

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**SIMULACIÓN DE DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE TRIGO  
(*Triticum Turgidum* L.) VARIEDAD JÚPARE C2001 BAJO TRES  
CONDICIONES DIFERENTES DE RIEGO CON EL MODELO CERES DE  
DSSAT**

**Tesis**

**Que presenta YESENIA PÉREZ DE LEÓN**

**Como requisito parcial para obtener el Título de**

**ING. AGRONOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Mayo del 2017.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

SIMULACIÓN DE DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE TRIGO  
(*Triticum Turgidum* L.) VARIEDAD JÚPARE C2001 BAJO TRES  
CONDICIONES DIFERENTES DE RIEGO CON EL MODELO CERES DE  
DSSAT

**Por:**

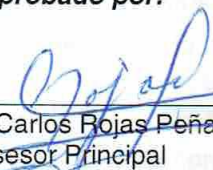
**YESENIA PÉREZ DE LEÓN**

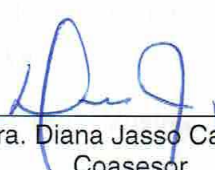
**Tesis**

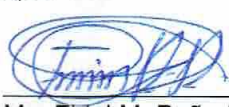
*Que se somete a consideración del H. Jurado examinador  
Como requisito parcial para obtener el título de:*

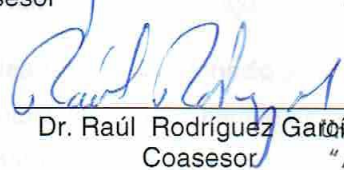
**Ingeniero agrónomo en irrigación**


**Aprobado por:**


  
\_\_\_\_\_  
M. C. Carlos Rojas Peña  
Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Diana Jasso Cantú  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Mc. Fidel M. Peña Ramos  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Raúl Rodríguez García  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Samaniego Moreno  
Coordinador de la División de Ingeniería

  
Coordinación de  
Ingeniería

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Mayo del 2017.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

SIMULACIÓN DE DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE TRIGO  
(*Triticum Turgidum* L.) VARIEDAD JÚPARE C2001 BAJO TRES  
CONDICIONES DIFERENTES DE RIEGO CON EL MODELO CERES DE  
DSSAT

**Por:**

**YESENIA PÉREZ DE LEÓN**

**Tesis**

*Que se somete a consideración del H. Jurado examinador  
Como requisito parcial para obtener el título de:  
**Ingeniero agrónomo en irrigación**  
**Aprobado por:***

---

M. C. Carlos Rojas Peña  
Asesor Principal

---

Dra. Diana Jasso Cantú  
Coasesor

---

Mc. Fidel M. Peña Ramos  
Coasesor

---

Dr. Raúl Rodríguez García  
Coasesor

---

Dr. Luis Samaniego Moreno  
Coordinador de la División de Ingeniería

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Mayo del 2017.**

## **AGRADECIMIENTO**

**A Dios** ser maravillo por darme primeramente la vida y sus bendiciones, por las fuerzas necesarias para lograr mis metas en la vida, por estar conmigo en los momentos buenos y malos, Dios mío muchas gracias por guíame por un buen camino en la vida.

**A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Mi Alma Terra Mater** por abrirme sus puertas para así yo poder cumplir una de mis más grandes metas en la vida y darme la oportunidad de formarme profesionalmente, estoy muy orgulloso de decir y ser Narro.

**Al Dr. Raúl Rodríguez García** por haberme brindado confianza hacia mí, Por su valiosa asesoría y apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

**Al M.C. Carlos Rojas Peña** por su colaboración en la realización y apoyo desinteresado en la revisión de este trabajo.

**A la Dra. Diana Jasso Cantú** por su valiosa ayuda en las observaciones de este trabajo y por darme consejos, ánimo siempre para salir adelante en el trabajo de investigación.

**Al M.C. Fidel Maximiliano Peña Ramos** por su disposición, observaciones y comentarios en este trabajo.

**A la M.C. Verónica Cortez Maldonado** por el gran apoyo, las enseñanzas que he recibido durante el tiempo de la realización de la presente investigación y por formar una bonita amistad.

A mis amigos de especialidad: A mi mejor amiga Elda; Silvia, Jesica, Wilson, Rodiel, Martin, Aldoris y Felipe, también a todos los grandes amigos que conozco por la confianza y amistad les deseo lo mejor en la vida, Dios me los bendiga y me los lleve por buen camino donde quiera que estén.

## DEDICATORIA

**Dedicada a mis padres con amor y cariño:**

Rubén Pérez Ortiz

Y

Valeria De León Pérez

Que me han dado la existencia y en ella la capacidad por superarme, por sus sabios consejos que me ha impulsado a seguir el camino de la superación, gracias por todo el apoyo moral y económico que me han brindado siempre para seguir adelante y lograr mis metas, por ello con toda la humildad en mi corazón eternamente mil gracias.

**A mis hermanos**, Ovillo, Ángel, Rubén, Andrea y en especial a Gildolfo, Ana Maris, Limber y Gary. Gracias por el cariño que siempre me han brindado, por su apoyo económico para lograr mis objetivos en la vida y por sus valiosos consejos que me han servido para ser una persona de bien y ser un ejemplo de superación. “ Los quiero mucho” sin dejar a un lado a mis cuñadas, Virginia y Verónica Alejandra por su cariño y apoyo que me brindaron siempre y por ser parte de mi familia.

**Al departamento de riego y drenaje** por brindarme esta formación profesional en especial a todos los maestros por su gran contribución y experiencia me formaron como profesionista.

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	i
ÍNDICE DE CUADROS .....	iv
RESUMEN .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo General .....	3
Objetivos Específicos.....	3
Hipótesis .....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Producción de trigo en Coahuila.....	4
Modelos de simulación .....	5
Modelo.....	5
Simulación .....	6
Sistema.....	6
Tipos de modelos .....	7
Modelos mecanísticos .....	7
Origen de modelo de simulación .....	8
Descripción de DSAAT .....	8
Descripción del Modelo Ceres –Trigo (desarrollo y crecimiento) en el DSSAT .....	9
Datos mínimos requeridos para la operación, calibración, y evaluación de un modelo en el programa DSSAT .....	10
Operar el modelo .....	10
Sitio .....	10
Clima .....	11
Suelos .....	11
Análisis de suelo: .....	12
Agua del suelo .....	12

Carbono y nitrógeno en el suelo .....	12
Temperatura del suelo .....	12
Crecimiento individual de la planta.....	13
Manejo .....	13
Calibración .....	13
Archivo de datos observados (archivo A y Archivo T) .....	15
La calibración de los coeficientes genéticos.....	19
Evaluación .....	20
Simulación en cereales.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
Tratamientos o condiciones de manejo  evaluadas.....	22
Información climática y de suelo.....	25
Evaluación estadística del modelo .....	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
Desarrollo fenológico .....	28
Simulación del rendimiento y sus componentes a la cosecha.....	29
Simulación de la materia seca total .....	30
Simulación del índice de área foliar.....	32
Simulación de materia seca en hojas .....	34
CONCLUSIONES .....	37
LITERATURA CITADA .....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista general de los componentes y la estructura modular de DSSAT-CSM.....	18
Figura 2. Visión general de los archivos de entrada y de salida usadas por el modelo de cultivos DSSAT (Hoogenboom et al., 2010).....	19
Figura 3. Localización geográfica del área de estudio.....	22
Figura 4. Representación esquemática del tamaño de las parcelas experimentales (tratamientos).....	24
Figura 5. Materia Seca Total (MST, kg ha <sup>-1</sup> ) observado y simulado durante el ciclo del cultivo, calibrados en el modelo CERES-Trigo para el cultivar Júpare C2001. T1(a); T2 (b); T3 (c).	31
Figura 6. Índice de área foliar observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Trigo para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c) .....	33
Figura 7. Materia seca parcial en hojas (MSH, kg ha <sup>-1</sup> ) observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Trigo para el cultivar Júpare C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c) .....	35



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Datos experimentales requeridos por el archivo A. ....	15
Cuadro 2. Datos experimentales requeridos por el archivo T. ....	16
Cuadro 3. Coeficientes genéticos DSSAT para CERES – Trigo. ....	16
Cuadro 4. Tratamientos y condiciones de manejo evaluados en la investigación. .....	23
Cuadro 5. Valores promedio climatológicos de noviembre 2015 a mayo 2016. ....	25
Cuadro 6. Variables de las propiedades físicas y químicas del suelo requeridas por el modelo DSSAT para el sitio experimental en Saltillo, Coahuila, México. ....	25
Cuadro 7. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio del suelo correspondiente a cada tratamiento. ....	26
Cuadro 8. Valores de los coeficientes genéticos obtenidos para la variedad Júpare C2001. ....	28
Cuadro 9. Desarrollo fenológico simulado y observado (en días después de la siembra) para los tres tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001. .....	29
Cuadro 10. Valores simulados y observados de rendimiento, peso de un grano y granos a la cosecha por m <sup>2</sup> , en los 3 tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001. ....	30
Cuadro 11. Comparación de promedios observados y simulados durante el ciclo del cultivo en materia seca total (kg ha <sup>-1</sup> ), coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ), cuadrados medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d). ....	32
Cuadro 12. Valores absolutos simulados y observados de la materia seca total a la cosecha para los tres tratamientos. ....	32
Cuadro 13. Comparación de valores promedio observados y simulados de índice de área foliar durante el ciclo del cultivo, coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d). ....	34
Cuadro 14. Valores del máximo índice de área foliar observado y simulado para cada tratamiento del cultivo de trigo variedad Júpare C2001. ....	34
Cuadro 15. Comparación de valores promedio observados y simulados de materia seca parcial en hojas durante el ciclo del cultivo, coeficiente de	

determinación ( $R^2$ ), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia  
(d). ..... 36

## RESUMEN

El uso de modelos de simulación en la agricultura es una alternativa en la toma de decisiones para reducir los costos de investigación, y ayudar a reducir los riesgos económicos, y de producción ya que resumen la interacción entre los factores de un proceso productivo. En el cultivo de trigo son una herramienta para predecir los comportamientos de crecimiento y rendimiento, y ayudan a entender las relaciones fisiológicas planta-ambiente. El rendimiento promedio nacional de trigo en México es de 5 toneladas por hectárea y en Coahuila es de 3 toneladas por hectárea, principalmente de trigo duro o cristalino, en este contexto con el fin de mejorar la productividad del cultivo de trigo (*Triticum turgidum* L.) variedad Júpare C2001. Este trabajo se realizó con el objeto de calibrar y validar modelo CERES-trigo de DSSAT para esta variedad, para predecir el crecimiento y rendimiento de este cultivo. La investigación se desarrolló en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila, México. El experimento se estableció en un diseño de bloques al azar, tres tratamientos con cuatro repeticiones. Los coeficientes genéticos se obtuvieron experimentalmente con el tratamiento en condición óptima de manejo de riego en la fecha de siembra. El modelo tuvo la capacidad de simular valores similares a los observados con un buen nivel de precisión en materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas a diferencia del rendimiento de grano que solo dos tratamientos tuvieron un buen ajuste. Mediante el uso del modelo de simulación CERES de DSSAT es factible predecir el crecimiento y rendimiento de cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación son representaciones matemáticas de procesos que podemos observar y/o medir (Esteves et al., 2012) y se clasifican en dos grandes grupos: en empíricos que son descriptivos y se derivan de datos observados sin involucrar procesos (Villegas et al., 2004) y los modelos mecanistas de simulación de los cultivos, son representaciones matemáticas de los principales procesos implicados en el desarrollo, crecimiento y producción de un cultivo (Bouman et al., 1996). Ellos integran el conocimiento adquirido por medio de la experimentación e innovación tecnológica en el campo de las ciencias biológicas, físicas y químicas relacionadas a sistemas de producción agrícola (Andarzian et al., 2015). En los cultivos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales, en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo y la planificación (Hernández et al., 2009). Los modelos de simulación son utilizados para predecir el comportamiento de fenómenos naturales, y son una herramienta importante en la investigación agropecuaria. Estos modelos no sustituyen a los experimentos de campo, pero reducen su número y los costos de investigación. (Díaz, 2008). Estos constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de estos y su rendimiento, también permiten estudiar algunos aspectos de la producción agrícola en menos tiempo y analizar diferentes variables simultáneamente, lo cual no puede hacerse eficientemente con experimentos tradicionales (Román-Paoli et al., 2000). En la agricultura es más frecuente el uso de modelos de simulación por los científicos, técnicos y productores agrícolas, los cuales han dado respuesta a factores de manejo en cultivos (Haefner, 2005).

El modelo CERES-Trigo estima el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de trigo, considerando las disponibilidades de agua y nitrógeno. Ha sido calibrado y validado bajo un amplio rango de condiciones ambientales y es utilizado con diversos fines. Integra los modelos CERES maíz, arroz, sorgo, cebada y trigo (Hoogenboom et al., 2010). En específico el modelo CERES - Trigo (Arora et al., 2007), el cual cuantifica las respuestas físicas y químicas del

cultivo al efecto del medio ambiente, permite analizar resultados y representar gráficamente simulaciones (cultivo, procesos del suelo, insectos, malezas y enfermedades), evalúa diferentes prácticas de manejo (rotación de cultivos), simula la producción de uno o varios ciclos continuos del cultivo (Singh et al., 2008;; Wu et al., 2013; Andarzian et al., 2015). El trigo es uno de los cereales más importantes en México, el consumo anual nacional es de 7.5 millones de toneladas y se producen 3.5, por lo cual se requiere importar 4 millones de toneladas al año (Financiera rural, 2014). El rendimiento nacional promedio es de 5 toneladas por hectárea, y en Coahuila es de 3 toneladas por hectárea (SIAP, 2015), por lo cual se requiere establecer estrategias de manejo del cultivo para incrementar el rendimiento de este cultivo en el estado. En este contexto el modelo de simulación CERES trigo será evaluado con la información obtenida en campo y será una valiosa herramienta para simular y predecir el comportamiento del cultivo en otras localidades en el estado.

### **Objetivo General**

Obtener los coeficientes genéticos en trigo variedad Júpare C2001 y evaluar la capacidad del modelo CERES-Trigo para simular el crecimiento, rendimiento del cultivo, con diferentes regímenes de riego.

### **Objetivos Específicos**

- Evaluar la capacidad del modelo CERES para simular en trigo variedad Júpare C2001 la fenología del cultivo, la producción de materia seca total aérea, en hojas.
- Evaluar la capacidad del modelo CERES para simular rendimiento de grano, peso de grano, número de granos por espiga y por m<sup>2</sup>.

### **Hipótesis**

- El modelo CERES - Trigo simula aceptablemente el crecimiento, rendimiento del cultivo trigo variedad Júpare C2001, considerando condiciones diferentes de manejo de riego y fecha de siembra.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

El trigo es uno de los principales granos para la alimentación, el cual junto con el maíz y el arroz se producen en muchos países. El trigo tiene sus orígenes en la antigua Mesopotamia, su producción le abrió las puertas a la agricultura y a la ganadería, convirtiéndose en uno de los cereales más importantes para la elaboración de alimentos, especialmente en la industria de la panificación, así como en la fabricación de pastas, galletas, bebidas y en la producción de combustibles. El cual México ocupa el tercer lugar mundial en exportación con 2,048,403 toneladas al año (SAGARPA, 2016). Se cultiva en más de 20 estados de la República Mexicana. Sin embargo, el 80% de la producción se genera en la zona norte (principalmente en el noroeste) y en Guanajuato en el ciclo otoño-invierno (O-I) bajo condiciones de riego; el resto se genera, en su mayoría, en regiones del centro y el altiplano central en el ciclo primavera-verano (P-V) en condiciones de temporal. El rendimiento promedio del ciclo otoño-invierno se estima en 5.3 toneladas por hectárea, mientras que el de primavera-verano es de 1.9 ton/ha (Villaseñor Mir et al., 2000).

### **Producción de trigo en Coahuila**

En Coahuila, en el año 2015 se sembraron 7,630 hectáreas bajo la modalidad de riego con un rendimiento promedio de 3.57 ton ha<sup>-1</sup>, la mayor superficie se encuentra en el centro-norte del estado, 7,219 has en los distritos de Acuña y Frontera y el resto en otros municipios), el municipio de Nava con 3,280 has es el que presenta mayor superficie destinada a este cultivo y con un rendimiento de 3.60 ton ha<sup>-1</sup>, una de las principales variedades sembradas es la Júpare C2001 (SIAP, 2015), este rendimiento puede considerarse bajo comparado con el rendimiento obtenido en otras regiones del país bajo riego (Moreno et al., 2010).

Por lo tanto se debe concluir estudios de un modelo de simulación en este caso el modelo CERES-Trigo puede ser una herramienta de gran utilidad para simular la respuesta de la variedad de trigo duro Júpare C2001, para incrementar el rendimiento de este cultivo en dicho estado.

## **Modelos de simulación**

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivo son instrumentos para reproducir el comportamiento de un cultivo y evaluar su respuesta al ambiente que lo circunda (Bindi, 2003). En la agricultura es una alternativa en la toma de decisiones para reducir los costos de investigación, ayudar a reducir los riesgos económicos, y de producción ya que resumen la interacción entre los factores de un proceso productivo (Rodríguez et al., 2010). Son una herramienta para predecir los comportamientos de crecimiento y rendimiento, y ayudan a entender las relaciones fisiológicas planta-ambiente. Ofrecen la posibilidad de integrar información sobre un sistema de producción determinado, la información experimental y los conceptos dentro de una lógica y una descripción cuantitativa de los procesos involucrados en el sistema, estos modelos aparecen como una buena alternativa que permite explorar los factores que en mayor o menor grado afectan un sistema de producción (Barrera, 1996).

## **Modelo**

Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí (Análisis de sistema de producción animal, 2008).

Un modelo es una representación simplificada de un sistema y un sistema es una parte bien delimitada del mundo real. Por ejemplo, un cultivo con todos sus órganos (raíz, tallo, hojas), procesos y mecanismos (crecimiento, desarrollo, fotosíntesis, transpiración, etc.) constituyen un sistema.

La construcción de un modelo consiste en la individualización de una serie de ecuaciones matemáticas, mediante las cuales es posible reproducir el



modelo más fiel posible, el comportamiento del sistema examinado (Hernández *et al.*, 2009).

Los objetivos primarios de un modelo en ciencia son, mejorar nuestro entendimiento de un sistema o probar teorías científicas, predecir el resultado de una combinación de situaciones en un sistema y controlar el sistema estudiado y producir resultados anticipados (Addiscott, 1993).

### **Simulación**

Simulación es el uso de un modelo para imitar, predecir o describir el comportamiento del sistema en estudio. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representa la estructura (estado) y el comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés. El sistema de interés existe en diferentes estados y momentos en el tiempo y existen reglas que rigen la forma en la cual el estado del sistema cambia a medida que transcurre el tiempo, ya que cada una por sí misma es una función del mismo. Si se escogen las variables apropiadas para describir el sistema y se representan adecuadamente las reglas que gobiernan el cambio, se deberían poder determinar los cambios en el estado del sistema a través del tiempo, es decir, se podría simular el comportamiento del sistema (Grant *et al.*, 1997).

### **Sistema**

Es el conjunto ordenado de partes o componentes relacionados entre sí y con su ambiente, de manera que forman y actúan como una unidad, una entidad o un todo con propiedades emergentes no evidentes en las partes mismas, por lo que no puede ser dividido sin perder sus propiedades o funciones esenciales (Ackoff, 1999). De igual manera (PROFOGAN, 1996) define un sistema como la combinación de elementos o componentes que interrelacionados forman un conjunto, con un objetivo determinado. Cada elemento tiene una función específica en el sistema; los sistemas pueden, a su vez, ser elemento de sistemas grandes e iguales, sus elementos pueden

entenderse como subsistemas. Es una parte bien delimitada del mundo real. Por ejemplo un cultivo con todos sus órganos (raíces, tallos, hojas), sus procesos y mecanismos (crecimiento, desarrollo, fotosíntesis, transpiración, etc.) constituyen un sistema (Marco, 2003).

### **Tipos de modelos**

De acuerdo con la cantidad de datos y el conocimiento que está disponible dentro de un campo particular, se desarrollan modelos con diferentes niveles de complejidad. La clasificación de los modelos ha sido intentada anteriormente, pero no se pueden hacer delimitaciones definidas, ya que los modelos generalmente poseen características de más de un grupo (Gálvez, 2008).

Entre los cuales se citan los siguientes.

Modelos empíricos o descriptivos

Modelos mecanísticos

Modelos estáticos

Modelos dinámicos

Modelos determinísticos

Modelos estocásticos

### **Modelos mecanísticos**

Estos modelos son aquellos que describen el comportamiento del sistema en términos de propiedades de bajo nivel. Por tanto, existe comprensión o explicación en los niveles inferiores. Estos modelos tienen la habilidad de imitar importantes procesos físicos, químicos o biológicos, y describir cómo y porqué resulta una respuesta particular (Gálvez, 2008). Son

muy útiles para decidir la mejor opción para optimizar el crecimiento y rendimiento del cultivo (Singh et al., 2008).

### **Origen de modelo de simulación**

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década de los 50's con modelos descriptivos y matemáticos de los procesos involucrados, a mediados de los 60 aparece el concepto de sistemas dinámicos que incluyen la variable tiempo y representaban el flujo de esos procesos y sus interacciones. En la década de los 70's se formaliza el concepto de dinámica de sistemas y en los 80's se utilizan procesos, vía computadoras, de verificación, validación y evaluación de modelos. En esta década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soya, trigo y arroz, incluidos en el programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). A partir de entonces la simulación de sistemas agrícolas empezó a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los cultivos agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciados por el ambiente y por las prácticas de manejo.

Expandió la potencialidad de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Barrett y Nearing, 1998).

### **Descripción de DSAAT**

El sistema DSSAT es un programa de computación interactivo que permite a los usuarios utilizar datos y modelos de simulación para resolver problemas específicos. Incluyen un programa que integra los modelos de simulación de cultivos, con una base de datos, un programa de utilidades, y programas de aplicación de las simulaciones. La finalidad principal de la aplicación de este sistema es mejorar la eficiencia de quienes toman decisiones, reduciendo el tiempo requerido para analizar interacciones complejas (Tsuji et al., 1994). Los modelos de simulación de cultivos en DSSAT

están enfocados a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales.

Otras de las aplicaciones que se les pueden dar a estos modelos de simulación es la inclusión de condiciones ambientales simuladas, rotación de cultivos y análisis secuencial (Thornton y Hoogenboom, 1994; Thornton *et al.*; 1995). Además proveen una de las mejores aproximaciones del comportamiento de los cultivos, integrando nuestro entendimiento de los procesos complejos de las plantas influenciados por el clima, el suelo y las condiciones de manejo (White y Hoogenboom, 2003).

### **Descripción del Modelo Ceres –Trigo (desarrollo y crecimiento) en el DSSAT**

El modelo CERES-Trigo calcula la acumulación y partición de biomasa en las diferentes etapas del cultivo y analizar el desarrollo fenológico y la influencia del genotipo, el clima, disponibilidad de agua y nitrógeno en el suelo, y su repercusión en la transformación y partición de biomasa en diversas partes de la planta, con el objetivo de lograr simular los efectos del medio ambiente en el crecimiento de los cultivos (Godwin *et al.*, 1989). El rendimiento y fenología se desarrollaron para ser de utilidad en la predicción, explicar el comportamiento del cultivo y mediante la evaluación de riesgos encontrar posibles estrategias ante factores que afecten el rendimiento de este cultivo (Hodges y Ritchie, 1991).

El modelo requiere información de los coeficientes genéticos del cultivo relacionada con la sensibilidad al fotoperiodo, duración del llenado del grano, la conversión de masa en número de granos, tasa de llenado del grano y la resistencia al frío (Singh *et al.*, 2008). Con la información proporcionada, el modelo simula diariamente el desarrollo fenológico, partición y acumulación de biomasa (kg ha<sup>-1</sup>), índice de área foliar, balance de agua (mm), contenido de nitrógeno entre el suelo y la planta desde la fecha de siembra hasta la etapa de madurez fisiológica para uno o varios ciclos (Rezzoug *et al.*, 2008; Singh *et al.*,

2008), para posteriormente efectuar la comparación de los datos observados con los simulados y para darle mayor confianza al usuario en la utilización de los modelos para evaluar los riesgos en el manejo del cultivo en diversos escenarios (Jones et al., 2003; Arora et al., 2007; Rodríguez et al., 2010; Glotter et al., 2014).

El procedimiento de calibración del modelo CERES consiste en ajustar los parámetros genéticos para minimizar la diferencia de los valores medidos con los simulados (Thorp et al., 2008), los coeficientes genéticos influyen en la aparición de las etapas de desarrollo, mediante la manipulación de estos, se puede encontrar las fechas en las cuales se presentaron los eventos fenológicos como la expansión del área foliar, producción de biomasa (rendimiento del grano y los componentes de la planta) (Arora et al., 2007; Rezzoug et al., 2008).

### **Datos mínimos requeridos para la operación, calibración, y evaluación de un modelo en el programa DSSAT**

Para la operación, calibración y evaluación de un modelo en dicho programa se requiere.

#### **Operar el modelo**

Para esto se requiere aspectos aunados a la caracterización del sitio, suelo, clima y manejo del cultivo que es esencial para la interpretación efectiva de los experimentos de campo (Hunt y Boote, 1998).

#### **Sitio**

Para el sitio de estudio se requiere las coordenadas geográficas, latitud y longitud, elevación, promedio de temperatura anual y promedio de la amplitud térmica anual, así como también la pendiente y aspecto general del paisaje, drenaje, presencia de piedras en superficie.

## **Clima**

En caso del clima se necesita de una estación meteorológica ubicada cerca de los experimentos de campo con el fin de registrar datos diarios de precipitación pluvial, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Estas variables constituyen el motor de los modelos. La radiación recibida también puede medirse con el número de horas de sol. En la mayor parte de las áreas, una estación meteorológica dentro de una distancia de 500 metros puede proporcionar medidas confiables. A distancias mayores los patrones de lluvia pueden ser significativamente diferentes. Como una alternativa, en caso de que la temperatura y la radiación fueran medidas a una distancia mayor de 500 metros, para registrar la lluvia se hace necesario colocar un pluviómetro en el mismo lugar del experimento (Hunt y Boote, 1998).

La función principal del software es leer o generar parámetros diarios y ajustarlos de acuerdo a los valores utilizados por el modelo (Hoogenboom et al., 2010). De ser necesario este módulo calcula el tiempo diario en horas, la temperatura máxima y mínima, radiación solar, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento (Singh et al., 2008).

## **Suelos**

Para la clasificación es necesario usar el sistema local y a nivel de familia del sistema taxonómico del USDA-SCS. Basándose en propiedades definidas por los diferentes horizontes o capas del suelo, hasta por lo menos la profundidad máxima de enraizamiento (factor de crecimiento de raíces). Las propiedades más importantes de cada horizonte incluyen: la profundidad desde la superficie del suelo hasta el límite inferior de cada horizonte, el punto de marchitamiento permanentes (PMP), la capacidad de campo (CC), la densidad aparente ( $D_a$ ), coeficiente de drenaje, el contenido de carbón y nitrógeno, el pH del suelo y el fósforo aprovechable. Las constantes de humedad PMP y CC son mejor estimados en el campo; sin embargo, se pueden obtener estimaciones iniciales a partir de la textura, la densidad aparente y el contenido de carbón

orgánico (Hunt y Boote, 1998). En este módulo se integran los sub-módulos de agua, temperatura, carbono, nitrógeno, fósforo y dinámica del suelo (Jones et al., 2003).

### **Análisis de suelo:**

Mediciones en las capas superficiales del suelo de la densidad aparente (Da), carbono orgánico, nitrógeno orgánico, pH, P y K.

El programa lee y calcula las características de la estructura del suelo por capas y las modificaciones en las propiedades del suelo en respuesta a la labranza, este módulo lee valores a partir de un archivo (Hoogenboom et al., 2010)

### **Agua del suelo**

Calcula procesos del agua en el suelo, acumulación de nieve, escorrentía, infiltración de la lluvia y riego, drenaje, saturación hídrica, flujo no saturado, profundidad del agua, evaporación del suelo y los procesos de captación de agua por la raíz, , los cálculos sobre el contenido de agua se actualizan a diario para cada capa del suelo (Hoogenboom et al., 2010).

### **Carbono y nitrógeno en el suelo**

Calcula las concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo, incluye la fertilización orgánica e inorgánica y el flujo de nutrientes entre las capas del suelo (Hoogenboom et al., 2010). El modelo calcula las cantidades de nitrógeno en el grano y en las partes vegetativas de la planta y también calcula un índice de estrés de nitrógeno (Guevara, 2007).

### **Temperatura del suelo**

El modelo se basa a partir de la temperatura del aire para determinar las condiciones de temperatura en las diferentes capas del suelo y para calcular la temperatura promedio anual del aire y la amplitud de las temperaturas medias mensuales (Jones et al., 2003).

## **Crecimiento individual de la planta**

Calcula diariamente la acumulación de materia seca, el índice de área foliar, número de hojas por planta y la profundidad radicular (Guevara, 2007).

### **Manejo**

- Nombre del cultivar y tipo.
- Fecha de siembra, profundidad y método, espaciamiento entre surcos y dirección, densidad de plantas.
- Irrigación y manejo de riego, fechas, método de riego y cantidades o profundidades.
- Fertilización inorgánica.
- Residuos (fertilizante orgánico), material vegetal, profundidad de incorporación cantidad y concentración de nutrientes.
- Aplicaciones de otros agroquímicos.
- Labranza.
- Esquema de cosecha.

### **Calibración**

Lo indicado en el apartado para operar el modelo más los siguientes datos

Funcionamiento del cultivo:

- Fecha de emergencia.
- Fecha de floración o polinización.
- Fecha de madurez fisiológica.
- Área foliar y peso de la parte aérea de la planta en tres distintos momentos del ciclo.
- Rendimiento en grano expresado como materia seca.
- Materia seca total a cosecha o índice de cosecha.
- Peso unitario del grano en materia seca.
- Numero de granos por planta.



- Numero de hojas producidas.
- Porcentaje de nitrógeno en el grano.
- Porcentaje de nitrógeno en el resto de la planta (Hunt y Boote, 1998).

El modelo requiere de datos mínimos para comenzar la operación de simulación del cultivo, es necesario proporcionar información del área de estudio, genotipo (coeficientes genéticos) de los mismos cultivares y contemplando el mayor rango posible de condiciones ambientales.

Los archivos para el modelo CERES – Trigo se encuentran organizados en cuatro tipos de archivos como datos de entrada y salida (Figura 2):

1. El primer tipo de archivo tiene información que identifica a los datos experimentales (EXP.DIR) y datos meteorológicos (WTH.DIR).
2. Un segundo grupo de archivos proporciona datos de entrada para los coeficientes de cultivo, el clima, el suelo y la información de gestión para todos los tratamientos de un experimento (ARCHIVO 1, ARCHIVO 2,..., file 0).
3. El tercero contiene datos de campo para la comparación con los resultados simulados para todos los tratamientos experimentales (FILE A, FILE T).
4. El cuarto archivo contiene los resultados de salida (Ritchie y Godwin., 1991).

Los archivos de entrada son parámetros del suelo, coeficientes genéticos y clima, con su utilización permiten al usuario organizar de una manera sencilla la información para seleccionar su experimento y los tratamientos del experimento de simulación en la comparación de los datos simulados con los observados y permitir al usuario optar por modificar condiciones de tratamiento para evaluar, “que pasaría si”: se tuviera diferente variedad, clima, suelo, fecha de siembra y profundidad, población de plantas, manejo del riego, distancia entre filas, y el cambio de la gestión de fertilizantes nitrogenados, variables que se pueden cambiar de forma interactiva (Ritchie y Godwin, 1991; Jones et al., 2003; Dhungana et al., 2006).

## Archivo de datos observados (archivo A y Archivo T)

El archivo **A** se cargó con los datos de requerimiento de unidades de calor de acuerdo a la madurez, datos máximos observados en el experimento y días julianos de eventos importantes del cultivo, pueden ser diferente en cada tratamiento. Las variables observadas fueron las siguientes. Estos datos de campo son necesarios para la lista de datos de salida simulados con los observados (Ritchie y Godwin, 1991).

Cuadro 1. Datos experimentales requeridos por el archivo A.

Variable	Descripción
TRNO	Número de tratamiento
HWAM	Rendimiento de grano a madurez ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
HWUM	Peso seco de cada unidad cosechada (g)
H#AM	Número de granos por metro cuadrado a madurez ( $\# \text{m}^{-2}$ )
H#UM	Número de granos cosechados por unidad de planta a la madurez
LAIX	Máximo índice de área foliar
CWAM	Peso seco de la biomasa aérea (hojas + tallos + granos) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
BWAH	Peso seco del rastrojo (tallos + hojas) en ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
ADAT	Fecha de antesis (día juliano)
MDAT	Fecha de madurez fisiológica (día juliano)
HIAD	Índice de cosecha

Cuadro 2. Datos experimentales requeridos por el archivo T.

<b>Requeridos</b>	<b>Descripción</b>
TRNO	Número de tratamiento
DATE	Fecha (día juliano)
LAI	Índice de área foliar
SWAD	Peso seco del tallo (kg ha <sup>-1</sup> )
GWAD	Peso seco del grano (kg ha <sup>-1</sup> )
LWAD	Peso seco de la hoja (kg ha <sup>-1</sup> )
CWAD	Peso seco de la biomasa aérea (kg ha <sup>-1</sup> )
T#AD	Número de tallos (# m <sup>-2</sup> )
SWTD	Contenido de humedad en el perfil (mm)
HWUD	Peso de un grano (grs)

**En el archivo T.** Se capturaron los datos de las fechas de muestreo de las variables observadas, durante el periodo de simulación.

**Archivo CUL.** En este archivo se cargaron los parámetros que caracterizan a los cultivares (coeficiente genéticos) utilizados en este experimento, el contenido de este archivo es el siguiente.

Cuadro 3. Coeficientes genéticos DSSAT para CERES – Trigo.

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
<b>P1D</b>	Coeficiente de sensibilidad al fotoperiodo (porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo /en relación con las 10 h menor que el límite del umbral) (%) (Rango 0-150).

<b>P1V</b>	Coeficiente de sensibilidad a la vernalización (días con temperatura óptima necesarios para completar la vernalización) (d) (Rango 0-60 días).
<b>P5</b>	Tiempo térmico de la fase de llenado del grano a la madurez (GDD) (Rango 600-900).
<b>G1</b>	Número de granos por espiga por unidad de peso en la antesis (#/g) (Rango 15-30).
<b>G2</b>	Tamaño potencial del grano en condición óptima (mg) (Rango 20 - 60).
<b>G3</b>	Peso seco estándar del vástago no estresado a la madurez (incluyendo grano) (g) (Rango 1 -25).
<b>PHINT</b>	Intervalo del filocrono (tiempo térmico entre la aparición sucesiva de las hojas) (GDD) (Rango 60 – 100).

---

GDD = grados día de desarrollo (Jones *et al.*, 2003)

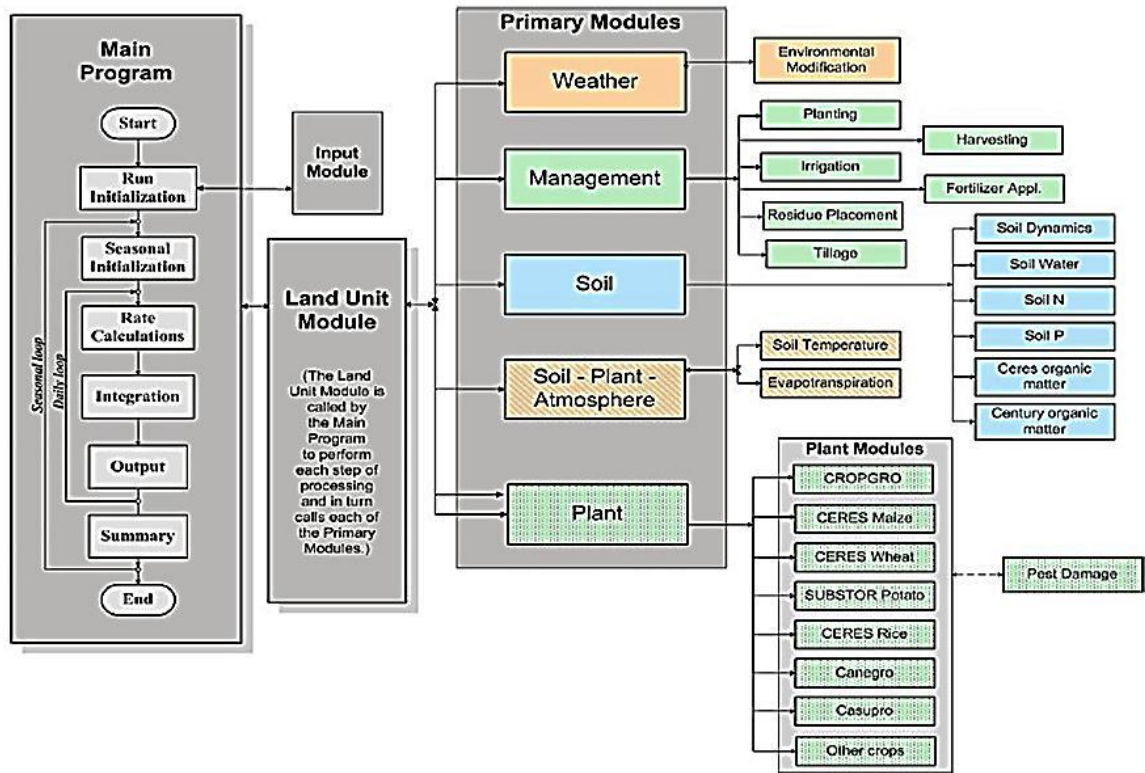


Figura 1. Vista general de los componentes y la estructura modula de DSSAT-CSM.

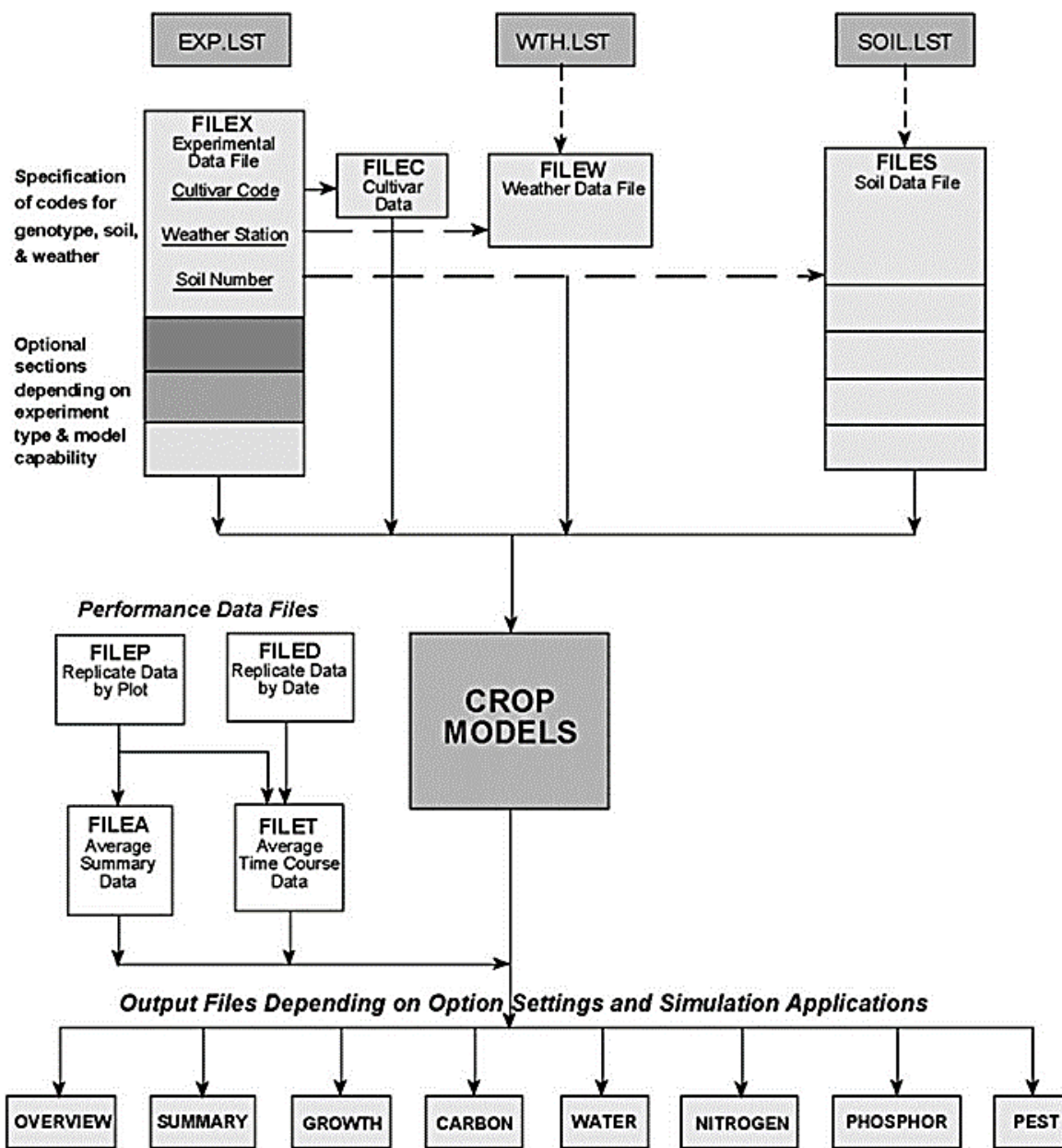


Figura 2. Visión general de los archivos de entrada y de salida usadas por el modelo de cultivos DSSAT (Hoogenboom et al., 2010).

### La calibración de los coeficientes genéticos

Para la variedad Júpare C2001 se basó en el tratamiento en condición óptima. El primer paso fue calcular P5 en grados días de desarrollo, considerando el promedio de las temperaturas máximas y mínimas diarias y restando la temperatura base (para trigo 0 °C) (Prabhakar et al., 2007) de la

misma manera PHINT, solamente que la suma en GDD se divide entre el máximo número de hojas que aparecieron durante la etapa vegetativa, se consideró que P1V se presenta después de la germinación y representa las temperaturas bajas que requiere la planta para comenzar a producir espiguillas y para P1D para el caso de trigo, es de día corto (Wang y Engel,1998). (Hunt et al., 1993) calcularon G1 con información a la antesis en la formación de espiguillas, para los coeficientes G2 y G3 se estimaron con la información recopilada de los muestreos de la cosecha, la combinación de los parámetros se realizó mediante el método de prueba y error.

### **Evaluación**

Incluye todos los aspectos para la operación del modelo más información de campo para la cual se validara el modelo (por ejemplo, fecha de floración femenina, madurez fisiológica, rendimiento en grano, materia seca de la parte aérea, entre otros). Se requieren datos de un número de experimentos que permiten evaluar la precisión del modelo de un amplio rango de ambientes. La evaluación de un modelo incluye la comparación de las salidas del modelo previamente calibrado con los datos reales para las variables deseadas. Esta evaluación permite conocer las bondades de uso de esta herramienta, a partir de la precisión obtenida en la simulación. Si el objetivo fuera la predicción del rendimiento, la evaluación permitiría conocer la relación entre los valores calculados por el modelo y los valores reales medidos. Se pueden especificar ambientes a partir de índices ambientales, o bien en función de factores agronómicos (fecha de siembra, densidad de la planta) o en términos de los aspectos físicos más importantes del ambiente (profundidad del perfil del suelo, duración del día, temperaturas, medias) (Hunt y Boote, 1998).

Para la evaluación del modelo se considera la comparación de los datos de salida de lo anteriormente calibrado frente a los datos reales, para determinar la exactitud y precisión de la simulación en conveniencia del propósito previsto, para conocer las bondades del uso de esta herramienta de

simulación al cuantificar la diferencia de los valores medidos y simulados (Valizadeh et al., 2014).

### **Simulación en cereales**

En el noreste, centro y sur de Europa, se realizó una investigación con la utilización de 8 modelos aplicables a trigo, del ciclo otoño-invierno. Dentro de los modelos utilizados se encontró al paquete DSSAT, el cual fue de los que presentó el mejor desempeño para estimar el rendimiento al presentar los RMSE más bajos y uno de los índices de concordancia más altos en comparación con los demás. En términos generales se encontró que los modelos difieren de los algoritmos que aplican, por lo tanto, no se puede asegurar que uno sea mejor que otro. Los resultados demostraron que la aplicación de modelos de simulación con una calibración limitada, conduce a un alto grado de desconfianza por lo que para obtener resultados más reales, es necesario especificar características de los cultivos (Palosuo, et al., 2011).



## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y descripción del experimento

La presente investigación se realizó en el jardín hidráulico de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista Saltillo, Coahuila, México, correspondiente a las coordenadas geográficas 25° 21' 20" Latitud Norte y 101° 01' 30" Longitud Oeste y una Altitud de 1743 msnm.

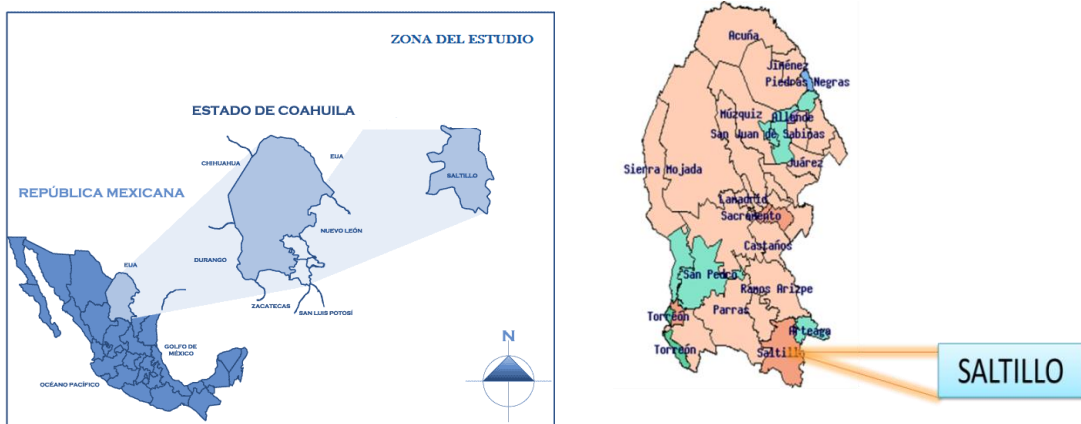


Figura 3. Localización geográfica del área de estudio.

### Tratamientos o condiciones de manejo evaluadas

Se evaluaron 3 tratamientos con tres regímenes de riego.

El experimento se realizó bajo el diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones. Cada tratamiento de riego estuvo ubicado en una parcela de 10 m de ancho y 30 m de largo, la cual se dividió en cuatro unidades experimentales o repeticiones. La siembra se efectuó el 15 de diciembre del 2015 en el ciclo otoño-invierno, se utilizó la variedad Júpare C2001, trigo duro o cristalino que es la más utilizada por los productores de la región norte del estado, se sembró en líneas separadas a 0.20 m, con una densidad de siembra de 170 kg ha<sup>-1</sup> y en promedio 250 plantas m<sup>2</sup> emergidas. La fertilización para todos los tratamientos fue de 170-90-00, previo a la siembra se suministró la dosis 100-90-00 (N-P-K;

kg ha<sup>-1</sup>) y el resto del nitrógeno en la etapa de amacollo, la aplicación se realizó manualmente, en líneas a una distancia de 0.20 m. La fuente de nitrógeno fue el sulfato de amonio granulado (20.5 % N) y del fósforo el superfosfato simple granulado (20 %).

El riego se efectuó por el método de aspersión, inicialmente a todos los tratamientos se dio un riego de presiembra de 30 mm que se complementó con un riego a la emergencia de 50 mm, posteriormente los riegos se efectuaron en las etapas fenológicas de: amacollo, encañe, espigado y floración, debido a que el ciclo se acortó y para evitar problemas de acame, que ocurrieron en las parcelas de los tratamientos, por lo cual en estos dos tratamientos los riegos a partir del espigamiento se debieron aplicar en varios días. La cantidad total aportada durante estas fases a los diferentes tratamientos fueron T1=380 mm, T2=323 mm y T3=245 mm.

Cuadro 4. Tratamientos y condiciones de manejo evaluados en la investigación.

<b>Tratamiento</b>	<b>Requerimiento de riego (%)</b>	<b>Fecha de siembra</b>
<b>1</b>	100	15 de diciembre de 2015
<b>2</b>	85	15 de diciembre de 2015
<b>3</b>	60	15 de diciembre de 2015

Los muestreos e identificación de las etapas fenológicas se realizaron semanalmente. El área foliar se determinó tomando 5 plantas por repetición, se utilizó el método de (Stickler et al., 1961) y para determinar el índice de área foliar se consideró el método de (Fageria y Santos 2008). Para determinar la acumulación de materia seca, se cortó 0.50 m de surco separando tallos, hojas y espigas (cuando aparecieron), se colocaron en un horno de secado a 65°C durante 48 horas, se pesaron y posteriormente se calculó la acumulación de biomasa parcial y total en kg ha<sup>-1</sup>. Para determinar el contenido de humedad

del suelo se utilizó el método gravimétrico (Radulovich, 2009), a estratos de 0.20 m hasta una profundidad de 0.80 m. Para estimar el rendimiento e índice de cosecha se cortó 25 m<sup>2</sup> por repetición, se contabilizaron las espigas de cada muestra y se pesó la materia seca total, posteriormente se trilló y pesó el grano obtenido por muestra para estimar el rendimiento en kg ha<sup>-1</sup>, para cada muestra se tomaron 100 granos para referencia peso y además se seleccionaron 20 espigas por repetición para contabilizar el número espiguillas y de granos por espiga y su peso, cifras requeridas por el modelo.

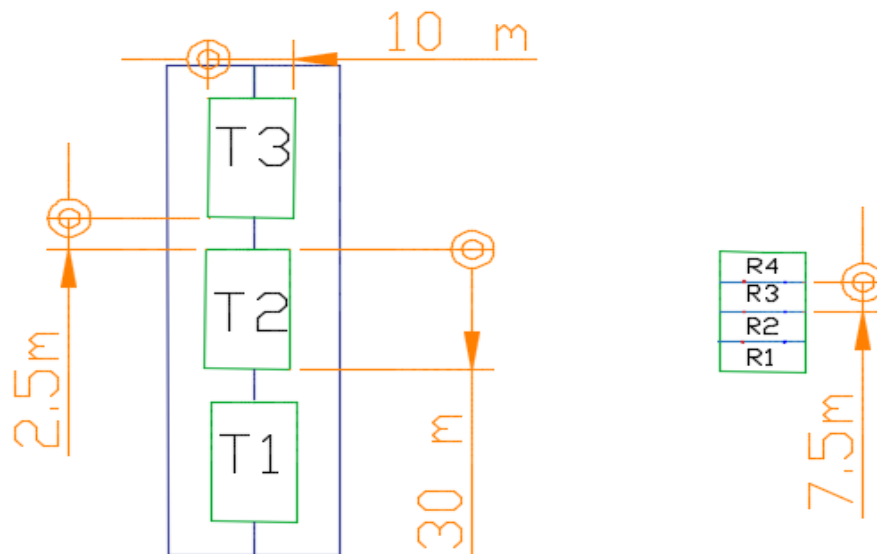


Figura 4. Representación esquemática del tamaño de las parcelas experimentales (tratamientos).

## Información climática y de suelo

En la presente investigación se utilizó el DSSAT v 4.5 , el cuál necesitó información climática (Cuadro 5) obtenida de la estación climática de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) localizada a 350 m del área de estudio, además antes de la siembra se realizó un análisis de suelo para obtener las propiedades físico– químicas, el cuál fue realizado en el Departamento de riego y drenaje de la Universidad, la textura del suelo es franco arcilloso (Cuadro 6) y se encontró el contenido inicial de nitrógeno, fósforo y potasio de las parcelas antes de la fertilización (Cuadro 7).

Cuadro 5. Valores promedio climatológicos de noviembre 2015 a mayo 2016.

Datos/ Meses	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Rad. (MJ/m <sup>2</sup> /día)	14.19	13.02	15.07	18.68	18.35	22.23	22.45
Max. Temp. (°C)	22.17	18.54	16.34	21.31	22.40	26.46	28.67
Min. Temp. (°C)	8.24	5.51	1.86	5.09	8.70	11.12	13.63
Lluvia (mm)	0.12	0.00	0.75	0.00	0.95	0.80	2.15
Vel. V (km/día)	227.60	271.29	213.61	213.00	259.48	265.30	350.06
Horas luz (hrs)	6.83	6.70	7.90	9.14	7.16	8.64	8.32
Evap. (mm/día)	3.32	3.79	2.86	4.82	5.23	6.28	6.02
HR (%)	62.57	53.94	54.23	42.72	49.13	50.50	60.84

Cuadro 6. Variables de las propiedades físicas y químicas del suelo requeridas por el modelo DSSAT para el sitio experimental en Saltillo, Coahuila, México.

Perfil	Materia				pH en agua	PMP* (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	CC* (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Sat.* (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )
	Arcilla	Limo	Arena	orgánica					
	(%)	(%)	(%)	(%)					
00-20	36.80	23.10	40.00	3.10	6.90	0.14	0.28	0.54	1.20

20-40	37.80	23.00	39.00	2.90	6.90	0.14	0.28	0.54	1.20
40-60	36.90	23.80	39.40	2.70	6.90	0.14	0.28	0.54	1.20
60-80	38.40	22.30	39.30	2.30	7.10	0.14	0.28	0.54	1.20

Cuadro 7. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio del suelo correspondiente a cada tratamiento.

Tratamiento	N (%)	P (kg ha <sup>-1</sup> )	K (kg ha <sup>-1</sup> )
T1	0.138	30.06	491
T2	0.203	6.86	900
T3	0.129	19.7	456

### Evaluación estadística del modelo

Los resultados de la simulación fueron evaluados estadísticamente para medir la capacidad del modelo, para lo cual se calculó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada simulación (Ecuación 3) y el índice de Willmott ( $d$ ) o índice de concordancia (Ecuación 2) que indica la precisión de la simulación, para el caso de estos índices cuando el valor es más cercano a 1, es mejor la relación entre las dos variables que se comparan y viceversa (Willmott, 1985), además la raíz del error cuadrado medio (RMSE) que ilustra el error de la predicción del modelo (Ecuación 1), para los datos medidos y simulados, cuanto menor sea este valor indica que el desempeño del modelo para la simulación es mejor (Wallach, 2006) y para cuantificar las diferencias de los valores simulados y observados se utilizó el error %, conocido como diferencia porcentual (Fórmula4), dónde un valor positivo indica el grado de sobreestimación del modelo y un valor negativo el grado de subestimación de la simulación (LeBlanc, 2004; Wu et al., 2013).

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$Diferencia \% = \left( \frac{P_i - O_i}{O_i} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde  $P_i$  y  $O_i$  son los valores simulados y observados de las variables de estudio,  $n$  es el número de observaciones y  $\bar{O}$  es la media de los valores observados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Coeficientes genéticos obtenidos de la calibración

Los coeficientes genéticos fueron calculados y calibrados para el cultivo de trigo variedad Júpare C2001, de acuerdo al tratamiento en condición óptima de manejo de riego en la fecha de siembra. La combinación de los parámetros genéticos con mejor ajuste en la simulación del crecimiento y rendimiento se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Valores de los coeficientes genéticos obtenidos para la variedad Júpare C2001.

Cultivar	Coeficientes genéticos						
	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
Júpare C2001	0	130	466	33	23	7	100

### Desarrollo fenológico

Los resultados de la simulación de la fenología del cultivo, mostraron que para los tratamientos (T1, T2 y T3) el modelo subestimó los días a la floración y a la madurez en un rango de -2 a -12 días (Cuadro 9). (Wu *et al.*, 2013) obtuvieron resultados similares al evaluar el modelo en trigo en el este de China, los autores indicaron que con diferencias en estos rangos se puede considerar un buen ajuste del modelo. (Dettori *et al.*, 2011) reportaron diferencias de entre - 9 y + 1 días en antesis cercanos a los valores obtenidos en esta investigación. (Ottman, 2008) citó la importancia de los coeficientes genéticos adecuados para disminuir el error en la simulación de la floración.

Cuadro 9. Desarrollo fenológico simulado y observado (en días después de la siembra) para los tres tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Desarrollo fenológico	Floración (DDS)				Madurez (DDS)			
	Sim.*	Obs.*	Diferencia	Diferencia (%)	Sim.	Obs.	Diferencia	Diferencia (%)
T1	113	125	-12	-9.6	144	153	-9	-5.9
T2	113	123	-10	-8.1	144	150	-6	-4
T3	113	120	-7	-5.8	144	146	-2	-1.4

Sim.=simulado; Obs.=observado; DDS=días después de la siembra

### Simulación del rendimiento y sus componentes a la cosecha

La simulación del rendimiento del grano y peso de grano para los tratamientos T1 y T2 mostró un buen ajuste entre valores simulados y observados, las diferencias porcentuales estuvieron dentro de un rango + 0.4 a + 7.9 % para rendimiento de grano y de 0 % a 11.53 % para peso de grano (Cuadro 10). El tratamiento T3 también tuvo un buen ajuste en el número de granos por m<sup>2</sup> (+ 4.05).

Estos resultados concuerdan con los de (Singh et al. 2008) quienes encontraron un buen ajuste en la simulación del rendimiento de trigo evaluando diferentes condiciones de manejo en riego. El modelo sobrestimó por porcentajes elevados el rendimiento de grano en los tratamientos T3, mostrando que el modelo no tuvo la capacidad de simular las condiciones que influyeron en un menor rendimiento en condiciones reales, debido a un déficit de riego o menor disponibilidad de agua en el suelo. El modelo simula un número elevado de granos por m<sup>2</sup> que son los que determinan el rendimiento elevado en estos tratamientos. (Langensiepen et al., 2008) en el norte de Alemania reportaron que el modelo subestima y sobrestima el rendimiento de grano en trigo, y citan que la magnitud error no permite la aplicación práctica del modelo. Además estos resultados defirieron con los datos reportados por (Moreno y Weiss 2004) encontraron que el modelo sobreestimó un 10 % el rendimiento, aunque subestimó el peso de un grano en un -11.45 %.



Cuadro 10. Valores simulados y observados de rendimiento, peso de un grano y granos a la cosecha por m<sup>2</sup>, en los 3 tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Trat.*	Rendimiento kg ha <sup>-1</sup>			Peso de un grano (mg)			Granos por m <sup>2</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	Sim.*	Obs.*	Dif* (%)	Sim.*	Obs.*	Dif (%)	Sim.*	Obs.*	Dif (%)
T1	7221	6979	0.4	23	23	0	31562	30343	4.05
T2	7122	6600	7.9	23	26	11.53	31128	25062	24.2
T3	6008	4525	-32.77	23	17	35.29	26262	25885	4.3

Trat.=tratamiento; Sim.=simulado; Obs.=observado; Dif.=diferencia.

### Simulación de la materia seca total

En los tres tratamientos el índice de concordancia (d) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) son elevados, superiores a 0.9 observándose un buen ajuste entre valores simulados y observados en la mayor parte del ciclo del cultivo (Cuadro 11), el tratamiento T2 presenta el menor RMSE=1239 kg ha<sup>-1</sup> indicando la mejor simulación, las mayores diferencias entre valores simulados y observados se presentan al final del ciclo, como se muestra en la Figura 5, donde el modelo subestima la materia seca total en los tratamientos T1, y T3 (Figura 5).

En los valores promedio simulados y observados T1, el modelo subestima el peso de la materia seca total (Cuadro 11), y a la cosecha el modelo subestimó lo obtenido en todos los tratamientos (Cuadro 12). Los indicadores estadísticos de la calibración que se obtuvieron en la presente investigación supera el valor de 0.63 encontrado por (Rodríguez et al., 1990) al usar CERES-trigo en la simulación de crecimiento, la RMSE mayor obtenida fue de 2102 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. Ya que la cifra de este estudio presenta que el modelo es una herramienta adecuada para la estimación de la materia seca total.

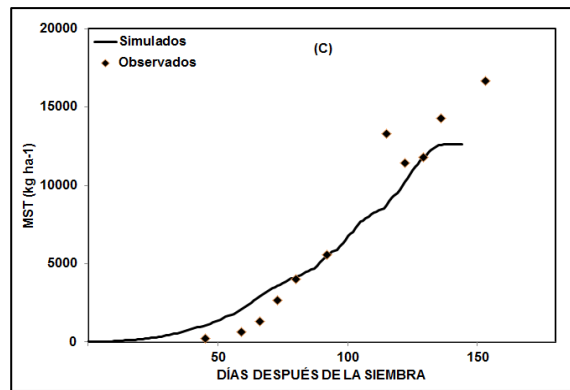
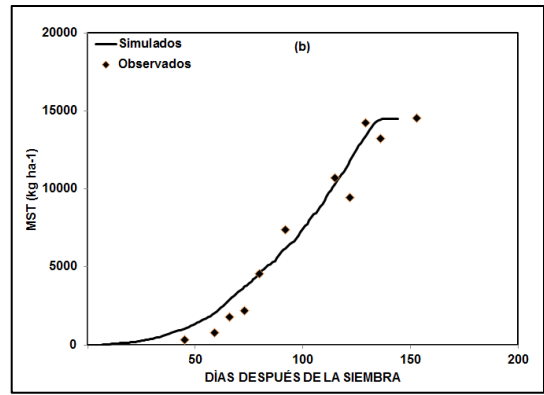
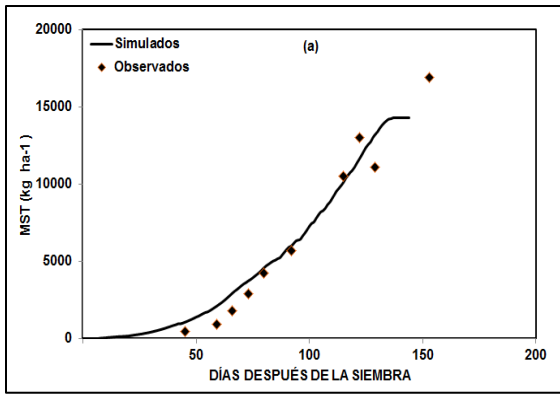


Figura 5. Materia Seca Total (MST, kg ha-1) observado y simulado durante el ciclo del cultivo, calibrados en el modelo CERES-Trigo para el cultivar Júpare C2001. T1(a); T2 (b); T3 (c).

Cuadro 11. Comparación de promedios observados y simulados durante el ciclo del cultivo en materia seca total (kg ha<sup>-1</sup>), coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), cuadrados medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Tratamientos	Materia seca total				
	Media observada	Media simulada	R <sup>2</sup>	d	RMSE
T1 (a)	7076	6960	0.92	0.96	2102
T2 (b)	6462	7041	0.95	0.98	1239
T3 (c)	6524	6246	0.93	0.96	1774

Cuadro 12. Valores absolutos simulados y observados de la materia seca total a la cosecha para los tres tratamientos.

Tratamientos	Materia seca total (kg ha <sup>-1</sup> )			
	Simulados	Observados	Diferencia	Relación (%)
T1	15071	16917	-1846	- 10.91
T2	15171	16688	-1517	- 9.09
T3	13192	14562	-1370	- 9.40

### Simulación del índice de área foliar

Para índice de área foliar en T1, T2 y T3, se simuló con un buen nivel de ajuste ya que al comparar los observados y simulados se registró una diferencia mínima entre ambos (Figura 6), (R<sup>2</sup>> 0.81, d>0.85 y el RMSE entre 0.76 y 1.59) (Cuadro 13). En el máximo índice de área foliar para los tratamientos T1, T2 y T3 los valores simulados fueron muy cercanos a los observados (Cuadro 14).

Resultados similares a T1, T2 y T3, fueron reportados por (Andarzian et al., 2015) que encontraron que aún con diferencias de esta magnitud la simulación es aceptable. Caso contrario (Singh et al., 2008), encontraron que el modelo subestimó el índice de área foliar en -15.63 % para un tratamiento en condición óptima, cifra menor a la reportada en la presente investigación para el tratamiento óptimo (Cuadro 14). Por otra parte coinciden con Pacheco et al, (2007) representan un IAF máximo de (d=0.98) en trigo en Argentina.

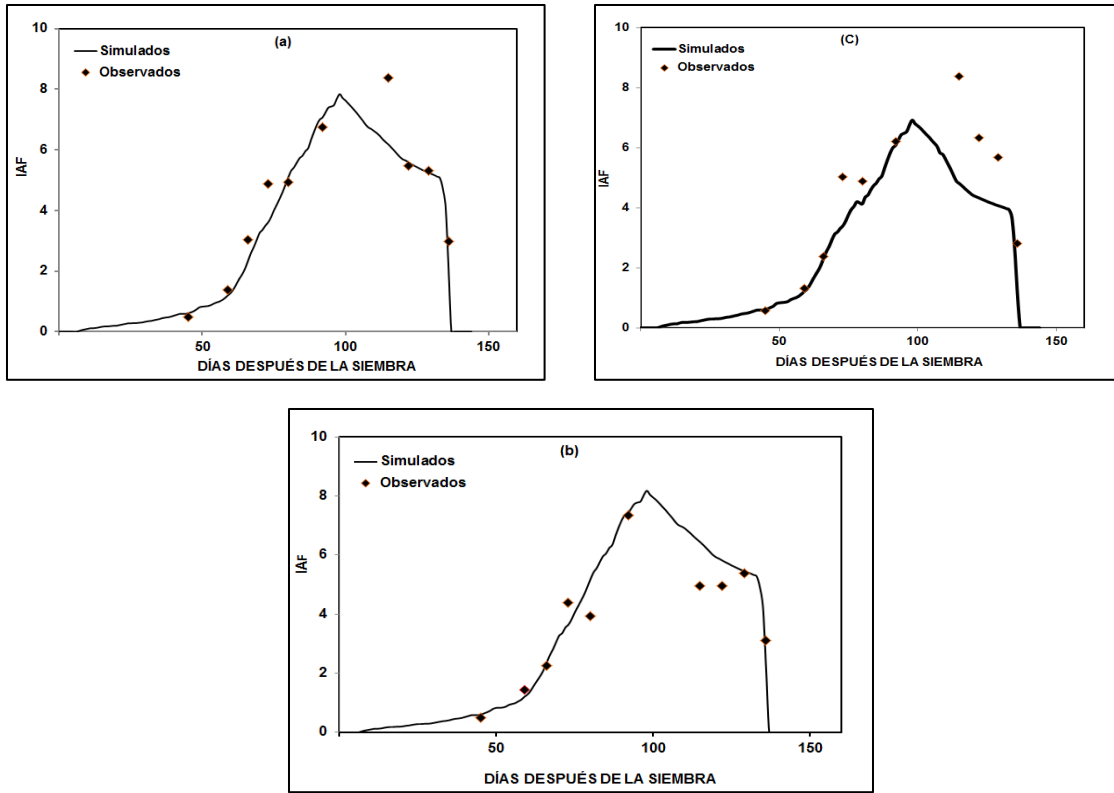


Figura 6. Índice de área foliar observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Trigo para el cultivar Júpere C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c)

Cuadro 13. Comparación de valores promedio observados y simulados de índice de área foliar durante el ciclo del cultivo, coeficiente de determinación ( $R^2$ ), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Tratamientos	Índice de área foliar				
	Media observada	Media simulada	$R^2$	d	RMSE
T1	4.36	3.9	0.89	0.95	0.88
T2	3.82	4.03	0.90	0.96	0.76
T3	4.36	3.21	0.81	0.85	1.59

Cuadro 14. Valores del máximo índice de área foliar observado y simulado para cada tratamiento del cultivo de trigo variedad Júpate C2001.

Tratamientos	Máximo índice de área foliar		
	Simulados	Observados	Diferencia (%)
T1(c)	7.8	8.4	-7.14
T2 (d)	8.2	8.4	2.38
T3 (e)	6.9	7.3	-5.48

### Simulación de materia seca en hojas

En la simulación de peso seco de hojas durante el ciclo del cultivo, los tratamientos T1 y T2 se observa un comportamiento aceptable entre los valores simulados y observados (Figura 7), con valores de  $R^2 = 0.85$  y  $0.89$ , valores de  $d = 0.90$  y  $0.93$  y los valores de RMSE de  $718$  y  $615$  kg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 15). En T3 el ajuste fue menor con valores de  $R^2 = 0.72$ , valores de  $d = 0.78$  y el valor de RMSE =  $1020$  kg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 15). CERES trigo en la simulación de rendimiento de grano y crecimiento de trigo, la mayor de los tres tratamiento obtuvo RMSE fue de  $1020$  kg ha<sup>-1</sup>.

Estos resultados difieren con (Ghaffari et al., 2001) ya que reportaron una RMSE de  $240$  kg ha<sup>-1</sup>, por otra parte coinciden con (Moreno-Sotomayor y Weiss 2004) en Nebraska, ya que obtuvieron un RMSE de  $811$  kg ha<sup>-1</sup>. Además estos resultados difieren con (Saseendran et al., 2004) al reportar una RMSE de  $363$  kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano, ya que los rendimientos

máximo se estimó en los 3,500 kg ha<sup>-1</sup>). Por lo tanto indica que los tres tratamientos de cuyos valores son, RMSE de 718, 615 kg ha<sup>-1</sup> y 1020 kg ha<sup>-1</sup> de desviación estándar del error obtenida en la presente investigación es aceptable. (Langensiepen et al., 2008) encontraron errores en la predicción del rendimiento y la acumulación de materia seca (biomasa), le atribuyeron esto a las diferencias de tiempo (clima) y la combinación de coeficientes genéticos utilizados en la calibración.

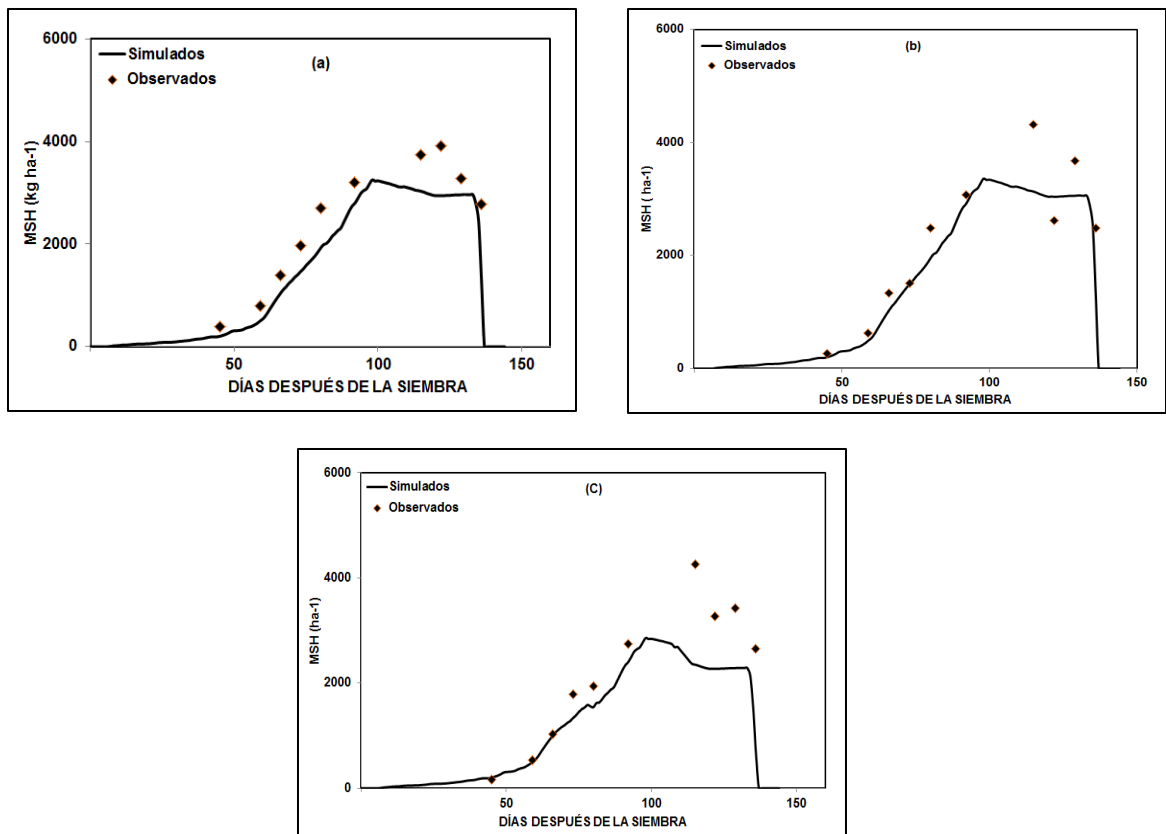


Figura 7. Materia seca parcial en hojas (MSH, kg ha<sup>-1</sup>) observado y simulado, calibrados en el modelo CERES-Trigo para el cultivar Júpate C2001. T1 (a); T2 (b); T3 (c).

Cuadro 15. Comparación de valores promedio observados y simulados de materia seca parcial en hojas durante el ciclo del cultivo, coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de concordancia (d).

Tratamientos	Materia seca parcial en hojas				
	Media observada	Media simulada	R <sup>2</sup>	d	RMSE
T1	2420	1814	0.89	0.9	718
T2	2241	1863	0.85	0.93	615
T3	2183	1455	0.72	0.78	1020

## CONCLUSIONES

Los modelos de simulación son una herramienta viable para la predicción del crecimiento y desarrollo de cultivos, en este caso tenemos el trigo aplicable en la toma de decisiones. En la investigación presentada se obtuvieron los coeficientes genéticos para la variedad de trigo Juparé C2001 con los tratamientos en condición de manejo óptimo en la fecha de siembra. La hipótesis nula que se planteó para este trabajo, se acepta, los mejores tratamientos fueron el T1 Y T2 ya que el modelo simuló con un buen ajuste las etapas de desarrollo del cultivo, así como el rendimiento de grano, materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas ya que tuvieron la capacidad de simular valores muy semejantes a los valores observados, en cuanto al T3 la variable del rendimiento de grano, el modelo no tuvo la capacidad de simular valores con un buen nivel de ajuste ya que lo simulado sobreestimo a lo observado con una diferencia porcentual de (-32.77%).

El modelo tuvo la capacidad de simular valores con buen nivel de precisión solo que a diferencia que el rendimiento de grano solo dos tratamientos tuvieron un buen ajuste.

A partir de los elementos brindados en este trabajo, se puede concluir que los modelos constituyen una herramienta muy útil para poder desarrollar una agricultura eficiente, desde el punto de vista económico, pero tan o más importante es poder hacer un uso racional de los recursos naturales, teniendo en cuenta la conservación del medio ambiente y sobre todo los recursos suelo, agua.



## LITERATURA CITADA

- Ackoff, R.I.** 1999. Re-creating the corporation. A design of organizations for the 21st century. New York, USA: Oxford University Press. 336 p.
- Addiscott, T. M.** 1993. Simulation modelling and soil behavior. *Geoderma* 60: 15-40.
- Análisis de sistema de producción animal.** (2008). Estudio FAO Producción y Sanidad Animal. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/w7452s/w7452s01.htm#1.1> definición
- Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., Andarzian, B.** 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *J. Saudi Soc. For Agric. Sci.* 14, 189-199.
- Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., Andarzian, B.** 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *J. Saudi Soc. For Agric. Sci.* 14, 189-199.
- Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., Andarzian, B.** 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *J. Saudi Soc. For Agric. Sci.* 14, 189-199.
- Arora, V.K., Singh, H., Singh, B.** 2007. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES-Wheat model. *Agr Water Manage.* 94, 22-30.
- Barrera, V.** 1996. Factores que afectan la sostenibilidad del sistema de producción de pequeños productores del Carchi-Ecuador. Modelo de simulación. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad de Chile.
- Barrett, J.R y M.A. Nearing.** 1998. Humanization of Decision Support Using informations from simulations. Pp 1-17 In: Peart R. and R.B. Curry (eds) *Agricultural System Modelling and Simulation.* Marcel Dekker Inc., New York, USA.

- Bindi, M.** (2003). Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. 26/03/08, de Università degli Studi di Firenze Sitio web: <http://svsconsultora.com.ar/ciomta/downloads/modelocultivo.pdf>
- Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laarh, H. H., Rabbingeh, R.** 1996. The 'School of de Wit' Crop Growth Simulation Models: A Pedigree and Historical Overview. *Agric. Sys.* 52, 171-198.
- Comerrma, J., Guenni L y Medina G.** 1985. Validación del balance hídrico del modelo Ceres-Maiz en la zona de Maracay, estado Aragua Venezuela. *Agron. Trop.* 35: 115-132.
- Dhungana, P., Eskridge, K.M. Weiss, A. Baenziger, P.S.** 2006. Designing crop technology for a future climate: An example using response surface methodology and the CERES-Wheat model. *Agr Syst.* 87, 63-79.
- Díaz, Solís., H., Rojas Montes, C.** (2008). Construcción y calibración de modelos de simulación para alfalfa (*Medicago sativa* L.) y Maíz forrajero (*Zea mays* L.) en el sur de Nuevo León, México. Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Esteves, M., Román-Paoli, E., Beaver, J. S., Muñoz, M. A., & Armstrong, A.** 2012. Determinación de coeficientes genéticos en tres cultivares y un híbrido de maíz. *J. of Agric. Univ. P. R.* 96(1): 57-75.
- Financiera Rural.** 2014. Panorama del trigo. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario Rural Forestal y Pesquero Panorama del trigo. Mayo. En: [http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Panorama%20Trigo%20\(may%202014\).pdf](http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Panorama%20Trigo%20(may%202014).pdf) Consultado en Septiembre 2015.
- Gabrielle, B., Menasseri S y Houot S.** 1995. Analysis and field evaluation of the Ceres models water balance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1403-1412.

- Ghaffari, A., H. F. Cook y H. C. Lee.** 2001. Simulating winter wheat yields under temperate conditions: exploring different management scenarios. *Eur. J. Agron.* 15:231-240.
- Glotter, M., Elliott, J., McInerney, D., Best, N., Foster, I., Moyer, E. J.** 2014. Evaluating the utility of dynamical downscaling in agricultural impacts projections. *Proc Natl Acad Sci.* 111, 8776-8781.
- Godwin, D., Ritchie, J., Singh, U., Hunt, L.** 1989. A user's guide to CERES-Wheat V2.10. International Fertilizer Development Center (IFDC) International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT)- Michigan State University . Muscle, Shoals, AL, EUA. 94 pp. En: [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNABU270.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABU270.pdf) Consultado en Septiembre 2015.
- Guevara, E.** 2007. La simulación del Desarrollo, Crecimiento y Rendimiento en maíz. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) EEA (Estación Experimental Agropecuaria), Pergamino, Buenos Aires, ARG. 37 pp. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoyRendimientoEnMaiz.pdf>
- Haefner, J. W.** 2005. Modeling Biological System: principles and applications. (Segunda edición) Springer. New York, USA, 475 pp. ISBN: 9780387250113.
- Hernández, N. Soto F y Caballero A.** (2009). Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30 (1), pp. 73-82.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agron.* 18, 235-265.
- Hernández, N., Soto, F., Caballero, A.** 2009. Modelos de simulación de cultivos, características y usos. *Cultivos Tropicales.* 30, 73-82.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, R.W., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Boot, K.J., Singh, U., Uryasev, O., Bowen, W.T., Gijsman, A.J., du Toit, A., White, J.W.**

- Hunt, L. A., Pararajasingham, S., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Imamura, D. T., Ogoshi, R. M.** 1993. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *J. Agron.* 85, 1090-1094.
- Hunt, L.A y K. J. Boote.** 1998. Data For model operation, calibration and evaluation. En: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom y P. K. Thornton (Eds.). *understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. USA. 39P.*
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T.** 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agron.* 18, 235-265.
- Langensiepen, M., Hanus, H., Schoop, P., Grasle, W.** 2008. Validating CERES – Wheat under North - German environmental conditions. *Agri. Syst.* 97, 34–47.
- LeBlanc, D.** 2004. *Statistics, concepts and applications for science.* Jones and Bartlett Publishers. Sudbury, Massachussets. 383 p.
- Marco, Bindi.** (2003). Instrumento para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción Agrícola. *Scienze Agronomiche e gestione del Territorio Agroforestale*, 03, 01.
- Mohan, M., y Martino, D.L.** (1997). Explorando a los rendimientos de trigo. *Avances en rendimiento de trigo en Uruguay*, pp.125
- Moreno, R.O.H., Rodríguez, C.J., Canseco, V. E.P., Martín, E. C., Herrera, A. H., Turrent, F. A.** 2010. Época de aplicación del primer riego y densidad de plantas en el cultivo de trigo. *BIOtecnia.* 12, 32-41.
- Moreno, S., and Weiss, A.** 2004. Improvements in the simulation of kernel number and grain yield in CERES-Wheat. *Field Crop Res.* 88, 157–169.
- Otter, S., Godwin, D.; Ritchie; J.T.** 1986. Testing and validating the CERES-Wheat model in diverse environments. Agristars YM-15-00407 ARS/USDA, Temple, Texas , USA.

- 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, 30º congreso Argentino de Producción Animal. Santiago del Estero, Argentina.
- Palosuo, T. A., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Torinese M. M., Olesen, J. E., Patil, R. H., Ruget, F. O., Rumbaur, C., Takac, J., Trnka M., Bindi, M., Aldag, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel W., Saylan L., Siska B., Rotter R.** 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Eur J Agron.* 35, 103-114.
- Prabhakar, B. N., Halepyati, A. S., Desai, B. K., Pujari, B. T.** 2007. Growing Degree Days and Photo Thermal Units Accumulation of Wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf.) Genotypes as Influenced by Dates of Sowing. *Karnataka J. Agric. Sci.* 20, 594-595.
- PROFOGAN** (Programa Nacional de Fomento Ganadero). 1996. Situación de la pequeña y mediana explotación pecuaria en el ecuador. 330 pp.
- Rezzoug, W., Gabrielle, B., Suleiman, A., Benabdeli, K.** 2008. Application and evaluation of the DSSAT wheat in the Tiaret region of Algeria. *Afr J Agric Res.* 3, 284-296.
- Ritchie, J.T., Godwin, D.** 1991. CERES Wheat 2.0. En: [http://nowlin.css.msu.edu/wheat\\_book/](http://nowlin.css.msu.edu/wheat_book/) Consultado en Julio 2015.
- Rodríguez, A. N. T., James, L. W. Odell y J. B. Daniel.** 1990. AWheat grazing systems model for deUS southern plains: Part I-Model description and performance. *Agric. Systems* 33:41-59.
- Rodríguez, A.M., Díaz, S.H., Aizpuru, G.E., López, T.R. Zamora, V.V.M.** 2010. Modelos de simulación para cereales forrajeros en el sur de Nuevo León, México. *Agraria.* 7, 6-16.
- Román-Paoli, E., S. Welch y R. Vanderlip,** 2000. Comparing genetic coefficients estimation methods using the CERES-Maize model. *Agrie. Sys.* 65:29-47.

- SAGARPA.** (2016) . Trigo grano, fuente de pastas, pan y galletas. Recuperado de <http://www.gob.mx/sagarpa/articulos/trigo-grano-fuente-de-pastas-pan-y-galletas?idiom=es>
- Saseendran, S. A., D. C. Nielsen, L. Ma, L. R. Ahuja yA. D. Halvorson.** 2004. Modeling Nitrogen Management Effects on Winter Wheat Production Using RZWQM and CERES-Wheat. *Agron. J.* 96:615-630.
- SIAP.2015.** Cierre de producción agrícola por estado. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. En: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> Consultado en Julio 2015.
- Singh, A. K., Tripathy, R., Chopra, U. K.** 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agr Water Manage.* 95, 776-786.
- Thornton, P. K. y Hoogenboom, G.** 1994. A computer program to analyze single season crop model outputs. *Agronomy Journal*, no. 86, p. 860-868
- Thornton, P. K.; Hoogenboom, G.; Wilkens, P. W. y Bowen, W. T.** A computer program to analyze multiple season crop model outputs. 1995. *Agronomy Journal*, no. 87, p. 131-136.
- Thorp, K. R., DeJonge, K. C., Kaleita, A. L., Batchelor, W. D., Paz J.O.** 2008. Metodology for the use of DSSAT models for precision agricultura decision support. *Computers and Electronics in Agriculture.* 64, 276-285.
- Tsuji, G. Y.** 1994. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer. p. 367-383. In G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P. K. Thornton .1998. (eds) *Understanding Options for Agricultural Production..* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Tsuji, G.Y.,** 2010. Decision support system for Agro-technology Transfer Version 4.5 [CD- ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI, USA.

- Valizadeh, J., Ziaei, S. M., Mazloumzadeh, S. M.** 2014. Assessing climate change impacts on wheat production. *J Saudi Soc Agr Sci.*13, 107-115.
- Villaseñor, M.** (2000). HE y E. Espitia R. 1994 La producción de trigo y la investigación en México. Foro de Consulta Permanente. El Agua y la Energía en la Cadena Alimentaria". México, DF, México. Universidad Nacional Autónoma de México, 91-104.
- Villegas, J. R., Hernández, V. A. G., Salazar, J. A. C., Muñoz, M. L., del Castillo, F. S., & Enciso, T. O.** 2004. Modelos empíricos del crecimiento y rendimiento de tomate podado a tres racimos. *Rev. Fitotec. Mex,* 27(Es1), 63-67.
- Wallach, D.** 2006. The two forms of crop models. In: Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (Eds.). *Working with Dynamic Crop Models Evaluation, Análisis, Parameterización and Applications.* Elsevier. Amsterdam, Reino Unido, 447 pp.
- Wang, E. and Engel, T.** 1998. Simulation of Phenological Development of Wheat Crops. *Agric. Syst.*58, 1-24.
- White, J. W. y Hoogenboom, G.** 2003. Gene-based approaches to crop simulation: Past experience and future opportunities. *Agronomy Journal,* no. 95, p. 52-64.
- Willmott, C. J., Akleson, G.S., Davis, R.E., Fedema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., Odonnel, J. Rowe, C.M.** 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90: 8995-9005.
- Wu, CH., Anlauf, R., Ma, Y.** 2013. Application of the DSSAT Model to Simulate Wheat Growth in Eastern China. *J. Agric. Sci.* 5, 198-208.