

MODELOS DE SIMULACIÓN PARA CEREALES FORRAJEROS EN  
EL SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO

MISAEEL RODRÍGUEZ ARVIZU

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias  
en Zootecnia

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"

DIRECCIÓN DE POSTGRADO  
PROGRAMA DE GRADUADOS



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.  
Diciembre de 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIRECCIÓN DE POSTGRADO

MODELOS DE SIMULACIÓN PARA CEREALES FORRAJEROS EN EL SUR DE  
NUEVO LEÓN, MÉXICO

TESIS

POR:

MISAEI RODRÍGUEZ ARVIZU

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como  
requisito parcial, para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN ZOOTEENIA

COMITÉ PARTICULAR :

Asesor Principal

---

Dr. Heriberto Díaz Solís

Asesor

---

Dr. Eduardo Aizpuru García

Asesor

---

Dr. Ramiro López Trujillo

Asesor

---

Dr. Víctor Manuel Zamora Villa

---

Dr. Jerónimo Landeros Flores  
Director de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México  
Diciembre, 2008.

## **AGRADECIMIENTOS**

**A**

**Dr. Heriberto Díaz Solís**

**Por su valiosa asesoría y apoyo en el desarrollo del presente trabajo**

**A**

**Dr. Eduardo Aizpuru García  
Dr. Ramiro López Trujillo  
Dr. Víctor Manuel Zamora Villa**

**Por su apoyo desinteresado en la revisión de este trabajo**

**A**

**Dr. Alejandro Javier Lozano del río  
M.C. Modesto Colín Rico**

**Por facilitarme la semilla de los cultivos estudiados en este trabajo**

**A**

**Ing. María de Lourdes Hernández Hernández**

**Por su valioso apoyo en la medición de área foliar**

**A Sr. Jesús Cabrera**

**Por su desinteresado apoyo al facilitar los materiales necesarios para el desarrollo del presente trabajo.**

**Al personal del Campo Experimental de Navidad, Nuevo León por su apoyo en las prácticas de manejo de los cultivos.**

**A mi Alma Mater.**

**Por abrirme sus puertas.**

## **DEDICATORIA**

**Dedicada a mis padres:**

**Fidel J. Rodríguez Pichardo**

**Y**

**Cirila Arvizu Hernández**

**Quienes desde niño me inculcaron los valores de la vida y educaron con el ejemplo, con cariño y respeto.**

**A mi esposa**

**María Magdalena Ramos Hernández**

**Que con su apoyo y cariño me impulso para concluir esta etapa.**

**A mis hermanos:**

**Enrique Rodríguez Arvizu**

**Abel Rodríguez Arvizu**

**R. Nahún Rodríguez Arvizu**

**A quienes admiro y respeto**

## COMPENDIO

### MODELOS DE SIMULACIÓN PARA CEREALES FORRAJEROS EN EL SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO

POR:

MISAEEL RODRÍGUEZ ARVIZU

MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN ZOOTECNIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE DE 2008

Dr. Heriberto Díaz Solís --Asesor--

**Palabras clave:** Predicción, calibración, cebada, trigo, triticale, DSSAT, Stella.

Los modelos de simulación o predicción son una alternativa para minimizar los costos de investigación y reducir los riesgos económicos y de producción. Sirven para representar las interacciones entre los factores de un proceso productivo y, con esto, dan pauta para seguir estrategias acorde con el objetivo planteado. En cultivos forrajeros son una herramienta para predecir los comportamientos de crecimiento y rendimiento, y ayudan a entender las relaciones planta-ambiente. Los objetivos planteados en la presente investigación fueron: calibrar el programa DSSAT 4.0.2.0 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; [www.icasa.net](http://www.icasa.net)) para los cultivos de cebada NARRO-92-05 (*Hordeum vulgare L*), trigo AN-239 (*Triticum aestivum L*), y triticale (Eronga, AN-125, y AN-31-B (*X:Triticosecale Wittmack*), construir con el programa Stella 9.0.2 modelos empíricos para los mismos cultivos en base a información climática y experimental y analizar las ventajas y desventajas de los modelos de ambos programas. Los cultivos fueron establecidos y muestreados en el Campo Agrícola Experimental de Navidad de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Galeana, Nuevo León, México. Las siembras se realizaron los días 7 de marzo de 2007 y

el 22 de febrero de 2008 con una sembradora de cereales de grano pequeño a una densidad de siembra de  $140 \text{ kg ha}^{-1}$  y la dosis de fertilización en el ciclo 2007 fue 85-117-00 (N-P-K) con fosfato monoamónico y sulfato de amonio y para el ciclo 2008 la dosis fue de 60-60-60 con triple 17. Los cinco materiales genéticos fueron establecidos en un diseño de bloques al azar con 3 repeticiones en unidades experimentales de  $86 \text{ m}^2$ . Las variables medidas semanalmente fueron: acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación en componentes del rendimiento (hoja, tallo y grano), altura del cultivo, relación hoja tallo, índice de área foliar, proteína cruda y fibra detergente ácida. Cada módulo del programa DSSAT 4.0.2.0 fue alimentado con la información obtenida del experimento y posteriormente se calibró mediante la manipulación de coeficientes genéticos de acuerdo a los valores observados. Con el programa Stella se construyeron modelos de crecimiento utilizando como variable predictora los Grados Día de Desarrollo (GDD) acumulados.

La calibración de los modelos, con el programa DSSAT, se logró de forma satisfactoria, i.e., los modelos tuvieron capacidad de simular valores aceptables al compararlos con los valores observados en parcelas independientes a las de la calibración. En la predicción de la acumulación de materia seca parcial aérea se tuvo una  $r^2$  de 0.95 a 0.98 y una raíz cuadrada del cuadrado medio del error o desviación estándar del error (RMSE) de 709.4 a  $1111.1 \text{ kg ha}^{-1}$ ; en la acumulación de materia seca parcial de tallo se tuvo una  $r^2$  de 0.94 a 0.97 y una RMSE de 551.5 a  $1077.2 \text{ kg ha}^{-1}$  y en la acumulación de materia seca parcial en grano se tuvo una  $r^2$  de 0.58 a 0.98 con una RMSE de 463.2 a  $920.2 \text{ kg ha}^{-1}$  para los 5 materiales estudiados. Sin embargo, en el caso de la predicción de acumulación de materia seca parcial en hoja el ajuste entre valores simulados con observados fue baja, el valor de  $r^2$  fue de 0.09 a 0.54 con una RMSE de 196.6 a  $483.4 \text{ kg ha}^{-1}$ . Al validar los modelos de cebada, trigo y triticale se encontró que los modelos calibrados, aunque simulan de forma aceptable, requieren de más ajustes con la evaluación de los cultivos bajo diferentes prácticas de manejo, ya que los estadísticos encontrados fue una  $r^2$  de 0.96 a 0.97 y una RMSE de 1059.3 a  $2184.4 \text{ kg ha}^{-1}$  para la acumulación de materia seca parcial aérea, una  $r^2$  de 0.92 a 0.96 y una RMSE de 718 a  $1854.1 \text{ kg ha}^{-1}$  para la acumulación de materia seca en tallo y una  $r^2$  de

0.91 a 0.97 con una RMSE de 502.4 a 973.1 kg ha<sup>-1</sup> para la acumulación de materia seca parcial en grano.

El modelo AN-CER construido en Stella 9.0.2 simuló con buen nivel de precisión el crecimiento y desarrollo de cada uno de los cultivos y variedades utilizados con valores de  $r^2$  de 0.94 a 0.98 y RMSE de 501 a 1366 kg ha<sup>-1</sup> para acumulación de materia seca parcial aérea,  $r^2$  de 0.92 a 0.98 y RMSE de 244 a 1042 kg ha<sup>-1</sup> para acumulación de materia seca parcial para forraje,  $r^2$  de 0.94 a 0.96 y RMSE de 5.8 a 9.8 cm en altura del cultivo,  $r^2$  de 0.83 a 0.91 y RMSE de 1.6 a 5.6 e la relación hoja tallo,  $r^2$  de 0.74 a 0.85 y RMSE de 0.13 a 0.28 para el índice de área foliar,  $r^2$  de 0.96 a 0.98 y RMSE de 340 a 1193 kg ha<sup>-1</sup> en llenado de grano,  $r^2$  de 0.89 a 0.99 y RMSE de 1.4 a 2.4 % para contenido proteico y  $r^2$  de 0.79 a 0.94 y RMSE de 2.3 a 3.7 % en contenido de FDA en la planta.

Los programas para simulación de DSSAT y Stella presentaron buena capacidad de predicción; sin embargo, se considera más práctico y accesible el uso de modelos de simulación construidos con Stella. Se concluye que mediante simulación con los modelos de los programas DSSAT y Stella es factible predecir el crecimiento y rendimiento de cultivos forrajeros.

## **ABSTRACT**

### **SIMULATION MODELS FOR CEREAL FORAGES IN THE SOUTH OF NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**BY:**

**MISAEEL RODRIGUEZ ARVIZU**

**MASTERY IN SCIENCES  
IN ZOOTECNIA**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DECEMBER OF 2008**

**Dr. Heriberto Díaz Solís – Advisor --**

**Key words:** *Prediction, calibration, barley, wheat, triticale, DSSAT, STELLA*

The use of simulation models is an alternative as a decision support system to reduce the cost and risks of production. Simulation models summarize the interaction between the factors of a productive process. In forage crops are a tool to predict the behaviors of growth and performance, and they help to understand the physiological relationships between environment and plants. The objectives in present investigation were: Calibrating the program DSSAT 4.0.2.0 for the crops of barley, wheat and triticale in the south of Nuevo León, Mexico, and to build empiric models for the same crops in the software Stella 9.0.2. The crops were established and sampled at the Agricultural Experiment Station of Navidad, Galeana, Nuevo León, Mexico of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. The genetic materials evaluated were barley NARRO 92-05 (*Hordeum vulgare L*), wheat AN-239 (*Triticum aestivum L*) and triticale Eronga, AN-125, and AN-31-B (*X:Triticosecale Wittmack*) established in a randomly complete blocks design whit three replications. Planting dates were in spring-summer on March 7, 2007 and on February 22, 2008.



The program DSSAT 4.0.2.0 was parameterized within each one modules with the information obtained of the experiment and later was calibrated by manipulation of genetic coefficients. In the program Stella 9.0.2 growth models were built using GDD as driver variable.

The calibration of the models for barley, wheat and triticales in DSSAT 4.0.2.0 had the ability to simulate acceptable values when simulated values were compared with observed values. Simulation of the accumulation of tops weight had a  $r^2$  of 0,95 to 0,98 and a RMSE of 709,4 to 1111,1 kg ha<sup>-1</sup>, in stem weight had a  $r^2$  of 0,94 to 0,97 and a RMSE of 551,5 to 1077,2 kg ha<sup>-1</sup> and a  $r^2$  of 0,58 to 0,98 with a RMSE of 463,2 to 920,2 kg ha<sup>-1</sup> in grain weight for the 5 studied materials. But in the prediction of leaf weight the adjustment between simulated with observed values  $r^2$  was from 0,09 to 0,54 with a RMSE of 196,6 to 483,4 kg ha<sup>-1</sup> for the studied materials. Validation of the models for barley (NARRO-92-05), wheat (A-239) and triticale (AN-31-B) showed that the calibrated models predict acceptably, however, more adjustments are required under different management practices of the crops because statistical values were:  $r^2$  of 0,96 to 0,97 and a RMSE of 1059,3 there is 2184,4 kg ha<sup>-1</sup> for the accumulation of dry partial aerial matter; accumulation of dry matter had a  $r^2$  of 0,92 to 0,96 and a RMSE of 718 to 1854,1 kg ha<sup>-1</sup> in Stem and a  $r^2$  of 0,91 to 0,97 with a RMSE of 502,4 to 973,1 kg ha<sup>-1</sup> for the accumulation of dry partial matter in grain is.

The model AN-CER constructed in Stella 9.0.2 simulated acceptably the growth and development for the each of the crops and varieties utilized whit values of  $r^2$  of 0.94 to 0.98 and RMSE of 501 to 1366 kg ha<sup>-1</sup> for accumulation of dry matter partial aerial,  $r^2$  of 0.92 to 0.98 and RMSE of 244 to 1042 kg ha<sup>-1</sup> in accumulation of dry matter to court for forage,  $r^2$  of 0.94 to 0.96 and RMSE of 5.8 to 9.8 cm in height of crop,  $r^2$  of 0.83 to 0.91 and RMSE of 1.6 to 5.6 in the ratio leaf:stem,  $r^2$  of 0.74 to 0.85 and RMSE of 0.13 to 0.28 for leaf area index,  $r^2$  of 0.96 to 0.98 and RMSE of 340 to 1193 kg ha<sup>-1</sup> for grain filling,  $r^2$  of 0.89 to 0.99 and RMSE of 1.4 to 2.4 % for contents of protein and  $r^2$  of 0.79 to 0.94 and RMSE of 2.3 to 3.7 % in FDA in the plant. The simulation models of DSSAT and Stella they presented good capability of prediction however considers

more practice and accessible the use of simulation models constructed in Stella. One comes to an end than by means use of simulation models of DSSAT 4.0.2.0 and Stella 9.0.2 is feasible to predict the growth and yield of forage crops depending of the objective Runaway by the user.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   | Página |
|---|--------|
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1      |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....   | 3      |
| 2.1 Uso de cereales como forraje.....   | 3      |
| 2.2 Influencia de las condiciones climáticas en el crecimiento de los cereales..... | 3      |
| 2.3 Modelos de simulación.....  | 5      |
| 2.3.1 Modelo. ....  | 5      |
| 2.3.2 Simulación. ....  | 5      |
| 2.3.3 Sistema. ....   | 6      |
| 2.4 Aplicación de los modelos de simulación. ....                                   | 7      |
| 2.5 Simulación en cereales .....  | 8      |
| 2.6 Concepto DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)..          | 9      |
| 2.6.1 Información requerida para operar DSSAT. ....                                 | 10     |
| 2.6.2 Datos requeridos para calibrar DSSAT.....                                     | 11     |
| 2.6.3 Descripción del modelo para trigo y cebada en DSSAT.....                      | 11     |
| 2.7 Descripción del programa Stella.....  | 11     |
| 3. MATERIAL Y MÉTODOS.....  | 13     |
| 3.1 Ubicación del área de estudio.....  | 13     |
| 3.2 Experimento de campo .....  | 13     |
| 3.3 Variables climáticas.....   | 14     |
| 3.4 Toma de datos.....  | 15     |
| 3.5 Carga de datos en DSSAT 4.0.2.0.....  | 16     |
| 3.6 Carga de materiales genéticos (“Genetic coefficients”).....                     | 17     |
| 3.7 Calibración de DSSAT .....  | 17     |
| 3.8 Construcción del modelo con Stella .....  | 18     |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 19     |
| 4.1 Calibración de DSSAT .....  | 19     |
| 4.1.1 Acumulación de materia seca parcial aérea. ....                               | 20     |
| 4.1.2 Acumulación de materia seca parcial en tallo. ....                            | 22     |
| 4.1.3 Acumulación de materia seca parcial en hoja. ....                             | 23     |
| 4.1.4 Acumulación de materia seca parcial en grano.....                             | 25     |

|  |      |
|--|------|
| 4.2 Validación de DSSAT .....                                | 27   |
| 4.2.1 Acumulación de materia seca parcial aérea. ....        | 27   |
| 4.2.2 Acumulación de materia seca parcial en tallo. ....     | 28   |
| 4.2.3 Acumulación de materia seca parcial en grano. ....     | 29   |
| 4.3 Descripción del modelo construido con Stella 9.0.2. .... | 30   |
| 4.3.1 Submodelo de condiciones climáticas. ....              | 30   |
| 4.3.2 Submodelo de manejo. ....                              | 32   |
| 4.3.3 Submodelo de crecimiento del cultivo. ....             | 32   |
| 4.3.4 Submodelo de composición química del forraje. ....     | 36   |
| 4.4 Evaluación del modelo AN-CER. ....                       | 37   |
| 4.4.1 Acumulación de materia seca parcial aérea. ....        | 37   |
| 4.4.2 Acumulación de materia seca para forraje. ....         | 39   |
| 4.4.3 Altura del cultivo. ....                               | 40   |
| 4.4.4 Relación hoja:tallo ....                               | 42   |
| 4.4.5 Índice de área foliar. ....                            | 43   |
| 4.4.6 Grano. ....  | 45   |
| 4.4.7 Proteína cruda y fibra detergente ácido. ....          | 47   |
| 4.5 Uso del modelo AN-CER. ....                              | 49   |
| 4.5.1 Acumulación de materia seca parcial aérea. ....        | 49   |
| 4.5.2 Materia seca para forraje. ....                        | 50   |
| 4.5.3 Índice de área foliar. ....                            | 51   |
| 4.5.4 Proteína cruda. ....                                   | 52   |
| <br>   |      |
| 5. CONCLUSIONES .....  | 55   |
| <br>   |      |
| 6. RESUMEN .....   | 57   |
| <br>   |      |
| 7. LITERATURA CITADA .....                                   | 58   |
| <br>   |      |
| ÍNDICE DE CUADROS.....                                       | xii  |
| <br>   |      |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                       | xivv |

## ÍNDICE DE CUADROS

Página

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 2.1. Valor nutritivo del forraje cosechado con grano masoso (base materia seca; kuhl <i>et al.</i> , 1993). .....  | 3  |
| Cuadro 3.1. Genotipos de cebada, trigo y triticale utilizados en el presente estudio.....   | 13 |
| Cuadro 3.2. Descripción de los coeficientes genéticos utilizados por DSSAT 4.0.2.0 para la calibración de modelos de trigo y cebada. ....   | 18 |
| Cuadro 3.3. Temperaturas (T) medias mensuales y desviación estándar de registros históricos de 12 años en la localidad de Navidad, Galeana, Nuevo León. ....                        | 18 |
| Cuadro 4.1. Coeficientes genéticos encontrados para los cultivos y variedades utilizadas en la calibración. ....  | 20 |
| Cuadro 4.2. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la simulación de acumulación de materia seca en tallo para los cultivos y variedades utilizados.....         | 22 |
| Cuadro 4.3. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la calibración para la acumulación de materia seca en hoja en los cultivos y variedades utilizados. ....     | 25 |
| Cuadro 4.4. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la validación para la acumulación de materia seca parcial aérea en los cultivos y variedades utilizados..... | 28 |
| Cuadro 4.5. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la validación para la acumulación de materia seca en tallo de los cultivos y variedades utilizados. ....     | 29 |
| Cuadro 4.6. Ecuaciones utilizadas en el modelo para estimar la acumulación de materia seca parcial.....   | 34 |
| Cuadro 4.7. Relaciones entre la variable GDD acum con el incremento de altura del cultivo. ....   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 4.8. Ecuaciones utilizadas por el modelo para la estimación de la relación entre hoja y tallo en cada uno de los genotipos. ....   | 35 |
| Cuadro 4.9. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar el comportamiento del IAF en cada uno de los genotipos. ....   | 35 |
| Cuadro 4.10. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar la acumulación y rendimiento de grano. ....   | 36 |
| Cuadro 4.11. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar el contenido de P C en la planta. ....  | 37 |
| Cuadro 4.12. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar el tendencia de FDA en la planta. ....  | 37 |
| Cuadro 4.13. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar datos observados con simulados por AN-CER para la variable acumulación de materia seca parcial aérea. .... | 39 |
| Cuadro 4.14. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar datos observados con los simulados por AN-CER para la acumulación de materia seca para forraje. ....       | 39 |
| Cuadro 4.15. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para altura del cultivo. ....                            | 42 |
| Cuadro 4.16. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER en la variable relación hoja tallo. ....                 | 42 |
| Cuadro 4.17. Índice de área foliar máximo y días después de la siembra a los que se alcanzo este. ....  | 45 |
| Cuadro 4.18. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para el índice de área foliar. ....                      | 45 |
| Cuadro 4.19. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para llenado de grano. ....                              | 46 |

Cuadro 4.20. Valores observados de Inicio de llenado de grano en días después de la siembra y rendimiento total. ....46

Cuadro 4.21. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para P C y F D A. ....49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Página

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Fases teóricas para la construcción de un modelo de simulación (Grant <i>et al.</i> , 1997). .....  | 6  |
| Figura 4.1. Acumulación de materia seca aérea, parcial durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0. ....            | 21 |
| Figura 4.2. Acumulación de materia seca parcial en tallo durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0. ....          | 23 |
| Figura 4.3. Acumulación de materia seca parcial en hoja durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0. ....           | 24 |
| Figura 4.4. Acumulación de materia seca parcial en grano durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0. ....          | 26 |
| Figura 4.5. Acumulación de materia seca aérea, parcial durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0 calibrado.....   | 27 |
| Figura 4.6. Acumulación de materia seca parcial en tallo durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0 calibrado..... | 28 |
| Figura 4.7. Acumulación de materia seca parcial en grano durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0. ....          | 30 |
| Figura 4.8. Modelo conceptual del submodelo de condiciones climáticas en el modelo AN-CER. ....   | 31 |
| Figura 4.9. Controles de manejo para el modelo AN-CER. ....   | 32 |
| Figura 4.10. Modelo conceptual del submodelo de crecimiento del cultivo en el modelo AN-CER. ....   | 33 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 4.11. Modelo conceptual del submodelo de composición química del forraje en el modelo AN-CER.....   | 36 |
| Figura 4.12. Acumulación de materia seca parcial aérea de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo, de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.  | 38 |
| Figura 4.13. Materia seca hasta corte para forraje (12 % PC) de los cultivos de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER. ....   | 40 |
| Figura 4.14. Altura del cultivo en (cm) de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.....   | 41 |
| Figura 4.15. Relación hoja tallo de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER. ....  | 43 |
| Figura 4.16. Índice de área foliar durante el ciclo de cultivo de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.....  | 44 |
| Figura 4.17. Llenado de grano de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.....  | 47 |
| Figura 4.18. Porcentaje de proteína cruda y fibra detergente ácido en los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER. ....  | 48 |
| Figura 4.19. Acumulación de materia seca parcial de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo, de acuerdo a datos simulados por AN-CER, con temperaturas medias actuales y con un incremento de temperatura media diaria de 3 °C..... | 50 |
| Figura 4.20. Acumulación de materia seca parcial para forraje de los cultivos de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos simulados por AN-CER, en la actualidad y con un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C.....                   | 51 |
| Figura 4.21. Índice de área foliar de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos simulados por AN-CER con temperatura actual y con un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C.....                        | 52 |

Figura 4.22. Proteína cruda de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos simulados por el modelo AN-CER, en la actualidad y con un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C..... 53

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación o predicción son una abstracción de la realidad para representar un sistema. Permiten proyectar resultados físicos y económicos teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente. En sistemas agrícolas, han aparecido como una herramienta que en base a la integración de sus componentes permite hacer una representación real de los mismos (Odum y Odum, 2000) por medio de operaciones lógicas y aritméticas que representan la estructura (estado) y comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Grant *et al.*, 1997).

Partiendo de lo anterior se han creado un gran número de programas como DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; [www.icasa.net](http://www.icasa.net)) que ayuda a simular o predecir el desarrollo y producción de un cultivo en base a información genotípica, ambiental y de manejo proporcionada por el usuario. DSSAT es un programa creado desde el año de 1982 como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la transferencia de agro tecnología (Uehara y Tsuji, 1998). Otro programa que se utiliza para la simulación es Stella que permite modelar sistemas dinámicos.

La toma de decisiones en el área agrícola, como en cualquier proceso productivo, es fundamental para alcanzar un objetivo. Por lo tanto, el contar con herramientas que permitan seguir la ruta más acertada para el uso y aprovechamiento sustentable de los recursos disponibles es una necesidad, sobre todo ante los cambios e inestabilidad climática de la actualidad.

La forma tradicional de hacer investigación agropecuaria está basada en experimentos de campo y por lo tanto es muy costosa; tanto DSSAT como Stella ofrecen la posibilidad de reducir los gastos de investigación al realizar buena parte de ella en gabinete y reducir el trabajo de experimentos a calibración y validación.

En la actualidad se requiere de la aplicación de nuevas tecnologías, que sirvan de apoyo para mejorar la productividad agrícola y pecuaria. Aunque si bien no es posible

controlar el clima, si se pueden adaptar los sistemas de producción agropecuarios a las condiciones climáticas de cada región para minimizar los riesgos y aprovechar las oportunidades al máximo. Los objetivos de este trabajo fueron: calibrar el programa DSSAT 4.0.2.0 para los cultivos de cebada, trigo y triticale, construir un modelo de predicción en Stella 9.0.2 para cada uno de los cultivos y analizar las ventajas y desventajas de ambos programas.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Uso de cereales como forraje.

Los cereales de invierno ofrecen múltiples opciones de uso, pudiendo ser usados en verde, ensilado, pastoreado o henificado, estas opciones se pueden tener en diferentes climas y zonas de producción. El Cuadro 2.1 muestra el valor nutritivo del forraje del trigo, cebada y triticale.

Cuadro 2.1. Valor nutritivo del forraje cosechado con grano masoso (base materia seca; kuhl *et al.*, 1993).

| Cultivo   | Nutrientes digestibles totales (%) | Proteína cruda (%) |
|-----------|------------------------------------|--------------------|
| Cebada    | 62-66                              | 9-11               |
| Trigo     | 55-60                              | 8-10               |
| Triticale | 52-54                              | 8-10               |

Ye *et al.* (2001) mencionan que el triticale es un cultivo de rápido crecimiento, con buena calidad forrajera y presenta buena resistencia al ataque de enfermedades. Es un cultivo que por sus características de producción, valor nutritivo además de su tolerancia a condiciones desfavorables como sequía, suelos pobres, y salinidad, adquiere gran importancia como cultivo forrajero.

### 2.2 Influencia de las condiciones climáticas en el crecimiento de los cereales.

El proceso de fotosíntesis es la base de la vida dentro del planeta tierra, el cual consiste en la descomposición de las moléculas de agua y bióxido de carbono para recombinar en moléculas de azúcar, mediante el uso de la energía de la luz (radiación solar) la cual proporciona la fuerza para mover el proceso fotosintético (Torres, 1983).

Todos los procesos fisiológicos de las plantas son realizados dentro de ciertos límites de temperatura, los cuales se encuentran entre los 0° y los 50 °C, para las plantas superiores. Las plantas para completar su ciclo vegetativo deben acumular cierto número de grados de temperatura (Torres, 1983).

Ritchie *et al.* (1998) mencionan que la escala de tiempo de las plantas de cereales está estrechamente relacionada con la temperatura, primero sugiere que la duración de un estado de crecimiento en particular está directamente relacionado con la temperatura y esta duración se puede predecir para una especie en particular utilizando la sumatoria de la temperatura media diaria del aire. Pero un término más apropiado para describir la duración de crecimiento de las plantas es "Thermal Time" porque la escala de tiempo de las plantas está estrechamente relacionado con las condiciones térmicas considerando una temperatura base a la que se detiene el crecimiento. Y proponen una fórmula para calcular "Thermal time" ( $Td$ ) en grados C por día.

$$Td = \sum_{i=1}^n (\bar{T}a - Tb)$$

Donde:

$\bar{T}a$  = Temperatura media diaria.

$Tb$  = Temperatura base a la que se detiene el desarrollo.

$n$  = número de días de observaciones de temperatura usadas.

Wilson y Cooper (1969) reportan que la temperatura puede modificar la anatomía y morfología de las hojas debido a que causa cambios en el tamaño de las células del mesófilo y la anatomía de los estomas lo cual tiene influencia en el proceso de fotosíntesis.

Sayed (1995) en su trabajo titulado efectos de la temperatura en el crecimiento, morfología y fotosíntesis del trigo, reporta que existe una relación lineal positiva de la temperatura de los meristemos con el desarrollo de las hojas y la aparición sucesiva de las mismas. Por otra parte Chowdhury y Wardlaw (1978) mencionan que las altas temperaturas tienen un efecto limitativo en la respiración y desplazamiento de carbohidratos en el desarrollo de la semilla.

Salisbury y Ross (2000) mencionan que el crecimiento de las plantas está afectado por la temperatura debido a reacciones enzimáticas influenciadas por dos factores opuestos. Cuando la temperatura aumenta, el aumento de energía cinética de las moléculas que reaccionan da lugar a un aumento en la velocidad de reacción, pero el aumento de temperatura también aumenta la velocidad de desnaturalización enzimática.

Los cambios de temperatura influyen en la velocidad de las reacciones químicas, dentro de los procesos fisiológicos de los organismos vivos. La temperatura tiene influencia significativa en el crecimiento y desarrollo de las plantas; en las etapas iniciales de crecimiento las temperaturas altas acortan el tiempo requerido para la diferenciación de órganos vegetativos y florales, mientras que en las etapas de antésis a llenado de grano, pueden causar estrés, sobre todo cuando la temperatura supera los valores críticos de crecimiento de los cultivos (Castañeda *et al.*, 2004).

### **2.3 Modelos de simulación.**

Los modelos de simulación son una herramienta que permite hacer la representación de un sistema real en base a variables que interaccionan en este. Los modelos tienen una conexión de las ideas con la realidad, ayudan a entender como están organizadas las cosas y cómo funcionan dentro de un sistema (Odum y Odum, 2000). Estos modelos son compuestos de una serie de operaciones lógicas y aritméticas que representan la estructura (estado) y comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Grant *et al.*, 1997).

Los modelos de simulación integran el conocimiento de diferentes disciplinas y dan a los investigadores la capacidad de dirigir experimentos por computadora y reducir el número de experimentos tradicionales (Jones *et al.*, 2001).

#### **2.3.1 Modelo.**

Un modelo es una abstracción de la realidad donde se describen los elementos esenciales de un problema (Grant *et al.*, 1997). Un modelo de simulación puede ser un modelo físico, una concepción mental, un modelo matemático, un modelo de computadora, o una combinación de todos (Roberts *et al.*, 1994).

#### **2.3.2 Simulación.**

Es el proceso de usar un modelo para simular o trazar paso por paso el comportamiento del sistema que estemos estudiando (Grant *et al.*, 1997). La simulación viene después de construir el diagrama o esquema del modelo, la simulación se muestra como un resultado del diseño y asignación de valores numéricos a cada una de las partes del sistema (Odum y Odum, 2000).

### 2.3.3 Sistema.

Grant *et al.* (1997) define sistema como una serie organizada de interrelaciones entre componentes físicos caracterizada por un límite y unidad funcional o bien un ensamble complejo de procesos caracterizados por mucha reciprocidad causa-efecto. Y mencionan que para la elaboración de un modelo de simulación existen cuatro fases o etapas (Figura 2.1).

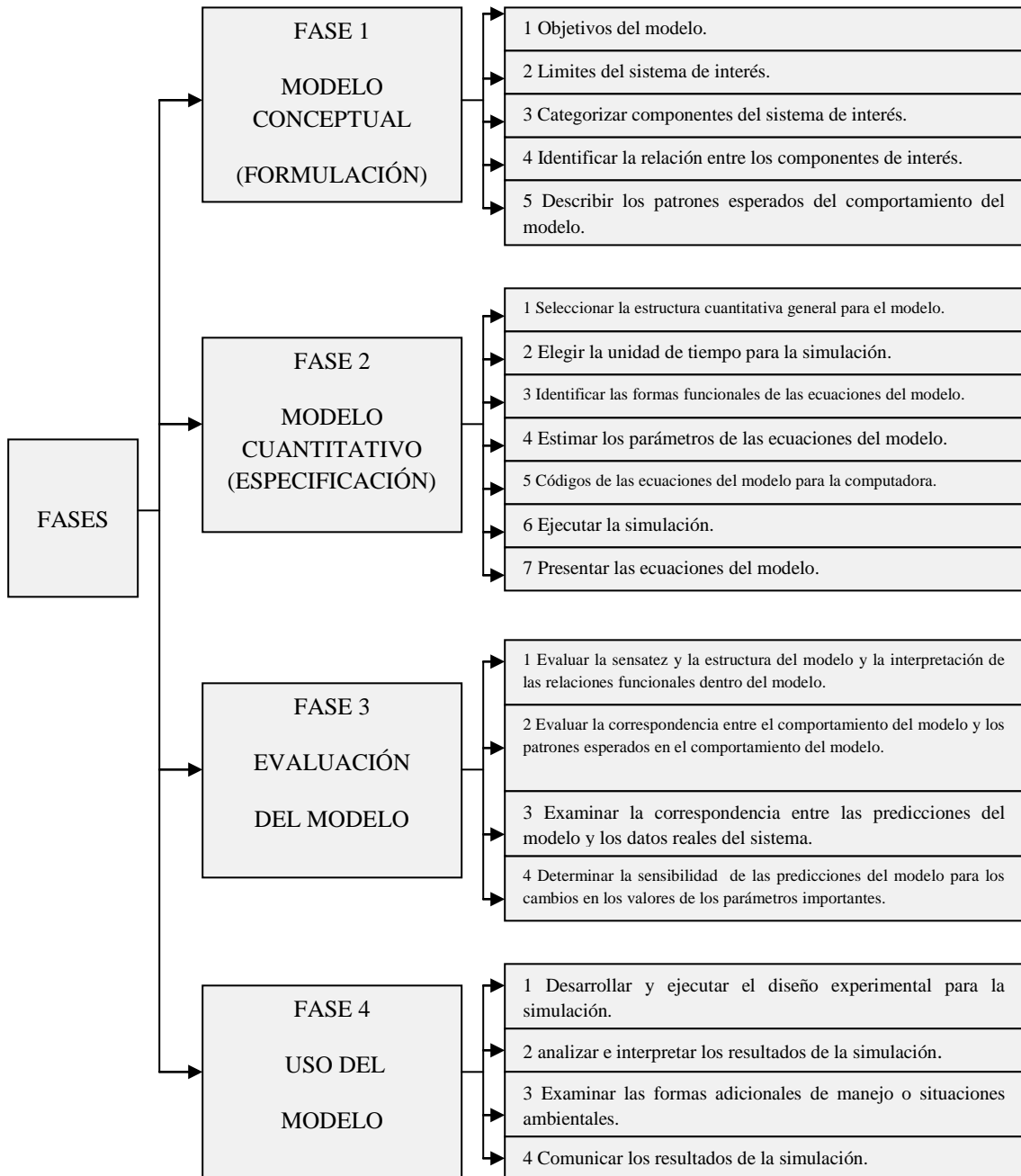


Figura 2.1. Fases teóricas para la construcción de un modelo de simulación (Grant *et al.*, 1997).



## 2.4 Aplicación de los modelos de simulación.

Los modelos de simulación son una herramienta que utiliza información obtenida a través de experiencias anteriores y permite proyectar los resultados físicos y económicos teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente (Forján, 2002).

Originalmente los modelos de crecimiento de cultivos, fueron usados como herramienta en las investigaciones científicas, resumiendo la compleja interacción de los diferentes procesos fisiológicos con las condiciones ambientales. Posteriormente, también se convirtieron en una herramienta para el monitoreo de sistemas agrícolas y para crear un uso racional del suelo (Verdoodt *et al.*, 2004).

El uso de modelos de simulación permite en forma práctica y flexible analizar las actividades agropecuarias encontradas en una cuenca o región. De la misma manera, facilita el análisis del antes y después de nuevas estrategias tecnológicas para determinar su viabilidad tanto biológica como económica y permitir determinar las condiciones necesarias para promover su difusión y fomento en determinada región (Holman, 2000).

Los modelos de simulación de crecimiento y rendimiento de las plantas, han cobrado importancia a partir del momento en que surgió la computadora como un instrumento, con el que se logra realizar y controlar a gran velocidad cálculos y procesos complicados que requieren una toma de decisiones rápida. Con estos modelos se ha simplificado la tarea de los investigadores agrícolas, ya que con un grupo de variables se pueden hacer predicciones para diferentes cultivos y tiempos, y con una serie de combinaciones de las mismas se pueden llegar a establecer las condiciones necesarias para que cada cultivo se desarrolle con todo su potencial en una región determinada (Téllez, 1999).

Ping *et al.* (2004) desarrollaron un modelo llamado GREENLAB el cual fue diseñado para hacer representaciones dinámicas de la morfogénesis y arquitectura de las plantas, utilizando ecuaciones matemáticas y reglas de decisión, obtenidas de estimadores de parámetros o por descriptores botánicos y morfológicos medidos en plantas muestra durante el curso de su desarrollo. El modelo pudo simular el crecimiento de un árbol integrando características arquitectónicas y morfológicas de la planta.

## 2.5 Simulación en cereales

Rodríguez *et al.* (1990) utilizaron el modelo Wheat Grazing Systems-Crop Environment Resource Synthesis (WGS CERES)-trigo para simular el crecimiento de este cultivo bajo pastoreo de ganado bovino. WGS CERES, utiliza la interacción climática, hidrológica y biofísica, y simula el crecimiento de hojas y tallos así como senescencia de hojas, acumulación de biomasa y la ganancia de peso de los animales. Los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) entre los valores observados y simulados para el crecimiento del forraje fueron 0.63, para la ganancia de peso 0.79 y para la producción de grano 0.74.

Ghaffari *et al.* (2001) utilizaron el modelo CERES-trigo para analizar las estrategias de manejo y buscar las mejores prácticas agronómicas en Kent, UK y encontraron un rendimiento de grano en datos observados de 6,900 a 7,400 kg ha<sup>-1</sup>, y los datos simulados fueron de 6,900 a 7,800 kg ha<sup>-1</sup>. La desviación estándar del error o raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) obtenida fue 240 kg ha<sup>-1</sup>. Reportan que CERES-trigo calibrado y validado puede ser usado para la predicción de el crecimiento y rendimiento del trigo bajo condiciones adecuadas para el oeste de Europa.

Moreno-Sotomayor y Weiss (2004) en Lincoln Nebraska, utilizaron CERES-trigo para hacer mejoras en la simulación y obtuvieron una RMSE de 2,608 para granos m<sup>-2</sup>, de 2.78 mg para peso de grano y de 811 kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano.

Saseendran *et al.* (2004) reportan la precisión al simular la materia seca y rendimiento de grano del trigo utilizando dos modelos, el CERES-trigo y el RZWQM, calibrados con tratamientos de dosis de nitrógeno en el oeste de Colorado, USA. Obtuvieron una RMSE de 500 kg ha<sup>-1</sup> para materia seca y 363 kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano con CERES-trigo y una RMSE de 1,247 kg ha<sup>-1</sup> para materia seca y 1,441 kg ha<sup>-1</sup>, para rendimiento de grano con el modelo RZWQM.

En Punjab, India se calibró DSSAT-CSM (cropping system model)-CERES para la producción y programación del riego en el cultivo de trigo, donde concluyen que este modelo es eficiente para tomar decisiones y una optima programación del manejo del riego, así como para predecir el crecimiento y desarrollo del trigo (Timsina *et al.*, 2008).

Langensiepen *et al.* (2008) probaron CERES-trigo para estimar el rendimiento de grano y la biomasa a la cosecha con datos de campo de 9 años en el norte de Alemania y

encontraron una RMSE de 2,200 kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano y de 3,200 kg ha<sup>-1</sup> para biomasa a la cosecha; mencionan que estos errores residuales son muy grandes por lo cual CERES-trigo necesita ser mejorado considerablemente.

Travasso y Magrin (1998) calibraron y validaron CERES-cebada para cinco genotipos utilizando diferentes fechas de siembra bajo optimas condiciones de crecimiento en variadas condiciones ambientales de Argentina. La RMSE obtenido fue 5.6 d al estimar la fecha de floración y una RMSE de 397 kg ha<sup>-1</sup> para estimar el rendimiento de grano en fechas de siembra normales.

## **2.6 Concepto DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).**

Uehara y Tsuji (1998) mencionan que en 1982 fue convocada una reunión internacional de científicos agrícolas y en sistemas en el International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics (ICRISAT) en Hyderabad, India, para diseñar un sistema de apoyo para la toma de decisiones en la transferencia de agro tecnología, de donde se inició la integración del programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). Posteriormente expertos en análisis de sistemas y simulación de cultivos, diseñaron y desarrollaron este programa en base a la interacción genotipo-ambiente (suelo-planta-atmósfera). En seguida un pequeño grupo de modeladores y científicos en sistemas generaron un plan para combinar los modelos en lenguaje FORTRAN con bases de datos dbf o dBASE.

Este programa es un paquete que integra suelo, cultivo, atmósfera, bases de datos, herramientas y aplicaciones para estimar la producción y riesgos económicos a escala del campo con diferente clima, suelo y prácticas de manejo (Bruma *et al.*, 2001).

El programa DSSAT es producto del proyecto IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) iniciado en 1982 y finalizado en 1993. Este programa ha sido desarrollado y expandido, desde entonces se ha mantenido y seguido actualizando bajo la protección del ICASA. DSSAT fue diseñado para ponerlo a disposición de los usuarios y aplicar el análisis de sistemas y simulación para la evaluación de resultados y riesgos y decidir alternativas de manejo en los cultivos. Los componentes centrales del programa DSSAT son los modelos de simulación y programas para facilitar su aplicación en diferentes regiones del mundo, las principales

características que permiten usarlo son: (1) entradas, organización, almacenes de datos de cultivos, suelo y agua; (2) recuperación, análisis y despliegue de datos; calibración del modelo de crecimiento del cultivo; (4) simular diferentes prácticas de manejo del cultivo y (5) evaluar los riesgos económicos asociados con las diferentes opciones (Jones *et al.*, 2001).

### **2.6.1 Información requerida para operar DSSAT.**

Para la simulación con DSSAT es básica la información de características del genotipo y manejo del cultivo (fecha de siembra, fecha de emergencia, espacio entre surcos, densidad de población, cantidad y tiempo de fertilización y la aplicación del riego). También se requiere detallar las condiciones ambientales (Hunt y Boote, 1998; Jones *et al.*, 2003)

#### **Sitio.**

Latitud, longitud, elevación y temperatura media anual; aspectos de inclinación (pendiente), obstrucción de rayos solares, drenaje y profundidad del suelo.

#### **Clima.**

Radiación solar global diaria; temperatura máxima y mínima; precipitación.

#### **Suelo.**

Clasificación a nivel de familia usando el sistema local y el sistema taxonómico del USDA-SCS; características básicas de perfil por capas de suelo: humedad, saturación, drenaje, densidad aparente, carbono orgánico, nitrógeno, pH, P y K.

#### **Condiciones iniciales.**

Cultivo anterior, ¿cantidad de? raíces, cantidad de nódulos (si hubo cultivos de nodulación); agua ¿humedad?, amonio y nitratos por capa de suelo.

#### **Manejo del cultivo.**

Nombre del cultivo y variedad; fecha de siembra, densidad y método, espacio entre surcos y dirección y densidad de población; riego y manejo del agua, fechas, método y cantidad o profundidad; fertilización (inorgánica); residuos (Fertilizantes orgánicos) aplicaciones (material, profundidad de incorporación, cantidad y concentración de nutrientes); químicos (pesticidas) aplicaciones (material y cantidades); labranza; condiciones ambientales y programa de cosecha.

### **2.6.2 Datos requeridos para calibrar DSSAT.**

Para la calibración de un modelo es necesaria toda la información de entradas en el sistema como: manejo del cultivo, condiciones ambientales, aéreas y del suelo así como las características genotípicas del cultivo (Hunt y Boote, 1998).

#### **Comportamiento del cultivo.**

Fecha de emergencia; fecha de floración o polinización; fecha de inicio de crecimiento de órganos vegetativos; fecha de madurez fisiológica; índice de área foliar y peso seco del cultivo en tres estadios del ciclo de vida; producción en términos de materia seca; índice de cosecha; peso unitario en materia seca (grano); número de granos por espiga o por planta; nivel de daño por parásitos; número de hojas producidas en el vástago.

### **2.6.3 Descripción del modelo para trigo y cebada en DSSAT.**

Los modelos CERES-trigo y cebada fueron modificados para su integración dentro de DSSAT. Para los modelos CERES, el ciclo de vida de las plantas está dividido en varias fases que son similares entre los cultivos, la tasa de desarrollo está gobernada por el “thermal time”, o grados-desarrollo día (GDD), que se calculan en base a temperaturas máximas y mínimas diarias. Los GDD requeridos para el cambio de un estado de crecimiento a otro son determinados por el usuario o calculados internamente en base a información proporcionada por el usuario. Los GDD ocurridos en el tiempo son una función definida por las temperaturas: base, optima y máxima, en la cual el desarrollo vegetativo no ocurre. La duración del día puede afectar el número total de hojas formadas alterando la duración de la fase de inducción floral y así la iniciación floral. La sensibilidad al fotoperiodo es una entrada del usuario el cultivar específico (Hogemboom *et al.*, 2003).

## **2.7 Descripción del programa Stella**

Stella es un programa que sirve como herramienta para modelar sistemas dinámicos, con pocas matemáticas sofisticadas y poco conocimiento de programación. Para crear un modelo de simulación en Stella se usan símbolos, los cuales representan almacenes, flujos y variables que influyen dentro de un sistema, los símbolos se conectan y se emplean ecuaciones matemáticas para relacionarlos (Martin y Tilley,

2000). Esto permite crear modelos versátiles en cuanto a su posible modificación y adaptación a sistemas y condiciones específicas.

Li *et al.* (2006) construyeron un modelo de simulación con Stella para predecir los requerimientos de nitrógeno en papa, rendimiento del tubérculo, consumo de nitrógeno, partición de nitrógeno en raíz, hoja, tallo y tubérculo y las pérdidas de nitrógeno en la planta y al validar el modelo obtuvieron una  $r^2$  de 0.91 en la estimación de consumo de nitrógeno y rendimiento de tubérculos que fueron correlacionados con las entradas de nitrógeno.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS.

#### 3.1 Ubicación del área de estudio

Se evaluaron los cultivos de cebada, trigo y triticale durante los ciclos primavera-verano 2007 y 2008, en el campo Agrícola Experimental de Navidad de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizado en Galeana, Nuevo León. El campo está situado en los 25° 02' 19'' N y 100° 37' 29'' O, a una altura de 1985 m.

#### 3.2 Experimento de campo

De las especies: cebada (*Hordeum vulgare L*), trigo (*Triticum aestivum L*) y triticale (*X:Triticosecale Wittmack*), se sembró un genotipo de cebada (NARRO-92-05), un genotipo de trigo (AN-239) y tres genotipos de triticale (Eronga), (AN-125) y (AN-31-B), en el ciclo primavera-verano del 2007, la siembra se efectuó el día 7 de marzo (día juliano 66). La siembra en el 2008 se efectuó el día 22 de febrero (día juliano 53) con cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239) y triticale (AN-31-B). La dosis de fertilización en el ciclo 2007 fue 85-117-00 (N-P-K) con las fuentes fosfato monoamónico y sulfato de amonio y para el ciclo 2008 la dosis fue de 60-60-60 con la fuente triple 17. Las dos siembras se realizaron con una sembradora de cereales de grano pequeño en hileras con un espacio entre surcos de 18 cm, con una densidad de siembra de 140 kg ha<sup>-1</sup>. Para los dos ciclos de cultivo se utilizaron como tratamientos los cultivos como se describe en el Cuadro 3.1. Pero en el ciclo 2008 los cultivos de triticale Eronga y AN-125 no se consideraron debido a que no se tuvo la densidad de población adecuada.

Cuadro 3.1. Genotipos de cebada, trigo y triticale utilizados en el presente estudio.

| Tratamiento | Especie   | Variedad    |
|-------------|-----------|-------------|
| 1           | Cebada    | NARRO-92-05 |
| 2           | Trigo     | AN-239      |
| 3           | Triticale | Eronga      |
| 4           | Triticale | AN-125      |
| 5           | Triticale | AN-31-B     |

Para cada una de las siembras realizadas se preparo previamente el terreno, con subsoleo, rastra y riego.

### **Diseño Experimental**

El arreglo del experimento se estableció como un diseño de bloques al azar, con cinco tratamientos y tres repeticiones, en total se tuvieron 15 unidades experimentales de 4.32 m de ancho por 20 m de largo, es decir con una superficie de (86.4 m<sup>2</sup>) cada una y un espacio entre parcelas de 1 m.

### **3.3 Variables climáticas**

Los datos climáticos se registraron diariamente por medio de una estación automática (Davis Vantage Pro II) instalada en el sitio del experimento. Los registros se hicieron en intervalos de 30 minutos y los datos se descargaron cada semana. La base de datos se procesó en una hoja de cálculo de Excel y se obtuvieron temperaturas máximas y mínimas por día en grados centígrados, radiación acumulada por día en W m<sup>-2</sup> (unidad de energía) y la precipitación en mm.

La estación climatológica registró la radiación solar en W m<sup>-2</sup> y DSSAT 4.0.2.0 requiere expresar la radiación en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (unidad de potencia). Por definición un W es igual a un J seg<sup>-1</sup> y un MJ es igual a un millón de joules. Como los registros se hicieron cada 30 minutos se tuvieron 48 valores de radiación en W m<sup>-2</sup> durante el día. Entonces se obtuvo el promedio en W m<sup>-2</sup> seg<sup>-1</sup>. El valor acumulado en el día fue el promedio multiplicado por 86,400 segundos que tiene un día y se obtiene el resultado en J m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> que dividido entre 1,000,000 es igual a MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>.

La temperatura se utilizó para calcular los Grados-Desarrollo Día (GDD), que acumuló cada uno de los cultivos durante su ciclo de desarrollo, utilizando la siguiente fórmula propuesta por Rajput (1980), al igual que Ritchie *et al.* (1998), aunque este autor lo maneja como "Thermal Time" o tiempo térmico.

$$GDD = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b$$

Donde:

GDD = Grados-Desarrollo Día.

Tmax = Temperatura máxima del día.



$T_{min}$  = Temperatura mínima del día.

$T_b$  = Temperatura base a la que la planta detiene su crecimiento, que para cebada, trigo triticale se considera de 0 °C.

### 3.4 Toma de datos

En la primera semana se muestreó emergencia, para obtener la densidad de plantas; para esto se contó el número de plantas emergidas en cinco líneas de 50 cm, seleccionadas al azar por medio de un pedazo de madera de 50 cm el cual fue lanzado hacia arriba y en la línea más cercana a donde cayó el pedazo de madera se hizo el conteo dentro de cada una de las unidades experimentales. Al final del ciclo para obtener la densidad de tallos, se contó el número de vástagos de cada unidad experimental en cinco líneas de 50 cm seleccionadas de la misma forma que los muestreos de emergencia.

Para medir fenología se registro semanalmente altura, número de hojas verdes y secas así como número de hijuelos en cinco plantas permanentes, identificadas al inicio del ciclo de cultivo, estas fueron seleccionadas al azar por medio de cinco estacas lanzadas sobre puntos en zigzag y la planta que quedara más cerca a la punta de la estaca se identifico por medio de la estaca y ligas de color.

Para acumulación de biomasa y componentes del rendimiento semanalmente se cortaron cinco plantas seleccionadas al azar caminando en zigzag sobre la parcela y al agacharse la planta que quedaba más cerca se cortaba, después se llevaron a la estufa de ventilación forzada a una temperatura de 65 °C por 72 hr para secar y posteriormente separar manualmente tallos de espigas y pesar cada una de las muestras, todo esto desde la primera semana hasta la madurez fisiológica de cada uno de los cultivos. Para estimar el rendimiento por hectárea se uso el peso de dichas plantas, extrapolado en base a los muestreos de densidad de población realizados al principio y al final del cultivo

Para medir el Índice de Área Foliar (IAF), se cortaron tres plantas seleccionadas al azar de la misma forma que fueron seleccionadas las plantas para acumulación de biomasa, dentro de cada unidad experimental, después se separaron las laminas de cada una de las plantas para medirlas con un integrador de área foliar de la marca LiCor modelo LI 3100. El IAF se estimó de acuerdo a la densidad de plantas muestreadas al

principio y al final del ciclo del cultivo, extrapolando el área foliar de las tres plantas medidas con el número de plantas contenidas en un metro cuadrado.

Para determinar la valor alimenticio del forraje, se realizaron análisis bromatológicos en seis puntos del desarrollo del cultivo, por método químico, para esto se utilizaron las plantas que fueron cosechadas para acumulación de materia seca, las muestras pertenecientes a las tres repeticiones de cada tratamiento se mezclaron para formar una sola muestra y se enviaron a los laboratorios de Agrolab México.

### **3.5 Carga de datos en DSSAT 4.0.2.0**

Para los modelos de simulación en el programa DSSAT es básica la información de manejo del cultivo (fecha de siembra, fecha de emergencia, espacio entre surcos, densidad de población, cantidad y tiempo de fertilización y la aplicación del riego) y también se requiere información de las condiciones ambientales del suelo, temperatura, radiación y precipitación (Hunt y Boote, 1998).

Se crearon bases de datos dentro del programa DSSAT en los módulos correspondientes (suelo, clima, datos experimentales y manejo del cultivo) y se agregaron los genotipos utilizados.

Suelo (“Soil Data”). Se creó el archivo de características del suelo en el módulo “Sbuild” donde se registró la ubicación geográfica, el color del suelo, el drenaje superficial así como la pendiente en por ciento. La información del suelo se hizo por capas de 30 cm hasta los 120 cm registrando textura en porcentaje de arena, limo y arcilla, porcentaje de materia orgánica, pH, y nitrógeno total en por ciento.

Clima (“Weather Data”). Dentro del módulo “WeatherMan” se creó el archivo de clima (.WTH) con información como ubicación geográfica, temperaturas máximas y mínimas diarias en grados centígrados, radiación solar en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y precipitación en mm.

Datos experimentales (“Experimental Data”). En este módulo ATCreate se cargaron los datos observados durante el ciclo de cultivo de cada uno de los materiales genéticos utilizados. Se crearon dos archivos: el archivo “A” (rendimiento máximo, fecha de antesis, número de espigas por metro cuadrado) y el archivo “T” (datos experimentales semanales).

Datos de manejo del cultivo (“Crop Management Data”). Con el módulo “Xbuild” se generó el archivo de manejo del cultivo, donde se cargó la información general del experimento como método de siembra, densidad de siembra, densidad de población emergida, espacio entre surcos, variedades utilizadas, estación climática, suelo, profundidad de siembra, para cada uno de los cultivos y variedades.

La versión 4.0.2.0 de DSSAT aun no cuenta con bases de datos para el cultivo de triticale, así que la calibración se hizo utilizando coeficientes genéticos de trigo, ya que tienen patrones de crecimiento similares.

### **3.6 Carga de materiales genéticos (“Genetic coefficients”)**

La carga de los genotipos utilizados en la calibración de DSSAT 4.0.2.0 se realizó en el archivo .CUL en el cual se agregaron las variedades de cada uno de los cultivos estudiados. Se utilizaron como coeficientes genéticos iniciales, los valores de las variedades más semejantes a los materiales trabajados.

### **3.7 Calibración de DSSAT**

La calibración de DSSAT para cada uno de los cultivos se hizo después de que el programa estaba operando con los archivos creados, la calibración se llevó a cabo mediante la manipulación de los coeficientes genéticos: P1V, P1D, P5, G1, G2, G3 y PHINT, los cuales se describen en el Cuadro 3.2. Los criterios para evaluar la calibración fueron: minimizar la raíz cuadrada del cuadrado medio del error  $\{RMSE = [\sum(\text{simulado} - \text{observado})^2 / N]^{0.5}\}$  que cuantifica la dispersión o variación entre los valores simulados con los observados, y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) que es una medida del grado de asociación entre los datos simulados y los observados (Gijssman *et al.*, 2002).

Cuadro 3.2. Descripción de los coeficientes genéticos utilizados por DSSAT 4.0.2.0 para la calibración de modelos de trigo y cebada.

| Coeficiente Genético | Descripción  |
|----------------------|--|
| P1V                  | Días con temperatura óptima para vernalización.  |
| P1D                  | Porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo con un fotoperiodo 10 hr menor al umbral.     |
| P5                   | Tiempo térmico de la fase de llenado de grano (GDD).   |
| G1                   | Número de semillas por unidad de peso del dosel en la antesis (#/g).                           |
| G2                   | Tamaño normal de la semilla bajo condiciones óptimas (mg).                                     |
| G3                   | Peso seco normal, (total, incluyendo grano) de un solo vástago no estresado en la madurez (g). |
| PHINT                | Tiempo térmico entre la aparición sucesiva de las hojas (GDD).                                 |

### 3.8 Construcción del modelo con Stella

Para desarrollar el modelo con el programa Stella 9.0.2 en primer lugar se identificaron los componentes que intervienen dentro del cultivo y las variables medidas en el experimento, para crear el modelo conceptual, posteriormente con los resultados obtenidos en el experimento y las variables climáticas medidas, se analizaron los datos con Statistica 6.0 y CurveExpert 1.3 para obtener las relaciones funcionales entre las variables estudiadas, y después se emplearon las ecuaciones obtenidas para relacionar cada uno de los componentes del modelo, dichas ecuaciones se obtuvieron con los datos medidos en campo de los dos ciclos de cultivo (2007 y 2008) muestreados para los materiales de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239), y triticale (AN-31-B). Para el triticale (Eronga) y triticale (AN-125) solo se hizo con el ciclo de cultivo del 2007.

Las temperaturas utilizadas para la construcción del modelo se obtuvieron de registros históricos de 12 años, medidos en la localidad donde se estableció el experimento de campo (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Temperaturas (T) medias mensuales y desviación estándar de registros históricos de 12 años en la localidad de Navidad, Galeana, Nuevo León.

| Mes     | T media (°C) | Desv Est | Mes        | T media (°C) | Desv Est |
|---------|--------------|----------|------------|--------------|----------|
| Enero   | 8.21         | 3.17     | Julio      | 18.39        | 2.31     |
| Febrero | 9.67         | 3.57     | Agosto     | 18.18        | 2.14     |
| Marzo   | 13.55        | 3.54     | Septiembre | 17.48        | 2.64     |
| Abril   | 15.27        | 3.16     | Octubre    | 14.8         | 3.24     |
| Mayo    | 18.09        | 2.45     | Noviembre  | 11.42        | 3.4      |
| Junio   | 19.10        | 2.09     | Diciembre  | 9.36         | 3.44     |

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos de la presente investigación se presentan en el siguiente orden: 4.1- Resultados de la calibración de DSSAT 4.0.2.0, considerando las variables de acumulación de materia seca parcial aérea, materia seca parcial en tallo, materia seca parcial en hoja y materia seca parcial en grano para los cultivos de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239), triticale (Eronga), triticale (AN-125) y triticale (AN-31.B); 4.2- Validación de DSSAT para los cultivos de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239) y triticale (AN-31-B) del ciclo 2008 con las variables acumulación de materia seca parcial aérea, materia seca parcial en tallo y materia seca parcial en grano; 4.3- Resultados del modelo AN-CER (Antonio Narro-Cereales) construido con Stella 9.0.2, donde se hace una evaluación del modelo, considerando las variables acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación de materia seca para forraje, altura del cultivo, relación hoja tallo, índice de área foliar, acumulación de materia seca en grano, proteína cruda y fibra detergente ácido del forraje. Finalmente se muestra el uso del modelo en Stella en dos escenarios; en el primero se utilizan temperaturas medias diarias actuales y en el segundo se considera un incremento de 3 grados centígrados a las temperaturas medias diarias actuales; para lo anterior, se presentan las variables materia seca parcial a madurez fisiológica, materia seca para forraje, índice de área foliar y proteína cruda del forraje.

### **4.1 Calibración de DSSAT**

El proceso de calibración realizado mediante la manipulación de coeficientes genéticos, indicó que existen hábitos de crecimiento ciertamente diferentes entre los cultivos de cebada, trigo y los triticales, únicamente se observan similitudes entre el trigo (AN-239) y el triticale (AN-125) como se puede apreciar en los coeficientes genéticos de cada uno de los materiales genéticos evaluados (Cuadro 4.1), en éste se puede apreciar de forma cuantitativa la descripción de cada uno de los materiales, por ejemplo, los materiales que requieren vernalización como el triticale (AN-31-B) que

necesita aproximadamente 15 días con temperatura óptima para completar la vernalización en su ciclo de cultivo; caso contrario de la cebada (NARRO-92-05) y el triticale (Eronga) que no tiene esta característica, esto quiere decir que la tasa de acumulación de biomasa en el triticale (AN-31-B) es retardada antes de acumular los días necesarios para la vernalización y en la cebada (NARRO-92-05) y triticale (Eronga) la acumulación de biomasa es más consistente .

Los materiales utilizados en el presente estudio mostraron sensibilidad al fotoperiodo, este es un factor que define la iniciación floral (Hogemboom *et al.*, 2003) y por tanto el inicio de llenado de grano, el triticale AN-125 es el que tiene mayor porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo (75 %). En cuanto a la fase de llenado de grano se observó que la cebada (NARRO-92-05) es precoz ya que lo que requirió 350 GDD mientras que el triticale AN-31-B necesitó 750 GDD, esto coincide con lo tardío que se muestra el ciclo de cultivo del mismo.

El “PHINT” o filocrono demostró que el ciclo de cultivo de la cebada fue el más corto de los materiales utilizados, esto se deduce de los 65 GDD que hay entre la aparición de cada una de sus hojas.

Cuadro 4.1. Coeficientes genéticos encontrados para los cultivos y variedades utilizadas en la calibración.

| Cultivo y Variedad   | Coeficiente genético |      |     |     |     |     |        |
|----------------------|----------------------|------|-----|-----|-----|-----|--------|
|                      | PIV*                 | P1D* | P5* | G1* | G2* | G3* | PHINT* |
| Cebada (NARRO-92-05) | 0                    | 60   | 350 | 22  | 34  | 0.9 | 65     |
| Trigo (AN-239)       | 05                   | 50   | 550 | 28  | 30  | 1.0 | 70     |
| Triticale (ERONGA)   | 00                   | 65   | 650 | 25  | 42  | 1.4 | 75     |
| Triticale (AN-125)   | 05                   | 75   | 450 | 28  | 32  | 1.0 | 70     |
| Triticale (AN-31-B)  | 15                   | 70   | 750 | 21  | 41  | 1.7 | 80     |

\* PIV = días con temperatura óptima para vernalización; P1D = porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo con un fotoperiodo 10 hr menor al umbral; P5 = tiempo térmico de la fase de llenado de grano (°C día); G1 = número de semillas por unidad de peso del dosel en la antésis (#/g); G2 = tamaño normal de la semilla bajo condiciones óptimas (mg); G3 = peso seco normal (total, incluyendo grano) de un solo vástago no estresado en la madurez (g); PHINT = tiempo térmico entre la aparición sucesiva de las hojas (°C día).

#### **4.1.1 Acumulación de materia seca parcial aérea.**

La acumulación de materia seca en los cultivos estudiados tuvo distintas tasas de crecimiento como se puede apreciar en la Figura 4.1. La cebada tiene rápido crecimiento desde el inicio del ciclo, comparado con los demás materiales y finaliza su crecimiento aproximadamente a los 90 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de

9,000 kg ha<sup>-1</sup>, por otra parte el triticale (AN-31-B) presenta lento crecimiento en la primer etapa de desarrollo lo que indica que necesita días de vernalización para iniciar el amacollamiento (Ewert *et al.*, 1996) y la finalización de su ciclo se encuentra aproximadamente a los 120 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de 12,500 kg ha<sup>-1</sup>.

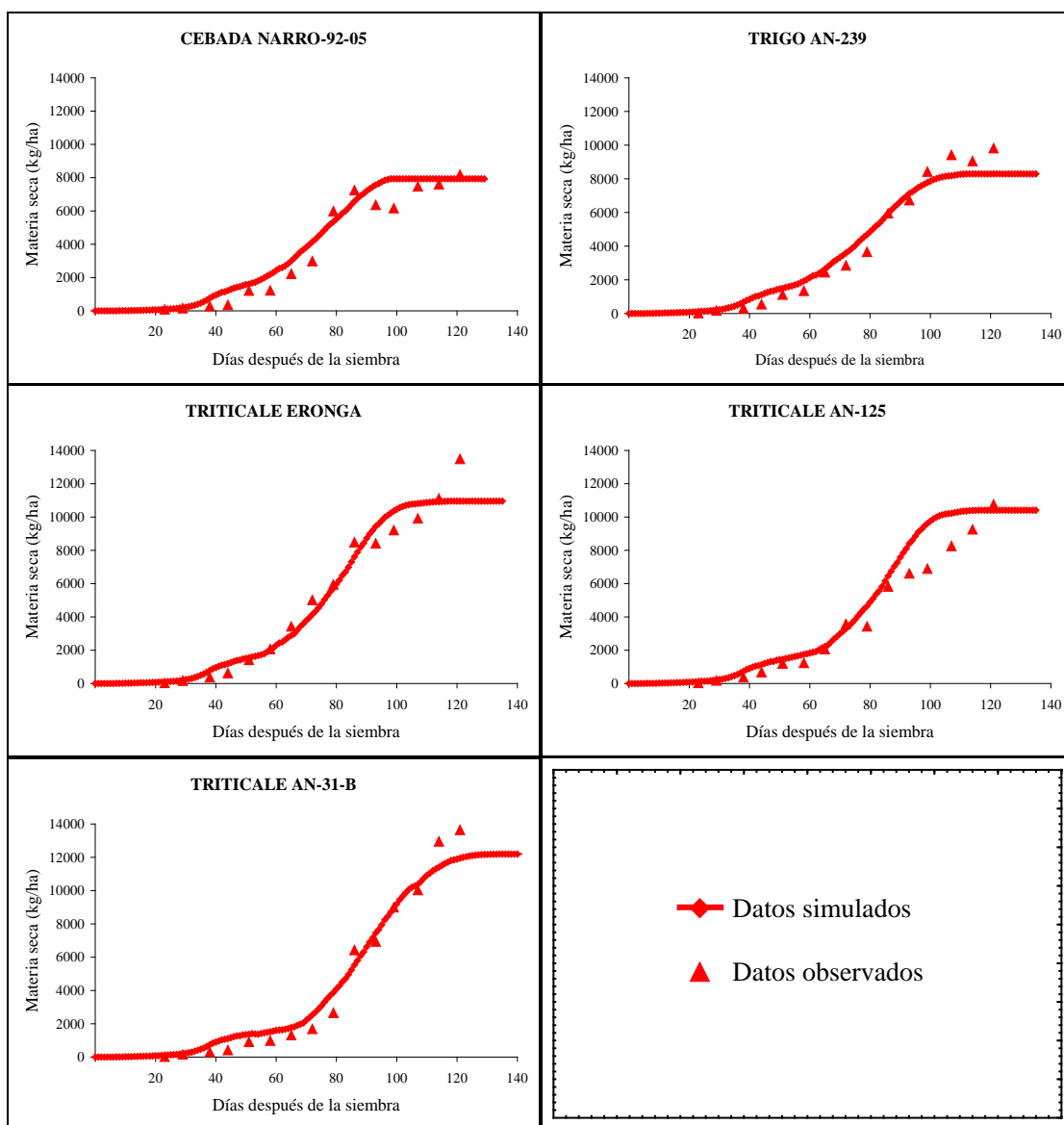


Figura 4.1. Acumulación de materia seca aérea, parcial durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

Los indicadores estadísticos de la calibración que se obtuvieron fueron  $r^2$  de 0.95 para la cebada (NARRO-92-05) y RMSE de 808.1 kg ha<sup>-1</sup>. Para el trigo (AN-239) se

obtuvo una  $r^2$  de 0.97, la cual supera el valor de 0.63 encontrado por Rodríguez *et al.* (1990) al usar CERES-trigo en la simulación de crecimiento de forraje, la RMSE obtenida fue de 709.4 kg ha<sup>-1</sup>, por arriba de la reportada por Saseendran *et al.* (2004) que obtuvieron una RMSE de 500 kg ha<sup>-1</sup> pero es menor a la reportada por Langensiepen *et al.* (2008) con una RMSE de 3,200 kg ha<sup>-1</sup>, quienes agregan que este error es elevado por lo cual CERES-trigo debe ser mejorado considerablemente. Para el triticale (Eronga) se obtuvo una  $r^2$  de 0.95 con una RMSE de 891.5 kg ha<sup>-1</sup>, para el triticale (AN-125) se encontró una  $r^2$  de 0.96 y una RMSE de 1,111.1 kg ha<sup>-1</sup> y para el triticale (AN-31-B) se obtuvo una  $r^2$  de 0.98 con una RMSE de 818.5 kg ha<sup>-1</sup>. Estos valores indican una alta asociación entre datos observados y simulados por los modelos, lo cual muestra que son una herramienta viable para estimar de forma aceptable la acumulación de materia seca parcial aérea.

#### **4.1.2 Acumulación de materia seca parcial en tallo.**

Los indicadores estadísticos de calibración que se obtuvieron para el componente tallo (Cuadro 4.2) muestran un coeficiente de determinación alto lo que indica que la relación entre datos simulados con observados tienen buen ajuste, pero la RMSE muestra que en el triticale (AN-125) existe una RMSE de 1077.2 kg ha<sup>-1</sup>, este se podría considerar elevado sin embargo se encuentra dentro del rango de RMSE de 672.9 a 1414.8, a excepción de la cebada (NARRO-92-05) y trigo (AN-239) que tienen una RMSE menor y los valores de  $r^2$  superan el rango 0.62 a 0.92 que reportan los modelos utilizados como ejemplos dentro del programa DSSAT

Cuadro 4.2. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la simulación de acumulación de materia seca en tallo para los cultivos y variedades utilizados.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE   |
|----------------------|-------|--------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.94  | 624.6  |
| Trigo (AN-239)       | 0.96  | 551.5  |
| Triticale (Eronga)   | 0.96  | 772.1  |
| Triticale (AN-125)   | 0.94  | 1077.2 |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.97  | 697.9  |

La acumulación de materia seca en el componente tallo se muestra en la Figura 4.2, en esta se aprecia como al final del ciclo en el triticale Eronga y AN-125 se presenta



un desfase en los días 90 a 120 lo que explica el mayor grado de variación encontrado en estos materiales.

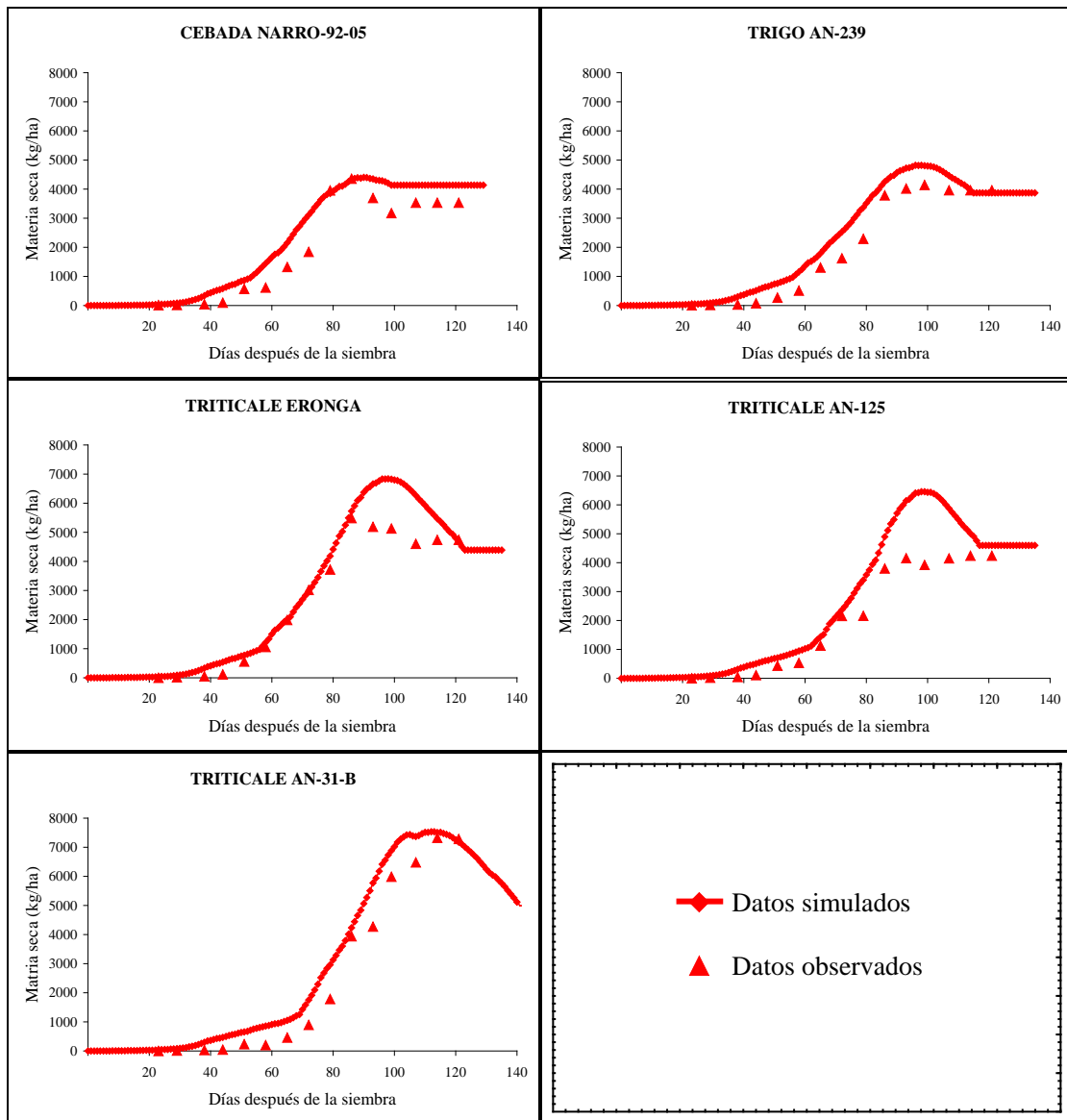


Figura 4.2. Acumulación de materia seca parcial en tallo durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

#### **4.1.3 Acumulación de materia seca parcial en hoja.**

Los resultados obtenidos de la simulación para esta variable indican una baja asociación entre los datos simulados y los observados (Figura 4.3).

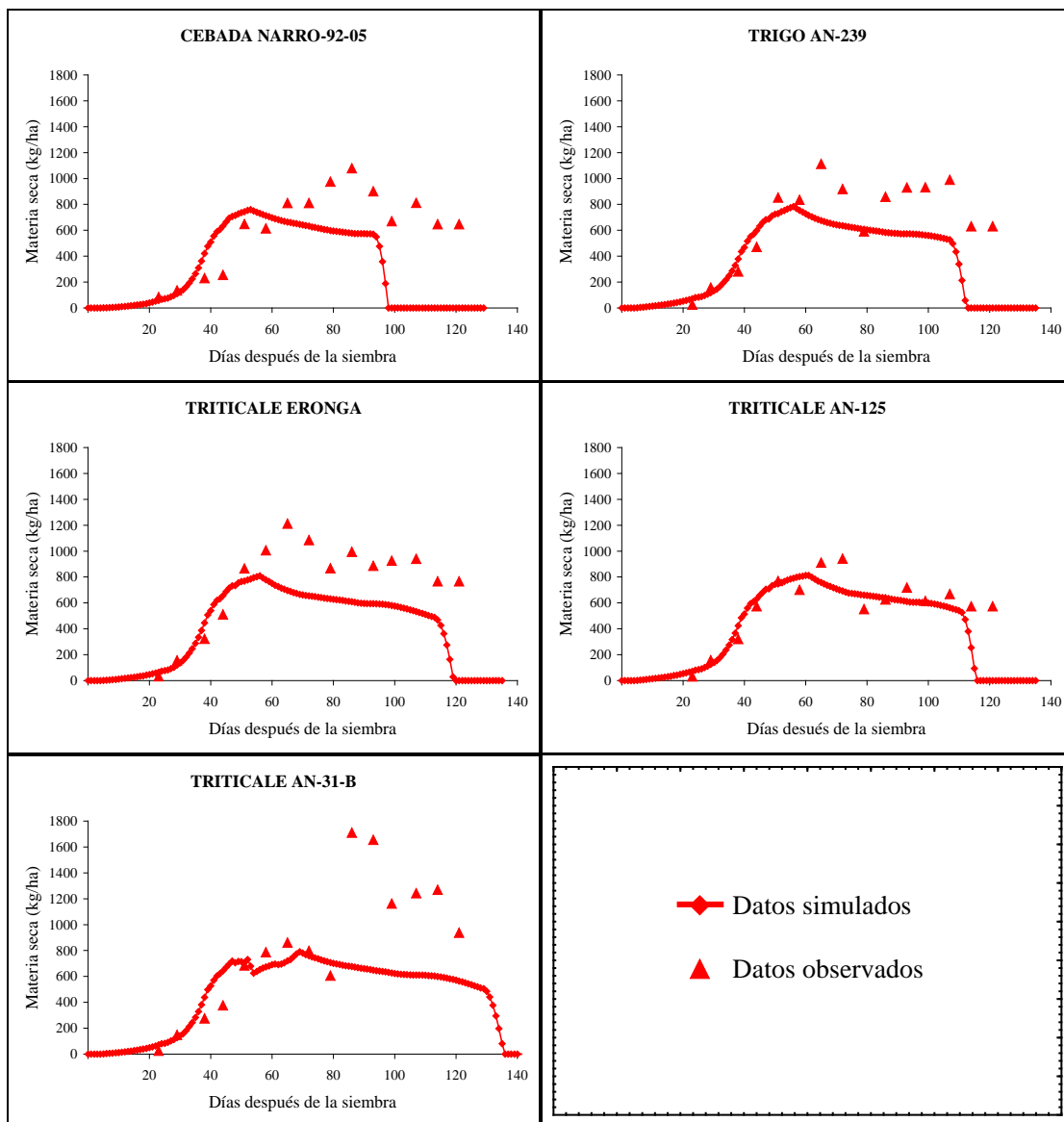


Figura 4.3. Acumulación de materia seca parcial en hoja durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

Los indicadores de la calibración indican que en la cebada (NARRO-92-05) se obtuvo el menor grado de ajuste ( $r^2=0.09$ ; Cuadro 4.3), esto se explica por la caída a cero de los valores simulados a los 100 días después de la siembra lo que coincide con la finalización de crecimiento de este material y para el resto de los cultivos también se obtuvieron valores de  $r^2$  bajos aunque aceptables. En todos los materiales los valores de  $r^2$  son bajos aunque las demás variables presenten buena relación entre simulados y observados, además la simulación de los modelos utilizados como ejemplos presentan al

igual baja capacidad de simulación en este componente del rendimiento lo que indica que el programa requiere de mejoras en la simulación de esta variable.

Cuadro 4.3. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la calibración para la acumulación de materia seca en hoja en los cultivos y variedades utilizados.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE  |
|----------------------|-------|-------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.09  | 424.8 |
| Trigo (AN-239)       | 0.42  | 334.3 |
| Triticale (Eronga)   | 0.48  | 346.9 |
| Triticale (AN-125)   | 0.54  | 196.6 |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.36  | 483.4 |

#### **4.1.4 Acumulación de materia seca parcial en grano.**

Los resultados obtenidos de la calibración para la variable acumulación de materia seca en grano se presentan en la Figura 4.4 donde se observa que el llenado de grano se inicia entre los 65 y 85 días después de la siembra y en general se encontró una buena relación entre los valores observados y simulados en todos los materiales.

Los indicadores estadísticos de calibración obtenidos de los datos simulados con los observados para esta variable, indican lo siguiente: un  $r^2$  de 0.58 para cebada (NARRO-92-05), y valores de RMSE de 706.1 kg ha<sup>-1</sup>; Travasso y Magrin (1998) reportan una RMSE de 397 kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano en Argentina, así que la variabilidad obtenida en este trabajo puede considerarse alta, esta dispersión se explica por la diferencia entre observados y simulados al final del llenado de grano. En trigo (AN-239) se obtuvo una  $r^2$  de 0.78 en el cual supera el valor de  $r^2$  de 0.74 encontrado por Rodríguez *et al.* (1990) al usar CERES trigo en la simulación de rendimiento de grano y crecimiento de forraje, la RMSE fue de 565.1 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que Ghaffari *et al.* (2001) reportan una RMSE de 240 kg ha<sup>-1</sup>, por otra parte Moreno-Sotomayor y Weiss (2004) en Nebraska, reportan RMSE de 811 kg ha<sup>-1</sup> y Saseendran *et al.* (2004) reportan una RMSE de 363 kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano, lo anterior indica que los 564.1 kg ha<sup>-1</sup> de desviación estándar del error obtenida en la presente investigación es aceptable considerando también que el rendimiento máximo se estimó en los 3,500 kg ha<sup>-1</sup>. Para el triticale (Eronga) se obtuvo una  $r^2$  de 0.98, y una RMSE de 463.2 kg ha<sup>-1</sup>, para triticale (AN-125) una  $r^2$  de 0.94 y una RMSE de 761.7 kg ha<sup>-1</sup> y para triticale (AN-31-B) se obtuvo una  $r^2$  de 0.95 con una RMSE de 920.2 kg ha<sup>-1</sup>.

La desviación estándar del error obtenida en los últimos dos materiales, aunque parece elevado podría decirse que es aceptable ya que los rendimientos se estimaron en 4,500 y 6,500 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. Cabe mencionar que en el modelo del triticale (Eronga) se obtuvo un buen ajuste como se aprecia en la Figura 4.4, ya que su error es de 463.2 kg ha<sup>-1</sup> y su rendimiento se estimó en 5,500 kg ha<sup>-1</sup> es decir un sesgo del 8.4 %.

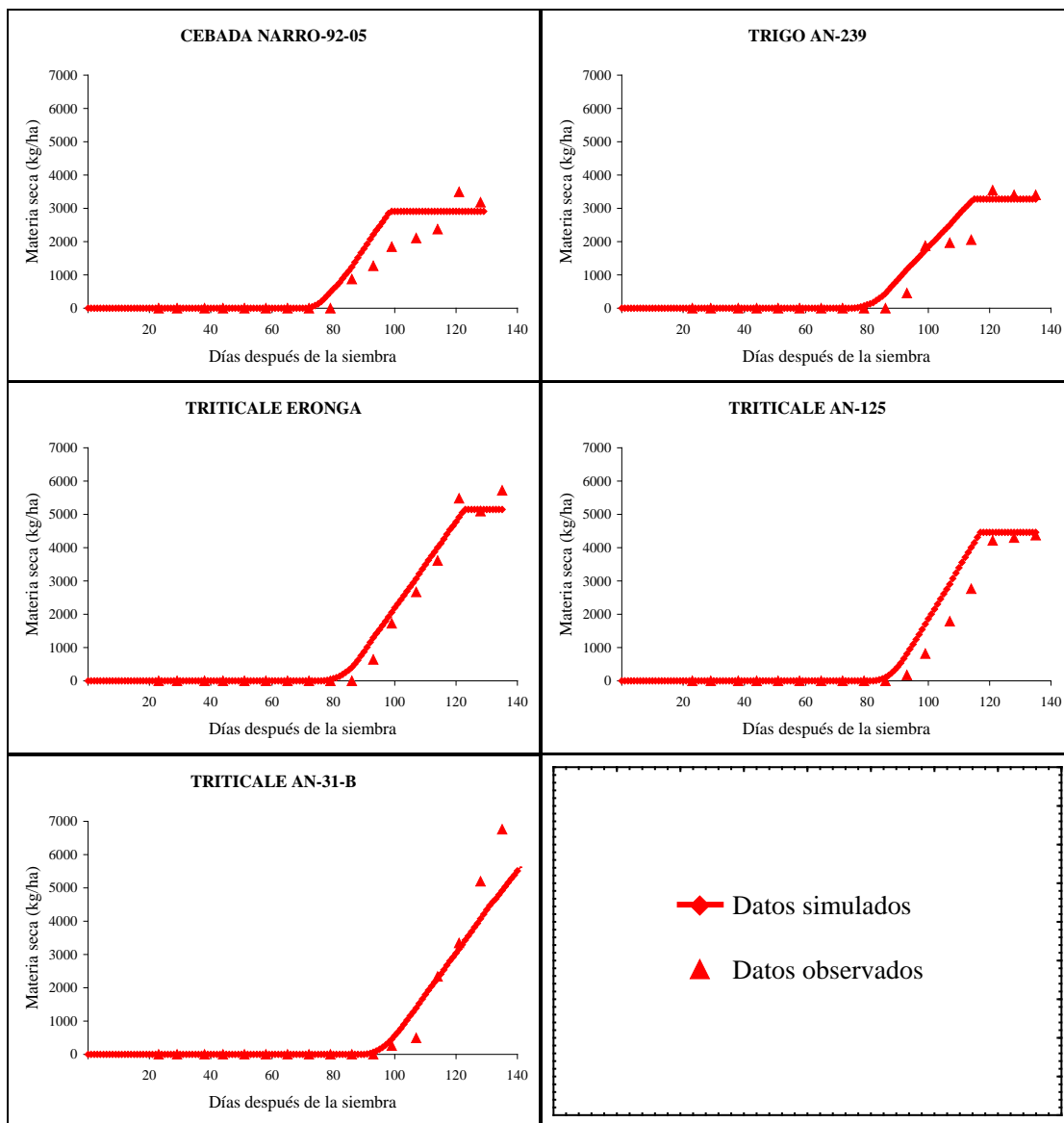


Figura 4.4. Acumulación de materia seca parcial en grano durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

## 4.2 Validación de DSSAT

La validación se realizó para los materiales de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239) y triticale (AN-31-B). Para esto, se utilizaron los datos medidos en campo del ciclo primavera-verano 2008, y en DSSAT se utilizaron los coeficientes genéticos obtenidos en el proceso de calibración del ciclo anterior (2007).

### 4.2.1 Acumulación de materia seca parcial aérea.

En la Figura 4.5 se presentan los valores observados y simulados por el modelo, en esta se aprecia que en los tres materiales, el modelo sobreestima ligeramente al inicio del ciclo y en el caso de la cebada (NARRO-92-05) subestima al finalizarlo. En el triticale (AN-31-B) un desfase durante todo el ciclo de cultivo.

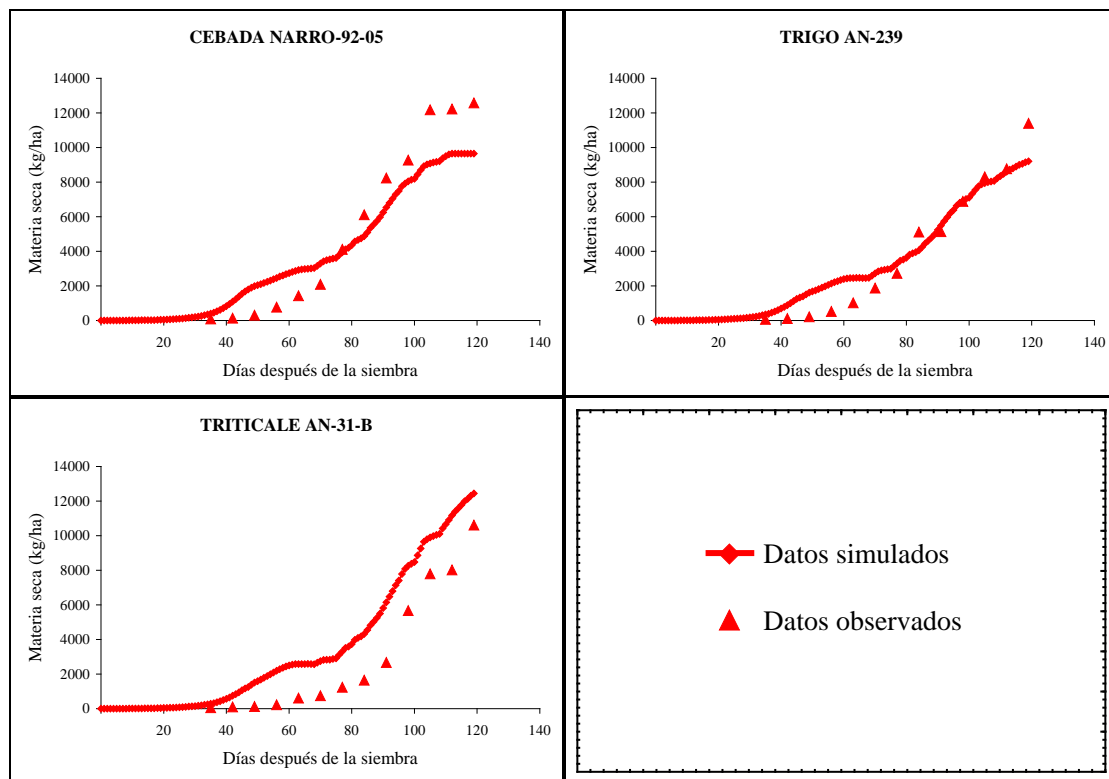


Figura 4.5. Acumulación de materia seca aérea, parcial durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0 calibrado.

El grado de asociación entre valores simulados con los observados, al validar los modelos presenta  $r^2$  buenos sin embargo su dispersión es elevada (Cuadro 4.4) sobre todo en el triticale (AN-31-B) de donde se estimó en  $2184.4 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Todo esto indica que el modelo ofrece estimaciones aceptables, pero que requiere de mayor información de campo y trabajo de calibración para disminuir su sesgo.

Cuadro 4.4. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la validación para la acumulación de materia seca parcial aérea en los cultivos y variedades utilizados.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE   |
|----------------------|-------|--------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.97  | 1779.2 |
| Trigo (AN-239)       | 0.96  | 1059.3 |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.96  | 2184.4 |

#### **4.2.2 Acumulación de materia seca parcial en tallo.**

Los valores observados y simulados por el modelo calibrado para la acumulación de materia seca en el componente tallo se presentan en la Figura 4.5.

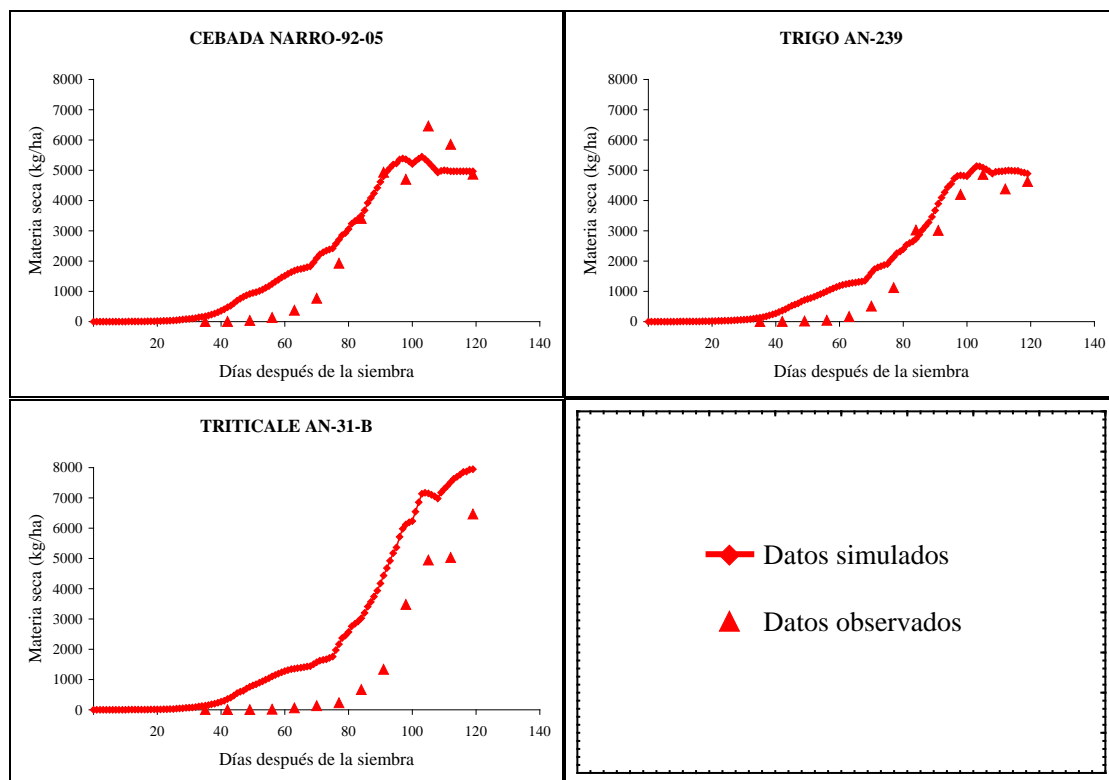


Figura 4.6. Acumulación de materia seca parcial en tallo durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0 calibrado.

El grado de asociación entre valores simulados y observados, presenta un  $r^2$  (Cuadro 4.5) bueno lo cual se explica por el comportamiento similar en la forma de

crecimiento que hay en lo simulado y lo observado, pero el grado de error (RMSE) entre estos valores indica, al igual que en la acumulación de materia seca parcial aérea, que existe una estimación pobre por parte del modelo.

Cuadro 4.5. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos en la validación para la acumulación de materia seca en tallo de los cultivos y variedades utilizados.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE   |
|----------------------|-------|--------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.94  | 832.7  |
| Trigo (AN-239)       | 0.96  | 718.0  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.92  | 1854.1 |

#### **4.2.3 Acumulación de materia seca parcial en grano.**

En la Figura 4.7 se presentan los valores observados y los simulados por el modelo, donde se puede apreciar el grado de precisión con que simula el modelo calibrado.

El grado de asociación entre valores simulados con los observados, presenta un coeficiente de determinación de 0.91 para la cebada (NARRO-92-05), un RMSE de 786.5 kg ha<sup>-1</sup> que esta 389.5 kg ha<sup>-1</sup> por arriba de lo reportado por Travasso y Magrin (1998). La  $r^2$  obtenida al validar el modelo de trigo (AN-239) fue de 0.91, y el RMSE fue de 502.4 kg ha<sup>-1</sup>, el cual estuvo, 262.4 kg ha<sup>-1</sup> por arriba de lo reportado por Ghaffari *et al.* (2001) y 139.4 kg ha<sup>-1</sup> por arriba de lo reportado por Saseendran *et al.* (2004). El grado de ajuste para el triticale (AN-31-B) fue una  $r^2$  de 0.97 y un RMSE de 973.1 kg ha<sup>-1</sup>.

Los resultados obtenidos al validar el modelo muestran errores superiores a los reportados por los diferentes autores, pero considerando que en el experimento de campo de la presente investigación se midió únicamente la respuesta del cultivo a una práctica de manejo, el modelo simula de forma aceptable el inicio de llenado de grano y el rendimiento total.

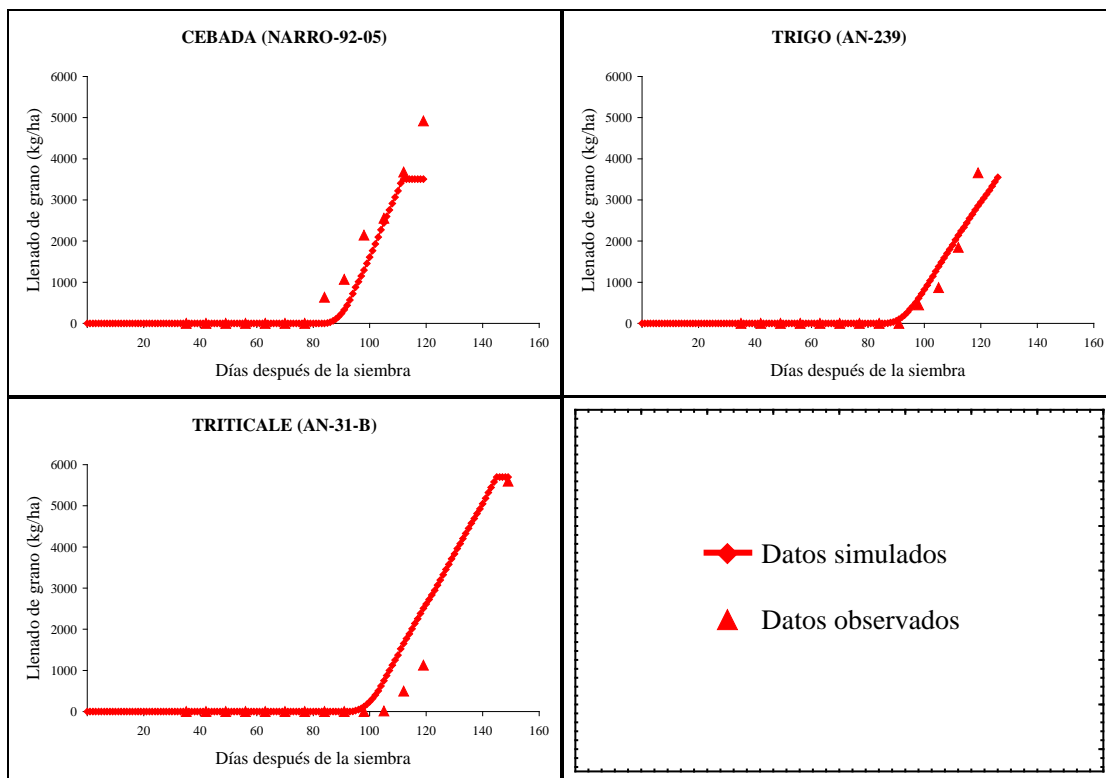


Figura 4.7. Acumulación de materia seca parcial en grano durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

### 4.3 Descripción del modelo construido con Stella 9.0.2.

El modelo denominado AN-CER está compuesto por cuatro submodelos o sectores los cuales se describen como: condiciones climáticas, manejo, crecimiento del cultivo y componentes químicos del forraje. El modelo corre en pasos diarios desde la fecha de siembra hasta la fecha de cosecha.

#### 4.3.1 Submodelo de condiciones climáticas.

Este submodelo sirve para simular las temperaturas medias diarias ( $T_{\text{día}}$ ), convertir esa temperatura a Grados-Desarrollo Día (GDD día) y acumularlos en la variable de estado GDD acum. Para la simulación de temperaturas y acumulación de GDD, el submodelo se basa en las fechas de siembra y cosecha definidas por el usuario. Este submodelo tiene además una variable auxiliar que es cambio de temperatura (TEMP cambio) que se utiliza para simular diferentes escenarios de temperatura definidos por el usuario (Figura 4.8).



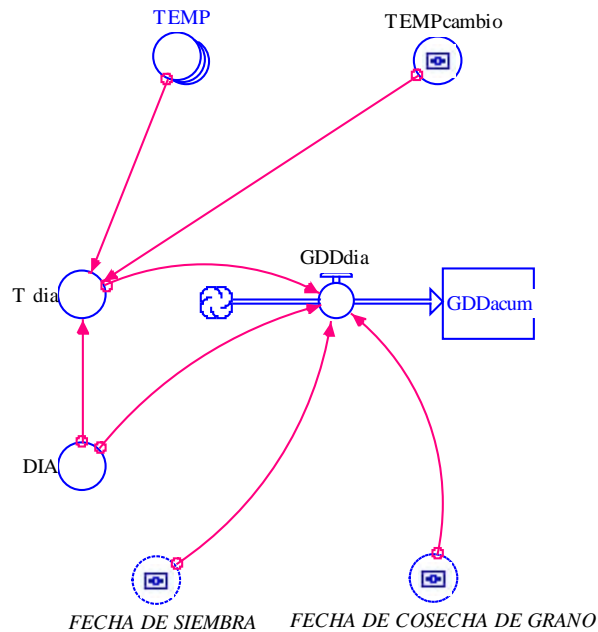


Figura 4.8. Modelo conceptual del submodelo de condiciones climáticas en el modelo AN-CER.

### GDD Acumulados.

Los GDD acum representan el tiempo térmico o grados día de desarrollo en grados centígrados acumulados a partir de la fecha de siembra, estos se acumulan de acuerdo a la ecuación:

$$\text{GDD acum (t)} = \text{GDD acum (t-dt)} + (\text{GDD día}) * dt;$$

Los GDD día se calculan a partir de la ecuación propuesta por Rajput (1980) y Ritchie, (1998), donde se consideró 0 °C como temperatura base para los tres cultivos.

$\text{GDD día} = \text{TMD} - \text{Tb}$ ; donde TMD es la temperatura media diaria (°C) y Tb es la temperatura base para cereales de grano pequeño (°C). Los GDD por día se obtienen de un generador de temperaturas diarias (TEMP) que trabaja con la distribución Normal parametrizada con las temperaturas medias y desviación estándar mensuales obtenidas de registros climáticos históricos de 12 años medidos en la localidad donde se realizó el experimento de campo.

### **Cambio de temperatura.**

La variable TEMP cambio es una variable auxiliar con la que el usuario puede simular el crecimiento del cultivo considerando cambios en la temperatura para representar el cambio climático.

#### **4.3.2 Submodelo de manejo.**

Este submodelo permite simular diferentes escenarios de manejo. Está compuesto por tres variables auxiliares que son genotipo y fechas de siembra y de cosecha; estas variables se pueden modificar por el usuario de acuerdo al interés de simulación. Es decir, el modelo tiene la capacidad de simular diferentes fechas de siembra, así como programar fechas de cosecha, para cinco materiales genéticos de cereales, donde se utiliza un código (1 a 5) para cada genotipo: el 1 para la cebada (NARRO 92-05), el 2 para el trigo (AN-239), el 3 para el triticale (Eronga), el 4 para el triticale (AN-125) y el 5 para el triticale (AN-31-B) (Figura 4.9).

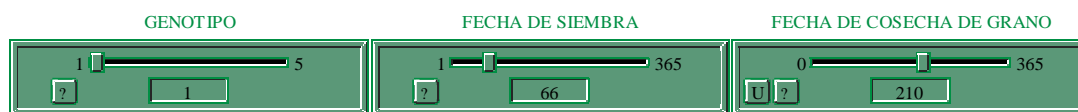


Figura 4.9. Controles de manejo para el modelo AN-CER.

#### **4.3.3 Submodelo de crecimiento del cultivo.**

Este submodelo está compuesto por seis variables que son materia seca parcial (MSP), materia seca para forraje (MSF), altura (A), relación hoja tallo (RHT), índice de área foliar (IAF) y grano (G) (Figura 4.10).

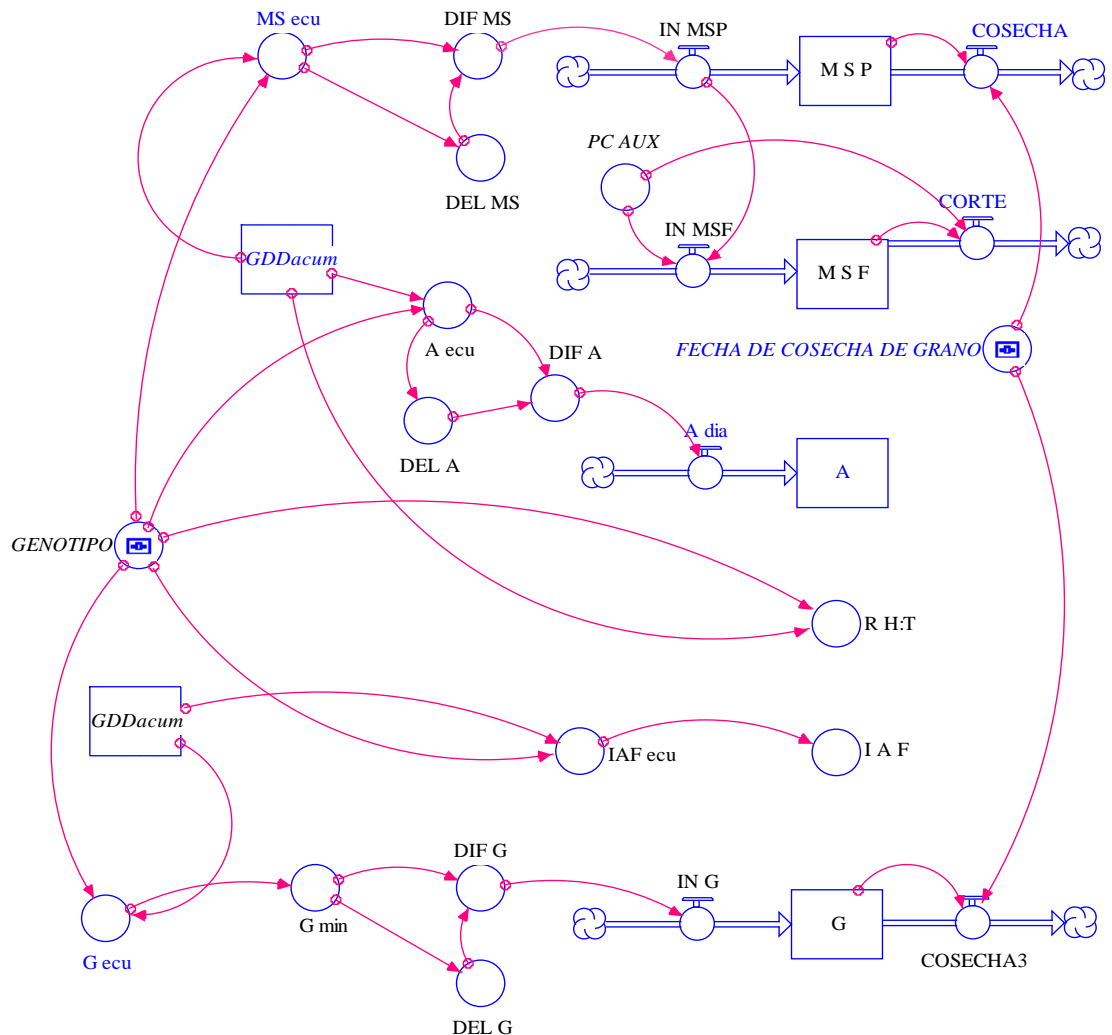


Figura 4.10. Modelo conceptual del submodelo de crecimiento del cultivo en el modelo AN-CER.

### Acumulación de materia seca parcial.

Esta variable se calcula mediante una variable de estado (MSP) que es definida por la ecuación:

$$MSP(t) = MSP(t-dt) + (IN\ MSP) * dt;$$

Donde IN MSP es el incremento de materia seca diaria en  $kg\ ha^{-1}$  que proviene de la diferencia de acumulación de materia seca del tiempo t menos la acumulación en el tiempo t-1 y dt es el cambio en el tiempo. La acumulación de materia seca es estimada mediante una función no lineal (modelo Gauss) con la variable independiente GDD acum (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Ecuaciones utilizadas en el modelo para estimar la acumulación de materia seca parcial.

| Genotipo           | Ecuación   | r <sup>2</sup> |
|--------------------|--|----------------|
| Cebada Narro 92-05 | $9871.1885 \cdot \exp(-((1762.1144 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 458.4188^2))$ | 0.7973         |
| Trigo AN-239       | $9971.7733 \cdot \exp(-((1984.0962 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 539.5713^2))$ | 0.9258         |
| Triticale Eronga   | $12497.186 \cdot \exp(-((2226.1952 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 698.1772^2))$ | 0.9169         |
| Triticale AN-125   | $10904.33 \cdot \exp(-((2362.0112 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 711.5882^2))$  | 0.9278         |
| Triticale AN-31-B  | $13659.482 \cdot \exp(-((2217.1255 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 530.1817^2))$ | 0.9435         |

### Acumulación de materia seca para forraje.

La materia seca para forraje (MSF) se estima por medio de una variable de estado a partir de la ecuación:

$MSF(t) = MSF(t - dt) + (IN\ MSF) \cdot dt$ ; donde IN MSF es el incremento de materia seca diaria en  $kg\ ha^{-1}$ , obtenida de la misma forma que se estima el incremento en materia seca parcial y dt es el cambio en el tiempo. Para la acumulación de materia seca para forraje, la cosecha se realiza cuando la proteína cruda (PC) en el forraje se encuentra aproximadamente en 12 %.

### Altura.

La variable altura (A) es una variable de estado en la que se acumula el crecimiento en centímetros sumando los incrementos de altura por día (A día) de acuerdo con la ecuación:

$$A(t) = A(t - dt) + (A\ día) \cdot dt$$

Donde A día es el incremento de altura en centímetros que proviene de la diferencia de altura en el tiempo t menos la acumulación en el tiempo t-1 y dt es el cambio en el tiempo. La altura es estimada mediante funciones no lineales (modelo Hoerl y Gauss) con la variable independiente GDD acum (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7. Relaciones entre la variable GDD acum con el incremento de altura del cultivo.

| Genotipo           | Ecuación  | r <sup>2</sup> |
|--------------------|---|----------------|
| Cebada Narro-92-05 | $5.3921402e-006 \cdot (0.99873641^{\text{GDDacum}}) \cdot (\text{GDDacum}^{2.4782849})$ | 0.9365         |
| Trigo AN-239       | $65.093269 \cdot \exp(-((1859.9824 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 690.45^2))$            | 0.9190         |
| Triticale Eronga   | $84.918938 \cdot \exp(-((1957.94 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 765.48412^2))$           | 0.9677         |
| Triticale AN-125   | $77.382968 \cdot \exp(-((2019.5579 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 738.04514^2))$         | 0.9561         |
| Triticale AN-31-B  | $108.18082 \cdot \exp(-((2216.9002 - \text{GDDacum})^2)/(2 \cdot 685.6296^2))$          | 0.9637         |

### Relación Hoja:Tallo.

La R HT es un cociente obtenido de la cantidad de hoja y la cantidad de tallo que va acumulando el cultivo. Esta relación es calculada por el modelo por medio de ecuaciones de potencia (Cuadro 4.8) entre GDD acum y el cambio que sufre esta relación. Cuando el objetivo del cultivo es la producción de forraje, las estimaciones de R HT se hicieron hasta después de que el cultivo acumuló más de 370 GDD acumulados desde la siembra.

Cuadro 4.8. Ecuaciones utilizadas por el modelo para la estimación de la relación entre hoja y tallo en cada uno de los genotipos.

| Genotipo           | Ecuación  | r <sup>2</sup> |
|--------------------|---|----------------|
| Cebada Narro-92-05 | $2.1009e009*(GDDacum-28.8041)^{-3.0927}$            | 0.8304         |
| Trigo AN-239       | $262977.48*(0.9993^{GDDacum})*(GDDacum^{-1.5532})$  | 0.7434         |
| Triticale Eronga   | $5.0957e009*(1.0013^{GDDacum})*(GDDacum^{-3.3815})$ | 0.9536         |
| Triticale AN-125   | $85346969*(1.0004^{GDDacum})*(GDDacum^{-2.6428})$   | 0.8892         |
| Triticale AN-31-B  | $218.4553*(0.9975^{GDDacum})*(GDDacum^{-0.2101})$   | 0.7205         |

### Índice de Área Foliar.

El IAF se calculó por medio de una variable auxiliar definida por funciones polinomiales de tercer grado (Cuadro 4.9), establecidas para cada uno de los genotipos. La variable independiente fue GDD acum.

Cuadro 4.9. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar el comportamiento del IAF en cada uno de los genotipos.

| Genotipo           | Ecuación   | r <sup>2</sup> |
|--------------------|--|----------------|
| Cebada Narro-92-05 | $-0.7161+0.0019*GDDacum+1.1843e-006*GDDacum^2+(-1.0929e-009*GDDacum^3)$    | 0.7629         |
| Trigo AN-239       | $-0.8983+0.0030*GDDacum+(-1.5249e-006*GDDacum^2)+1.1817e-010*GDDacum^3$    | 0.7392         |
| Triticale Eronga   | $-0.8186+0.0024*GDDacum+(-3.9799e-009*GDDacum^2)+(-5.2060e-010*GDDacum^3)$ | 0.8817         |
| Triticale AN-125   | $-1.2123+0.0041*GDDacum+(-2.1401e-006*GDDacum^2)+1.8951e-010*GDDacum^3$    | 0.7761         |
| Triticale AN-31-B  | $-0.1573+0.00045*GDDacum+7.9638e-007*GDDacum^2+(-4.0729e-010*GDDacum^3)$   | 0.5962         |

### Grano.

La acumulación de grano (G) es representada por una variable de estado definida por la ecuación:

$G(t) = G(t - dt) + (IN G) * dt$ ; donde IN G es el incremento de grano por día en  $kg ha^{-1}$  obtenida como la diferencia del grano en el tiempo t menos el grano en el tiempo t-1 que es calculado mediante modelos cuadráticos (Cuadro 4.10). La variable independiente son los GDD acumulados en cada uno de los genotipos con que trabaja el modelo y dt es el cambio en el tiempo.

Cuadro 4.10. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar la acumulación y rendimiento de grano.

| Genotipo           | Ecuación   | r <sup>2</sup> |
|--------------------|--|----------------|
| Cebada Narro-92-05 | $-6484.3205 + 6.8898 * GDDacum + (-0.0010 * GDDacum^2)$  | 0.5624         |
| Trigo AN-239       | $-18991.508 + 18.9470 * GDDacum + (-0.0040 * GDDacum^2)$ | 0.7122         |
| Triticale Eronga   | $-19114.937 + 16.6010 * GDDacum + (-0.0026 * GDDacum^2)$ | 0.8992         |
| Triticale AN-125   | $-26830.809 + 23.8972 * GDDacum + (-0.0045 * GDDacum^2)$ | 0.8951         |
| Triticale AN-31-B  | $-17095.797 + 12.1970 * GDDacum + (-0.0012 * GDDacum^2)$ | 0.9125         |

#### 4.3.4 Submodelo de composición química del forraje.

Este submodelo esta compuesto por dos variables auxiliares en las que se representa el contenido de proteína cruda (PC), y el contenido de fibra detergente acido (FDA) (Figura 4.11).

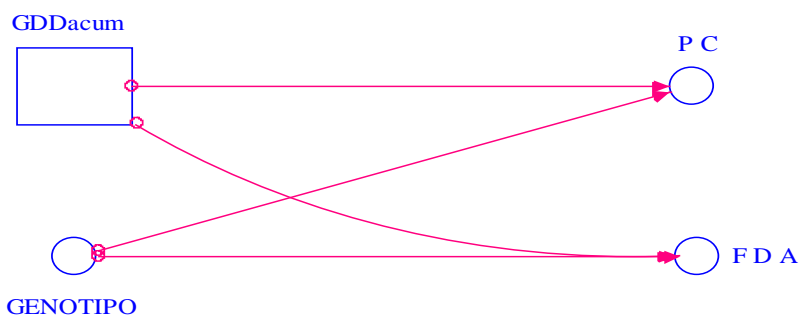


Figura 4.11. Modelo conceptual del submodelo de composición química del forraje en el modelo AN-CER.

#### Proteína cruda.

La PC se calcula por medio de una variable auxiliar de acuerdo con funciones no lineales (modelo Hoerl) (Cuadro 4.11) donde se relaciona con los GDD acumulados, para cada uno de los genotipos para los que simula el modelo.

Cuadro 4.11. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar el contenido de P C en la planta.

| Genotipo           | Ecuación   | r <sup>2</sup> |
|--------------------|--|----------------|
| Cebada Narro-92-05 | $1652347.7*(1.0006^{GDDacum})*(GDDacum^{-1.8065})$ | 0.9828         |
| Trigo AN-239       | $1025.4549*(0.9996^{GDDacum})*(GDDacum^{-0.5473})$ | 0.9651         |
| Triticale Eronga   | $4615.7931*(0.9997^{GDDacum})*(GDDacum^{-0.8005})$ | 0.9447         |
| Triticale AN-125   | $161.5172*(0.9993^{GDDacum})*(GDDacum^{-0.2402})$  | 0.9316         |
| Triticale AN-31-B  | $0.3509*(0.9982^{GDDacum})*(GDDacum^{0.8285})$     | 0.9984         |

### Fibra detergente ácido.

La FDA se calcula por medio de una variable auxiliar de acuerdo con funciones no lineales (modelo Hoerl) (Cuadro 4.12) en las cuales se considera como variable independiente los GDD acumulados, para cada uno de los genotipos para los que simula el modelo.

Cuadro 4.12. Ecuaciones utilizadas por el modelo para estimar el tendencia de FDA en la planta.

| Genotipo           | Ecuación   | r <sup>2</sup> |
|--------------------|--|----------------|
| Cebada Narro-92-05 | $0.0214*(0.9993^{GDDacum})*(GDDacum^{1.1615})$   | 0.9701         |
| Trigo AN-239       | $0.1237*(0.9994^{GDDacum})*(GDDacum^{0.9025})$   | 0.7989         |
| Triticale Eronga   | $3.5641+0.0434*GDDacum+(-1.2978e-005*GDDacum^2)$ | 0.8813         |
| Triticale AN-125   | $8.8550+0.0375*GDDacum+(-1.1324e-005*GDDacum^2)$ | 0.8209         |
| Triticale AN-31-B  | $0.6041*(0.9998^{GDDacum})*(GDDacum^{0.5963})$   | 0.8408         |

## 4.4 Evaluación del modelo AN-CER.

Para evaluar el modelo se realizaron 100 corridas por el modelo a pasos diarios del ciclo de cultivo con fecha de siembra el día 07 de marzo (día juliano 66) con los valores simulados se calcularon los promedios y su desviación estándar, y posteriormente se compararon estos valores simulados con los observados en el ciclo de cultivo del 2008, la capacidad de predicción se midió mediante r<sup>2</sup> y RMSE la cual mide el grado de dispersión o desviación estándar de los valores simulados de los observados.

### 4.4.1 Acumulación de materia seca parcial aérea.

La simulación con el modelo AN-CER presentó buena capacidad de predicción de acumulación de materia seca parcial aérea durante el ciclo de cultivo como se observa en la Figura 4.12, en esta se comparan los valores simulados con los observados.

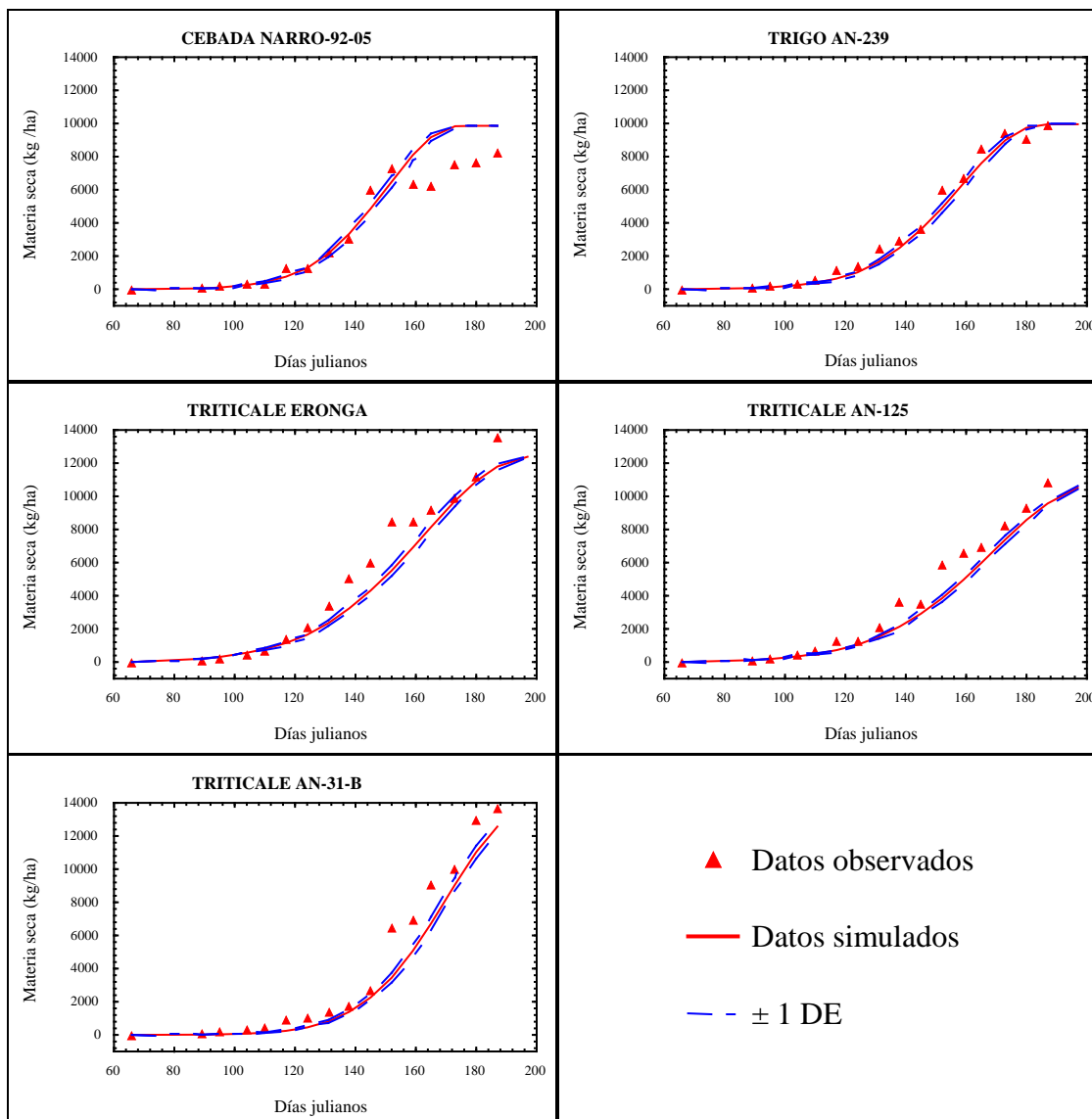


Figura 4.12. Acumulación de materia seca parcial aérea de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo, de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

De acuerdo con los indicadores estadísticos (Cuadro 4.13) la dispersión más significativa y la asociación más baja entre los valores simulados y los observados se presenta en la cebada (NARRO-92-05) esto se explica por la sobreestimación por el modelo al final del ciclo de  $1,600 \text{ kg ha}^{-1}$  aproximadamente. La predicción de acumulación de biomasa en el triticale (Eronga y AN-31-B) con el modelo AN-CER presentó un buen ajuste pero presenta una subestimación fuerte en los días 86 a 99 después de la siembra (días julianos 152 a 165) que va de los  $1,000$  a  $2,500 \text{ kg ha}^{-1}$ .



Cuadro 4.13. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar datos observados con simulados por AN-CER para la variable acumulación de materia seca parcial aérea.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE   |
|----------------------|-------|--------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.94  | 1366.1 |
| Trigo (AN-239)       | 0.98  | 501.2  |
| Triticale (Eronga)   | 0.96  | 1223.5 |
| Triticale (AN-125)   | 0.98  | 936.5  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.98  | 1284.7 |

Aunque los datos predichos por el modelo AN-CER presentan un fuerte grado de asociación con los datos observados, la precisión de la predicción es baja en algunos periodos del ciclo de cultivo. Cabe mencionar que al comparar los indicadores estadísticos obtenidos en la evaluación de las predicciones en DSSAT con los obtenidos en la evaluación del modelo AN-CER muestra que los coeficientes de determinación son parecidos pero el RMSE es mayor al evaluar el modelo AN-CER.

#### **4.4.2 Acumulación de materia seca para forraje.**

La predicción de acumulación de materia seca parcial hasta corte para forraje por el modelo AN-CER (Figura 4.13) se evaluó considerando el corte al momento en que la planta contaba con un 12 % de proteína cruda.

Cuadro 4.14. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar datos observados con los simulados por AN-CER para la acumulación de materia seca para forraje.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE   |
|----------------------|-------|--------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.95  | 244.6  |
| Trigo (AN-239)       | 0.96  | 362.2  |
| Triticale (Eronga)   | 0.98  | 782.3  |
| Triticale (AN-125)   | 0.95  | 564.6  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.92  | 1042.2 |

Al comparar los datos medidos en campo y los simulados por el modelo de predicción del rendimiento de forraje del triticale (AN-31-B) se presentó una subestimación fuerte en el día 86 después de la siembra (día juliano 152) lo cual explica la máxima dispersión y menor grado de asociación (Cuadro 4.14) de los 5 cultivos y variedades simulados.

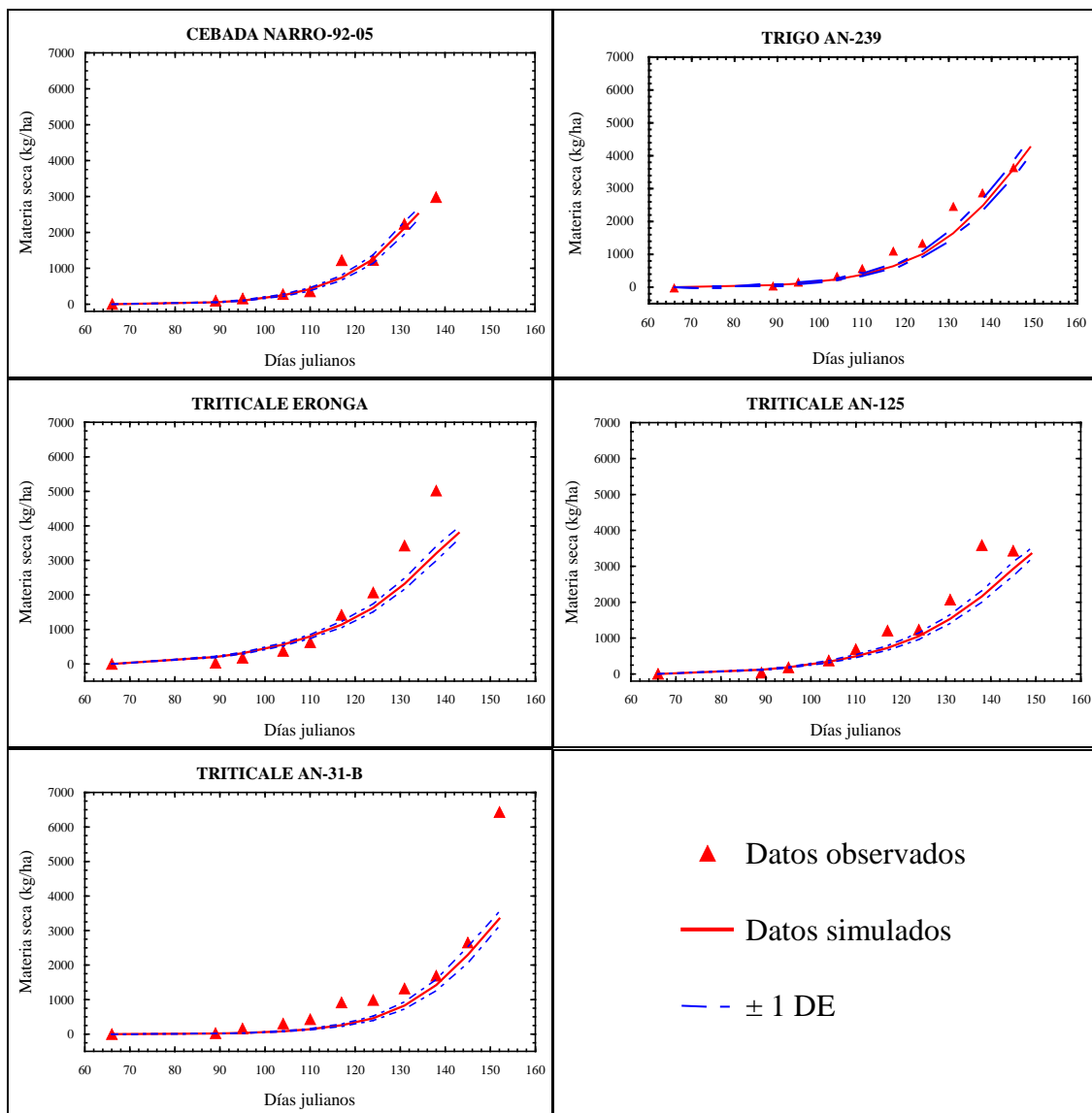


Figura 4.13. Materia seca hasta corte para forraje (12 % PC) de los cultivos de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

#### **4.4.3 Altura del cultivo.**

La predicción de la altura del cultivo se presenta en la Figura 4.14, en esta se hace una comparación de los valores simulados con los observados. De acuerdo a los datos observados el cultivo de triticale (Eronga) tuvo una altura de 78 cm, Colin *et al.* (2007) reportan una altura de 108 cm. La altura del cultivo en el triticale (AN-125) fue de 72 cm y en el cultivo de triticale (AN-31-B) de acuerdo a datos medidos en campo la altura fue de 98 cm, Cruz *et al.* (1998) reportan alturas de 150 y 170 cm en triticales en el estado de México al probar diferentes dosis de calcio y fósforo; por otra parte,

Ramírez *et al.* (2003) reportan alturas promedio de 66.27 cm en triticales bajo tratamientos de irradiación en el estado de México.

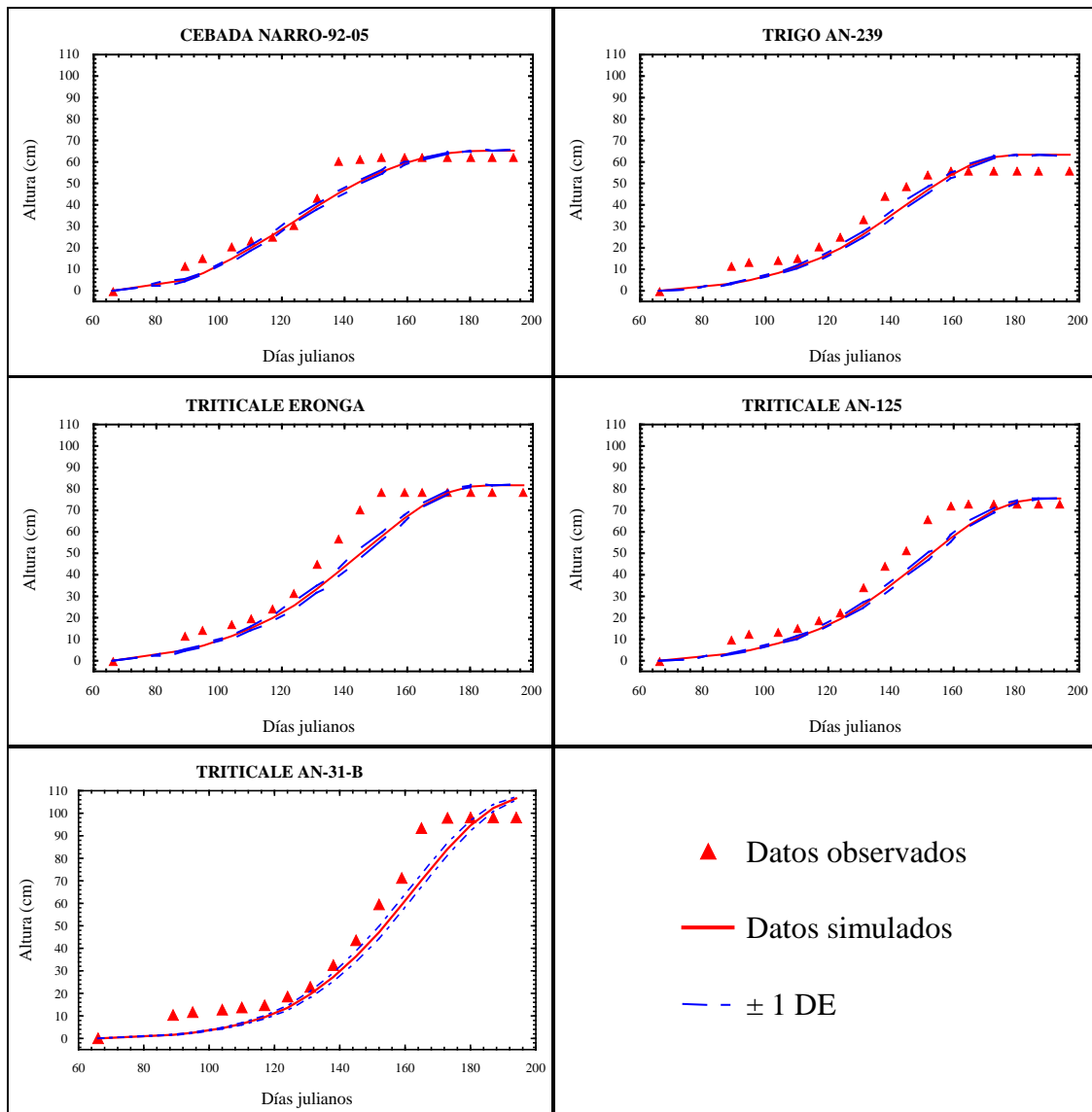


Figura 4.14. Altura del cultivo en (cm) de cebada, trigo y triticales de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

De acuerdo con los indicadores estadísticos (Cuadro 4.15) de la capacidad de predicción del modelo se observa que en todos los materiales existe un buen grado de asociación entre valores simulados con los datos observados y la desviación estándar del error no supera los 10 cm lo cual se explica por el ligero desfase que se presenta en la finalización del crecimiento de los cultivos.

Cuadro 4.15. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para altura del cultivo.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE |
|----------------------|-------|------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.94  | 5.8  |
| Trigo (AN-239)       | 0.95  | 6.8  |
| Triticale (Eronga)   | 0.94  | 9.6  |
| Triticale (AN-125)   | 0.95  | 7.9  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.96  | 9.8  |

#### **4.4.4 Relación hoja:tallo**

En la simulación por el modelo para RHT en la planta se presenta una sobreestimación al inicio del ciclo en los cultivos de cebada (NARRO-92-05) y triticale (AN-31-B) lo cual coincide con la mayor RMSE (Cuadro 4.16) encontrado en estos dos materiales al comparar los valores simulados por el modelo con los observados.

Cuadro 4.16. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER en la variable relación hoja tallo.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE |
|----------------------|-------|------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.90  | 5.6  |
| Trigo (AN-239)       | 0.83  | 2.7  |
| Triticale (Eronga)   | 0.87  | 1.6  |
| Triticale (AN-125)   | 0.84  | 1.7  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.91  | 4.6  |

En la Figura 4.15 se presentan los datos de la RHT observados y simulados por el modelo AN-CER durante el ciclo de cultivo.

Es importante destacar que en los cultivos de trigo (AN-239) y triticale (AN-31-B) la caída de RHT es más lenta que el resto de los materiales, esto coincide de la misma forma con la caída de proteína y por consiguiente se retarda el tiempo de corte para forraje con buen contenido proteico y con mayor rendimiento. La RHT del valor nutritivo del forraje, una alta relación hoja tallo se asocia frecuentemente con una buena calidad forrajera (Colin *et al.*, 2007).

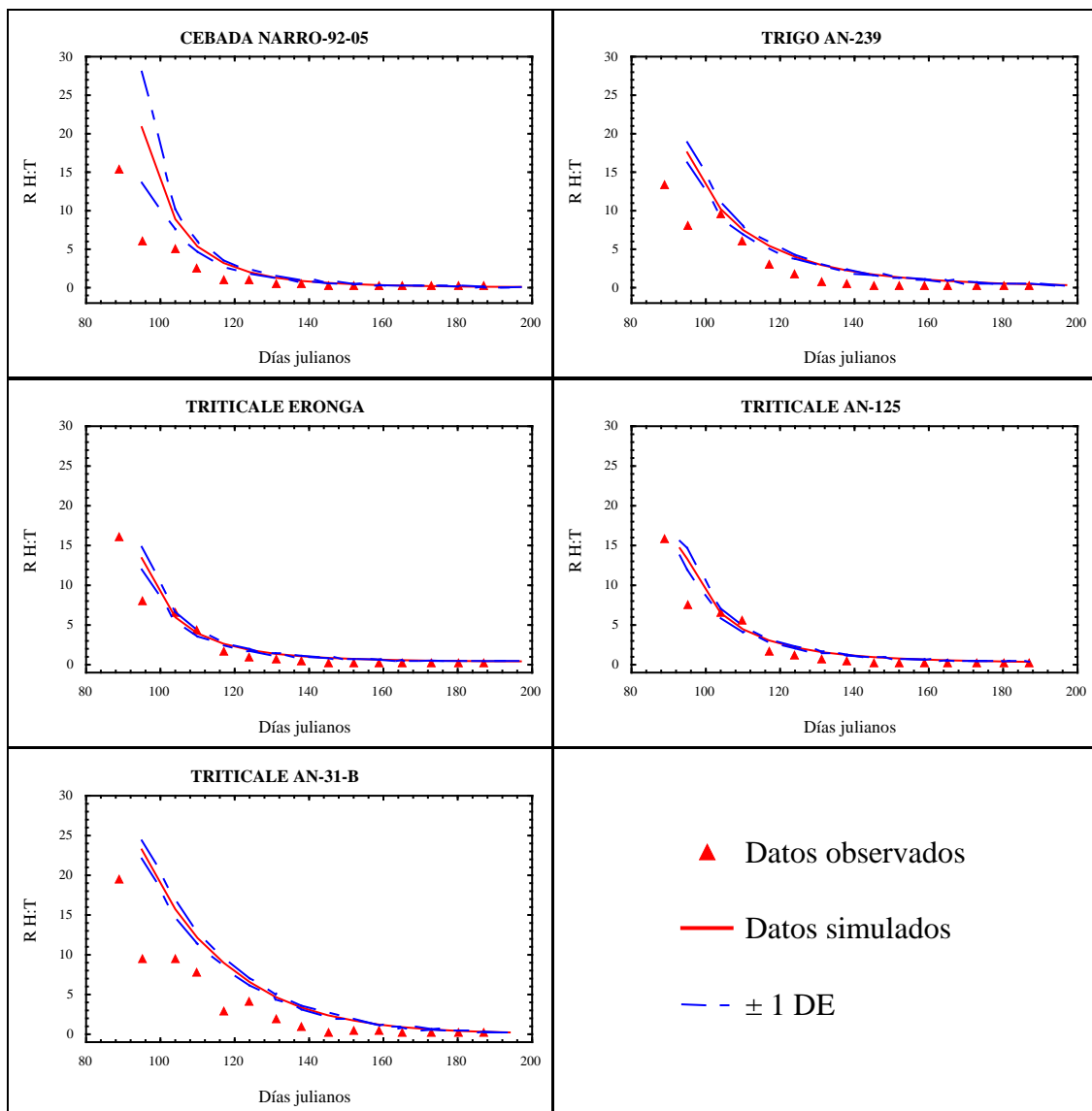


Figura 4.15. Relación hoja tallo de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

#### 4.4.5 Índice de área foliar

Con el modelo AN-CER fue posible estimar de forma aceptable el índice de área foliar como se observa en la Figura 4.16. El cultivo que alcanzó el valor más alto de IAF fue la cebada (NARRO-92-05; Cuadro 4.17) y el que presentó el menor fue el trigo (AN-239) con 0.8. Pacheco *et al.* (2007) reportan un IAF máximo de 0.98 en trigo forrajero en Argentina.

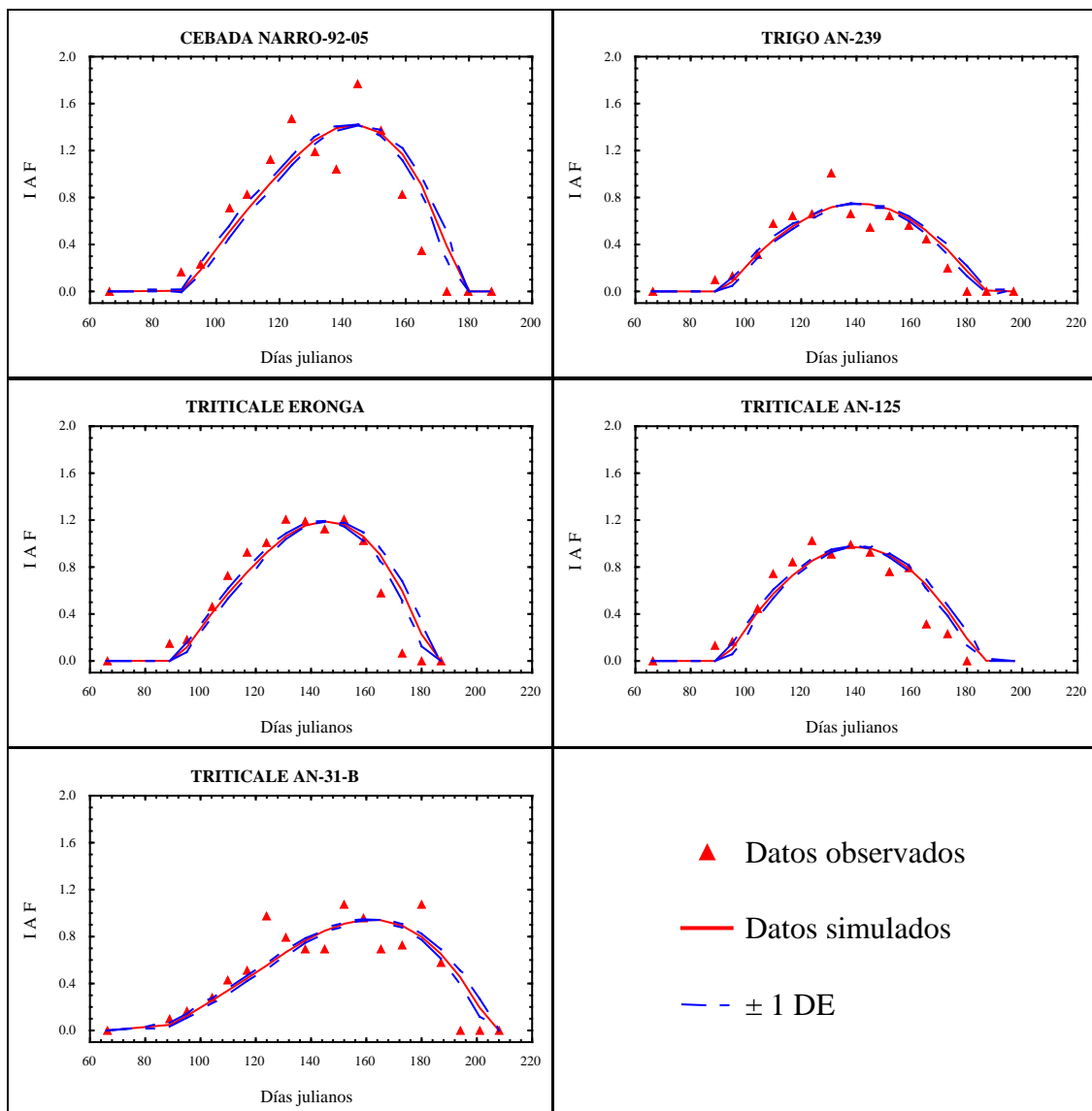


Figura 4.16. Índice de área foliar durante el ciclo de cultivo de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

Los días después de la siembra a los que se alcanzaron el máximo IAF en todos los cultivos se aproximó a los días en que se realizó el corte para forraje con un contenido de 12 % de PC, lo que indica que el valor máximo de IAF puede ser un buen indicador de corte para forraje con buen contenido proteico y con buen rendimiento.

La tendencia del IAF en el cultivo de triticale (AN-31-B) mostró que este material fue el más tardío ya que necesitó de 99 d para alcanzar su máximo IAF.

Cuadro 4.17. Índice de área foliar máximo y días después de la siembra a los que se alcanzo este.

| Cultivo y variedad   | IAF Máximo | Días después de la siembra |
|----------------------|------------|----------------------------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 1.5        | 74                         |
| Trigo (AN-239)       | 0.8        | 74                         |
| Triticale (Eronga)   | 1.2        | 76                         |
| Triticale (AN-125)   | 1.0        | 74                         |
| Triticale (AN-31-B)  | 1.0        | 99                         |

En los cultivo de cebada (NARRO-92-05) y triticale (AN-31-B) fue donde se presentó el coeficiente de determinación (Cuadro 4.18) más bajo al comparar los valores simulados con los observados lo cual fue debido al error experimental que se tuvo en los muestreos realizados sin embargo la RMSE fue de 0.28 lo que indica que es factible la estimación de IAF por el modelo.

Cuadro 4.18. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para el índice de área foliar.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE |
|----------------------|-------|------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.79  | 0.28 |
| Trigo (AN-239)       | 0.84  | 0.13 |
| Triticale (Eronga)   | 0.84  | 0.20 |
| Triticale (AN-125)   | 0.85  | 0.14 |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.74  | 0.20 |

#### **4.4.6 Grano.**

El modelo AN-CER logró simular de manera satisfactoria la acumulación de materia seca en grano, el modelo estima casi a la perfección el momento en que inició el llenado de grano (Cuadro 4.20) así como el rendimiento total. Al medir la capacidad de predicción por el modelo AN-CER se encontraron coeficientes de determinación altos al relacionar los valores simulados con los observados los cuales son superiores a los valores de  $r^2$  encontrados en el modelo desarrollado con DSSAT. La dispersión más elevada se presentó en el triticale (AN-31-B; Cuadro 4.19) lo cual se explica por la subestimación por parte del modelo en la finalización de llenado de grano. Las RMSE obtenidos en DSSAT son ligeramente menores que las obtenidas con el modelo de Stella en los cultivos de triticale (Eronga y AN-31-B) pero en el resto de los materiales es mayor.

Cuadro 4.19. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para llenado de grano.

| Cultivo y variedad   | $r^2$ | RMSE   |
|----------------------|-------|--------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.98  | 340.7  |
| Trigo (AN-239)       | 0.96  | 465.2  |
| Triticale (Eronga)   | 0.97  | 874.5  |
| Triticale (AN-125)   | 0.96  | 714.8  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.98  | 1193.4 |

El rendimiento del trigo (AN-239) se estimó en 3,400 kg ha<sup>-1</sup>, Álvarez et al. (2006) reportan rendimiento promedio de grano en trigo de 1,800 kg ha<sup>-1</sup> en el estado de Zacatecas, con poca disponibilidad de agua, en siembras al voleo sin corrugaciones, por otra parte Solís y Díaz (2001) reportan rendimiento promedio en trigo de 3,966 kg ha<sup>-1</sup> sin fertilización bajo condiciones de riego en Celaya, Guanajuato, en este mismo lugar Solís et al. (2002) reportan rendimiento promedio de 7,345 kg ha<sup>-1</sup> con fertilización bajo condiciones de riego. El rendimiento de grano en el presente estudio se estimó en 5,300, 4,400 y 6,000 kg ha<sup>-1</sup> para los triticales Eronga, AN-125 y AN-31-B respectivamente. Murillo et al. (2001) reportan rendimiento promedio de grano de 3,700 kg ha<sup>-1</sup> de 160 líneas de triticale evaluadas bajo condiciones de riego en La Paz, Baja California Sur, por otra parte Cruz *et al.* (1998) reportan rendimiento de 1,532 a 1,922 kg ha<sup>-1</sup> de grano en triticales en el estado de México al probar diferentes dosis de calcio y fósforo.

Cuadro 4.20. Valores observados de Inicio de llenado de grano en días después de la siembra y rendimiento total.

| Cultivo y variedad   | Inicio de llenado de grano | Rendimiento total |
|----------------------|----------------------------|-------------------|
| Cebada (NARRO-92-05) | 74                         | 3,600             |
| Trigo (AN-239)       | 94                         | 3,400             |
| Triticale (Eronga)   | 94                         | 5,300             |
| Triticale (AN-125)   | 94                         | 4,400             |
| Triticale (AN-31-B)  | 104                        | 6,000             |

En la Figura 4.17 se presentan los rendimientos de grano estimados en campo y los predichos por el modelo. De acuerdo a los datos observados el rendimiento de la cebada (NARRO-92-05) se estimó en 3,600 kg ha<sup>-1</sup>, Travasso y Magrin (1998) reportan rendimiento en grano de 2000 a 5500 kg ha<sup>-1</sup> de cebada en Argentina.



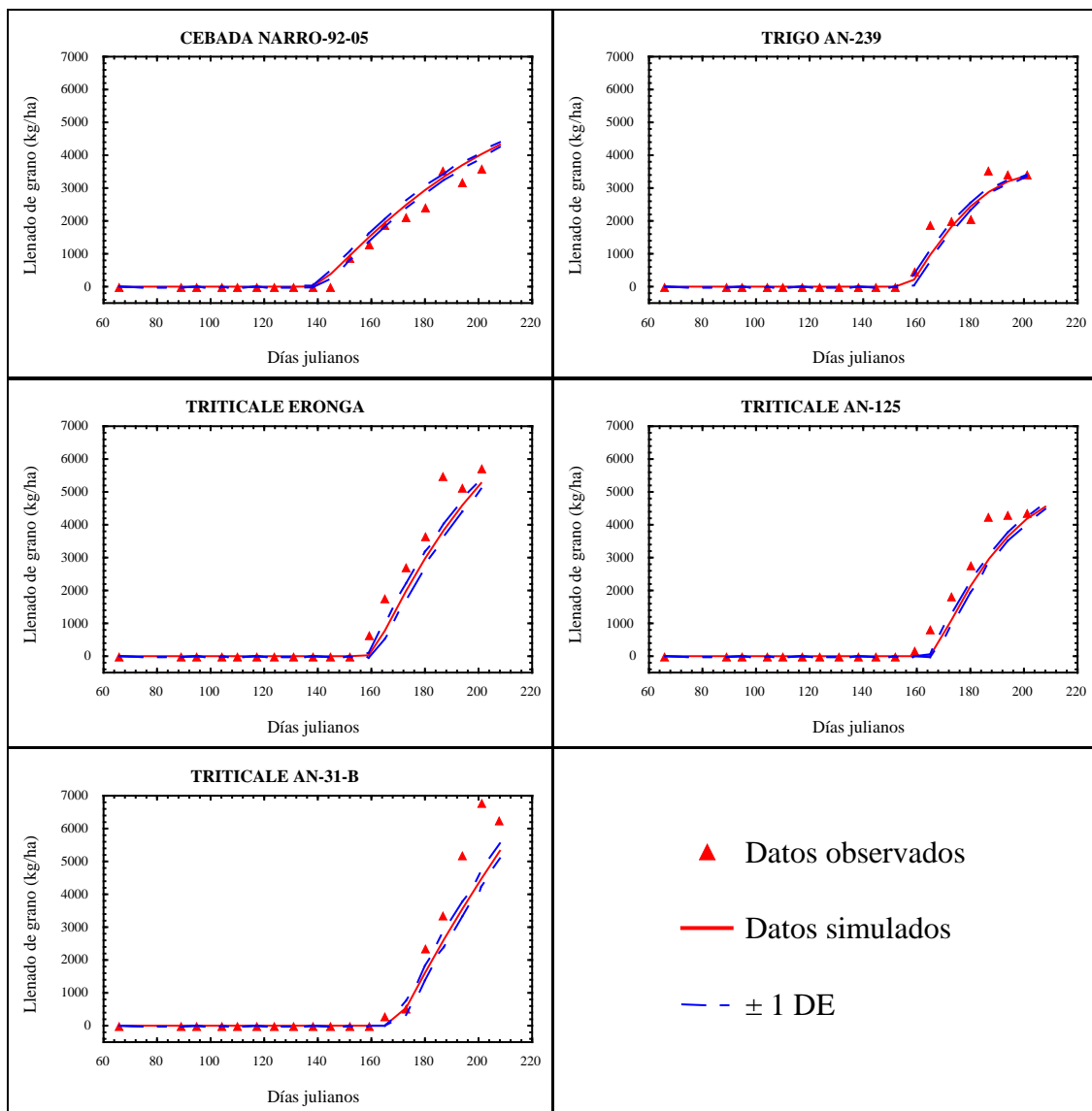


Figura 4.17. Llenado de grano de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

#### **4.4.7 Proteína cruda y fibra detergente ácido**

Los resultados de la simulación con el modelo AN-CER vs los valores observados de la tendencia que presentó la caída de PC y el aumento de FDA se muestran en la Figura 4.18 es importante mencionar que el comportamiento que sigue estas dos variables es más lento en algunos materiales como el triticale AN-31-B lo que coincide con el comportamiento del IAF, es decir a mayor duración de la etapa vegetativa, más lenta la caída de PC y mayor valor forrajero. Sin embargo la cebada (NARRO-92-05) presentó valores máximos de FDA de 35 % mientras que el resto de

los cultivos alcanzo valores de 45 % lo que indica que el forraje de cebada aun maduro puede presentar buena digestibilidad.

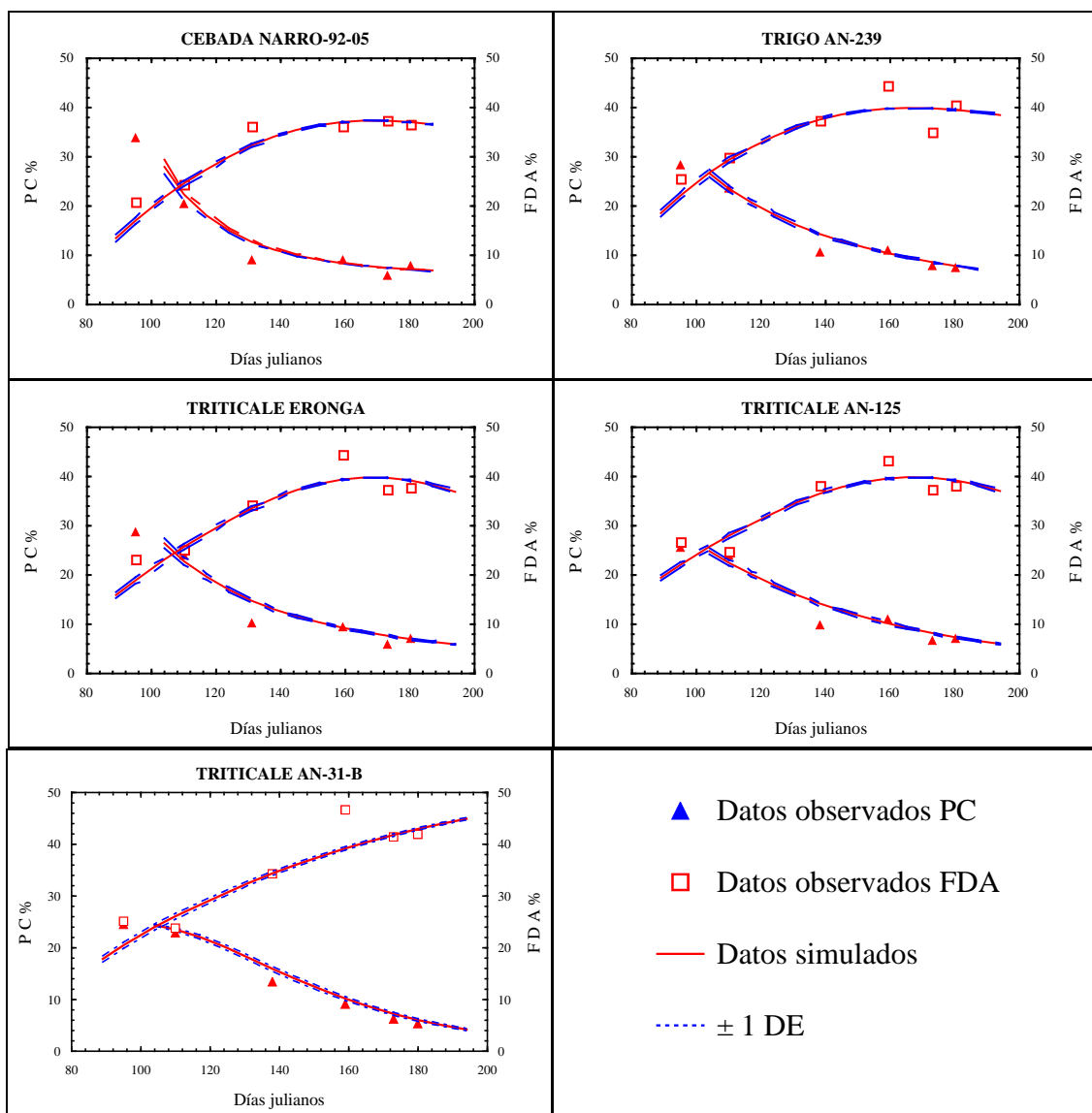


Figura 4.18. Porcentaje de proteína cruda y fibra detergente ácido en los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos observados y los simulados por AN-CER.

Los indicadores estadísticos (Cuadro 4.21) de la capacidad de predicción por el modelo para el comportamiento de PC y FDA durante el ciclo de cultivo mostraron un grado de asociación ( $r^2$ ) bueno y la RMSE más elevada para PC fue de 2.4 % en el triticale (Eronga) y en FDA fue de 3.7 % en el cultivo de triticale (AN-31-B).

Cuadro 4.21. Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y RMSE obtenidos al comparar los datos observados con los simulados por AN-CER para P C y F D A.

| Cultivo y variedad   | P C   |      | F D A |      |
|----------------------|-------|------|-------|------|
|                      | $r^2$ | RMSE | $r^2$ | RMSE |
| Cebada (NARRO-92-05) | 0.92  | 2.0  | 0.94  | 2.3  |
| Trigo (AN-239)       | 0.93  | 1.9  | 0.79  | 3.1  |
| Triticale (Eronga)   | 0.90  | 2.4  | 0.87  | 2.9  |
| Triticale (AN-125)   | 0.89  | 2.2  | 0.81  | 3.0  |
| Triticale (AN-31-B)  | 0.99  | 1.4  | 0.84  | 3.7  |

#### 4.5 Uso del modelo AN-CER.

En este apartado se realizó la predicción de la posible respuesta de los cultivos al incrementarse 3 °C la temperatura media diaria actual con el objeto de representar el efecto del calentamiento global y la influencia que tendría esto en el desarrollo durante el ciclo de cada uno de los cultivos estudiados en la presente investigación. Las variables analizadas fueron acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación de materia seca para forraje, índice de aérea foliar y contenido proteico.

##### **4.5.1 Acumulación de materia seca parcial aérea.**

En la Figura 4.19 se presenta la acumulación de materia seca parcial aérea en los cultivos de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239) y triticales (Eronga, AN-125 y AN-31-B), al considerar temperaturas medias actuales vs incremento de 3 °C en la temperatura media diaria actual. Se puede observar como el ciclo del cultivo se acorta en los cultivos debido a la rápida acumulación de GDD para completar el ciclo de crecimiento de las plantas (Torres, 1983), por otro lado como reportan Wilson y Cooper (1969) la temperatura puede modificar la anatomía y morfología de las hojas debido a que causa cambios en el tamaño de las celdas del mesófilo y la anatomía de los estomas, lo cual tiene influencia en el proceso de fotosíntesis por lo tanto se ocasiona una aceleración en la tasa de crecimiento del cultivo, así como la influencia de la temperatura en la velocidad de las reacciones químicas, dentro de los procesos fisiológicos en el crecimiento y desarrollo de las plantas; en las etapas iniciales de crecimiento las temperaturas altas acortan el tiempo requerido para la diferenciación de órganos vegetativos y florales (Castañeda *et al.*, 2004).

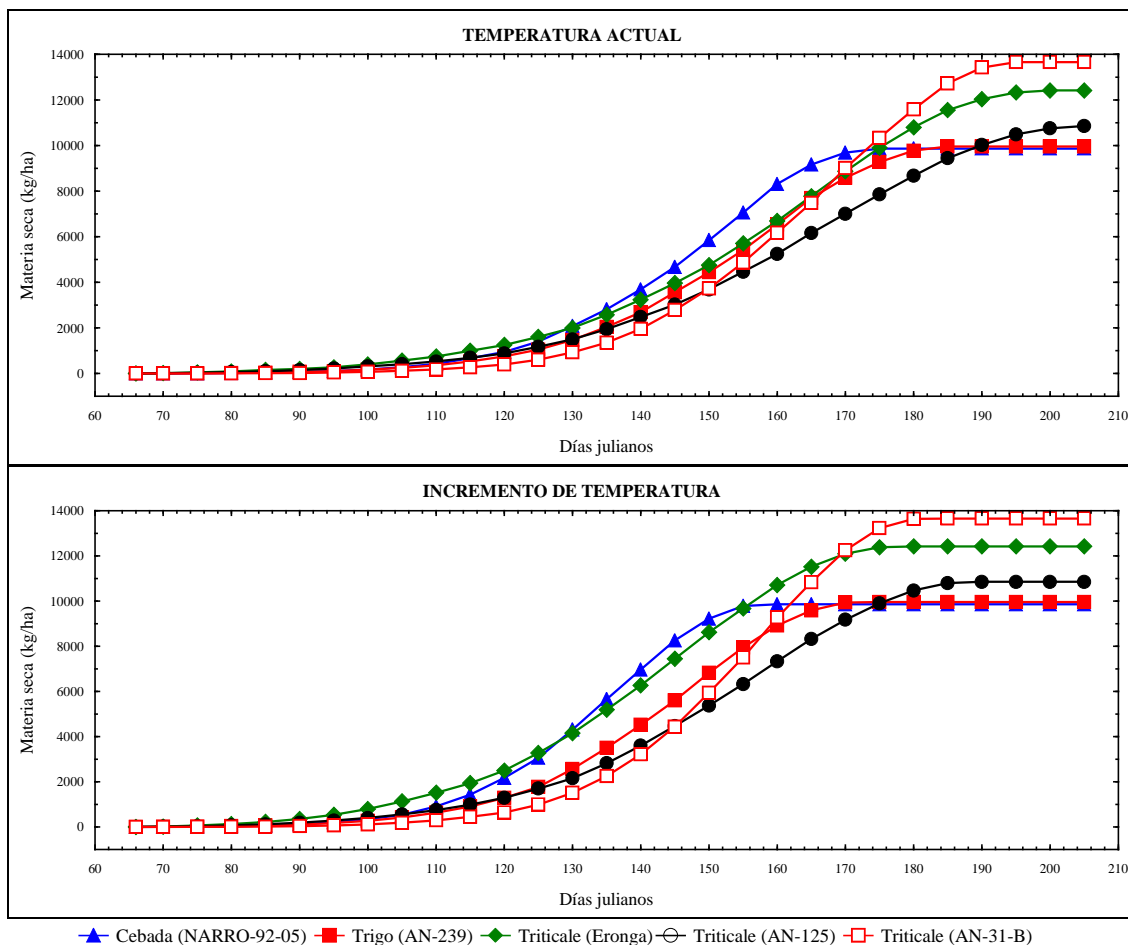


Figura 4.19. Acumulación de materia seca parcial de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo, de acuerdo a datos simulados por AN-CER, con temperaturas medias actuales y con un incremento de temperatura media diaria de 3 °C.

#### **4.5.2 Materia seca para forraje.**

En la Figura 4.20 se presenta la acumulación de materia seca hasta corte para forraje al momento en que se encuentra en un 12 % de proteína cruda, aquí se observa que con el incremento de temperatura, la tasa de crecimiento aumenta al igual que la caída del contenido proteico en la planta, ocurre con mayor rapidez debido a que la temperatura tiene un efecto marcado en la lignificación de la planta. El uso de AN-CER en la simulación de estos dos escenarios muestra como la fecha de corte de forraje se acorta aproximadamente en 15 días en cada uno de los materiales aunque al parecer en el rendimiento no se presenta ningún efecto.

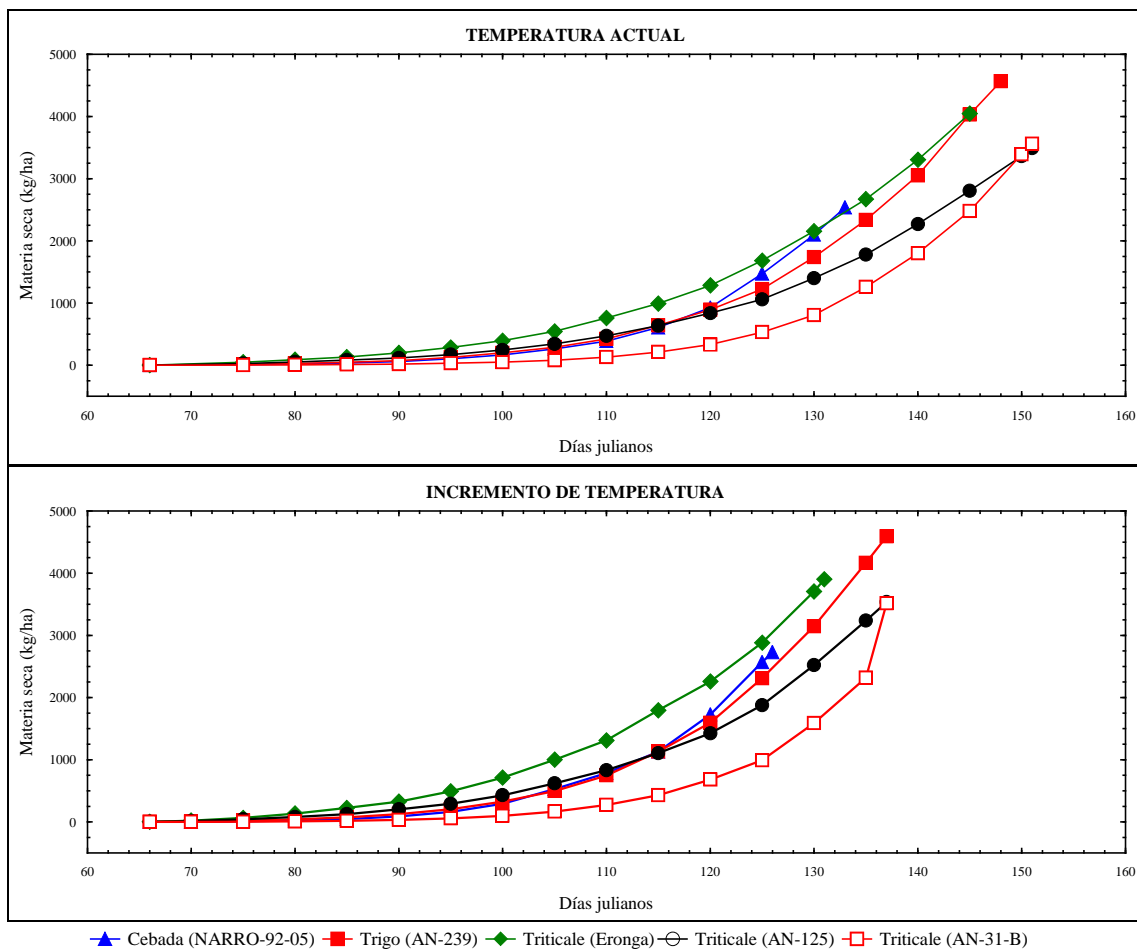


Figura 4.20. Acumulación de materia seca parcial para forraje de los cultivos de cebada, trigo y triticale de acuerdo a datos simulados por AN-CER, en la actualidad y con un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C.

### **4.5.3 Índice de área foliar.**

La simulación por el modelo AN-CER para el índice de área foliar se presenta en la Figura 4.21 y se muestra cómo afecta el incremento de la temperatura en el ciclo vegetativo o periodo verde el cual se recorrió y acortó debido a la aparición de las hojas con mayor rapidez y por la llegada de la senescencia prematura ya que existe una relación lineal positiva de la temperatura con el desarrollo de los meristemos y la aparición sucesiva de las hojas (Chowdhury y Wardlaw, 1978)

Sin embargo no se presenta variación alguna en cuanto al máximo índice de área foliar alcanzado por cada uno de los cultivos y variedades utilizadas.

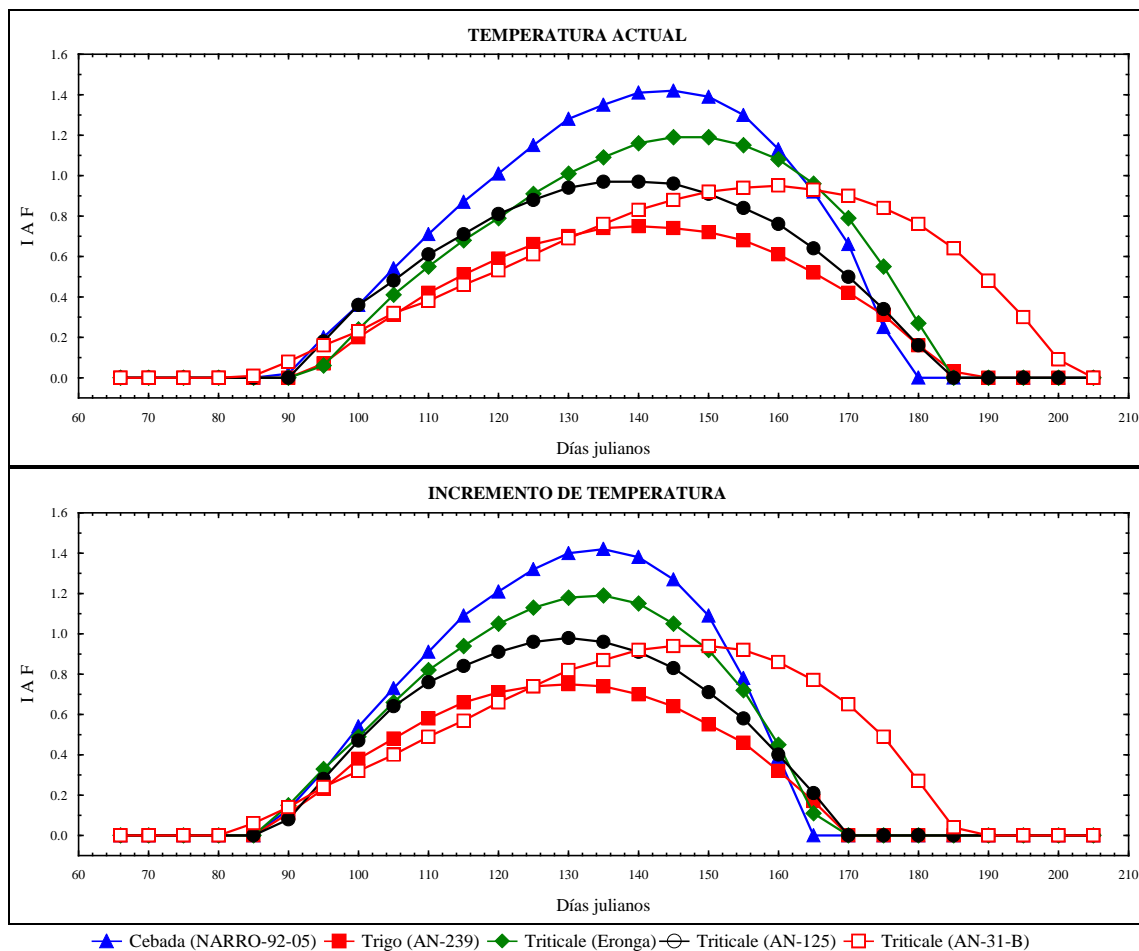


Figura 4.21. Índice de área foliar de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos simulados por AN-CER con temperatura actual y con un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C.

#### 4.5.4 Proteína cruda

En la Figura 4.22 se muestra la proteína cruda de cada uno de los cultivos, donde se observa que con un incremento de temperatura de 3 °C a la temperatura diaria actual el contenido proteico cae con mayor rapidez que con temperaturas medias actuales. Se puede decir que el contenido de proteína en la planta es un indicador de madures de la misma y que está relacionada negativamente con la acumulación de GGD debido a que el crecimiento de la planta requiere de una estructura para sostenerse y los tallos se convierten en material lignificado ocasionado por las reacciones enzimáticas que ocurren durante el proceso de crecimiento de las plantas (Salisbury y Ross, 2000). Por ejemplo en la simulación con temperaturas actuales la concentración de proteína cruda en la planta a los 74 días después de la siembra (día juliano 140) se encuentra

aproximadamente en promedio de 15 % mientras que con el incremento de temperatura a la misma fecha se encuentra en 10% promedio.

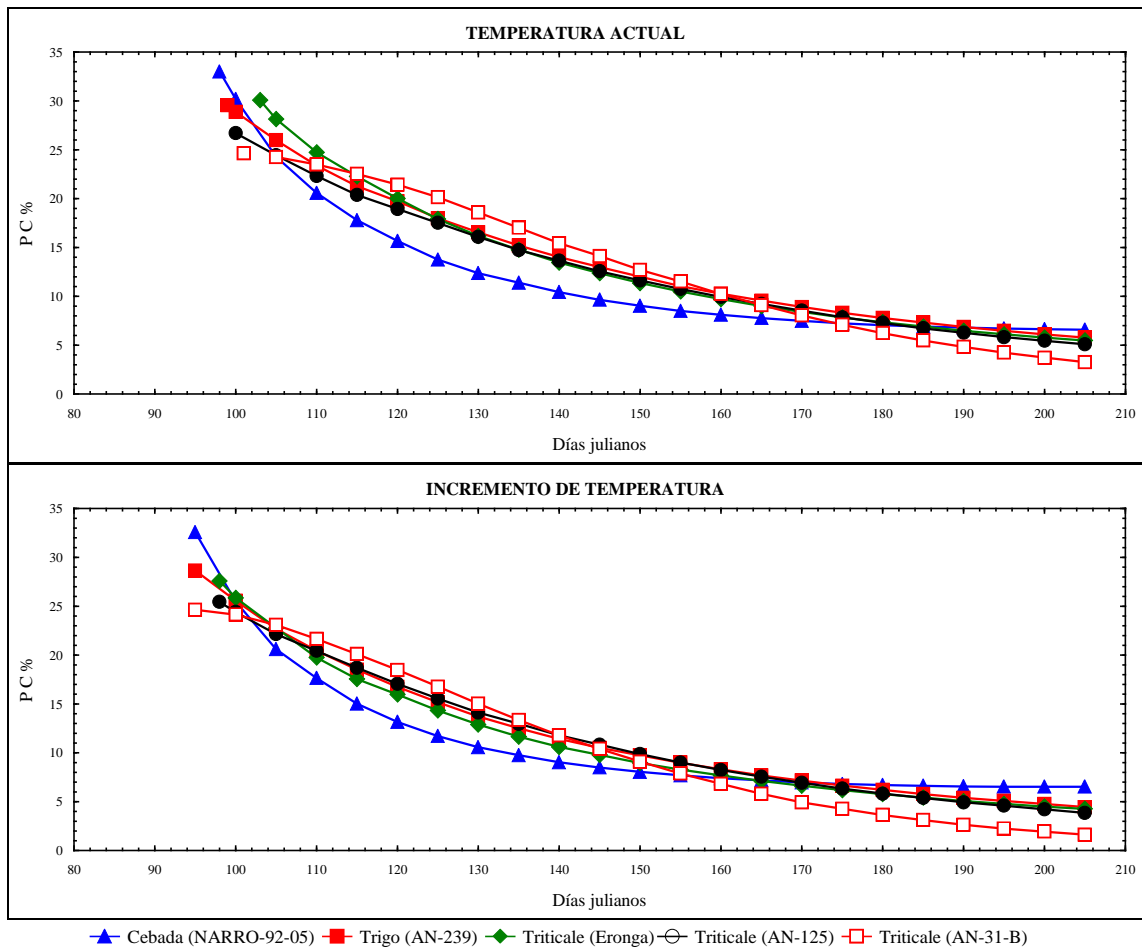


Figura 4.22. Proteína cruda de los cultivos de cebada, trigo y triticale durante su ciclo de acuerdo a datos simulados por el modelo AN-CER, en la actualidad y con un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C.

Los modelos de DSSAT 4.0.2.0 pueden ser calibrados utilizando la información de características genéticas del cultivo, ambiente (suelo y clima) del sitio así como datos experimentales y de manejo del cultivo de interés. Y de la calibración se puede caracterizar un material genético en base a su P1V, P1D, P5, G1, G2, G3 y PHINT mismos que pueden ser de mayor utilidad al conocer cuantitativamente el comportamiento de crecimiento de un cultivo y variedad específica.

En base a lo aquí reportado se puede aseverar que: La calibración de los modelos de simulación utilizados en DSSAT 4.0.2.0 presentan ciertas dificultades debido a los procedimientos laboriosos de parametrización del programa en cada uno de los módulos necesarios en los que se requiere de información detallada del crecimiento y desarrollo de los cultivos con diferentes practicas de manejo, así como información de ambiente (suelo y clima) y características genéticas del cultivo y variedad a utilizar, esta información no es difícil conseguir debido a que en la investigación que se ha generado sobre el crecimiento y desarrollo de cultivos forrajeros, carece de todo esto. Pero los modelos calibrados tienen una ventaja importante ya que estos pueden ser aplicables al tenerse calibrado el programa para diferentes cultivos y variedades utilizadas en el país y utilizando únicamente diferentes practicas de manejo por computadora será factible la estimación de rendimientos de los cultivos y con esto tomar las decisiones más congruentes con los recursos disponibles en la región de trabajo.

Con el uso de la temperatura como variable predictora del crecimiento y desarrollo de los cultivos (Ritchie *et al.*, 1998) se construyó un modelo simple con el programa Stella, el cual a diferencia de los modelos DSSAT tiene la capacidad de ser modificado o complementado de acuerdo al interés del usuario y presenta buena capacidad de simulación de acuerdo a la región y características con que fue construido. Los modelos de simulación tienen su aplicación en la toma de decisiones y planeación de las estrategias a seguir dentro de una explotación agropecuaria al igual que los experimentos.



## 5. CONCLUSIONES

La calibración de los modelos de cebada trigo y triticales en el programa DSSAT 4.0.2.0 para los genotipos y región de estudio se logró de forma satisfactoria. En base a la calibración los modelos tuvieron la capacidad de simular valores muy semejantes a los valores observados, para la acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación de materia seca parcial en el componente tallo y acumulación de materia seca parcial en grano para los 5 materiales estudiados. Pero en el caso de la acumulación de materia seca parcial en hoja el ajuste entre valores simulados con observados fue débil para los materiales en estudio. Al validar los modelos de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239) y triticale (AN-31-B) se encontró que los modelos calibrados aunque simulan de forma aceptable requieren de más ajustes en base a la evaluación de los cultivos bajo diferentes prácticas de manejo debido a las  $r^2$  y RMSE encontrados

Con el programa Stella 9.0.2 se construyeron modelos en base a información experimental y climática, los cuales simularon aceptablemente el comportamiento del crecimiento de acuerdo con las  $r^2$  y RMSE encontrados, durante todo el ciclo de cultivo para las variables de acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación de materia seca parcial hasta corte para forraje, altura del cultivo, relación hoja tallo, índice de área foliar, acumulación de materia seca parcial en grano, contenido de proteína cruda y fibra detergente acida al relacionar cada una de estas variables con la acumulación de GDD.

Los modelos utilizados por DSSAT 4.0.2.0 presentan gran cantidad de aplicaciones sin embargo se complica su uso ya que para ser útiles requieren de largos procesos de calibración con información detallada de prácticas de manejo del cultivo y sus características genéticas así como ambiente del lugar, además no es posible su modificación o adaptación para los fines que el usuario desee, como simular cortes y rebrotes en los cereales de grano pequeño o en cultivos perennes. Por otro lado los modelos construidos en Stella 9.0.2 presentan gran versatilidad en cuanto a agregar o quitar variables, por lo tanto la capacidad de ser modificables de acuerdo al objetivo que busque el usuario y adaptarse a las necesidades del mismo, por lo anterior se considera

más práctico y accesible el uso de modelos de simulación contruidos en Stella para las condiciones de producción e investigación con que se cuenta en la región

En base a los resultados presentados en esta investigación, se confirma que los modelos de simulación son una herramienta viable para la predicción del crecimiento y desarrollo de cultivos forrajeros y aplicables en la toma de decisiones dentro de explotaciones agropecuarias.

## 6. RESUMEN

El uso de modelos de simulación es una alternativa en la toma de decisiones para minimizar los costos de investigación y ayudar a reducir los riesgos económicos y de producción. En cultivos forrajeros son una herramienta para predecir los comportamientos de crecimiento y rendimiento, y ayudan a entender las relaciones fisiológicas entre planta-ambiente. El trabajo se realizó con el objeto de calibrar el programa DSSAT 4.0.2.0 para los cultivos de cebada, trigo y triticale en el sur de Nuevo León, México, construir modelos empíricos para los mismos cultivos con el programa Stella 9.0.2. y analizar ventajas y desventajas de ambos programas. El programa DSSAT 4.0.2.0 fue alimentado dentro de cada uno de sus módulos con información experimental de los cultivos de cebada (*Hordeum vulgare*), trigo (*Triticum aestivum L*), y triticale (*X:Triticosecale Wittmack*) y posteriormente se calibró mediante la manipulación de coeficientes genéticos, en el programa Stella 9.0.2 se construyeron un modelo denominado AN-CER para predecir el crecimiento de los mismos cultivos. La calibración de los modelos de cebada trigo y triticales en el programa DSSAT 4.0.2.0 para los genotipos y región de estudio se realizó satisfactoriamente y los modelos tuvieron la capacidad de simular valores aceptables al comparar con valores observados. El modelo AN-CER construido en Stella 9.0.2 simuló de forma aceptable el crecimiento y desarrollo de cada uno de los cultivos y variedades utilizados para las variables de acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación de materia seca hasta corte para forraje, altura del cultivo, relación hoja tallo, índice de área foliar, llenado de grano contenido proteico y contenido de FDA en la planta. Los modelos de simulación de DSSAT y Stella presentaron buena capacidad de predicción sin embargo se considera más práctico y accesible el uso de modelos de simulación construidos en Stella. Se confirma que mediante el uso de modelos de simulación de DSSAT 4.0.2.0 y Stella 9.0.2 es factible predecir el crecimiento y rendimiento de cultivos forrajeros para el sur de Nuevo León, México, dependiendo del objetivo perseguido por el usuario.

**Palabras clave:** predicción, calibración, triticale, trigo, cebada, DSSAT, Stella.

## 7. LITERATURA CITADA

- Álvarez D., P., M. Luna F., J. Hernández M., A. Lara H., M. A. Salas L. y B. cabañas C. 2006. Sistemas reproducción de cebada maltera (*Hordeum vulgare L.*) en el estado de Zacatecas, México. *Agricultura técnica en México*. 32:181-190.
- Bruma, J. y J. W. Jones. 2001. An international collaborative network for agricultural systems applications (ICASA). *Agricultural Systems*. 70:355–368.
- Castañeda S., M. C., C. López C., J. Molina M., T. B. Colinas L. y A. Livera H. 2004. Crecimiento y desarrollo de cebada y trigo. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:167-175.
- Chowdhury, S. I. y I. F. Wardlaw. 1978. The effect of temperature on kernel development in cereals. *Australian Journal of Agricultural Research*. 29:205–223.
- Colín R., M., V. M. Zamora V., A. J. Lozano R., G. Zambrano M. y M. A. Torres T. 2007. Caracterización y selección de nuevos genotipos imberbes de cebada forrajera para el norte y centro de México. *Téc. Pecu. Méx.* 45:249-262.
- Cruz F., G., S. Aviles M. y J. C. Cortés C. 1998. Estudio de adaptabilidad del triticale a diferentes dosis de calcio y fósforo en andisoles. *Terra latinoamericana*. 16:63-69.
- Ewert, F., J. Porter y B. Honermeier. 1996. Use of AFRCWHEAT2 to predict the development of main stem and tillers in winter triticale and winter wheat in North East Germany. *European Journal of Agronomy*. 5:89-103.
- Forján H. 2002. Modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos. *AgroBarrow*. No. 27. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Ghaffari, A., H. F. Cook y H. C. Lee. 2001. Simulating winter wheat yields under temperate conditions: exploring different management scenarios. *European Journal of Agronomy*. 15:231-240.

- Gijsman, A. J., G. Hoogenboom, W. J. Parton y P. C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from CENTURY. *Agron. J.* 94:462–474.
- Grant, W. E., E. K. Pedersen y S. L. Marín. 1997. Ecology and natural resource management: systems analysis and simulation. John Wiley & Sons Inc. New York, U.S.A. p. 16-28.
- Holman F. 2000. El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras. XVI reunión latinoamericana de producción animal (ALPA). Montevideo, Uruguay.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, A. J. Gijsman, P. W. Wilkens, U. Singh y W. T. Bowen. 2003. DSSAT v4 Cropping system simulation model en: Hoogenboom G., J. W. Jones, C. H. Porter, P. W. Wilkens, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, y G. Y. Tsuji (Editors). Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.
- Hunt, L. A. y K. J. Boote. 1998. Data for model operation, calibration, and evaluation. En: Tsuji G. Y., G Hoogenboom. Thorton.(Eds). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Great Britain. p. 9-39.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy.* 18:235-265.
- Jones, J. W., B. A. Keating y C. H. Porter. 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems.* 70:421–443.
- Kuhl, G., D. Simms y C. Bandyk. 1993. Nutritional composition of feedstuffs for beef cattle, Kansas State University, Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Kansas U. S. A.
- Langensiepen, M., H. Hanus, P. Schoop y W. Grasl. 2008. Validating CERES-wheat under North-German environmental conditions. *Agricultural Systems.* 97:34-47.
- Li, H., L. E. Parent y A. Karam. 2006. Simulation modeling of soil and plant nitrogen use in a potato cropping system in the humid and cool environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 115:248-260.

- Martin, J. F. y D. R. Tiller. 2000. Simulating with Stella. En: Odum T. H and E. C. Odum. (Eds). Modelling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. p. 133-149.
- Moreno-Sotomayor, A. y A. Weiss. 2004. Improvements in the simulation of kernel number and grain yield in CERES-Wheat. *Field crop research*. 88: 157-169.
- Murillo A., B., A. Escobar H., H. Fraga M., R. Pargas L. 2001. Rendimiento de grano y forraje de líneas de triticale y centeno en Baja California Sur, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 24:145-153.
- Odum, T. H y E. C. Odum. 2000. Modeling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. p. 3-4.
- Pacheco R., J. E., A. Marino M. y E. Abbate P. 2007. Producción forrajera de un trigo de alto rendimiento en grano vs. raigrás anual en Balcarce. 30° Congreso Argentino de Producción Animal. Santiago del Estero, Argentina.
- Ping, Y. H., K. M. Zhen, P. Reffye y M. Dingkuhn. 2004. A Dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Annals of Botany*. 93:591-602.
- Rajput R. P. 1980. Response of soybean crop to climate and soil environments. Tesis Doctoral. IARI, New Delhi, India.
- Ramírez C. J. J., T. Cervantes S., H. E. Villaseñor M. y C. López C. 2003. Selección para componentes del rendimiento de grano en triticale irradiado. *Agrociencia*. 37:595-603.
- Ritchie, J. T., U. Singh, D.C. Godwin, y W. T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. En: Tsuji G. Y., G Hoogemboom. Thorton (Eds). *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers. Great Britain. p. 79-98.
- Roberts, N., D.F. Andersen, R.M. Deal, M.S. Garet, y W.A. Shaffer. 1994. Introduction to computer simulation. A system dynamics modeling approach. Productivity Press. Portland, oregon, USA. p. 3.
- Rodríguez, A. N. T., James, L. W. Odell y J. B. Daniel. 1990. A Wheat grazing systems model for de US southern plains: Part I-Model description and performance. *Agricultural Systems*. 33:41-59.

- Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 2000. Fisiología de las plantas 3. Desarrollo de las plantas y fisiología ambiental. Thomson Editores Spain. Madrid España. p. 741-765.
- Saseendran, S. A., D. C. Nielsen, L. Ma, L. R. Ahuja y A. D. Halvorson. 2004. Modeling Nitrogen Management Effects on Winter Wheat Production Using RZWQM and CERES-Wheat. *Agron. J.* 96:615-630.
- Sayed, O. H. 1995. Effects of temperature on growth, morphology, and photosynthesis in wheat. *Biologia Plantarum.* 37:49-55.
- Solís M., E. y T. J. G. Díaz L. 2001. Efecto de los factores controlables de la producción sobre el rendimiento y la panza blanca del grano en trigo duro. *Terra latinoamericana.* 19:375-383.
- Solís M., E., J. D. Molina G., H. E. Villaseñor M. y S. Sandoval I. 2002. Rendimiento de grano y resistencia a roya en poblaciones de trigo obtenidas mediante selección. *Rev. Fitotec. Mex.* 25:89-96.
- Téllez O., O. S. 1999. Validación del modelo EPIC, para simular el índice de área foliar, acumulación de materia seca nitrogenada y rendimiento de grano en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo. Tesis. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. México.
- Timsina, J., D. Godwin, E. Humphreys, S. Yadvinder, S. Bijay, S.S. Kukal y D. Smith. 2008. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT-CSM-CERES-Wheat model. *Agricultural Water Management.* 95:1099-1110.
- Torres R., E. 1983. Agrometeorología. Edit. DIANA, S. A. 1a ED. D. F., México. p. 39-79.
- Travasso, M. I. y G. O. Magrin. 1998. Utility of CERES-Barley under Argentine conditions. *Field Crops Research.* 57:329-333.
- Uehara, G. y G. Y. Tsuji. 1998. Overview of IBSNAT. En: Tsuji G. Y., G Hoogenboom. Thornton (Eds). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Great Britain. p. 1-7.
- Verdoodt, A., R. E Van. y L. Ye. 2004. Daily simulation of potential dry matter production of annual field crops in tropical environments. *Agron. J.* 96:1739-1753.

Wilson, D. y J. P. Cooper. 1969. Effect of temperature during growth on leaf anatomy and subsequent lightsaturated photosynthesis among contrasting *Lolium* genotypes. *New Phytol.* 68:1115-1123.

Ye C., W. E., H. Díaz S., A. J. Lozano R., V. M. Zamora V. y M. J. Ayala O. 2001. Agrupamiento de germoplasma de triticale forrajero por rendimiento, ahijamiento y gustosidad. *Tec. Pecu. Mex.* 39:15-30.