de grano y sus componentes para 10 variedades de triticales, evaluados en el valle de Mexicali, Baja California. (O-I 2014-15 y O-I 2015-16).....	26
Cuadro 4. Comparación de medias para rendimiento de grano y sus componentes, por contrastes ortogonales por tipos de crecimiento de triticales.	28
Cuadro 5. Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y sus componentes, para 10 variedades de triticales evaluados en el valle de Mexicali, Baja California. (O-I 2014-15 y O-I 2015-16).....	29
Cuadro 6. Condiciones de riego y fertilización del estudio en los ciclos O-I 2014/15 y O-I 2015/16 en el valle de Mexicali, Baja California.	35
Cuadro 7. Rendimiento de biomasa seca de hojas de triticales ($t\ ha^{-1}$) en las diferentes etapas fenológicas bajo condiciones de riego y fertilización en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.	38
Cuadro 8. Coeficientes de correlación de los componentes de biomasa seca, NDVI e índices fotográficos evaluados en el ciclo O-I 2014-15, valle de Mexicali, Baja California.	39
Cuadro 9. Coeficientes de correlación de los componentes de biomasa seca, NDVI e índices fotográficos evaluados en el ciclo O-I 2015-16, valle de Mexicali, Baja California.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción de forraje verde de Triticale en México, año agrícola riego + temporal (O-I, P.V.) 2017 (SIAP, 2018).....	4
Figura 2. Promedios de biomasa de hoja (BHOJ), biomasa de tallos (BTALL) y biomasa total (BTOT) para 10 variedades de triticale cortados en la etapa de embuche, evaluados en dos ciclos, O-I 214-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California. *Barras con letras iguales dentro de cada gráfica no difieren estadísticamente (tukey \leq 0.05).....	20
Figura 3. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y biomasa seca de hojas (BHOJ) antes y después de antesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.....	42
Figura 4. Relación entre el índice fotográfico (GGA) y biomasa seca de hojas (BHOJ) antes y después de antesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.....	44
Figura 5. Relación del índice área verde (GGA) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) antes y después de antesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.	45

RESUMEN

El estado de Baja California es de las principales regiones ganaderas en México. En los últimos años la superficie dedicada a esta actividad ha mostrado un incremento en la utilización de suelos salinos, con bajo contenido de materia orgánica y poca disponibilidad de agua, lo que se ve reflejado en una menor producción de forraje de los cultivos como avena, rye grass y alfalfa. Además, las bajas temperaturas en invierno limitan el crecimiento y desarrollo de estos cultivos por lo que resulta importante desarrollar nuevas variedades como alternativa forrajera en esta región. El triticale es una opción por su alto potencial de producción de forraje, sin embargo; el proceso tradicional de obtención y evaluación de nuevas variedades de triticales se caracteriza por la utilización de métodos destructivos que son laboriosos y costosos. En este estudio el objetivo general fue la validación de dos métodos de estimación de biomasa en triticales forrajeros en el valle de Mexicali, Baja California. Por consiguiente, los objetivos específicos de este estudio fueron: 1) evaluar el rendimiento de biomasa seca y grano de 10 variedades de triticales en los ciclos O-I 2014-15 y 2015-16, en el valle de Mexicali; 2) evaluar la correlación entre el NDVI y los índices de vegetación con la producción de biomasa seca de hojas de triticale, determinado por GreenSeeker Handheld® y la cámara digital bajo diferentes números de riegos y niveles de fertilización nitrogenada. El estudio se realizó en el campo agrícola experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, en el ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México, durante los ciclos otoño-invierno en 2014-2015 y 2015-2016. Se evaluaron 10 variedades de triticale: cuatro de tipo primaveral (AN123, AN125, AN137, Eronga), dos de tipo facultativo (AN105, AN38) y cuatro de tipo invernal (AN31B, AN34, AN31P, ABT). Para determinar los índices de vegetación GA y GGA se tomaron tres fotografías con una cámara digital, para determinar el NDVI se realizaron tres mediciones con un espectroradiómetro marca GreenSeeker Handheld®, en las etapas de amacollamiento, encañe, embuche, anthesis, llenado de grano y madurez fisiológica. Finalmente, para estimar la producción de biomasa seca se tomó una muestra de 0.15 m² de una hilera central por cada parcela en cada una de las etapas mencionadas. La información fue analizada bajo un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron que las

variedades invernales AN31B y AN34 fueron sobresalientes para la producción de biomasa seca total, la variedad facultativa AN38 y las variedades primaverales AN125 y Eronga, presentaron superioridad en rendimiento de grano. Se obtuvo una relación directa entre los valores de los índices de vegetación con la acumulación de biomasa seca durante el desarrollo del cultivo por lo tanto se concluye que es posible emplear indistintamente los índices GGA y NDVI, para determinar biomasa seca de manera indirecta mediante cámaras digitales o GreenSeeker Handheld®.

Palabras clave: triticale, producción de biomasa, índices de vegetación, NDVI

ABSTRACT

The state of Baja California is one of the main livestock regions in Mexico. In recent years, soil acreage devoted to this activity has shown an increase in saline soils with low organic matter content and low water availability. As a consequence forage production of crops such as oats, rye grass and alfalfa has been reduced. In addition, winter low temperature limits the growth and development of these crops so it is important to develop new varieties as a forage alternative in this region. The Triticale crop is an option because of its high potential for forage production. However, the traditional process of obtaining and evaluating new varieties of Triticale is characterized by the use of destructive methods that are laborious and expensive. The overall objective of this study was to validate two biomass estimation methods in forage triticale in the Mexicali valley, Baja California. Accordingly, the specific objectives of this study were: 1) to evaluate dry biomass and grain yield of 10 triticale varieties in the O-I cycles 2014-15 and 2015-16, in the Mexicali valley; and 2) evaluate the correlation between NDVI and vegetation indexes with Triticale leaves dry biomass production as estimated by the use of GreenSeeker Handheld® and a digital camera under different numbers of irrigations and nitrogen fertilization levels. The study was carried out at the experimental agricultural field of the Institute of Agricultural Sciences of the Autonomous University of Baja California, in the ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, Mexico, during the fall-winter cycles of 2014-2015 and 2015-2016. Ten varieties of triticale were evaluated: four of spring type (AN123, AN125, AN137, Eronga), two of facultative type (AN105, AN38) and four of winter type (AN31B, AN34, AN31P, ABT). During the growth stages

corresponding to: tillering, first node visible, booting, anthesis, grain filling and physiological maturity, three photographs were taken with a digital camera to obtain the GA and GGA vegetation indexes. Also, three measurements were made with a GreenSeeker Handheld® spectroradiometer to determine the NDVI. Moreover, to estimate dry biomass production, a sample of 0.15 m² from the central row was taken for each plot in each of the previously described stages. Data was analyzed under a randomized complete block design with three repetitions. Results showed that winter type varieties AN31B and AN34 were outstanding for the production of total dry biomass, the facultative type variety AN38 and the spring type varieties AN125 and Eronga, presented superiority in grain yield. A direct relationship was obtained between the values of the vegetation indexes with the accumulation of dry biomass during the development of the crop. Therefore, it can be concluded that it is possible to effectively use either GGA or NDVI as an indirect method to estimate dry biomass through the use of digital cameras or GreenSeeker Handheld®.

Keywords: triticale, biomass production, vegetation indexes, NDVI

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El estado de Baja California es una de las principales regiones ganaderas en México, representada por dos zonas productoras: la zona costa, que produce 22% de la carne de bovino y la zona del valle de Mexicali, donde se produce el 78 % (PRODUCE, 2013). Sin embargo, existen limitantes en la producción de forraje al no tener cultivos alternativos a los tradicionales de la región como son, alfalfa (*Medicago sativa*), avena (*Avena sativa*) y rye gras (*Lolium perenne*), que permitan sustituir parte del balance nutricional del ganado principalmente en la época de invierno donde hay mayor escasez (SAGARPA, 2013). Baja California se encuentra dentro de los estados que puede presentar un mayor efecto ante el cambio climático para los años 2030 en el que se tendrá mayor escasez de agua, periodos de sequía extremos y prolongados (IPCC, 2009). Dada esta situación se reafirma la necesidad de evaluar nuevos cultivos y variedades con tolerancia a estrés hídrico que son importantes para garantizar las cosechas de los cultivos en el futuro. En México diversos estudios reportan que el cultivo de triticale presenta potencial para la producción de forraje y dependiendo de los tipos de hábito de crecimiento de las variedades: primaverales, intermedios e invernales presentan rendimientos que oscilan entre 8.5 y 25 t ha⁻¹ de materia seca y entre 46 y 50 t ha⁻¹ de forraje verde (Lozano, 2004; Murillo, 2001), superiores a cultivos como trigo, cebada, centeno y avena, con rendimientos de granos similares al trigo entre 8 y 12.72 t ha⁻¹ (Lozano del Río *et al.* 2004, Mellado *et al.* 2005). De esta manera el triticale muestra potencial en la producción de forraje y grano de buena calidad que pudiera ser una alternativa o complemento en la alimentación del ganado en la región (Peña, 2004). Por otra parte, la evaluación de líneas o variedades forrajeras se realiza de manera tradicional con métodos destructivos que resulta ser una actividad laboriosa y costosa, lo que implica principalmente por el tiempo, material que se requiere en la toma de datos de campo, procesamiento de muestras para determinar el rendimiento de los genotipos y al final seleccionar los mejores de acuerdo las necesidades de la región. El uso de instrumentación ha permitido facilitar la selección y evaluación de variedades o

líneas en los programas de mejoramiento de cereales de grano pequeño, principalmente los espectroradiómetros y las cámaras convencionales que permiten determinar el NDVI determinado por GreenSeeker Handheld® y los índices de vegetación derivados de fotografías digitales que han mostrado correlación positiva con la biomasa, rendimiento de grano y con los procesos fisiológicos de las plantas. Estos equipos son rápidos y fáciles de usar en un programa de mejoramiento genético, lo que permite una selección indirecta y eficiente de genotipos superiores en las características como biomasa seca, área foliar, actividad fotosintética, eficiencia en el uso del agua, entre otros. La flexibilidad de tomar las lecturas permite trabajar con mayor cantidad de genotipos, reducir tiempo, costo y trabajo (Casadesús *et al.* 2005). A fin de obtener una estimación más precisa del potencial de producción de biomasa y/o grano de los genotipos se requiere evaluarlos en diferentes ambientes y a través de sus diferentes etapas de crecimiento que maximicen las diferencias genotípicas. La validación de la precisión de estos métodos es necesario corroborarlo con el método destructivo tradicional. Por lo expuesto anteriormente, en este estudio el objetivo general fue la validación de dos métodos de estimación de biomasa en triticales forrajeros en el valle de Mexicali Baja California. Los objetivos específicos fueron: 1) evaluar el rendimiento de forraje seco y rendimiento de grano de triticales forrajeros en las condiciones del valle de Mexicali; 2) identificar índices de vegetación que permita seleccionar variedades de triticales para forraje en el valle de Mexicali. Para el cumplimiento del primer objetivo, se evaluó el rendimiento de biomasa seca y grano de 10 variedades de triticales en los ciclos otoño-invierno 2014-15 y 2015-16, en el valle de Mexicali que se presenta en el artículo denominado “Rendimiento de biomasa y grano en variedades de triticales en el valle de Mexicali”, para el segundo objetivo se evaluó la correlación entre los índices de vegetación con la producción de biomasa seca de hojas de triticales, determinado por GreenSeeker Handheld® y la cámara digital bajo diferentes números de riegos y niveles de fertilización nitrogenada que se presenta en el artículo denominado “Relación de índices fotográficos y NDVI con la producción de biomasa seca en triticales en el valle de Mexicali”.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

En este estudio el objetivo general fue la validación de dos métodos de estimación de biomasa en triticales forrajeros en el valle de Mexicali, Baja California.

3.2. Objetivos específicos

- 1) Evaluar el rendimiento de biomasa seca y grano de 10 variedades de triticales en los ciclos O-I 2014-15 y 2015-16, en el valle de Mexicali.
- 2) Evaluar la correlación entre los índices de vegetación con la producción de biomasa seca de hojas de triticales, determinado por GreenSeeker Handheld® y la cámara digital bajo diferentes números de riegos y niveles de fertilización nitrogenada.

Para el cumplimiento del primer objetivo, se evaluó el rendimiento de forraje seco y rendimiento de grano de triticales forrajeros en las condiciones del valle de Mexicali que se presenta en el artículo denominado “Rendimiento de biomasa y grano en variedades de triticales en el valle de Mexicali”, para el segundo objetivo se evaluó la correlación de los índices de vegetación que permitan seleccionar en forma indirecta variedades de triticales para forraje en el valle de Mexicali que se presenta en el artículo denominado “Relación de índices fotográficos y NDVI con la producción de biomasa seca en triticales en el valle de Mexicali”.

CAPÍTULO III

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Producción de triticale en México

Los estados con mayor superficie sembrada de triticale para grano son Estado de México, Tlaxcala y San Luis Potosí con 16,093, 965 y 84 hectáreas respectivamente en el año 2017, el cual es utilizado principalmente para la alimentación de ganado bovino, ovino, equino, porcino y aves de corral (SIAP, 2018). Esto ha permitido incrementar el ingreso de las familias en esos estados debido al bajo costo para producir el grano de triticale ya que es un cultivo más resistente a las enfermedades foliares y de suelo como también más tolerante a la sequía. Otra ventaja importante que ofrece el triticale es la explotación para forraje verde para la alimentación del ganado, bovino, ovino y caprino. Este tipo de explotación ha aumentado en varios estados como son: el Estado de México, Durango, Guanajuato, Aguascalientes, Chihuahua, Jalisco, Querétaro, Coahuila, Hidalgo, San Luis Potosí, Tlaxcala, Zacatecas y Baja California (Figura 1).

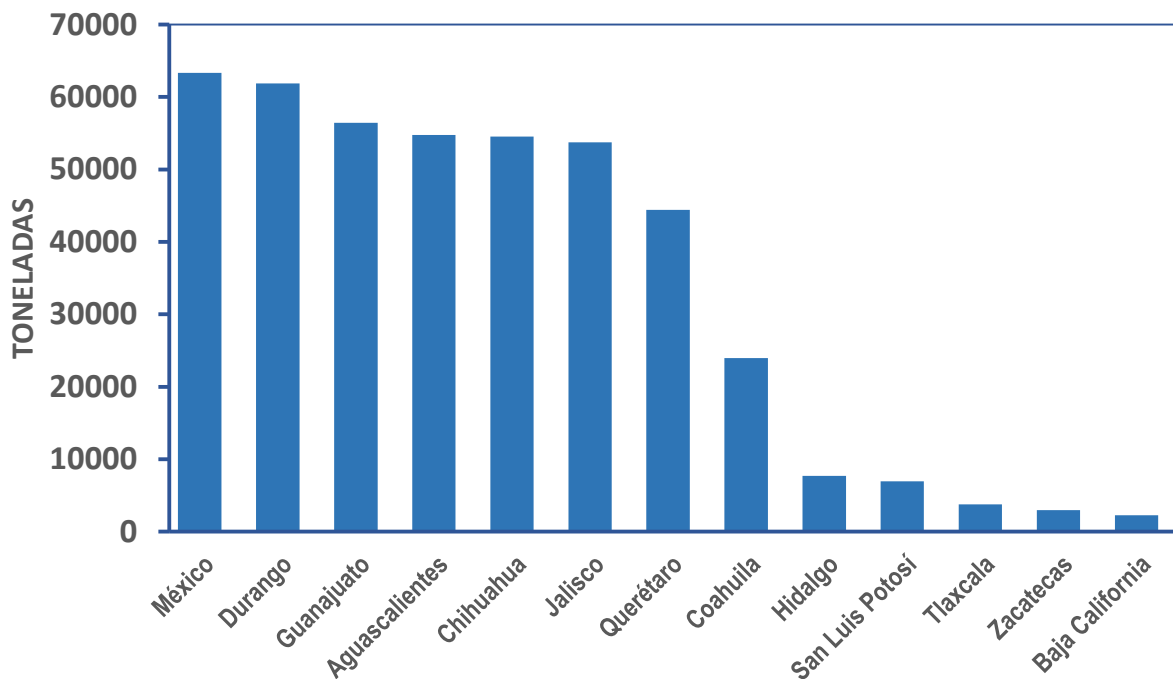


Figura 1. Producción de forraje verde de Triticale en México, año agrícola riego + temporal (O-I, P.V.) 2017 (SIAP, 2018).

2.2. Origen de triticale

El triticale (*x Triticosecale Wittmack*) es un cereal de autofecundación (fecundación del óvulo de una flor por el polen de la misma planta). Fue obtenido artificialmente a partir del cruzamiento de trigo (*Triticum* spp.) y centeno (*Secale* spp.). El nombre triticale es una combinación del prefijo de Triticum (derivado de *Triticum*) y el sufijo *Secale*, es decir, los géneros botánicos de las plantas progenitoras. Al crear este nuevo cereal se pretendió combinar la calidad del grano y la productividad aportada por el trigo, con el vigor de la planta del centeno, resistencia a la sequía, bajas temperaturas y limitantes de suelo (Hewstone *et al.* 1977). Baun, (1971) sugirió el nombre latino genérico *Triticosecale Wittmack*, el cual es aceptado hasta ahora.

2.3. Tipos de triticales

Según la producción de forraje y gustosidad del triticale para la alimentación del ganado bovino u ovino, las variedades pueden ser: primaverales; que se caracterizan por ser materiales de doble propósito (forraje y grano), son insensibles al fotoperiodo, son más precoces y con menor potencial de amacollaje que el resto de los materiales; los facultativos; son variedades de doble propósito (forraje y grano), son más precoces que los triticales de invierno, insensibles al fotoperiodo; los invernales; son variedades con mayor potencial forrajero, en los que se pueden realizar múltiples cortes de forraje, presentan buena capacidad de rebrote, soportan el pastoreo intensivo, son sensibles al fotoperiodo, son más tardíos que el resto de los materiales (Murillo, 2001).

Diversos estudios realizados en el Norte de México reportaron que dependiendo de los tipos de hábito de crecimiento de las variedades de triticale: primaverales, facultativos e invernales presentan rendimientos que oscilan entre 8.5 y 25 t ha⁻¹ de materia seca (Lozano, 2004). Murillo (2001), en el estado de Baja California Sur, reportó rendimientos en triticales de hábitos primaverales de 50 t ha⁻¹, triticales de invierno con 52 t ha⁻¹ y triticales facultativos con 46 t ha⁻¹ de forraje verde. En cuanto a rendimiento de grano, en la actualidad las nuevas variedades de triticales como emperador INIA evaluados en diferentes localidades en Chile los rendimientos van de 11.3 a 21.2 t ha⁻¹ (Jobet *et al.* 2019). En otro estudio Lozano, (2004) reporta que bajo condiciones de temporal en promedio de rendimiento el triticale produce 15% más que el trigo.

2.4. Características de triticale para forraje y grano

Asimismo con base en las características y necesidades del sector ganadero de la región se buscan variedades de triticale: 1) con rendimientos altos de forraje ($>12 \text{ t ha}^{-1}$ de materia seca), 2) alta calidad nutritiva de forraje en contenido de fibra neutro detergente de 40 a 52%, contenido de ácido fibra detergente de 25 a 32%, contenido de energía neto de lactancia más de $1.45 \text{ Mcal kg}^{-1}$ y digestibilidad de materia seca más de 65% (Hernández, 2012), para pastoreo deben contener alta gustosidad (>3) y alta capacidad de rebrote (>0.6) (Ye, *et al.* 2001), 3) para grano los rendimientos deben ser mayor a 9 t ha^{-1} , 4) con alta calidad del grano principalmente el contenido de proteína cruda mayor al 12%, 5) de ciclos cortos (135 días a madurez fisiológica), 6) de rápido crecimiento foliar para evitar la evaporación del agua, 7) un sistema radicular fuerte que asimile mejor los nutrientes y agua del suelo, 8) resistencia a plagas (principalmente áfidos), 9) resistencia a enfermedades (royas de la hoja y tallo), 10) tolerancia a la sequía, 11) tolerancia a las altas temperaturas, 12) tolerancia a las heladas y 13) estabilidad en la expresión fenotípica a los diferentes ambientes.

2.5. Ajuste fenológico de las plantas

Una de las características más importantes para la adaptación de los cultivos al ambiente en que se desarrollan es el ajuste fenológico (Loss y Sidique, 1994). La adecuación de los diferentes estadios de desarrollo y la duración del ciclo de cultivo a las condiciones ambientales de la zona es uno de los factores más importantes en la determinación del rendimiento. La precocidad a floración y el vigor inicial son claves para reducir el efecto del estrés hídrico y térmico que tiene lugar al final del ciclo de cultivo durante el llenado del grano en trigo harinero y trigo duro (Dias y Lidon, 2009; Álvaro *et al.* 2008), de manera similar la duración del área foliar una vez alcanzada la antesis y durante el llenado del grano, ha sido relacionada con el rendimiento del cultivo en diferentes ambientes (Christopher *et al.* 2008). En base a este contexto radica la importancia del estudio de los diferentes hábitos de crecimiento en sus diferentes etapas de desarrollo, además de la calidad de forraje durante su ciclo para un óptimo aprovechamiento en la alimentación animal.

2.6. Relación de los componentes de biomasa con rendimiento de grano

Diversos estudios reportan que el rendimiento de grano en cereales se expresa como el producto de la biomasa en la madurez y el índice de cosecha. Por tanto, el incremento en el rendimiento está asociado al mejorar el índice de cosecha (Álvaro *et al.* 2008). Por tanto, para mejorar el rendimiento se tiene que incrementar la biomasa. De igual forma el vigor inicial es un carácter que depende tanto del índice de cosecha como del índice de área foliar y está relacionado con la adaptación de las plantas al cambio climático (Ludwing y Asseng, 2010). Por lo que la medición del vigor inicial es importante en zonas donde el agua empieza a ser factor limitante en la producción de grano, ya que un vigor inicial rápido, reduce la evaporación directa del suelo, aumenta la radiación interceptada por el cultivo y permite una mejor competencia contra las malezas (Jacobsen *et al.* 2012) y finalmente está relacionada con el rendimiento final del cultivo (Preus *et al.* 2012).

2.7. Métodos de evaluación de biomasa en cereales de grano pequeño

La evaluación de la biomasa es de gran importancia en los programas de mejoramiento de cereales y puede ser evaluada mediante métodos directos que consisten en muestreos destructivos donde se extraen muestras de forraje del campo, para transportarlas al laboratorio, medir el área de las hojas, peso verde, y mediante un horno secar las muestras y calcular su peso seco, para finalmente determinar la biomasa del cultivo (Royo *et al.* 2004). Este método por la cantidad de mano de obra que se requiere resulta ser costosa e inviable, además por ser destructivo y consume parte de la cosecha es un problema dado que se trabaja con parcelas pequeñas en los programas de mejoramiento (Royo *et al.* 2004).

Los métodos indirectos mediante reflectancia pueden ser una alternativa: los cuales consisten en la proporción de energía que es reflejada desde un objeto a la energía incidente sobre el objeto. Donde la reflectancia espectral de un cultivo difiere considerablemente en la región cercana al infrarrojo ($\lambda = 700-1300$ nm) y en el rango visible de color rojo ($\lambda = 550-700$ nm) del espectro electromagnético (Kulma y Silva, 1973). Las plantas tienen una baja reflectancia en la parte azul y rojo del espectro debido a la absorción de la clorofila, con una reflexión más alto en el verde por lo que las plantas se ven verdes a la vista. En contraste, la energía cercana al infrarrojo se

refleja fuertemente en la superficie de la planta y la cantidad de esta reflectancia es determinada por las propiedades de los tejidos de las hojas, su estructura celular, el protoplasma y los cloroplastos. Así también estas características se ven afectadas por los factores ambientales tales como la humedad del suelo y la etapa de la hoja (Ma *et al.* 2001). Por el contrario, entre la vegetación y el suelo están en un máximo de reflectancia de rojo y cercano al infrarrojo, por lo tanto, las mediciones de reflectancia espectral se pueden utilizar para calcular una variedad de índices vegetativos que se correlacionan bien con los parámetros agronómicos y fisiológicos de las plantas relacionados con la actividad fotosintética y la productividad de la planta (Ma *et al.* 2001; Adamsen *et al.* 1999).

2.8. Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI)

Uno de los índices más generalizados es el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) el cual ha mostrado eficiencia en la predicción de la actividad fotosintética, ya que este índice de vegetación incluye tanto la luz roja y cercana al infrarrojo del espectro: la actividad fotosintética de la planta se determina por el contenido de clorofila y el funcionamiento del mismo, estudios han documentado la relación entre el nitrógeno y la clorofila de las hojas para el trigo (Evans, 1989).

Mediante el uso de los espectroradiómetros se pueden medir los espectros de luz reflejada por el dosel (Royo *et al.* 2003). Diversos índices espectrales han sido propuestos para la estimación de diferentes caracteres de vegetación; sin embargo, existe poca información en su utilización para predicción de rendimiento de biomasa y grano en cereales y su uso en diferentes condiciones ambientales. De igual manera, los espectroradiómetros son equipos costosos y su uso se limita a mercados definidos, ante esta situación se han puesto al mercado equipos de menor costo y fáciles de usar además de ser independientes de las condiciones atmosféricas. Tal es el caso del GreenSeeker Handheld® que permite medir el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

De esta manera las mediciones de reflectancia espectral mediante instrumentación que proporcionan una evaluación rápida, no destructiva y cuantitativa de los cultivos para interceptar la radiación y evaluar la fotosíntesis, representa un menor costo en los programas de mejoramiento (Aparicio *et al.* 2000; Royo *et al.* 2003). Los diferentes

índices que pueden obtenerse son el índice de área foliar (IAF) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que fue propuesto para estimar la biomasa verde y además el rendimiento de grano en diferentes cereales (Slafer *et al.* 2005).

2.9. Características del GreenSeeker Handheld®

El GreenSeeker Handheld® es un equipo que mide el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) se obtiene a partir de mediciones de la reflectancia de la luz en las regiones del rojo e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético. Bajo el principio de que, un dosel verde y sano absorberá la mayor parte de la luz roja y reflejará la mayor parte de la luz NIR, a causa de que la clorofila absorbe la luz azul y roja principalmente y el mesófilo refleja la luz NIR. (Pietragalla y Madrigal, 2013). Los procesos fisiológicos que permiten evaluar de manera indirecta son: área verde, capacidad fotosintética, estado de nitrógeno en la planta. Las ventajas de su uso es que es un equipo de fácil uso, independiente a las condiciones de luz solar. Sin embargo, algunas desventajas es que se restringe su uso en condiciones climáticas como días lluviosos, presencia de rocío, vientos o bien la cantidad y el ángulo de radiación incidente, ya que puede modificar la estructura del dosel y distorsionar las lecturas del NDVI, debido a cambios en la reflexión de la luz. Asimismo, la distorsión de las lecturas puede ser causas de la estructura y morfología del dosel ya que la reflectancia es afectada por la arquitectura de las plantas, así como también la presencia de ceras, espigas y aristas, (Pietragalla y Madrigal, 2013).

2.10. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son otras de las herramientas que en la actualidad están disponibles para muchas aplicaciones agrícolas (Huete *et al.* 2002), sin embargo, las resoluciones espaciales son demasiado rústicas para parcelas pequeñas en las que se trabajan en los programas de mejoramiento. Por ejemplo, QuickBird® es un satélite comercial con un sensor de alta resolución que recoge imágenes de la superficie de la tierra durante las horas del sol. El sistema recoge datos pancromáticos de 61 centímetros y estereoscópicos multiespectrales de 2,5 metros. El QuickBird® está diseñado para cubrir grandes áreas con gran eficacia y precisión. Los usos principales son en aplicaciones de cartografía, urbanismo, investigación meteorológica y vigilancia

militar. Las ventajas de esta tecnología son que muestran un excelente nivel de detalle, claridad, calidad espectral y cobertura global, siendo una gran herramienta para el análisis e interpretación de la superficie terrestre, especialmente en el ámbito militar, administración de recursos naturales, evaluación de desastres, agricultura, control del medio ambiente, cartografía detallada, entre otros. Las desventajas es que requiere de equipos de cómputo con alta capacidad de procesamiento de datos que resulta ser costosos, además la fusión de imágenes de ambos sensores (pancromático y multiespectral) permite obtener data multiespectral a 61 cm de resolución. Los datos colectados por el satélite tienen una resolución radiométrica de 11 bit y el tamaño de cada escena es de 16.5 km x 16.5 km; por lo que para parcelas pequeñas resulta ser imposible su uso (ESA, 2018).

2.11. Índices de vegetación derivados de fotografías digitales (pic-vis)

Los índices de vegetación derivados de fotografías digitales (pic-vis), muestran otra opción en predicción de biomasa y rendimiento de grano en los cereales; el cual se basa en diferentes espacios de color, en base a términos de matiz (color), luminosidad (brillo) y saturación (vividez). La creación de dichas escalas ha permitido expresar en forma precisa el color, según la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) dentro de estos se encuentran CIE $L^*a^*b^*$, CIE XYZ y CIE Luv para identificar y expresar el color de forma objetiva (Casadesús *et al.* 2007).

CIE-Lab es el espacio de color ampliamente usado porque correlaciona los valores numéricos de color consistentemente con la percepción visual humana, donde L^* indica la luminosidad y a^* y b^* son las coordenadas cromáticas. L^* =luminosidad; a^* = coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde); b^* =coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul). CIE Luv; permite la medición de la cromaticidad del color verde, pero aún no está descrito para su uso en los pic-vis (Trussell *et al.* 2005). Otro componente de las imágenes digitales es el espacio de color que se basa en la saturación, intensidad y tonalidad promedio de la imagen (HIS), finalmente en cuanto al número de píxeles verdes se encuentra área verde (GA, por sus siglas en inglés) % de píxeles de $60 < \text{tonalidad} < 120$ y área más verde (GGA, por sus siglas en inglés) % de píxeles de $80 < \text{tonalidad} < 120$, ya que los colores que captan las cámaras digitales van de RGB (rojo, verde y azul), el cual permite evaluar la cubierta verde del cultivo.

De los índices anteriormente descritos algunos serán más adecuados para proporcionar estimadores de características de los cultivos que otros, donde ciertos componentes de color son más sensibles a las condiciones de iluminación y para el procesamiento de imágenes digitales mediante un programa de computo (Casadesús *et al.* 2005).

En particular, dependiendo de la intensidad media medida por el sensor, el sistema de control de la exposición cambia el tamaño de la abertura y/o la velocidad de obturación junto con un controlador automático de ganancia para capturar imágenes bien expuestas (Ramanath *et al.* 2005). Como consecuencia de estos auto-ajustes los parámetros de color que dependen de la luminosidad de una escena no se pueden cuantificar de forma fiable a partir de las imágenes obtenidas con las cámaras convencionales, mientras que los parámetros relacionados con la cromaticidad se miden más fácilmente (Casadesús *et al.* 2005). Entre ellos, el componente de tono (H) a partir de la saturación de color de intensidad espacio de color (HIS) ya se ha utilizado como un indicador de la calidad del césped, medido ya sea con un colorímetro (Landschoot y Mancino, 2000) o a partir de imágenes digitales (Casadesús *et al.* 2005). Otros índices pueden estar basados en el recuento de los píxeles cuyo color se encuentra en el rango para una característica dada, tales como las hojas verdes (Lukina *et al.* 1999). Sin embargo, por razones prácticas, en programas de mejoramiento en el que el número de imágenes puede ser alto, todas las operaciones de imagen deben llevarse a cabo de forma automática y sin la necesidad de la intervención del usuario en cada imagen analizada.

2.12. Usos de las cámaras convencionales en las mediciones de área verde del cultivo

De acuerdo a lo anterior, las cámaras digitales convencionales podrían proporcionar un método más conveniente para predecir la cubierta vegetal, ya que son más accesibles, portátiles y fácil de usar. La fotografía digital se ha utilizado para cuantificar características de las plantas tales como área de la hoja (Lati *et al.* 2011.), la senescencia de las hojas (Adamsen *et al.* 1999) o la cobertura de pastizales (Li *et al.* 2005). Además, las imágenes son de usos múltiples, una vez que se han utilizado para la evaluación de la biomasa también puede ser útil para comprobar otros caracteres, tales como la presencia de enfermedad, densidad y distribución de las plantas.

CAPÍTULO IV

ARTÍCULO 1

Rendimiento de biomasa y grano en variedades de triticale en el valle de Mexicali

**José Luis Velasco López¹, Roberto Soto Ortiz^{1*}, Carlos Enrique Ail Catzim¹,
Onécimo Grimaldo Juárez¹, Silvia Mónica Avilés Marín¹, Alejandro Javier Lozano
del Río²**

¹Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, carretera delta s/n C.P. 21705, ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México.

²Departamento de fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, C.P. 1923, Saltillo, Coahuila, México. Autor para correspondencia: roberto_soto@uabc.edu.mx.

Resumen

El valle de Mexicali es una región importante en la producción de carne y leche de origen bovino con aceptación en otros países principalmente Estados Unidos, Japón y Corea. Por tal motivo se requiere forraje de calidad para la alimentación del ganado como el triticale, utilizado en diversas zonas de México, sin embargo, en el valle de Mexicali no se tiene información del comportamiento agronómico de este cultivo. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de biomasa seca y grano de 10 variedades de triticales en los ciclos otoño-invierno 2014-15 y 2015-16, en el valle de Mexicali. El diseño experimental fue bloques completos al azar con tres repeticiones. Se evaluaron 10 variedades de triticales de diferentes tipos de crecimiento: cuatro

primaverales, dos facultativos y cuatro invernales. Además, se evaluó una variedad de avena. En el primer ciclo de evaluación, la mayor producción de biomasa total correspondió a la variedad AN125 y AN105 con 10.5 y 10.7 t ha⁻¹, en rendimiento de grano las variedades AN105, AN38, AN125, AN31B, ABT y Eronga produjeron de 5.4 a 7.3 t ha⁻¹. Para el segundo ciclo, las variedades superiores en biomasa total fueron AN31B, ABT, AN38, AN34, AN31P y Eronga con 4.9 a 6.0 t ha⁻¹ y en rendimiento de grano AN38, AN123, Eronga y AN125 de 3.1 a 4.1 t ha⁻¹. En conclusión, las variedades invernales AN31B y AN34 mostraron potencial para la producción de biomasa total, la variedad facultativa AN38 y las variedades primaverales AN125 y Eronga, presentaron superioridad en rendimiento de grano en los dos ciclos de evaluación.

Palabras clave: componentes de rendimiento, forraje, x *Triticosecale Wittmack*

Abstract

The Mexicali valley is an important region in the production of meat and milk of bovine origin with acceptance in other countries mainly the United States, Japan and Korea. For this reason, quality forage as triticale is required for livestock feeding as used in various areas of Mexico. However, in the Mexicali valley there is no information whatsoever on the agronomic performance of this crop. The objective of this study was to evaluate dry biomass and grain yield of 10 varieties of triticale in the fall-winter cycles 2014-15 and 2015-16, in the Mexicali valley. Data was analyzed under a randomized complete block design with three repetitions. Ten triticale varieties with different growth type were evaluated: four spring type, two facultative type and four winter type varieties. Also, an oat variety was evaluated. In the first evaluation cycle, the highest total biomass production corresponded to the varieties AN125 and AN105 with 10.5 and 10.7 t ha⁻¹ respectively. As far as grain yield, AN105, AN38, AN125, AN31B, ABT and Eronga varieties produced from 5.4 to 7.3 t ha⁻¹. For the second cycle, the top varieties in total biomass production were AN31B, ABT, AN38, AN34, AN31P and Eronga with 4.9 to 6.0 t ha⁻¹ and in grain yield AN38, AN123, Eronga and AN125 from 3.1 to 4.1 t ha⁻¹. It can be concluded that winter varieties AN31B and AN34 showed potential for the production of total biomass, the facultative variety AN38 and the spring varieties AN125 and Eronga, presented superiority in grain yield in the two evaluation cycles.

Key words: yield components, forage, x *Triticosecale Wittmack*

Introducción

El triticale (x *Triticosecale Wittmack*) se utiliza como alimento para el ganado de engorda y leche, por su contenido nutricional en forraje y grano se encuentra dentro de los estándares para considerarlo de alta calidad al cumplir con los parámetros en contenido de fibra neutro detergente, ácido fibra detergente, energía neto de lactancia, digestibilidad de materia seca, gustosidad y proteína cruda (Hernández, 2012), es un cultivo con potencial para reemplazar a otros cereales en la alimentación del ganado (Gelelcha *et al.* 2007, Frías *et al.* 2016). Además de presentar mayor tolerancia a suelos salinos, altas temperaturas y mayor competitividad en ambientes desfavorables que los cultivos tradicionales como, trigo, avena, cebada y rye grass (Hewstone *et al.* 1977). Las condiciones agroclimáticas anteriormente mencionadas son características de las regiones áridas de México donde la salinidad de los suelos asociadas a altas temperaturas y la baja precipitación son los principales factores que limitan la producción de forraje y grano donde el cultivo de triticale (x *Triticosecale Wittmack*) puede ser una alternativa para estas regiones (Ballesteros *et al.* 2015).

El cultivo de triticale se clasifica de acuerdo a su patrón de producción y necesidad de vernalización en: 1) primaverales, de rápido crecimiento (115 días a madurez fisiológica) y recomendados para un corte, 2) facultativos, de crecimiento rápido (145 días a madurez fisiológica), semi postrado, recomendado para dos cortes y 3) invernales, de crecimiento postrado y tardío (165 días a madurez fisiológica) suficientes para realizar de tres a cinco cortes (Murillo *et al.* 2001, Lozano del Río *et al.* 2009). Estudios de Lozano del Río *et al.* (2004) y Mellado *et al.* (2005) documentaron rendimientos de forraje verde en triticales primaverales, invernales y facultativos con 50, 52 y 46 t ha⁻¹ respectivamente, además se reportaron rendimientos de grano entre 8 y 12.72 t ha⁻¹ bajo condiciones de zonas áridas. También se reportó que el rendimiento final del grano es determinado por componentes como el número de espigas por metro cuadrado, tamaño de espiga, número de espiguillas por espiga, número de granos por espiga y peso de granos por espiga (Biscoe y Gallagher, 1977), los cuales son resultados del potencial genético de la variedad y de las condiciones ambientales en

que se desarrolla (Slafer *et al.* 2006). La importancia de obtener altos rendimientos de forraje y grano en el valle de Mexicali se debe a la demanda para la alimentación del ganado bovino en la producción de carne y leche, pero las condiciones climáticas de esta región son limitantes para abastecer la cantidad necesaria, el potencial de producción de forraje seco en cultivos como cebada y avena son de 5.68 y 6.13 t ha⁻¹ respectivamente y en forraje verde de cultivos como sorgo, avena y maíz reportan rendimientos de 44.3, 35.9, 58.6 t ha⁻¹, en cuanto a rendimiento de grano; el trigo, sorgo y maíz presentan producciones de 5.9, 4.48 y 8.9 t ha⁻¹. (SIAP, 2016). El objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de biomasa seca y grano de 10 variedades de triticale en el valle de Mexicali.

Materiales y métodos

Localidad. El estudio se realizó durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015 (O-I 2014-15) y otoño invierno 2015-2016 (O-I 2015-16), en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, en el ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México, ubicado entre las coordenadas 32° 24'N y 115° 11'O, con una altitud de 15 m, en un suelo de textura arcillosa. El clima del valle de Mexicali se clasifica como árido cálido, muy extremo, con temperatura media anual de 22.9° C, máxima de 48.5° C y mínima durante invierno de -7.0° C, y una precipitación media anual de 60 mm (García, 1988).

Material genético. Se evaluaron 10 variedades de triticale: cuatro de tipo primaveral (AN123, AN125, AN137, Eronga), dos de tipo facultativo (AN105, AN38) y cuatro de tipo invernal (AN31B, AN34, AN31P, ABT). Estos materiales fueron proporcionados por el programa de cereales de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" para el ciclo otoño invierno 2014-15. En el ciclo otoño invierno 2015-16, se utilizó el grano cosechado del ciclo anterior como semilla y como testigo una variedad comercial de avena forrajera (Bachiníva) de ciclo intermedio/precoz.

Diseño experimental y manejo agronómico. Las variedades se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con 10 y 11 tratamientos, con tres repeticiones en cada uno, durante los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 respectivamente. La parcela experimental consistió en 6 hileras/parcela y una distancia entre hilera de 0.30 m por 5 m de largo (9.0 m²), la parcela útil fue de 0.50 m de una hilera central (0.15 m²). La

siembra de los lotes se realizó bajo el sistema tradicional (en plano), mediante una sembradora para granos finos modelo SB-2008 16D se marcaron las hileras a una distancia de 0.30 m, posteriormente se sembró de manera manual, en suelo seco. En el primer ciclo de cultivo la siembra fue el 8 de enero del 2015 y en el segundo ciclo el 30 de noviembre del 2015 a una densidad de 120 kg ha⁻¹ según lo recomendado por Lozano *et al.* (2009). Las parcelas se separaron entre sí 0.30 m y entre bloques 1.0 m; se establecieron bordes con una longitud y altura de 0.80 y 0.50 m respectivamente. La fórmula de fertilización empleada fue 120-80-00, la mitad del nitrógeno y el total del fósforo se aplicaron al momento de la siembra y la segunda mitad del nitrógeno se aplicó en el segundo riego. El cultivo se desarrolló en condiciones óptimas de humedad, se realizó el riego a la siembra y cuatro de auxilio, cuando más del 50% de las parcelas llegaron a las etapas de amacollamiento, encañe, floración y llenado de grano, identificando las etapas con base en la escala fenológica propuesta por Zadoks *et al.* (1974) que son 25, 32, 65 y 75 en ambos ciclos, con una lámina de riego total aproximada de 80 cm. El control de malezas se realizó con deshierbes manuales según fue requerido. No se realizó control de plagas y enfermedades durante el desarrollo del cultivo por baja incidencia.

VARIABLES EVALUADAS. Para estimar la biomasa seca, el muestreo destructivo se realizó cuando cada variedad llegó a la etapa de embuche (43, en la escala de Zadoks), considerando diferencia de días por su tipo de crecimiento y una vez que estos cumplieron con los criterios de corte en cereales de invierno propuestos por Lozano del Río *et al.* (2009) en ambos ciclos, las plantas se cortaron al nivel del suelo en un segmento de 0.50 m lineal; posteriormente en el laboratorio se separaron las hojas y tallos de cada muestra, se secaron en una estufa a 60°C por 72 horas, se registró su peso en gramos por parcela y el valor obtenido se transformó a toneladas por hectárea. Para la estimación del rendimiento de grano y sus componentes, cuando cada variedad llegó a la etapa de cosecha, se cortaron al nivel del suelo 2.0 m lineales de plantas en dos hileras centrales de cada parcela, posteriormente se trilló con una maquina estacionaria, el material trillado se limpió, se determinó su peso en kilogramos y se transformó a toneladas por hectárea ajustado a una humedad del 12 %. Los componentes de rendimiento se estimaron a partir de la recolección aleatoria de 10

espigas de cada parcela, de las cuales se midieron las siguientes variables: longitud de espiga (LE) y número de espiguillas/espiga (EE). Posteriormente, las espigas se trillaron de manera individual y se midieron las variables complementarias; granos/espiga (GE) y peso de granos/espiga (PGE).

Para estimar el número de espigas/m² (EM2), se contaron las espigas presentes en dos hileras centrales de 1.0 m lineal en cada una de las parcelas cuando más del 50% de las plantas llegó a la etapa de madurez fisiológica (90, en la escala de Zadoks).

Análisis estadístico. En todas las variables y por ciclo se realizaron análisis de varianza, comparación de medias (Tukey 0.05) y análisis de contrastes ortogonales entre los tipos de crecimiento de las variedades. En ambos ciclos se realizaron análisis de correlación lineal de Pearson entre el rendimiento de grano y sus componentes. Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS 9.0 (SAS, 2002).

Resultados y discusión

En el ciclo O-I 2014-15, las variedades se desarrollaron a temperaturas medias de 15 a 23° C, mínimas de 8 a 13° C y máximas de 23 a 31° C, con una temperatura media del suelo de 12 a 17° C y con 215 horas frío. En el ciclo O-I 2015-16, las temperaturas medias fueron de 11 a 21° C, mínimas de 3 a 12° C y máximas de 20 a 29° C, con una temperatura media del suelo de 12 a 18° C y con 789 horas frío acumulados de emergencia a madurez fisiológica (Cuadro 1).

Biomasa seca de hojas

En el ciclo O-I 2014-2015, los resultados de los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias mostraron a las variedades AN137 con 8.1 t ha⁻¹ y AN125, AN34, AN105 con 7.8 t ha⁻¹ sobresalientes estadísticamente con respecto al resto de las variedades. En el segundo ciclo, se observaron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias mostraron a las variedades AN31B y AN31P con 3.2 y 2.8 t ha⁻¹, respectivamente, que fueron superiores al resto de las variedades de triticale y a la avena con 1.3 t ha⁻¹ (Figura 2). Los análisis de contrastes ortogonales en el primer ciclo no se encontraron diferencias entre los diferentes tipos de crecimiento, a diferencia del segundo ciclo, se observó diferencias entre los tipos de triticales, donde el tipo invernal fue superior en 79% (1.1 t

ha⁻¹) a los facultativos, 47% (0.8 t ha⁻¹) primaverales y 108% (1.3 t ha⁻¹) a la variedad de avena.

Cuadro 1. Datos climáticos en que se desarrollaron las variedades en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16, ejido

Ciclo O-I 2014-15							Ciclo O-I 2015-16						
Mes	Tmax	Tmin	Tmed	HF	Ts	ETF	Mes	Tmax	Tmin	Tmed	HF	Ts	ETF
Enero	23.4	8.08	15.25	97	12.4	Emergencia-Principio de Amacollamiento	Diciembre	20.3	3.2	11.3	367	12.0	Emergencia- Principio de Amacollamiento
Febrero	27.4	9.42	17.9	164	13.6	Amacollamiento- Principio de encañe	Enero	20.8	5.2	12.5	633	11.0	Amacollamiento- Principio de encañe
Marzo	29.4	11.74	20.5	200	14.1	Encañe-Embuche	Febrero	26.5	8.2	17.1	740	13.1	Encañe-Embuche
Abril	30.4	11.61	21.4	208	15.7	Embuche-Espigamiento	Marzo	27.9	9.4	18.9	780	16.0	Espigamiento- Llenado de grano
Mayo	31.7	13.74	23.0	215	17.3	Llenado de grano- Madurez fisiológica	Abril	29.8	12.1	21.4	789	18.7	Madurez fisiológica

Nuevo León, Mexicali, Baja California.

T max: temperatura máxima, T min: temperatura mínima, Ts: temperatura del suelo, en grados centígrados °C, HF: horas frío acumulados, ETF: etapa fenológica promedio de las variedades.

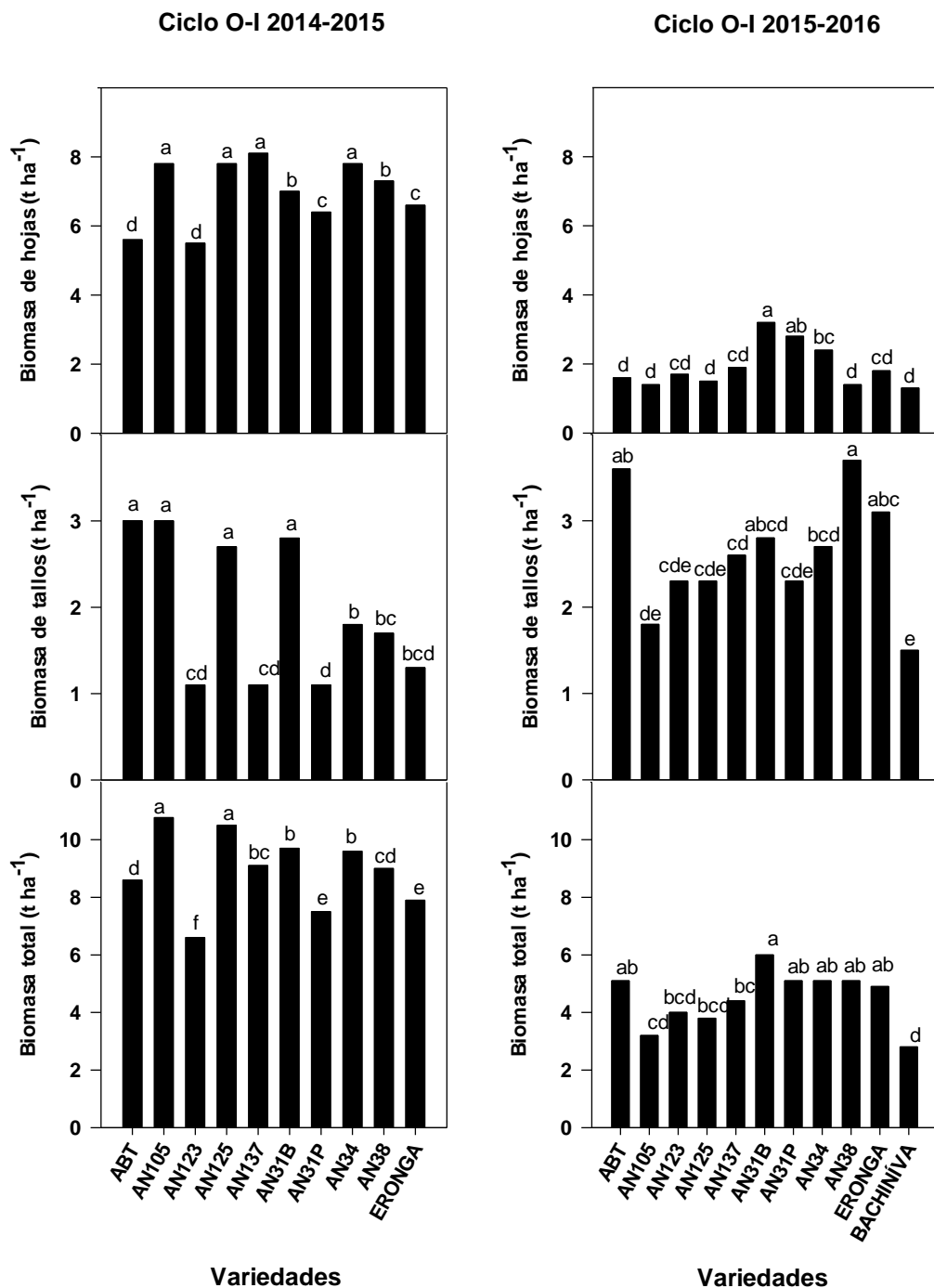


Figura 2. Promedios de biomasa de hoja (BHOJ), biomasa de tallos (BTALL) y biomasa total (BTOT) para 10 variedades de triticale cortados en la etapa de embuche, evaluados en dos ciclos, O-I 214-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California. *Barras con letras iguales dentro de cada gráfica no difieren estadísticamente (tukey ≤ 0.05).

Biomasa seca de tallos

En el primer ciclo, los resultados de los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, en las pruebas de medias se observó que cuatro variedades de triticale ABT y AN105 con 3.0 t ha^{-1} , AN31B con 2.8 t ha^{-1} y AN125 con 2.7 t ha^{-1} fueron superiores estadísticamente. En el segundo ciclo, se observaron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias mostraron a los triticales AN38, ABT, Eronga y AN31B con rendimientos de 3.7, 3.6, 3.0 y 2.8 t ha^{-1} , respectivamente, superiores a la avena (1.5 t ha^{-1}). Los contrastes ortogonales en el primer ciclo, mostraron diferencias estadísticas entre los triticales invernales y primaverales ($P \leq 0.05$), siendo los invernales superiores en 40% (0.6 t ha^{-1}), esto es atribuido a que los invernales presentan mayor potencial para producir hijuelos que los primaverales como lo reporta Lozano *et al.* (2009). En el segundo ciclo se observó diferencias entre invernales y primaverales, siendo superiores los invernales en 12% (0.3 t ha^{-1}).

Biomasa seca total

En el primer ciclo, los resultados de los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades evaluadas, las pruebas de medias mostraron que AN105 y AN125 fueron superiores que las otras variedades con producciones de 10.7 y 10.5 t ha^{-1} , respectivamente, en un estudio realizado por Colín *et al.* (2009) reportaron rendimiento de 7.0 t ha^{-1} en triticale bajo condiciones de riego en el estado de Coahuila. En el segundo ciclo, se observaron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades evaluadas, las pruebas de medias mostraron a los triticales AN31B (6.0), ABT (5.1), AN38 (5.1), AN34 (5.1), AN31P (5.1) y Eronga (4.9) con los mayores rendimientos y superiores a la avena (2.8 t ha^{-1}), similares a lo reportado por Lozano del Río *et al.* (2009) con rendimientos de 4.1 y máximos de 5.8 t ha^{-1} en un estudio de triticale realizado en los estados de Coahuila, Nuevo León y Chihuahua. Con base en los resultados en este estudio, el triticale puede ser una opción para forraje en las condiciones del valle de Mexicali.

Cuadro 2. Comparación de medias para biomasa seca, por contrastes ortogonales por tipos de crecimiento de triticales.

GRUPOS	CICLO	BHOJ (t ha ⁻¹)		NSF	BTALL (t ha ⁻¹)		NSF	BTOT (t ha ⁻¹)		NSF
	O-I 2014-15									
Pv vs Fc		7.0	7.5	ns	1.5	2.3	ns	8.5	9.9	**
Fc vs Inv		7.5	6.7	ns	2.3	2.1	ns	9.9	8.8	**
Inv vs Pv		6.7	7.0	ns	2.1	1.5	*	8.8	8.5	**
	O-I 2015-16									
Pv vs Fc		1.7	1.4	ns	2.5	2.7	**	4.3	4.2	**
Fc vs Inv		1.4	2.5	**	2.7	2.8	ns	4.2	5.3	**
Inv vs Pv		2.5	1.7	**	2.8	2.5	**	5.3	4.3	**
Pv vs Bc		1.7	1.2	ns	2.5	1.5	**	4.3	2.7	**
Fc vs Bc		1.4	1.2	ns	2.7	1.5	ns	4.2	2.7	ns
Inv vs Bc		2.5	1.2	**	2.8	1.5	ns	5.3	2.7	**
Tcl vs Bc		2.0	1.2	ns	2.7	1.5	ns	4.7	2.7	ns

GRUPOS=tipos de crecimiento de triticales; Pv=primaverales; Fc=facultativos; Inv=invernales; Tcl=triticales; Bc=avena variedad Bachiníva; O-I 2014-15=ciclo otoño invierno 2014-2015; O-I 2015-16=ciclo otoño invierno 2015-2016; BHOJ=biomasa de hoja; BTALL=biomasa de tallos; BTOT=biomasa total; NSF=nivel de significancia; ns=no significativo; *=significativo al 0.05, nivel de probabilidad; **=significativo al 0.01, nivel de probabilidad.

En los análisis de contrastes ortogonales (Cuadro 2), en el primer ciclo los triticales facultativos fueron superiores a los invernales y primaverales en 13% (1.1 t ha^{-1}) y 16% (1.4 t ha^{-1}), respectivamente. Estos resultados son similares a lo documentado por Lozano *et al.* (2009) indicando que los facultativos presentan potencial para producir hijuelos y hojas en ambientes semiáridos. Por lo tanto, los triticales facultativos pueden ser potenciales para la producción de forraje seco cortados en la etapa de embuche. En el segundo ciclo los invernales fueron superiores a los facultativos en 26% (1.1 t ha^{-1}) y los primaverales en 23% (1.0 t ha^{-1}), finalmente los primaverales e invernales fueron superiores a la avena en 59% y 96% (1.5 y 2.6 t ha^{-1}).

Longitud de espiga

En ambos ciclos, los análisis de varianza no mostraron diferencias entre variedades, en el primer ciclo los valores fueron de 10.4 a 12.9 cm y en el segundo de 9.5 a 11.5 cm. Mendoza *et al.* (2014) reportan valores entre 16.6 y 17.2 cm en variedades de triticales evaluados para producción de semilla con 50% de fertilización química y 50% de biofertilizante. Los contrastes ortogonales en el primer ciclo no se encontraron diferencias entre los tipos de crecimiento de triticales, en el segundo ciclo los primaverales fueron superiores de los facultativos con 1.1 cm y los invernales fueron superiores de los primaverales con 0.1 cm.

Espiguillas por espiga

Los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias (Cuadro 3) mostraron a las variedades AN105, AN31B, AN34, AN31P, AN38 y Eronga, superiores con valores entre 29.6 y 32.0. En el segundo ciclo se observó diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$), las variedades ABT, AN31P, AN31B, AN34 y AN38 fueron las que presentaron los valores más altos que van de 24.8 a 28.8 espiguillas por espiga. El número de espiguillas por espiga encontrados en ambos ciclos, son similares a los que documenta Mohammed *et al.* (2011) quienes registraron de 25 a 30 espiguillas por espiga, este autor señala que el número de espiguillas por espiga está determinado por la heredabilidad genética más que por las condiciones climáticas. Los contrastes ortogonales en el primer ciclo mostraron que los invernales son superiores de los facultativos y de los primaverales en 1.2 y 4.8. En el segundo ciclo

los primaverales fueron superiores a los facultativos en 0.4 y los invernales superiores de los facultativos en 4.1 espiguillas por espiga.

Granos por espiga

En el primer ciclo no se encontró diferencias entre las variedades con valores entre 56 y 73. A diferencia, en el segundo ciclo se observó diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias (Cuadro 3) mostraron a las variedades AN123, ABT, AN137, AN38 y AN31B, con los mayores valores entre 53 y 66 granos por espiga. Este comportamiento se pudo deber a que durante el desarrollo del grano las condiciones ambientales permitieron una buena polinización y formación de grano para todas las variedades.

Peso de granos por espiga

Los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias (Cuadro 3) mostraron a las variedades ABT, AN137, AN38, AN123 y Eronga, con los mayores pesos de granos por espiga que van de 2.5 a 3.5 g. En el segundo ciclo no se observaron diferencias entre las variedades con valores de 2.0 a 3.5. Estos resultados son similares a lo que reporta Ballesteros *et al.* (2015) con valores de 2.24 a 3.6 g por espiga, el cual está determinado por la cantidad de nitrógeno aplicado y de las condiciones climáticas del ciclo del cultivo.

Espigas por metro cuadrado

En los análisis de varianza no se observaron diferencias entre las variedades, los valores observados fueron de 284 a 450. A diferencia del segundo ciclo, donde se observaron diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) entre variedades, AN38, AN125, AN31B, AN137, AN31P, AN105, Eronga, y ABT presentaron los valores más altos entre 268 a 376 espigas por m^2 (Cuadro 3). Los contrastes ortogonales en el primer ciclo no mostraron diferencias entre tipos de triticales, en el segundo ciclo los triticales facultativos se diferenciaron de los primaverales con 45 más espigas por m^2 , estos valores son superiores que lo reportado por Paccapelo *et al.* (2017) de 235 a 314 espigas por m^2 .

Cuadro 3. Rendimiento promedio de grano y sus componentes para 10 variedades de triticale, evaluados en el valle de Mexicali, Baja California. (O-I 2014-15 y O-I 2015-16)

VARIEDADES		RG (t ha ⁻¹)	EM2	LE (cm)	EE	GPE	PGE (g)
O-I 2014-15	AN123	4.3 ^{bcd}	335.0 ^a	10.4 ^a	25.6 ^b	62.3 ^a	2.5 ^{ab}
	AN125	6.1 ^{ab}	450.0 ^a	10.5 ^a	26.3 ^b	59.0 ^a	2.3 ^b
	AN137	4.5 ^{bcd}	285.0 ^b	12.0 ^a	28.0 ^b	67.6 ^a	3.0 ^{ab}
	Eronga	5.4 ^{abcd}	444.0 ^a	11.8 ^a	29.6 ^{ab}	63.0 ^a	2.5 ^{ab}
	AN105	7.3 ^a	390.0 ^a	11.8 ^a	32.0 ^{ab}	62.0 ^a	2.4 ^b
	AN38	6.9 ^a	425.0 ^a	10.8 ^a	29.6 ^{ab}	73.3 ^a	2.6 ^{ab}
	AN31B	5.7 ^{abc}	381.0 ^a	11.3 ^a	31.0 ^{ab}	59.6 ^a	2.2 ^b
	AN34	4.0 ^{cd}	318.3 ^a	12.0 ^a	31.0 ^{ab}	60.3 ^a	2.4 ^b
	AN31P	3.6 ^d	284.3 ^a	11.6 ^a	31.0 ^{ab}	56.3 ^a	2.0 ^b
	ABT	5.7 ^{abc}	286.0 ^a	12.9 ^a	36.0 ^a	73.3 ^a	3.5 ^a
	CV %	12.1	24.4	9.1	7.9	11.1	14.0
	DMS	1.9	257.8	3.1	6.9	20.8	1.0
	Primaverales	5.1	378.8	11.2	27.4	63.0	2.6
	Facultativos	7.1	407.7	11.3	31.0	67.7	2.5
	Invernales	4.8	317.5	12.0	32.2	62.4	2.6
O-I 2015-16	AN123	3.5 ^{ab}	238.6 ^b	11.3 ^a	24.7 ^{bc}	66.6 ^a	2.3 ^a
	AN125	3.1 ^{abc}	326.0 ^{ab}	10.3 ^a	24.6 ^{bc}	54.6 ^{abc}	1.9 ^a
	AN137	2.8 ^{bcd}	284.6 ^{ab}	10.7 ^a	22.8 ^c	62.2 ^{ab}	1.9 ^a
	Eronga	3.3 ^{abc}	271.3 ^{ab}	10.4 ^a	23.0 ^c	51.4 ^{bc}	2.3 ^a
	AN105	2.5 ^{bcde}	274.0 ^{ab}	9.5 ^a	22.0 ^c	48.1 ^c	1.6 ^a
	AN38	4.1 ^a	376. ^a	9.8 ^a	24.8 ^{abc}	56.1 ^{abc}	1.8 ^a
	AN31B	1.4 ^{ef}	315.6 ^{ab}	10.9 ^a	27.3 ^{ab}	50.5 ^{bc}	1.6 ^a
	AN34	1.5 ^{def}	248.0 ^b	10.1 ^a	25.7 ^{abc}	50.8 ^{bc}	1.4 ^a
	AN31P	1.2 ^f	274.3 ^{ab}	10.8 ^a	28.0 ^{ab}	53.5 ^{abc}	1.4 ^a
	ABT	2.2 ^{cdef}	268.6 ^{ab}	11.5 ^a	28.8 ^a	65.1 ^a	2.4 ^a
	CV %	17.1	13.9	6.7	5.4	8.0	22.0
	DMS	1.2	117.8	2.1	4.0	13.1	1.2
	Primaverales	3.2	280.2	10.7	23.8	58.7	2.1
	Facultativos	3.3	325.2	9.6	23.4	52.1	1.7
	Invernales	1.6	276.7	10.8	27.5	55.0	1.8

Dentro de cada columna, medias con literales iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$); CV=coeficiente de variación en %; DMS=diferencia mínima significativa; O-I 2014-15=ciclo otoño invierno 2014-2015; O-I 2015-16=ciclo otoño invierno 2015-2016; LE=longitud de espiga; EE=espiguillas por espiga; GPE=granos por espiga; PGE=peso de granos por espiga; EM2=espigas por metro cuadrado; RG=rendimiento de grano.

Rendimiento de grano

En el primer ciclo, los análisis de varianza mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las variedades, las pruebas de medias (Cuadro 3) mostraron a las variedades AN105, AN38, AN125, AN31B, ABT y Eronga, con mayores rendimientos de 7.3, 6.9, 6.1, 5.7, 5.7 y 5.4 t ha⁻¹, respectivamente. Estos valores son similares a los reportados por Mendoza *et al.* (2011) con 6.61 t ha⁻¹, Castro *et al.* (2011) 5.5 t ha⁻¹ y Goyal *et al.* (2011) 5.6 t ha⁻¹, quienes documentan que la fertilización, fecha y densidad de siembra del cultivo de triticale influyen en el rendimiento final del grano. En el segundo ciclo se observó diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) entre variedades, presentando a AN38, AN123, Eronga y AN125 los mayores rendimientos con valores de 4.1, 3.5, 3.3 y 3.1 t ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). El mayor rendimiento de grano de las variedades observadas en el ciclo O-I 2014-15 posiblemente se debió a la presencia de días frescos (temperaturas medias diarias, 18 a 22° C) durante las etapas de espigamiento y antesis, que favoreció el buen desarrollo de las espigas y llenado de grano. A diferencia del ciclo O-I 2015-16 la amplia variación en las temperaturas diarias durante las etapas de encañe (8 a 19° C) y espigamiento (12 a 21° C), posiblemente afectaron el rendimiento de grano.

En los análisis de contrastes ortogonales (Cuadro 4), en el primer ciclo los triticales facultativos se diferenciaron de los primaverales en rendimiento de grano superándolos en 2.0 t ha⁻¹ y los primaverales de los invernales con una superioridad de 0.3 t ha⁻¹, en el segundo ciclo, los facultativos se diferenciaron de los primaverales y de los invernales con 0.1 y 1.7 t ha⁻¹. La superioridad de los facultativos se puede deber a las temperaturas en el periodo de floración y llenado de grano, lo que posiblemente aseguró una óptima polinización con temperaturas mínimas, máximas y medias de 11, 30 y 21° C, y un adecuado llenado de grano con temperaturas mínimas, máximas y medias de 13, 31 y 23° C, estos valores se encuentran dentro del rango reportado por Felix *et al.* (2009) con temperaturas óptimas en floración de 10 a 24° C y de 12 a 26° C en llenado de grano. Por lo que las variaciones de temperaturas entre máximas y mínimas durante el día influyeron en el rendimiento de grano en las variedades que las horas frío acumuladas desde la siembra a la cosecha, ya que en el ciclo 2014-15 las horas frío acumuladas fueron de 215 y en el ciclo 2015-16 fueron 789.

Cuadro 4. Comparación de medias para rendimiento de grano y sus componentes, por contrastes ortogonales por tipos de crecimiento de triticales.

GRUPOS	CICLO	RG (t ha ⁻¹)			EM2		LE (cm)		EE		GE		PGE (g)						
		NSF		NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF	NSF			
O-I 2014-15																			
Pv vs Fc		5.1	7.1	**	378.8	407.7	ns	11.2	11.3	ns	27.4	31.0	ns	63.0	67.7	ns	2.6	2.5	ns
Fc vs Inv		7.1	4.8	ns	407.7	317.5	ns	11.3	12.0	ns	31.0	32.2	**	67.7	62.4	ns	2.5	2.6	ns
Inv vs Pv		4.8	5.1	**	317.5	378.8	ns	12.0	11.2	ns	32.2	27.4	**	62.4	63.0	ns	2.6	2.6	ns
O-I 2015-16																			
Pv vs Fc		3.2	3.3	**	280.2	325.2	*	10.7	9.6	**	23.8	23.4	**	58.7	52.1	ns	2.1	1.7	ns
Fc vs Inv		3.3	1.6	**	325.2	276.7	ns	9.6	10.8	ns	23.4	27.5	**	52.1	55.0	ns	1.7	1.8	ns
Inv vs Pv		1.6	3.2	ns	276.7	280.2	ns	10.8	10.7	**	27.5	23.8	ns	55.0	58.7	ns	1.8	2.1	ns

GRUPOS=tipos de crecimiento de triticales; Pv=primaverales; Fc=facultativos; Inv=invernales; O-I 2014-15=ciclo otoño invierno 2014-2015; O-I 2015-16= ciclo otoño invierno 2015-2016; RG=rendimiento de grano; EM2=espigas por metro cuadrado; LE=longitud de espiga; EE=espiguillas por espiga; GPE=granos por espiga; PGE=peso de granos por espiga; NSF=nivel de significancia; ns=no significativo; *=significativo al 0.05, nivel de probabilidad; **=significativo al 0.01, nivel de probabilidad.

Correlación de rendimiento de grano y sus componentes

Los análisis de correlación para ambos ciclos (Cuadro 5), mostraron que espigas por m² y pesos de granos por espiga están mayormente correlacionados con el rendimiento del grano ($r=0.57$), que el resto de los componentes. Granos por espiga, espiguillas por espiga y longitud de espiga presentaron una correlación menor de $r=0.49$, $r=0.46$ y $r=0.32$, respectivamente, lo que concuerda con lo reportado por Paccapelo *et al.* (2004), Abeledo *et al.* (2003), y Castro *et al.* (2011). Por lo que los mayores incrementos en rendimiento de grano en triticale serían posibles si se aumenta la producción de espigas por unidad de superficie, peso de granos por espiga, granos por espiga y espiguillas por espiga como reporta Solís *et al.* (2004).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y sus componentes, para 10 variedades de triticales evaluados en el valle de Mexicali, Baja California. (O-I 2014-15 y O-I 2015-16).

	EM2	EE	GE	LE	PGE
EE	0.08				
GPE	0.05	0.57***			
LE	-0.04	0.76***	0.66***		
PGE	0.08	0.49***	0.72***	0.56***	
RG	0.57***	0.46***	0.49***	0.32**	0.57***

LE=longitud de espiga; EE=espiguillas por espiga; GPE=granos por espiga; PGE=peso de granos por espiga; EM2=espigas por metro cuadrado; RG=rendimiento de grano; *=significativo al 0.05, nivel de probabilidad; **=significativo al 0.01, nivel de probabilidad; ***=significativo al 0.001, nivel de probabilidad.

Conclusiones

Para las condiciones agroecológicas prevalecientes en el presente estudio, las variedades invernales AN31B y AN34 mostraron potencial para la producción de biomasa total, la variedad facultativa AN38 y las variedades primaverales AN125 y Eronga, presentaron superioridad en rendimiento de grano en los dos ciclos de evaluación. La variedad de avena (Bachiníva) tuvo menor rendimiento de biomasa total que las variedades de triticale. Los triticales de tipos invernales presentaron el mayor potencial productivo en biomasa seca total, los de tipo facultativo y primaveral en rendimiento de grano.

ARTÍCULO 2

Relación de índices fotográficos y NDVI con la producción de biomasa seca en triticales en el valle de Mexicali

José Luis Velasco López¹, Roberto Soto Ortiz^{1*}, Carlos Enrique Ail Catzim¹, Onécimo Grimaldo Juárez¹, Silvia Mónica Avilés Marín¹ e Alejandro Javier Lozano del Río²

¹Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, carretera delta s/n C.P. 21705, ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México.

²Departamento de fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, C.P. 1923, Saltillo, Coahuila, México. Autor para correspondencia: roberto_soto@uabc.edu.mx.

Resumen

El objetivo del presente estudio fue determinar la relación de diferentes índices fotográficos y valores de NDVI con la producción de biomasa seca de hojas en triticales forrajeros cultivados durante dos ciclos agrícolas, bajo diferente condición de riego y fertilización. La información fue analizada bajo un diseño en bloques completos al azar. Para determinar los índices de vegetación GA, GGA se tomaron tres fotografías con una cámara digital, para determinar el NDVI se realizaron tres mediciones con un espectroradiómetro marca Greenseeker Handheld®, en las etapas de amacollamiento, encañe, embuche, antesis, llenado de grano y madurez fisiológica. Finalmente, para estimar la producción de biomasa seca se tomó una muestra de 0.15 m² de una hilera central por cada parcela en cada una de las etapas mencionadas. Los resultados mostraron mayor ajuste a las ecuaciones de regresión lineal simple entre NDVI y biomasa de hojas antes de antesis ($R^2=0.45$) en respuesta a los efectos de interacción entre muestreos y variedades en ambos ciclos de evaluación. Después de antesis las relaciones de NDVI con biomasa de hojas fue menor ($R^2=0.34$). La relación entre el índice GGA y biomasa de hojas antes de antesis fue de ($R^2= 0.30$), de forma similar se encontró una relación mayor ($R^2=0.34$) entre GGA con biomasa de hojas después de antesis. En conclusión, es posible emplear indistintamente los índices GGA y NDVI,

para determinar biomasa seca de manera indirecta mediante cámaras digitales o GreenSeeker Handheld®, dada la relación lineal positiva entre ambos.

Palabras clave: índices fotográficos, NDVI, Triticale, producción de biomasa

Abstract

The objective of the present study was to determine the relationship of different photographic indexes and NDVI values with the production of dry leaf biomass in forage triticale cultivated during two agricultural cycles, under different irrigation and fertilization conditions. Data was analyzed under a randomized complete block design. To determine the GA, GGA vegetation indexes, three photographs were taken with a digital camera, to determine the NDVI, three measurements were made with a Greenseeker Handheld® spectroradiometer, in the stages of tillering, stem elongation, booting, anthesis, milk development and ripening, to estimate the production of dry biomass, a sample of 0.15 m² of a central row was taken for each plot in each of the mentioned stages. Results showed a better fit to the simple linear regression equations between NDVI and leaf biomass before anthesis ($R^2=0.45$) in response to the effects of interaction between samples and varieties in both evaluation cycles. After anthesis, the statistical relationship between NDVI and leaf biomass was lower ($R^2=0.34$). In addition, the ratio between the GGA index and leaf biomass before anthesis was ($R^2=0.30$), similarly a higher relationship ($R^2=0.34$) was found between GGA with leaf biomass after anthesis. It can be concluded that it is possible to effectively use either GGA or NDVI indexes as an indirect method to estimate dry biomass through the use of digital cameras or GreenSeeker Handheld®, due to the positive linear relationship between the two indexes.

Key words: digital cameras, GreenSeeker Handheld®, forage, Triticale

Introducción

Para el desarrollo de nuevas variedades de cereales con alta producción y calidad se requiere de una amplia evaluación de líneas donde el procedimiento más utilizado es el método directo que consiste en obtener muestras de forraje verde, procesarlas, para así determinar la biomasa seca. La principal desventaja de este método son altos costos en

mano de obra y la pérdida de material vegetal para evaluaciones posteriores en los programas de mejoramiento (Royo *et al.* 2004). También existe el método indirecto basado en la medición de la reflectancia, que se fundamenta en la cantidad de energía que es reflejada desde un objeto en relación con la energía incidente sobre el mismo. En el caso de las plantas, debido a la composición y estructura de hojas, protoplasmas y cloroplastos de la superficie foliar se genera una alta reflectancia de la energía cercana al infrarrojo, así también la presencia de clorofila causa que el color verde se refleje con mayor intensidad que el rojo y azul dentro del espectro electromagnético, estas propiedades de las plantas se correlacionan con los parámetros agronómicos y fisiológicos de las plantas que muestran de manera indirecta la actividad fotosintética y la productividad de la planta (Ma *et al.* 2001; Adamsen *et al.* 1999). En la actualidad las mediciones de reflectancia espectral son herramientas para calcular diferentes índices vegetativos, sin embargo, existen factores como la humedad del suelo y la etapa fenológica de la planta que dificultan las mediciones de reflectancia (Ma *et al.* 2001).

Existen equipos diseñados para medir los espectros de luz reflejada por la superficie foliar y que no dependen de las condiciones de iluminación solar o nubosidad (Royo *et al.* 2003), entre los más utilizados está el GreenSeeker Handheld® que determina el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), este índice permite la medición de la reflectancia de luz roja y cercana al infrarrojo, en consecuencia ha mostrado eficiencia en la predicción de la actividad fotosintética y por lo que fue propuesto para estimar la biomasa verde y el rendimiento de grano en diferentes cereales (Slafer *et al.* 2005).

Otro método indirecto son las imágenes satelitales que son utilizadas en aplicaciones agrícolas para estudios de vegetación, evaluación de ecosistemas y rendimientos en los cultivos agrícolas (Huete *et al.* 2002) sin embargo, se limita su aplicación a grandes extensiones debido a la menor capacidad de resolución óptica y del requerimiento de equipos especiales para su procesamiento. De esta manera, se han propuesto las cámaras digitales que logran obtener imágenes de alta resolución y que permiten determinar los índices de vegetación (pic-vis) basándose en la saturación, intensidad y tonalidad de la imagen en diferentes espacios de color establecidos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) para identificar y expresar el color de forma objetiva.

Los índices fotográficos permiten cuantificar características de las plantas tales como área, senescencia de las hojas, la cobertura de pastizales y la calidad de césped (Lati *et al.* 2011; Li *et al.* 2005).

En base a lo anterior, se realizó el presente estudio para determinar la correlación entre el NDVI y los índices fotográficos con la producción de biomasa seca de hojas de triticale, determinado por GreenSeeker Handheld® y la cámara digital bajo diferentes números de riegos y niveles de fertilización nitrogenada.

Materiales y métodos

Localidad. El estudio se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, en el ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México, ubicado entre las coordenadas 32° 24' de Latitud Norte y 115° 11' de Longitud Oeste, con una altitud de 15 m, en un suelo de textura arcillosa. El clima del valle de Mexicali se clasifica como árido cálido, muy extremo, con una temperatura media anual de 22. 9° C, máxima de 48. 5° C y mínima durante invierno de -7. 0° C, con una precipitación media anual de 60 mm (García, 1988).

Los experimentos. Se realizaron en los ciclos otoño-invierno 2014-2015 y 2015-2016 donde las variedades de triticales se evaluaron con dos cantidades diferentes de riego (cuatro y cinco) y fertilización 120-80-00 y 60-80-00 (Cuadro 6).

Material genético. Se evaluaron 10 variedades de triticales: cuatro de tipo primaveral (AN123, AN125, AN137, Eronga), dos de tipo facultativo (AN105, AN38) y cuatro de tipo invernal (AN31B, AN34, AN31P, ABT). La semilla de estos materiales fue proporcionada por el programa de cereales de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” para la siembra en el ciclo otoño-invierno 2014-15 y el grano cosechado de este ciclo se utilizó como semilla para el ciclo otoño invierno 2015-16.

Manejo agronómico y diseño experimental. Las fechas de siembra fueron el 8 de enero y el 30 de noviembre del 2015 para el primer y segundo ciclo agrícola respectivamente. El suelo se preparó con barbecho, rastra, floteo y surcado, posteriormente la siembra de las variedades se realizó de forma manual bajo el sistema tradicional (en plano) en suelo con una densidad de 120 kg de semilla ha⁻¹, en base a lo recomendado por Lozano *et al.* (2009). Los experimentos se establecieron por separado

en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, cada parcela experimental se estableció de 9.0 m² con 6 hileras de 5 m de largo y 0.30 m de distancia entre hilera.

Cuadro 6. Condiciones de riego y fertilización del estudio en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.

	Etapa fenológica de ultimo riego	Número de riegos	Fertilización N P K
Experimento 1	Llenado de grano	5	120-80-00
Experimento 2	Llenado de grano	5	60-80-00
Experimento 3	Antesis	4	120-80-00
Experimento 4	Antesis	4	60-80-00

Las etapas fenológicas se identificaron en base a la escala de Zadoks, los riegos aplicados correspondieron a los valores 00; germinación, 25; amacollamiento, 32; encañe, 65; floración y 75; llenado de grano, la fertilización fue 50% al momento de la siembra y el resto en amacollamiento N; unidades de nitrógeno, P; unidades de fósforo, K; unidades de potasio.

VARIABLES EVALUADAS. Las mediciones se realizaron en las etapas de amacollamiento, encañe, embuche, antesis, llenado de grano y madurez fisiológica, identificando las etapas en base a la escala fenológica propuesta por Zadoks *et al.* (1974) que son 25, 32, 43, 65, 75 y 90 en ambos ciclos, a medio día sin presencia de sombra y viento a una altura de 0.5 m sobre la cubierta vegetal y en posición cenital al centro de cada parcela del total de los experimentos. Se utilizó una cámara digital marca samsung® de 12 mega pixeles en el cual se tomaron tres fotografías por parcela, posteriormente mediante el software breedpix® 0.1 se calcularon los índices de vegetación GA y GGA. De igual manera, se utilizó el GreenSeeker Handheld® para determinar el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI). Finalmente, para determinar la producción de biomasa seca se realizaron muestreos destructivos que consistieron en retirar desde la raíz las plantas de 0.15 m² en una hilera con competencia completa; posteriormente en el laboratorio se separaron las hojas, tallos y espigas de cada muestra y se secaron en una estufa a 60° C por 72 horas y se registró su peso en gramos por parcela, el valor obtenido se transformó a toneladas por hectárea de biomasa seca.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO. Los datos obtenidos se analizaron con el paquete estadístico sas® 9.0 (SAS 2002) por medio de ANOVA y correlación lineal de las variables GA, NDVI y biomasa seca de hojas mediante el modelo de Pearson, finalmente se generó la ecuación de regresión lineal simple.

Resultados

En el ciclo O-I 2014-15 se observó mayor rendimiento de biomasa seca de hojas en la etapa de embuche y antesis para todas las condiciones de riego y fertilización. El rendimiento más alto con 8.45 t ha⁻¹, se obtuvo en condiciones de 5 riegos y fertilización 120-80-00 en la etapa de embuche, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades de nitrógeno menos se obtuvo rendimiento de 6.5 t ha⁻¹ en la etapa de antesis. En condiciones de 4 riegos el mayor rendimiento de biomasa seca de hojas fue de 6.12 t ha⁻¹ con fertilización 60-80-00 en la etapa de embuche, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades más de nitrógeno se obtuvo rendimiento de 4.75 t ha⁻¹ en la etapa de embuche. En el ciclo O-I 2015-16 se observó mayor rendimiento de biomasa seca de hojas en la etapa de embuche para todas las condiciones de riego y fertilización. El

rendimiento más alto con 1.82 t ha^{-1} , se obtuvo en condiciones de 5 riegos y fertilización 120-80-00, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades de nitrógeno menos se obtuvo rendimiento de 1.47 t ha^{-1} . En condiciones de 4 riegos el mayor rendimiento de biomasa seca de hojas fue de 1.75 t ha^{-1} con fertilización 60-80-00 en la etapa de embuche, con la misma cantidad de riegos y 60 unidades más de nitrógeno se obtuvo rendimiento de 1.5 t ha^{-1} en la etapa de embuche (Cuadro 7). En este estudio se confirma que los valores más altos de biomasa foliar en triticale se observan antes de antesis como reportan los autores Casadesús *et al.* (2014) y Royo *et al.* (2004).

Los análisis de varianza en las etapas fenológicas antes de antesis en el ciclo O-I 2014-15, mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la interacción entre los muestreos y variedades en biomasa seca de hojas y NDVI en los cuatro experimentos, de manera similar los índices GA y GGA en el experimento cuatro. También se observó diferencias significativas entre variedades como en los muestreos en las respuestas a los índices GA y GGA en los experimentos uno, dos y tres. Asimismo, los análisis de correlación mostraron correlación positiva entre el NDVI y biomasa seca de hojas en un rango de 0.56 a 0.66 en los experimentos uno, dos y cuatro (Cuadro 8).

En las etapas fenológicas después de antesis se observó diferencias significativas en la interacción entre los muestreos y variedades en biomasa seca de hojas y NDVI ($P \leq 0.05$) en los cuatro experimentos, de manera similar el índice GA en los experimentos uno, dos y tres, el índice GGA en los experimentos tres y cuatro. De igual manera se observó diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) en variedades y entre los muestreos en el índice GA en el experimento cuatro y GGA en los experimentos uno y dos. Asimismo, en los cuatro experimentos se observó correlación positiva entre los índices NDVI, GA y GGA con biomasa seca de hojas ($r > 0.50$), los índices GA y GGA con NDVI ($r > 0.77$) (Cuadro 8).

Cuadro 7. Rendimiento de biomasa seca de hojas de triticale ($t\ ha^{-1}$) en las diferentes etapas fenológicas bajo condiciones de riego y fertilización en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.

	5 Riegos		5 Riegos		4 Riegos		4 Riegos	
	120-80-00		60-80-00		120-80-00		60-80-00	
	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo1	Ciclo2
Amacollo	1.04	0.83	1.13	0.8	0.92	0.77	1.07	0.77
Encañe	4.79	1.15	4.63	1.11	3.34	1.06	3.79	1.12
Embuche	8.45	1.82	6.05	1.47	4.75	1.5	6.12	1.75
Antesis	6.8	1.19	6.5	1.09	4.44	1.37	4.25	1.24
Llenado de grano	4.66	1.28	4.24	1.02	3.32	1.2	3.06	1.04
Madurez fisiológica	3.07	1.12	3.34	0.97	2.58	1.04	2.31	1.08

Las etapas fenológicas se identificaron en base a la escala de Zadoks, 25; amacollamiento, 32; encañe, 43; embuche 65; floración, 75; llenado de grano y 90; madurez fisiológica; ciclo1: ciclo O-I 2014-15; ciclo 2: ciclo O-I 2015-16.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de los componentes de biomasa seca, NDVI e índices fotográficos evaluados en el ciclo O-I 2014-15, valle de Mexicali, Baja California.

		5 Riegos		5 Riegos		4 Riegos		4 Riegos	
		120-80-00		60-80-00		120-80-00		60-80-00	
		BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI
Antes de Antesis	NDVI	0.587		0.638		0.449		0.626	
	GA	0.156	0.114	0.359	0.142	0.157	0.140	0.155	0.053
	GGA	0.180	0.143	0.258	0.068	0.254	0.179	0.077	-0.053
Después de Antesis	NDVI	0.618		0.642		0.612		0.645	
	GA	0.525	0.780	0.580	0.817	0.547	0.851	0.507	0.841
	GGA	0.497	0.778	0.611	0.791	0.580	0.829	0.534	0.814

BHOJ=biomasa seca de hojas; NDVI=índice de vegetación de diferencia normalizado; GA=área verde; GGA=área más verde.

En el ciclo O-I 2015-16 antes de antesis se observó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la interacción entre los muestreos y variedades en la respuesta a biomasa de hojas en los cuatro experimentos, el índice NDVI en los experimentos dos, cuatro y cinco, los índices GA y GGA en los experimentos cuatro y cinco. Así también, se registró diferencias significativas entre muestreos en biomasa seca de hojas en los cuatro experimentos, GA en los experimentos uno, dos y tres. Y se observó diferencias significativas entre variedades en biomasa seca de hojas en los experimentos tres y cuatro, GA y GGA en el experimento dos. En estas etapas fenológicas, se presentó correlación positiva de los índices GA y GGA con NDVI ($r > 0.6$) en los cuatro experimentos (Cuadro 9).

Después de antesis, se observó diferencias significativas en la interacción entre los muestreos y las variedades en la respuesta a biomasa de hojas en los experimentos uno y cuatro, los índices GA y GGA en los experimentos dos y cuatro. También se observó diferencias significativas entre los muestreos en la respuesta a NDVI en los cuatro experimentos, GA y GGA en los experimentos uno y tres. De manera similar se registró diferencias significativas entre variedades en NDVI en los experimentos uno y dos, biomasa de hojas en los experimentos dos y tres. Se observó correlación positiva de los índices GA y GGA con NDVI en los cuatro experimentos ($r > 0.7$) (Cuadro 9).

Se observó mayor ajuste a las ecuaciones de regresión lineal simple entre NDVI y biomasa hojas antes de antesis en respuesta a los efectos de interacción entre muestreos y variedades en ambos ciclos de evaluación (Figura 3). La relación de NDVI con biomasa de hojas fue de $R^2=0.44$. Después de antesis las relaciones de NDVI con biomasa de hojas fue menor $R^2=0.33$ (Figura 3).

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de los componentes de biomasa seca, NDVI e índices fotográficos evaluados en el ciclo O-I 2015-16, valle de Mexicali, Baja California.

		5 Riegos 120-80-00		5 Riegos 60-80-00		4 Riegos 120-80-00		4 Riegos 60-80-00	
		BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI	BHOJ	NDVI
Antes de Antesis	NDVI	0.197		0.159		0.253		-0.115	
	GA	0.220	0.649	0.273	0.600	0.293	0.607	0.000	0.649
	GGA	0.216	0.682	0.180	0.601	0.327	0.606	-0.018	0.669
Después de Antesis	NDVI	-0.010		0.075		0.213		0.001	
	GA	0.124	0.863	0.123	0.907	0.260	0.885	0.057	0.864
	GGA	0.126	0.821	0.087	0.875	0.262	0.846	0.045	0.797

BHOJ=biomasa seca de hojas; NDVI=índice de vegetación de diferencia normalizado; GA=área verde; GGA=área más verde.

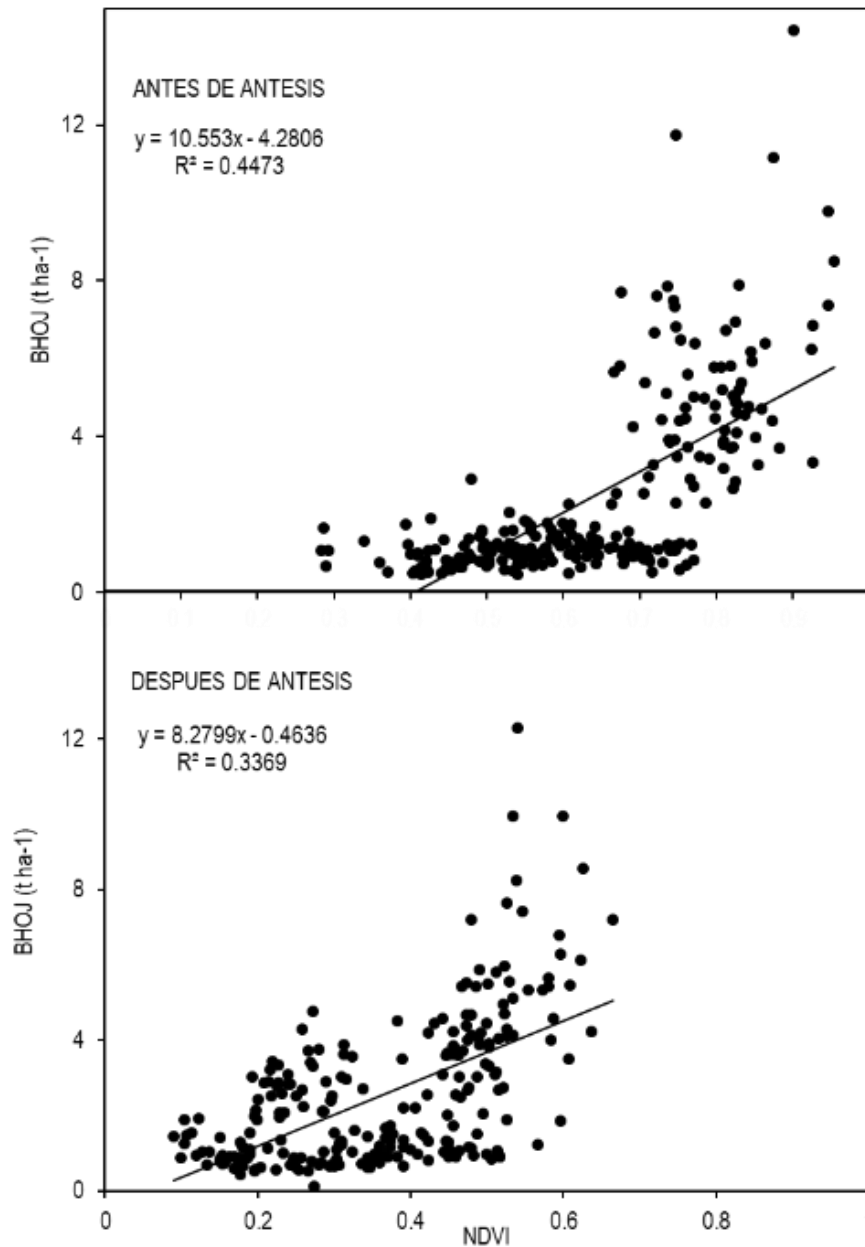


Figura 3. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y biomasa seca de hojas (BHOJ) antes y después de anthesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.

Asimismo, la relación entre el índice GGA y biomasa de hojas fue de $R^2= 0.30$ antes de antesis en los dos ciclos de evaluación, de forma similar se encontró una relación entre GGA con biomasa de hojas de $R^2=0.34$ después de antesis (Figura 4).

Del total de los experimentos en ambos ciclos de evaluación se observó relación alta entre el índice fotográfico GGA y NDVI ($R^2= 0.85$), obteniéndose mayor ajuste a la ecuación de regresión lineal simple (Figura 5).

Discusión

En este estudio se observó diferencias en los valores de NDVI, GA y GGA en las variedades de triticales a través de las diferentes etapas fenológicas, similar a lo que documenta Álvaro *et al.* (2007), donde los valores de NDVI en los triticales se diferenciaron entre las etapas de primer nudo, embuche y principio de espigamiento. Asimismo, los diferentes valores de biomasa de hojas, NDVI, GA, GGA fueron efecto del número de riegos, la cantidad de fertilizante nitrogenada y la etapa fenológica, como documenta Casadesús *et al.* (2007). Por su parte la relación entre NDVI con biomasa seca de hojas en este estudio es similar con lo reportado por los autores Cabrera *et al.* (2011) y Marti *et al.* (2007) quienes encontraron mayor relación de biomasa en la etapa cercana a antesis debido también a que el NDVI mide la proporción entre la luz reflejada por la clorofila y la luz reflejada por otras estructuras celulares (Ma *et al.* 2001, Aparicio *et al.* 2002). Así también se encontró que los índices de vegetación NDVI, GA y GGA con biomasa seca se ajustan mejor a ecuaciones de regresión lineal simple similar a lo que reporta Cabrera *et al.* (2011) y diferentes a lo que reportan otros autores como son relaciones exponenciales (Aparicio *et al.* 2000 y Álvaro *et al.* 2007). El GreenSeeker Handheld® que determina el NDVI y las cámaras convencionales el índice fotográfico GGA pueden ser una herramienta práctica y más económica para evaluar líneas o variedades de triticales forrajero en diferentes condiciones de riego y fertilización nitrogenada en las etapas fenológicas antes de antesis (Royo *et al.* 2004; Cabrera *et al.* 2011; Casadesús *et al.* 2014).

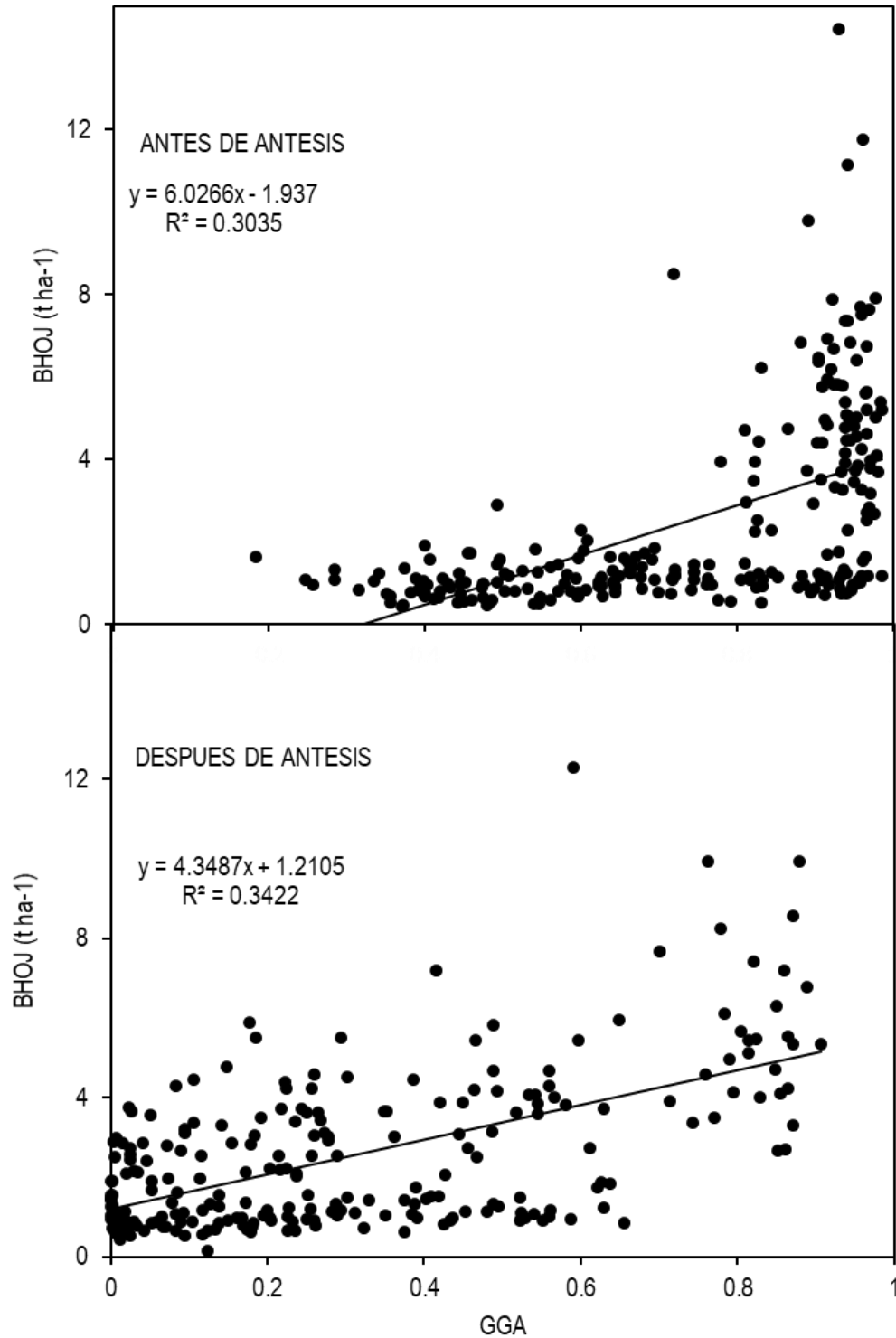


Figura 4. Relación entre el índice fotográfico (GGA) y biomasa seca de hojas (BHOJ) antes y después de anthesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.

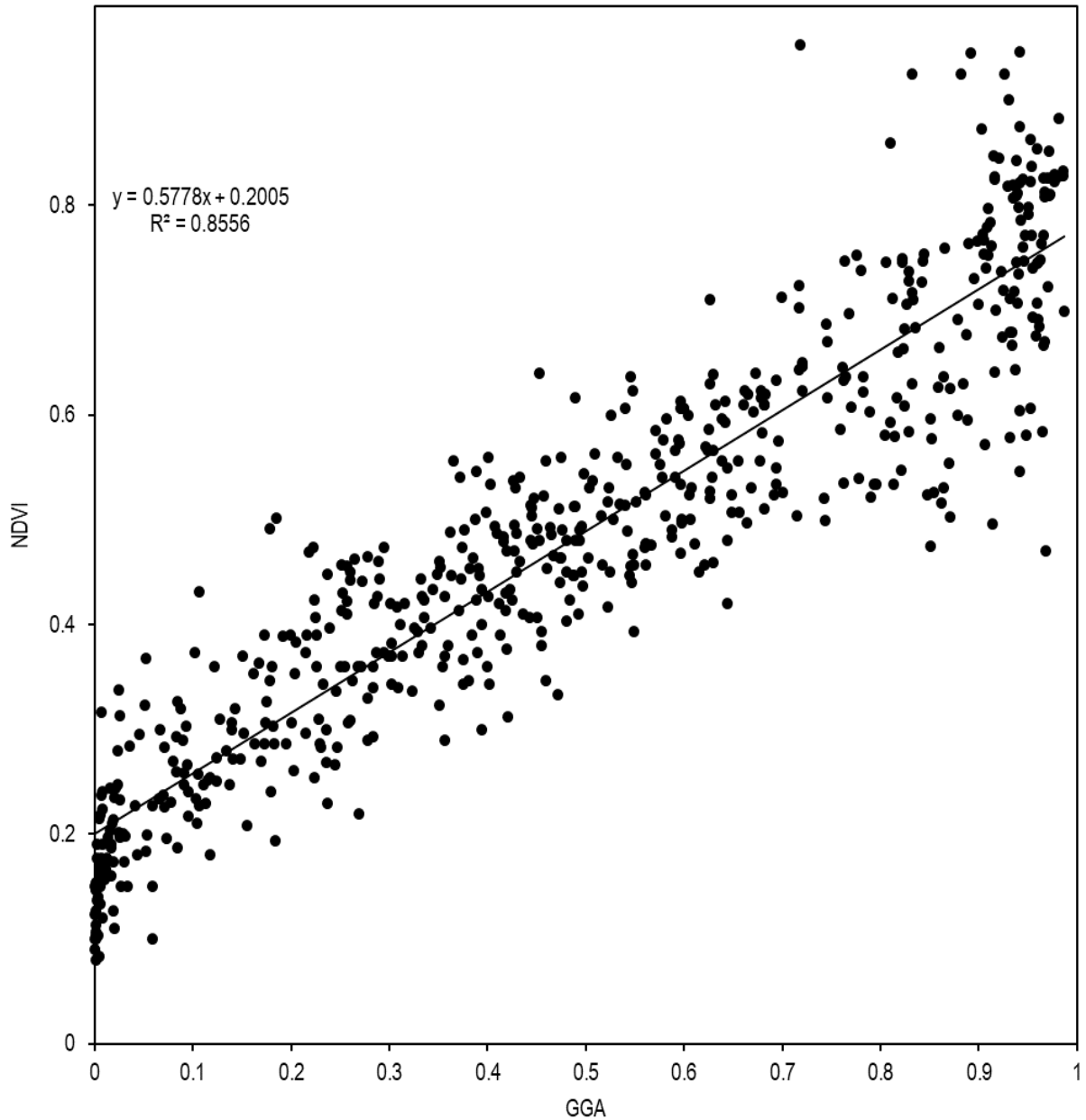


Figura 5. Relación del índice área verde (GGA) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) antes y después de antesis del total de experimentos evaluados en los ciclos O-I 2014-15 y O-I 2015-16 en el valle de Mexicali, Baja California.

Conclusiones

Los valores de los índices de vegetación GA, GGA y NDVI varían por la etapa de muestreo y condiciones de manejo del cultivo. Se obtuvo una relación directa entre los valores de los índices de vegetación con la acumulación de biomasa seca durante el desarrollo del cultivo. Es posible emplear indistintamente los índices GGA y NDVI, para determinar biomasa seca de manera indirecta mediante cámaras digitales o GreenSeeker Handheld®, dada la relación lineal positiva entre ambos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

Las variedades de triticales de tipos invernales como son AN31B y AN34, pueden ser una opción para la producción de forraje seco bajo condiciones óptimas de riego y fertilización en el valle de Mexicali.

Las variedades de tipos facultativos y primaverales como AN38, AN125 y Eronga, pueden ser una opción para la producción de grano para la alimentación del ganado.

Los valores de los índices de vegetación GA, GGA y NDVI varían por la etapa de muestreo y condiciones de manejo del cultivo.

Se obtuvo una relación directa entre los valores de los índices de vegetación con la acumulación de biomasa seca durante el desarrollo del cultivo. Es posible emplear indistintamente los índices GGA y NDVI, para determinar biomasa seca de manera indirecta mediante cámaras digitales o GreenSeeker Handheld®, dada la relación lineal positiva entre ambos.

LITERATURA CITADA

- Abeledo, L. G., Calderini, D. F., and Slafer, G. A. (2003) Genetic improvement of yield responsiveness to nitrogen fertilization and its physiological determinants in barley. *Euphytica*, 133:291-298.
- Adamsen, F. J., Pinter, P. J., Barnes, E. M., La Morte, R. L., Wall, G. W., Leavitt, S. W., Kimball, B. A. (1999) Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science*, 39:719–724.
- Álvaro, F., García del Moral, L. F., and Royo, C. (2007) Usefulness of remote sensing for the assessment of growth traits in individual cereal plants grown in the field. *International Journal Remote Sensing*, 28:2497–2512.
- Álvaro, F., Isidro, J., Villegas, D., García del Moral, L. F., Royo, C. (2008) Breeding effects on grain filling, biomass partitioning, and remobilization in Mediterranean durum wheat. *Agronomy Journal*, 100:361–370.
- Ammar, K., Mergoum, M., and Rajaram, S. (2004) The history and evolution of triticale. In: Mergoum M, Gómez Macpherson H (ed). *Triticale Improvement and Production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Pp. 1-9.
- Aparicio, N., Villegas, D., Araus, J. L., Casadesús, J., & Royo, C. (2002) Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science*, 42:1547–1555.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesús, J., Araus, J. L., & Royo, C. (2000) Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92:83–91.
- Ballesteros, R. E., Morales, R. E., Franco, M. O., Santoyo, C. E., Estrada, C. G., y Gutiérrez, R. F. (2015) Manejo de fertilización nitrogenada sobre los componentes del rendimiento de triticale. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6:721-733.
- Baun, B. R. (1971) The taxonomic and cytogenetic implications of the problem of naming amphiploids of *Triticum* and *secale*. *Euphytica*, 20:302-306.

- Biscoe, P. V., and Gallagher, J. N. (1977) Weather, dry matter production and yield. In: Landsberg JJ, Cutting CV (ed). Environmental Effects on Crop Physiology. Academic Press, London. Pp. 75–100.
- Cabrera-Bosquet, L., Molero, G., Stellacci, A. M., Bort, J., Nogues, S., and Araus, J. L. (2011) NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Research Commun*, 39:147–159. doi:10.1556/CRC.39.2011.1.15
- Casadesús, J., and Villegas, D. (2014) Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *Journal Integrative of Integrative Plant Biology*, 56:7–14. Doi: 10.1111/jipb.12117
- Casadesús, J., Biel, C., Save, R. (2005) Turf color measurement with conventional digital cameras. In *Proceedings of 2005 EFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture*. Vila Real, Portugal: Universidade de Tra's-os-Montes e Alto Douro. Pp. 804–811.
- Casadesús, J., Kaya, Y., Bort, J., Nachit, M., Araus, J., Amor, S., et al. (2007) Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Annals of Applied Biology*, 150:227–236. Doi:10.1111/j.1744-7348.2007.00116.x
- Castro, N., Rufach, H., Capellino, F., Domínguez, R., and Paccapelo, H. (2011) Evaluación del rendimiento de forraje y grano de triticales y tricepiros. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 37:281-289.
- Chaves, M. and Davies, B. (2010) Drought effects and water use efficiency: improving crop production in dry environments. *Functional Plant Biology*, 37:3-6.
- Christopher, J. T., Manschadi, A. M., Hammer, G. L., Borrell, A. K. (2008) Developmental and physiological traits associated with high yield and stay-green phenotype in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 59:354-364.
- Colín, R. M., Zamora, V. V., Torres, T. M., and Jaramillo, S. M. (2009) Producción y valor nutritivo de genotipos imberbes de cebada forrajera en la región lagunera de México. *Técnica Pecuaria en México*, 47:27-40.

- Dias, A. S., Lidon, F. C. (2009) Evaluation of Grain Filling Rate and Duration in Bread and Durum Wheat, under Heat Stress after Anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195:137-147.
- ESA. (2018) Esa eduspace. Obtenido de esa eduspace: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMJC07SXIG_0.html
- Evans, J. R. (1989) Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C-3 plants. *Oecologia*, 78:9-19.
- Fras, A., Gołbiewska, K., Gołbiewski, D., Mankowski, D. R., Boros, D., and Szecówka, P. (2016) Variability in the chemical composition of triticale grain, flour and bread. *Journal of Cereal Science*, 71:66-72.
- García, E. (1988) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, México. Pp. 217.
- Gelelcha, S., Fantahun, B., Yaie, B., and Girma, B. (2007) Triticale (X Triticosecale wittmack) a new addition to the Ethiopian cereals. *African Crop Science Conference Proceedings*, 8:1991-1995.
- Gill, K. S. and Omokanye, A. T. (2016) Spring triticale varieties forage yield, nutrients composition and suitability for beef cattle production. *Journal of Agricultural Science*, 8:1-14.
- Goyal, A., Beres, B. L., Randhawa, H. S., Navabi, A., Salmon, D. F. and Eudes, F. (2011) Yield stability analysis of broadly adaptative triticale germplasm in southern and central Alberta Canada, for industrial end-use suitability. *Canadian Journal of Plant Science*, 91:125-135.
- Hewstone, C., Acevedo, J. y Clarke, M. (1977) Comportamiento de triticales bajo condiciones extremas de humedad en la zona sur. In C. Hewstone (ed.) *Estudios preliminares de triticales en la zona sur de Chile*. INIA Publ. Misc. 5. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Carillanca, Temuco, Chile. Pp. 26-29.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83:195–213.

- Jacobsen, S. E., Jensen, C. R., Liu, F. (2012) Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 128:34–47.
- Jobet, C., Zúñiga, J., Castillo, D., Matus, I., Alfaro, C., García, J. C. (2019) Emperador INIA: nueva variedad de triticale (x *Triticosecale* Wittmack) de invierno para el sur de Chile. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science*, 35(2):173-177.
- Kumar, R., L. Silva. (1973) Light ray tracing through a leaf cross- section. *Applied Optics*, 12:2950-2954.
- Landschoot, P. J., Mancino, C. F. (2000) A comparison of visual vs. instrumental measurement of color differences in bent grass turf. *Horticultural Science*, 35:914–916.
- Lati, R. N, Filin, S., Eizenberg, H. (2011) Robust methods for measurement of leaf-cover area and biomass from image data. *Weed Science*, 59:276–284.
- Li, X. B., Chen, Y. H., Yang, H., Zhang, Y. X. (2005) Improvement, comparison, and application of field measurement methods for grassland vegetation fractional coverage. *International Journal of Plant Biology*, 47:1074–1083.
- Loss, S. P., and Siddique, K. H. (1994) Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. *Advances in Agronomy*, 52:229–276.
- Lozano del Río, A. J., Hernández, A., González, R., and Béjar, M. (2004) Triticale in México. In: Mergoum M, Gómez-Macpherson H (ed). *Triticale Improvement and Production*. Food and Agriculture. Organization of the United Nations, Rome. Pp.123–128.
- Lozano del Río, A. J., Zamora, V.V., Ibarra, J. L., Rodríguez, H. S., De la cruz, L. E., y De la Rosa, I. M. (2009) Análisis de la interacción genotipo-ambiente mediante el modelo AMMI y potencial de producción de triticales forrajeros (X *Triticosecale* Wittmack). *Universidad y Ciencia*, 25:81-92.
- Ludwig, F., Asseng, S. (2010) Potential benefits of early vigor and changes in phenology in wheat to adapt to warmer and drier climates. *Agricultural Systems*, 103:127–136.
- Lukina, E. V., Stone, M. L., Rann, W. R. (1999) Estimating vegetation coverage in wheat using digital images. *Journal of Plant Nutrition*, 22:341–350.

- Ma, B., Dwyer, L., Costa, E., and Cober, M. (2001) Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal*, 93:1227-1234. Doi: 10.2134/agronj2001.1227.
- Martí, J., Bort, J., Slafer, G. A., and Araus, J. L. (2007) Can wheat yield be assessed by early measurements of Normalized Difference Vegetation Index? *Annals of Applied Biology*, 150:253–257. Doi: 10.1111/j.1744-7348.2007.00126.x
- Mellado, Z. M., Madariaga, B. R., and Matus, T. E. (2005) Aguacero-INIA, nuevo cultivar de triticale de primavera para Chile. *Agricultura Técnica*, 65:90-95.
- Mendoza, E. M., Cortez, B. E., Rivera, R. J., Rangel, L. J., Andrio, E. E., and Cervantes, O. F. (2011) Época y densidad de siembra en la producción y calidad de semilla de triticale (X *Triticosecale* Wittmack). *Agronomía Mesoamericana*, 22:309-316.
- Mendoza, E. M., Sámano, R. S., Cervantes, O. F., Andrio, E. E., Rangel, L. J., Rivera, R. J., et al. (2014) Evaluación de la fertilización integral en la producción de semilla de triticale (X *Triticum secale* Wittmack). *Phyton*, 83:93-100.
- Mohammad, F., Ahmad, I., Khan, N. U., Maqbool, K., Naz, A., and Shaheen, S. (2011) Comparative study of morphological traits in wheat and triticale. *Pakistan Journal of Botany*, 43:165-170.
- Murillo, A. B., Arturo, E. H., Fraga, M. H., y Pargas, L. R. (2001) Rendimiento de grano y forraje de líneas de triticale y centeno en Baja California Sur, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 24 (2):145-153.
- Paccapelo, H. A., Funaro, D. O., Mac, C. T., and Melis, O. A. (2004) Rendimiento de grano y sus componentes en cereales sintéticos (tricepiros y triticales). *Revista Facultad de Agronomía Universidad Nacional de la Pampa*, 15:3-8.
- Peña, R. (2004) Food uses of triticale. In mergoum, M., and H. Gómez-Mac Pherson (eds.) *Triticale improvement and production*. Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO), Rome, Italy. Pp. 37-48.
- Preuss, P. P., Huang, C. Y., Louhaichi, M., Ogbonnaya, F. C. (2012) Genetic variation in the early vigour of spring bread wheat under phosphate stress as characterized through digital charting. *Field Crops Research*, 127:71–78.
- Ramanath, R., Snyder, W. E., Yoo, Y. J., Drew, M. S. (2005) Color image processing pipeline. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22:34–43.

- Royo, C., Aparicio, N., Blanco, R., and Villegas, D. (2004) Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 20:419–430. Doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00058-3.
- Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesús, J., Monneveux, P., Araus, J. L. (2003) Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 4403–4419.
- Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesús, J., Monneveux, P., and Araus, J. L. (2003) Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 4403–4419.
- SAS, Institute., Inc. (2002) Version 9.0 of system SAS for Windows, copyright. SAS Institute Inc., Cary, NC. USA.
- SEMARNAT. (2009) Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. Pp. 2-84.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2016) <http://www.gob.mx/siap/>. Fecha de consulta 31 de julio de 2018.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2018) Recuperado el 13 de septiembre de 2018, de <http://www.siap.gob.mx/avance-de-siembras-y-cosechas-por-cultivo/>
- Sistema de información para el manejo de agua de riego en Baja California (SIMARBC) 2018. <http://www.simarbc.gob.mx/>. Fecha de consulta 15 de agosto del 2018.
- Slafer, G. A., and Savin, R. (2006) Physiology of crop yield. In: *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. In: R. Goodman, Marcel Dekker, Taylor & Francis Group (Ed), NY, USA.
- Slafer, G. A., Araus, J. L., Royo, C., and García, L. F. (2005) Promising ecophysiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Annals of Applied Biology*, 146:61–70.
- Snyder, R. L. (1985) Hand calculating degree-days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35:353-358.

- Solís, M. E., Hernández, M. M., Borodanenko, A., Aguilar, A. J. and Grajeda, C. O. (2004) Duración de la etapa reproductiva y el rendimiento de trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27:323-332.
- Varughese, C., Barker, T., and Saari, E. (1987) *Triticale*. CIMMYT, México, D.F. Pp. 31.
- Ye Ceh, W. E., Díaz, S. H., Lozano del Río, A. J., Zamora, V. V., y Ayala, O. M. (2001) Agrupamiento de germoplasma de triticale forrajero por rendimiento, ahijamiento y gustosidad. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 39:15-30.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Konzak, C. F. (1974) A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14:415-421.