

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Relación del Área Foliar y NDVI con el Rendimiento de Biomasa en Triticale
(X *Triticosecale* Wittmack)

Por:

OSMAN SANTIZO ALVARADO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Relación del Area Foliar y NDVI con el Rendimiento de Biomasa en Triticale
(X *Triticosecale* Wittmack)

Por:

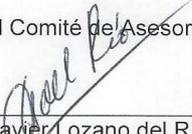
OSMAN SANTIZO ALVARADO

TESIS

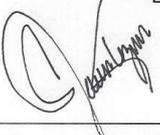
Presentada como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

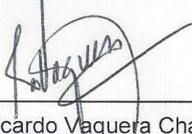
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Alejandro Javier Lozano del Río
Asesor Principal



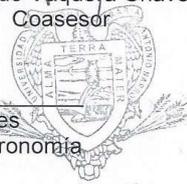
Dr. Carlos Javier Lozano Cavazos
Coasesor



M.C. Ricardo Vaquera Chávez
Coasesor



Dr. Gabriel Callegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Diciembre 2017

DEDICATORIA

A Jehová Dios

Por permitirme la vida y la dicha de estar aquí y hacer de mi persona un hombre de bien. Por ser mi fortaleza en los momentos difíciles, y no abandonarme en ningún momento en mi vida; que gracias a tí se pueden realizar los sueños que se plantea para nuestras vidas.

A mis padres.

Sr. Romeo Santizo Escobar

Sra. Irma Alvarado Vázquez

Por ser los mejores padres, por darme la confianza y regalarme la mejor herencia que es el estudio. Agradezco infinitamente todo el amor y el esfuerzo que realizaron para sacarme adelante, gracias por todos los consejos, por todos los momentos que pasamos juntos, por ser mis dos grandes amores.

A mis hermanos

Kenny Santizo Alvarado

Leyver Santizo Alvarado

Derly Santizo Alvarado

Carlos Iván Santizo Alvarado

Que son el ejemplo a seguir, gracias por los grandes momentos que me han regalado; agradezco el apoyo y la confianza que depositaron en mí. Este logro es para cada uno de ustedes. A mi hermano Carlos por ser mi compañía, crecer juntos y compartir grandes momentos en la vida.

A mis abuelos

Sr. Audomaro Santizo Bravo

Sra. Témpora Escobar Roblero

Sra. Candelaria Vázquez Romero

Por la dicha de tenerlos como abuelos, agradezco cada uno de sus consejos que me brindaron, gracias por apoyarme siempre y estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

A mi “ALMA TERRA MATER”

Por permitirme culminar mi carrera profesional en esta gran casa de estudios. Gracias por cobijarme entre tus aulas y formarme profesionalmente durante estos 4 años y medio.

Al Dr. Alejandro Javier Lozano del Río

Por todas sus enseñanzas, amistad, consejos y toda su confianza puesta en mí. Agradezco la oportunidad que me brindó para realizar este trabajo de investigación.

Al MC. Ricardo Vaquera Chávez

Por ser un gran amigo, por la confianza que puso en mí, agradezco todo el apoyo y consejos que me ha brindado, gracias por ser una gran persona, con quien puedo contar siempre.

A mi novia Paloma García Laguna.

Por ser una gran mujer a quien admiro, por estar siempre a mi lado, por tu gran amor, y consejos que siempre me brindas, gracias por esos grandes momentos que pasamos juntos durante nuestra formación profesional.

A mis profesores

Por las enseñanzas que me brindaron durante mi formación profesional, gracias por cada uno de sus consejos y animarnos a seguir forjándonos en la vida para lograr nuestros objetivos.

A mis amigos

Por compartir conmigo grandes momentos de alegría, y brindarme su confianza, agradezco cada uno de sus consejos y tiempo que me brindaron.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	vi
I. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
Objetivos específicos	2
HIPOTESIS	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
Generalidades.....	4
Tipos de triticale.....	5
Efecto de la fertilización nitrogenada sobre los cultivos.....	7
Acumulación de biomas.....	8
Área foliar.....	10
Área foliar e intercepción de la radiación solar.....	11
Determinación del área foliara.....	13
Herramientas utilizadas en estudios de acumulación de biomasa.....	13
Reflectancia espectral.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
Localización del sitio experimental.....	16
Desarrollo del experimento.....	16
Material genético utilizado.....	16
Preparación del terreno.....	17
Fecha de siembra.....	17
Tamaño de parcela experimental.....	18
Fertilización.....	18
Riegos.....	18
Control de plagas, enfermedades y malezas.....	19
Muestreos.....	19
Diseño experimental utilizado en campo.....	20

Variable registrada.....	20
Análisis estadísticos.....	21
Modelo estadístico de los análisis de varianza por muestreo para las variables en estudio.....	21
Pruebas de comparación de medias.....	22
IV. RESULTADOS.....	23
Resultados de los análisis de varianza por muestreo. Biomasa total.....	23
Resultados de los análisis de varianza por muestreo. Área foliar.....	24
Resultados de los análisis de varianza por muestreo. NDVI.....	25
V. DISCUSIÓN.....	31
VI. CONCLUSIONES.....	40
VII. LITERATURA CITADA.....	41

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1 Lista de genotipos y sorteo utilizados en el experimento. Navidad, N.L. Ciclo 2014 – 2015.....	17
Cuadro 4.1. Resultados de los análisis de varianza por muestreo para BIOT.....	23
Cuadro 4.2. Resultados de los análisis de varianza por muestreo para AF.	24
Cuadro 4.3. Resultados de los análisis de varianza por muestreo para NDVI	25
Cuadro 4.4. Resultados de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para biomas.....	26
Cuadro 4.5. Resultados de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para área foliar	26
Cuadro 4.6. Resultados de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para la variable NDVI.....	27
Cuadro 4.7. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos para biomasa seca.....	28

Cuadro 4.8. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre Grupos para área foliar.....	29
Cuadro 4.9. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos para área NDVI.....	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Contenido de humedad del suelo (%) en los diferentes regímenes de humedad a través del ciclo de cultivo. Navidad, N.L. Ciclo 2014-2015.....	31
Figura 4.2. Patrones de producción de biomasa de los diferentes grupos de triticales bajo las dosis de fertilización evaluadas.....	34
Figura 4.3. Patrones de acumulación de área foliar de los diferentes grupos de triticales bajo las dosis de fertilización evaluadas.....	35
Figura 4.4. Tendencias encontradas en los diferentes grupos de triticales para valores de NDVI bajo las dosis de fertilización evaluadas.....	36
Figura 4.5. Relación entre área foliar y la biomasa a través del ciclo del cultivo.....	37
Figura 4.6. Relación entre el NDVI y la biomasa a través del ciclo de cultivo	37
Figura 4.7. Relación entre el área foliar y el NDVI a través del ciclo de cultivo.....	38
Figura 4.8. Relación entre el área foliar y la biomasa durante la etapa vegetativa del cultivo.....	38
Figura 4.9. Relación entre el NDVI y la biomasa durante la etapa Vegetativa del cultivo.....	39
Figura 4.10. Relación entre el NDVI y la biomasa durante la etapa Vegetativa del cultivo.....	39

RESUMEN

En el Norte y Centro de México existe una alta demanda de forraje de calidad que con mejoras tecnológicas en el riego y la fertilización se logre un mejor aprovechamiento de estos insumos. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la fertilización sobre la producción de biomasa de triticales de diferente hábito de crecimiento, así como la utilidad de métodos de reflectancia espectral en la predicción de la acumulación de biomasa. La investigación se realizó en el Campo Agrícola Experimental de la UAAAN en Navidad, N.L. Se sembraron en el ciclo otoño-invierno 2014-2015. Se evaluaron 12 genotipos de diferente hábito de crecimiento. Se realizaron 12 muestreos destructivos para estimar la producción de biomasa. El diseño experimental fue bloques completos al azar. La no aplicación de fertilizante redujo significativamente la producción de biomasa. Los tipos precoces produjeron mayor biomasa al inicio del ciclo y los tipos tardíos tuvieron mayor área foliar. La predicción del rendimiento de biomasa por medio de reflectancia espectral (NDVI) sólo fue útil durante la etapa vegetativa del cultivo. Se recomienda aplicar cuando menos dosis moderadas de fertilizante nitrogenado.

Palabras clave: triticales, biomasa, dosis de fertilización, área foliar, NDVI.

I.INTRODUCCIÓN

La fertilización nitrogenada es uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de cereales. Se considera que el nitrógeno (N), es el principal factor limitante en la producción agrícola (Kichey *et al.*, 2007) y, al igual que en otros cereales, es también uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de triticale (*X Triticosecale* Wittmack). La disponibilidad de N para la planta es indispensable por ser un componente básico de todas las moléculas orgánicas involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal (Salas, 2003). Además, el N es un elemento indispensable para la fotosíntesis; para que las plantas fijen el carbono; para la acumulación de materia orgánica y la producción de rendimientos económicamente atractivos. La biomasa acumulada por las plantas es el producto final de la actividad fotosintética y es la reserva de nutrientes de la mayoría de las plantas. El crecimiento del cultivo resulta de la acumulación de biomasa vegetal. Por lo tanto, la acumulación de biomasa en el cultivo depende de la cantidad de radiación solar disponible, de la capacidad del dosel para interceptarla y de la eficiencia con que el cultivo convierte la radiación capturada en biomasa vegetal. La determinación del área foliar es fundamental en estudios de nutrición y crecimiento vegetal, con ésta se puede determinar la acumulación de materia seca, el metabolismo de carbohidratos, el rendimiento y calidad de la cosecha (Bugarin *et al.*, 2002). Es una medida necesaria para evaluar la intensidad de asimilación de las plantas, parámetro de gran relevancia cuando se efectúa el análisis de crecimiento de un cultivo. La determinación de ciertas

características como la acumulación de biomasa, el desarrollo de la superficie foliar, etc., requieren medidas destructivas que precisan de más tiempo, lo que limita su utilización en programas de mejoramiento. Con el fin de evaluar estas características de forma rutinaria, en los últimos años se han desarrollado diferentes herramientas instrumentales que permiten realizar esta tarea de forma rápida y precisa. Uno de los más conocidos y versátiles es la reflectancia espectral, la cual se basa en el principio de absorción y reflexión de la luz por la cubierta vegetal o dosel en las regiones correspondientes a la franja del espectro electromagnético visible (400-700 nm) e infrarrojo (700-1300 nm), (Peñuelas y Filella, 1988; Royo et al. 2005). Por lo mencionado anteriormente, se planteó la presente investigación con el siguiente:

OBJETIVO GENERAL

- Determinar el comportamiento productivo de triticales de diferente hábito de crecimiento bajo diferente dosis de fertilización y las relaciones entre área foliar y lecturas de NDVI con el rendimiento, con los siguientes:

Objetivos específicos

- Determinar el efecto del déficit de fertilización nitrogenada sobre la producción de biomasa en triticales de diferente hábito de crecimiento.
- Determinar el efecto del déficit de fertilización nitrogenada sobre la acumulación de área foliar en triticales de diferente hábito de crecimiento.

➤ Determinar la eficacia de un método de reflectancia espectral para estimar la producción de biomasa y área foliar en triticales de diferente hábito de crecimiento.

HIPÓTESIS

a) No existe diferencia en la producción de biomasa al no aplicar fertilizante nitrogenado.

b) No existe diferencia en la producción de biomasa entre los seis diferentes grupos.

c) El método de reflectancia espectral es eficaz en la predicción de la biomasa a través del ciclo total de cultivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Generalidades

Debido a las condiciones climáticas tan diversas en el Norte de México, que varían desde bajas temperaturas en el invierno hasta heladas ocasionales en la primavera, así como el déficit en la disponibilidad de agua para la agricultura, han llevado a los productores a elegir variedades de rápido crecimiento, que toman la mejor ventaja de la baja tasa de transpiración durante el invierno donde la radiación y evaporación son bajas (Santiveri *et al.*, 2004). Los forrajes invernales tienen la ventaja de crecer durante el periodo de baja demanda de evaporación, lo que permite un ajuste gradual al déficit de agua y así mantener el uso eficiente de la misma.

El triticale (*X Triticosecale* Wittmack.) puede utilizarse para tres fines agrícolas: a) producción de grano, b) producción de forraje y c) doble propósito, ya sea para corte ó pastoreo. Esta última modalidad en el uso de este cultivo está ganando popularidad en diversas regiones del norte y centro de México durante el ciclo otoño–invierno, debido a su potencial productivo y adecuada calidad nutritiva, la cual, en la etapa de encañe-embuche, es similar a la alfalfa (Collar y Aksland, 2001).

El triticale es un nuevo cultivo resultado de la cruce del centeno y el trigo; el objetivo en el mejoramiento de este nuevo cereal fue combinar las características deseables de las dos especies; alta productividad, adecuada resistencia a enfermedades y plagas, tolerancia al estrés, alta capacidad de absorción de

nutrientes, tolerancia a déficits de humedad, calidad nutritiva superior y rápido establecimiento, lo que lo ha convertido en una buena opción como forraje de emergencia en comparación con los cultivos tradicionales como la avena, trigo o cebada (Moore, 2005; Ozkan *et al.*, 1999; Ye *et al.*, 2001). De esta forma, el triticale es uno de los cultivos que por sus características antes mencionadas adquiere gran importancia como una alternativa para ayudar a solucionar el déficit de alimentos (NRC, 1989).

Es un cultivo relativamente nuevo en México, del cual se estima que se cultivan alrededor de 8,000 hectáreas, en su mayoría para producción de grano, principalmente en los estados de Michoacán, Nuevo León, Puebla, Jalisco, México, Tlaxcala y Sonora, y más recientemente, y para uso forrajero, en los estados de Chihuahua, Coahuila y la Región Lagunera, donde se reportan superficies mayores a las 5000 has sólo en esta última región, ya que ha demostrado ser una especie que compite efectivamente con la avena, ballico, trigo, centeno y cebada en la producción de forraje durante la época invernal (Ye *et al.*, 2001).

Tipos de triticale

Con base a su patrón productivo y hábito de crecimiento, en México se han desarrollado materiales de triticale para uso forrajero, principalmente para cortes múltiples o pastoreo (Lozano del Río, 2002). En este tipo de explotación es imprescindible la capacidad de rebrote de los genotipos, la cual depende principalmente del hábito de crecimiento y la etapa fenológica del corte, de las

condiciones climáticas, las prácticas de manejo, la humedad y fertilidad del suelo y de la presión del corte o pastoreo, entre otras (Poysa, 1985).

Existen varios hábitos de crecimiento en este cultivo, generalmente agrupados en primaverales, invernales y facultativos (Lozano del Río, 2002). Los triticales de hábito primaveral se caracterizan por su rápido crecimiento y diferenciación, sin requerimientos de vernalización, con crecimiento inicial erecto que favorece la cosecha mecánica, con amacollamiento reducido y baja capacidad de recuperación después del corte siendo adecuados para un solo corte. Los tipos invernales son convenientes para cortes o pastoreos múltiples. Los tipos facultativos son de rápido crecimiento y diferenciación, presentan crecimiento inicial semipostrado, amacollamiento intermedio y buena capacidad de recuperación después del corte o pastoreo, por lo que son adecuados para dos cortes o pastoreos. Un cuarto tipo, intermedios- invernales, mencionado por Ye *et al.*, (2001), presentan crecimiento y diferenciación medios, semipostrados, con buen ahijamiento y alta capacidad de rebrote que permite dar cortes múltiples, sin ser tan tardíos como los tipos invernales (Lozano *et al.*, 2009; Royo *et al.*, 1995; Ye *et al.*, 2001). Estos últimos son excelentes en la producción de forraje para cortes o pastoreos múltiples debido a su capacidad de rebrote, alta calidad nutritiva, adecuado rendimiento de forraje seco y una mayor relación hoja-tallo, en comparación con los triticales facultativos, avena y trigo.

Efecto de la fertilización nitrogenada sobre los cultivos

La fertilización nitrogenada es uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de cereales. Se considera que el nitrógeno (N), es el principal factor limitante en la producción agrícola (Kichey *et al.*, 2007) y, al igual que en otros cereales, es también uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de triticale (*X Triticosecale* Wittmack). La disponibilidad de N para la planta es indispensable por ser un componente básico de todas las moléculas orgánicas involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal (Salas, 2003). Además, el N es un elemento indispensable para la fotosíntesis; para que las plantas fijen el carbono; para la acumulación de materia orgánica y la producción de rendimientos económicamente atractivos.

Newbould (1989), sostienen que la disponibilidad de N para los cultivos es en general deficiente, debido al manejo de suelos y a las pérdidas por lixiviación, por lo que es posible que su aplicación no sea totalmente aprovechada por el cultivo en los estados de mayor requerimiento de este nutriente. Ello ocasiona que para satisfacer la demanda de los cultivos, el N deba agregarse al suelo en grandes cantidades como abono orgánico o fertilizante nitrogenado. Esto resulta relevante considerando el impacto ambiental de la lixiviación de N, que constituye un grave problema en algunos países industrializados (Newbould, 1989), por lo que la implementación de tecnologías de manejo del cultivo que incrementen la eficiencia en el uso de insumos fertilizantes se vuelven esenciales (Parodi, 2003). Aunque la práctica más utilizada para la aplicación de N es mediante la fertilización en siembra, el empleo de dosis elevadas de N que permitan la expresión del potencial de rendimiento de las variedades existentes en el

mercado actual, requiere un manejo cuidadoso y eficiente de la parcialización del nutriente, esto con el fin de minimizar las pérdidas por lixiviación durante el desarrollo del cultivo, así como evitar la contaminación de capas freáticas y su efecto nocivo sobre la salud humana y la sostenibilidad ambiental (Campillo *et al.*, 2007). La importancia del momento de aplicación, además de la dosis de fertilizante empleado, puede también inducir un mejoramiento en la eficiencia de absorción, según investigaciones relacionadas con el cultivo de trigo (Campillo *et al.*, 2007) y cebada (Moreno *et al.*, 2003).

Las deficiencias de nitrógeno afectan marcadamente la tasa de expansión foliar, reduciendo el área foliar final de las hojas. El estrés nitrogenado produce una coloración verde claro a amarillenta en las hojas debido a la merma en el contenido de clorofila y su senescencia anticipada. Como consecuencia de la menor área foliar activa resultante se reduce la proporción de radiación incidente interceptada por el canopeo y, en consecuencia, la producción de biomasa (Newbould, 1989).

Acumulación de biomasa

La biomasa acumulada por las plantas es el producto final de la actividad fotosintética y es la reserva de nutrientes de la mayoría de las plantas. El crecimiento del cultivo resulta de la acumulación de biomasa vegetal. La acumulación de biomasa se debe, principalmente, al balance neto positivo del intercambio de carbono entre la planta y su ambiente, donde las pérdidas por respiración son sobrecompensadas a través del proceso de fotosíntesis. Por lo tanto, la acumulación de biomasa en el cultivo depende de la cantidad de

radiación solar disponible, de la capacidad del dosel para interceptarla y de la eficiencia con que el cultivo convierte la radiación capturada en biomasa vegetal. En cereales de grano pequeño, el rendimiento de grano está estrechamente relacionado con la producción de biomasa e índice de cosecha (Austin *et al.*, 1980). Comprender el proceso de la acumulación de biomasa durante la estación de crecimiento y la relación entre el rendimiento de grano y biomasa puede ayudar a alcanzar el más alto rendimiento a través de la nutrición y mejores prácticas agronómicas. Bajo condiciones de crecimiento óptimas, el rendimiento de grano normalmente se incrementa cuando se incrementa el total de materia seca y el consumo de nutrientes (Karlen y Camp, 1982).

Una tasa más alta de crecimiento resulta en un incremento final de biomasa, pero la tasa de crecimiento y fenología puede ser afectada por la sequía y el estrés dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo, de su duración e intensidad. Usualmente, el estrés de humedad combinado con altas temperaturas reduce la acumulación de materia seca (Shpiler y Blum, 1986). Generalmente, los cultivos siguen un patrón de acumulación de biomasa similar en varias etapas de crecimiento; un incremento en la biomasa en etapas tempranas alcanza la máxima producción en las etapas tardías de crecimiento. La biomasa y la absorción de nutrientes en todas las especies aumentan con el tiempo y alcanza su máximo en las últimas etapas de crecimiento (Malhi *et al.*, 2006).

Area foliar.

El aprovechamiento de la oferta de radiación por un cultivo en una localidad dada está condicionado por la oportunidad y duración de su ciclo, en

función de la fecha de siembra, el largo del ciclo del genotipo y los factores que controlan la duración de su ciclo. La biomasa total a cosecha de los cultivos resulta de la acumulación neta del CO₂ asimilado durante todo el ciclo de crecimiento. Cuanto mayor sea la duración del ciclo del cultivo, mayor será la cantidad de radiación incidente durante una determinada estación de crecimiento. Por otro lado, no toda la radiación incidente durante el período de crecimiento es aprovechada por el cultivo. En los primeros estadíos del ciclo el cultivo carece de la superficie foliar suficiente como para captar toda la luz incidente. A medida que despliega nuevas hojas, la proporción de radiación que es interceptada por el cultivo aumenta. La tasa de crecimiento del cultivo aumenta a medida que se incrementa la eficiencia de intercepción de radiación, alcanzándose los valores máximos cuando el porcentaje de intercepción se aproxima al 95%. Debido a que la asimilación del CO₂ resulta de la absorción de energía solar (radiación) y dado que ésta última está distribuida uniformemente sobre una superficie, los factores primarios que afectan la biomasa total son la radiación solar absorbida y la eficiencia de utilización de esa energía para la fijación del CO₂.

Área foliar e intercepción de la radiación solar

Para que un cultivo use eficientemente la radiación solar, gran parte de ésta debe ser absorbida por los tejidos fotosintéticos. Las hojas, principales órganos responsables de la fotosíntesis e intercepción de luz, se desarrollan en el embrión de las semillas y en los tejidos meristemáticos de los tallos. En los

cultivos anuales el área foliar inicial se desarrolla de la semilla y ésta al ser pequeña durante las etapas iniciales de crecimiento provoca que gran parte de la radiación solar sea absorbida por la superficie del suelo, produciendo calor sensible. Los cultivos eficientes tienden a invertir la mayor parte de su crecimiento temprano en expandir su área foliar, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de la radiación solar. Algunas prácticas agronómicas tales como fertilización de arranque, altas densidades de siembra y un mejor arreglo espacial de las plantas (por ejemplo hileras estrechas), son usadas para acelerar la cobertura del suelo e incrementar la intercepción de luz.

El desarrollo del área foliar de un cultivo anual de crecimiento determinado como en los cereales el crecimiento vegetativo se detiene a la floración. A medida que el área foliar se desarrolla, la radiación interceptada por las hojas se incrementa. Inicialmente el área foliar aumenta a una tasa exponencial, pero ésta al comienzo es pequeña y la radiación interceptada no es significativa por varias semanas. En floración el desarrollo del área foliar finaliza, siendo el objetivo de las prácticas culturales maximizar la fotosíntesis del cultivo interceptando prácticamente toda la radiación solar incidente. Esto es un patrón eficiente para cultivos de cereales, en donde la mayoría del peso de la semilla proviene de la fotosíntesis luego de la floración.

La producción total de materia seca es el resultado de la eficiencia con que el cultivo intercepta y utiliza la radiación solar disponible durante la estación de crecimiento. Los órganos principales de la planta encargados de interceptar la radiación solar son las hojas. Para alcanzar altas tasas de crecimiento del cultivo, en la cubierta vegetal o dosel debe haber suficiente hojas que intercepten gran

parte de la radiación solar incidente. Cuando esto ocurre, el nivel de eficiencia fotosintética del cultivo está determinado por la eficiencia fotosintética de las hojas. Esta eficiencia puede estar influida por la cantidad de radiación solar, capacidad de las hojas para fotosintetizar, el área foliar, y cómo el nivel de la radiación solar es distribuido en la superficie foliar y la magnitud de la respiración.

Los cultivos no mantienen un área foliar crítica durante toda la estación de crecimiento. Los cultivos anuales inician la acumulación de área foliar a partir de la emergencia, en la cual la intercepción de la radiación es casi cero, pero el área foliar se incrementa y eventualmente intercepta la mayoría de la radiación foliar. Después de que la cobertura total del suelo es alcanzada, la producción total de materia seca es función del tiempo que el cultivo pueda mantener activo su cobertura foliar o dosel. Una de las estrategias para maximizar la utilización de la radiación solar y el rendimiento incluyen la fertilización, principalmente la nitrogenada, para incrementar la tasa de crecimiento del cultivo y la eficiencia fotosintética, además de aumentar la duración del área foliar para lograr la máxima cantidad de radiación interceptada (Gardner et al. 1985).

Determinación del área foliar.

La determinación del área foliar es fundamental en estudios de nutrición y crecimiento vegetal, con ésta se puede determinar la acumulación de materia seca, el metabolismo de carbohidratos, el rendimiento y calidad de la cosecha (Bugarin et al., 2002). Es una medida necesaria para evaluar la intensidad de asimilación de las plantas, parámetro de gran relevancia cuando se efectúa el

análisis de crecimiento de un cultivo. El mismo autor menciona que para aplicar las técnicas de análisis de crecimiento en estudios con plantas se requiere como mínimo una medida de la cantidad de material vegetal presente (peso seco) y una medida del sistema asimilatorio (área foliar) de las plantas, y a partir de estas medidas se pueden calcular los diferentes parámetros de un análisis de crecimiento sencillo, ya que el empleo de modelos matemáticos para el cálculo del área foliar en plantas es de gran importancia en cuanto a la fisiología vegetal, ya que nos permite determinar la eficiencia fotosintética que la planta posee a través de su ciclo.

Herramientas utilizadas en estudios de acumulación de biomasa.

Reflectancia espectral

La determinación de ciertas características como la acumulación de biomasa, el desarrollo de la superficie foliar, etc., requieren medidas destructivas que precisan de más tiempo, lo que limita su utilización en programas de mejoramiento. Con el fin de evaluar estas características de forma rutinaria, en los últimos años se han desarrollado diferentes herramientas instrumentales que permiten realizar esta tarea de forma rápida y precisa, facilitando su uso entre los mejoradores. Así, en las últimas décadas se han desarrollado herramientas que permiten relacionar las respuestas fisiológicas de los cultivos en diferentes condiciones, con respecto a su adaptación al ambiente y con el rendimiento, tanto de biomasa como de grano, con el fin de utilizarlas como herramientas de selección en los programas de mejoramiento.

Uno de los más conocidos y versátiles es la reflectancia espectral, la cual se basa en el principio de absorción y reflexión de la luz por la cubierta vegetal o

dosel en las regiones correspondientes a la franja del espectro electromagnético visible (400-700 nm) e infrarrojo (700-1300 nm), (Peñuelas y Filella, 1988; Royo et al. 2005).

El principio del funcionamiento de estos sensores consiste en la emisión de haces de luz en las bandas roja e infrarroja del espectro electromagnético al follaje del cultivo. Se ha demostrado que la luz roja es absorbida y que la luz infrarroja es principalmente reflejada por la biomasa verde de las plantas, los datos de luz reflejada en estas dos longitudes de onda son utilizados para estimar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) (Verhulst y Govaerts, 2010).

La medición de la reflectancia de la luz por parte de la cubierta vegetal y el suelo puede proveer una estimación precisa no destructiva y rápida de la biomasa de la planta y el estado fisiológico de la misma (Aparicio et al 2000; Peñuelas y Filella, 1998). A partir de los valores de reflectancia obtenidos en ciertas longitudes de onda es posible calcular ciertos índices que están bien correlacionados con muchas características de interés en el mejoramiento de plantas. Estos índices son útiles en la identificación de genotipos que se mantiene en mejores condiciones fisiológicas a lo largo del ciclo y por lo tanto pueden producir un mayor rendimiento (Babar et al. 2006; Gutiérrez-Rodríguez et al. 2004).

La reflectancia espectral también se ha descrito como una herramienta útil para determinar la eficiencia fotosintética y estimar el contenido de clorofila (Babar et al. 2006), el estado hídrico de la cubierta vegetal (Wu et al. 2009), la respuesta a estreses ambientales (Reynolds et al. 2001), estimar la biomasa de

forma no destructiva (Aparicio et al. 2000), evaluar el contenido de nitrógeno del cultivo (Eitel et al. 2008) y el rendimiento de grano, tanto bajo riego como en temporal (Raun et al. 2001; Royo et al. 2005; Gutiérrez-Rodríguez et al. 2004; Babar et al. 2006; Prasad et al. 2007).

III. MATERIALES Y METODOS

Localización del sitio experimental

El presente estudio se realizó durante el ciclo otoño - invierno 2014-2015 en el Campo Agrícola Experimental de la UAAAN, en Navidad, N. L., ubicado entre las coordenadas 25° 04' Latitud Norte y 100° 56' Longitud Oeste del meridiano de Greenwich, con una altitud de 1,895 msnm.

Se establecieron tres experimentos para evaluar el comportamiento productivo de 12 genotipos de triticale bajo condiciones de riego normal (50 cm de lámina total); eliminando el riego en etapa vegetativa (final de amacollamiento, 40 cm de lámina total) y eliminando el riego a partir de la floración (40 cm de lámina total).

Desarrollo del Experimento

Material genético utilizado

En el Cuadro 1 se presenta la lista de los 12 genotipos utilizados en los experimentos, de los cuales 4 fueron líneas experimentales de triticale con hábito de crecimiento primaveral, 2 del tipo facultativo, 2 del tipo intermedio-invernal y 4 de hábito invernal, que fueron proporcionados por el Proyecto Triticale del Programa de Cereales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Cuadro 3.1. Lista de genotipos y sorteo utilizados en el experimento. Navidad, N.L. Ciclo 2014 – 2015.

Trat.	Descripción	R1	R2	R3	Hábito de crecimiento	Grupo
V1	AN-123	1	14	26	Primaveral	1
V2	AN-125	2	21	32	Primaveral	1
V3	AN-137	3	19	34	Primaveral	1
V4	ERONGA 83	4	17	29	Primaveral	1
V5	AN-105	5	24	36	Facultativo	2

V6	AN-38	6	13	31	Facultativo	2
V7	AN-66	7	18	25	Intermedio-invernal	3
V8	AN-184	8	22	33	Intermedio-invernal	3
V9	ABT	9	16	35	Invernal	4
V10	AN-31B	10	20	28	Invernal	4
V11	ANPELON	11	23	30	Invernal	4
V12	AN-34	12	15	27	Invernal	4

Preparación del terreno

Se realizaron las labores que tradicionalmente se utilizan para la siembra de cereales en la región, esto es, barbecho, rastreo y doble nivelación.

Fecha de siembra

La siembra se realizó en húmedo el 16 de Enero de 2015 durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015. Esta se realizó manualmente, a chorrillo, depositando la semilla en el fondo del surco y tapando posteriormente con el pie.

Tamaño de parcela experimental

Cada unidad experimental estuvo conformada por 10 surcos de 5 m de largo por 30 cm entre hileras (15.0 m²).

Fertilización

A la siembra, en los tres experimentos, en cada unidad experimental se aplicó a la mitad de la parcela (5 surcos) una dosis de fertilización de 80-00-00,

utilizando como fuente urea (46% N). A los cinco surcos restantes no se les aplicó fertilizante.

Riegos

A los tres experimentos se les aplicó el riego inmediatamente después de la siembra con un sistema de aspersión; posteriormente, en el caso del experimento con riego normal, se aplicaron 4 riegos adicionales en las etapas de amacollamiento, encañe, floración y llenado de grano, dando un total de 50 cm de lámina; al segundo juego se eliminó el riego en etapa vegetativa (final de amacollamiento, 40 cm de lámina total) y el tercero eliminando el riego a partir de la floración (40 cm de lámina total).

Control de plagas, enfermedades y malezas.

Debido a que no se presentó incidencia de plagas y enfermedades no se realizó control de ningún tipo; el control de malezas, como la incidencia no fue severa, se realizó manualmente.

Muestreos

Se realizaron 12 muestreos destructivos secuenciales de biomasa en cada unidad experimental, tanto en la subparcela fertilizada como en la no fertilizada: Las fechas de muestreo fueron las siguientes:

M1: 25/03/2015

M2: 03/04/2015

M3: 15/04/2015

M4: 24/04/2015

M5: 01/05/2015

M6: 08/05/2015

M7: 04/05/2015

M8: 21/05/2015

M9: 27/05/2015

M10: 03/06/2015

M11: 11/06/2015

M12: 17/03/2015

Los muestreos se realizaron manualmente, con rozadera, cortando el forraje en 50 cm lineales de un surco con competencia completa, aproximadamente a 2 cm sobre la superficie del suelo.

Diseño experimental utilizado en campo

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento en cada uno de los tres experimentos.

Variables registradas

➤ **Biomasa seca total (BIOT):** En cada uno de los muestreos, esta se determinó al sumar los pesos de hojas, tallos y en su caso, espigas de cada parcela; posteriormente se transformó a forraje seco total en $t\ ha^{-1}$.

➤ **Area foliar (AF):** Se determinó a partir de las muestras de biomasa colectadas en cada muestreo, a cada una de las cuales se les separaron las hojas y se midió su superficie en cm^2 en un integrador de área foliar marca LI-COR, modelo LI-3100.

➤ **Indice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI):** Previo a cada uno de los muestreos destructivos de biomasa, se realizaron mediciones de NDVI mediante el sensor óptico Greenseeker Hand Held (GreenSeeker®, NTech Industries Incorporation, Ukiah, CA, EUA), para obtener el NDVI de cada una de las unidades experimentales.

Análisis estadísticos

Se efectuaron análisis de varianza por muestreo para cada una de las características evaluadas en este estudio. En esta investigación, para cada variable se promediaron los datos de los tres regímenes de humedad, analizando sólo el efecto de las dosis de fertilización. Asimismo, los genotipos se incluyeron en grupos de acuerdo a su hábito de crecimiento (Cuadro 3.1), con el siguiente modelo:

Modelo estadístico de los análisis de varianza por muestreo para las variables en estudio.

$$Y_{ijk} = : \mu + R_i + r_j (R) + G_k + RiG_k + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable observada.

μ : = Efecto de la media general.

R_i = Efecto de la *i*-ésima fertilización

$r_j (R)$ = Efecto de la *j*-ésima repetición dentro de la *i*-ésima fertilización.

G_k = Efecto del *k*-ésimo grupo.

MiG_k = Efecto de la interacción del *k*-ésimo grupo en la *i*-ésima fertilización.

E_{ijk} = Error experimental.

Pruebas de comparación de medias

Se realizaron pruebas de comparación de medias para la variable estudiada, entre regímenes y grupos, utilizando la prueba de Tukey al nivel de probabilidad registrada en el correspondiente análisis de varianza.

Se calculó el coeficiente de variación para la variable estudiada, esto con la finalidad de verificar el grado de precisión con la que se realizó el experimento utilizando la siguiente fórmula:

$$C.V. = \sqrt{\frac{CMEE}{\bar{x}}} \times 100$$

Donde:

CMEE = Cuadrado medio del error experimental.

\bar{X} = Media general del carácter.

Los análisis de varianza y las pruebas de comparación de medias de las variables estudiadas se realizaron con el paquete estadístico SAS 8.1 (1999). Los análisis de regresión entre variables y las gráficas fueron realizadas con el paquete estadístico Statistica 6.1 (2001).

RESULTADOS

Resultados de los análisis de varianza por muestreo. Biomasa total.

Los análisis de varianza entre muestreos para la variable biomasa seca (BIOT), reportaron diferencias significativas en el primer muestreo (Cuadro 4.1); a partir del segundo muestreo reportaron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización en todos los muestreos; entre los grupos de triticale, no se reportaron diferencias estadísticas en el muestreo inicial y los últimos dos muestreos; sin embargo, se registraron diferencias altamente significativas a partir del tercer muestreo y significativas en el segundo muestreo. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 29.3% (muestreo 1) y 54.7 % (muestreo 5).

		BIOT											
FV	GL	CUADRADOS MEDIOS											
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
DF	1	0.511 *	7.734 **	22.022 **	72.641 **	66.282 **	331.778 **	284.104 **	410.909 **	561.443 **	682.616 **	726.221 **	726.221 **
REP (DF)	4	0.047 ns	0.136 ns	1.787 *	2.336 ns	2.630 ns	1.441 ns	3.938 ns	1.169 ns	1.948 ns	3.433 ns	1.835 ns	1.842 ns
GRUPO	3	0.064 ns	0.526 *	11.428 **	10.154 **	19.046 **	28.594 **	42.218 **	31.188 **	34.424 **	33.730 **	16.640 ns	16.640 ns
DF * GRUPO	3	0.060 ns	0.073 ns	1.023 ns	0.599 ns	1.063 ns	2.600 ns	2.619 ns	1.500 ns	2.632 ns	1.683 ns	15.248 ns	15.248 ns
ERROR	204		0.155	0.721	1.494	3.166	3.667	3.353	4.482	5.665	6.671	7.354	7.354
TOTAL	215												
MEDIA GENERAL		0.947	1.270	2.374	2.982	3.251	5.307	5.798	6.465	7.026	7.762	8.508	8.508
CV %		29.3	31.0	35.7	40.9	54.7	36.0	31.5	32.7	33.8	33.2	31.8	31.8

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro 4.1. Resultados de los análisis de varianza por muestreo para BIOT.

Resultados de los análisis de varianza por muestreo. Area foliar.

Como se observa en el (Cuadro 4.2), los resultados del análisis de varianza entre muestreos para la variable área foliar (AF), reportaron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización en todos los muestreos; entre los grupos de triticale se reportaron diferencias estadísticas altamente significativas en cada uno de los muestreos. Los coeficientes de variación oscilaron entre 20.9% (muestreo 5) y 71.9% (muestreo 12). Los fertilizantes nitrogenados juegan un papel muy importante en la producción de área foliar en las variedades de triticale, aumentando el desarrollo del cultivo en comparación con los no fertilizados .

		AF											
FV	GL	CUADRADOS MEDIOS											
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
DF	1	154295.8 **	309652.8 **	686232.9 g**	930282.8 g**	589271.3 **	435057.6 **	348894.1 **	218767.5 **	142161.7 **	67805.3 **	27896.5 **	7909.6 **
REP (DF)	4	606.8 ns	1965.0 ns	1103.5 ns	1607.9 ns	698.6 ns	663.1 ns	1110.6 ns	947.5 ns	37.5 ns	302.7 ns	350.6 ns	79.2 ns
GRUPO	3	4442.1 **	4842.7 **	14987.6 **	93760.2 **	73768.0 **	59477.6 **	35607.2 **	25864.2 **	20752.7 **	17570.0 **	10063.2 **	3335.1 **
DF + GRUPO	3	1464.1 ns	913.6 ns	1296.8 ns	15948.7 **	9215.6 *	10411.8 **	9461.3 **	5223.4 **	3672.8 **	4300.7 **	2391.2 **	714.8 **
ERROR	204	867.8	1218.8	1698.6	1728.6	3.166	1615.2	1404.5	1305.2	497.432	627.9	431.8	125.1
TOTAL	215												
MEDIA		119.4	153.5	187.1	198.2	169.9	146.8	116.5	94.8	76.508	50.7	31.1	15.5
CV %		24.6	22.7	22.0	20.9	28.9	27.3	32.1	38.0	29.1	49.3	66.5	71.8

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad

Cuadro 4.2. Resultados de los análisis de varianza por muestreo para AF.

Resultados de los análisis de varianza por muestreo. NDVI.

Para la variable NDVI, los análisis de varianza entre muestreos (Cuadro 4.3), y reflejaron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización en cada uno de los muestreos; entre los grupos de triticale, los dos muestreos iniciales no presentaron diferencias estadísticas significativas, sin embargo, a partir del tercer muestreo se reflejaron diferencias altamente significativas. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 8.3% (muestreo 3) y 25.3% (muestreo 12).

		NDVI											
FV	GL	CUADRADOS MEDIOS											
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
DF	1	1.304 **	1.710 **	2.690 **	1.408 **	0.990 **	0.668 **	0.550 **	0.468 **	0.342 **	0.183 **	0.027 **	0.026 **
REP (DF)	4	.004 ns	0.001 ns	.0002 ns	0.001 ns	0.003 ns	0.002 ns	0.004 ns	0.001 ns	0.002 ns	0.003 ns	0.006 *	0.005 *
GRUPO	3	.0019 ns	.0005 ns	0.021 **	0.018 **	0.012 **	0.013 **	0.021 **	0.023 **	0.038 **	0.113 **	0.319 **	0.419 **
DF * GRUPO	3	0.00081 ns	.0004 ns	.002 ns	0.002 ns	0.003 ns	0.002 ns	0.005 ns	0.004 ns	0.002 ns	0.005 ns	0.002 ns	0.003 ns
ERROR	204	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001
TOTAL	215												
X GENERAL		0.44	0.503	0.559	0.471	0.432	0.399	0.377	0.355	0.310	0.257	0.196	0.161
CV %		12.6	9.9	8.3	11.2	12.2	13.6	14.7	15.2	18.1	20.5	22.8	25.3

ns: no significativo; * significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro 4.3. Resultados de los análisis de varianza por muestreo para NDVI.

Como se observó en el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización (Cuadros 4.1 y 4.4), la aplicación de fertilizante nitrogenado tuvo un efecto positivo y altamente significativo sobre la producción de biomasa seca desde las etapas tempranas del desarrollo de las variedades de triticale. En el muestreo inicial, la fertilización nitrogenada aumentó la biomasa seca en 13 % (promedio de todas las variedades) en comparación con los tratamientos no fertilizados. A partir del segundo muestreo hasta el final del ciclo, el efecto de la fertilización sobre la acumulación de biomasa fue de mayor magnitud (34-63 %), dependiendo de la fecha de muestreo.

DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
DF1	1.008 a	1.477 a	2.723 a	3.603 a	3.815 a	6.591 a	6.995 a	7.928 a	8.711 a	9.603 a	10.466 a	10.466 a
DF2	0.886 b	1.063 b	2.026 b	2.361 b	2.688 b	4.022 b	4.641 b	5.001 b	5.342 b	5.921 b	6.551 b	6.551 b
DMS	0.082	0.139	0.505	0.577	0.612	0.453	0.749	0.408	0.527	0.700	0.511	0.512

Cuadro 4.4. Resultados de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para biomasa.

DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
DF1	148.6 a	193.7 a	246.1 a	266.9 a	225.6 a	193.9 a	157.9 a	127.3 a	102.1 a	67.3 a	41.5 a	20.9 a
DF2	90.2 b	113.4 b	128.1 b	129.6 b	114.2 b	99.7 b	75.1 b	62.4 b	50.9 b	34.2 b	20.8 b	10.2 b
DMS	9.3	16.7	12.5	15.1	9.9	9.7	12.5	11.6	12.3	6.5	7.0	3.3

Cuadro 4.5. Resultados de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para área foliar.

DF	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

DF1	0.531 a	0.597 a	0.676 a	0.557 a	0.505 a	0.459 a	0.431 a	0.405 a	0.353 a	0.287 a	0.210 a	0.173 a
DF2	0.367 b	0.409 b	0.441 b	0.384 b	0.360 b	0.339 b	0.323 b	0.305 b	0.267 b	0.226 b	0.183 b	0.148 b
DMS	0.026	0.016	0.006	0.012	0.021	0.017	0.026	0.013	0.018	0.022	0.030	0.028

Cuadro 4.6. Resultados de la prueba de comparación de medias entre dosis de fertilización para la variable NDVI.

Los resultados de la prueba de comparación de medias entre grupos para la variable biomasa seca (Cuadro 4.7), mostró que en los dos muestreos iniciales y los muestreos finales, no hubo diferencias significativas entre los grupos para la acumulación de biomasa; sin embargo, a partir del tercer muestreo se registraron diferencias significativas entre los mismos. En el cuarto y quinto muestreo se registraron diferencias altamente significativas para las variedades de habito primaveral en comparación con las variedades de habito invernal; en el muestreo siete no hubo diferencias entre las variedades de habito primaveral y facultativo. La variedad de hábito invernal registró estadísticamente la menor acumulación de biomasa. Con respecto a los resultados de la comparación de medias para área foliar (Cuadro 4.5), la dosis de fertilización nitrogenada reportó diferencias altamente significativas en comparación con los tratamientos no fertilizados; sin embargo, a partir del cuarto muestreo las lecturas empezaron a disminuir consistentemente en ambas dosis de fertilización, aunque siempre de mayor magnitud en el experimento con fertilización.

Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

1	0.985 a	1.389 a	2.883 a	3.437 a	3.837 a	6.047 a	6.628 a	7.161 a	7.594 a	8.365 a	8.365 a	8.365 a
2	0.915 a	1.219 a	2.483 a	3.106 ab	3.498 ab	5.081 ab	5.953 a	6.700 ab	7.435 a	7.956 ab	9.175 a	9.175 a
3	0.954 a	1.241 a	1.966 b	2.837 ab	3.117 ab	5.575 a	6.015 a	6.599 ab	7.430 a	8.260 a	9.136 a	9.136 a
4	0.921 a	1.192 a	2.016 b	2.538 b	2.610 b	4.544 b	4.781 b	5.583 b	6.053 b	6.814 b	8.005 a	8.005 a
DMS	0.147a	0.208	0.449	0.646	0.941	1.012	0.968	1.119	1.258	1.365	1.433	1.434

Cuadro 4.7. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos para biomasa seca.

Los resultados de la prueba de comparación de medias para la variable área foliar (Cuadro 4.8); muestran que en el primer muestreo se reportaron diferencias altamente significativas entre el grupo de triticales de hábito primaveral y el grupo de hábito tardío, con mayor área foliar para el primer grupo; entre los grupos de crecimiento facultativo e intermedio-invernal no hubo diferencias significativas. En el muestreo dos se reportó que no hubo diferencias significativas entre los grupos más precoces (G1 y G), sin embargo, entre el grupo de triticales de hábito intermedio invernal y el invernal se registraron diferencias altamente significativas. En el tercer muestreo la diferencia entre grupos fue altamente significativa; las mayores lecturas fueron para los grupos de hábito facultativo. En los muestreos siguientes se observó que los mayores valores de área foliar fueron registrados por las variedades de hábito intermedios invernales.

Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1	129.1 a	157.8 ab	175.4 c	151.1 c	130.5 b	109.1 c	86.3 c	69.3 c	53.2 c	30.0 c	15.0 b	7.5 c

2	118.7 ab	155.6 ab	212.9 a	193.4 b	156.4 b	142.7 b	120.7 b	98.0 b	84.4 b	64.8 ab	44.5 a	26.0 a
3	119.6 ab	163.8 a	200.6 ab	224.5 a	195.9 a	172.4 a	142.4 a	118.3 a	96.9 a	70.1 a	41.0 a	21.7 a
4	109.9 b	142.7 b	179.1 bc	234.7 a	203.0 a	173.6 a	131.6 ab	107.0 ab	85.3 ab	54.8 b	35.6 a	15.2 b
DMS	15.5	18.4	21.7	21.9	26.0	21.2	19.8	19.1	11.7	13.2	10.9	5.9

Cuadro 4.8. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos para área foliar.

Para los valores de NDVI (Cuadro 4.9), no hubo diferencias significativas entre los grupos en los dos muestreos iniciales para esta variable, sin embargo, en el muestreo tres se reportaron diferencias altamente significativas entre los grupos de triticale de hábito más precoz en comparación con los tipos más tardíos; entre los grupos de triticale de hábito intermedio invernal e invernal no hubo diferencias significativas en las lecturas realizadas. En el cuarto muestreo las mayores lecturas se registraron en los grupos de variedades de hábito precoz, seguido de las variedades de hábito invernal. En los muestreos finales se reportaron lecturas altamente significativas entre los grupos de triticale, las mayores lecturas se registraron en el grupo de hábito invernal, seguido del grupo de hábito intermedio invernal.

Grupo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1	0.449 a	0.500 a	0.547 b	0.460 bc	0.418 b	0.383 b	0.356 b	0.333 b	0.279 b	0.203 c	0.104 c	0.055 c

2	0.456 a	0.503 a	0.596 a	0.495 a	0.455 a	0.418 a	0.399 a	0.374 a	0.325 a	0.268 b	0.223 b	0.188 b
3	0.455 a	0.509 a	0.561 b	0.448 c	0.426 b	0.390 ab	0.370 ab	0.349 ab	0.310 a	0.275 ab	0.232 b	0.205 b
4	0.442 a	0.503 a	0.551 b	0.480 ab	0.438 ab	0.408 ab	0.391 a	0.371 a	0.333 a	0.296 a	0.258 a	0.231 a
DMS	0.030	0.026	0.024	0.028	0.028	0.028	0.029	0.028	0.029	0.028	0.023	0.021

Cuadro 4.9. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos para área NDVI.

DISCUSIÓN

Independientemente de que en este estudio sólo se analizaron los efectos de la aplicación de fertilizante nitrogenado sobre los grupos de genotipos en cada fecha de muestreo, excluyendo el efecto de los regímenes de humedad, existieron diferencias importantes en el contenido de humedad del suelo, particularmente en el régimen de humedad 3 (castigo a partir de la floración), donde el contenido de humedad fue el menor a lo largo del ciclo, disminuyendo drásticamente a partir de la floración (Figura 4.1).

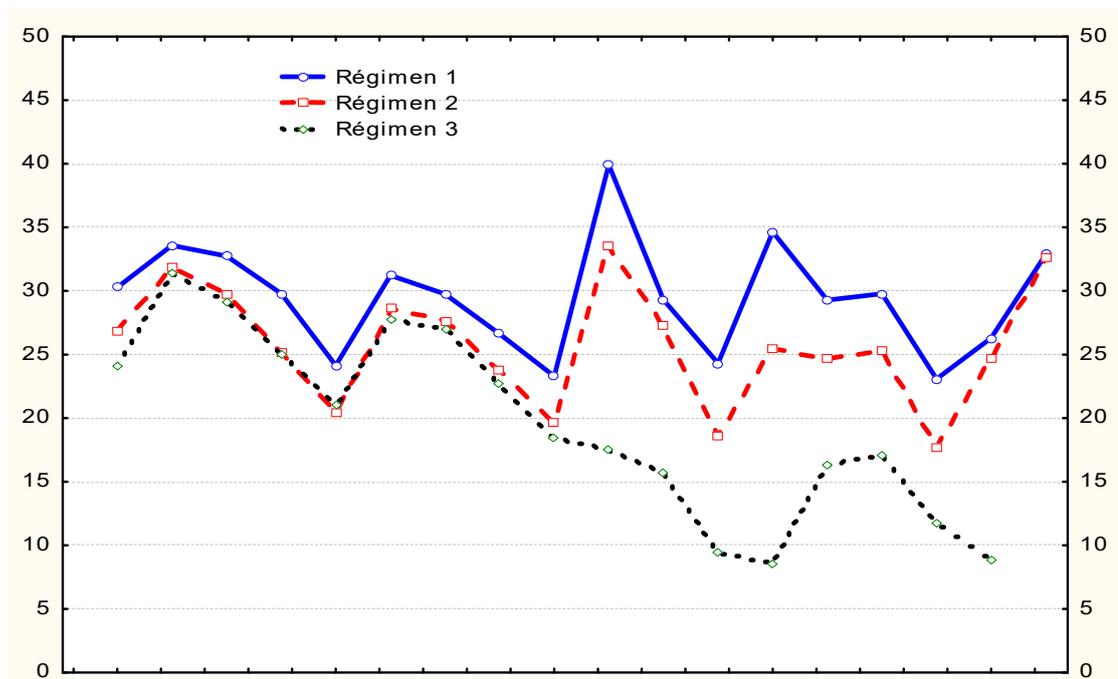


Figura 4.1. Contenido de humedad del suelo (%) en los diferentes regímenes de humedad a través del ciclo de cultivo. Navidad, N.L. Ciclo 2014-2015.

De manera general, los resultados de los análisis de varianza para producción de biomasa (BIOT), registraron diferencias altamente significativas entre las dosis de fertilización en todos los muestreos, ya que como señalan diversos autores, la fertilización nitrogenada es uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de cereales, debido

a que la disponibilidad de nitrógeno es indispensable para la planta por ser un componente básico de todas las moléculas orgánicas involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal y muy importante (Salas, 2003). Asimismo, (Kichey *et al.*, 2007) consideran que el nitrógeno es el principal factor limitante en la producción agrícola (Kichey *et al.*, 2007) y al igual que en otros cereales, es también uno de los factores de impacto más importantes en el crecimiento y desarrollo de triticale. Además, el nitrógeno es un elemento indispensable para la fotosíntesis; para que las plantas fijen el carbono y la producción de rendimientos económicamente atractivos.

Newbould (1989), Parodi (2003) y Campillo *et al.*, (2007), señalan que deben implementarse tecnologías de manejo del cultivo que incrementen la eficiencia en el uso de los insumos fertilizantes. Con respecto a la disminución del área foliar y la producción de biomasa observada a través de los muestreos en los tratamientos sin fertilización, las deficiencias de nitrógeno afectaron marcadamente la tasa de expansión foliar, reduciendo el área foliar final de las hojas. El estrés nitrogenado produjo también una coloración verde claro a amarillenta en las hojas debido a la merma en el contenido de clorofila y su senescencia anticipada. Como consecuencia de la menor área foliar activa resultante se redujo la proporción de radiación incidente interceptada por el dosel de las plantas y en consecuencia, la producción de biomasa, concordando con lo reportado por (Newbould, 1989).

En este estudio, se encontró que la variación en las curvas de acumulación de biomasa y área foliar crecimiento (Figuras 4.1 y 4.2) debida a las diferencias genotípicas entre los grupos fue menor que la variación ambiental causada por

los efectos de la fertilización, corroborado por la magnitud de los cuadrados medios de estos factores en los análisis de varianza (Cuadro 4.1 y 4.2); así, las deficiencias de nitrógeno afectan marcadamente la tasa de expansión foliar, reduciendo el área foliar final de las hojas, y como consecuencia de la menor área foliar activa resultante, se reduce la proporción de radiación incidente interceptada por el dosel de la planta y en consecuencia, la producción de biomasa (Newbould, 1989).

Por otra parte, la longitud del ciclo de crecimiento fue mayor en los tipos invernales en comparación con los primaverales, concordando con lo mencionado por Ramos et al. (1985), que señala que la acumulación de material seco depende fuertemente de factores tales como la disponibilidad de agua, temperatura y radiación. La variabilidad mostrada por los diferentes grupos en la acumulación de biomasa fue debida a la variabilidad en la longitud del ciclo desde la siembra hasta la máxima acumulación del peso seco de las plantas. Asimismo, la diferencia entre genotipos con respecto al área foliar durante las etapas fenológicas fue debida a los diferentes tipos de hábito de crecimiento en cuanto a la duración y cantidad de biomasa verde, concordando con lo mencionado por Lozano (2002) con respecto a las diferencias entre hábitos de crecimiento de los distintos tipos de triticales, así como de las características estructurales de las hojas (Casadesús y Villegas. 2014). En general, e independientemente de su hábito de crecimiento, la biomasa y la absorción de nutrientes en todos los grupos de genotipos aumentaron con el tiempo y alcanzaron su máximo en las últimas etapas de crecimiento, concordando con lo reportado por (Malhi *et al.*, 2006). Con respecto a los patrones observados de acumulación de área foliar por los

diferentes grupos en este estudio, estos concuerdan con lo reportado por Aparicio et al. (2002), que mencionan que el desarrollo del área foliar de un cultivo anual de crecimiento determinado como el triticale, el crecimiento vegetativo se detiene a la floración. A medida que el área foliar se desarrolla, la radiación interceptada por las hojas se incrementa. Inicialmente el área foliar aumenta a una tasa exponencial, pero ésta al comienzo es pequeña y la radiación interceptada no es significativa por varias semanas. En floración el desarrollo del área foliar finaliza, como se observó en este estudio (Figura 4.2).

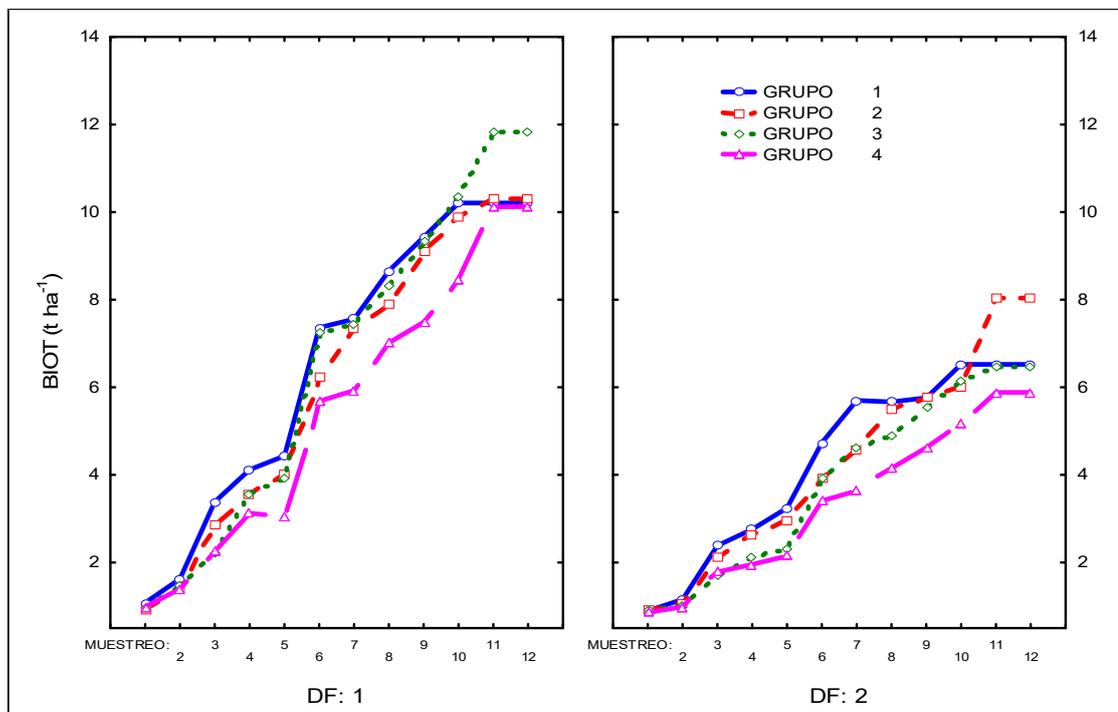


Figura 4.2. Patrones de producción de biomasa de los diferentes grupos de triticales bajo las dosis de fertilización evaluadas.

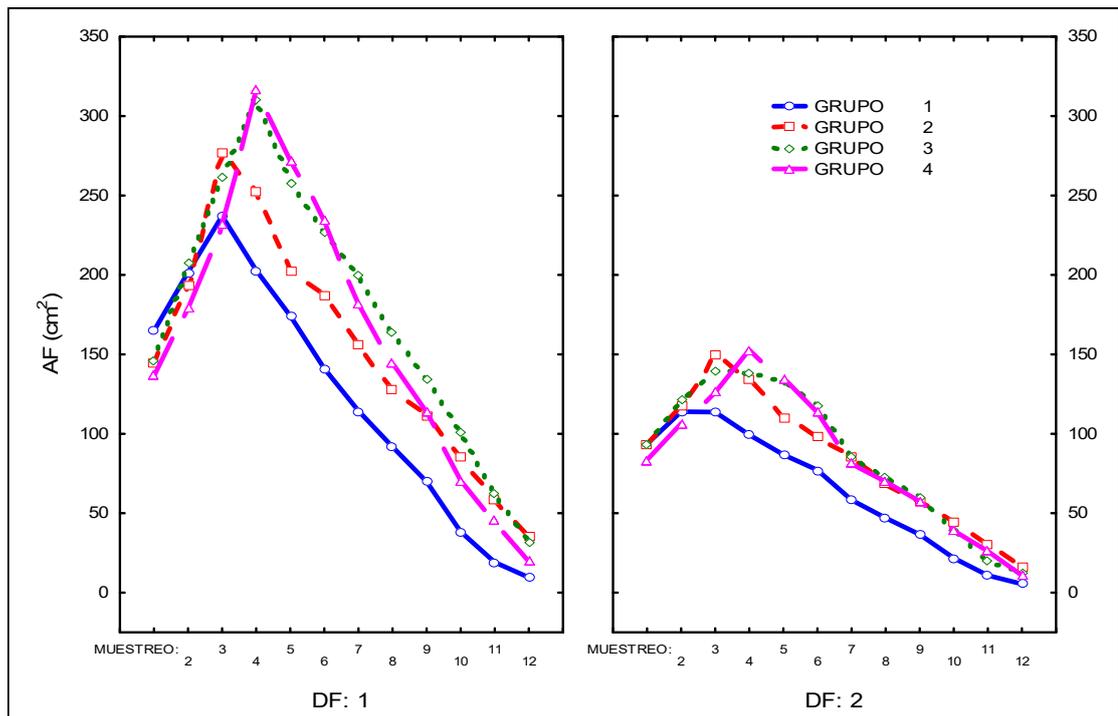


Figura 4.3. Patrones de acumulación de área foliar de los diferentes grupos de triticales bajo las dosis de fertilización evaluadas.

Con respecto al patrón encontrado en este estudio con respecto al NDVI (Figura 4.3), Aparicio et al (2000) y Peñuelas y Filella, (1998), mencionan que la medición de la reflectancia de la luz por parte de la cubierta vegetal y el suelo puede proveer una estimación precisa no destructiva y rápida de la biomasa de la planta y el estado fisiológico de la misma. A partir de los valores de reflectancia obtenidos en ciertas longitudes de onda es posible calcular ciertos índices que están bien correlacionados con muchas características de interés en el mejoramiento de plantas. Estos índices son útiles en la identificación de genotipos que se mantienen en mejores condiciones fisiológicas a lo largo del ciclo y por lo tanto pueden producir un mayor rendimiento (Babar et al. 2006; Gutiérrez-Rodríguez et al. 2004). En este estudio, al analizar la relación entre el

área foliar y el NDVI con la producción de biomasa a través de todo el ciclo, se encontró una correlación negativa entre estas variables (Figuras 4.4 y 4.5); por lo tanto, bajo las condiciones de este estudio, no se considera práctico utilizar estos parámetros, particularmente el NDVI, para predecir o estimar la producción de biomasa sin realizar muestreos destructivos, independientemente de la alta correlación existente entre el AF y el NDVI (Figura 4.6); sin embargo, al analizar la correlación existente entre las variables antes mencionadas sólo durante la fase vegetativa de los diferentes grupos de triticales, se registraron relaciones positivas y significativas entre el AF y NDVI con la biomasa, aunque no de gran magnitud (Figuras 4.7, 4.8 y 4.9), lo que las convierte en herramientas útiles para la estimación de la producción de biomasa durante la fase vegetativa en la selección de materiales forrajeros de triticale.

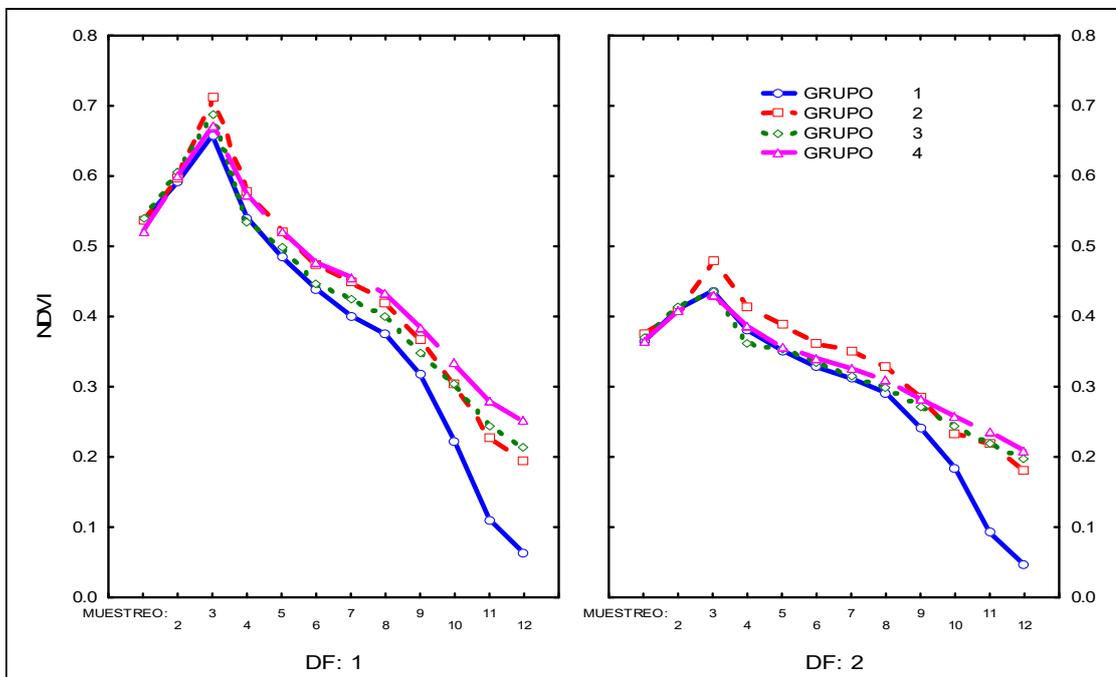


Figura 4.4. Tendencias encontradas en los diferentes grupos de triticales para valores de NDVI bajo las dosis de fertilización evaluadas.

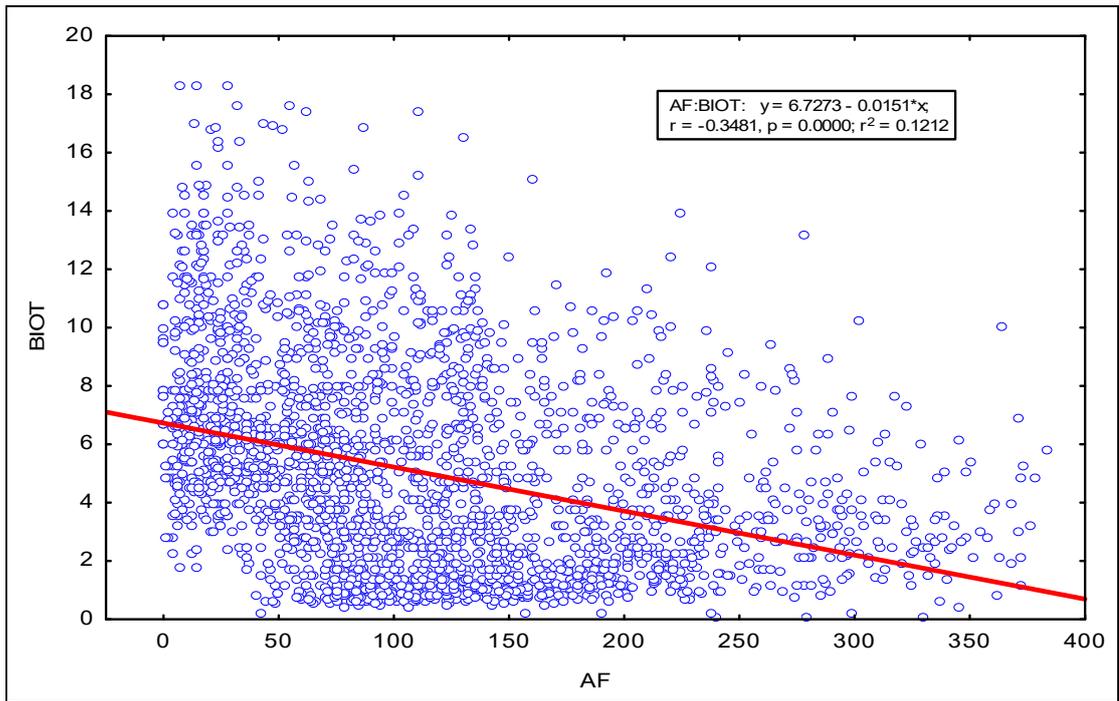


Figura 4.5. Relación entre área foliar y la biomasa a través del ciclo de cultivo.

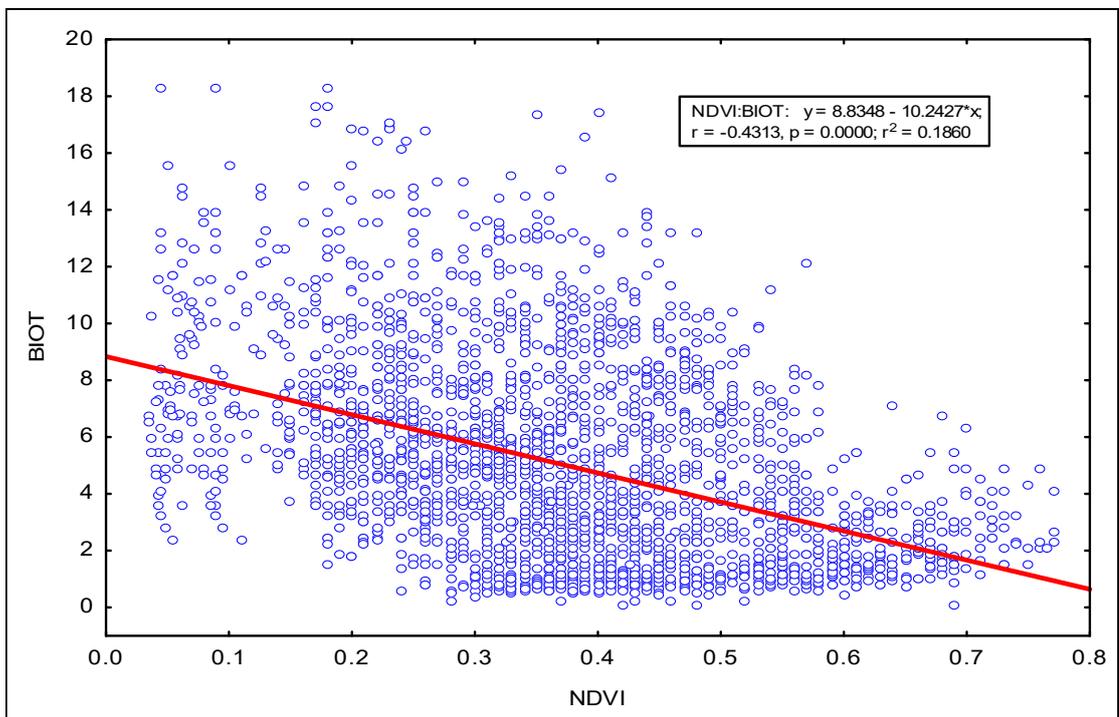


Figura 4.6. Relación entre el NDVI y la biomasa a través del ciclo de cultivo.

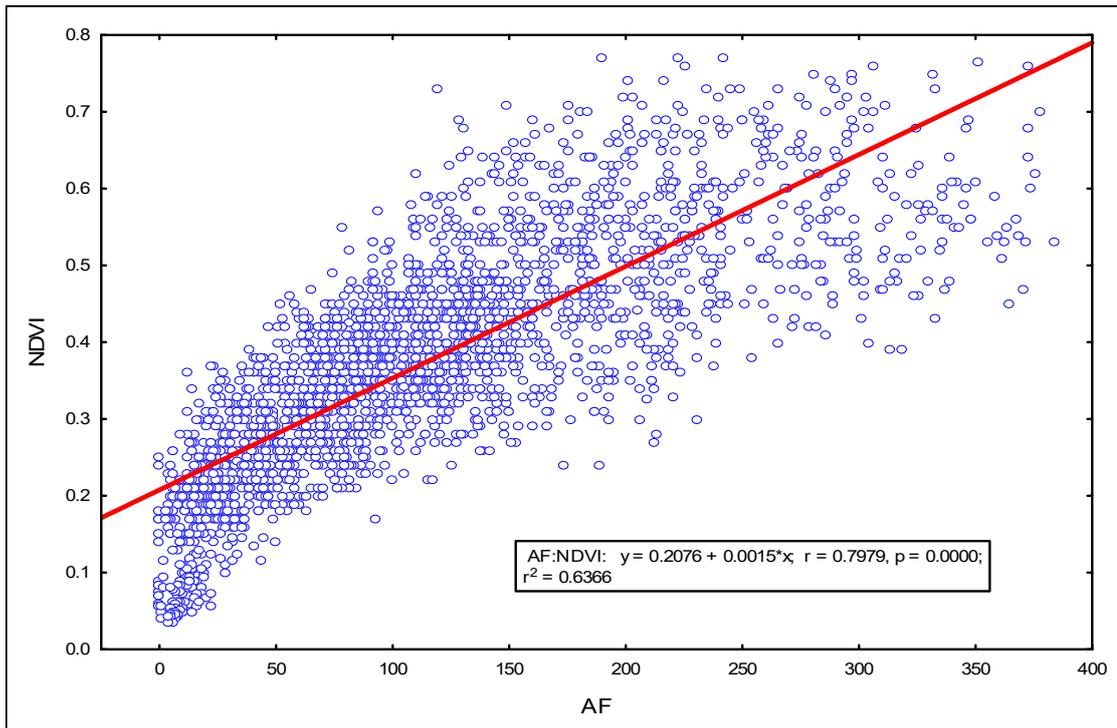


Figura 4.7. Relación entre el área foliar y el NDVI a través del ciclo de cultivo.

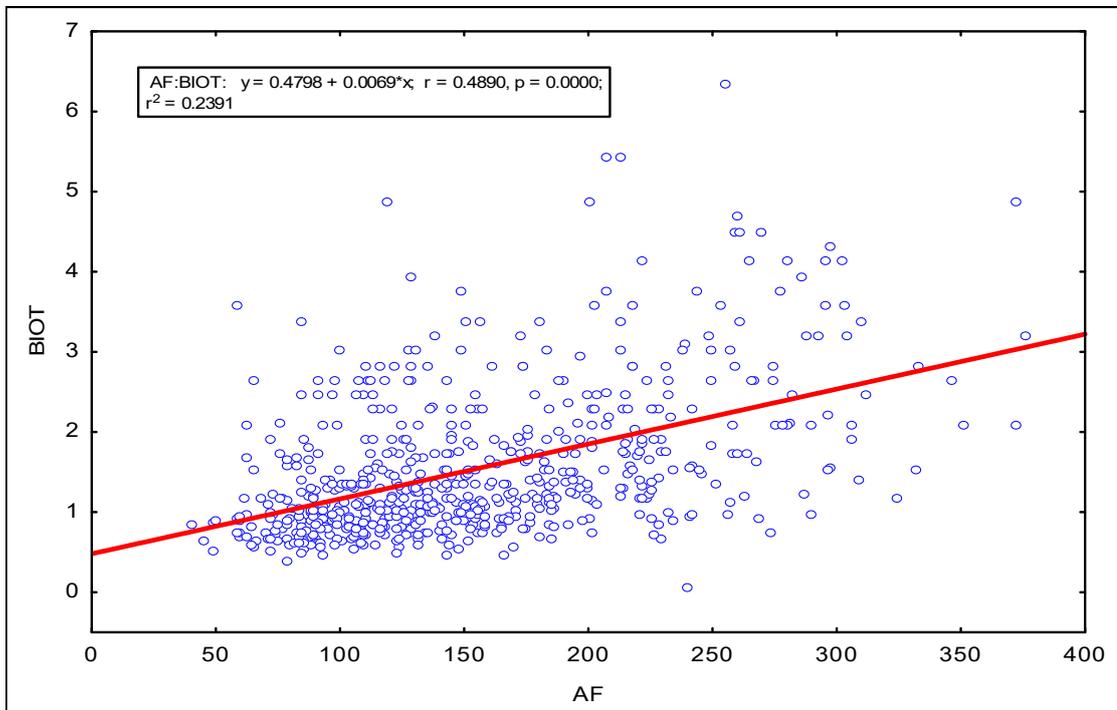


Figura 4.8. Relación entre el área foliar y la biomasa durante la etapa vegetativa del cultivo.

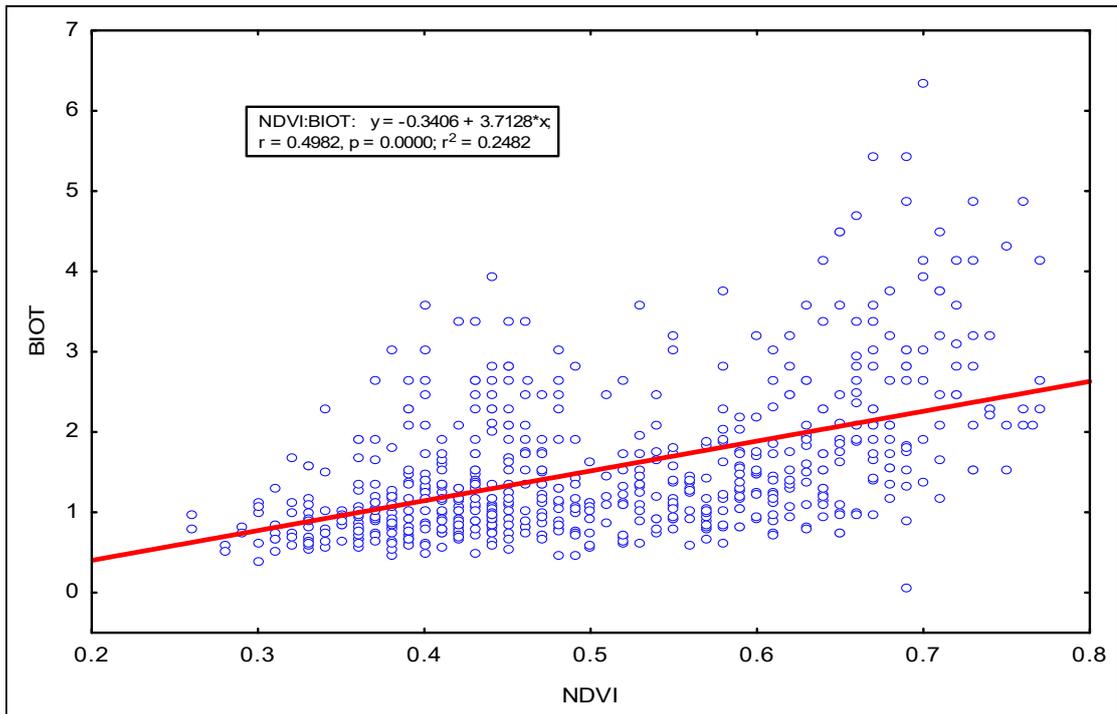


Figura 4.9. Relación entre el NDVI y la biomasa durante la etapa vegetativa del cultivo.

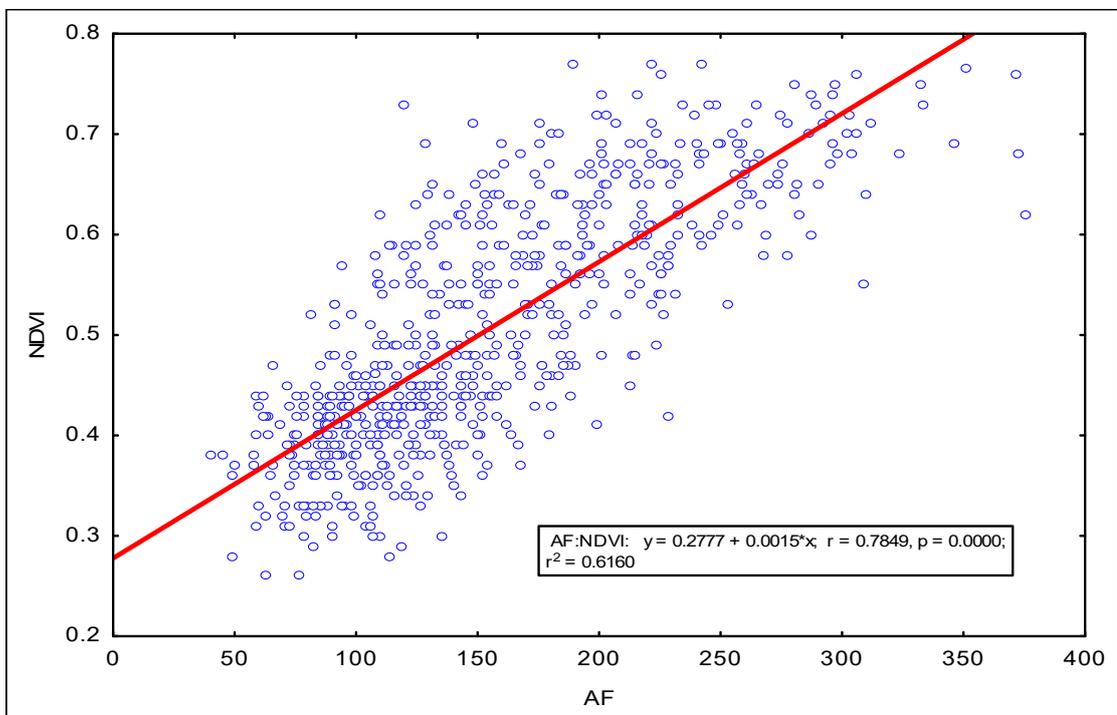


Figura 4.10. Relación entre el NDVI y la biomasa durante la etapa vegetativa del cultivo.

CONCLUSIONES

De acuerdo a las condiciones bajo las cuales se realizó la presente investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- La fertilización nitrogenada promovió una mayor acumulación de biomasa y/o área foliar a través del ciclo, independientemente del hábito de crecimiento de los genotipos.
- Los triticales de hábito primaveral y facultativo registraron los mayores rendimientos de biomasa total durante la primera fase del ciclo de cultivo, debido a su precocidad, por lo que resultan los tipos más adecuados cuando el objetivo es la mayor acumulación de biomasa en el menor tiempo posible para tipos de explotación como henificado y ensilaje.
- Los triticales de hábito facultativo e intermedio-invernal registraron la mayor área foliar a través del ciclo, debido a su mayor relación hoja-tallo, aspecto importante ligado a la calidad de los forrajes.
- En este estudio, la utilización del NDVI como predictor o estimador de la biomasa sólo fue útil durante la fase vegetativa de los diferentes grupos de triticales.
- El comportamiento productivo de los diferentes tipos de triticales registró una considerable disminución de la biomasa bajo cero fertilización, por lo que es recomendable aplicar dosis moderadas de fertilizante nitrogenado.

LITERATURA CITADA

- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesús, J., Araus, J. L., Royo, C., (2002). Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Sci* 42: 1547-1555.
- Austin, R.B., Bingham, J., Blackwell, R.D., Evans, L.T., Ford, M.A., Morgan, C.L. and Taylor, M. 1980. Genetic improvements in winter wheat yield since 1890 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.* 94:675-689.
- Babar, M. A., Reynolds, M. P., Ginkel, M. van, Klatt, A. R., Raun, W. R., Stone, M. L. (2006). Spectral reflectance to estimate genetic variation for in-season biomass, leaf chlorophyll, and canopy temperature in wheat. *Crop Sci* 46: 1046-1057.
- Bugarín, M. R.; Spínola, A. G.; García, P. S.; Paredes, D. G. 2002. Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra* 20: 401-409.
- Campillo, R. R.; Jobet, F. C. y Undurraga, D. P. 2007. Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en andisoles de la región de la Araucanía, Chile. *Chile. Agric. Téc.* 67(3):281-291.
- Casadesús J., D. Villegas. 2014. Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *J Integr Plant Biol. Res.* 56:7–14. Doi: 10.1111/jipb.12117
- Collar, C., and Aksland, G. 2001. Harvest effects on yield and quality of winter forage. *Proc. 31st California Alfalfa and Forage Symposium.* Ca. U.C. Cooperative Extensión. University of California, Davis. Calif: 133-142.

- Eitel, J. U. H., Long, D. S., Gessler, P. E., Hunt, E. R. (2008). Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. *Agron J* 100: 1694-1702.
- Gardner, F.P.; Brent Pearce, R; Mitchel, R.L. (1985) Carbon fixation by crop canopies. In: *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. pp. 31-57.
- Gutiérrez-Rodríguez, M., Reynolds, M. P., Escalante-Estrada, J. A., Rodríguez-González, M. T. (2004). Association between canopy reflectance indices and yield and physiological traits in bread wheat under drought and well-irrigated conditions. *Aust J Agr Res* 55: 1139-1147.
- Karlen, D.L. and Camp, C.R. 1982. N, P and K accumulation by high-yielding irrigated maize grown on a typical Paleudult in the Southeastern U.S. Ed. Proc. 9th Intl, Plant Nutr. Colloq. Vol. 1. Warwick University, UK.Pp. 262-267
- Kichey, T.; Hirel, B.; Heumez, E.; Dubois, F. and Le Gouis, J. 2007. In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Res.* 102:22-32.
- Lozano del Río, A, J. 2002. Triticales forrajeros para la Región Lagunera. *Revista Agropecuaria Laguna.* 29(6):4-5.
- Lozano-del Río, A. J., Zamora-Villa, V. M., Ibarra-Jiménez, L., Rodríguez-Herrera. S. A., de la Cruz-Lázaro, E., y de la Rosa-Ibarra, M. 2009. Análisis de la interacción genotipo-ambiente mediante el modelo AMMI y potencial de producción de triticales forrajeros (*X Triticosecale wittm.*). *Universidad y Ciencia.* 25(31):81-92.

- Malhi, S.S., Johnston, A.M., Schoenau, J.J., Wang, Z.H., and Vera, C.L. 2006. Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley and oat on a Blanck Chernozem soil in Saskatchewan. *Can. J. Plant Sci.* 86:1005-1014.
- Moore, E. L. 2005. Alternative forage crops when irrigation water is limited. Drought Management Factsheet. British Columbia, Canadá. 6:1-6.
- Moreno, A., Moreno, M. M.; Ribas, F. and Cabello, M. J. 2003. Influence of nitrogen fertilizer on grain yield of barley (*Hordeum vulgare* L.) under irrigated conditions. *Spanish J. Agric. Res.* 1:91-100.
- National Research Council. 1998. Triticale: A promising addition to the world's cereal grains. National Academy Press, Washington, D.C. 105 pp.
- Newbould, P. 1989. The use of nitrogen fertilizer in agriculture. Where do we go practically an ecologically? *Ecology of arable land* (Eds.). Clarholm, M. and Bergström, L. Kluwer, Dordrecht. 281-295 pp.
- Ozkan, H., Genv, T., Yagnasanlar, T., and Toklu, F. 1999. Stress tolerance in hexaploid spring triticales under Mediterranean environment. *Plant Breeding.* 118:365-367.
- Parodi, P. 2003. Mayor eficiencia en el uso del nitrógeno puede aumentar la rentabilidad del trigo y hacerlo más amigable hacia el ambiente. *In*: Kohli, M. M.; Díaz, M. y Castro, M. (Eds.). *In*: Seminario Internacional Estrategias y Metodologías Utilizadas en el Mejoramiento de Trigo, La Estanzuela, Uruguay. 8-11 de octubre de 2001. CIMMYT-INIA, Colonia, Uruguay. 275-283 pp.

- Peñuelas, J, Filella, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends Plant Sci* 3(4): 151-156.
- Poysa, V.W. 1985. Effect of forage harvest on grain yield and agronomic performance of winter triticale, wheat and rye. *Can. J. Plant Sci.* 65:879-888.
- Prasad, B., Carver, B. F., Stone, M. L., Babar, M. A., Raun, W. R., Klatt, A. R. (2007b). Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under great plains conditions. *Crop Sci* 47: 1426-1440.
- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., Schepers, J. S. (2001). In-Season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron J.* 93: 131-138.
- Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio, J. I., McNab, A. (eds.). (2001). Application of physiology in wheat breeding. Mexico, D.F.: CIMMYT. ISBN: 9706480773, 240 pp.
- Royo, C. and Parés, D. 1995. Yield and quality of winter and spring triticales for forage and grain. *Grass and Forage Science.* 51:449-455.
- Salas, C. 2003. Nutrición mineral de plantas y el uso de fertilizantes. *In: Meléndez, G. y Molina, E. (Eds.). Fertilizantes: características y manejo.* Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR, San José. 1-19 pp.
- Royo, C., García del Moral, L. F., Slafer, G. A., Nachit, M. M., Araus, J.L. (2005). Selection Tools for improving Yield-Associated Physiological Traits. En Royo, C., Nachit, M.M., Di Fonzo, N., Araus, J. L., Pfeiffer, W.H., Slafer, W. H. (eds). *Durum wheat breeding – current approaches and future strategies (vol. 2).* Ed. Food Products Press. ISBN: 1560229675, 991 pp.

- Santiveri, F., Royo, C., and Romagosa, I. 2004. Growth and yield responses of spring and winter triticale cultivated under Mediterranean conditions. *Europ. J. Agronomy*. 20:281-292.
- Shpiler, L., and Blum, A. 1986. Differential reaction of wheat *Triticum aestivum* cultivars to hot environments. *Euphytica* 35:483-492.
- Verhulst, N., Govaerts, B. 2010. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. Mexico, D.F.; CIMMYT.
- Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., Huang, W. (2009). Predicting vegetation water content in wheat using normalized difference water indices derived from ground measurements. *J Plant Res* 122: 317-326.
- Ye, C.W., Díaz, S.H., Lozano-del Río, A.J., Zamora-Villa, V.M., Ayala, O.M. 2001. Agrupamiento de germoplasma de triticale por rendimiento, ahijamiento y gustosidad. *Téc. Pecu.* 39(1):15-29.