



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
"Fructuoso Rodríguez Pérez"
FACULTAD: CIENCIAS TÉCNICAS

Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en
Biomatemática

Estrategias de manejos para la soya en el sur de Mayabeque empleando el modelo DSSAT-CROPGRO

Autor: Ing. Leynier Tuero Suárez

Tutor: Dr.C Jorge García Coronado

Mayabeque, 2019

Agradecimientos

Sirvan estas líneas para agradecer a todos aquellos que de una forma u otra que me han ayudado en el transcurso de esta etapa.

A mi tutor Jorge García y a todos los colegas del GIAF (Jorge Días, Gustavo, Mari y el Chino) por guiarme a lo largo de este camino, por dar lo mejor de sí en cada momento que los necesité y por todos los conocimientos adquiridos junto ellos.

A la Facultad de Ciencias Técnicas y a todos los profesores del Departamento de Matemática-Física, en especial a Lucy y Walky por ser las coordinadoras de esta maestría que nos ha formado como mejores profesionales.

A mi mamá Aleida y a mi papá Alexis, por ser los mejores del mundo, por darme todo el amor que puede existir, por darme mis primeras lecciones en la escuela y en la vida y por estar siempre ahí para mí.

A mi esposa Anaily, por todo su amor, ternura y pasión, por estar a mi lado en cada momento, por crear en mí una mejor persona, por apoyarme y aconsejarme siempre.

A mis suegros Ilá y Armandito, por aceptarme como un hijo más, por brindarme todo su apoyo y por tenerme siempre presente.

A todos aquellos que están ausentes, pero siempre me brindaron su mano desinteresadamente.

Dedicatoria

A mis padres, por todo su amor y dedicación.

A mi esposa, el sol que alumbra mis días.

Resumen

En la actualidad, la producción nacional de soya a gran escala tiene una importancia estratégica para el desarrollo sostenible del país. Sin embargo, el agua es el principal recurso limitante, por lo que resulta imprescindible el desarrollo de estrategias de riego que permitan un máximo aprovechamiento del agua. Inicialmente, se analizan los diferentes métodos para obtener la radiación solar diaria arrojando que la radiación estimada por la NASA es la más exacta y por tanto fue la utilizada en esta investigación. En este trabajo se utiliza la herramienta de simulación de cultivos DSSAT para determinar la fecha óptima de siembra de la soya, variedad Júpiter, en el Sur de Mayabeque.. Además, se estudia mediante el modelo DSSAT-CROPGRO-Soya, el efecto sobre los rendimientos de varias estrategias de riego, se aplicaron varias láminas de riego: 5 mm, 10 mm, 15 mm y 20 mm, variando en todos los casos el contenido de agua en el cual comienza un nuevo riego: 85%, 75%, 65%, y 55% de la capacidad de campo, para la capa comprendida entre 0 - 40 cm de profundidad. Después de simulados los experimentos virtuales y analizados los resultados obtenidos se escogió como fecha óptima de siembra el 15 de julio y como mejor estrategia de riego la que aplica 15 mm de agua al 85% de la capacidad de campo.

Astract

Currently, large-scale national soybean production is an important strategic for the sustainable development of the country. However, water is the main limiting resource, then it is essential to develop irrigation strategies that allow maximum water productivity. Initially, different methods to obtain daily solar radiation are analyzed, showing that the radiation estimated by NASA is the most accurate and therefore was the one used in this research. In this work, the DSSAT crop simulation tool is used to determine the optimal planting date for soybeans, Jupiter cultivar, in the South of Mayabeque.. In addition, through the DSSAT-CROPGROW-Soybean model, the effect of several irrigation strategies on the yields is studied. Four levels of irrigation amounts: 5 mm, 10 mm, 15 mm and 20 mm were applied, varying in all cases the content of water to which a new irrigation starts: 85%, 75%, 65%, and 55% of the field capacity, for the layer between 0 - 40 cm deep. After simulated the virtual experiments and analyzed the results obtained, it was chosen as the optimum planting date July 15th and as the best irrigation strategy the one that applies 15 mm of water to 85% of the field capacity.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Revisión bibliográfica.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Generalidades del cultivo de la soya.....	4
1.3 Modelos de simulación de cultivos	8
1.4 Modelo DSSAT	9
1.5 Modelo CROPGRO	10
1.6 Modelo CROPWAT	11
1.7 Influencia del riego en el cultivo de la soya	12
1.7.1 Fases sensibles de la soya al déficit hídrico	13
Capítulo 2. Materiales y métodos.....	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Características edáficas del sitio de estudio	15
2.3 Características climáticas durante los años de estudio.....	16
2.4 Variedad de cultivo de soya a seleccionar y metodología seguida para su selección	18
2.5 Caracterización de la variedad seleccionada	18
2.6 Modelo CROPGRO de simulación del crecimiento de leguminosas ...	19
2.6.1 Desarrollo del cultivo	19
2.6.2 Balance de Carbono	20
2.6.3 Removilización del Nitrógeno y de los hidratos de carbono, senescencia y madurez	23
2.6.4 Balance hídrico del suelo, crecimiento de las raíces y evapotranspiración	23
2.7 Metodología de trabajo.....	25
2.8 Metodología para la obtención de la radiación global diaria.....	27
2.8.1 Obtención de la radiación solar mediante el modelo VP-RAD.....	28

2.8.2	Radiación solar estima por la NASA.....	30
2.9	Metodología para obtener fecha óptima de siembra	31
2.9.1	Implementación en DSSAT de la metodología para obtener la fecha óptima de siembra	32
2.10	Metodología para evaluar estrategias de riego	33
2.10.1	Implementación en DSSAT de la metodología para evaluar estrategias de riego	35
Capítulo 3.	Resultados y discusión	36
3.1	Introducción.....	36
3.2	Obtención de la radiación solar diaria	36
3.2.1	Análisis del año 2016.....	39
3.3	Fecha óptima de siembra de la soya.....	41
3.3.1	Simulación de rendimiento potencial	41
3.3.2	Simulación de rendimiento de secano	49
3.4	Evaluación de estrategias de riego	56
3.4.1	Selección del óptimo % del LSAD	56
3.4.2	Selección de la óptima lámina de riego	59
	Conclusiones.....	64
	Recomendaciones.....	65
	Referencias Bibliográficas	66
	Anexos	76

Introducción

La producción de alimentos es uno de los grandes desafíos de la agricultura a nivel mundial. Tales propósitos están indisolublemente ligados al empleo y desarrollo de las tecnologías en el campo de la Ingeniería Agrícola. Las ventajas del empleo de dichas herramientas es la de aligerar la producción y mejorar las técnicas de cultivo, lográndose con ello aumentar la rentabilidad de las explotaciones, comodidad de laboreo y favorecimiento de la seguridad alimentaria, a la vez que permite enmarcarse en la agricultura competitiva (FAO, 2017).

A ello se añade que en la actualidad el uso combinado de modelos junto a técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica consideradas herramientas indispensable para el avance científico de esta rama (Loosvelt *et al.*, 2011). Los mismos son capaces de capturar los aspectos esenciales de la dinámica (Manyame *et al.*, 2007), aun cuando simplifiquen en menor o mayor grado la interacción entre los diferentes elementos del continuo suelo-agua-planta- atmósfera.

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos y el análisis del sistema suelo-planta-atmósfera son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna (Damour *et al.*, 2010). Entre ellos, se destaca el universalmente difundido DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology) (Hoogenboom *et al.*, 2017). Dentro de este el modelo CROPGRO es uno de los módulos incluidos en la infraestructura que conforma el sistema de ayuda en la toma de decisiones para la transferencia agro-tecnológica (DSSAT-CSM) (Jones *et al.*, 2003), el cual simula el crecimiento de diez cultivos, incluidos siete leguminosas de grano. Especialmente se destaca el modelo SOYGRO (Wilkerson *et al.*, 1983) que simula el crecimiento de la soja, un cultivo altamente cotizado a nivel mundial para la alimentación humana y animal.

La soja se estudia en Cuba desde antes del año 1905. Ya para esa fecha se conocen informes emitidos por la Estación Experimental Agronómica de Santiago de las Vegas, hoy Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT), sobre la aclimatación de 50 variedades del cultivo. Desde muy temprano su uso en el país se dirigió fundamentalmente a la

extracción de aceite y la utilización de la torta para la alimentación de diferentes especies de animales según Hernández y Bello, (2010).

Los dos productos básicos que se obtienen de la soja son harina proteica y aceite. En algunos lugares, la mayor parte del aceite obtenido se consume en forma de margarina, grasa de freír, mayonesa, aceites de ensalada y otros productos comestibles; el resto corresponde a productos utilizados por las industrias de pinturas, barnices linóleo y tejidos de caucho (Laicos, 2010). La harina de soja es la principal fuente de complementos proteínicos para piensos (Díaz y Saucedo, 2003). Cada vez son más numerosos los productos destinados al consumo humano que incorporan harina de soja o soja, tanto en regiones deficitarias en proteínas como en otros lugares.

El agua cumple una función crucial en la vida de las plantas (Martínez, 2013). La deficiencia de agua es generalmente la limitante más importante en la producción de semilla de soja (Salvagiotti *et al.*, 2009). En la agricultura, el riego es un factor de productividad, por cuanto permite al agricultor el dominio de la mayor parte de los otros procesos agrícolas, con relativa independencia de las condiciones climáticas, y por ello constituye un paradigma para los agricultores de casi todo el mundo. Un manejo ineficiente del agua de regadío puede provocar por tanto una modificación no favorable en las propiedades físico-químicas de los suelos, así como la salinización y polución del agua subterránea y/o superficial, lo que asegura un impacto negativo sobre el medio (de la Mella *et al.*, 1997).

En lugares donde el agua es un factor limitante decisivo, el futuro crecimiento de la productividad agrícola dependerá de la movilización eficaz de los recursos hídricos y el aumento de la eficiencia del riego (FAO, 2016). En este sentido, se han reportados estudios que analizan y demuestran la variación de los rendimientos de la soja en función de la lámina de riego aplicada (Giménez *et al.*, 2017; Carter, 2018; Pringle *et al.*, 2019). Por otro lado, Sharda *et al.* (2019) evalúan estrategias de riego variando el porcentaje del límite superior de agua disponible (LSAD) al cual comienza el riego.

En Cuba se han evidenciado estudios que aplican estrategias de riego en función de la lámina total de riego aplicada (González Robaina *et al.*, 2013; Maduro *et al.*, 2017). Sin embargo, no se evidencian estudios que combinen la lámina de riego aplicada y el porcentaje del LSAD cuando comienza un riego.

El agua es un recurso agotable que interviene en todos los procesos; limitarla y hacer un uso eficiente de ella siempre y cuando no sean afectados los rendimientos es el tema fundamental que persigue el siguiente trabajo, encaminado a evaluar estrategias de riego para la variedad de soya Júpiter durante su cultivo en el sur de Mayabeque aplicando el modelo de simulación de cultivo DSSAT.

Objeto de estudio: El cultivo de la soya en las condiciones edafoclimáticas del sur de Mayabeque.

Problema científico: Dada la creciente variabilidad climática y demanda de alimentos no se cuentan con estrategias de manejo en las condiciones edafoclimáticas del sur de Mayabeque, que garanticen mantener los rendimientos y un uso eficiente del recurso agua.

Hipótesis: Es posible mediante la utilización del modelo DSSAT establecer para el cultivo de la soya estrategias eficientes de manejo en las condiciones edafoclimáticas del sur de Mayabeque.

Objetivo General: Evaluar el comportamiento agroproductivo del cultivo de la soya considerando diferentes estrategias de manejo y el modelo DSSAT-CROPGRO para las condiciones edafoclimáticas del sur de Mayabeque.

Objetivos Específicos:

1. Evaluar diferentes metodologías para la obtención los valores de la radiación solar diaria correspondientes al área de estudio.
2. Establecer la fecha óptima de siembra para el cultivo de la soya variedad Júpiter en condiciones las condiciones de suelo y clima del sur de Mayabeque.
3. Implementar estrategias de riego que garanticen altos rendimientos de soya con uso eficiente del agua, minimizando los costos económicos y riesgos medioambientales.

Capítulo 1. Revisión bibliográfica

1.1 Introducción

En este primer capítulo se abordan temas relacionados con los referentes del cultivo de la soya y la modelación de cultivos. Se realiza una revisión bibliográfica acerca del cultivo de la soya el mundo y en Cuba, así como de las características de suelo y clima que permiten su desarrollo. Se presentan los principales modelos de simulación de cultivos y se hace un análisis del modelo DSSAT, el CROPGRO y CROPWAT. Por último, se hace un estudio de la influencia del riego en el cultivo de soya y de cuales son fases fenológicas de la soya que son sensibles al déficit hídrico.

1.2 Generalidades del cultivo de la soya

La soya (*Glycinemax*) es el cultivo leguminoso de granos más importante a nivel global en términos de producción total e intercambio internacional. Durante los últimos 50 años, ha dominado el mercado mundial en producciones de aceite vegetal por poseer alto contenido de grasa (17- 26 %) y su gran valor proteico (32- 45 %); ya que las proteínas de soya contienen todos los aminoácidos esenciales para el alimento animal y humano, lo que la hace atractiva como materia prima para numerosas industrias y los más diversos usos; estas características hacen que se encuentre entre los 10 cultivos más importantes de la agricultura (Iglesias, 1986; Díaz *et al.*, 2001), siendo considerado como “frijol universal” ya que contiene 1 ½ veces más proteína y 10 veces más grasa, que cualquier otro frijol.

En la actualidad, a nivel mundial, la soya, que es la principal oleaginosa cultivada que representa el 61% de la producción mundial, alcanzará 604 millones de t en la campaña 2018/19, cifra máxima alcanzada en su historia. Los principales productores y exportadores: EEUU, Brasil y Argentina, representan el 82,6% de la producción mundial. El consumo de soja previsto en 2018/19 será suficiente con la producción repartido entre el 67% de harinas de soja para pienso; el 16% de aceite de soja para consumo humano y el resto para semillas, biodiesel, principalmente. Los principales consumidores seguirán siendo: China, EEUU y la UE en conjunto representan el 57% del consumo de la soja mundial (Maluenda, 2018). En el Anexo 1 se puede observar el balance del sector de la

soja de las 10 últimas campañas y la producción de soja y harina de soja en el mundo.

Según Díaz Carrasco y Díaz (1992), en Cuba se estudia la soja desde antes del año 1905; para esa fecha se conocen informes emitidos por la Estación Experimental Agronómica de Santiago de las Vegas, hoy Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT), sobre la aclimatación de 50 variedades del cultivo.

En Cuba, esta oleaginosa adquiere relevancia económica por sus múltiples usos. En la industria alimenticia, se utiliza en el 60% de los alimentos manufacturados, es empleada como complemento dietético, derivados lácteos y forma parte de comestibles cárnicos además los residuos sólidos obtenidos en la producción de aceites se destinan como materia prima para la producción de emulsiones, fertilizantes, adherentes entre otras utilidades industriales (Socorro y Martín, 1998).

En la alimentación animal se utiliza como: forraje, ensilaje, harina de follaje, grano seco y permite la elaboración de concentrados proteicos de alta calidad nutricional para la alimentación avícola, del ganado porcino y bovino (Días y Esquivel, 1998).

Según (Rosas y Young, 1991) la soja es una planta herbácea, erecta, anual y ramificada, cuya altura puede variar entre 30 y 200 cm; su ciclo de vida puede ir desde 80 hasta 200 días aproximadamente, según sea la variedad y las condiciones ambientales.

La característica fisiológica más importante de este cultivo es el fotoperíodo (parte del día en que un ser vivo está expuesto a la luz.). Para que pase de su fase vegetativa a su fase reproductiva es necesario que la duración del día sea más corta que su fotoperíodo crítico (período de luz más largo bajo el cual la planta puede florecer). Es necesaria la extrema precaución en el momento de elegir una variedad para sembrar en una época determinada; debe conocerse que, según Hernández y Bello (2010), la variación del fotoperíodo en Cuba tiene un máximo de 13.5 horas luz en junio y un mínimo de 10.5 en diciembre. Esta amplitud es suficiente para producir diferencias en el comportamiento de las

plantas de soya, existiendo variedades adaptadas a la época de primavera (15 abril - 15 mayo), verano (15 julio - 15 agosto) e invierno (15 diciembre - 15 enero).

Según Toledo (1995) en relación con las características físicas del suelo, se adapta a casi todos los tipos de suelos; sin embargo, dentro de esa gama de variaciones existen determinados tipos que reúnen condiciones más propicias.

El suelo ideal sería aquel que reúna las siguientes características:

- a) Buena capacidad de retención de agua y nutrimentos disponibles para la planta.
- b) Aeración satisfactoria, permitiendo un adecuado desarrollo radical.
- c) No presentar una cama endurecida debajo de la superficie, que obstaculice el desarrollo de las plantas.
- d) Baja susceptibilidad a la erosión.

Los suelos de textura mediana con contenido de arcilla superiores al 20 % son los más eficiente, es recomendable que sea profundo (1 a 2 m). Considerando que es un cultivo altamente tecnificado, con un elevado índice de uso de mecanización en sus diversas etapas vegetativas. Se debe preferir terrenos de topografía plana (0 a 3 % de pendiente) o suavemente ondulados (4 a 8 %) y que el pH del suelo se encuentre entre 6.0 y 7.5 coincidiendo con Hernández y Bello, (2010).

Según Laicos (2010) las distancias de siembra entre surcos más recomendadas son 50; 60 ó 70 cm, y de 15 a 20 cm entre planta y planta en dependencia del equipo de siembra a utilizar, de las condiciones de cada lugar y la posibilidad de cultivar o no altas densidades de población. El número de plantas por metro lineal puede variar entre 20-25, obteniendo densidades desde 330 000-400 000 plantas/ha para lo cual se requieren 80 kg de semilla certificada, con un mínimo de 80 % de germinación. La profundidad de siembra oscila entre los 2.5 y 5 cm. Se recomienda menor profundidad para los suelos húmedos y pesados y mayor para los suelos secos y ligeros.

La soya es resistente a los períodos de sequía. Los períodos críticos en los que no debe faltarle la humedad al cultivo son la germinación, el establecimiento del cultivo y durante la floración al llenado de las vainas (**ver Tabla 1.1**). Según Hernández y Bello, (2010).

Tabla1.1. Requerimientos hídricos de la soya

Períodos	Norma neta (m ³ /ha)
Siembra a brotación	350-550
Brotación a inicio de la floración	250-300
Inicio de la floración a inicio de la maduración	300-350
Inicio de la maduración a madurez fisiológica	200-250

El principal fertilizante utilizado en la producción de soja es el SPS, superfosfato simple. Este fertilizante también se denomina arrancador, porque se aplica en el momento en que se siembra la semilla en el campo. El mismo aporta los requerimientos del cultivo en P (fósforo), S (azufre) y Ca (calcio). Las cantidades de aplicación del mismo oscilan entre 50 y 100 kg/ha (Díaz y Duarte, 2004) y para suplir las necesidades de nitrógeno; ya que requiere de altas cantidades, mayoritariamente cubierta a partir del proceso de fijación biológica de N atmosférico (FBN) en la simbiosis entre la leguminosa y los rizobios (Perticari, 2005; Collino *et al.*, 2007) se puede inocular la bacteria *Bradyrhizobium*, a razón de 500 g de inoculante por quintal de semilla (Ferraris *et al.*, 2006).

La fecha de cosecha puede variar por muchos factores, pero depende básicamente de la variedad plantada y está determinada por la caída de las hojas, según Espinosa *et al* (2011) se realiza cuando la humedad de los granos este entre un 13-15 % o que el 25 % de las vainas estén secas (color uniforme pardo). Los métodos de cosecha pueden ser semimanuales o mecánicos.

La ocurrencia de enfermedades y plagas ampliamente diseminadas, la pobre germinación de las semillas, el menor crecimiento debido a condiciones de días cortos y fallas en la nodulación debido a condiciones variables del suelo, son algunos de los mayores factores que limitan el desarrollo del cultivo de la soja en las regiones tropicales (Pérez, 2000). Por esta razón los programas de mejoramiento de soja que se llevan a cabo por instituciones como el Instituto de Ciencias Agrícolas (INCA) y el INIFAT se orientan al desarrollo de variedades;

de alto rendimiento, resistentes a enfermedades, buena germinación y amplia adaptación a las condiciones del clima.

Actualmente los clones comerciales que son sembrados, según el Listado Oficial de Variedades Comerciales del 2016 son: INCASoy-27, INCASoy-35, INIFAT V-9, INIFAT-382, Júpiter, Luciana, Sambalba, SCIGBL1, SOYIG-001, SOYIG-101, SOYIG-20, SOYIG-22, SOYIG-86, SOYIG-84, SOYIG-N5, BRS-284, BRS-133, Conquista, Cubasoy-120, Cubasoy-23, Doko RC, Doko, Doucrop, GR-315, IGH-24, Incasoy-36, Incasoy-1, Incasoy-24.

1.3 Modelos de simulación de cultivos

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos y el análisis del sistema suelo-planta-atmósfera son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna según Hernández *et al.* (2009). Esto se debe a que son la única herramienta disponible para traducir una colección de hipótesis acerca de procesos ecológicos en una representación de cómo el ecosistema funciona en su totalidad.

Tuvieron sus inicios en la fisiología del cultivo, la física del suelo y en los procesos que interaccionan en los sistemas suelo-planta-hoja (Boote *et al.*, 1998). Permiten realizar análisis de impactos tecnológicos, económicos y ambientales, la evaluación de estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento de los cultivos.

Ritchie (1994) identifica tres tipos de modelos determinísticos. El primer tipo son los modelos estadísticos, que han sido usados para predecir rendimientos en grandes áreas. Para el desarrollo de estos modelos los rendimientos finales son correlacionados con las variables meteorológicas regionales (Thompson, 1969; 1970). Debido a sus limitaciones este tipo de modelo va siendo sustituido mediante el uso de modelos de simulación simples o algo más complejos (Abbaspour *et al.*, 1992). Los modelos mecanicistas incluyen la descripción matemática de la mayoría de los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta que se conocen en el campo de las ciencias de las plantas. Estos modelos han sido aplicados principalmente en la investigación y no son muy prácticos para la aplicación agrícola a nivel de campo. La tercera categoría de Ritchie (1994) son los modelos funcionales. Estos modelos incluyen ecuaciones

simplificadas o relaciones empíricas para representar los variados y complejos procesos que ocurren en la planta y su interacción con el ambiente.

Las aplicaciones de los modelos de simulación de cultivos pueden ser definidas como: aplicaciones estratégicas, aplicaciones tácticas y aplicaciones predictivas. En las aplicaciones estratégicas los modelos de simulación son corridos previos a la siembra para evaluar diferentes estrategias de manejo alternativos. En las aplicaciones tácticas los modelos de cultivos son corridos antes o durante el desarrollo del cultivo. Las aplicaciones estratégicas y tácticas proveen información para la toma de decisiones tanto para el campesino, los consultores, los directivos y otras personas ligadas directamente al manejo y la producción agrícola. Las aplicaciones predictivas pueden ser realizadas antes o durante el desarrollo del cultivo con el objetivo fundamental de predecir rendimientos, esta información puede ser usada a nivel de campo para la toma de decisiones o a nivel gubernamental para el desarrollo de políticas y las decisiones respecto a la seguridad alimentaria (Hoogenboom, 2000).

Los continuos avances de la informática ha permitido crear innumerables aplicaciones en todos los niveles, haciendo de los modelos de simulación una herramienta de trabajo fundamental, según Marshall (2007). Con el desarrollo se ha pasado de modelos a nivel elemental (aplicación del conocimiento fisiológico) (De Wit y Goudriaan, 1974) a modelos más avanzado a escala de planta, como CERES (Jones, 1986), CROPGRO (Boote *et al.*, 1998), EPIC (Williams *et al.*, 1989), ALMANAC (Kiniry *et al.*, 1992), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), los modelos de sistema de cultivo DSSAT (Jones *et al.*, 2003), los modelos Wageningen (van Ittersum *et al.*, 2003) y los APSIM (McCown *et al.*, 1996).

1.4 Modelo DSSAT

La plataforma de simulación de cultivos de DSSAT es un producto obtenido del proyecto IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) iniciado en 1982 para facilitar la aplicación de un conjunto de modelos de cultivo en un sistema de investigación agronómica (Jones *et al.*, 2003) aunque el proyecto finalizó en 1993, su desarrollo se ha expandido desde entonces continuándose con la actualización y el mantenimiento de este software bajo el amparo de ICASA (International Consortium for Agricultural System Application) (Jones *et al.*, 2001).

El sistema de apoyo a la decisión para la transferencia de agro-tecnología (DSSAT) es entendido como concepto básico como un paquete de modelos, cuya evaluación ha pasado de ser un conjunto de programas independientes que operan juntos, a ser un nuevo modelo de sistema de cultivo (DSSAT-CSM) el cual los incorpora, pero como módulos, usando un único modelo de suelo (Jones *et al.*, 2003).

Ha estado en uso durante los últimos años por los investigadores en todo el mundo. Este paquete incorpora modelos de 16 cultivos diferentes con software que facilita la evaluación y aplicación de los modelos de cultivo para diferentes fines, derivados de los programas CROPGRO y CERES (maíz, trigo, soja, cacahuete, arroz, patata, tomate, haba seca, sorgo, guisantes, entre otros) (Hernández *et al.*, 2009). La plataforma *DSSAT* ha tenido los siguientes impactos, según (Jones y Royce, 2008):

- Ha sido adoptado por más de 1500 investigadores en 91 países.
- Es utilizado en más de ocho proyectos nacionales e internacionales sobre el cambio climático.
- Posee cientos de aplicaciones desarrolladas independientemente de los creadores originales.
- Validó el enfoque de sistemas para la transferencia tecnológica.

En la simulación del cultivo de la soja, DSSAT-CSM utiliza el módulo CROPGRO; este es un modelo específico de soja el cual presenta mejoras útiles en cuestiones de evaluación de producción sustentable (Cavero *et al.*, 2000). Es empleado bajo una amplia gama de condiciones ambientales, aplicado a los impactos de las proyecciones de condiciones climáticas de diversas partes del mundo.

1.5 Modelo CROPGRO

El modelo CROPGRO es uno de los módulos incluidos en la infraestructura que conforma el sistema de ayuda en la toma de decisiones para la transferencia agro-tecnológica (DSSAT-CSM) (Hoogenboom *et al.*, 2017). Está basado en los modelos SOYGRO (Wilkerson *et al.*, 1983) que simula el crecimiento de la soja (*Glycinemax* L. Merr.) PNUTGRO (que simulan el crecimiento del cacahuete) y BEANGRO (que simulan el crecimiento de la judía) (Hoogenboom *et al.*, 2017).

Actualmente CROPGRO simula el crecimiento de diez cultivos, incluidos siete leguminosas de grano: (soja (*Glycinemax* L. Merr.); cacahuete o maní (*Arachishypogaea* L.); judía, poroto o frijol (*Phaseolusvulgaris* L.); garbanzo (*Cicerarietinum* L.), caupí (*Vignaunguiculata* (L) Walp), mucuna o frijol terciopelo (*Mucunapruriens* L.) y haba (*Vicia faba* L.), así como cultivos de otras familias botánicas, como tomate (*Lycopersicumesculentum* Mill.); pasto braquiaria (*Brachiariadecumbens* Sapf.) y yuca, mandioca o casabe (*Manihotesculenta* Crantz) (Hoogenboom *et al.*, 2017).

Dentro de las ventajas que presenta está, que permite que usuarios modifiquen valores en un archivo de plantilla de cosecha de especies sin cambiar cualquier código. El funcionamiento con la propia plantilla está menos propenso a errores ya que no requiere cambios en el código modelo. La desventaja principal a este método es que las cosechas con ciclos vitales muy diferentes de los descritos por el enfoque de CROPGRO no pueden ser suficientemente modeladas.

El CROPGRO integra cuatro secciones que interactúan: (1) fenología (rige la dosis de provecho de los distintos órganos que conforman la planta, determina el inicio de la removilización de nitrógeno, participa en el crecimiento en superficie de las hojas e interviene en la subsección de senescencia, (2) balance de carbono (base del modelo e incluye las subsecciones de fotosíntesis del dosel, respiración, removilización de nitrógeno y senescencia de los tejidos (Godwin y Jones, 1991), (3) balance de agua y (4) balance de nitrógeno.

1.6 Modelo CROPWAT

CROPWAT es un programa informático de la FAO para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos y las necesidades de riego a base de suelo, clima y datos de los cultivos. Además, permite el desarrollo de los horarios de riego para diferentes condiciones de gestión y el cálculo del sistema de abastecimiento de agua para diversos sistemas de cultivo. CROPWAT también se puede utilizar para evaluar las prácticas de riego a los agricultores y para calcular el rendimiento de los cultivos bajo las dos condiciones de secano y regadío (Smith *et al.*, 1991; Allen *et al.*, 1996; Caverro *et al.*, 2000; Kassam y Smith, 2001). El uso del CROPWAT ha sido reportado por varios investigadores en diversas condiciones de clima, suelo y cultivo, algunos ejemplos son:

- Estimación de los requerimientos de riego de cítricos, almendros, palma datilera y uvas en la Franja de Gaza (Al-Najar, 2011).
- Programación del riego del patrón de cultivos (en el que predominaba la caña de azúcar) de una zona con diferentes opciones de frecuencia y aplicación del riego, de esa manera determinaron si las necesidades de agua calculadas eran satisfechas con la cantidad de agua disponible en la región (Arteaga *et al.*, 2011).
- Para pronosticar el riego de King Grass (*Pennisetumpurpureum*) en zonas llanas del oriente cubano (Rodríguez, 2017).

1.7 Influencia del riego en el cultivo de la soya

La escasa disponibilidad de recursos hídricos, unido a los altos costes del riego, obliga a adoptar cambios drásticos en el manejo de éste, al objeto de contribuir a la obtención de producciones económicamente rentables, con dotaciones hídricas inferiores a las que plantas requieren para su óptimo crecimiento y producción. Para ello resulta fundamental conocer los efectos del déficit hídrico sobre la producción y la calidad de la cosecha, conocimiento que se viene buscando a través de la aplicación de prácticas de riego en las que sólo una fracción del agua perdida a través del proceso de evapotranspiración (ETc) es reemplazada mediante el riego, y que han sido englobadas dentro del término riego deficitario (Rojas y Sacristán, 2013).

El riego deficitario controlado (RDC) es una estrategia de aplicación de agua de riego, consistente en un aporte hídrico de una magnitud inferior a los requerimientos evapotranspirativos. Sirve para manejar el desarrollo vegetativo y reproductivo de la vida de las plantas, la cual en algunos casos produce una reducción en el rendimiento (Zapata y Segura, 1995).

Numerosos estudios han demostrado que el riego deficitario puede conseguir ahorros sustanciales de agua, si bien su correcta aplicación precisa de un conocimiento riguroso del comportamiento del cultivo, ya que la respuesta al estrés hídrico varía considerablemente entre especies vegetales (Padilla-Díaz *et al.*, 2016; Alcaras *et al.*, 2016; Kifle y Gebretsadikan, 2016; Yang *et al.*, 2017)

Sin embargo, estudios como el llevado a cabo por Maduro *et al.* (2017), para el cultivo de soya, demuestran la gran dependencia que tienen los rendimientos de

la lámina total de riego aplicada; en este experimento varían la lámina de riego desde 770 m³/ha hasta 7852 m³/ha y consecuentemente los rendimientos aumentan desde 513 kg/ha hasta 4343 kg/ha. En este sentido, González Robaina *et al.* (2013) obtiene la función agua rendimiento para el cultivo de la soya en Sur de la Habana demostrando la variación de los rendimientos en función de la cantidad de agua aplicada.

Sharda *et al.* (2019) evalúan estrategias de riego, para el cultivo de la soya, en las cuales varían el porcentaje del límite superior de agua disponible (LSAD) al cual comienza el riego desde 20 % hasta 80 %. En este estudio se evidencia un apreciable crecimiento de los rendimientos a medida que aumenta el % del LSAD al cual comienza el riego. Sin embargo, no se han encontrado estudios reportados en la literatura que combinen la lámina de riego aplicada y el porcentaje del LSAD cuando comienza un riego, proceso que permitiría seleccionar una estrategia de riego que haga un uso eficiente del agua y que a su vez garantice altos rendimientos.

1.7.1 Fases sensibles de la soya al déficit hídrico

Las etapas del ciclo vegetativo de la soya de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre la fructificación avanzada y el llenado de granos (Fehr y Caviness, 1977), es decir el período más crítico de determinación del rendimiento. El llenado de grano es para varios autores el período más sensible (Carballo de Silva, 1990). Según (Andriani, 2002), este es el período más crítico para el cultivo; puesto que ocurren pérdidas de más del 40 % en el rendimiento, respecto a esto García y Sur (2009), señalan que el llenado de granos es la etapa más susceptible al déficit hídrico; debido a que un estrés en esta etapa produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de semillas por vaina y del peso de las semillas. Si el estrés hídrico ocurre durante el llenado de grano, el peso de las semillas será el componente de rendimiento afectado (Salvagiotti *et al.*, 2009).

Estudios realizados durante el cultivo de la soya han demostrado que la semilla de soya necesita absorber el 50 % de su volumen de agua para germinar, y que es muy sensible a sequías prolongadas en etapa de floración, durante la cual presenta una demanda hídrica de 7.5 mm/día (Alvarado *et al.*, 2012). Según MAMBRIN *et al.*, (2005) se coincide que a partir de la floración aumentan las

necesidades hídricas, lo que significa que desde ese momento y hasta la cosecha los riegos deben ser periódicos, para obtener mayores rendimientos.

En Cuba no se ha puesto en práctica la aplicación de estrategias de riego que provoquen un déficit hídrico para el cultivo de la soya y que garanticen rendimientos aceptables, pero si en otros cultivos; como ejemplo el plátano, arrojando resultados negativos, ya que en las fases en las que se produjo un déficit hídrico en relación con la demanda, se vio afectada la productividad (Martínez, 2013); no siendo así para la piña, que presentó alta resistencia a la sequía y la capacidad de aprovechar muy eficientemente el agua disponible (Pérez, 2017).

.

Capítulo 2. Materiales y métodos

2.1 Introducción

Los experimentos desarrollados de manera virtuales fueron realizados con los datos agroclimáticos de los terrenos cercanos a los límites entre el asentamiento de Pedrín Troya y la UEB Héctor Molina Riaño, pertenecientes a la cooperativa de producción agropecuaria Cuba-Nicaragua, ubicada en los 22°46'55"N 81°54'25 O" del municipio de San Nicolás.

2.2 Características edáficas del sitio de estudio

El suelo fue clasificado como Ferralítico Amarillento gléyi acorde con la nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba (Hernández *et al.*, 1999) o Ferri-Gleyic Lixisol (WRB, 1998). Todos los horizontes del perfil tienen una textura arcillosa, con un contenido de arcilla en torno al 76,4 % en el primer horizonte, que llega hasta los 40 cm de profundidad, y en torno al 85 % en los horizontes restantes hasta 110 cm; ello hace que tengan mala aireación, difícil drenaje y labranza, apelmazamiento y formación de costra según Molina (2002).

El pH del suelo es próximo a 7,4 (neutro), condición óptima para el desarrollo del cultivo de la soya y la asimilación de nutrientes, según Andrades y Martínez, (2001). La parcela tiene una topografía plana, con pendiente de aproximación al 1 % en dirección sudeste. Los valores de pH, materia orgánica, fueron extraídas de Corluy (2001), quien realizó ensayos de campo en parcelas colindantes, y están recogidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Principales características del perfil del suelo de la parcela experimental.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH H ₂ O	pH KCl	Materia orgánica (%)	CaCO ₃ (%)
A	0-40	76,4	16,9	6,7	7	6,1	2,42	0,8
B	40-90	88,2	8,3	3,4	7,6	6,7	0,43	0,53
C	90-130	83,9	11,3	4,8	7,5	6,4	0,31	0,8

Como resultado de los ensayos de campos en parcelas colindantes extraídos (Corluy, 2001) fueron determinadas las curvas tensión humedad de cada horizonte, cuyos parámetros del modelo de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) se muestran en la Tabla.2.2.

Tabla 2.2 Parámetros del modelo de Van Genuchten para cada horizonte del perfil de suelo.

Horizontes	θ_r	θ_s	α_d	n	m^*
A	0.3493	0.6300	0.0616	1.1250	0.1111
B	0.0961	0.5679	0.0692	1.0442	0.0423
C	0.0000	0.5243	0.0138	1.039	0.0373

El modelo DSSAT también necesita de los valores de humedad a capacidad de campo y límite de marchitez que para estos suelos corresponde a los potenciales de 33 y 1500 kPa respectivamente. Para obtener dichos valores fueron evaluados los modelos de Van Genuchten de cada perfil para estos valores de potencial.

La conductividad hidráulica de saturación fue determinada en campo mediante un permeámetro de Gelpi (Corluy, 2001) para los primeros dos horizontes. Los valores se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores de la conductividad hidráulica de saturación.

Horizontes	$K_s(\text{cm d}^{-1})$
Lixisol A*	3.00
Lixisol B*	0.20

2.3 Características climáticas durante los años de estudio

En la caracterización climática del área de estudio se utilizó un período de 30 años, comprendido entre 1986 y 2016 cuyos datos meteorológicos provienen de la estación climática de Güines ubicada en los 22°50'51"N 82°01' 25"O; la cual se ubica a 16 km al noroeste del área de estudio.

El clima se clasifica estacionalmente húmedo, según la clasificación dada por Köppen (avanzada), empleada por el Instituto de Meteorología.

A partir de los valores de precipitación (Prec), temperatura máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) fueron calculados los valores promedios mensuales de cada uno de estos parámetros durante el período de estudio; los cuales fueron reportados por la estación climatológica del municipio Güines. Como se puede apreciar en la Tabla 2.4 las temperaturas máximas fluctuaron entre los 26,7 y 32,8 °C; mientras que las mínimas, oscilaron sobre los 15,5 y 22,8 °C respectivamente; las precipitaciones acumuladas no reportaron valor significativo durante los meses de noviembre a marzo, se mantuvieron por debajo de los 80 mm. La irradiación solar es otra de las variables necesarias para la realización de los experimentos virtuales, la cual fue calculada según la metodología descrita en el epígrafe 2.8.

Tabla 2.2. Valores promedios mensuales calculados a partir de los valores de precipitación (Prec), temperatura máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) entre el período 1986-2016 reportados por la estación climatológica del municipio Güines.

Meses	Prec(mm)	T máx (°C)	T mín (°C)
Enero	45,5	26,7	15,5
Febrero	50,0	27,7	15,6
Marzo	51,5	28,7	16,7
Abril	77,3	30,5	18,2
Mayo	173,2	31,5	20,0
Junio	267,6	31,8	21,5
Julio	188,7	32,6	22,8
Agosto	200,7	32,8	21,6
Septiembre	229,1	32,0	21,5
Octubre	134,2	30,4	20,6
Noviembre	54,0	28,5	18,8
Diciembre	44,9	28,3	17,7

2.4 Variedad de cultivo de soya a seleccionar y metodología seguida para su selección

De las múltiples variedades de cultivo de soya que actualmente son sembradas en Cuba (Listado Oficial de Variedades Comerciales en Cuba, 2016) se seleccionó para el ensayo el clon Júpiter, por poseer caracteres significativos con respecto a los demás clones; entre ellos se pueden citar, según Romero *et al.* (2013); que alcanza gran altura la planta en las primeras dos semanas de germinación, así como en los primeros dos meses de su ciclo vegetativo. Dichos resultados pudieran estar relacionados con la respuesta de las diferentes variedades al fotoperíodo. En el ciclo vegetativo de la soya la altura de la planta es uno de los indicadores más afectados por la duración del día, y varía según la especie, la latitud y la época del año, según Malik *et al.*, (2009). Además, la elección se fundamenta en que en cultivares de porte alto la altura es un requisito fundamental, ya que propicia la cosecha mecanizada y posibilita que estos sean más eficientes para competir con las plantas arvenses (FAO, 2011).

Es también significativo que dentro del propio estudio realizado por (Romero *et al.*, 2013) en un suelo Fersialítico Pardo Rojizo lixiviado, obtiene que esta variedad comparada con otras seis, alcanza los mayores rendimientos; de 2200 kg/ha en la siembra de noviembre y marzo.

Por último, el clon Júpiter es también una de las 25 variedades de cultivo que se encuentra calibrada en el módulo de soya del modelo de simulación de cultivo DSSAT.

2.5 Caracterización de la variedad seleccionada

La variedad Júpiter se desarrolló en Gainesville, Florida en el año 1956. Proviene del cruzamiento D49-2491 x Bilomi № 3. La altura promedio de la planta es de 80 cm. El hábito de crecimiento es determinado, tiene buena ramificación y la maduración es intermedia, a los 115 días. La vaina es pequeña y no se abre, con dos a tres semillas medianas (17,45 g/100 semillas) color verde crema, presenta nodulación en sus raíces, las semillas son de color amarillo, hilio color café e hipocótilo y flor de color lila. Es resistente a la enfermedad conocida como pústula bacteriana y no se vuelca, según Días (1976).

2.6 Modelo CROPGRO de simulación del crecimiento de leguminosas

El CROPGRO, es uno de los módulos que integra el modelo de simulación de cultivo DSSAT, que simula el crecimiento y desarrollo del cultivo leguminoso soya, variedad Júpiter.

2.6.1 Desarrollo del cultivo

El desarrollo del cultivo de soya variedad Júpiter considera 13 fases de crecimiento (entre siembra y madurez de cosecha) con diferencias en la sensibilidad a la temperatura, fotoperíodo y déficits (hídrico y de nitrógeno); cada una de estas tiene un único acumulador de desarrollo que empieza a sumar en un estadio de desarrollo dado y termina cuando supera un valor umbral preestablecido, considerándose entonces que se produce el estadio de desarrollo siguiente:

La tasa de desarrollo fisiológico expresada como día fisiológico transcurrido por día del calendario, (DF/día); durante una fase de desarrollo, es función de la temperatura (T), fotoperíodo (P) y el déficit hídrico. Cada una de estas funciones adopta valores comprendidos entre 0 y 1.

$$DF/día = f(T) \cdot f(P) \cdot f(\text{déficit hídrico}) \quad \text{Ec 2.1}$$

Como la tasa de desarrollo del cultivo no tiene la misma respuesta a los factores ambientales antes mencionados a lo largo de todo su ciclo. El número de días fisiológicos necesarios para completar una fase del ciclo es igual al número de días del calendario si la temperatura, el fotoperíodo y las condiciones hídricas son las óptimas.

Las características de la variedad de soya Júpiter están almacenadas en los parámetros contenidos en tres archivos: especie (*.SPE), ecotipo (*.ECO) y cultivar (*.CUL). En el Anexo 2 se pueden observar los parámetros contenidos en el archivo especie (*.SPE), en el que están puntualizadas las características comunes a todos los cultivares de la especie. En el archivo *.CUL se concentran los coeficientes que están referidos a las características más variables entre los cultivares (Anexo 3) y en el *.ECO los coeficientes que se refieren a las características comunes de cada grupo de madurez (Anexo 4).

2.6.2 Balance de Carbono

La simulación del aumento total de biomasa del cultivo se apoya sobre el balance de carbono que incluye la fotosíntesis bruta, la respiración, el reparto de asimilados, la removilización de proteínas y carbohidratos desde los tejidos vegetativos y la abscisión de algunos órganos de la planta.

El hidrato de carbono (glucosa $\approx \text{CH}_2\text{O}$) es “la unidad molecular básica” utilizada en CROPGRO para calcular la fotosíntesis bruta, la respiración de mantenimiento, así como la conversión de la glucosa mediante la respiración de crecimiento en peso seco de tejido de la planta.

La tasa de cambio en el total de materia seca del cultivo (W ; g m^{-2}), es descrita como:

$$\frac{dW}{dt} = W_+ - SL - SS - SR - SSH - CT - PT \quad \text{Ec 2.2}$$

donde SL, SS, SR, y SSH son partes perdidas de hojas, tallos, raíces y vainas respectivamente, CT es la parte de la fotosíntesis bruta que contribuye a engrosar la reserva (“pool”) de hidratos de carbono, PT la cantidad de biomasa perdida debido a plagas y enfermedades; el crecimiento nuevo, W_+ , es función de la fotosíntesis bruta (P_g), de la respiración de mantenimiento (R_m) y de la eficiencia de la conversión (E) de g y de CH_2O en g de materia seca como muestra la ecuación 2.3.

$$W_+ = P_g - R_m \quad \text{Ec 2.3}$$

2.6.2.1 Fotosíntesis del cultivo

En el modelo CROPGRO, la fotosíntesis es dependiente de la intercepción de luz, edad de la hoja, temperatura, concentración de CO_2 , estrés hídrico y concentración de clorofila en hojas (Boote *et al.*, 1998). La fotosíntesis puede ser deducida en función de las opciones:

- Fotosíntesis diaria de la cubierta vegetal (modelo más empírico)

Se calcula la fotosíntesis diaria para una cubierta vegetal óptima, en función de la radiación solar diaria, para luego multiplicarla por factores comprendidos entre 0 y 1 para la intercepción de luz, la temperatura, el contenido en nitrógeno de la hoja y el déficit hídrico.

- Fotosíntesis horaria a nivel de hoja (modelo más mecanicista)

Este modelo permite describir de manera más mecanicista la respuesta de la fotosíntesis a la temperatura, a la concentración de CO₂ y a la radiación solar. Asimismo, la simulación suministra resultados más sensatos de la respuesta de la intercepción de luz y del crecimiento, a la distancia entre líneas y a la densidad de plantas (Parton y Logan, 1981; Kimball y Bellamy, 1986).

2.6.2.2 Respiración de crecimiento y de mantenimiento

La respiración de mantenimiento es función de la temperatura, de la tasa de fotosíntesis bruta y de la biomasa del cultivo, a la que se le restan los lípidos y las proteínas almacenadas en las semillas.

La respiración de crecimiento y la eficiencia de la conversión de la glucosa en tejidos de la planta se calculan utilizando la teoría de los equivalentes glucosa desarrollada por Penning de Vries *et al.* (1974) y Penning de Vries y Van Laar (1982).

Los equivalentes glucosa necesarios para la síntesis de los disímiles tejidos están en manos de la composición química del tejido y de las rutas metabólicas empleadas para su síntesis. Esta proximidad permite suponer: i.- la glucosa respirada para proveer ATP, NADH, y NADPH para la biosíntesis; ii.-la condensación, reducción e incremento del contenido de energía del tejido.

Conocido los costes en equivalentes-glucosa de los seis tipos de compuestos, antes mencionados, y la composición aproximada del tejido, se puede calcular el coste global en equivalentes-glucosa de la síntesis de un gramo de tejido (Penning de Vries y Van Laar, 1982):

$$E = \frac{1}{2.56 \cdot FP + 1.24 \cdot FC + 3.11 \cdot FF + 2.17 \cdot FL + 0.93 \cdot FO + 0.05 \cdot FM} \quad \begin{matrix} \text{Ec} \\ 2.4 \end{matrix}$$

Donde,

E = g producto por g de glucosa, y FP, FC, FF, FL, FO y FM son las fracciones de proteína, de celulosa-almidón, de lípidos, de ácidos orgánicos y de minerales, respectivamente.

2.6.2.3 Reparto de asimilados en función del balance de Carbono

Los algoritmos de reparto de asimilados de CROPGRO varía con la fase de desarrollo del cultivo y la formación de nuevos órganos reproductivos. La distribución puede ser:

- Reparto de asimilados hacia los órganos vegetativos (la parte que queda una vez que se ha cubierto la demanda de los órganos reproductivos).
- Reparto de asimilados hacia los órganos reproductivos (el orden de primacías para distribuir los asimilados es el siguiente: fijación simbiótica de nitrógeno y crecimiento de nódulos, semillas, carpelos, formación de nuevas vainas y en último lugar crecimiento vegetativo).

CROPGRO controla la producción de asimilados, exceptuando circunstancias como:

- 1) apertura del proceso vegetativo cuando la evolución potencial del área foliar y la extensión de los sumideros de asimilados pueden ser limitantes.
- 2) durante un déficit de nitrógeno pronunciado que delimita el crecimiento de los tejidos vegetativos o de las semillas.
- 3) si no se han formado suficientes vainas y semillas para utilizar la producción de asimilados.

2.6.2.4 Absorción, balance de Nitrógeno y fijación simbiótica de Nitrógeno respecto al balance de Carbono

CROPGRO mediante un algoritmo similar al utilizado en el CERES-Wheat (Ritchie *et al.*, 1989; Godwin y Jones, 1991) simula los procesos del balance de N del suelo y de su extracción por las raíces, la absorción del mismo, la mineralización, inmovilización, desnitrificación y la lixiviación.

La demanda total del cultivo se calcula a partir del incremento en peso de cada tipo de órgano, multiplicado por la concentración máxima de N admitida para cada parte de la planta. Esto último viene especificado en el archivo que define las características de la especie.

Del mismo modo se ha incorporado un módulo que simula la fijación simbiótica de nitrógeno. Cuando las extracciones de nitrógeno son capaces de cubrir la demanda, la progresión de los nódulos es baja y cuando las extracciones son

insuficientes, se utilizan hidratos de carbono en la fijación simbiótica de nitrógeno en función de la masa de los nódulos y de las características predeterminadas de la especie.

La tasa de fijación de N_2 está también influenciada por el déficit hídrico del suelo, así como la aireación del mismo y el estadio de desarrollo de la planta (Boote *et al.*, 1998).

2.6.3 Removilización del Nitrógeno y de los hidratos de carbono, senescencia y madurez

El modelo permite la acumulación de reservas de hidratos de carbono en hojas y tallos bajo diferentes circunstancias: 1) la ausencia de nitrógeno restringe el crecimiento, 2) la insuficiente demanda al inicio del ciclo o cuando se ha fijado el número definitivo de semillas y 3) durante el período desde la apertura de la floración hasta que emprende la fase de crecimiento rápido de las semillas.

La removilización de proteínas permite a la planta aumentar su ritmo diario de producción de semillas, pero conlleva a una caída de la concentración de nitrógeno en las hojas, ocasionando una reducción de la fotosíntesis de la cubierta como una pérdida progresiva de hojas por abscisión. Como consecuencia de esta rebaja proteica va relacionada la reducción del área foliar, el peso de hojas y tallos y sus proteínas respectivamente.

La senescencia de las hojas pende de la removilización de las proteínas, pero se ve precipitada con el déficit hídrico, esto se transfiere a una senescencia gradual; acelerándose a partir de la madurez fisiológica, induciendo a la abscisión prácticamente de todas las hojas (Fehr y Caviness, 1977).

2.6.4 Balance hídrico del suelo, crecimiento de las raíces y evapotranspiración

La simulación del balance hídrico del suelo fue descrita por Ritchie (1985), y es el mismo modelo que se emplea en todos los modelos del DSSAT.

Para determinar la infiltración como la escorrentía del agua procedente de precipitaciones o de riegos, se utilizan las curvas constituidas por el "Soil Conservation Service" (SCS). En indudables acontecimientos, el drenaje puede verse delimitado por la conductividad hidráulica de saturación y algunos horizontes pueden encontrarse saturados en ciertos períodos; originando una

reducción de la densidad de raíces en los horizontes, y una disminución tanto de las extracciones de agua como de la fijación simbiótica de nitrógeno.

Tanto la masa, como la longitud de raíces de cada uno de los horizontes son variables de estado que se calculan a diario durante la simulación. La longitud de raíces generada durante el día obedece a la cantidad de asimilados destinados al crecimiento subterráneo y de un parámetro que define la cantidad de masa que contiene una unidad de longitud de raíz. La asignación de la longitud de raíces nuevas generadas a los diferentes horizontes, dependerá de tres factores:

- 1) La progresión en profundidad del frente radical.
- 2) Una función preferencial de distribución de las raíces en cada uno de los horizontes del suelo.
- 3) Contenido de agua de cada una de las zonas.

Si la fracción de agua disponible de un horizonte es inferior a 0.25 de la potencial, el modelo tiene en cuenta una reducción del crecimiento de las raíces en este horizonte. Por esto, las raíces tienden a crecer más rápidamente en los horizontes húmedos que en los secos. El modelo también tiene en cuenta una reducción del alargamiento de las raíces en cuanto el suelo está cercano a la saturación. Las mismas circunstancias que frenan el crecimiento radical, estimulan la senescencia de las raíces.

El modelo CROPGRO permite escoger entre dos opciones para calcular la evapotranspiración potencial o de referencia del cultivo (ET_0 , mm d⁻¹):

(1) Priestley-Taylor según Ritchie (1972, 1985); opción emplea por defecto por el modelo y la más aprovechada, debido en gran medida a que requiere menos datos climáticos (datos diarios de radiación solar y temperaturas mínimas y máximas).

(2) Penman-Monteith-FAO 56 (PM-FAO 56) según Allen *et al.* (1998); que requiere, además, datos diarios de la temperatura del punto de rocío y de la velocidad del viento.

Tanto para PT como con PM-FAO 56, el modelo utiliza una función exponencial del índice de área foliar (IAF) para separar la transpiración potencial del cultivo

de la evaporación de agua del suelo. La capacidad de suministro de agua del sistema suelo-raíces es función de la densidad de raíces y de la humedad de cada uno de los horizontes.

2.6.4.1 Efecto del déficit hídrico sobre los procesos

Dentro de los procesos que simula el modelo CROPGRO se establecen sensibles al déficit hídrico: la fotosíntesis, transpiración, fijación simbiótica de nitrógeno, expansión de las hojas (al disminuir la superficie específica de las hojas (SLA)), la tasa de aparición de hojas, el alargamiento de los entrenudos y reparto de asimilados hacia la parte subterránea del cultivo.

Cuando la extracción de agua por las raíces no consigue cubrir la demanda del cultivo la fotosíntesis del mismo se ve reducida, la disminución de la tasa de aparición de hojas, de la SLA, del alargamiento de los entrenudos y el aumento de la proporción de asimilados orientados hacia las raíces se inicia de forma más precoz (al tratarse de procesos más sensibles a la sequía), ya que se ocasiona cuando la relación entre la extracción de agua por las raíces y la evapotranspiración potencial del cultivo cae por debajo de 1.5; el mismo modo la velocidad de avance del frente de raíces se ve incitada por la insuficiencia de agua a partir de una relación inferior a 1, mientras que, cuando la proporción de agua disponible en los horizontes superficiales (5-40 cm de profundidad) disminuye por debajo de un valor umbral, la fijación simbiótica de nitrógeno se ve reducida. Asimismo, cuando la demanda evapotranspirativa no se satisface en su totalidad por las extracciones de agua por las raíces, la senescencia de las hojas se acelera.

2.7 Metodología de trabajo

El esquema general de la metodología de trabajo que se propone para alcanzar los objetivos planteados en la investigación se muestra en la Figura 2.1. Inicialmente, se parte del conocimiento de los datos del perfil de suelo y de los valores de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para la zona de estudio. Sin embargo, es importante destacar que es necesario también el conocimiento de la radiación solar diaria y que en este caso la estación climática del municipio Güines no mide esta variable, por tanto es imprescindible

implementar una metodología que permita obtener la radiación solar diaria, la cual será descrita en la sección 2.8.

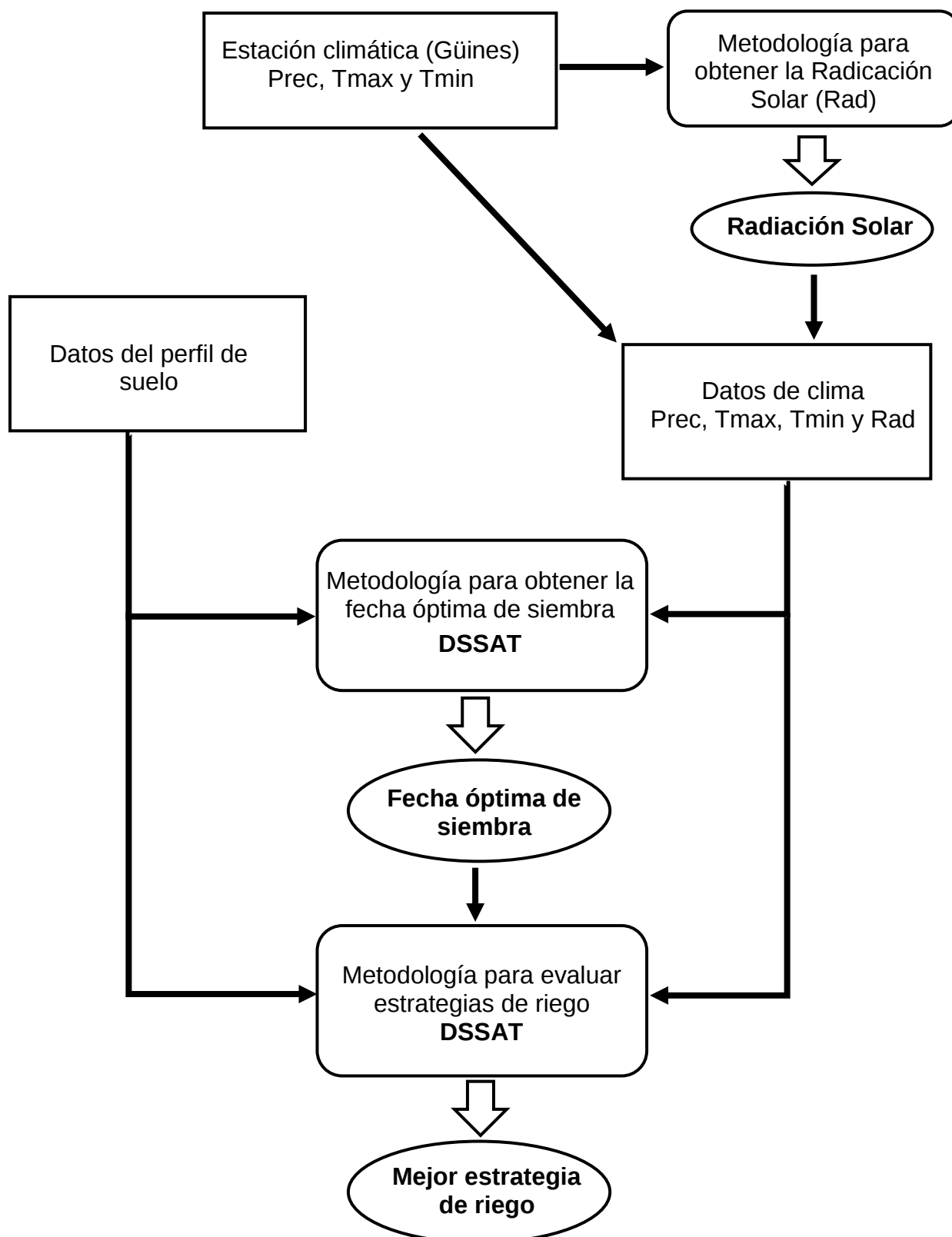


Figura 2.1 Esquema general de la metodología de trabajo.

Una vez obtenida la radiación solar diaria se completan todos los datos de clima necesarios, los que junto con los del perfil de suelo serán introducidos en el DSSAT y se utilizarán por la metodología que permite determinar la fecha óptima de siembra, la cual será abordada en el epígrafe 2.9. Es notorio señalar que en esta metodología se aplica a la variedad de soya en cuestión, la Júpiter.

Partiendo de haber obtenido la fecha óptima de siembra y del conocimiento de los datos de suelo y clima, se diseña e implementa en DSSAT la metodología para evaluar diferentes estrategias de riego, ver acápite 2.10. Como resultado de este proceso se obtiene la mejor estrategia de riego en la fecha óptima de siembra para variedad de soya Júpiter bajo las condiciones edafoclimáticas de la zona de estudio.

2.8 Metodología para la obtención de la radiación global diaria

La radiación global diaria es una de las variables climáticas imprescindible para este estudio, pero la estación climática de la zona de estudio no mide la misma, por lo que es necesario su obtención por otras vías. En la literatura se proponen dos formas fundamentales para obtener esta variable en cualquier lugar del planeta, la primera es la estimación de la misma mediante el modelo VP-RAD, ver acápite 0 y la segunda es adquirir los valores de esta variable de los servidores de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA), los cuales son estimados por satélites espaciales y además se encuentran publicados gratuitamente.

Existen controversias con respecto a cuál de estos dos métodos es el más exacto por lo que se procede a la implementación de ambos en una estación climática donde sí se midan los valores reales de la radiación global diaria con exactitud. En este caso la estación climática seleccionada fue la de Homestead en la Florida, su posición geográfica es 25,5126° de latitud y -80,5031° de longitud, la cual se encuentra relativamente cerca de la zona de estudio. En la Figura 2.2 se puede observar la ubicación de esta estación y la del sitio de interés de esta investigación.

La estación climática de Homestead se encuentra equipada con sensores de última tecnología y miden diariamente una amplia gama de variables meteorológicas como: las precipitaciones, las temperaturas máximas y mínimas

del aire y el suelo, la humedad relativa, la velocidad del viento, la radiación solar entre otras. Además, los valores de las mediciones de estas variables se encuentran publicados gratuitamente en la página web de la estación (FAWN, 2019).

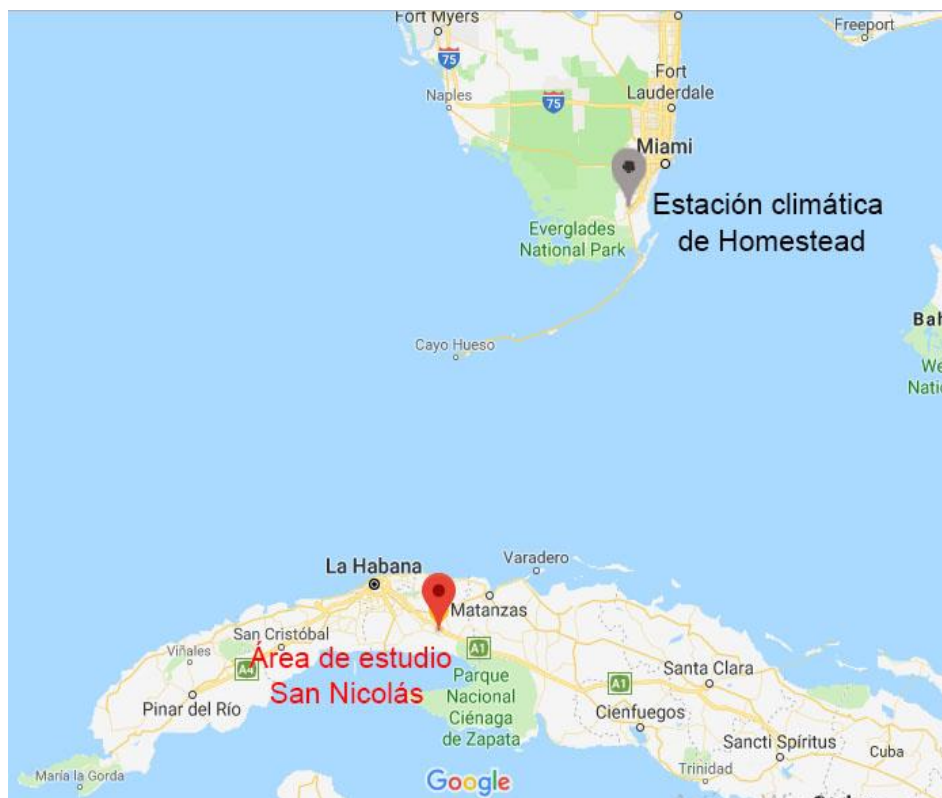


Figura 2.2 Estación climática de Homestead en la Florida y su posición con respecto al área de estudio.

Posteriormente a que se obtenga la radiación solar por ambos métodos para la estación climática de Homestead, los resultados obtenidos serán comparados con los valores de reales de radiación medidos en la misma posición. Este proceso permitirá decidir cuál de los dos mecanismos es el más exacto y por ende cuál es que se utilizará en este estudio. Con el objetivo de tomar la decisión correcta en este sentido se hará un análisis estadístico considerando la media, la varianza y otros estadígrafos, además se realizarán test estadísticos como los test de igualdad de varianzas y medias.

2.8.1 Obtención de la radiación solar mediante el modelo VP-RAD

El modelo VP-RAD propuesto por Winslow *et al.* (2001) usa los valores de la temperatura máxima y mínima, además de las precipitaciones para calcular la radiación solar diaria.

La radiación global (R_s) es estimada a partir de la radiación en la superficie de la atmosfera Q_0

$$R_s = \tau_{ef} D [1 - \beta e_s(T_{min}) / e_s(T_{min})] Q_0 \quad \text{Ec 2.5}$$

Para el cálculo de Q_0 se siguió la metodología de (Antonić, 1998) donde:

$$Q_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot 1367}{\pi} \left[1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \left[\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(w_s) + \frac{\pi w_s}{180} \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \right] \quad \text{Ec 2.6}$$

Cuyos parámetros (w_s : ángulo para el cual se oculta el sol y δ : ángulo de declinación del sol) pueden ser calculados mediante:

$$w_s = \text{Arcos}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad \text{Ec 2.7}$$

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[360 \frac{284 + n}{365}\right] \quad \text{Ec 2.8}$$

La latitud del lugar es $\varphi = 22.83^\circ \text{Norte}$

Por otro lado, T_{ef} es la transmisividad de la atmósfera que puede ser obtenida para cada sitio en función de su latitud y la temperatura media anual mediante:

$$\tau_{ef} = (\tau_0 \tau_v)^{P/P_0} \quad \text{Ec.2.9}$$

Donde $\frac{P}{P_0}$ es la corrección de la presión atmosférica producto a la altitud del lugar:

$$\frac{P}{P_0} = [1 - (2.2569 \cdot 10^{-5})z]^{5.2553} \quad \text{Ec.2.10}$$

La transmisibilidad del aire limpio y seco $\tau_0 = 0.774$, la transmisibilidad del vapor de agua puede ser estimada a partir de la temperatura media anual del aire para los días sin lluvia (Precipitación menor de 1 mm):

$$\tau_v = 0.9636 - 9.092 \cdot 10^{-5} [T_{mean} + 30]^{1.8232} \quad \text{Ec 2.11}$$

Y para los días en los que precipita más de 1mm $\tau_v = 0.13$.

Por su parte, $e_s(T_{max})$ y $e_s(T_{min})$ son las presiones de vapor saturado a las temperaturas máximas y mínimas respectivamente y son estimadas mediante:

$$e_s(T) = 0.611e^{17.269 \cdot T / (237.7 + T)} \quad \text{Ec 2.12}$$

El parámetro β es generalmente igual a 1.041, aunque en sitios de elevada variación de temperaturas durante el día, el valor de β puede ser estimado (Winslow *et al.*, 2001). La función D la corrección debido a la longitud del día, que expresa el cociente entre la radiación global total del día y la radiación acumulada hasta el momento donde la temperatura es máxima y por tanto mínima la humedad relativa, su valor se calcula mediante:

$$D = \left[1 - \frac{2 \left(\frac{N}{2} - \frac{\pi}{4} \right)^2}{N^2} \right] - 1 \quad \text{Ec 2.13}$$

Donde N es la duración del día solar, que se calcula mediante:

$$N = \frac{2}{15} \text{Arcos}[-\text{Tan}(\varphi) \cdot \text{Tan}(\delta)] \quad \text{Ec 2.14}$$

2.8.2 Radiación solar estima por la NASA

La NASA, a través de su programa de investigación en ciencias de la Tierra, ha apoyado durante mucho tiempo la investigación de los sistemas de satélite, los cuales proporcionan datos importantes para el estudio del clima y los procesos climáticos. Estos datos incluyen estimaciones promediadas climatológicamente a largo plazo de las cantidades meteorológicas y flujos de energía solar de superficie. Estos productos basados en satélites y modelos han demostrado ser lo suficientemente precisos para proporcionar datos fiables de recursos solares y meteorológicos sobre regiones donde las medidas de superficie son escasas o inexistentes, además han sido utilizados en varias investigaciones (Stillman y Zeng, 2018; Termite *et al.*, 2016).

El proyecto de Meteorología de Superficie y Energía Solar (SSE) es una de las actividades anteriores financiadas por la NASA. El sitio web de entrega de datos de SSE se centra en proporcionar un fácil acceso a los parámetros valorados en la industria de energía renovable y se lanzó inicialmente en 1997. Posteriormente en el 2003 se inició el proyecto POWER, el cual abarcó el componente SSE y agregó nuevos conjuntos de datos con aplicabilidad a las industrias de

arquitectura y agrícola. Los datos en POWER se proporcionan en una cuadrícula global con una resolución espacial de 0.5 ° de latitud por 0.5 ° de longitud (Stackhouse *et al.*, 2018).

La radiación solar diaria, la cual es la variable de interés se encuentra estimada en el sitio web del proyecto POWER para el área de estudio. Además, se cuentan con mediciones diarias de misma desde el año 1988 lo cual es un periodo tiempo suficiente para llevar a cabo esta investigación, por lo que se consideró el uso de la misma desde esta fuente.

2.9 Metodología para obtener fecha óptima de siembra

Con el objetivo de obtener la fecha óptima de siembra se diseñó la metodología que se muestra en la Figura 2.3. En la misma, se parte del conocimiento de las variables climáticas de la zona de estudio: las precipitaciones, la radiación solar, y las temperaturas máximas y mínimas. También es necesario contar con los datos del perfil de suelo del lugar donde serán realizados los experimentos. Posteriormente se debe usar las mismas condiciones iniciales en todos los tratamientos, entiéndase por condiciones iniciales: área del terreno, cantidad de surcos, dimensiones del surco, entre otros factores.

La fecha óptima de siembra se puede encontrar en cualquiera de los meses del año. Por tanto, se varía este parámetro desde el 1 de enero hasta el 15 de diciembre con un intervalo de 15 días entre sí, obteniendo un total de 24 posibilidades. Luego se combinan las posibles fechas de siembra siembras con los datos de clima, los valores del perfil de suelo y las condiciones iniciales, resultando un total de 24 tratamientos.

Los tratamientos obtenidos serán aplicados a la variedad de soya estudiada. A continuación, se corre el modelo de simulación por cada tratamiento y por cada uno de los años de interés, este periodo de simulación depende de la disponibilidad de los datos de la estación climática.

Posteriormente a las simulaciones se obtendrán los resultados de los rendimientos, el peso del grano, el índice de área foliar y del clima. Los mismos, permitirán escoger la óptima fecha de siembra para la variedad estudiada bajo las condiciones de suelo y clima de interés.

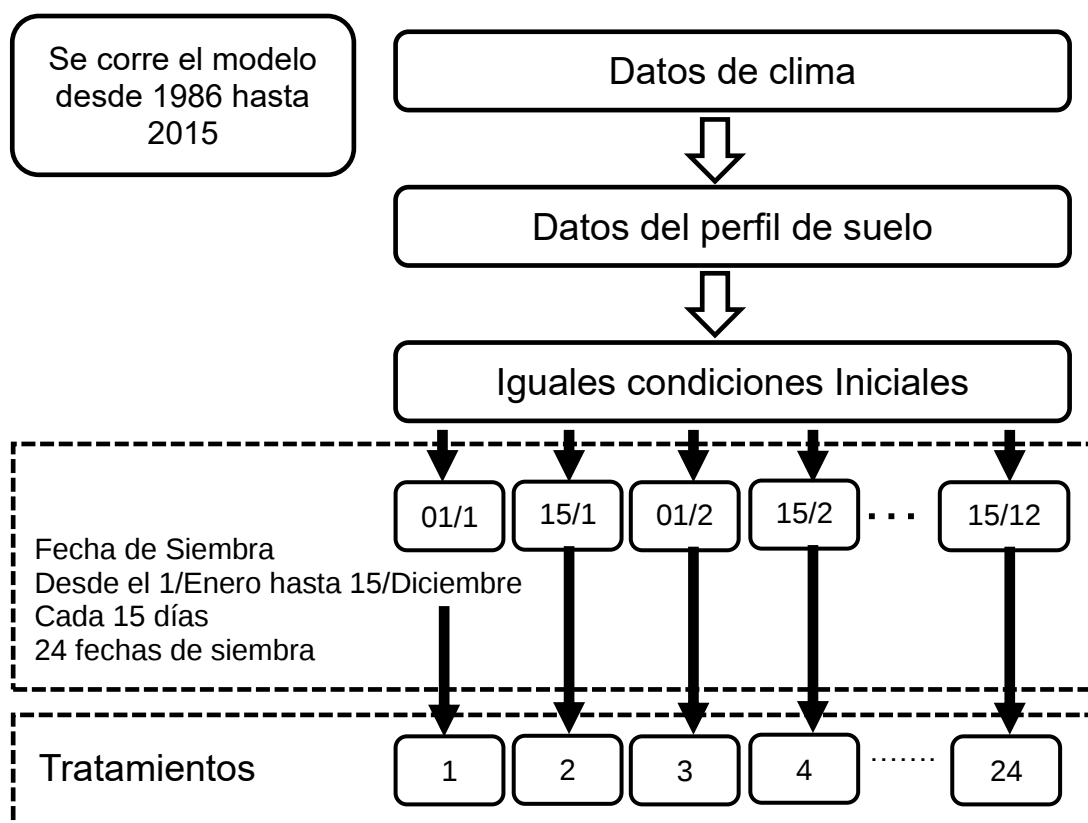


Figura 2.3 Metodología para obtener la fecha óptima de siembra.

2.9.1 Implementación en DSSAT de la metodología para obtener la fecha óptima de siembra

El software DSSAT permite a través de la herramienta *Seasonal* simular experimentos virtuales en varios años consecutivos.

Al DSSAT le es permisible añadir nuevos perfiles de suelos y estaciones climatológicas, dependiendo de la localización del experimento a desarrollar; mediante las salidas *Soil Data* y *Weather Data*.

Utilizando la herramienta *Seasonal* se crea un experimento virtual llamado Soya Potencial; al mismo se le suministró los datos necesarios, tales como: área del terreno, cantidad de surcos, dimensiones del surco, sucesivamente utilizando la opción *Environment*, se establecen las características agroclimáticas como: estación de clima, (la utilizada para los experimentos virtuales desarrollados es la situada en el municipio de Güines), tipo de suelo (Ferralítico amarillento gléyi), tipo de drenaje (Drainage Type), textura de suelo (Surface Texture); además de la profundidad y otros parámetros requeridos.

Posteriormente haciendo uso de la opción *Management* se establece el cultivo (soya) y variedad del mismo (Júpiter), es de mencionar que en este experimento la variedad fue única, pero se pueden agregar múltiples, así como también otros cultivos. Definiendo entonces mediante la opción *Planting* las 24 posibles fechas de siembra, planteando de igual forma el método de plantación, la densidad de siembra y demás.

Mediante la opción *Simulation Option* se pueden determinar las características que tendrá la simulación con respecto al agua, nitrógeno, potasio, CO₂, fósforo, efectos de la simbiosis, de enfermedades que puedan atacar al cultivo, y de las labores a realizar durante la labranza. En el experimento Soya Potencial no se tiene en cuenta ninguna de las deficiencias antes mencionadas, debido que, como su nombre lo resalta se busca todas las potencialidades que la variedad de soya Júpiter pueda alcanzar, por tanto, toda el agua que se requiera se le atribuye. Utilizando la herramienta *Tratament* de la barra de tarea, se creó un tratamiento para cada fecha de siembra establecida; esta herramienta permite realizar tratamientos combinando la misma fecha de siembra para distintos cultivares, el mismo cultivar para diferentes perfiles de suelo, entre otros, pero en el experimento se utilizó el mismo cultivar y el propio perfil de suelo en todas las posibles fechas de siembra que se establecieron.

Una vez salvado el experimento, se procede a realizar la simulación; utilizando la herramienta *Run*; pasando así al análisis de los resultados (*Analysis*). Por las diferentes variables que brinda el software se pueden determinar los rendimientos, días de maduración, índice de área foliar, peso del grano, temperaturas máximas y mínimas, la irradiación solar para cada una de las posibles fechas de siembra que se definieron al comienzo.

Se creó igualmente otro experimento, llamado Soya Secano; difiriendo del anterior en las opciones de simulación, debido a que, si se tuvo en cuenta el agua, ya que el cultivo recibiría solo el agua precipitada durante la lluvia, no se le aplicarían riegos.

2.10 Metodología para evaluar estrategias de riego

Partiendo de haber establecido la fecha optima de siembra, se diseñó la metodología que se muestra en la Figura 2.4, la cual permite evaluar diferentes

estrategias de riego. Igual que en la metodología descrita en la sección 2.9, son necesarios los datos de clima y suelo, así como las condiciones iniciales para la simulación. Además, los tratamientos obtenidos también serán simulados por cada año en el periodo de interés.

Para la fecha de siembra definida, obtenidas de cada experimento anterior; se evalúan diferentes estrategias de riego, para ello se combina la cantidad de agua aplicada en cada riego y el porcentaje del límite superior de agua disponible (LSAD) en el cual comienza el riego. Son aplicadas 4 láminas de riego: 5, 10, 15 y 20 mm; para cada una de ellas se varía el porcentaje del LSAD en que empieza el riego: 85, 75, 65 y 55 %. El resultado de este proceso son 16 tratamientos que serán aplicados a la variedad estudiada, importante destacar que cada tratamiento con una estrategia de riego.

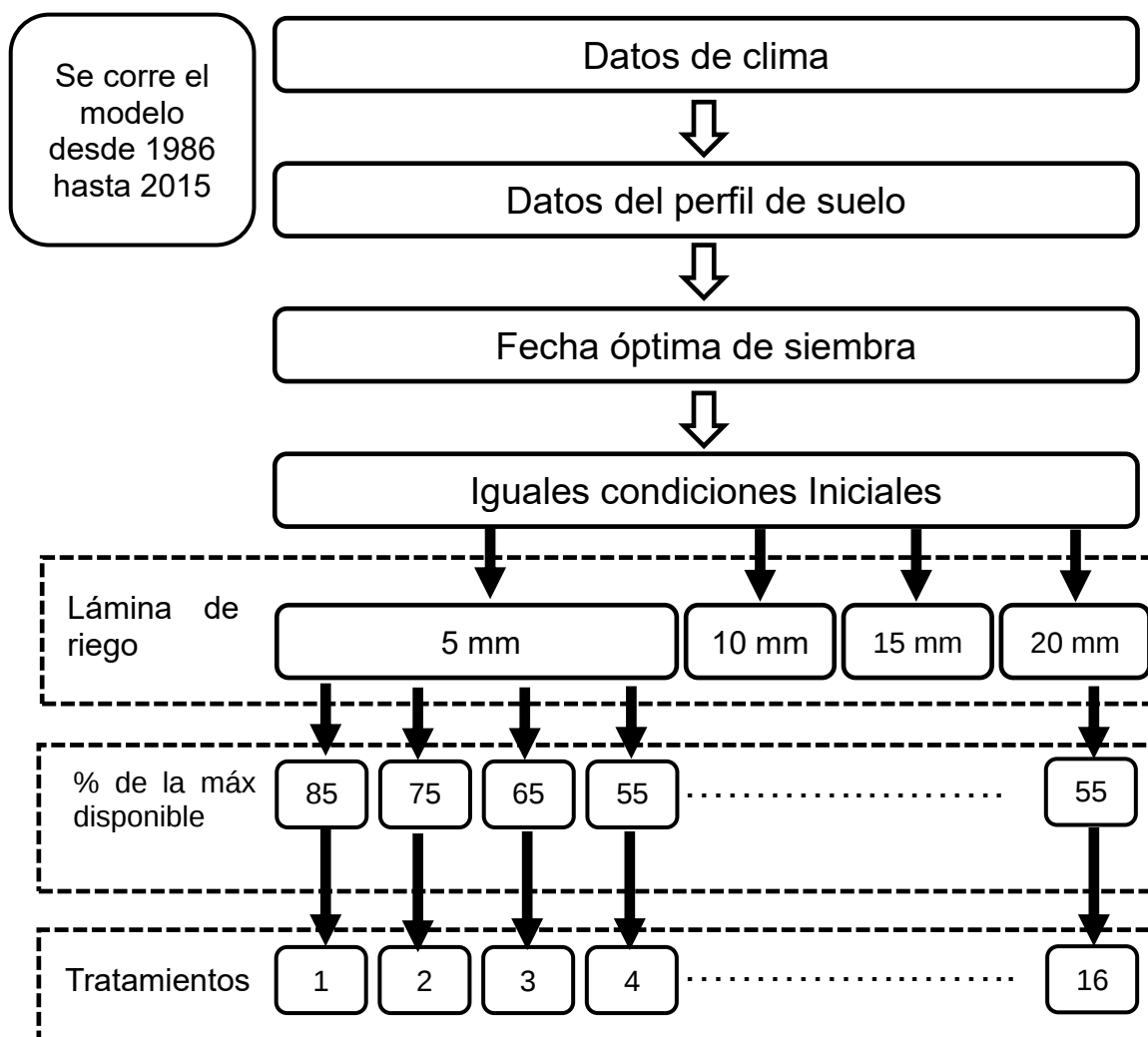


Figura 2.4 Metodología para evaluar estrategias de riego.

2.10.1 Implementación en DSSAT de la metodología para evaluar estrategias de riego

Considerando que ya fue escogida la fecha óptima de siembra, utilizando la herramienta *Seasonal* se desarrolló un experimento virtual, atribuyéndole la información requerida; semejante al experimento creado para obtener la fecha de siembra.

Dentro del experimento virtual, en la opción de *Simulation Options*, en el menú *Management*, en el submenú *Irrigation and Wather Management*, son configurados los diferentes valores de las láminas de riego y los porcentos del LSAD en el que comienza el riego. Estos dos factores son combinados en este menú con el objetivo de implementar las estrategias de riego. Posteriormente mediante la herramienta *Tratament* se crea un tratamiento para cada estrategia de riego.

Una vez salvado, se procede a la simulación por la herramienta *Run* y por las salidas *PlanGro* se puede conocer el comportamiento del rendimiento, peso foliar, peso del tallo; así como por la salida *SoilWat* el consumo de agua, cantidad de riegos a aplicar, total de agua en el perfil de suelo; para cada una de las estrategias de riego en la fecha óptima de siembra. Estos resultados serán juzgados en epígrafes posteriores y permitirán seleccionar la mejor estrategia de riego.

.

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el estudio realizado. Primero, se muestran los resultados estadísticos que permiten decidir cuál es la mejor vía para obtener la radiación solar diaria. Luego, se analizan los rendimientos en condiciones potenciales y de secano, proceso brinda la posibilidad de escoger la fecha óptima de siembra de la soya, variedad Júpiter. Por último, se hace una evaluación de las estrategias de riego propuestas en la metodología y se selecciona la mejor garantizando rendimientos aceptables y un uso eficiente del agua y los recursos económicos.

3.2 Obtención de la radiación solar diaria

En el capítulo anterior fueron explicadas dos de las vías que existen para el cálculo de la radiación solar diaria. Ambas vías, la obtención de la radiación estimada por la NASA y calcularla por el modelo VP-RAD fueron aplicadas a la estación climática de Homestead en la Florida durante el periodo comprendido entre el año 1998 y el 2016, con el objetivo de realizar una comparación entre ambos métodos y decidir cuál es la mejor vía para ser utilizada en esta investigación. Es importante destacar que el periodo de tiempo para este estudio está en concordancia con la disponibilidad de las variables meteorológicas en los servidores digitales de la estación climática de Homestead.

Como uno de los criterios de decisión entre ambos métodos se hará un análisis estadístico de los mismos con respecto al valor real medido con un instrumento de alta precisión en la estación. La Figura 3.1 muestra el diagrama de caja, para el valor real, el estimado por la NASA y el calculado por el modelo VP-RAP, de la radiación solar diaria (MJ/m^2) correspondientes a la estación climática de Homestead.

En la Figura 3.1 se puede observar la coincidencia de los tres grupos de valores en cuanto los mínimos, los cuales son cercanos a cero. Sin embargo, para los máximos existen marcadas diferencias, los correspondientes a la radiación real y de la NASA rondan los 30 MJ/m^2 y los valores calculados están por encima de 40 MJ/m^2 . Otra de las diferencias es con respecto al primer cuartil, el cual se

encuentra para la radiación calculada por debajo de 5 MJ/m^2 , casi 3 veces inferior con respecto a los otros dos métodos. De forma general se puede deducir una mayor similitud entre los valores de radiación reales y los estimados por la NASA.

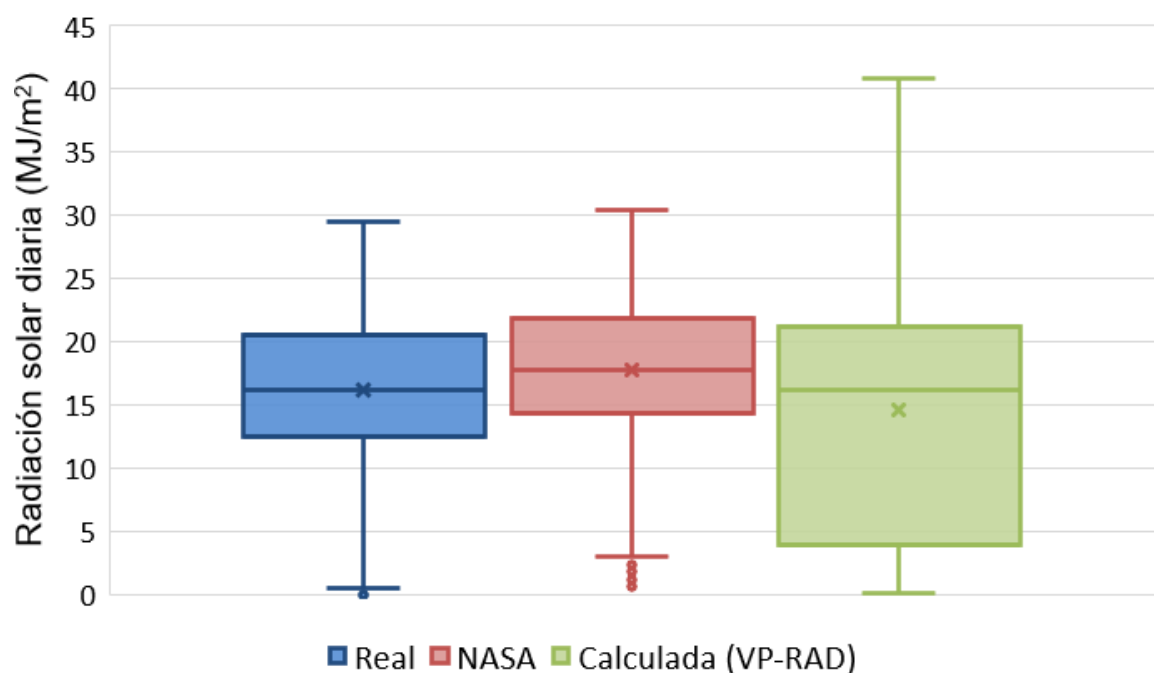


Figura 3.1 Diagrama de caja de la radiación solar diaria (MJ/m^2), en el periodo comprendido entre 1998 y 2016, para el valor real, el estimado por la NASA y la calculada por el modelo VP-RAP correspondientes a la estación climática de Homestead.

En la comparación entre métodos se presenta la Tabla 3.1, en la cual se muestra la estadística de la radiación solar diaria para los valores reales, los estimados por la NASA y los calculados por el modelo VP-RAP. La misma corrobora lo mostrado por el gráfico anterior en cuanto a la similitud en el valor mínimo, el que varía de 0 a 0,6 y las diferencias significativas con respecto al valor máximo siendo estos de 29,46, 30,40 y 40,85 para los valores reales, de la NASA y calculados respectivamente; de forma similar sucede con el primer cuartil el cual tiene sus valores en 12,46, 14,30 y 3,93 respectivamente. Por otro lado existe una gran semejanza de la mediana y del tercer cuartil de ambos métodos con respecto al valor real.

Otro de los estadígrafos es la media, la cual tiene valores bastante cercanos de 16,21, 17,75 y 14,61 para la radiación real, la de la NASA y la calculada respectivamente, la relativa similitud se debe al número elevados de valores

manejados y a los efectos de la promediación que enmascara la variabilidad entre el conjunto de valores. La varianza de los tres grupos es 32,51, 27,95 y 71,59 respectivamente; en este sentido es importante destacar que la varianza de la radiación real y la estimada por la NASA son bastante cercanas, por otro la radiación calcula es más del doble del valor real, lo cual pudiera errores perceptibles en la simulación. Lo anterior, indica que la radiación solar estimada por la NASA es más confiable que la calculada.

Tabla 3.1 Estadística de la radiación solar diaria (MJ/m^2), en el periodo comprendido entre 1998 y 2016, para el valor real, el estimado por la NASA y la calculada por el modelo VP-RAP correspondientes a la estación climática de Homestead.

Estadística	Real	NASA	Calculada
Mínimo	0.00	0,60	0,1
Máximo	29,46	30,40	40,85
Mediana	16,18	17,80	16,13
Media	16,21	17,75	14,61
Desv. Estándar (σ)	5,70	5,2	8,46
Valor del 1er Cuartil	12,46	14,30	3,93
Valor del 3er Cuartil	20,48	21,90	21,14
Varianza (var)	32,51	27,95	71,59
Coef. de Variación (cv)	0,35	0,30	0,57

Por su parte el coeficiente de variación (CV) también refleja alta similitud entre la radiación estimada por la NASA y la medida en la estación, este factor solo tiene una variación de 5 décimas para este método. En contraste con este resultado, el CV para la radiación calculada es también menor que 1 pero su valor es de 0,57; lo cual es mucho mayor que los otros dos valores. Este valor elevado para este grupo de datos con respecto a los demás se debe a que la desviación estándar tiene el mismo comportamiento.

También se hace un análisis del error medio (EM) y de la raíz del error cuadrático (RECM) medio de ambos métodos con respecto al valor real medido, la Tabla 3.2 resume los resultados obtenidos.

Tabla 3.2 Valores del EM y el RECM de la radiación solar diaria (MJ/m^2), en el periodo comprendido entre 1998 y 2016, para valor estimado por la NASA y la calculada por el modelo VP-RAP correspondientes a la estación climática de Homestead.

Parámetro	NASA	Calculada
EM	-1,546	1,599
RECM	3.504	7,217

En la Tabla 3.2 se puede observar que en cuanto al error medio (EM) ambos métodos son modularmente similares. Sin embargo, los valores obtenidos tienen signos diferentes, lo cual significa que el cálculo de la radiación mediante el modelo VP-RAP sobrestima pues el EM es positivo; por otro lado, los valores estimados por la NASA son subestimados. Estos resultados pueden conducir a diferencias significativas con respecto a los rendimientos.

Con el objetivo de arrastrar los errores diarios de ambos métodos fue calculada la raíz cuadrada del error cuadrático (RECM). Con respecto a este parámetro, según la Tabla 3.2, la radiación estimada por la NASA es más exacta que la calcula pues la RECM de esta última supera en más del doble a la de la NASA.

En función de los elementos explicados con anterioridad y teniendo como criterios fundamentales de decisión la similitud de los parámetros estadísticos, el EM y la RECM se considera que el método más exacto para obtener la radiación solar diaria es que usa los valores estimados por la NASA.

3.2.1 Análisis del año 2016

Los test estadísticos de igualdad de varianzas y medias son fundamentales en la comparación de series de datos. En este caso, estos test fueron aplicados al periodo de interés (1998 – 2016) y no se obtuvieron similitudes significativas. Por tanto, con el objetivo de hacer un análisis más profundo se decide aplicar estos test estadísticos a los valores de radiación solamente para el año 2016.

Los test estadísticos de igualdad de varianzas y medias fueron implementados en el software R, estos 2 test fueron aplicados cada uno de los métodos propuestos contra el valor real de la radiación. Como criterio de decisión se obtuvo el p-valor, el cual se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores del p-valor de los test estadísticos de similitud de varianzas y medias, en el año 2016, para el valor estimado por la NASA y la calculada por el modelo VP-RAP correspondientes a la estación climática de Homestead.

Tipo de test	NASA-Real	Calculada-Real
Similitud de varianzas	0.394	1.76×10^{-16}
Similitud de medias	0.361	1.24×10^{-8}

En el test de homogeneidad de varianzas la hipótesis alternativa (H_1) plantea que, si esta es verdadera, el cociente de las varianzas de los conjuntos de datos analizados es diferente de 1, en este caso se consideró un intervalo de confianza del 95 %. Según Tabla 3.3, no existe similitud entre las varianzas de la radiación real y la calculada para el año 2016 pues el p-valor es menor que 0,05 y por tanto se acepta la hipótesis alternativa. Un resultado totalmente diferente se obtiene para los valores de radiación reales y estimados por la NASA, en este caso el p-valor es mayor que 0,05, por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) y las varianzas son iguales.

Resultados similares al anterior se obtienen al aplicar el test de igualdad de medias, en el cual la hipótesis alternativa (H_1) plantea que, si esta es verdadera, la diferencia de las medias de los conjuntos de datos analizados es diferente de 0, igualmente se consideró un intervalo de confianza del 95 %. En este caso, no existe similitud entre las medias de la radiación real y la calculada para el 2016. Sin embargo, para los valores de radiación reales y los estimados por la NASA, se obtiene que las medias son similares pues el p-valor es mayor que 0,05.

Luego de aplicar estos tests estadísticos a los valores de radiación correspondientes al año 2016 se llega a la misma conclusión que en la sección anterior, la cual plantea que los valores de radiación estimados por la NASA son más exactos que los calculados por el modelo VP-RAP y por tanto estos serán

los utilizados en las simulaciones que permitirán obtener la fecha óptima de siembra y la mejor estrategia de riego.

El hecho que los test de igualdad de varianzas y medias no hayan arrojado similitudes, en ninguno de los métodos estudiados, en el periodo comprendido entre 1998 y el 2016 puede deberse a la extensión de la serie de datos estudiada (6617 valores). También, el método que usa el modelo VP-RAP necesita de parámetros que son estimados regionalmente lo cual puede traer errores. Además, cuenta en los errores de cálculo que, las tecnologías usadas por los satélites de la NASA, en los primeros años de la serie (1998), se consideran obsoletas con respecto a las del 2016 (Stackhouse *et al.*, 2018).

3.3 Fecha óptima de siembra de la soya

El crecimiento y desarrollo de un cultivo es determinado por su manejo y por rasgos genéticos que interactúan con factores ambientales. Por ello, un elemento esencial para llevar a cabo manejos óptimos de los cultivos es la elección precisa de la fecha de siembra, lo cual es una decisión determinante sobre el ambiente que explorará el cultivo durante el ciclo y especialmente durante etapas críticas de desarrollo, lo cual repercutirá en el rendimiento. Por ello, se juzgan los rendimientos obtenidos para la variedad de soya de estudio, con auxilio del modelo de simulación de cultivo DSSAT, como vía de seleccionar el momento óptimo de siembra. Ello se realiza para distintas fechas y variantes de manejo donde se asumen condiciones óptimas o potenciales para el desarrollo del cultivo y también para secoano.

3.3.1 Simulación de rendimiento potencial

En la Figura 3.2 se muestra el comportamiento del rendimiento potencial de la soya, variedad Júpiter, para 24 variantes de fechas de siembra, equiespaciadas 16 días entre sí. Lo anterior fue obtenido con el módulo CROPGROP, módulo de DSSAT que simula el crecimiento y desarrollo del cultivo. Ello se realiza bajo las condiciones edafoclimáticas del sur de Mayabeque, lo cual presupone el empleo de la serie de datos meteorológicos y las características de suelo de la región de estudio. Todos estos factores determinan la variabilidad en cuanto a los rendimientos manifestados en la figura. En relación a estos también se muestra el

percentil indicativo de los valores de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de estos en un grupo de observaciones.

Los mayores valores potenciales se obtuvieron para fechas de siembra inherentes al mes de enero, donde el 100 % de los rendimientos simulados se sitúan por encima de los 3000 kg/ha (3,0 t/ha), siendo el valor más elevado para este mes alrededor de las 6,5 t/ha. Según Castellanos (1986) citado por González-Robaina *et al.* (2019), rendimientos por encima de las 3 t/ha, en las condiciones de suelo y clima similares al área de estudio, se pueden alcanzar solo en la siembra de primavera, y donde la productividad del agua en base a la evapotranspiración logra 0,88 kg m⁻³. Estos altos valores en el anterior estudio fueron para un nivel de fertilidad del suelo cercano al óptimo y un año húmedo (1999), sin restricciones de agua. Ello habla a favor de comportamiento adecuado del modelo en cuanto a la generación de los valores de rendimientos en el rango de fechas de siembras mostrado.

Entre dichos valores se distinguen los correspondiente a la fecha del 15 de enero, obteniéndose que todos los valores simulados son superiores a 4200 kg/ha, el 75 % de los mismos están entre esta cota y 5600 kg/ha con un valor medio de los rendimientos de 5300 kg/ha.

Por su parte, los más bajos valores se corresponden a fechas de siembra comprendidas entre el 1 de octubre y el 1 de noviembre, con posterioridad a este periodo se inicia un manifiesto crecimiento en los rendimientos. Igualmente se aprecia una tendencia de bajos rendimientos cuando se llevan a cabo plantaciones del cultivo en el mes de marzo. Exceptuándose las fechas de inicios de año, lo obtenido son valores permisibles en el cultivo de la soya una vez que Romero *et al.* (2013), para suelo Fersialítico Pardo Rojizo lixiviado con aplicación de dos riegos por semana y fertilización con fórmula completa en el momento de la siembra obtienen que esta variedad, comparado con otras seis, alcanza los mayores rendimientos de 2110 kg/ha en la siembra entre noviembre y marzo.

El hecho es que aún bajo condiciones óptimas de cultivo se obtienen fluctuaciones de los rendimientos en dependencia de la fecha de siembra. Esto en general arroja valiosa información acerca de los manejos del cultivo de la soya, tales como las especificaciones acerca de periodos de plantaciones a tener en cuenta en el sur de Mayabeque.

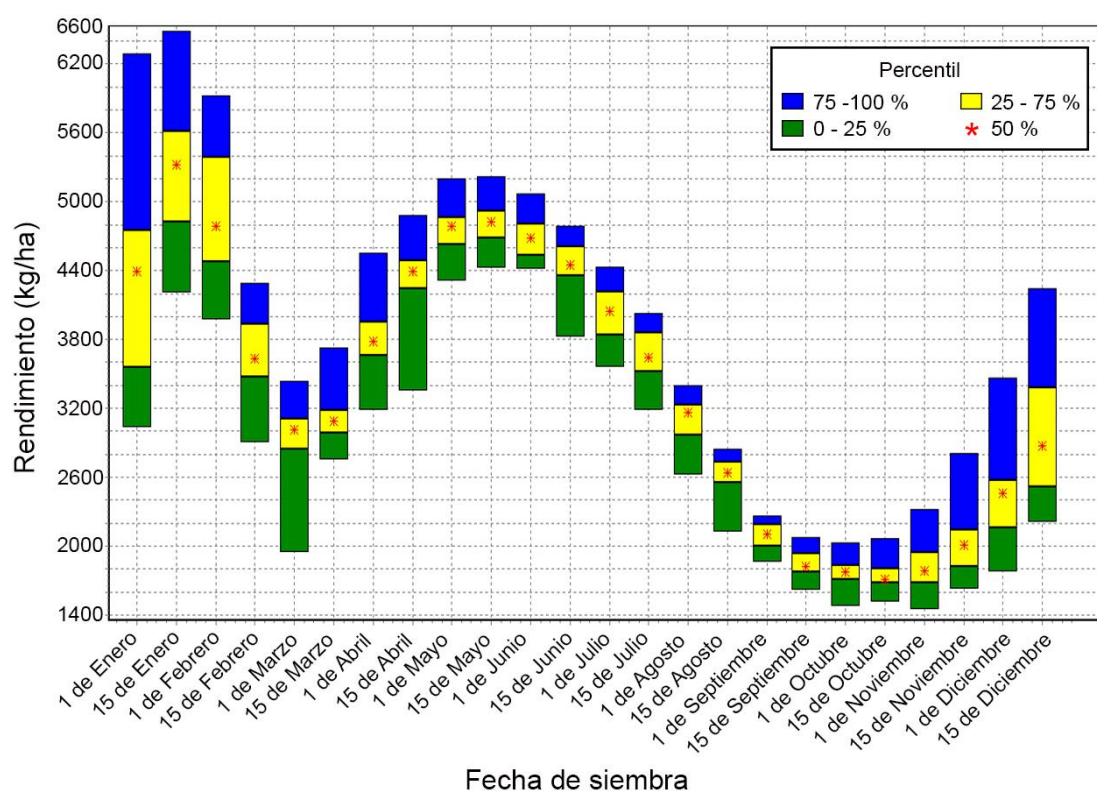


Figura 3.2 Comportamiento obtenido del rendimiento potencial por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soja variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Según Hernández y Bello (2010) la variedad de soja Júpiter es un clon veraniego y se debe cultivar entre los primeros 15 días de julio a mediación de agosto para alcanzar rendimientos superiores a los 3800 kg/ha. Lo anterior, se valida en este estudio atendiendo al resultado de los rendimientos, los cuales tienen como media 4018 kg/ha y 3665 kg/ha para las fechas de 1 y 15 de julio respectivamente, variando desde 3.2 t/ha hasta 4.4 t/ha en todo este mes.

Las caídas en los rendimientos en diferentes situaciones productivas se deben, en general, a una disminución en el número de granos Gutiérrez y Scheiner citados por Pergolini (2013). En lo que se refiere al rendimiento obtenido, sus resultados se pueden juzgar relacionados con el número de vainas por planta y el peso de 100 granos, factores hallados muy relacionados en numerosos trabajos en la literatura. Quijano *et al.* (1996) y Kantolic *et al.* (2003) afirman que el componente más asociado con variaciones en rendimiento del cultivo de soja es el número de granos por unidad de superficie, el cual es función de la tasa de crecimiento del cultivo entre plena floración y comienzo de llenado de los granos.

En la Figura 3.3 se muestra el peso del grano para las diferentes fechas de siembra simuladas, las tendencias de altos rendimientos para fechas de siembra de inicio y finales de año se asocian a iguales tendencia del peso de granos. El bajo peso en el caso del mes de marzo se corresponde con la caída de los rendimientos difirió apreciablemente del resto, determinando un rendimiento relativamente bajo. En este sentido es notorio señalar que se observa un incremento en el peso del grano medio mensual entre las fechas del 1 de abril al 1 de junio, aumentando desde 0.15 g hasta 0.19 g, lo cual coincide con un aumento de los rendimientos medios mensuales en este mismo periodo, los que varían desde 3.7 t/ha hasta 4.7 t/ha.

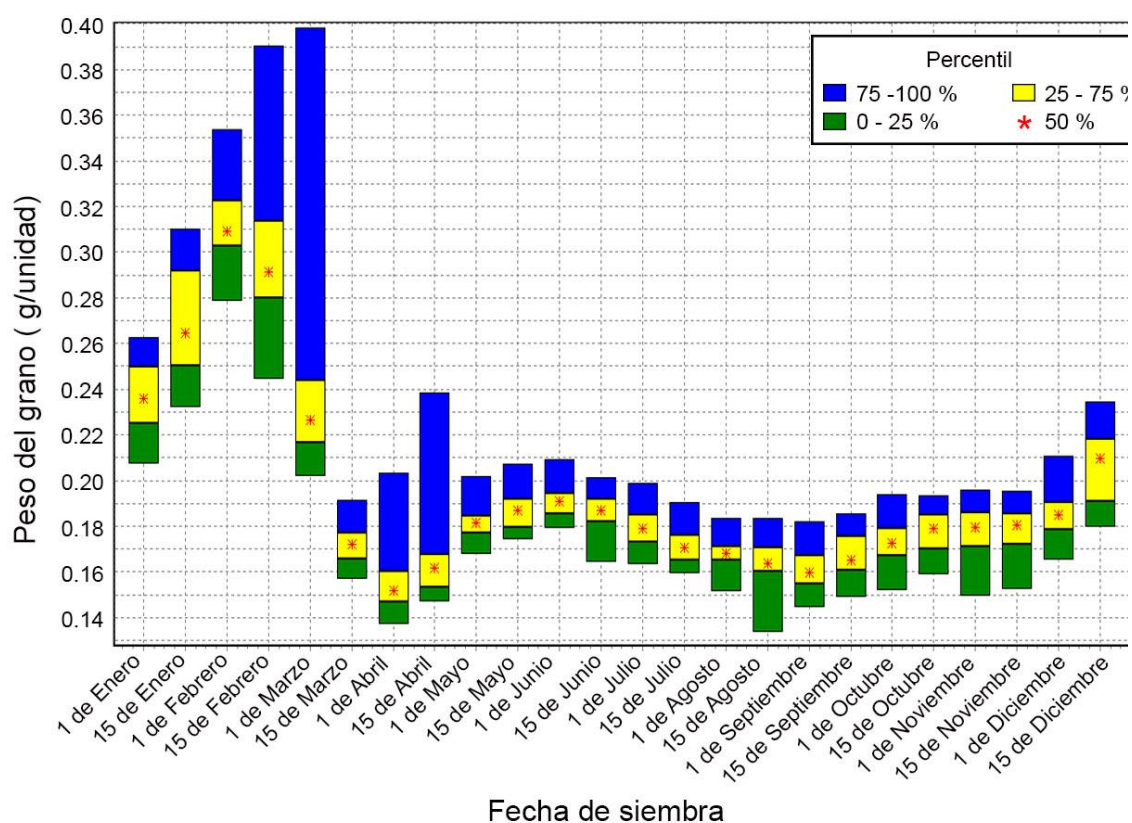


Figura 3.3 Comportamiento promedio obtenido en condiciones potenciales del peso del grano por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soya variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Por otra parte, no existe una similitud entre las fechas de siembra que poseen los valores más bajos de rendimientos y del peso de grano, siendo el 1 de noviembre la fecha que posee el menor valor de rendimiento y el 1 de agosto la en la que se obtiene el menor peso de grano. Además, el 1 de marzo se sitúa el

resultado con mayor peso del grano y en contraposición los rendimientos descienden significativamente llegando a disminuir por debajo de 2.0 t/ha.

Linares (2009) en Guatemala encontró diferencias estadísticas en cuanto al número de granos por vaina y el peso de 100 granos, al evaluar diferentes cultivares de soya en diversas localidades del país; mientras que el rendimiento fluctuó entre 2900 y 3700 kg/ha.

Sin embargo, son similares a los obtenidos por Díaz y Saucedo citado por Pérez *et al.* (2005) y Zamora y Abdou (2007); y en general coinciden con los informados por (Ortiz, 2013), quien destaca que existe una correspondencia en cuanto al peso de los granos y el rendimiento. Además, estos autores señalaron que en Cuba el peso de 100 granos de soya oscila entre 11.6 y 23.5 g, lo cual se corrobora en los resultados que se muestran en la Figura 3.3, para todas las fechas de siembra excepto en los meses de enero y febrero.

En buena medida las tendencias de los rendimientos y el peso de los granos en las etapas propicias para instaurar el cultivo de la soya, fecha de siembra, no es más que un reflejo de las condiciones climáticas en determinados periodos, las cuales son propias del sitio de estudio. Por ende, es importante enjuiciar las características climáticas del ambiente de producción de los cultivos debido a que las mismas son las que determinan su potencial alcanzable. Con respecto a esto la radiación solar, la temperatura ambiente y las precipitaciones son las principales variables agrometeorológicas que regulan los procesos metabólicos de las plantas (Carcova *et al.*, 2000).

Entre los factores de mayor variación interanual están las precipitaciones y en menor medida la temperatura y la radiación. Sin embargo, considerando que las deficiencias hídricas fueron controladas en el supuesto de condiciones potenciales, aquí sólo consideramos el efecto de los dos últimos. La influencia y la demanda de agua en los rendimientos del cultivo de soya en la región de estudio serán abordadas en próximos epígrafes.

La duración de una fase (habitualmente medida en días) depende de la temperatura, siendo esta determinante en la duración de cada uno de los distintos estados fenológicos del cultivo. Las tendencias de altos rendimientos para fechas de siembra de inicio y finales de año y del peso de granos se asocian

a patrones de comportamiento de la temperatura del sitio de estudio. En estos periodos se manifiestan, propios de la época, valores de temperatura que resultan inferiores a las de otras fechas de siembra que se manejan en la simulación.

El cultivo de dicha oleaginosa es exitoso en climas con veranos cálidos y condiciones óptimas de crecimiento a temperaturas medias de 20 °C a 30 °C (Rosas y Young, 1991), coincidiendo en este sentido, con Díaz *et al.* (2007) que además plantearon que las más próximas a 30 °C son las ideales para su desarrollo. Los rendimientos favorables de esta variedad en el mes de enero pudieron deberse a que las temperaturas tuvieron una media óptima para el desarrollo del cultivo (29.2 °C), ver Figura 3.4. Lo mismo no se aprecia para los meses inherentes a fechas intermedias de siembra, en las cuales la temperatura promedio mensual es superior a los 30 °C.

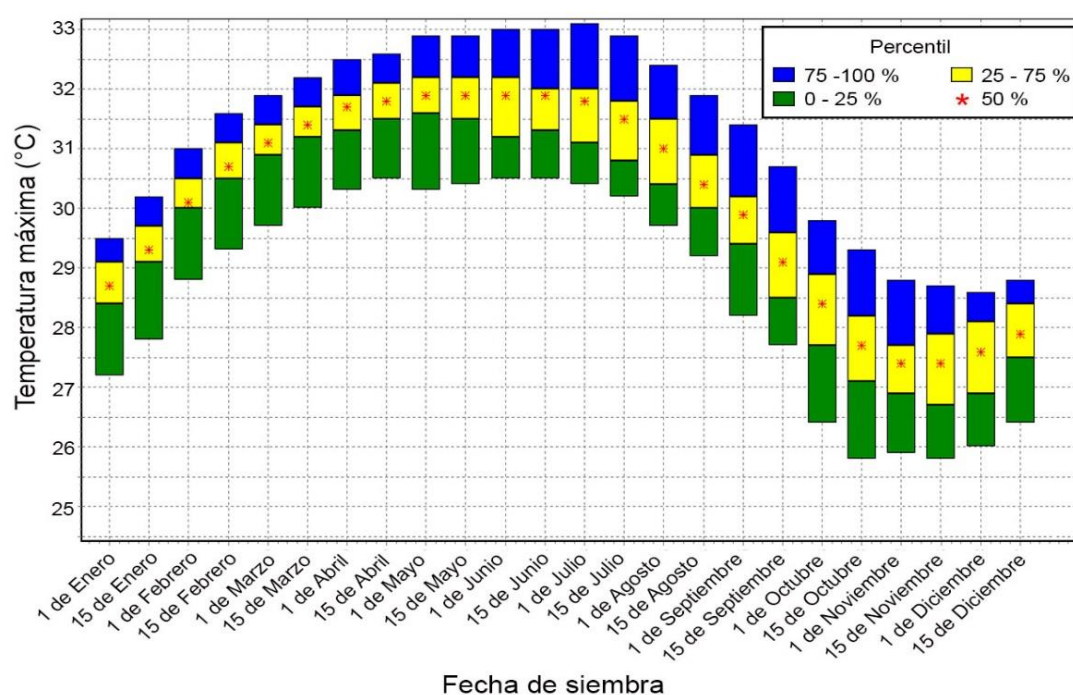


Figura 3.4 Comportamiento promedio obtenido por DSSAT de la temperatura máxima (°C) para diferentes fechas de siembra de la soja variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Al mismo tiempo estas se conjugan con altos valores de la radiación solar, lo cual de conjunto explican en buena medida los resultados de las Figuras 3.2 y 3.3 para fechas de siembra de inicio. En el bajo peso y rendimiento del mes de

octubre se conjugan relativamente con los bajos valores de radiación. Como se observa en Figura 3.5, únicamente durante el mes de octubre se registró una situación de menor radiación solar en relación al resto de la serie de datos disponible. A nivel de cultivo, esta menor radiación pudo tener consecuencias en el rendimiento potencial de dicho mes. En este sentido son varios los autores que coinciden en que es determinante en el rendimiento la cantidad de radiación incidente, así como la que es capaz de ser interceptado por el follaje (Baigorri y Croato, 2000; Andrade y Sadras, 2002).

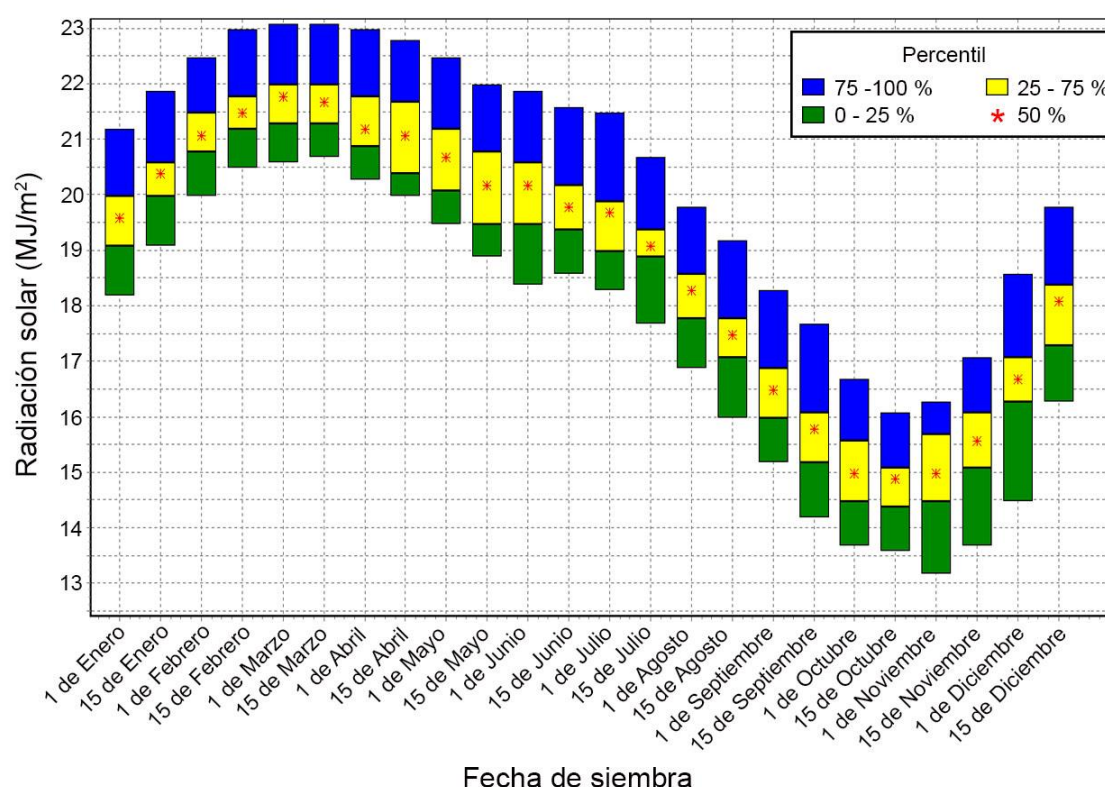


Figura 3.5 Comportamiento promedio obtenido por DSSAT de la radiación solar (MJm^2/d) durante el ciclo del cultivo de la soja variedad Júpiter para diferentes fechas de siembra en el sur de Mayabeque.

La conjugación de estas variables meteorológicas, temperatura y radiación, explica en cierta medida los valores de peso por 100 granos para marzo, no así su reflejo en rendimientos. Obsérvese que a partir de este mes y hasta julio el cultivo alcanza sus mayores valores del índice de área foliar (Figura 3.6), el cual expresa la superficie del área foliar fotosintéticamente activa de un cultivo por unidad de superficie de suelo y, junto con otros parámetros constituye un

estimador muy apropiado para medir su grado de desarrollo. Aunque es conocido que un incremento en el rendimiento necesariamente no está relacionado con aumentos en el área foliar del cultivo; ya que podría ser consecuencia de una acumulación de materia seca (Jeuffroy y Ney, 1997).

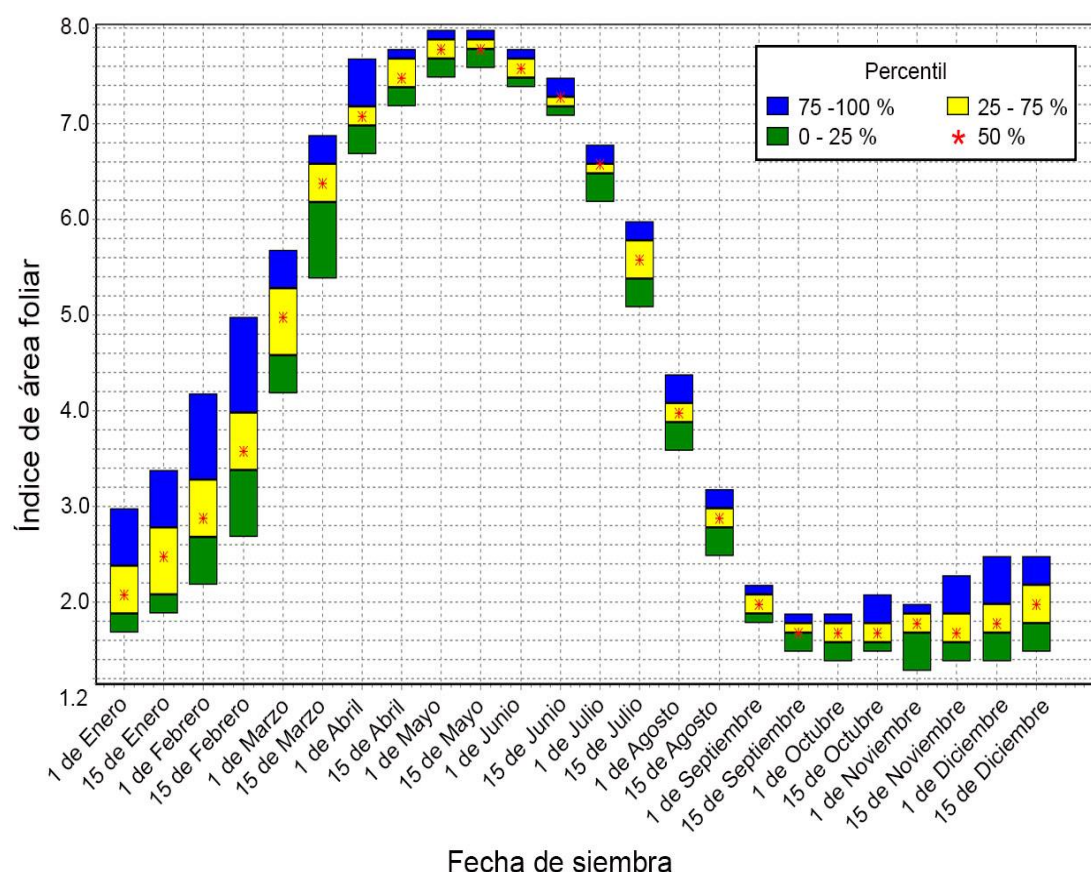


Figura 3.6 Comportamiento promedio del índice de área foliar (LAI) obtenido en condiciones potenciales por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soja variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Las aparentes contradicciones para marzo pudiesen deberse a que el efecto sobre todo de la temperatura, propios de estas fechas de siembra, proporciona mayor desarrollo foliar y granos vigorosos, pero afectan la floración y la cuantía de vainas y granos por plantas y con ello el rendimiento por hectáreas de suelo plantadas. Para Merino (2006) las diferencias de fechas de floración, entre años, que puede presentar la variedad de soja ensayada, sembrada en la misma época, son debidas a variaciones de temperatura.

Varios estudios llevados a cabo en ambiente controlado mostraron reducciones en el rendimiento del orden del 35 % con temperaturas medias diarias de 27,5

°C con respecto al control de 17,5 °C. Aunque, en soya, existen diferentes criterios acerca de los rangos de temperatura que generarían disminuciones del rendimiento. Gibson y Mullen (1996) encontraron que un régimen térmico de 35 °C durante el día y entre 20 °C y 30 °C durante la noche aplicado desde el comienzo de floración al comienzo del llenado de granos provocó disminuciones del rendimiento cercanas al 16 %.

No obstante, la relación entre la duración de una fase del cultivo, sus indicadores de rendimiento, la temperatura o la radiación no es lineal, así como es difícil de dilucidar la interacción entre sí de los factores climáticos tomados en cuenta. Para que se tenga idea, Romero *et al.* (2013) obtienen para las condiciones de Cuba que esta variedad Júpiter, comparado con otras seis, alcanza los mayores rendimientos y es segunda en número de vaina por plantas, sin embargo, es la cuarta variedad con el mayor número de granos por vaina y por peso de 100 granos de soya.

Por lo antes citado, en relación a los valores históricos de las variables climáticas, el peso de los granos de soya y sus rendimientos, enero es el mes donde las potenciales del cultivo alcanzaron los más elevados valores respecto al resto, sobre todo durante la segunda quincena, por lo cual se establece el 15 de enero como la fecha óptima para la siembra de la soya variedad Júpiter, en el sur de Mayabeque bajo condiciones óptimas de manejo.

3.3.2 Simulación de rendimiento de secano

Este experimento virtual simulado persigue el mismo propósito anterior, pero en condiciones reales y que además difiere en cuanto manejos, esencialmente en relación al suministro de agua al cultivo. En este particular fue solo considerado el agua de las precipitaciones y su influencia en los rendimientos para similares fechas de siembra.

Los rendimientos que anteriormente eran superiores en fechas de siembra de enero en este experimento, al tener en cuenta las precipitaciones diarias históricas, muestran para esta una disminución significativa, al punto de no superar los 200 kg/ha como se aprecia de la Figura 3.7. Algo similar se constata para siembra del cultivo desde el mes de octubre hasta finales de año.

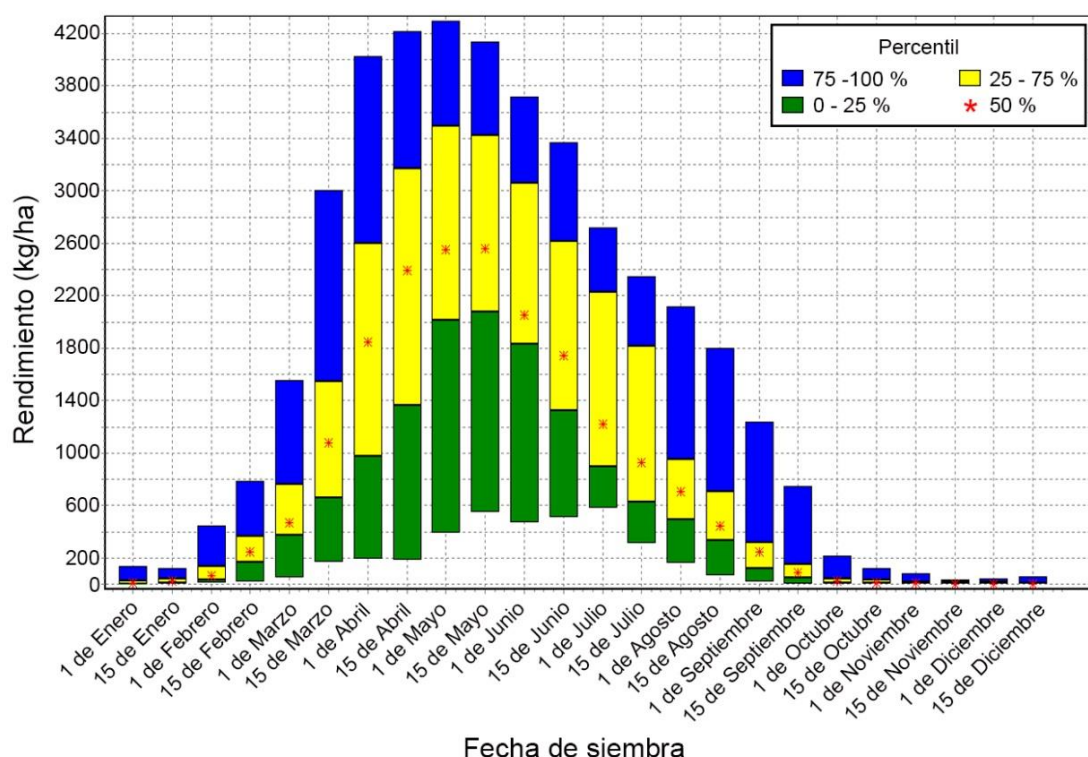


Figura 3.7 Comportamiento del rendimiento en secano obtenido por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soja variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

En esta simulación el pico de rendimientos se localiza entre fechas de abril a junio coincidente con el periodo de mayores aportes del agua de lluvia, lo cual reafirma lo planteado por Merino (2006) que en las condiciones de Cuba el cultivo de la soja presenta un desarrollo productivo favorable en siembra de primavera, mientras que Díaz (1979) señaló los períodos de abril a mayo, puesto que coincide con el inicio de las intensas precipitaciones y la elevación de las temperaturas. En cambio, González (1955) y González y Ramos (1958) citados por (Machado *et al.*, 1987) recomendaron las siembras de julio a agosto y González *et al.* (1984) coincide en señalar a julio y agosto como los mejores al obtener en esa etapa los más altos rendimientos. Estos resultados en cultivo de soja secano claro está son fuertemente dependiente de la pluviometría de cada zona en particular.

También en coherencia con Farias (1995), al plantear para contextos tropicales que debido a las intensas precipitaciones y la elevación de las temperaturas que se inician a finales de abril y principios de mayo, es posible obtener producciones

de máximas eficiencia en volúmenes de grano sin las costosas técnicas de riego, lo que podría significar un alto porcentaje del costo del cultivo.

En el gráfico se destaca por sus más altos rendimientos las fechas de siembra correspondientes al mes de mayo, especialmente la de 15 de mayo acorde a análisis de los valores correspondientes al percentil. Como para igual periodo en el análisis potencial en secano las condiciones climáticas modulan iguales tendencias del peso de los granos y del LAI (Figura 3.8 y Figura 3.9), a sabiendas que en condiciones de campo raramente los granos de soja alcanzan su peso potencial (Borrás *et al.*, 2004).

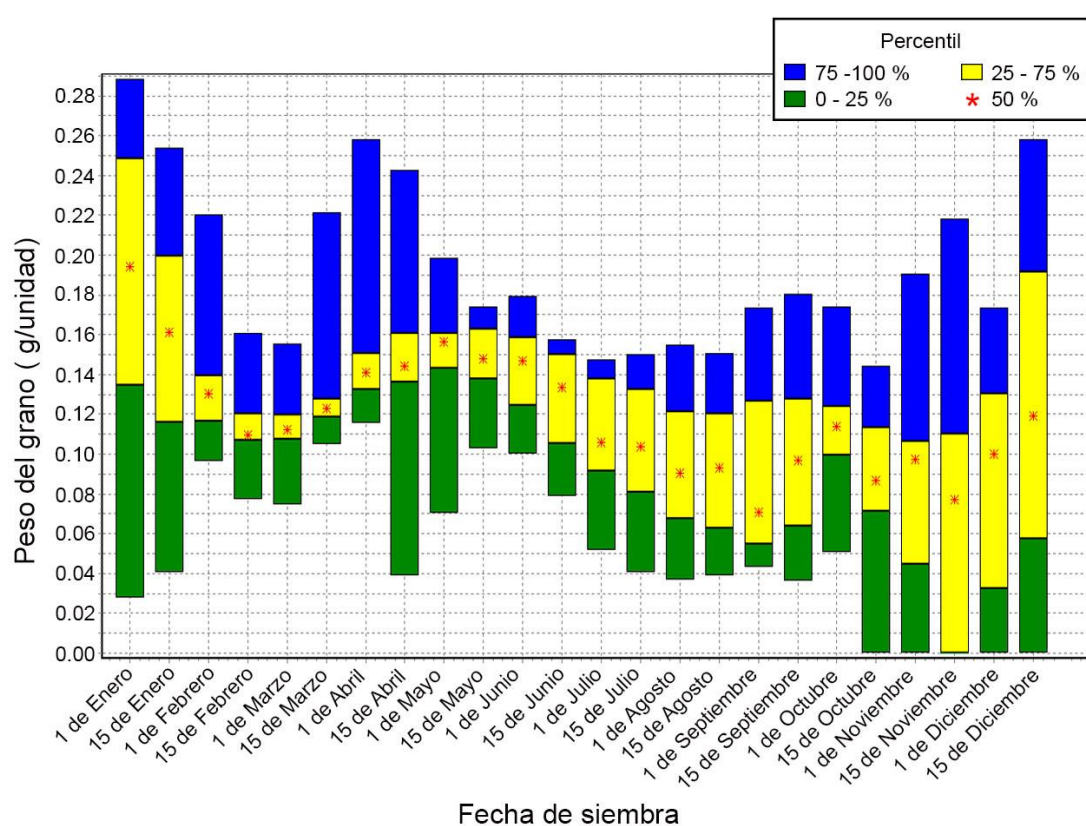


Figura 3.8 Comportamiento promedio del peso del grano obtenido en condiciones de secano por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soya variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

A pesar de encontrarse dentro de los meses donde mayor número de precipitaciones se acumuló la insuficiencia de agua para suplir la demanda total del cultivo, produjeron mermas en el peso de los granos y los rendimientos. Otras experiencias realizadas en soja sin suministro de riego reportaron reducción

significativa del número de granos y aumento significativo de su peso, sin variación en el rendimiento final (Kadhem *et al.*, 1985).

No obstante, se hace notar que para fecha de siembra de 15 mayo los rendimientos de primavera de esta variedad de soya en el presente estudio alcanzan hasta 4.2 t/ha, producción en el orden de los límites que suele alcanzar el clon Júpiter, pero se encuentra por debajo de la media obtenida en la simulación potencial. Para esta fecha de siembra en la Figura 3, el 100 % de las simulaciones sobrepasan las 4.4 t/ha.

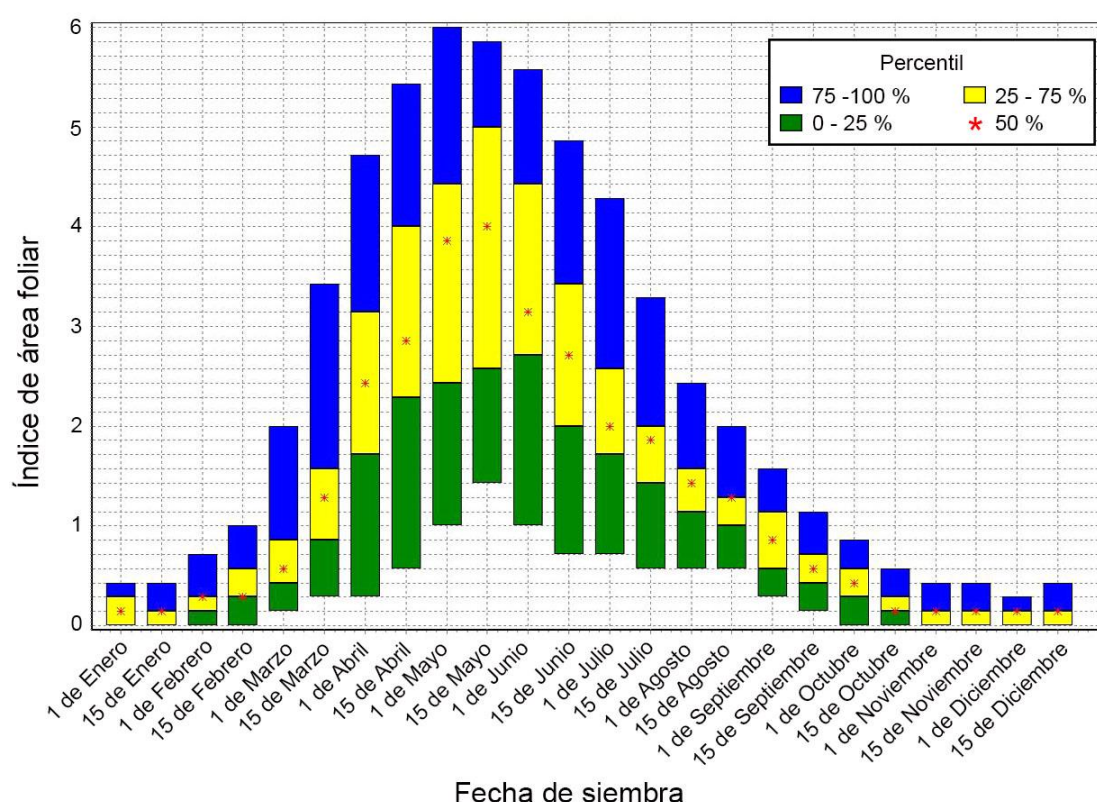


Figura 3.9 Comportamiento promedio del índice de área foliar (LAI) obtenido en condiciones de secano por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soya variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

3.3.2.1 Análisis del parámetro días para la cosecha

Otro de los factores de gran importancia a considerar son los días para la cosecha, que indica el tiempo de maduración del cultivo, los resultados obtenidos para las fechas de siembras de interés se pueden observar en la Figura 3.10. Las simulaciones realizadas arrojan una alta variación de este parámetro en

función de las fechas de siembra, siendo su valor máximo 224 días en la fecha del 15 de enero y su valor mínimo 85 días en el mes de septiembre.

Según (Esquivel y Ortega, 2002) la soya, específicamente la variedad Júpiter tiene un ciclo de cosecha que varía entre 110 y 120 días, lo cual se corresponde con los resultados obtenidos en el mes de julio, coincidiendo además con lo planteado por Morales (1991) y Castellanos (1986) citado por González-Robaina *et al.* (2019). También Hernández y Bello (2010) afirman que esta variedad tiene un ciclo de cosecha de 110 días. Sin embargo el clon Júpiter presentado por el INAP (Instituto Nacional Agropecuario) en Quito, Ecuador tiene un tiempo de maduración de 130 días (Días, 1976).

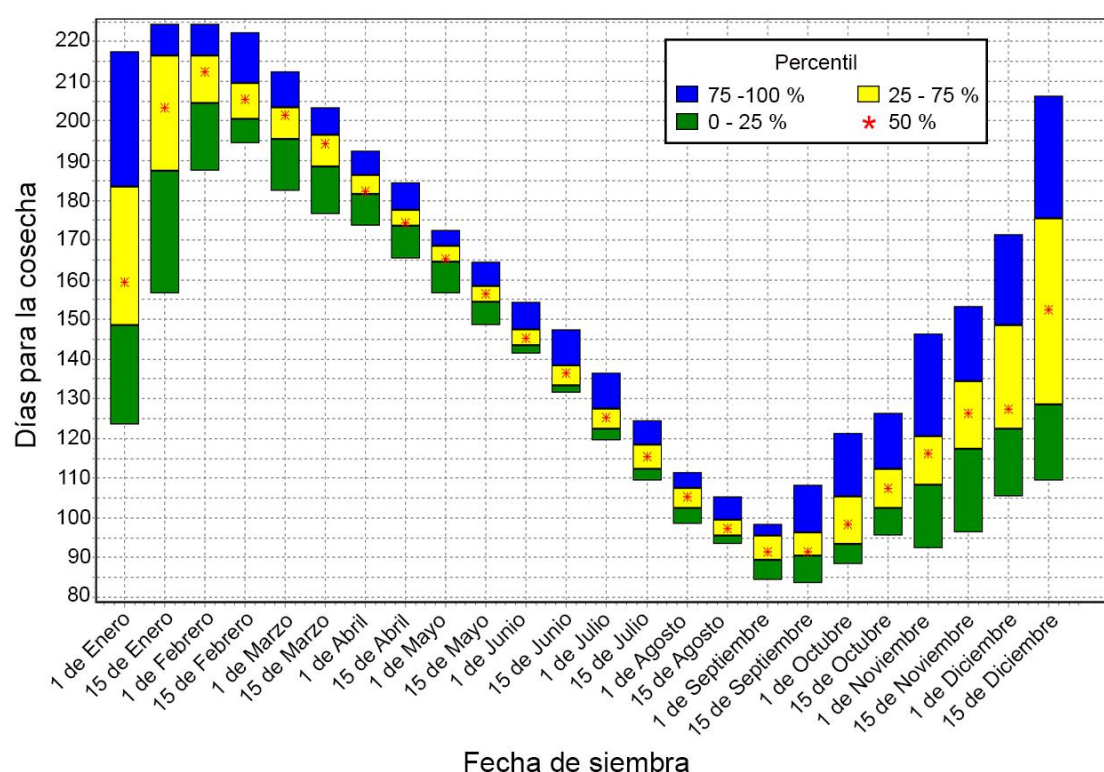


Figura 3.10 Comportamiento promedio de los días para la cosecha obtenido en condiciones de secano por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soja variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Estas variaciones en el tiempo de maduración se encuentran relacionadas con las temperaturas. (Peltzer, 2005) demuestra la influencia que tiene este parámetro con los días entre la etapa de siembra y floración en cuatro cultivares diferentes. Los resultados los experimentos realizados durante tres años consecutivos, arrojaron que el año con menor promedio de tempera mensual fue

que tuvo un mayor ciclo de cosecha para todas las variedades estudiadas. Resultados similares fueron obtenidos por (Jumrani y Bhatia, 2018).

Los resultados del ciclo de cosecha para los meses de enero y diciembre son lejanos a los reportados en la literatura (110-120 días), teniendo una media de 155 y 205 para las fechas de 15 de diciembre y enero respectivamente, lo cual se puede deber a que en estos meses es donde se obtienen los menores promedios mensuales para las temperaturas, ver Figura 3.4. Además, en la Figura 3.10, se observa que a partir del mes de febrero hasta agosto existe una disminución significativa del tiempo de maduración, lo cual está en concordancia con el aumento que sufre la temperatura en este periodo.

La Figura 3.11 muestra la gráfica de probabilidad acumulada en función del ciclo de cosecha para las fechas de siembras de interés. En la misma se observa que la fecha del 1 de diciembre es la que tiene una mayor variación, siendo 108 y 175 días sus valores mínimos y máximos respectivamente, demostrando una alta inestabilidad en este sentido lo que viene acompañado de valores de insignificantes de rendimientos. Lo mismo sucede para las fechas de inicio de año por lo que serán descartadas en el análisis.

Entre los meses de marzo y agosto, sobresalta la fecha del 15 mayo como la primera a analizar pues es la que tiene mayores rendimientos y peso en grano, ver Figura 3.7 y Figura 3.8 respectivamente. Sin embargo, los días en la cosecha para esta fecha de siembra no se encuentra entre 100 y 120 días en ninguno de los años simulados; la media de esta fecha es 159.2 días y la desviación estándar 3.4, siendo 151 y 167 días los mínimos y máximos respectivamente, por lo antes planteado se decide analizar otros meses.

La Figura 3.10, demuestra que para las fechas posteriores al 15 de mayo el ciclo de cosecha disminuye como también lo hace el rendimiento (Figura 3.7), provocando que a medida que la fecha se aleja más de mayo se obtienen menores rendimientos. Otra de las fechas de interés es el 15 de julio, pero de igual forma a como sucede en mayo, los días para la cosecha están fuera de parámetros, teniendo a 134 y 150 días como sus valores mínimos y máximos. Además, la media para esta fecha es 138 días quedando descartada.

En consecuencia, con lo anterior, sobresale la fecha del 15 de julio, siendo 118 días la media del ciclo de cosecha y 3.3 días la desviación estándar, los valores mínimos y máximos son 112 y 127 días. La Figura 3.11 brinda otra información muy valiosa, pues esta demuestra que para la fecha del 15 de julio existe un 85 % probabilidad que los días para la cosecha se encuentren 110 y 121 días, teniendo en cuenta la gráfica anterior está basada en la simulación de 30 años de historia, estos son resultados muy acertados.

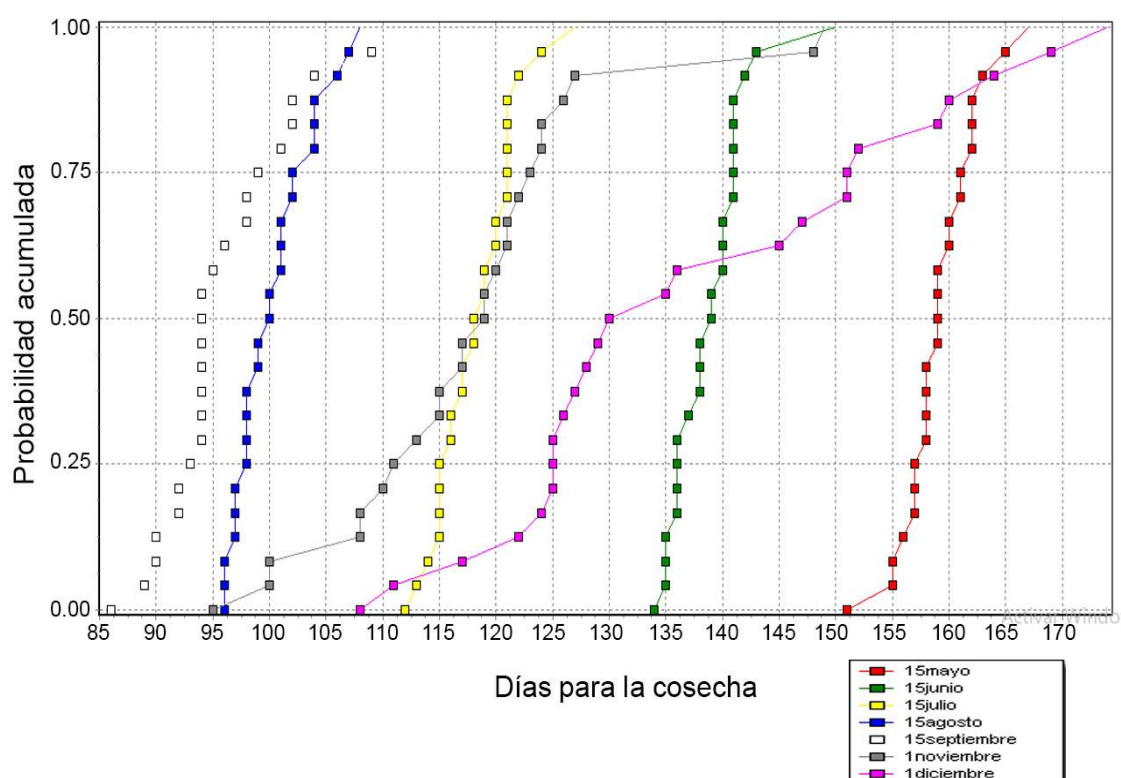


Figura 3.11 Probabilidad de los días para la cosecha obtenido en condiciones de secano por DSSAT para diferentes fechas de siembra de la soja variedad Júpiter durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Considerando todo lo planteado anteriormente y teniendo un compromiso entre los rendimientos y el ciclo de cosecha, se selecciona al 15 de julio como la fecha óptima de siembra. Este resultado coincide con lo planteado por Hernández y Bello (2010) pues ellos recomiendan la siembra de la variedad Júpiter entre el 15 de julio y 15 de agosto. Además, González (1955) y González y Ramos (1958) citados por Machado *et al.* (1987) y González *et al.* (1984) plantean que los meses de julio y agosto son los que propician un desarrollo óptimo de este clon. Sin embargo, lo anterior no corresponde con autores como Merino (2006) que

manifiestan los meses abril a junio con los ideales para la siembra de esta variedad.

3.4 Evaluación de estrategias de riego

En epígrafes precedentes del estudio se investigó las supuestas condiciones tanto potenciales como de secano el comportamiento de la soya en las condiciones del sur de Mayabeque, obteniendo como fecha óptima de siembra el 15 de julio. Durante el presente acápite se indagará tal comportamiento, para la fecha óptima escogida, pero con el auxilio de diferentes metodologías de riego como estrategia para satisfacer altos rendimientos y un uso eficiente del agua. Como resultado se delinearán los rendimientos de la soya variedad Júpiter para distintos porcentajes del límite superior del agua disponible en el suelo (LSAD) en cuestión y volumen de agua utilizada. Además de ello se involucran la información meteorológica de la zona de estudio, las fechas de siembra óptima seleccionadas previamente.

3.4.1 Selección del óptimo % del LSAD

Con el objetivo de obtener la mejor estrategia de riego, se utilizó la metodología descrita en la sección 2.10 obteniendo los resultados de la Figura 3.12, en la cual se muestran los rendimientos de la variedad de soya Júpiter en la fecha de siembra del 15 de julio para las 16 estrategias de riego. El máximo de rendimiento se obtuvo para la estrategia que aplica 20 mm de agua a un 85 % del LSAD llegando a obtener 2922 kg/ha (2,9 ton/ha), lo cual se encuentra 0.5 t/ha por debajo de los rendimientos indicados por (Cordero *et al.*, 2010) para esta variedad en la misma etapa de siembra, concordando en este sentido.

Por otra parte, el valor mínimo de rendimiento es de 425 kg/ha y se obtiene para una lámina de riego de 5 mm a un 55 % del LSAD, lo cual es un resultado muy por debajo de lo reportado en la literatura. Sin embargo, lo obtenido anteriormente se puede justificar por las grandes influencias que tiene el estrés hídrico sobre los rendimientos de la soya (García Rodríguez *et al.*, 2017; Gava *et al.*, 2016; Fioreze *et al.*, 2015).

En la Figura 3.12, se puede observar que existe una alta dependencia en los rendimientos y el por ciento del límite superior de agua disponible que se maneja para la iniciación del riego. En el caso de los tratamientos que aplican una lámina

de 20 mm, la media de los rendimientos en todos los años simulados disminuye desde 1896 kg/ha hasta 1382 kg/ha a medida que se reduce el por ciento del LSAD de 85 % a 55 %, lo que representa un 28,1 % de la cota máxima. Esto es un resultado esperado puesto que con toda intencionalidad se condiciona el suministro de agua al cultivo desde punto y su respuesta se refleja en menos rendimientos. Ahora los rangos en que varían los rendimientos por estrategias se ha de explicar por la variabilidad interanual. Este comportamiento se obtiene para cada todos los tratamientos que aplican la misma lámina de riego.

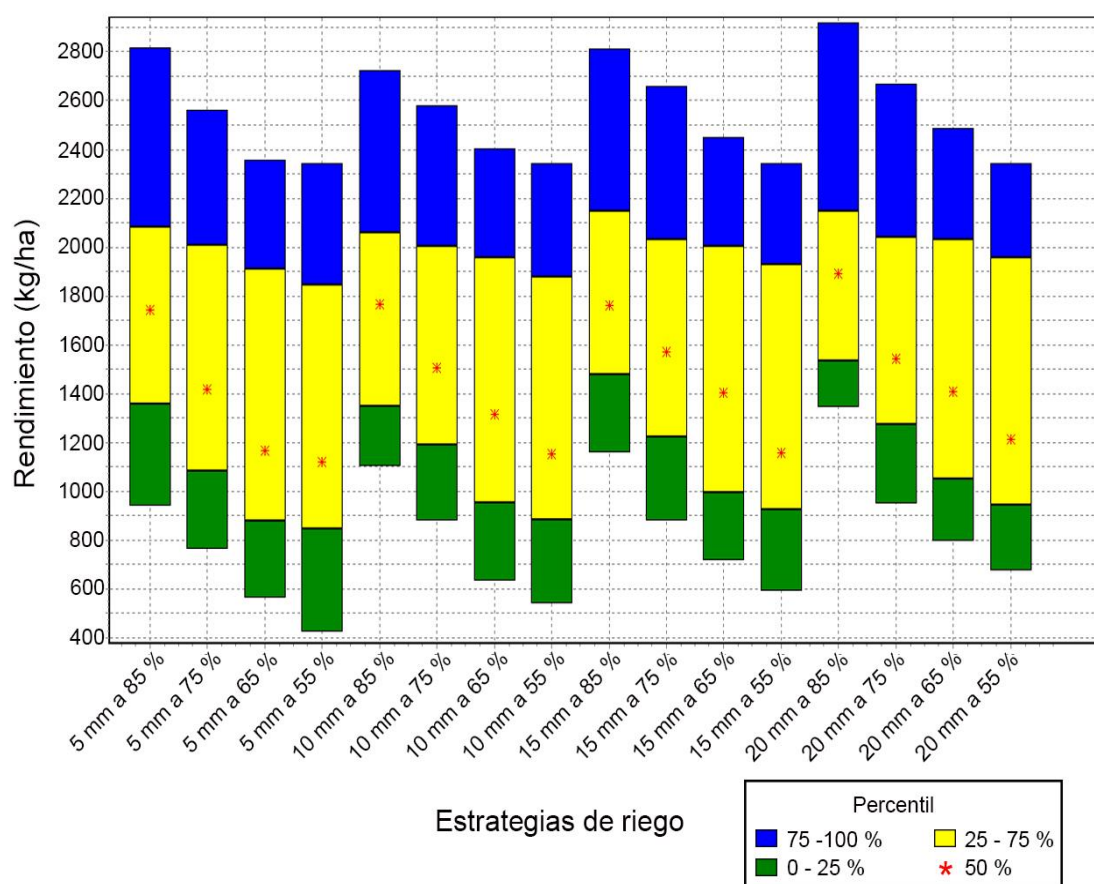


Figura 3.12 Rendimientos obtenidos por DSSAT para diferentes estrategias de riego de la variedad Júpiter en la fecha del 15 de julio durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Los resultados anteriores están en concordancia con los obtenidos por Sharda *et al.* (2019) quienes obtienen que en Texas los rendimientos medios para la soya, en el periodo de 1952 al 2012 varían de 2.2 t/ha a 5.0 t/ha al aumentar el porcentaje del límite superior de agua disponible de 20 % a 80 %. En este estudio se aprecia también un aumento de la productividad del agua aplicada la cual

aumenta con el por ciento del LSAD de 4,62 a 7,59. Otros autores como Sweeney *et al.* (2003) y Garcia *et al.* (2010) han obtenido resultados similares en los Estados Unidos.

Otro aspecto importante que se refleja en la Figura 3.12 es que los tratamientos que comienzan el riego a un mismo por ciento del LSAD y que solo se diferencian en la cantidad de agua aplicada en cada riego no difieren significativamente en los rendimientos. En concordancia, se obtiene que el promedio de los rendimientos es 1261 kg/ha y 1382 kg/ha para las estrategias que aplican 5 mm y 20 mm de agua a un 55 % del LSAD respectivamente, al aumentar tres veces la cantidad de agua en cada riego el rendimiento solo aumenta en 121 kg/ha lo que representa el 9,5 % de la menor cota.

Por tanto, se decide que la óptima estrategia de riego debe comenzar el mismo a un 85 % del LSAD con el objetivo de garantizar los mejores rendimientos. En este sentido, la Figura 3.13 muestra la probabilidad acumulada en función de los rendimientos para las estrategias que comienzan el riego a un 85 % de la LSAD, las cuatro curvas, que corresponden a las diferentes láminas de riego según la leyenda, se encuentran relativamente cercas. Se puede observar que las diferencias más significativas entre estos tratamientos se encuentran en el extremo inferior donde estos varían de 941 kg/ha a 1341 kg/ha para las láminas de 5 mm y 20 mm respectivamente. Sin embargo, los máximos extremos se encuentran más cercanos van desde 2821 kg a 2922 kg, siendo la variación total de solo 101 kg/ha lo cual representa el 3.5 %.

Además, la Figura 3.13 muestra que la media de los rendimientos en todos los años simulados es casi la misma en dependencia de la cantidad de agua aplicada en cada riego. Los tratamientos que comienzan el riego al 85 % del LSAD con una lámina de 5 mm, 10 mm, 15 mm y 20 mm tienen una media de 1731 kg/ha, 1767 kg/ha, 1816 kg/ha y 1896 kg/ha respectivamente. Considerando los resultados anteriores, se evidencia que al aumentar la lámina del riego los rendimientos no tienen variaciones significativas, aunque si pudiese tener significación la variación indiscriminada de tales láminas por concepto de uso no eficiente del agua y problemas medioambientales asociados.

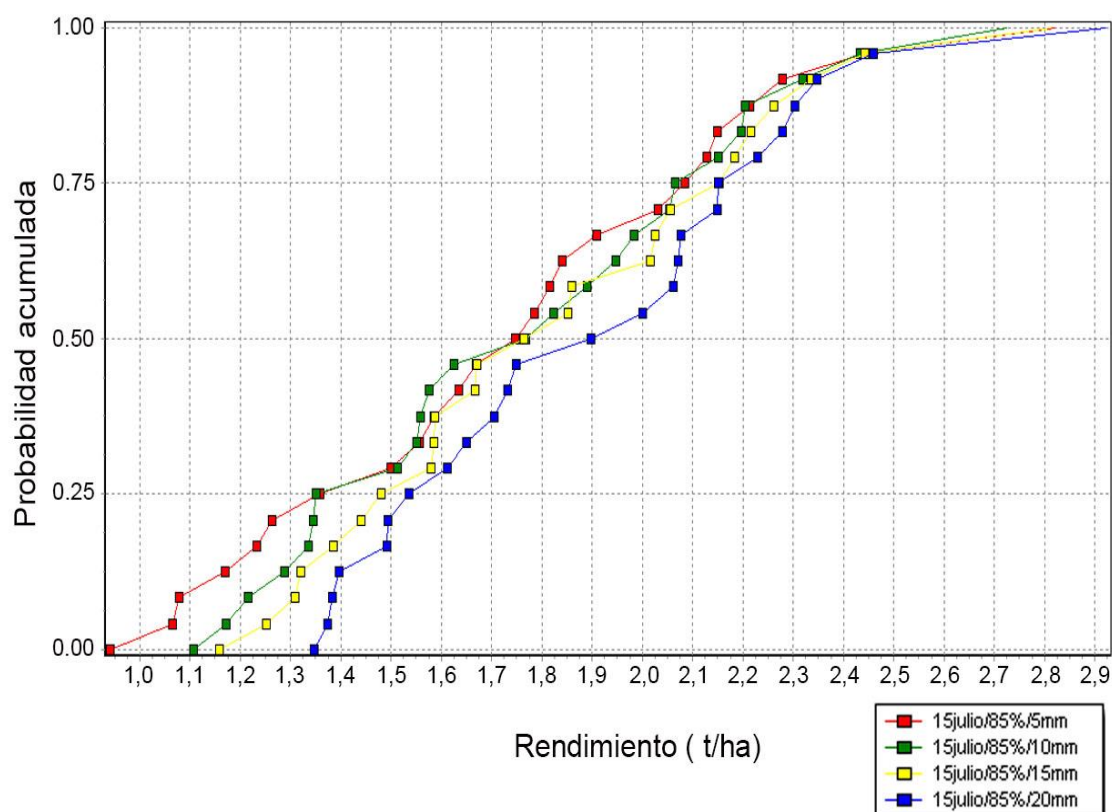


Figura 3.13 Probabilidad acumulada en función de los rendimientos obtenida por DSSAT para diferentes estrategias de riego de la variedad Júpiter en la fecha del 15 de julio durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

3.4.2 Selección de la óptima lámina de riego

Una vez investigado que la estrategia óptima de riego tiene como momento de iniciación del riego un contenido de humedad equivalente al 85 % del LSAD, es necesario analizar cuál será la lámina de riego que se aplicará. Con vista a tomar la decisión correcta serán estudiados como parámetros fundamentales el riego total acumulado durante el ciclo de vida del cultivo, el cual está directamente relacionado con el uso eficiente del recurso agua y por otro lado el número de riegos total, factor que afecta la rentabilidad económica de la cosecha.

La Figura 3.14 muestra las gráficas de probabilidad acumulada en función del riego total acumulado para cada una de las estrategias de riego. En la misma se observa como aumenta el riego total acumulado al incrementar el tamaño de la lámina, siendo el valor máximo 180 mm para la estrategia que aplica 20 mm. Por otra parte, los valores mínimos obtenidos en todas las estrategias fueron similares y oscilaron entre 15 y 20 mm. Las medias del riego total acumulado en

todos los años simulados van aumentando, siendo 65, 77, 93 y 116 mm cuando la cantidad de agua aplicada por riego es 5, 10, 15 y 20 mm respectivamente.

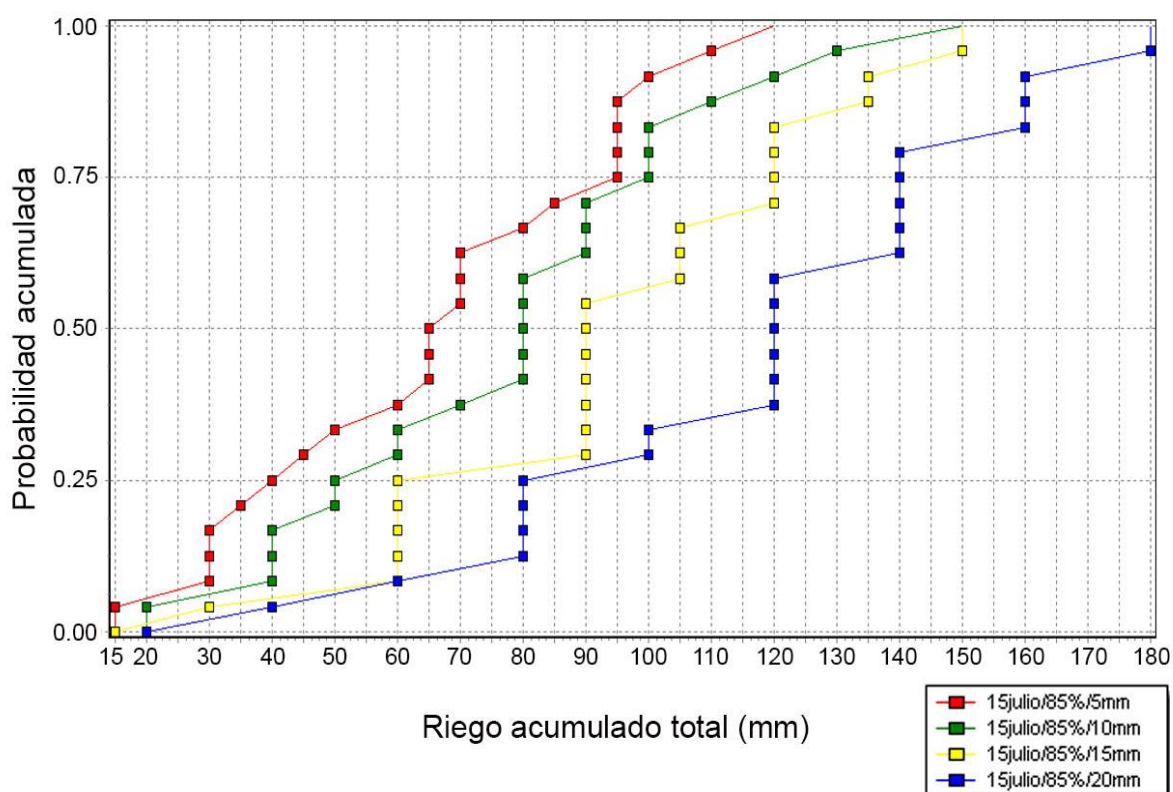


Figura 3.14 Probabilidad acumulada en función del riego total acumulado obtenida por DSSAT para diferentes estrategias de riego de la variedad Júpiter en la fecha del 15 de julio durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Luego se hace necesario analizar las respuestas en rendimiento de la soya bajo estas variantes de láminas aplicadas. En la Figura 3.14 se observa que para estas 4 estrategias los valores de rendimiento se mantienen aproximadamente constante con independencia del riego total acumulado. Por tanto, la mejor estrategia es la que hace un uso más eficiente del recurso agua, que en este caso es la que tiene menor riego acumulado durante el ciclo de vida del cultivo. En este sentido se decide que la estrategia que aplica una lámina de 5 mm es la más eficiente y la de 20 mm es la menos eficiente, quedando las que aplican 10 y 15 mm en posiciones intermedias.

Sin embargo, otro de los aspectos importantes a considerar es la cantidad total de riegos durante el desarrollo del cultivo, el cual varía significativamente en dependencia de la lámina de riego según se muestra en la Figura 3.15. En la

misma se observa que la estrategia más eficiente en el uso del agua (la que aplica 5 mm) es la que necesita regar mayor cantidad de veces, lo que trae consigo más gastos económicos. Para la misma una de las simulaciones alcanzó la cota máxima de 24 riegos y existe un 25 % de probabilidad que los valores más altos se encuentren entre 19 y 24 riegos. Además, la media de esta estrategia es 5 riegos mayor con respecto a la que aplica 10 mm lo cual representa el 62 % de los riegos que necesita esta última.

Por otra parte, las estrategias de riego que aplican 15 y 20 mm tienen un comportamiento similar en función del riego total aplicado coincidiendo en su valor medio el cual es de 6 riegos, teniendo como valores mínimos 2 y 1 respectivamente y como máximos 9 y 10. En sentido la estrategia que aplica 10 mm aumenta su valor medio a 8 riegos, teniendo 2 y 15 riegos como valores mínimos y máximos respectivamente.

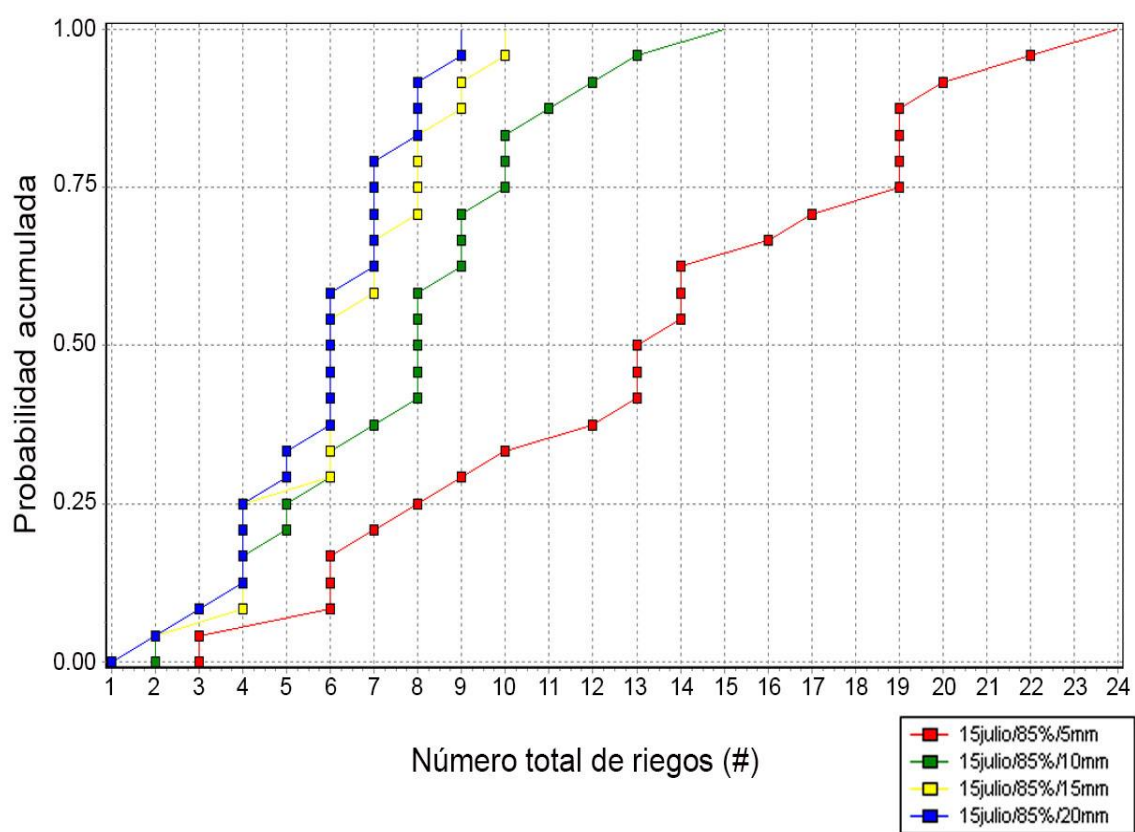


Figura 3.15 Probabilidad acumulada en función del número de riegos obtenida por DSSAT para diferentes estrategias de riego de la variedad Júpiter en la fecha del 15 de julio durante el ciclo del cultivo en el sur de Mayabeque.

Lo dicho anteriormente evidencia que las estrategias más factibles desde el punto de vista económico son las que aplican 15 y 20 mm de agua a un 85 % del LSAD pues estas son las que necesitan menor cantidad de riegos para el desarrollo del cultivo. En contraposición, la que aplica 5 mm es la menos eficiente en el sentido económico, pero es la que hace mejor uso del agua. Por último, la estrategia que aplica 10 mm se encuentra en una posición intermedia en cuanto a la economía de la cosecha.

Tomando como fundamento que es tan importante el uso del agua como el aspecto económico, tratando de mantener un compromiso entre estos dos factores y considerando que los valores de rendimiento se mantienen casi constante se decide que la estrategia optima de riego es la que aplica 15 mm de agua al 85 % del LSAD. Siendo resultados de esta estrategia, que en la fecha del 15 de julio se obtuvo un rendimiento medio de 1816 kg/ha y como media es necesario aplicar 6 riegos para gastar 90 mm de agua.

Este resultado está en correspondencia con el estudio realizado por González Robaina *et al.* (2013), en el cual se determinan las funciones agua rendimientos para 14 cultivos agrícolas en condiciones del Sur de la Habana. Para el cultivo soya en la fecha de siembra de verano plantean la ecuación del rendimiento en función del riego total aplicado en un intervalo de 25 mm a 160 mm, lo cual está en acierto con el los valores mínimos y máximos del riego total para la estrategia que aplica 15 mm de agua al 85 % del LSAD, los cuales son 10 mm y 150 mm respectivamente. Además, al evaluar la ecuación planteada por los autores en 160 mm se obtiene un rendimiento de 2528 kg/ha, valor que está bastante aproximado a 2765 kg/ha el cual es el rendimiento máximo simulado en la estrategia de interés.

Por otro lado Hernández y Bello (2010) plantean que los requerimientos hídricos de la soya se encuentran entre 110 y 145 mm, lo cual se encuentra por encima de la media obtenida para la variedad de interés con fecha de siembra el 15 de julio y usando la estrategia que aplica 15 mm de agua a un 85% del LSAD.

En cuanto a la cantidad de riegos es importante destacar que González Robaina *et al.* (2019) obtienen que para la soya en años húmedos se deben realizar 8 riegos, de 10 mm cada uno, durante todo el ciclo vegetativo del cultivo para un total de 80 mm; coincidiendo con 6 riegos de 15 mm cada uno, para un total de

90 mm. Por otro lado, para años secos los autores plantean que se deben realizar un total de 12 riegos lo cual está 2 riegos por encima del valor máximo del número de riegos obtenido para la mejor estrategia de riego.

Por otra parte González Robaina *et al.*, (2014) plantean que la soya tiene una productividad agronómica de $0,62 - 1,2 \text{ kg/m}^3$, lo cual es validado con la productividad agronómica del agua para la variedad de soya Júpiter, bajo la estrategia de riego propuesta, en la fecha de siembra del 15 de julio, siendo su valor de $2,017 \text{ kg/m}^3$.

..

Conclusiones

Como conclusión al presente trabajo de tesis se destacan las siguientes ideas:

- La metodología de estimación de la radiación solar diaria de la NASA es más exacta a los valores reales medidos en la estación climática de Homestead que la calculada por el modelo VP-VAR, siendo la raíz cuadrada del error cuadrático medio de la comparación de 3.504 y 7,217 respectivamente.
- La soya variedad Júpiter, tanto para condiciones potenciales y de secano en el sur de Mayabeque, cuenta con fecha óptima de siembra de 15 de julio, cuyo ciclo del cultivo es de alrededor de 110 días con rendimientos de hasta 2300 kg/ha.
- La estrategia de riego que aplica 15 mm de agua al 85 % de la capacidad de campo constituye la variante más adecuada considerando los rendimientos y teniendo un balance entre el agua total aplicada, la demanda del cultivo y cantidad de riegos.

De acuerdo a lo planteado anteriormente, es válido afirmar que el problema de la investigación ha sido resuelto y los objetivos fijados al inicio de la misma fueron cumplidos

Recomendaciones

Para darle continuidad a este tema de investigación y encontrar soluciones más eficaces se recomiendan los siguientes elementos:

- Realizar la calibración en la plataforma DSSAT de otras variedades soya sembradas en el país y aplicar las metodologías propuestas a las mismas para ampliar la gama de aplicación de los resultados obtenidos.
- Evaluar la validez de los resultados de simulación obtenidos para otras regiones del país, en particular aquellas en las que la representatividad de los tipos de suelos sea similar a la de este estudio.
- Divulgar los resultados del trabajo entre especialistas y directivos vinculados al manejo de los suelos, el riego, y el medioambiente de la provincia de Mayabeque.

Referencias Bibliográficas

ABBASPOUR, K.C.: ; HALL, J.W.: ; MOON, D.E.: "A yield model for use in determining crop insurance premiums", *Agricultural and forest meteorology*, 60(1-2): 33–51, 1992.

ALCARAS, L.M.A.: ; ROUSSEAU, M.C.: ; SEARLES, P.S.: "Responses of several soil and plant indicators to post-harvest regulated deficit irrigation in olive trees and their potential for irrigation scheduling", *Agricultural Water Management*, 171: 10–20, 2016.

ALLEN, R.G.: ; PEREIRA, L.S.: ; RAES, D.: ; SMITH, M.: "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56", *Fao, Rome*, 300(9): D05109, 1998.

ALLEN, R.G.: ; SMITH, M.: ; PEREIRA, L.S.: ; PRUITT, W.O.: "Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements", pp. 17–34, 1996.

AL-NAJAR, H.: "The integration of FAO-CropWat model and GIS techniques for estimating irrigation water requirement and its application in the Gaza Strip", *Natural Resources*, 2(03): 146, 2011.

ANDRADE, F.: ; SADRAS, V.: *Bases Para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja [Basis for the management of maize, sunflower and soybean]*, Ed. Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología ..., 2002.

ANDRADES RODRÍGUEZ, M.: ; MARTÍNEZ, M.: *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*, Ed. Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2001.

ANDRIANI, J.M.: "Estrés hídrico en soja", *IDIA*, 21(3): 48–51, 2002.

ANTONIĆ, O.: "Modelling daily topographic solar radiation without site-specific hourly radiation data", *Ecological modelling*, 113(1-3): 31–40, 1998.

ARTEAGA, R.: ; ÁNGELES, V.: ; VÁZQUEZ, M.A.: "Programa CROPWAT para planeación y manejo del recurso hídrico", *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(2): 179–195, 2011.

BAIGORRI, H.E.: ; CROATO, D.R.: *Manejo del cultivo de la soja en Argentina.*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires (Argentina ..., 2000.

BOOTE, K.J.: ; JONES, J.W.: ; HOOGENBOOM, G.: ; PICKERING, N.B.: "The CROPGRO model for grain legumes", *Understanding options for agricultural production*, pp. 99–128, Ed. Springer, 1998.

BORRÁS, L.: ; SLAFER, G.A.: ; OTEGUI, M.E.: "Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal", *Field Crops Research*, 86(2-3): 131–146, 2004.

CARBALLO DE SILVA, L.: "Manejo del riego en soya sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa", *Agronomía Tropical*, 40: 35–56, 1990.

CARCOVA, J.: ; URIBELARREA, M.: ; BORRAS, L.: ; OTEGUI, M.E.: ; WESTGATE, M.E.: "Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize", *Crop Science*, 40(4): 1056–1056, 2000.

CARTER, L.: "Soybean Root Growth and Yield Response to Variable Rate Irrigation", , 2018.

CASTELLANOS, A.: *Evapotranspiración real de la soya (Glycine max) sembrada en invierno.*, Centro de Información y Documentación Agropecuario, La Habana (Cuba)., No. 0138-8738, La Habana, Cuba, 1986.

CAVERO, J.: ; FARRE, I.: ; DEBAEKE, P.: ; FACI, J.M.: "Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models", , 2000.

COLLINO, D.: ; DE LUCA, M.: ; PERTICARI, A.: ; URQUIAGA, S.: ; RACCA, R.: "Aporte de la FBN a la nutrición de la soja y factores que la limitan en diferentes regiones del país", *XXIII Reunión Latinoamericana de Rizobiología. Los Cocos, Córdoba, Argentina*, : 25–29, 2007.

CORLUIY, J.: *STUDIE VAN DE WATERBALANS IN VERSILTE BODEMS VAN EEN SUIKERRIETPLANTAGE IN CUBA*, Tesis (en opción al Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias), Universidad de Gent, Bélgica, 2001.

DAMOUR, G.: ; SIMONNEAU, T.: ; COCHARD, H.: ; URBAN, L.: "An overview of models of stomatal conductance at the leaf level", *Plant, Cell & Environment*, 33(9): 1419–1438, 2010.

DE LA MELLA, R.M.: ; BARRERO, E.: ; DE VILLAVICENCIO, M.N.: ; HERRERA, H.: ; GUERRA, M.A.: ; GARCÍA, M.: ; FRÓMETA, Z.: ; CASALS, C.: "Influencia de la soya, trigo e hiello sobre la calidad de una bologna con CRM de ave", *Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos*, (287): 41–44, 1997.

DE VRIES, F.P.: ; BRUNSTING, A.H.M.: ; VAN LAAR, H.H.: "Products, requirements and efficiency of biosynthesis a quantitative approach", *Journal of theoretical Biology*, 45(2): 339–377, 1974.

DE WIT, C.T.: ; GOUDRIAAN, J.: *Simulation of ecological processes*, Ed. Pudoc, 1974.

DÍAS, G.: *INIAP-JUPITER Una nueva variedad para cosecha mecanizada*, INIAP- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Información Técnica Agropecuaria, No. 45, Quito, Ecuador, 1976.

DÍAS, H.: ; ESQUIVEL, M.: *Cultivo y Utilización de la Soya en Cuba*, 34-35 ppp., Holguín, Cuba, 1998.

DÍAZ CARRASCO, H.: ; DIAZ, V.: *El cultivo de la soya para granos y forrajes*, Ministerio de Agricultura, 1992.

DÍAZ, H.: *Mejoramiento y producción de semillas de soya en Cuba*, Tesis (en opción al Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias), INIFAT, Academia de Ciencias de Cuba, 1979.

DÍAZ, M.: ; DUARTE, G.: *Manual Práctico para la Producción de Soja. Hemisferio Sur*, pp. 79 a 92, ISBN-950-504-578-6, 2004.

DÍAZ, M.: ; SAUCEDO, O.: *Comportamiento de tres variedades de soya [Glycine max (L.) Merr.] en suelo pardo con carbonato*, Ed. Inédito, 2003.

DÍAZ, M.F.: ; PADILLA, C.: ; AGUIRRE, L.: ; LON-WO, E.: ; CASTRO, M.: ; CINO, D.M.: "Utilización de las leguminosas como alternativa en la alimentación de animales monogástricos", *Informe final de proyecto. PNCT*, (008), 2001.

DÍAZ, P.: ; MEDINA, G.: ; RUÍZ, J.: ; SERRANO, A.: "Potencial productivo del cultivo de soya (Glycine max (L.) Merrill) en México. Ciclo primavera-verano", *Publicación Técnica ed.*, vol. *Delimitación en sistemas de información geográfica, México*, , 2007.

ESQUIVEL, M.: ; ORTEGA, A.: "La soya en la alimentación animal. 2.-Su uso en cerdos, aves y peces.", *ACPA*, 21(2): 38–41, 2002.

FAO: *Semillas en emergencias*, ser. Manual técnico, Roma, Italia, 2011.

FAO: *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria.*, [en línea] ISBN-978-92-5-309374-8, Roma, 2016. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i6030s.pdf>

FAO: *EL estado mundial de la agricultura y la alimentación. APROVECHAR LOS SISTEMAS ALIMENTARIOS PARA LOGRAR UNA TRANSFORMACIÓN RURAL INCLUSIVA*, [en línea] ISBN-978-92-5-309873-6, Roma, 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i7658s.pdf>

FARIAS, J.R.B.: *Requisitos climáticos. El cultivo de la soja en los trópicos mejoramiento y producción.*, FAO, Roma (Italia)., 1995.

FAWN: *FAWN - Florida Automated Weather Network*, [en línea] 2019, Disponible en: <https://fawn.ifas.ufl.edu/station/station.php?id=440> [Consulta: 6 de marzo de 2019].

FEHR, W.R.: ; CAVINESS, C.E.: "Stages of soybean development: Special Report", Ames: *Iowa State University*, 80: 11, 1977.

FERRARIS, G.: ; ANTA, G.G.: ; ZORITA, M.D.: "Aportes actuales y futuros de tratamientos biológicos sobre la nutrición nitrogenada y producción de soja en el Cono Sur", pp. 85–89, 2006.

FIGUEIREDO, S.L.: ; PIVETTA, L.G.: ; FANO, A.: ; MACHADO, F.R.: ; GUIMARÃES, V.F.: "Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa de vegetação", *Ceres*, 58(3), 2015.

GARCIA, F.O.: ; SUR, I.C.: "Introducción: Marco de referencia del Simposio", pp. 3–5, 2009.

GARCÍA RODRÍGUEZ, J.C.: ; MUÑOZ OROZCO, A.: ; MALDONADO MORENO, N.: ; CRUZ IZQUIERDO, S.: ; ASCENCIO LUCIANO, G.: "Resistencia a sequía en genotipos de soya considerando caracteres morfológicos, fisiológicos y agronómicos", *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(2): 431–437, 2017.

GAVA, R.: ; FRIZZONE, J.A.: ; SNYDER, R.L.: ; DE ALMEIDA, B.M.: ; DE FREITAS, P.S.L.: ; REZENDE, R.: "ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE DÉFICIT HÍDRICO NA IRRIGAÇÃO DA CULTURA DA SOJA/STRATEGIES OF DEFICIT WATER MANAGEMENT IN IRRIGATION OF SOYBEAN CROP", *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 10(3): 305–315, 2016.

GIBSON, L.R.: ; MULLEN, R.E.: "Influence of day and night temperature on soybean seed yield", *Crop Science*, 36(1): 98–104, 1996.

GIMÉNEZ, L.: ; PAREDES, P.: ; PEREIRA, L.S.: "Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models", *Water*, 9(6): 393, 2017.

GODWIN, D.C.: ; JONES, C.A.: "Nitrogen dynamics in soil-plant systems", *Modeling plant and soil systems*, (modelingplantan): 287–321, 1991.

GONZÁLEZ, J.: ; DOMÍNGUEZ, P.: ; PÉREZ, A.: "Comportamiento de cerdos alimentados con desperdicios procesados y diferentes niveles de miel rica y levadura torula", *Ciencia y Técnica en la Agricultura. Ganado Porcino. CU.* 1989, 12(4), 1984.

GONZÁLEZ ROBAINA, F.: ; CISNEROS ZAYAS, E.: ; HERRERA PUEBLA, J.: ; LÓPEZ SEIJAS, T.: ; CID-LAZO, G.: "Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico", *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1), 2019.

GONZÁLEZ ROBAINA, F.: ; HERRERA PUEBLA, J.: ; LÓPEZ SEIJAS, T.: ; CID LAZO, G.: "Funciones agua rendimiento para 14 cultivos agrícolas en condiciones del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3): 5–11, 2013.

GONZÁLEZ ROBAINA, F.: ; HERRERA PUEBLA, J.: ; LÓPEZ SEIJAS, T.: ; CID LAZO, G.: "Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4): 21–27, 2014.

HERNÁNDEZ, G.: ; BELLO, R.: *Generalidades sobre el manejo del cultivo de la soya (Glycine max L. Merr.)*, Instituto de Investigaciones Porcinas, Boletín Técnico Porcino, No. 14, 11-16pp., 2010.

HERNÁNDEZ, N.: ; SOTO, F.: ; CABALLERO, A.: "Modelos de simulación de cultivos: Características y usos", *Cultivos Tropicales*, 30(1): 00–00, 2009.

HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.: ; PÉREZ-JIMENÉZ, J.M.: ; MESA-NÁPOLES, Á.: ; FUENTES-ALFONSO, E.: ; BOSCH-INFANTE, D.: *Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba.*, Ed. Instituto de suelos, 1999.

HOOGENBOOM, G.: "Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications", *Agricultural and forest meteorology*, 103(1-2): 137–157, 2000.

HOOGENBOOM, G.: ; PORTER, C.H.: ; SHELIA, V.: ; BOOTE, K.J.: ; SINGH, U.: ; WHITE, J.W.: ; HUNT, L.A.: ; OGOSHI, R.: ; LIZASO, J.I.: ; KOO, J.: *Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) version 4.7* (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, Ed. USA, 2017.

IGLESIAS, L.: "Estudio de la variabilidad morfoagronómica y bioquímica en soya (*Glycine max* L. Merrill)", *Lourdes Iglesias-Tesis de Grado (Dr. en Ciencias Agrícolas)*, : 1986–236, 1986.

JEUFFROY, M.-H.: ; NEY, B.: "Crop physiology and productivity", *Field Crops Research*, 53(1-3): 3–16, 1997.

JONES, C.A.: *CERES-Maize; a simulation model of maize growth and development*, ser. 04; SB91. M2, J6., 1986.

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.: "The DSSAT cropping system model", *European journal of agronomy*, 18(3-4): 235–265, 2003.

JONES, J.W.: ; KEATING, B.A.: ; PORTER, C.H.: "Approaches to modular model development", *Agricultural Systems*, 70(2-3): 421–443, 2001.

JONES, J.W.: ; ROYCE, F.: *La investigación agrícola en la era informática*, marzo de 2008,

JUMRANI, K.: ; BHATIA, V.S.: "Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean", *Physiology and Molecular biology of Plants*, 24(1): 37–50, 2018.

KADHEM, F.A.: ; SPECHT, J.E.: ; WILLIAMS, J.H.: "Soybean Irrigation Serially Timed During Stages R1 to R6. 11. Yield Component Responses 1", *Agronomy journal*, 77(2): 299–304, 1985.

KANTOLIC, A.: ; GIMÉNEZ, P.I.: ; DE LA FUENTE, E.B.: "Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja", *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. UBA Argentina*, : 165–201, 2003.

KASSAM, A.: ; SMITH, M.: "FAO methodologies on crop water use and crop water productivity", pp. 18, 2001.

KIFLE, M.: ; GEBRETSADIKAN, T.G.: "Yield and water use efficiency of furrow irrigated potato under regulated deficit irrigation, Atsibi-Wemberta, North Ethiopia", *Agricultural water management*, 170: 133–139, 2016.

KIMBALL, B.A.: ; BELLAMY, L.A.: "Generation of diurnal solar radiation, temperature, and humidity patterns", *Energy in agriculture*, 5(3): 185–197, 1986.

KINIRY, J.R.: ; WILLIAMS, J.R.: ; GASSMAN, P.W.: ; DEBAEKE, P.: "A general, process-oriented model for two competing plant species", *Transactions of the ASAE*, 35(3): 801–810, 1992.

LAICOS, R.T.: *Todo sobre soya*, Salud pública de México, 51, No. 3, México, 2010.

LINARES, H.: *Evaluación de la adaptabilidad y potencial del rendimiento de 6 cultivares de soya Glycine max L., para la producción de semilla, en época de invierno (agosto a septiembre) en tres localidades del departamento de Chiquimula*, Tesis (en opción al PhD Thesis), Tesis en opción al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de San Carlos ..., 2009.

LOOSVELT, L.: ; PAUWELS, V.R.: ; CORNELIS, W.M.: ; DE LANNOY, G.J.: ; VERHOEST, N.E.: "Impact of soil hydraulic parameter uncertainty on soil moisture modeling", *Water Resources Research*, 47(3), 2011.

MACHADO, R.: ; REMY, V.A.: ; TANG, M.: ; SANTANA, H.: "Soya (Glycine max (L.) Merrill)", *Pastos y Forrajes*, 10(2), 1987.

MADURO, Á.: ; ORTIZ, J.: ; MIRANDA, H.: ; TOBÍA, C.: ; PEROZA, D.: "Efecto de láminas de riego sobre el cultivo de la soya (Glycine max L.)", *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 30: 11–18, 2017.

MALIK, M.F.A.: ; QURESHI, A.S.: ; ASHRAF, M.: ; KHAN, M.R.: ; JAVED, A.: "Evaluation of genetic diversity in soybean (Glycine max) lines using seed protein electrophoresis", *Australian Journal of Crop Science*, 3(2): 107, 2009.

MALUENDA, J.: *EL record en todo el sector de la soya 2018/19, marcado por la tensión comercial entre EEUU y China, [en línea] 2018. Disponible en: <https://www.agrodigital.com/2018/10/24/la-soja-esta-de-record-en-medio-de-la-tension-comercial-entre-eeuu-y-china/>*

MAMBRIN, M.: ; BAST, R.: ; CURRIÉ, H.: ; DEBORTOLI, D.: ; MÉNDEZ, M.: *Evaluación del rendimiento de soja bajo riego en dos modalidades secano*, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias, Corrientes, Argentina, 2005.

MANYAME, C.: ; MORGAN, C.L.: ; HEILMAN, J.L.: ; FATONDJI, D.: ; GERARD, B.: ; PAYNE, W.A.: "Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions", *Geoderma*, 141(3-4): 407–415, 2007.

MARSHALL, B.: "Decision support systems in potato production", *Potato Biology and Biotechnology*, pp. 777–800, Ed. Elsevier, 2007.

MARTÍNEZ, R.: "Efecto del riego deficitario controlado en la productividad del banano", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(2): 51–55, 2013.

MCCOWN, R.L.: ; HAMMER, G.L.: ; HARGREAVES, J.N.G.: ; HOLZWORTH, D.P.: ; FREEBAIRN, D.M.: "APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research", *Agricultural systems*, 50(3): 255–271, 1996.

MERINO JIMÉNEZ, D.: *Caracterización morfofisiológica y agronómica de cultivares de soya (Glycine max (L.) Merr) en siembra de invierno en suelo pardo con carbonos*, Tesis (en opción al PhD Thesis), Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2006.

MORALES, A.: "Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica", *San José, Costa Rica*, , 1991.

ORTIZ, R.: "Importancia de la localidad en el comportamiento de variedades de soya durante siembras de primavera en Cuba", *Cultivos Tropicales*, 25(3): 67–72, 2013.

PADILLA-DÍAZ, C.M.: ; RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, C.M.: ; HERNANDEZ-SANTANA, V.: ; PEREZ-MARTIN, A.: ; FERNÁNDEZ, J.E.: "Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements", *Agricultural Water Management*, 164: 28–37, 2016.

PARTON, W.J.: ; LOGAN, J.A.: "A model for diurnal variation in soil and air temperature", *Agricultural Meteorology*, 23: 205–216, 1981.

PELTZER, H.F.: "Efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de genotipos de soja en siembra de primavera", *Serie extensión. EEA Paraná*, (56), 2005.

PENNING DE VRIES, F.W.: ; VAN LAAR, H.H.: "Simulation of plant growth and crop production", *Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen*, 308, 1982.

PÉREZ, C.B.: "Efecto del agua sobre el rendimiento en el cultivo de la piña", *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(4): 8–13, 2017.

PÉREZ, R.: *Manual práctico para el cultivo y uso del frijol de soya*, Departamento de coordinación y asesorías de proyectos. Consejo de Iglesias de Cuba, 30pp., La Habana, Cuba, 2000.

PÉREZ, R.A.: ; IZNAGA, A.C.: ; VALDÉS, A.B.: ; POCH, A.F.: "Estudio de nuevas variedades de soya (Glycine max (L.) Merrill) en siembras de invierno en Suelos pardos con carbonatos", *Centro Agrícola*, 32(2), 2005.

PERGOLINI, S.: *Factores que explican las variaciones de rendimiento del cultivo de soja entre los sectores de Bajo y Loma.[en línea]. elsitioagricola. com. Registro de la Propiedad Intelectual N° 506866.[Consultado: 04/07/2011]*, 2013.

PERTICARI, A.: "Inoculación de calidad para un máximo aprovechamiento de la FBN", pp. 121–126, 2005.

PRINGLE, H.C.: ; FALCONER, L.L.: ; FISHER, D.K.: ; KRUTZ, L.J.: "Soybean Irrigation Initiation in Mississippi: Yield, Soil Moisture, and Economic Response", *Applied Engineering in Agriculture*, 35(1): 39–50, 2019.

QUIJANO, A.: ; MORANDI, E.: ; MARTIGNONE, R.: ; BODRERO, M.: "Número de semillas y rendimiento en soja en relación a la época de siembra y la disponibilidad hídrica", *XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegeta. Mendoza*, : 222–223, 1996.

RIOJA MOLINA, A.: "Apuntes de Fitotecnia General", *EUITA, Ciudad Real*, , 2002.

RITCHIE, J.T.: "Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover", *Water resources research*, 8(5): 1204–1213, 1972.

RITCHIE, J.T.: "A user-orientated model of the soil water balance in wheat", *Wheat growth and modelling*, pp. 293–305, Ed. Springer, 1985.

RITCHIE, J.T.: "Classification of crop simulation models", *Crop Modeling and Related Environmental Data: A Focus on Applications for Arid and Semiarid Regions in Developing Countries*, : 3–14, 1994.

RITCHIE, J.T.: ; SINGH, U.: ; GODWIN, D.: ; HUNT, L.: "A user's guide to CERES-Maize V2. 10", *International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL*, , 1989.

RODRÍGUEZ, A.A.S.: "Pronóstico del régimen de riego para dos empresas pecuarias de la provincia de Granma", *Revista Ingeniería Agrícola*, 2(1): 28–32, 2017.

ROJAS, F.: ; SACRISTÁN, E.: *Guía Ambiental para el Cacao*, Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural. Federación Nacional de Cacaoteros., 127 ppp., Colombia, 2013.

ROMERO, A.: ; RUZ, R.: ; GONZÁLEZ, M.: "Evaluación de siete cultivares de soya (*Glycine max*) en las condiciones edafoclimáticas del municipio Majibacoa, Las Tunas", *Pastos y Forrajes*, 36(4): 459–463, 2013.

ROSAS, J.: ; YOUNG, R.: *EL CULTIVO DE LA SOYA*, [en línea] 1991, Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_soya.pdf

SALVAGIOTTI, F.: ; SPECHT, J.E.: ; CASSMAN, K.G.: ; WALTERS, D.T.: ; WEISS, A.: ; DOBERMANN, A.: "Growth and nitrogen fixation in high-yielding soybean: Impact of nitrogen fertilization", *Agronomy Journal*, 101(4): 958–970, 2009.

SHARDA, V.: ; GOWDA, P.H.: ; MAREK, G.: ; KISEKKA, I.: ; RAY, C.: ; ADHIKARI, P.: "Simulating the Impacts of Irrigation Levels on Soybean Production in Texas High Plains to Manage Diminishing Groundwater Levels", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, , 2019.

SMITH, M.: ; ALLEN, R.G.: ; MONTEITH, J.L.: ; PERRIER, A.: ; PEREIRA, L.: ; SEGEREN, A.: "Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements", *Rome: FAO*, , 1991.

SOCORRO, M.A.: ; MARTÍN, D.S.: *Granos. Plagas y enfermedades de la soya*, vol. 1, pp. p 82-85, 1998.

STACKHOUSE JR, P.W.: ; ZHANG, T.: ; WESTBERG, D.: ; BARNETT, A.J.: ; BRISTOW, T.: ; MACPHERSON, B.: ; HOELL, J.M.: ; HAMILTON, B.A.: "POWER Release 8.0. 1 (with GIS Applications) Methodology (Data Parameters, Sources, & Validation) Documentation Date December 12, 2018 (All previous versions are obsolete)(Data Version 8.0. 1; Web Site Version 1.1. 0)", , 12 de diciembre de 2018.

STILLMAN, S.: ; ZENG, X.: "Evaluation of SMAP soil moisture relative to five other satellite products using the climate reference network measurements over USA", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (99): 1–10, 2018.

STÖCKLE, C.O.: ; DONATELLI, M.: ; NELSON, R.: "CropSyst, a cropping systems simulation model", *European journal of agronomy*, 18(3-4): 289–307, 2003.

SWEENEY, D.W.: ; LONG, J.H.: ; KIRKHAM, M.B.: "A single irrigation to improve early maturing soybean yield and quality", *Soil Science Society of America Journal*, 67(1): 235–240, 2003.

TERMITE, L.F.: ; MASSARI, C.: ; TODISCO, F.: ; BROCCA, L.: ; FERRO, V.: ; BAGARELLO, V.: ; PAMPALONE, V.: ; WAGNER, W.: "Use of modeled and satellite soil moisture to estimate soil erosion in central and southern Italy.", 2016.

THOMPSON, L.M.: "Weather and technology in the production of wheat in the United States", *Journal of Soil and Water Conservation*, , 1969.

THOMPSON, L.M.: "Weather and Technology in the Production of Soybeans in the Central United States 1", *Agronomy Journal*, 62(2): 232–236, 1970.

TOLEDO, P.: *El cultivo de la soya en los trópicos*, Producción y Protección vegetal, 19-36pp., 1995.

VAN GENUCHTEN, M.T.: "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1", *Soil science society of America journal*, 44(5): 892–898, 1980.

VAN ITTERSUM, M.K.: ; LEFFELAAR, P.A.: ; VAN KEULEN, H.: ; KROPFF, M.J.: ; BASTIAANS, L.: ; GOUDRIAAN, J.: "On approaches and applications of the Wageningen crop models", *European journal of agronomy*, 18(3-4): 201–234, 2003.

WILKERSON, G.G.: ; JONES, J.W.: ; BOOTE, K.J.: ; INGRAM, K.T.: ; MISHOE, J.W.: "Modeling soybean growth for crop management", *Transactions of the ASAE*, 26(1): 63–0073, 1983.

WILLIAMS, J.R.: ; JONES, C.A.: ; KINIRY, J.R.: ; SPANEL, D.A.: "The EPIC crop growth model", *Transactions of the ASAE*, 32(2): 497–0511, 1989.

WINSLOW, J.C.: ; HUNT JR, E.R.: ; PIPER, S.C.: "A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data", *Ecological Modelling*, 143(3): 227–243, 2001.

WRB: *World reference base for soil resources*, Food and agriculture organization of the united nations, Roma, Italia, 1998.

Y GARCIA, A.G.: ; PERSSON, T.: ; GUERRA, L.C.: ; HOOGENBOOM, G.: "Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA", *Agricultural Water Management*, 97(7): 981–987, 2010.

YANG, H.: ; DU, T.: ; QIU, R.: ; CHEN, J.: ; WANG, F.: ; LI, Y.: ; WANG, C.: ; GAO, L.: ; KANG, S.: "Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China", *Agricultural Water Management*, 179: 193–204, 2017.

ZAMORA, A.: ; ABDOL, S.: "Evaluación de variedades de soya en época de frío en dos tipos de suelos de la provincia Granma", *Revista Electrónica Granma Ciencia*, 11(3), 2007.

ZAPATA, M.: ; SEGURA, P.: *Riego deficitario controlado: Fundamentos y aplicaciones*, ser. Sirsi) i9788471145901, 1995.

Anexos

Anexo 1: Balance mundial de soya en las 10 últimas campañas

Figura A1.1: Producción y consumo mundial de soya en las 10 últimas campañas y previsiones 2018/19. Fuente USDA

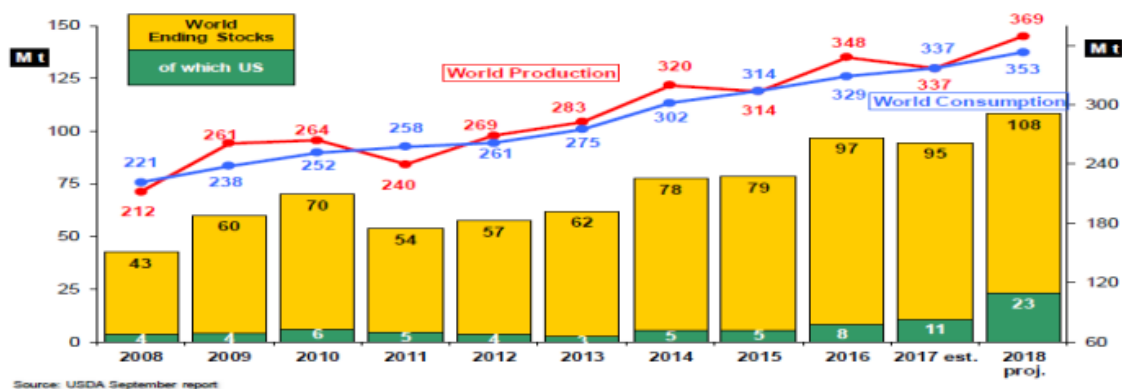


Tabla 1. Balance del sector de la soya 2014/15 a 2018/19. Millones de t. Fuente CIC

	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19 prevé.
Producción	320	315	349	339	370
Consumo	302	317	336	345	358
Comercio	124	134	148	154	155
Stocks finales	36	32	46	41	52
Stocks finales (a)	14	16	22	19	33

a) Principales exportadores: Brasil, EEUU, Argentina.

Tabla A1.1: Producción de soya y harina de soya en el mundo. Fuente USDA

Producción de soya (millones de t)					Producción harina de soya (millones de t)				
Países	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	Países	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
EEUU	106,9	106,9	119,5	127,7	China	64,5	69,7	71,3	74,1
Brasil	96,5	114,6	119,5	120,5	EEUU	40,5	40,6	44,4	44,4
Argentina	58,8	55,0	37,8	57,0	Brasil	30,8	31,3	33,3	33,1
China	11,8	12,9	14,2	15,0	Argentina	33,2	33,3	28,6	33,0
India	6,9	11,0	8,4	10,5	UE	11,8	11,4	11,8	13,1
Paraguay	9,2	10,3	10,0	9,8	India	4,4	7,2	6,1	7,2
Canadá	6,5	6,6	7,7	7,0	Méjico	3,5	3,6	4,0	4,1
Mundo	320,0	314,8	350,1	347,8	Mundo	215,8	225,4	230,9	242,4

Fuente: Maluenda (2018)

Anexo 2: Resumen de los tipos de parámetros usados en el módulo de Plantilla de cultivos

SECCIÓN	DESCRIPCIÓN
Fotosíntesis	Funciones que definen el efecto del N foliar y de la temperatura sobre la fotosíntesis
Respiración	Parámetros de respiración asociada con varios procesos del crecimiento. Concentración “máxima”, “de crecimiento normal”, y “final” en proteína de hojas, tallos, raíces, vainas, semillas y tejidos de nódulos
Composición de la planta	Porcentaje de carbohidrato-celulosa, lípidos, lignina y ácidos orgánicos de hojas, tallos, raíces, vainas semillas y tejido nodular. Efecto de la temperatura sobre el contenido de lípido de la semilla.
Parámetros de carbono y nitrógeno	Coeficientes para la acumulación de reservas de carbohidratos en el tejido de los tallos.
Parámetros de fijación de nitrógeno	Parámetros para el crecimiento de los nódulos y su senescencia. Matriz de datos que define el efecto de la temperatura, agua del suelo, y edad de los nódulos sobre la fijación y el crecimiento de los nódulos
Parámetros. De crecimiento de planta y partición (reparto de asimilados)	Reparto de la materia seca hacia hojas, tallos y raíces como una función del estadio vegetativo. Coeficientes de reparto en emergencia, estadio final de crecimiento, senescencia del tallo, durante el estrés hídrico y crecimiento de los nódulos. Parámetros que indican la influencia que tienen la temperatura y la radiación solar en la expansión foliar. Parámetros de profundidad y longitud inicial de raíces y extracción de agua.
Factores de senescencia	Parámetros de senescencia relacionados con el estadio vegetativo, daño por congelación, movilización de nitrógeno, sequía y autosombreado de la cubierta

Parámetros fenológicos	Curvas que definen el efecto de la temperatura sobre el desarrollo vegetativo y reproductivo (temprano y tardío). Parámetros para cada estadio de crecimiento: estadio precedente, función de fotoperíodo, función de temperatura, sensibilidad a la temperatura y el agua, sensibilidad al N y P.
Parámetros. De alto y ancho del dosel	Largo de los entrenudos e incremento del ancho del dosel como una función del estadio vegetativo. Elongación de los entrenudos como una función de la temperatura y el flujo de fotones fotosintéticos.

Fuente: (Jones *et al.*, 2003)

Anexo 3: Coeficientes genéticos del archivo *.CUL (archivo cultivar)

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
CLDL	Longitud del día por encima de la cual el desarrollo reproductivo no se ve afectado por la longitud del día (para plantas de día largo) (h). Fotoperíodo óptimo por encima de este valor.
PPSEN	Pendiente de la respuesta relativa de desarrollo con el fotoperíodo en función del tiempo (negativa para plantas de día largo) (1 / h).
EM-FL	Tiempo (días fototérmicos) desde el final de la fase juvenil hasta la aparición de la primera flor, duración mínima con temperatura (T) y fotoperíodos (P) óptimos. (T y F op)
FL-SH	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor a la primera vaina mayor de 0.5 cm (T y P op).
FL-SD	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor a la primera semilla (T y P op).
SD-PM	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera semilla a madurez fisiológica (T y P op).
FL-LF	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor al final del crecimiento de hojas (T y P op).
LFMAX	Tasa fotosintética máxima (mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) con saturación lumínica y temperatura óptima

SLAVR	Área foliar específica (cm ² g ⁻¹) para hojas nuevas durante el pico de crecimiento vegetativo.
XFRUIT	Fracción máxima de la fotosíntesis bruta diaria disponible para semillas y vainas.
WTPSD	Peso máximo de semilla (g) bajo condiciones no limitantes de sustrato
SFDUR	Duración (DPT; días fototérmicos) del llenado de semilla
SDPDV	Número de semillas por vaina.
PODUR	Tiempo (DPT; días fototérmicos) requerido para que el cultivo adquiriera la carga completa de vainas en condiciones óptimas, usado para computar la tasa de formación de flores y vainas.

Fuente: (Boote *et al.*, 1998)

Anexo 4: Coeficientes genéticos del archivo *.ECO (archivo ecotipo)

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
MG.	Número de grupo de madurez para cada ecotipo.
THVAR	Tasa mínima de desarrollo reproductivo bajo temperatura óptima y condiciones de días largos o cortos, según se trate de una leguminosa de día corto o de día largo, respectivamente.
PL-EM	Tiempo (días térmicos) entre siembra y emergencia (T óptima).
EM-V1	Tiempo (días térmicos) requerido de emergencia a la primera hoja verdadera (T óptima).
V1-JU	Tiempo (días térmicos) requerido de emergencia al final de la fase juvenil
JU-R0	Tiempo (días fototérmicos) requerido para la inducción floral (T y F óptimos).
PM09	Proporción de tiempo entre la formación de la primera semilla y madurez fisiológica, en el que puede desarrollarse la última semilla.
LNGSH	Tiempo (días fototérmicos) requerido para el crecimiento de las vainas (T y P óptimos).
R7-R8	Tiempo (días fototérmicos) entre madurez fisiológica (R7) y madurez de cosecha (R8) (T y P óptimos).

RIPRO	Incremento en la sensibilidad a la longitud del día después de floración (CSDL decrece por este valor (h))
FL-VS	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor a la última hoja sobre el tallo principal (T y P óptimos).
TRIFOL	Tasa de aparición de hojas (días térmicos-1) en el tallo principal, hojas por día térmico (T óptima).
SIZELF	Tamaño (cm ² hoja-1) de una hoja normal (nudo 8° - 10°).
THRSH	Relación (% en peso) máxima de semilla (semilla + carpelo)-1 a madurez.
SDPRO	Porcentaje de proteína en semilla ($g_{\text{proteína}} g_{\text{semilla}}^{-1}$).
SDLIP	Porcentaje de lípido en semilla ($g_{\text{lípidos}} g_{\text{semilla}}^{-1}$).

Fuente: (Boote et al., 1998)