

# Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca



**MinAgricultura**  
Ministerio de Agricultura  
y Desarrollo Rural

100 AÑOS

Elaborado por:  
César Andrés Cortés Bello.  
Coordinador del proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302.

Juan Geovany Bernal Patiño  
Eliecer David Díaz Almanza  
Javier Fernando Méndez Monroy  
Apoyo técnico TCP/COL/3302

Supervisión técnica:  
Pasquale Steduto (FAO/NRL)  
Patricia Mejías (FAO/NRL)  
Dirk Raes (KU Leuven)  
Elias Fereres (Universidad de Córdoba)  
José Francisco Boshell (Consultor)

La presente investigación se desarrolló en el marco del proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302. "Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático (EIECC)".

Fotografías: FAO Colombia.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 134275/1/08.13

La FAO fomenta el uso, la reproducción y la difusión del material contenido en este producto informativo. Salvo que se indique lo contrario, se podrá copiar, imprimir y descargar el material con fines de estudio privado, investigación y docencia, o para su uso en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca de forma adecuada a la FAO como la fuente y titular de los derechos de autor y que ello no implique en modo alguno que la FAO aprueba los puntos de vista, productos o servicios de los usuarios.

Todas las solicitudes relativas a la traducción y los derechos de adaptación así como a la reventa y otros derechos de uso comercial deberán dirigirse a [www.fao.org/contact-us/licence-request](http://www.fao.org/contact-us/licence-request) o a [copyright@fao.org](mailto:copyright@fao.org).

Los productos de información de la FAO están disponibles en el sitio web de la Organización ([www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)) y pueden adquirirse mediante solicitud por correo electrónico a [publications-sales@fao.org](mailto:publications-sales@fao.org).

© FAO 2013

## AGRADECIMIENTOS

La realización del presente TCP/COL/3302 “Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático (EIECC)” y su publicación fue posible gracias a la suma de varios esfuerzos y voluntades.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), brindaron apoyo técnico y financiamiento para la realización del TCP/COL/3302 y edición del presente trabajo.

Adicionalmente, los aportes del Departamento Nacional de Planeación (DNP), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), Federación Nacional de Usuarios de Distritos de Adecuación de Tierras (FEDERRIEGO).

Se resalta los grandes aportes de Pasquale Steduto, Patricia Mejías, Dirk Raes, Elias Fereres, Juan Fernando Gallego Beltrán, Nestor Hernandez Iglesias, Francisco Boshell, Ana Maria Loboguerrero, Fabián Villalba, Javier Carbonell Gonzalez, Ruby Stella Hernandez Salazar, Fernando Villegas Trujillo, Jaime Bernal, Enrique Cortés, Dagoberto Bonilla.

A todas ellas y ellos que contribuyeron al logro del presente trabajo, nuestro sincero agradecimiento.





## PRESENTACIÓN

La división de Tierras y Agua de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) ha desarrollado un modelo que permite simular el rendimiento de cultivos herbáceos como respuesta al agua, denominado AquaCrop. Este modelo es el resultado de múltiples investigaciones a nivel mundial y se tienen experiencias de la adaptación y calibración exitosa en lugares con diferentes condiciones medio-ambientales y características propias de los cultivos.

Atendiendo la demanda técnica de la Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible del Departamento Nacional de Planeación (DNP) a FAO, se crea el Convenio de Cooperación Técnica TCP/COL/3302/COL. El propósito del convenio fue adaptar y validar AquaCrop para los cultivos de arroz riego, caña de azúcar, maíz tecnificado y papa en zonas productoras a nivel nacional. Adicionalmente, se evaluó el rendimiento de los cultivos bajo escenarios de variabilidad y cambio climático.

Los resultados de las actividades anteriores permitirán a DNP utilizar el modelo AquaCrop en el Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático (EIECC) a nivel nacional y a los gremios, centros de investigación, productores, técnicos agrícolas, entre otros, como herramienta para la toma de decisiones.

El desarrollo del TCP contó con presupuesto de FAO y de Gobierno Nacional a través del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Los recursos destinados por MADR para la ejecución de este proyecto fueron administrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

En este documento se presentan resultados obtenidos de la adaptación y validación del modelo AquaCrop a las condiciones agrometeorológicas de zonas productoras de Colombia y los posibles efectos de variabilidad y cambio climático sobre los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar.





## TABLA DE SIGLAS

CC	Canopy Cover o Cobertura de Dosel
CCo	Canopy Cover o Cobertura de Dosel inicial
CENICAÑA	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EIECC	Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático
ENSO	El Niño/Oscilación del sur
ETo	Evapotranspiración de referencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (siglas en inglés)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HI	Índice de Cosecha (siglas en inglés)
IAF	Índice de Área Folear
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en inglés)
MADR	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
MCG	Modelos de circulación general de la atmósfera
NOAA	Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (siglas en inglés)
ONI	Índice Oceánico del Niño (siglas en inglés)
RAW	Lámina de agua rápidamente aprovechable (siglas en inglés)
SRES	Reporte Especial sobre Escenarios de emisiones (siglas en inglés)
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical





# CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
2.	Aspectos Generales.....	3
2.1.	Cultivo de caña de azúcar.....	3
2.2.	Fenómenos climáticos.....	5
2.2.1.	La Variabilidad climática.....	5
2.2.2.	El Cambio Climático.....	6
2.3.	Descripción del modelo AquaCrop.....	8
3.	Descripción de la metodología.....	13
3.1.	Agroclimatología de la zona de estudio.....	14
3.2.	Descripción de módulos y parámetros a implementar.....	16
3.3.	Adaptación del modelo de AquaCrop.....	18
3.4.	Análisis de Sensibilidad.....	22
3.5.	Validación de AquaCrop.....	23
3.6.	Aplicación de AquaCrop.....	24
3.6.1.	Variabilidad Climática.....	25
3.6.2.	Cambio Climático.....	25
4.	Resultados.....	27
4.1.	Análisis agroclimático.....	27
4.2.	Ajuste del modelo.....	30
4.2.1.	Calibración de parámetros de desarrollo de la cobertura de follaje.....	30
4.2.2.	Calibración del porcentaje de fertilidad.....	33
4.3.	Análisis de sensibilidad.....	36
4.3.1.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles freáticos.....	36
4.3.2.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de fertilidad de suelos.....	37
4.3.3.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de horizontes restrictivos.....	38
4.3.4.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas de suelo.....	38





4.4.	Validación.....	39
4.5.	Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático.....	42
4.5.1.	Variabilidad Climática.....	46
4.5.2.	Afectaciones del Cambio Climático sobre la caña de azúcar.....	49
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	50
	Anexo.....	53

# 1. INTRODUCCIÓN

Colombia está experimentando actualmente cambios muy importantes. El país se encuentra en un punto en el que debe tomar decisiones que determinarán el tipo de desarrollo que su sociedad seguirá en el futuro y en esa medida serán cruciales a la hora de mejorar las condiciones de vida de su población. En particular, en el campo de la agricultura, Colombia enfrenta una serie de importantes desafíos, que deben ser afrontados apropiadamente. Desde hace algunos años se vienen presentando en el país cambios climáticos, reflejo de fenómenos globales y de las particularidades de la geografía colombiana, los cuales han tenido repercusiones sobre la producción de algunos cultivos agrícolas. Es entonces muy importante que se implementen estrategias y se usen herramientas que faciliten la adaptación de la agricultura colombiana a los cambios que está experimentando y seguirá experimentando el clima en el futuro.

De acuerdo a lo anterior, el documento que aquí se presenta se enmarca dentro de las actividades de MADR junto con DNP y FAO para apoyar y fortalecer acciones que conlleven a evaluar impactos económicos del cambio climático en la agricultura a través de la adaptación y calibración del modelo AquaCrop para el cultivo de caña de azúcar en el valle geográfico del Río Cauca. De esta manera se determinan rendimientos agrícolas a través de características de la zona de siembra, tales como suelo, clima, cultivo y manejo de éste, y se aportan herramientas para mejorar y tomar decisiones para el uso eficiente de los recursos medioambientales, y también contar con elementos adecuados para enfrentar fenómenos de variabilidad y cambio climático.

AquaCrop es un modelo de desarrollo de follaje, enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible (Raes, D.; Et Al, 2009). AquaCrop es desarrollado por la FAO, con la ventaja de ser relativamente sencillo en comparación con otros modelos de simulación de rendimientos, por lo que con sólo calibrar algunos parámetros se obtienen resultados similares a la realidad. Esto facilita el uso del modelo en tanto que la información necesaria para adaptarlo a las condiciones colombianas no es tan grande en comparación a otros modelos y la plataforma del software resulta ser de fácil manejo. De esta forma, además de contribuir al EIECC, el TCP deja capacidad instalada en gremios, instituciones, centros de investigación y algunos productores para tomar decisiones haciendo uso de esta herramienta.

En este orden de ideas, este documento expone resultados del proceso de adaptación y calibración del modelo AquaCrop a las condiciones y características propias de zonas





productoras de Colombia del cultivo de caña de azúcar. Este cultivo se adapta muy bien a las condiciones ambientales del valle geográfico del Río Cauca, la cual es la región donde se ubica la mayor zona productora de caña de azúcar del país. Por tal razón, el proceso de adaptación del modelo AquaCrop para este cultivo se llevó a cabo en esta zona. Este proceso se llevó a buen término gracias a la información proporcionada por IDEAM y por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA).

Adicionalmente en este documento, se presentan análisis de sensibilidad de algunos parámetros de AquaCrop y ejercicios para identificar cambios en el rendimiento agrícola en función de la variabilidad climática y de los niveles de CO<sub>2</sub> estimados para el futuro.

El documento se encuentra compuesto por cinco secciones, siendo la primera esta introducción. En la segunda sección se presentan generalidades del modelo AquaCrop y del cultivo de Caña de Azúcar, así como una descripción general de los fenómenos de variabilidad y cambio climático; la tercer sección contiene la descripción de la metodología utilizada respecto al estudio de caso, la adaptación y aplicación del modelo. La cuarta sección presenta los resultados obtenidos con el modelo y en la quinta sección se encuentran las conclusiones y recomendaciones del proceso de ajuste del modelo.

## 2. ASPECTOS GENERALES

### 2.1. Cultivo de caña de azúcar

La Caña de azúcar es un pasto perenne que pertenece a la familia de las gramíneas, adaptado a un amplio rango de climas tropicales y subtropicales entre los 36.5° latitud Norte (España) hasta los 3° latitud Sur (Uruguay). Para su ciclo vegetativo requiere de estaciones húmedas o riego y noches cálidas y su crecimiento disminuye a temperaturas inferiores de 10-12 °C (EEAOC, 2009). Los climas excesivamente húmedos producen elevadas toneladas de cosecha pero bajo rendimiento en sacarosa (Castillo & Castellvi Sentis, 1996).

El procesamiento de caña de azúcar para la obtención de sacarosa empieza realmente en campo. La variedad de caña, el suelo en el cual se cultiva, la oferta ambiental, las prácticas de manejo, entre otras, determinan la calidad del material producido (Larrahondo J. , 1995). En particular, las características agroclimáticas de la zona es uno de los principales aspectos a tener en cuenta para evaluar los rendimientos potenciales de un cultivo.

Durante los primeros meses de crecimiento de la caña de azúcar, el agua proveniente de la lluvia ó riego estimula su rápida elongación y formación de entrenudos. Sin embargo, la ocurrencia de lluvias intensas durante el período de maduración no es recomendable, porque produce pobre calidad de jugo<sup>1</sup>, exagera el crecimiento vegetativo, la formación de cañas de agua, aumenta la humedad del tejido y la migración de sacarosa al follaje. Además, dificulta las operaciones de cosecha y transporte. La recuperación de azúcar es mayor cuando el clima es seco, con poca humedad, estas condiciones favorecen la acumulación de azúcar (Larrahondo & Villegas, 1995).

El consumo total de agua de la caña de azúcar en diferentes países varía en forma amplia, debido a las diferencias en los ciclos del cultivo. Por lo general, este consumo oscila entre 1200 y 1500 mm por año de cultivo (Torres Aguas, 1995). Las zonas seleccionadas para este estudio se ubican dentro del rango mencionado, con precipitaciones medias multianuales entre 1200 mm y 1500 mm.

---

[1] El tallo de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida, fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa.





La temperatura y la estacionalidad de las lluvias son las variables climáticas más determinantes en el cultivo de la caña de azúcar. La temperatura óptima para la brotación es de alrededor de 28-32 °C (EEAOC, 2009). Temperaturas sobre 38 °C reducen la tasa de fotosíntesis y aumentan la respiración. A temperaturas mayores se estimula la fotorrespiración y la sacarosa puede degradarse en fructosa y glucosa, lo que produce menor acumulación de azúcares. Por otro lado, condiciones severas de frío (por debajo de 9 °C) inhiben la brotación de las socas y reducen el crecimiento de la caña (Castillo & Castellvi Sentis, 1996). En condiciones tropicales, la temperatura tiene un efecto negativo sobre la calidad del jugo en los períodos secos, cuando la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima oscila entre 11 °C y 12 °C, lo cual estimula el almacenamiento de sacarosa (Larrahondo & Villegas, 1995).

La producción de caña de azúcar en Colombia se centra en el departamento del Valle del Cauca, el cual cuenta con cerca de 80 % del área sembrada total, mientras que el 20% restante se ubica en los departamentos de Risaralda y Cauca (DANE, 2011). La producción de caña de azúcar corresponde al 8 % del área total de cultivos perennes en Colombia (más de 200.000 hectáreas); a finales de 2010 había en el valle del Río Cauca 218,311 hectáreas sembradas con caña de azúcar para la producción de azúcar y etanol, de las cuales 172,421 fueron cosechadas durante el año. Los ingenios molieron en total 20'141,093 toneladas de caña, produjeron 2'269'750 toneladas de azúcar y 286'995,000 litros de etanol (Cenicaña, 2010 a).

Las exigencias de humedad y variación de temperatura para obtener los máximos niveles de sacarosa a nivel mundial conlleva a que únicamente, con excepción del Valle del Cauca en Colombia, Hawái y Perú, se lleve a cabo la cosecha de la caña de azúcar durante una época del año, lo que se denomina zafra (Finagro, 2012).

En Colombia no existe zafra por las condiciones climáticas tropicales propias del valle geográfico del Río Cauca que permite que se coseche cada 10 a 14 meses en promedio. Colombia ocupa el primer lugar a nivel mundial en cuanto a rendimiento en toneladas de caña por hectárea (TCH), el rendimiento promedio en las dos últimas décadas se encuentra, entre 120 y 130 TCH (Cenicaña, 2010).

En forma general, se dice que el clima del valle del Río Cauca, en el cual se ubica el eje azucarero de Colombia, se caracteriza por presentar régimen bimodal de precipitación, consistente en la sucesión intercalada de dos temporadas de lluvia y dos temporadas secas (Cenicaña, 2010); esta oferta ambiental ha permitido que las labores de establecimiento del cultivo se puedan realizar en cualquier época del año, con aplicaciones de riego en los meses más secos. No obstante, el efecto que tiene la variabilidad y el cambio climático en la intensidad, frecuencia y distribución de las distintas variables climáticas, ha provocado cambios en los patrones de manejo de cultivo y en los rendimientos promedio de biomasa fresca y sacarosa.

## 2.2. Fenómenos climáticos

A continuación se presenta una descripción general de los fenómenos de variabilidad climática (inter-anual e intra-anual) y cambio climático, junto con los impactos que estos tienen sobre Colombia.

### 2.2.1. La Variabilidad climática

Según Pabón (2000; 2011), la variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones alrededor de una condición predominante (normal climática) observadas durante periodos de tiempo relativamente cortos. Ésta incluye los extremos y las diferencias de los valores mensuales, estacionales y anuales con respecto a los valores promedio (generalmente de series de 30 años de extensión) de la correspondiente variable (por ejemplo, temperatura del aire, precipitación). La variabilidad climática incluye las variaciones intraestacionales (variaciones de dos o tres meses), interanuales (de año en año) e interdecadales (a través de decenios).

En Colombia la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es la principal responsable de la variabilidad climática estacional. La ZCIT es la denominación que se da a un cinturón de baja presión que rodea al globo terrestre en la región ecuatorial formado por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes situadas al Norte y Sur del Ecuador. Esta convergencia de masas de aire húmedas, provoca una intensa actividad convectiva, generando abundante nubosidad, lluvias y tormentas sobre las zonas por donde pasa (IDEAM, 2002 citado por Rojas E. 2011; IDEAM, 2005).

El fenómeno ENSO (El Niño-Niña Southern Oscillation) es uno de los fenómenos de variabilidad climática inter-anual conocido hasta ahora que tiene gran influencia e impacto en la climatología de algunas regiones colombianas. Sin embargo, ENSO es sólo uno de tantos fenómenos océano-atmosféricos que producen variabilidad. El ENSO es un patrón climático cuasi periódico que ocurre en la zona ecuatorial del Océano Pacífico, con una escala temporal de 2 a 7 años, los eventos Niño/Niña se reconocen de modo general por alteraciones en la temperatura media superficial del Pacífico Ecuatorial (Pabón D. 2011, Pabón D. 2000).

Este fenómeno es importante en la climatológica colombiana, ya que afecta los valores de precipitación, temperatura del aire, niveles de radiación, entre otros, ya sea con aumentos ó reducciones respecto de la media climática. Según IDEAM (2005), efectos del fenómeno ENSO - fase Niño, se han identificado sobre las variables temperatura del aire, precipitación y caudales. Se han hecho evidentes ligeros incrementos en la temperatura del aire (entre 0.2 y 0.5 °C) en la mayor parte del país. Estas anomalías superan el medio grado Celsius en la región Pacífica, el nororiente de la región Caribe y buena parte de la región Andina, particularmente en los valles interandinos y en los Santanderes. También se ha podido





determinar que durante su ocurrencia se presenta una tendencia significativa a la disminución de la temperatura del aire en horas de la madrugada, con lo cual se propicia el desarrollo del fenómeno de heladas en los altiplanos. En términos generales, se ha podido identificar que cuando se presenta el fenómeno del niño hay déficit moderado de precipitación (entre el 20 y el 40% en los volúmenes mensuales) en la mayor parte de la región Andina, entre ellos Cundinamarca, Valle de Cauca y Tolima y en la región Caribe, aunque la zona del Norte de Córdoba presenta condiciones severas (superiores al 40%).

Bajo condiciones del ENSO, fase Niña, se ha hecho evidente en Colombia el descenso de la temperatura del aire durante las horas del día en la región Pacífica, en gran parte de la región Andina y Caribe. Aumentos en la temperatura del aire solo se han observado en sectores aislados del Piedemonte Llanero. En relación con alteraciones en el patrón pluviométrico del país a causa de esta fase del fenómeno, es importante mencionar los excedentes de precipitación, entre 20 y 40% de los valores normales, que se registran en forma muy localizada en áreas de la región Andina y Caribe. Aunque a nivel muy local, en Cundinamarca, Tolima y Valle del Cauca, se han presentado excedentes severos (mayores del 40%) (Montealegre J. 2009; Montealegre J. 2007).

La variabilidad climática puede afectar el rendimiento de los cultivos cuando se presentan eventos anómalos, esto es, temperaturas extremas que conlleven por ejemplo a sequías y excesos de humedad. Estas anomalías pueden tener mayor incidencia si sobrepasan el umbral de tolerancia que puede tener el cultivo en alguna fase fenológica específica, conduciéndolo a la reducción del rendimiento o a su muerte total.

### **2.2.2. El Cambio climático**

En la actualidad existe una cierta preocupación por el hecho de que el clima pueda estar cambiando a un ritmo excesivamente rápido en comparación con sus fluctuaciones naturales. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 1996), el incremento de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera, de continuar a los ritmos actuales de emisión, darán lugar en las próximas décadas a un cambio climático global que se reflejará en distintos fenómenos que alterarán especialmente la temperatura y los regímenes de precipitaciones de nuestro planeta Tierra.

#### **Escenarios de Cambio Climático**

Para analizar los diferentes impactos del Cambio Climático y debido a la alta incertidumbre respecto a las condiciones climáticas futuras, el IPCC aconseja trabajar con “escenarios”, los cuales son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro.

Estos escenarios del “posible clima futuro”, son derivados de escenarios de las posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas. Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de supuestos sobre las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero y otros agentes contaminantes, es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones.

En el 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés). Estos nuevos escenarios examinan el período de 1990 al 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos como la población mundial y el producto interno bruto. Los escenarios SRES se han utilizado como base de las proyecciones climáticas de modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) y modelos acoplados. Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas, de cambio tecnológico y están constituidos por cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2 (IPCC, 2000).

- A1: Un mundo con un crecimiento económico muy rápido; población global que alcanza su punto máximo a mediados de siglo y disminuye a partir de entonces. Se presenta una introducción rápida de tecnologías nuevas y más eficientes.
- A2: Un mundo muy heterogéneo con aumento continuo de la población global; con crecimiento económico regionalmente orientado y más fragmentado y más lento que en otros escenarios.
- B1: Un mundo convergente con la misma población global que en A1 pero con cambios rápidos de estructuras económicas hacia una economía de la información y los servicios, con reducciones de intensidad material, y la introducción de tecnologías limpias y eficientes de recursos.
- B2: Un mundo en el cual el énfasis está sobre soluciones locales para la sostenibilidad económica, social, y ambiental, con la población continuamente creciente (menor que en A2) y con un desarrollo económico intermedio.

## **Cambio Climático y sus posibles impactos en Colombia**

El cambio climático representa una seria amenaza para la sociedad colombiana por sus múltiples impactos previstos sobre la población y los sectores productivos. Especialmente el sector agropecuario, debido a que la agricultura es vulnerable al cambio climático, ya que las temperaturas más altas tienen impacto sobre los rendimientos de los cultivos. Los cambios en los patrones de las precipitaciones a corto plazo representarían pérdidas de cosechas, y en el largo plazo, una disminución en la producción. No obstante, es muy probable que el cambio climático también genere ciertos beneficios en algunos cultivos y regiones específicas del mundo.





El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en cumplimiento de las funciones de informar al Estado y a la comunidad colombiana acerca del ambiente, particularmente sobre el clima, ha venido desarrollando una investigación para detectar las evidencias del cambio climático en Colombia y para elaborar escenarios climáticos que con mayor probabilidad se presentarían en los próximos decenios. En la actualidad, el IDEAM, basado en estudios propios y en el estado del tema en el país, dispone de conocimiento suficientemente sustentado sobre el cambio climático en Colombia (Ruiz J, 2010).

IDEAM ha proyectado tendencias del clima para Colombia bajo los escenarios del IPCC utilizando modelos meteorológicos globales y regionales de alta resolución: modelo global GSM (Global Spectral Model) del MRI (Meteorological Research Institute) del Japón y los modelos regionales PRECIS (Providing Regional Climates for impact Studies) del Reino Unido y WRF (Weather Research and Forecast) de los Estados Unidos, con base en condiciones iniciales de modelos de baja resolución (CCM3, ECHAM4, HadCM3Q, HadAM3P y CCSM) ofrecidos por centros internacionales como el MRI del Japón, el Centro Hadley del Reino Unido y el Community Climate System Model (CCSM) de los Estados Unidos (Ruiz J, 2010).

Estudios desarrollados por IDEAM (Ruiz J, 2010), reportan que se detectó para Colombia un aumento de la temperatura media del orden de  $0.13^{\circ}\text{C} \cdot \text{década}^{-1}$  para 1971-2000 y el ensamble de los escenarios de cambio climático proyecta que la temperatura promedio del aire en el país aumentará con respecto al período de referencia 1971-2000 en  $1.4^{\circ}\text{C}$  para el 2011-2040,  $2.4^{\circ}\text{C}$  para 2041-2070 y  $3.2^{\circ}\text{C}$  para el 2071-2100. Esto causaría disminuciones en los volúmenes de precipitación en amplias zonas de las regiones Caribe y Andina.

El calentamiento de la atmósfera también contribuirá al aumento de la evaporación y de la evapotranspiración con lo que se afecta el ciclo hidrológico, reduciendo así la escorrentía. La reducción de la precipitación en las regiones Andina y Caribe incidirá directamente en la reducción de los caudales y la disminución de los mismos traerá efectos en la calidad del recurso. Con lo anterior, las regiones Caribe y Andina pueden ser objeto de los siguientes impactos: “Desabastecimiento de agua para consumo humano y las actividades que desarrolla la población. Desmejoramiento del saneamiento básico con implicaciones en la salud humana. Incremento de los costos de la provisión de agua y conflictos entre la población y las entidades encargadas de la gestión de los recursos y de la provisión de agua potable” (Pabón, 2010 citado por Ruiz J, 2010). También es posible que se presenten incrementos hacia la Región Pacífica (Ruiz J, 2010).

### 2.3. Descripción del modelo AquaCrop

AquaCrop es un modelo de desarrollo de follaje enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible. El modelo simula los rendimientos posibles de cultivos herbáceos en función

del consumo de agua. El modelo se centra en el agua, al ser éste uno de los principales determinantes de la producción agrícola y debido a que el crecimiento de la población y la creciente industrialización alrededor del mundo están demandando una cantidad cada vez mayor de agua, convirtiendo a este recurso finito cada vez más en un factor limitante de la producción agrícola.

Además de simular satisfactoriamente el rendimiento agrícola, AquaCrop es un modelo que utilizando un conjunto pequeño de parámetros y principios, logra describir de forma simple y directa los procesos que determinan la producción agrícola del cultivo y de esta manera hace más fácil el manejo del mismo por parte de un público bastante amplio.

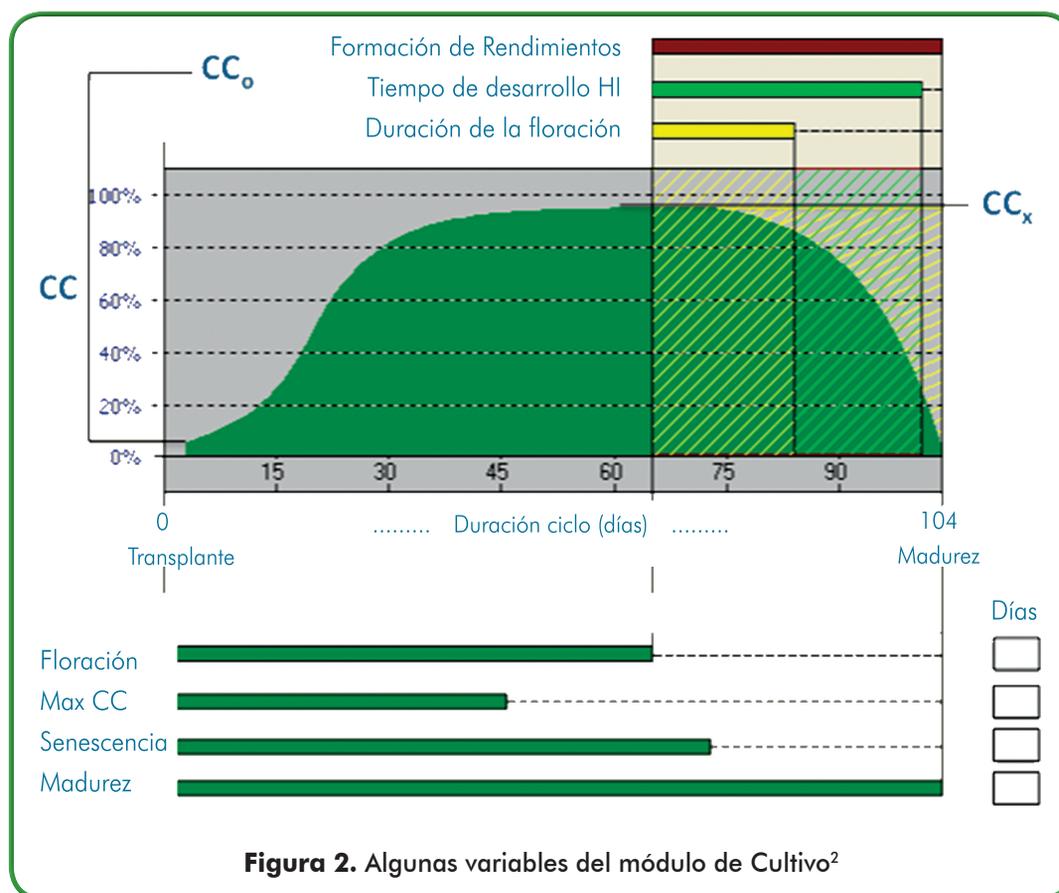
En la figura 1 se presenta la interfaz principal de AquaCrop, donde se observan los módulos disponibles para realizar los ejercicios de simulación. En la parte superior, en el encabezado "Environment and Crop" (paso 1), se encuentran cuatro módulos que componen el modelo: Clima, Cultivo, Prácticas de Manejo y Suelo (los cuales serán descritos en la próxima sección). Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros (ventana del lado derecho paso 2 y 3). A continuación se describen someramente algunos de estos parámetros, los cuales serán objeto de discusión en posteriores secciones. En paréntesis después del nombre del parámetro se encuentra el módulo al cual pertenece cada parámetro en el modelo.



Figura 1. Interfaz del modelo AquaCrop



- Fecha de siembra (Cultivo): este parámetro permite especificar el día del año en el cual se siembra el cultivo.
- Cobertura de dosel inicial,  $CC_0$  (Cultivo): este parámetro se requiere para describir la expansión del dosel en los primeros días de sembrado y se obtiene como el producto de la densidad de la planta (número de plantas por hectárea) y del tamaño del dosel a la siembra. En AquaCrop, dado este último, el usuario especifica bien sea la densidad de la planta o la cobertura del dosel inicial, mientras que el programa determina el valor del otro parámetro automáticamente.
- Cobertura del dosel máxima,  $CC_x$  (Cultivo): este parámetro describe el porcentaje máximo de cobertura del dosel bajo condiciones óptimas.
- Días a dosel máximo, Max CC (Cultivo): este parámetro especifica cuantos días se demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del dosel.
- Duración ciclo (Cultivo): Este parámetro permite especificar cual es la duración del ciclo de desarrollo del cultivo.



**Figura 2.** Algunas variables del módulo de Cultivo<sup>2</sup>

[2] Elaborado por el autor con base en las ventanas del software AquaCrop.

- Índice de Cosecha (Cultivo): este parámetro establece una relación entre la biomasa y el rendimiento del cultivo<sup>3</sup>. El usuario proporciona el índice de cosecha (HI) de referencia pero el valor que realmente tome el HI puede variar, pues el estrés por agua puede alterar el HI, bien sea negativa o positivamente, dependiendo del tiempo, la severidad y duración del estrés.
- Riegos (Prácticas de Manejo): AquaCrop tiene un submódulo de riego que permite especificar las características del método de riego utilizado en el cultivo. Dentro de las opciones disponibles se puede especificar la no existencia de un método de riego manual (el agua en la zona de raíces proviene entonces de la lluvia), se le puede proporcionar al módulo un cronograma de riego específico (especificando la cantidad de riego por día) o se puede programar automáticamente el riego especificando una condición límite (por ejemplo aplicar una lámina de riego determinada cada vez que la lámina de agua rápidamente aprovechable se agote en un porcentaje dado).
- Fertilidad (Prácticas de Manejo): el porcentaje de fertilidad viene dado por la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos. Este parámetro puede ser calibrado analizando la razón entre una parcela del cultivo bajo las condiciones normales de producción y otra con las condiciones óptimas (Raes & et Al, AquaCrop User's Guide, 2011).

AquaCrop ha sido previamente calibrado para algunos cultivos (ver tabla 1) en determinados lugares del mundo y el usuario puede seleccionar y hacer uso de alguna de estas calibraciones.

**Tabla 1. Cultivos calibrados previamente para AquaCrop**

Cultivo	Lugar
Algodón	Córdoba, España
Maíz	Davis, USA
Papa	Líma, Perú
Quinoa	Bolivia
Tomate	Córdoba, España
Trigo	Valenzano, Italia
Girasol	Córdoba, España
Cebada	Tigray, Etiopía
Sorgo	Texas, USA
Remolacha azucarera	Foggia, Italia
Soya	Patancheru, India

[3]  $Y = HI * B$ , donde  $Y$  es rendimiento,  $B$  es biomasa y  $HI$  es el índice de cosecha.





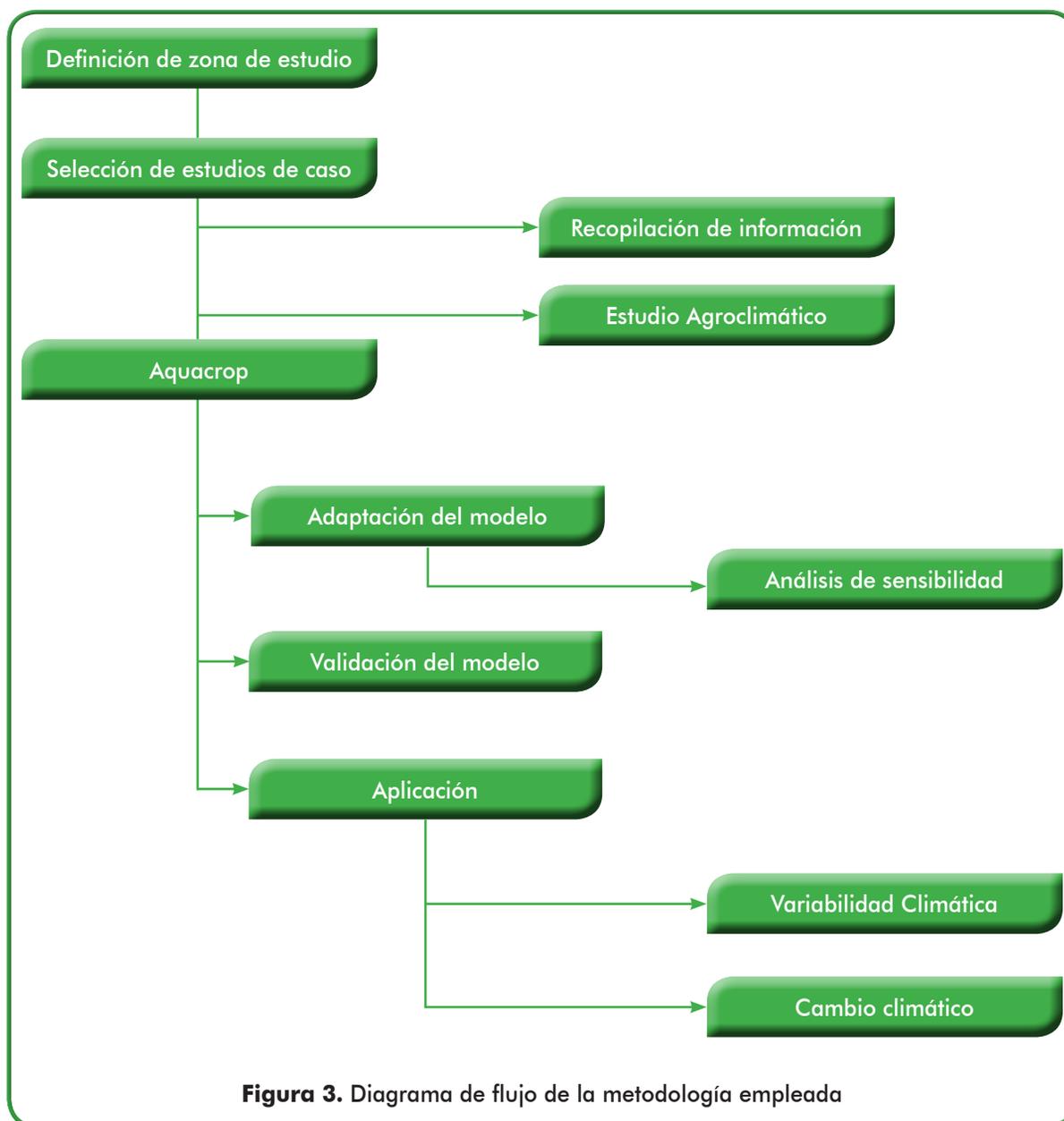
Una vez se han determinado los diferentes parámetros de los módulos puede obtenerse la producción de biomasa seca y el rendimiento cosechable en peso seco. Esta etapa de la simulación se logra por medio del módulo Simulation, a través de la opción RUN.

En esta sección sólo se proporciona una descripción breve de AquaCrop, enfatizando aquellos elementos de mayor uso para la adaptación del modelo. Para mayor comprensión de la parte teórica y de manejo, se recomienda visitar la página de la FAO, <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En la figura 3 se presenta un esquema general de la metodología utilizada en la adaptación del modelo AquaCrop para el cultivo de caña de azúcar en Colombia. Se seleccionaron tres estudios de caso, específicamente en los municipios de Florida, Guacarí y Zarzal en el departamento del Valle del Cauca. La selección de estas áreas de estudio obedeció a la disponibilidad de la siguiente información:

- Disponibilidad de series meteorológicas
- Disponibilidad de información de experimentos desarrollados por centros de investigación, gremios, federaciones, universidades, entre otros; de las principales variables de cultivo e información de rendimientos por ciclo investigado.
- Disponibilidad de información de suelos, principalmente enfocadas a variables hidrofísicas en varios horizontes.
- Disponibilidad de información de láminas, fechas de aplicación y tiempos de riego durante el ciclo de cultivo.
- Disponibilidad de Información histórica de rendimientos de cultivo.

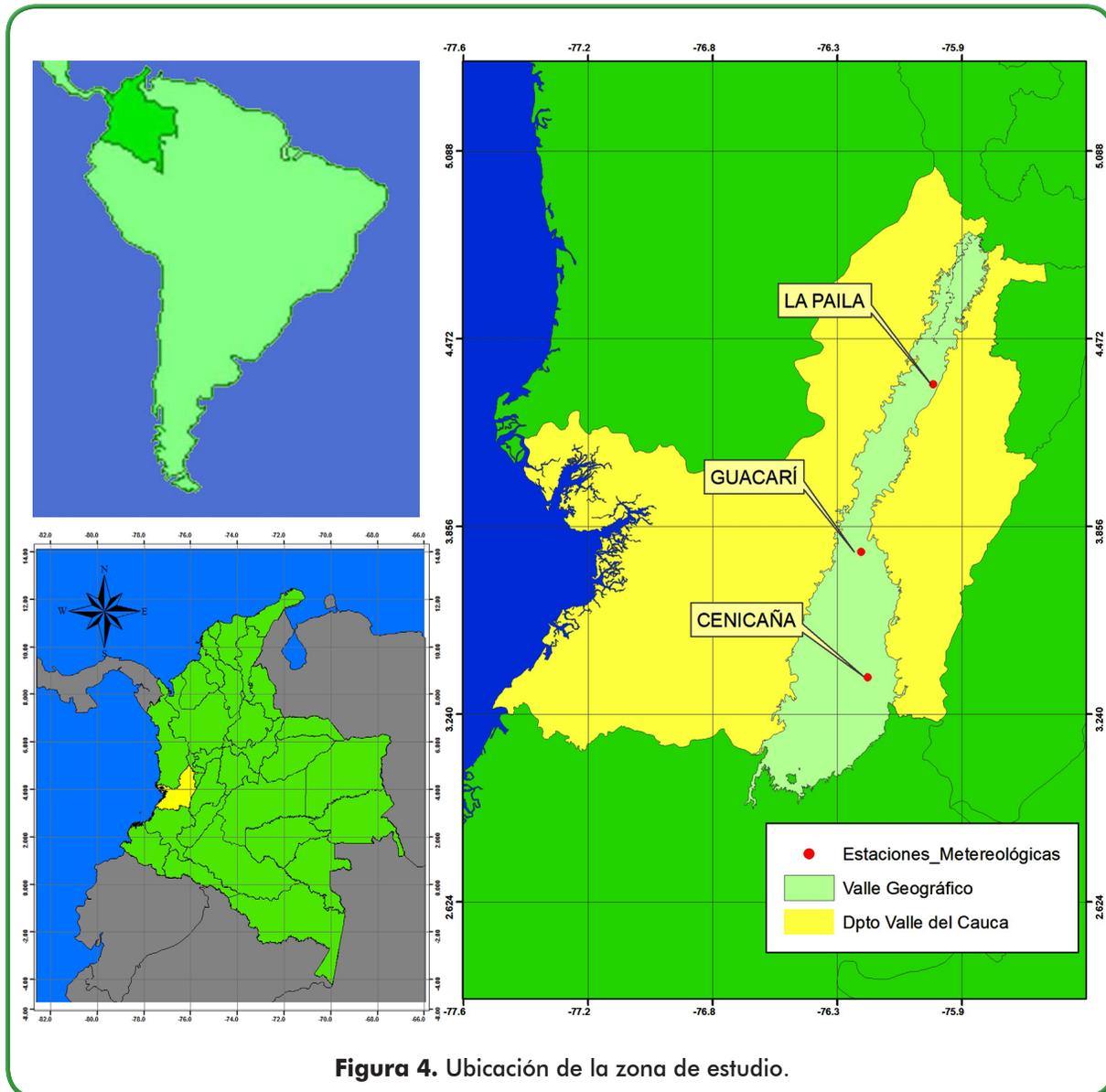


### 3.1. Información climática de la zona de estudio

La caracterización climática se realiza en estaciones meteorológicas cercanas a las zonas seleccionadas donde se tiene la información de cultivo necesario para realizar la adaptación del modelo de AquaCrop. En la tabla 2 se referencian las zonas de estudio, las estaciones climatológicas utilizadas y el material evaluado, y la ubicación espacial de dichas estaciones en los distintos departamentos se observa en la figura 4. El análisis agroclimatológico se hizo para el periodo comprendido entre 1994-2010.

**Tabla 2.** Zonas bajo estudio para el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del Río Cauca

Departamento	Municipio	Nombre estación	Altitud	Cod est	Coordenadas geográficas		Material
					Latitud	Longitud	
	Florida	Cenicaña	1020	CEN	3° 21'36,38"	76°18'01,40"	
Valle del Cauca	Guacarí	Guacarí	1020	GUA	3°46'22,38"	76°19'21,95"	CC 85-92
	Zarzal	La Paila	930	PAI	4° 19'22,82"	76° 05'04,35"	



**Figura 4.** Ubicación de la zona de estudio.



## 3.2. Descripción de módulos y parámetros a implementar

Dentro del modelo AquaCrop se tiene una serie de módulos que permiten ingresar las variables externas, las variables de estado y los parámetros No Conservativos (Propios de cada región). A continuación se describen de manera general los requerimientos que se tuvieron en cuenta en el proceso de evaluación del modelo.

- **Módulo de Clima**

Se utilizaron registros diarios de las variables de las estaciones de la red meteorológica de CENICAÑA; precipitación, temperatura máxima y mínima, y evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>); la concentración de CO<sub>2</sub> asignada por defecto del modelo AquaCrop; y los resultados de las proyecciones de cambio climático simuladas con el modelo PRECIS usado por IDEAM con los registros de una de las estaciones de CENICAÑA.

La ET<sub>o</sub> expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específica, y no considera las características del cultivo, y los factores del suelo; este fenómeno resulta de la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen, Luis S., Raes, & Smith, 2006). Los únicos factores que afectan la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) son parámetros climáticos. Por lo tanto la ET<sub>o</sub>, también es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de los datos meteorológicos (Allen R. , Pereira, Raes, & Smith, 2006). AquaCrop no calcula la evapotranspiración de manera directa; para ello en este estudio se utilizó el software de circulación gratuita ET<sub>o</sub> Calculator, desarrollado por la FAO, el cual es un módulo complementario del software AquaCrop y utiliza el método FAO Penman-Monteith para obtener la evapotranspiración de referencia como función de variables climáticas y de la localización geográfica.

- **Módulo de cultivo**

El ajuste del modelo AquaCrop se trabajó con la variedad CC 85-92 y sólo se modificaron los parámetros No Conservativos, es decir aquellos que son característicos de la región en estudio, tales como la fenología, tipo de suelo, prácticas culturales entre otros. Las salidas generadas por el modelo se contrastaron con evaluaciones estadísticas de seguimiento del follaje (Canopy Cover) y con rendimientos históricos de biomasa fresca para distintos ciclos de cultivo suministrados por CENICAÑA. Con base en los experimentos de seguimiento de follaje se determinaron parámetros No Conservativos que describen de buena manera las condiciones de la variedad evaluada para el valle geográfico del Río Cauca, ver Anexo 1.

Los experimentos en mención se realizaron a comienzos de 2012 en la granja experimental de CENICAÑA. Ahí se realizó un seguimiento del desarrollo de la cobertura de follaje o canopy cover del cultivo de caña de azúcar en tres lotes, a saber: el lote 18, el lote 4 y el lote 14. En cada uno de ellos se realizaron distintas pruebas, descritas brevemente a continuación:

- En el lote 18 se inició el monitoreo de la influencia del grado de compactación del suelo en el desarrollo de la cobertura de follaje.
- En el lote 4 se inició el monitoreo de la cobertura de follaje de la variedad CC 93 44-18 respecto a la variedad CC 85-92.
- En el lote 14 se tiene una parcela de control de monitoreo del desarrollo del follaje con cinco repeticiones de la variedad CC 85-92.

A la fecha de elaboración de este documento se continúan tomando registros de cobertura de follaje y los análisis aquí expuestos se realizaron con los datos de los primeros 230 días de monitoreo.

Si bien tan solo la información del lote 14 se utilizó para calibrar los parámetros del modelo, los experimentos en los otros dos lotes proporcionan información valiosa respecto al comportamiento de la cobertura de follaje bajo diferentes condiciones.

- **Módulo suelo**

Este módulo requiere parámetros físicos como textura del suelo, Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo, Punto de Saturación y Conductividad Hidráulica Saturada. Esta información se refirió a perfiles de calicatas realizadas en el lote 18 de experimentación en inmediaciones de la estación experimental de CENICAÑA. Y para el caso de los municipios de Guacarí y Zarzal se empleó información de calicatas descritas por IGAC (2004).

- **Módulo de manejo de cultivo**

- ▶ **Riegos**

Al momento de esta publicación no fue posible contar con la información detallada de los volúmenes de riego ni de las frecuencias de aplicación para los ciclos históricos evaluados en el modelo. Sin embargo CENICAÑA ha estimado que la lámina estándar de aplicación en un cultivo de caña de azúcar es de 70 milímetros cada vez que la lámina de agua rápidamente aprovechable (RAW, por sus siglas en inglés) se agota un 60%. En ese orden de ideas, el módulo de riego en el modelo AquaCrop fue preparado para cumplir con ese estándar, es decir que el modelo ajusta automáticamente el riego cada vez que la RAW se agota a un 60%.





► **Prácticas agrícolas**

El modelo AquaCrop asume porcentajes de fertilidad del cultivo fijos durante todo el ciclo, el cual es una relación entre la biomasa observada y la potencial. De tal forma, se estimó un rango de fertilidad del cultivo en el modelo, el cual fue validado estadísticamente de acuerdo con los mejores resultados de una prueba de bondad de ajuste.

Para determinar el porcentaje de fertilidad que permitía el mejor ajuste del modelo AquaCrop versión 4.0 a las condiciones ambientales del valle geográfico del Río Cauca, se procedió a realizar una serie de simulaciones procurando mantener homogeneidad en los datos de entrada, esto es: distancia a la estación meteorológica no mayor a 1 km, duración del ciclo vegetativo entre 11 y 13 meses. Adicionalmente, que el cultivo no exceda 5 socas y que cada cosecha cuente con un registro de producción de tallos frescos.

### **3.3. Adaptación del modelo de AquaCrop**

El proceso de creación del módulo para el cultivo de la caña de azúcar se realizó con apoyo de expertos desarrolladores del modelo de AquaCrop, con apoyo del conocimiento de expertos de CENICAÑA y por los consultores del TCP, con base en la información recopilada; pues la versión 3.1 plus de AquaCrop, última versión existente para aquella época, no contaba con este módulo. La FAO viene evaluando y desarrollando investigaciones para el diseño de un módulo de cultivo para la caña de azúcar; y de manera preliminar en la versión 4 de AquaCrop se incluyó un módulo de prueba con algunos elementos de esta investigación.

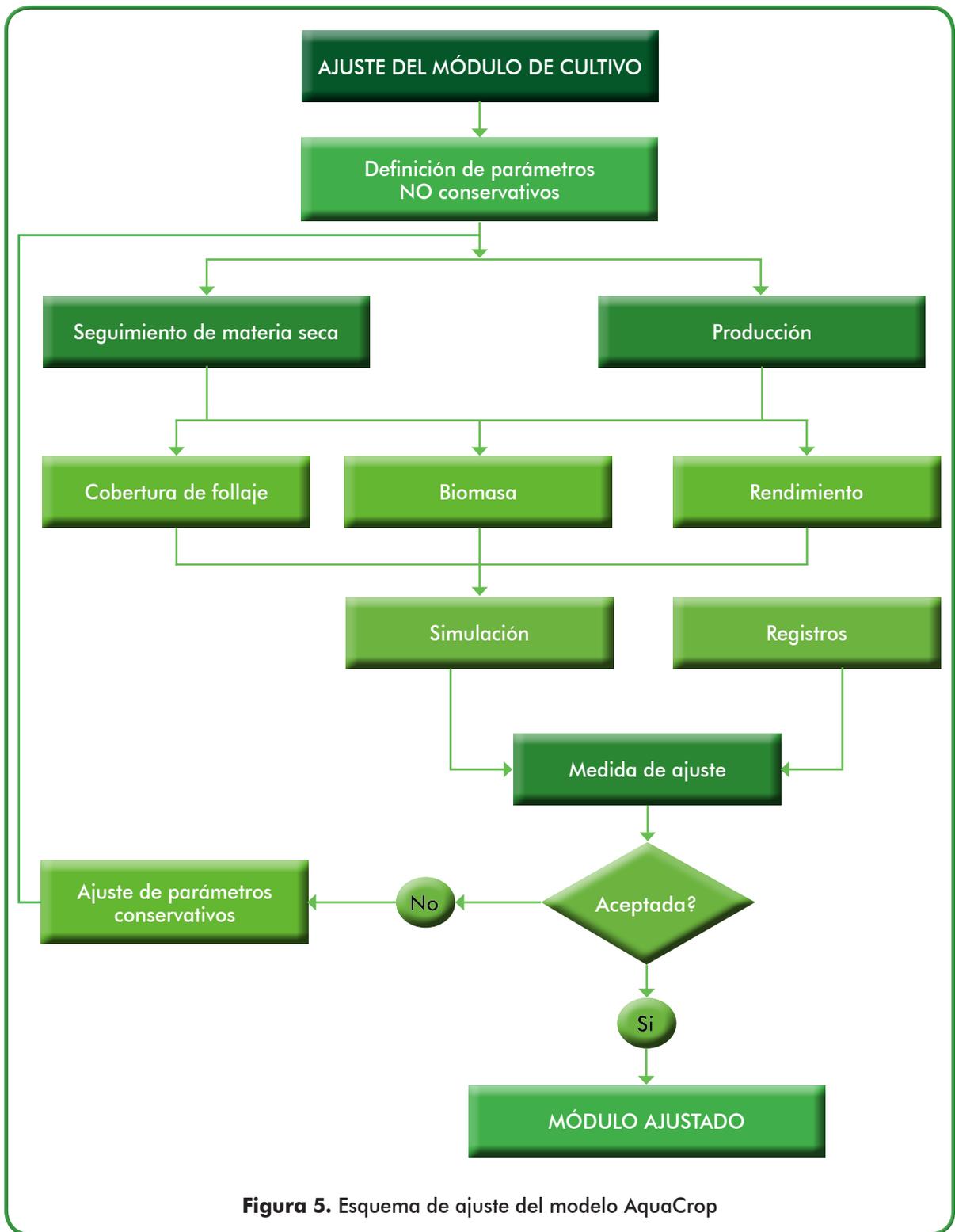
De acuerdo a lo anterior, se realiza la adaptación del modelo AquaCrop versión 4.0, con información suministrada por CENICAÑA. El material seleccionado para la adaptación corresponde a la variedad CC-8592, la cual a diciembre de 2010 se encontraba sembrada en 161,550 hectáreas que equivalen al 74 % del total del área sembrada en caña de azúcar en Colombia (Cenicaña, 2010 a). La información meteorológica corresponde a la estación CENICAÑA de la estación experimental ubicada en el municipio de Florida en el departamento del Valle del Cauca. Los ciclos evaluados para este municipio se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Zona y fecha de la adaptación del modelo AquaCrop para los materiales de caña de azúcar en estudio.

Lugar del experimento		Tipo de material: CC 85-92
Departamento	Municipio	Ciclos evaluados
Valle del Cauca	Florida	13 Jun. 1996_15 May. 1997
		15 Apr. 2001_09 May. 2002
		27 Jul. 2001_21 Jun. 2002
		16 Mar. 2003_03 Mar. 2004
		30 Mar. 2006_20 Abr. 2007
		22 Ene. 2008_19 Feb. 2009
		28 Ene. 2008_18 Feb. 2009
		09 Feb. 2001_10 Ene. 2002
		04 Sep. 2001_09 Ago. 2002
		08 Nov. 2003_30 Nov. 2004
		27 Sep. 2006_05 Oct. 2007
		08 Nov. 2003_24 Nov. 2004
		21 Sep. 2003_07 Sep. 2004
		28 Ago. 2006_18 Ago. 2007
		28 Ago. 2006_17 Sep. 2007
		21 Ago. 2007_24 Ago. 2008
		23 Abr. 2007_19 May. 2008
		08 May. 2007_20 May. 2008
08 May. 1997_15 Abr. 1998		
19 Abr. 1997_15 May. 1998		
12 May. 2009_24 May. 2010		

Una descripción general del proceso de ajuste del módulo de cultivo, se puede encontrar en la figura 5. El esquema de trabajo tiene como punto de partida la definición de los parámetros No Conservativos, los cuales son asignados de acuerdo a la disponibilidad de información de seguimiento agronómico en las distintas etapas del cultivo, de acuerdo a los registros de rendimientos históricos ya sea en biomasa o producto cosechado, o utilizando información secundaria.





Una vez se cuenta con estos parámetros, puede observarse el comportamiento de diferentes procesos o variables determinantes que caracterizan el proceso evolutivo del cultivo o su resultado final (cobertura de follaje, biomasa, rendimiento). Estos juegan un papel determinante en el proceso posterior a la simulación, pues son el criterio que permite aceptar o no el ajuste, de acuerdo a la comparación de los valores simulados con los resultados obtenidos en campo. Si el ajuste obtenido no es el adecuado se procede a modificar técnicamente algunos parámetros conservativos que no han sido evaluados en campo y se vuelve a iniciar el proceso descrito.

En el caso de la caña de azúcar la variable que se utilizó para determinar la bondad del ajuste fue el rendimiento de los tallos secos, variando principalmente el parámetro no conservativo; potencial de fertilidad, pues en los análisis de sensibilidad se encontró que el ajuste era bastante sensible al mismo.

Dado que las salidas del modelo AquaCrop se estiman en términos de biomasa seca, es decir, tallos secos y para el caso de la caña de azúcar los registros históricos están en términos de tallos frescos (sin biomasa aérea), se realizó una conversión de biomasa seca a biomasa fresca, tal y como se expresa a continuación:

$$\text{TALLOS FRESCOS} = \frac{\text{TALLOS SECOS}}{0.3} * 0.6$$

Donde:

El factor 0.3 representa la fracción de materia seca y el factor 0.6 representa la fracción de tallos sin hojarasca.

Esta expresión empírica ha sido corroborada ampliamente por los cultivadores de caña de azúcar en el valle geográfico del Río Cauca y con ella se homologaron las salidas del modelo para poder ser comparadas con los registros históricos desde 1994.

Una vez se llegó a un ajuste satisfactorio, se procedió a realizar el análisis de sensibilidad, el cual permitió comprender cuál era el comportamiento de los rendimientos ante alteraciones de algunos de sus parámetros. Toda la información empleada se encuentra resumida en la tabla 4, presentada de acuerdo al módulo de AquaCrop al cual pertenece.



**Tabla 4.** Información requerida para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop

Módulos de Aquacrop				
Cultivo	Clima	Suelo	Prácticas de manejo	
			Riego	Campo
Emergencia, Cobertura de dosel inicial (o densidad de siembra), Cobertura Máxima de dosel, Inicio y duración de floración, Senescencia, Madurez fisiológica del grano, Índice de Cosecha (HI), Fecha de Siembra, Método de Siembra, Temperatura críticas (Base y Máxima), Profundidad inicial y máxima de raíces, Días a máxima profundidad de raíces, Productividad de Agua (WP*).	Precipitación, Temperaturas Máxima y Mínima, Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET <sub>o</sub> ), Concentraciones de CO <sub>2</sub> .	Textura, Número de Horizontes, Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de campo, Punto de Saturación, Conductividad Hidráulica Saturada, Curva Número (CN), Lámina rápidamente evaporable (REW), Profundidad de capa restrictiva, Profundidad de nivel freático.	Método de irrigación, Lámina Neta de Riego, Lámina Bruta de Riego, Fechas de aplicación de Riego, Eficiencia de la aplicación de Riego.	Grado de fertilidad del suelo respecto al cultivo, Presencia de acolchados o residuos de cosecha, Capa de agua permanente sobre el suelo

### 3.4. Análisis de sensibilidad

Para entender la susceptibilidad del modelo a los cambios en las características medioambientales y cómo esa susceptibilidad puede afectar las salidas en biomasa y/o rendimientos, con base en el ajuste llevado a cabo previamente, se seleccionaron algunas de las principales entradas del modelo, dentro del grupo de simulaciones empleadas para el ajuste, las cuales fueron modificadas dentro de un rango específico para observar cómo se veían alterados los rendimientos del cultivo. El análisis de sensibilidad se llevó a cabo sobre las siguientes entradas:

- Nivel freático
- Nivel de fertilidad del suelo
- Nivel de profundidad de capas compactas
- Diferentes texturas del suelo

### 3.5. Validación de AquaCrop

Como primer ejercicio de validación del modelo AquaCrop, versión 4.0, se seleccionaron dos lugares en la región del valle geográfico del Río Cauca: el municipio de Guacarí, ubicado en una región semiseca del valle geográfico, y el municipio de Zarzal, un poco más húmedo que el anterior, (ver tabla 2 y figura 4).

Con el ajuste inicial, se mantuvieron sin modificación aquellos parámetros no conservativos que fueron estimados en el ajuste de la estación CENICAÑA (Canopy Cover máximo, Canopy Cover inicial, días a emergencia, días a máximo Canopy Cover, días a senescencia) y aquellos que fueron determinados a partir de información secundaria (profundidad de raíces, temperatura base y máxima, índice de cosecha y factores de conversión de tallos secos a tallos frescos). Se cambiaron los parámetros concernientes a clima, suelo y manejo agrícola y se corroboró que el modelo arrojara valores de rendimientos acordes con los observados. Se utilizaron los mismos criterios de homogeneidad descritos anteriormente: distancia a la estación meteorológica no mayor a 1 km, duración del ciclo vegetativo entre 11 y 13 meses. Adicionalmente, que el cultivo no exceda 5 socas y que cada cosecha cuente con un registro de producción de tallos frescos.

La validación del modelo de AquaCrop para el cultivo de caña se realizó en las zonas, y fechas, indicadas en la tabla 5 para la variedad CC-85-92. Este proceso consistió en realizar simulaciones utilizando el módulo del cultivo ajustado previamente en el municipio de Florida, cambiando el tiempo de la fenología (de acuerdo a condiciones reales de la zona), las condiciones de clima, suelo y manejo agronómico de cada zona en estudio. Se compararon las salidas del rendimiento de tallos frescos finales con las obtenidas en campo.



**Tabla 5.** Zona y fecha de la validación del modelo AquaCrop para los materiales de caña de azúcar en estudio

Lugar del experimento		Tipo de material: cc 85-92
Departamento	Municipio	Ciclos evaluados
Valle del Cauca	Guacarí	21 Jul. 2008 a 02 Ago. 2009
		06 Mar. 2006 a 10 Mar. 2007
		09 Mar. 2006 a 11 Mar. 2007
		15 May. 2006 a 15 May. 2007
		26 Ago. 2010 a 07 Sep. 2011
		22 Nov. 2009 a 07 Nov. 2009
		21 Jul. 2008 a 02 Ago. 2008
		22 Ago. 2009 a 23 Ago. 2010
		16 Ene. 2008 a 04 Feb. 2009
		14 Ene. 2008 a 04 Feb. 2009
		15 Dic. 2008 a 18 Dic. 2009
		20 Oct. 2008 a 18 Nov. 2009
		04 Jul. 2009 a 29 Jul. 2010
		02 Jul. 2009 a 30 Jul. 2010
	04 Jul. 2009 a 24 Jun. 2010	
	26 Feb. 2010 a 17 Feb. 2011	
	Zarzal	28 Jul. 2008 a 13 Jul. 2009
		09 Mar. 2006 a 28 Feb. 2007
		25 Feb. 2006 a 28 Feb. 2007
		12 Feb. 2006 a 12 Feb. 2007
		06 Mar. 2006 a 28 Feb. 2007
		21 Feb. 2008 a 12 Mar. 2009
		04 Mar. 2008 a 24 Mar. 2009
		10 Ene. 2008 a 14 Ene. 2009
		30 Nov. 2003 a 13 Dic. 2004
		06 Ene. 2008 a 15 Dic. 2010
05 Sep. 2006 a 10 Sep. 2007		
20 Oct. 2008 a 13 Oct. 2009		

### 3.6. Aplicación de AquaCrop

Con el objetivo de analizar y continuar con el proceso de validación, se evaluó por medio de AquaCrop el comportamiento de los rendimientos de la caña de azúcar ante variaciones en los patrones climáticos; se procedió a aplicar el modelo AquaCrop ajustado previamente a dos fenómenos climáticos de vital importancia para el país: el fenómeno de la variabilidad climática (más específicamente el fenómeno ENSO) y el fenómeno del cambio climático.

### 3.6.1. Variabilidad Climática

El primer paso para evaluar el impacto del fenómeno del Niño sobre los rendimientos de la caña de azúcar fue la exploración de los registros históricos de rendimientos para conocer de qué manera la variabilidad climática posiblemente ha influenciado la producción de tallos frescos en cada uno de los lugares seleccionados. Para ello se homogeneizaron los registros históricos de acuerdo a los siguientes criterios: a cada grupo de registros por lugar o estación de influencia se le extraen aquellos datos de ciclos vegetativos entre 11 y 13 meses, número de socas no mayor a cinco y cercanía a cada estación meteorológica menor a 1 km. Con este grupo filtrado se procedió a clasificar y promediar la producción de tallos frescos cosechada durante los periodos coincidentes con eventos Niño, Niña y Neutros, agrupados según los índices ONI<sup>4</sup> reportados por la NOAA<sup>5</sup>.

Una vez se contó con un análisis histórico del impacto del fenómeno ENSO sobre la producción de caña de azúcar, se procedió a evaluar este mismo impacto pero haciendo uso del modelo AquaCrop. Para contar con un grupo más amplio de datos, para cada uno de los grupos se llevaron a cabo unas simulaciones genéricas (variando levemente algunos parámetros, de acuerdo a las características de cada zona).

### 3.6.2. Cambio Climático

Para este ejercicio se contó con las corridas realizadas por el IDEAM en los escenarios de cambio climático A2 y B2. El IDEAM realizó un ensamble multimodelo (IDEAM, 2° Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático, 2010), donde utilizaron tres modelos regionales: El modelo global de alta resolución GSM-MRI con resolución horizontal de 20 km \* 20 km, el modelo PRECIS con resolución horizontal de 25 km \* 25 km y el modelo CCSM-WRF con el cual se generaron resultados a 4 km \* 4 km para la región Andina. Las salidas de este modelo son las variables de precipitación media mensual, temperaturas máximas y mínimas media mensuales, desde el año 2010 hasta el 2100.

Para analizar el fenómeno del cambio climático se planteó un ejercicio de simulación utilizando la herramienta AquaCrop, con la intención de estudiar los efectos del cambio climático y la posible respuesta del cultivo de caña de azúcar. Para tal fin se plantearon dos escenarios: en el primero se mantuvo una oferta tecnológica óptima, es decir, una aplicación de 70 mm cada vez que la RAW se agota al 60% y un potencial de fertilidad de 100% (óptimo) y 20% de coberturas (mulches) para toda el área cultivada. El segundo ejercicio estimó los rendimientos sólo con las láminas de lluvia de cada uno de los periodos sin

---

[4] Oceanic Niño Index.

[5] National Oceanic and Atmospheric Administration of USA.





ninguna aplicación de riego. Para los dos ejercicios se usaron los parámetros evaluados para la variedad CC 85-92. El modelo AquaCrop se corrió para los escenarios A2 y B2 del IPCC y para los periodos 2021-2030 y 2041-2050. El escenario A2 contempla un patrón de emisiones mayores que el escenario B2 por lo que los efectos del cambio climático resultan ser más pronunciados.

Los resultados que se van a presentar corresponden a las salidas del modelo AquaCrop una vez se han incorporado los cambios en el clima que se prevén de acuerdo a los escenarios de cambio climático contemplados, por lo que deben considerarse tan solo como indicativos y no como proyecciones precisas de lo que va a suceder en el futuro. No debe olvidarse la alta incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas futuras.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis agroclimático

El análisis agroclimático presentado en esta sección se hizo con base en registros históricos de las estaciones La Paila, Cenicaña y Guacarí de la red meteorológica del Centro Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar – CENICAÑA -, entidad encargada de este tipo de monitoreo para el gremio azucarero del país.

El clima del valle del Río Cauca se caracteriza por un régimen bimodal de precipitación, consistente en la sucesión intercalada de dos temporadas de lluvias (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos temporadas secas (enero-febrero y julio-agosto), mientras que marzo, junio, septiembre y diciembre son considerados meses de transición (Cenicaña, 2010), tal como se puede observar en las figuras 6, 7 y 8.

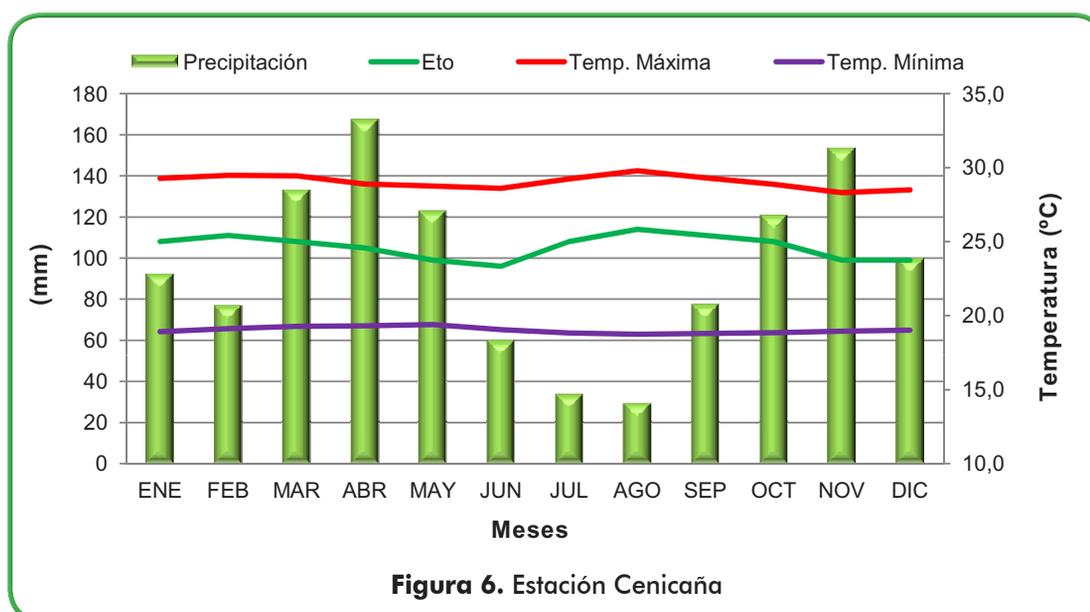


Figura 6. Estación Cenicaña

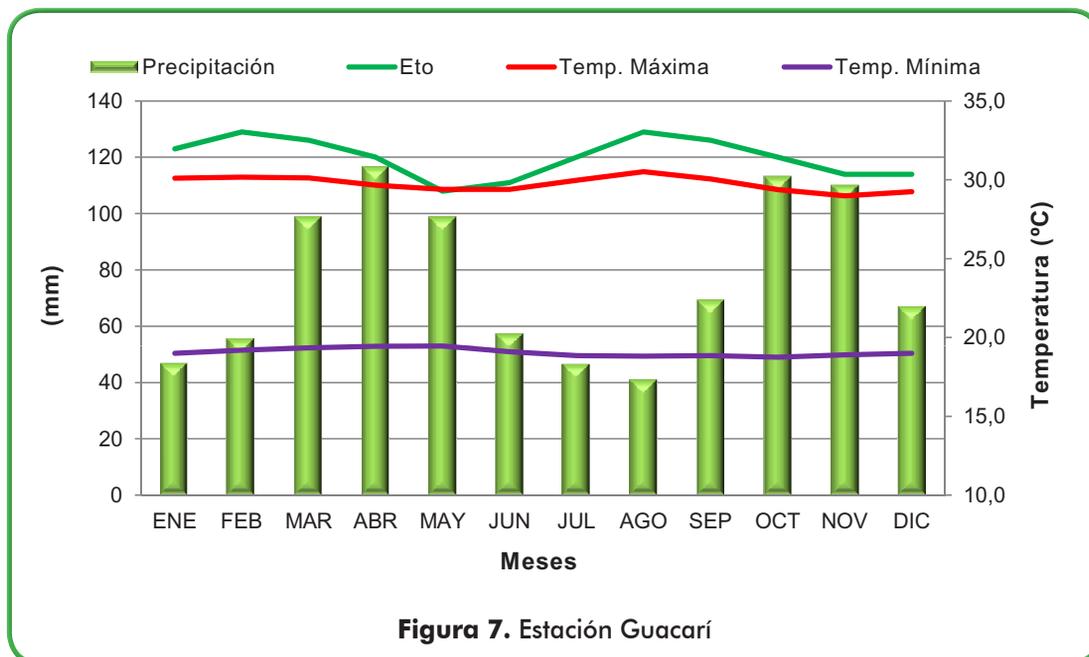


Figura 7. Estación Guacarí

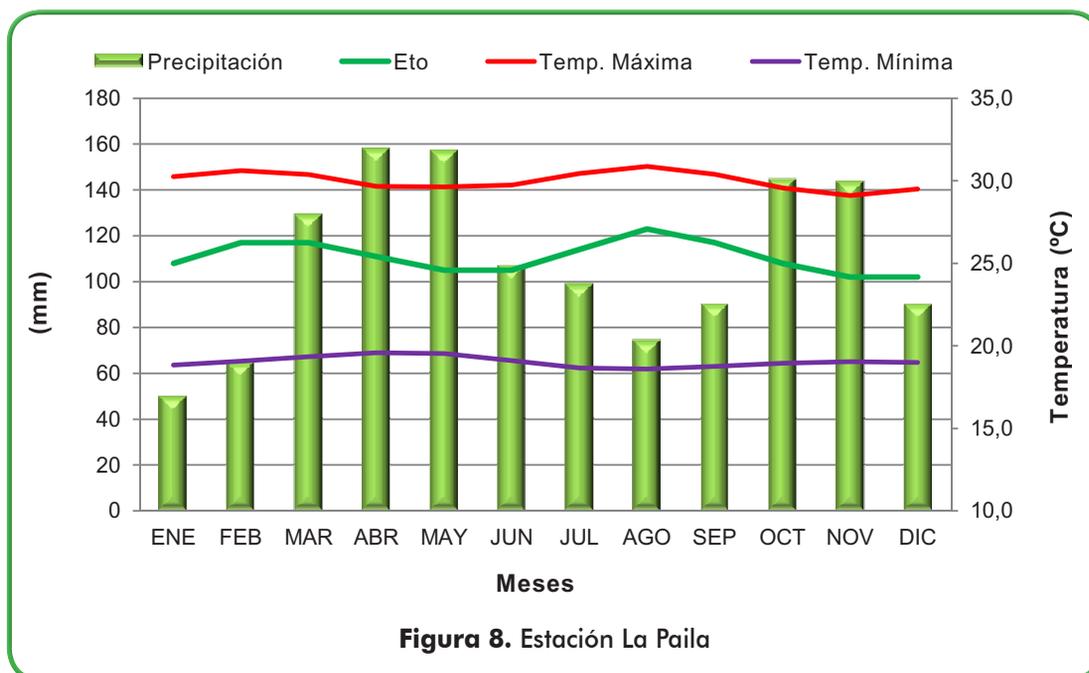


Figura 8. Estación La Paila

La alta temperatura es una de las principales características del valle geográfico del Río Cauca, cuya altitud oscila alrededor de los 1000 msnm, no obstante en esta misma región se pueden alcanzar temperaturas extremas (máximas y mínimas) que pueden llegar a determinar el rendimiento en una cosecha. Para todas las estaciones, se puede evidenciar que las temperaturas máximas y mínimas se alcanzan en los meses de enero-febrero y julio-agosto.

En la zona Sur, en la estación Cenicaña, se observa una temperatura media anual de 23 °C, una temperatura mínima media de 19 °C y una temperatura máxima media de 29 °C (ver figura 6); nótese que la diferencia entre las dos es de 10°C.

En la zona Centro del departamento (estación Guacarí) se observa temperatura media anual de 23.4 °C, la temperatura mínima media registrada es de 19.1°C y una temperatura máxima media absoluta de 29.7 °C (ver figura 7); el rango entre las dos se mantiene por debajo de los 11°C.

Más al norte del departamento del Valle del Cauca, en la estación La Paila, se ha registrado una media multianual de 23.3 °C, una mínima media de 19 °C y una temperatura máxima media de 30 °C (ver figura 8), siendo esta estación en donde se alcanza el rango más amplio entre la temperatura máxima y la mínima con 11°C.

En las figuras 6, 7 y 8 también se puede observar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para cada una de las estaciones. En el valle geográfico del Río Cauca se presentan altas tasas de ET<sub>o</sub> influenciadas por el número de horas-día de brillo solar y por las altas temperaturas que se presentan en la región.

En particular, para los tres sitios seleccionados para este estudio se tiene lo siguiente: en inmediaciones del municipio de Florida y con datos de la estación Cenicaña se estimó una ET<sub>o</sub> media multianual de 1266 mm. En la estación Guacarí, que representa las características climáticas del municipio con el mismo nombre, se estimó una evapotranspiración media multianual de 1440 mm. De igual forma para la estación La Paila se estimó una evapotranspiración media multianual de 1329 mm (ver figuras 6, 7 y 8).

En ese orden de ideas se realizó un balance hídrico global para relacionar la precipitación y la evapotranspiración a escala multianual. Dicho balance muestra que los tres sitios se encuentran en déficit hídrico, esto es: la estación La Paila muestra un déficit de 22 mm, la estación Guacarí muestra un déficit de 520 mm y la estación Cenicaña muestra un déficit de 100 mm. Lo anterior no implica, que todos los años se muestre la misma tendencia, de hecho los efectos de la variabilidad climática de los últimos años han mostrado periodos bastante húmedos con altas tasas de precipitación.

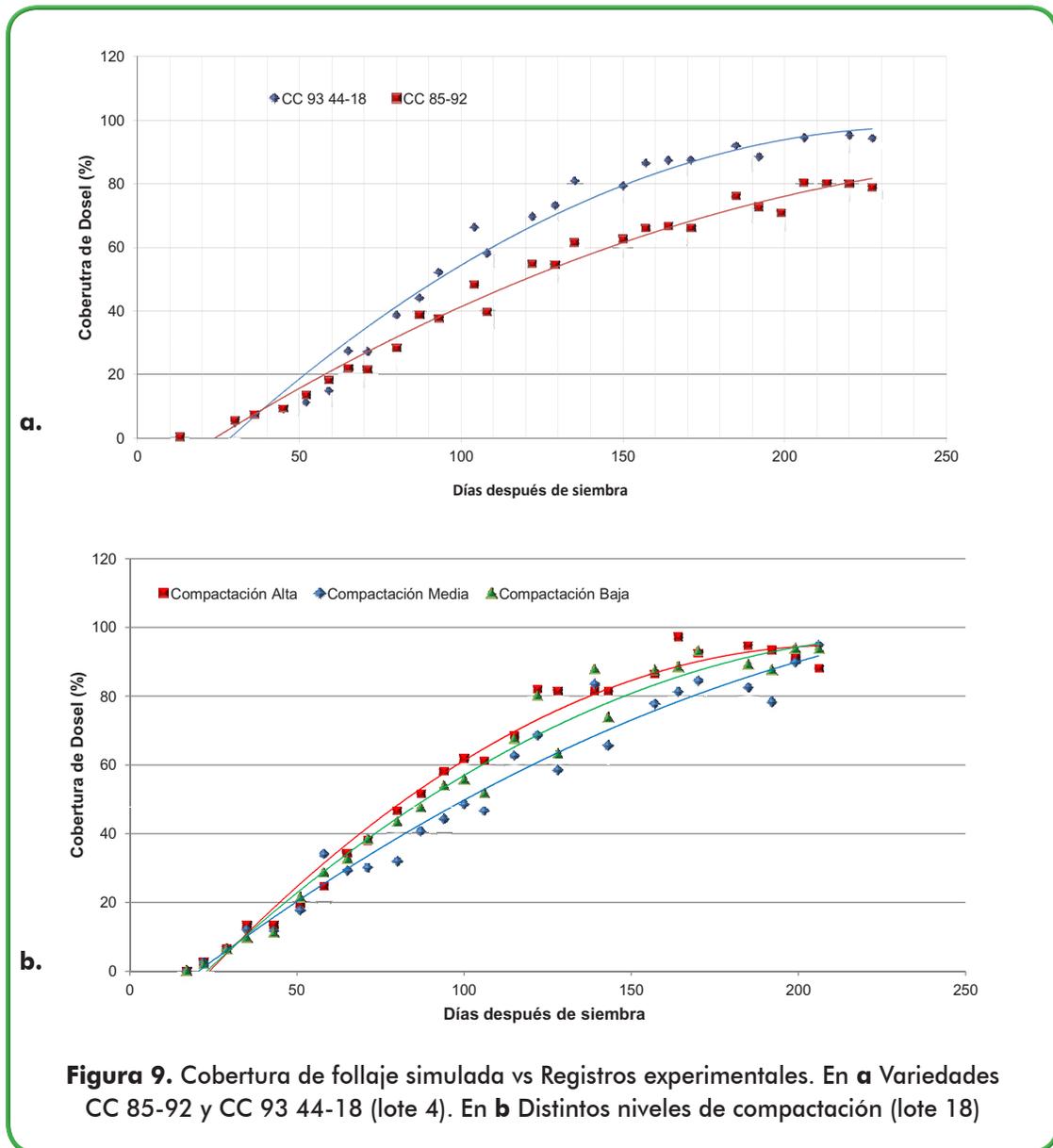
Adicionalmente, podemos encontrar que existen periodos anuales multianuales donde no hay déficit hídrico, los cuales corresponden a las temporadas de lluvia, y que en general no deben requerir aplicaciones de riego, con excepción del municipio de Guacarí, el cual se caracteriza por ser una de las zonas más secas del valle geográfico del Río Cauca.



## 4.2. Ajuste del modelo

### 4.2.1. Calibración de parámetros de desarrollo de la cobertura de follaje

La figura 9 resume los resultados de los experimentos realizados por CENICAÑA en su granja experimental y muestran como varía al trabajar con diferentes variedades de caña de azúcar y el cambio en el desarrollo de la cobertura de follaje ante diferentes niveles de compactación.



En la figura 9a se pueden observar los resultados del lote 4, en el cual se llevó a cabo el seguimiento del desarrollo de la cobertura de dos variedades: la CC 85-92 y la CC 93 44-18. Es importante mencionar que para el lote 4; el follaje de los materiales evaluados son resultado de una siembra con plantilla nueva, es decir, sin ningún corte previo.

Del desarrollo de follaje de la variedad CC 85-92 se sabe que puede ser inferior en comparación a otras variedades comerciales, si bien su crecimiento posterior, su desarrollo de tallos y su productividad en azúcar son mayores (CENICAÑA, 2002). Se observa que la variedad CC 85-92 alcanza porcentajes de desarrollo de follaje más bajos que la CC 93 44-18; es posible que este comportamiento facilite un menor traslado de sacarosa al follaje para realizar fotosíntesis y permita mayor concentración de sacarosa en los tallos.

El análisis de las curvas de tendencia permite observar que la variedad CC 93 44-18 alcanza máximo desarrollo de follaje cercano al 96%, mientras que la variedad CC 85-92 alcanza un máximo desarrollo de follaje cercano al 80%; ambas líneas tienden a estabilizarse después del día 190.

En la 9b se pueden observar los resultados de seguimiento del lote 18; aquí se llevó a cabo el seguimiento del desarrollo de la cobertura de follaje en suelos con tres niveles de compactación<sup>6</sup>: Alta, Media y Baja. Estas tres evaluaciones se realizaron con material de quinto corte de la variedad CC 85-92.

De aquí se puede observar que el porcentaje de desarrollo de cobertura de follaje de la caña sembrada en el tratamiento con baja compactación es mayor que el porcentaje de desarrollo de cobertura de follaje de los otros dos tratamientos; a su vez que el porcentaje de desarrollo de follaje monitoreado en el tratamiento con alta compactación se ubica por debajo de los otros dos.

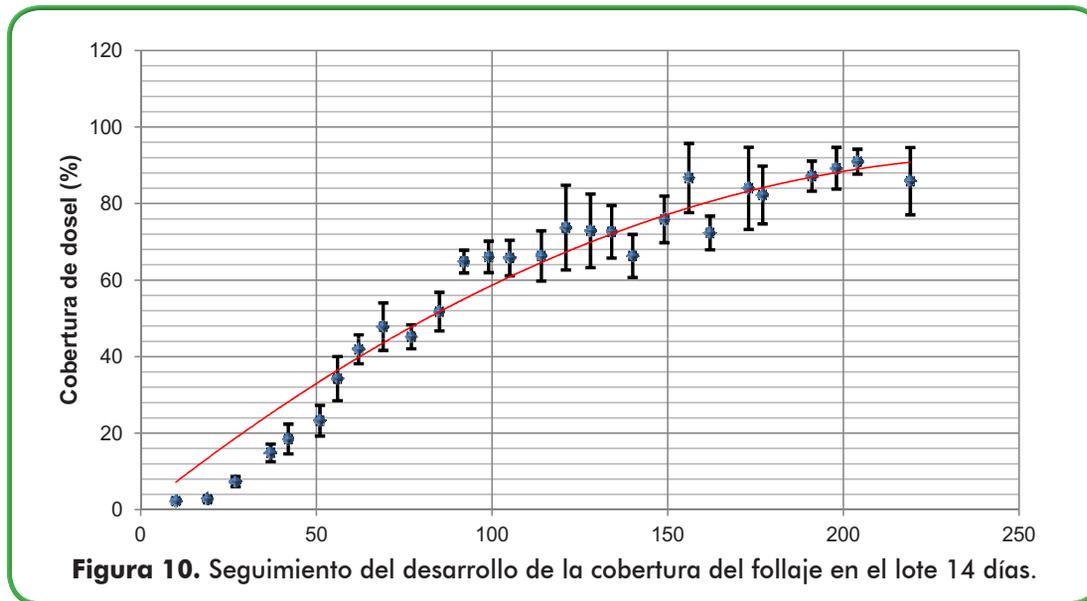
Las curvas de tendencia de los tratamientos con baja y media compactación alcanzan máximo de cobertura de follaje cercano al 94%, mientras que la curva del tratamiento con alta compactación alcanza un máximo cerca del 88%. Las tres curvas tienden a estabilizarse a partir del día 180.

En la figura 10 se pueden observar los resultados obtenidos en el lote 14. Los datos de seguimiento registrados para este lote se utilizaron para determinar el día después de siembra en el que se alcanza la máxima cobertura de follaje. Utilizando el promedio de cinco repeticiones de monitoreo de desarrollo de cobertura de follaje, así como su línea de tendencia, se determinó que dicho nivel de cobertura de follaje se alcanzaba aproximadamente en el día 185.

---

[6] Estos niveles de compactación están determinados por un número específico de pases de tractor.





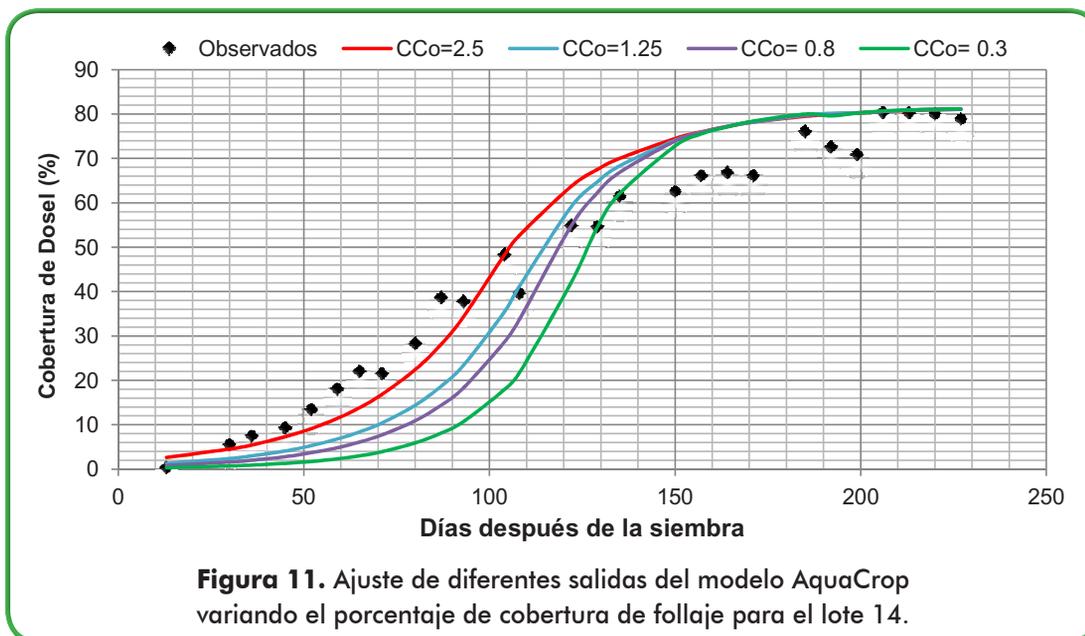
**Figura 10.** Seguimiento del desarrollo de la cobertura del follaje en el lote 14 días.

Como se ha podido observar, el tipo de material, la edad del corte y el nivel de compactación del suelo son factores que determinan la máxima cobertura de follaje que puede alcanzar un cultivo de caña de azúcar. Dado que el modelo AquaCrop, versión 4.0, es un modelo que puede representar el comportamiento típico de una región en estudio, es conveniente trabajar con las condiciones que describen los rendimientos potenciales, tal es el caso de la máxima cobertura de follaje encontrada, que en este caso corresponde a condiciones de compactación media y baja, es decir de 94%.

Siendo así, la determinación del número de días para alcanzar la máxima cobertura de follaje coincide con algunos estudios realizados por Evans (1975) quien encontró que: “en general el máximo índice de área foliar -IAF- se alcanza cerca de seis meses desde la siembra y entonces empieza a declinar, esto puede estar afectado por la variedad y las condiciones de crecimiento”, (Evans, 1975).

Por otro lado, con el fin de determinar el coeficiente de canopy cover inicial, en la figura 11, se presenta el ajuste de diferentes salidas del modelo AquaCrop variando el valor porcentual de este parámetro, utilizando el porcentaje de máximo Canopy, con su respectivo número de días y también el número de tallos por metro cuadrado, determinados a nivel de campo. En la tabla 6 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson<sup>7</sup> cada una de las curvas con los datos observados. De acuerdo a este coeficiente y se tiene que la cobertura de follaje inicial se ajusta mejor a 2.5%.

[7] El coeficiente de Pearson permite determinar el grado de correlación existente entre dos conjuntos de variables. El índice puede tomar valores entre 1 y -1, en donde el primer valor indica que existe una correlación perfecta positiva, el segunda que existen una correlación perfecta negativa y el valor de 0 indica que no existe correlación alguna entre las dos series de datos.

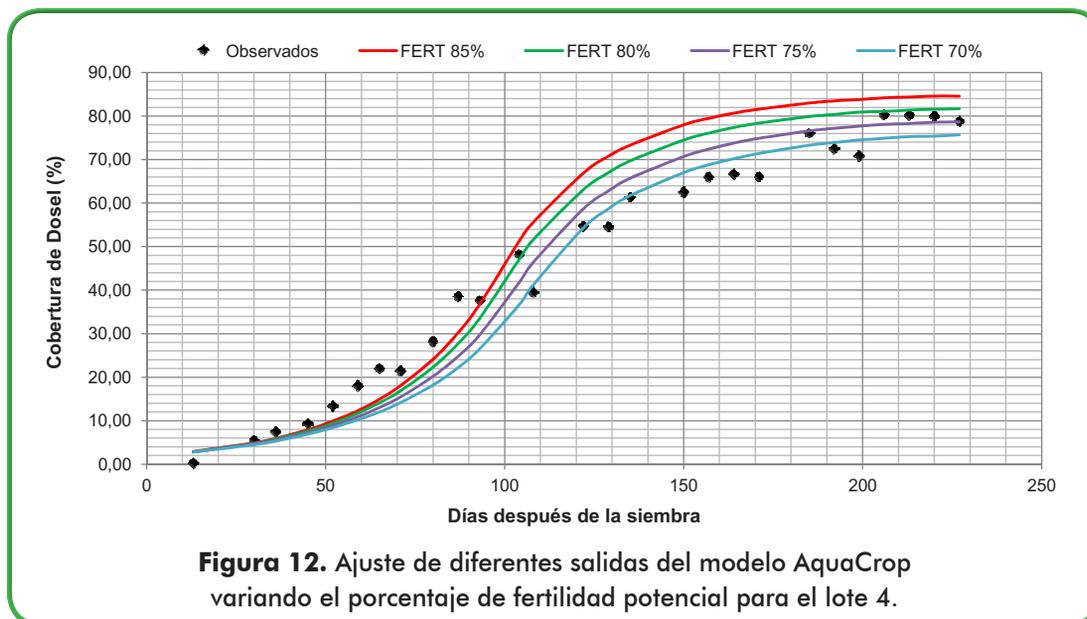


**Tabla 6.** Coeficientes de correlación de Pearson de diferentes cobertura de follaje inicial simulados por el modelo AquaCrop para el lote 4 de la estación experimental de CENICAÑA.

Variable	Cobertura de follaje inicial -CCo- (%)	Coef de correlación de Pearson
Cobertura de Follaje o Canopy Cover	0.3	0.950
	0.8	0.967
	1.25	0.973
	2.5	0.981

#### 4.2.2. Calibración del porcentaje de fertilidad

Una vez se tuvieron calibrados los parámetros del canopy cover en AquaCrop (canopy cover inicial, canopy cover máximo y día en que se alcanza el máximo) se procedió a analizar cómo se comportaba la cobertura de follaje ante variaciones en el porcentaje de fertilidad; los resultados se encuentran en la figura 12. Los puntos negros representan datos observados, mientras que las líneas sólidas corresponden a los resultados arrojados por AquaCrop para los diferentes niveles de fertilidad. De estos ejercicios se pudo concluir que el porcentaje de fertilidad óptimo debía ubicarse en el rango entre 70 % y 80 %.

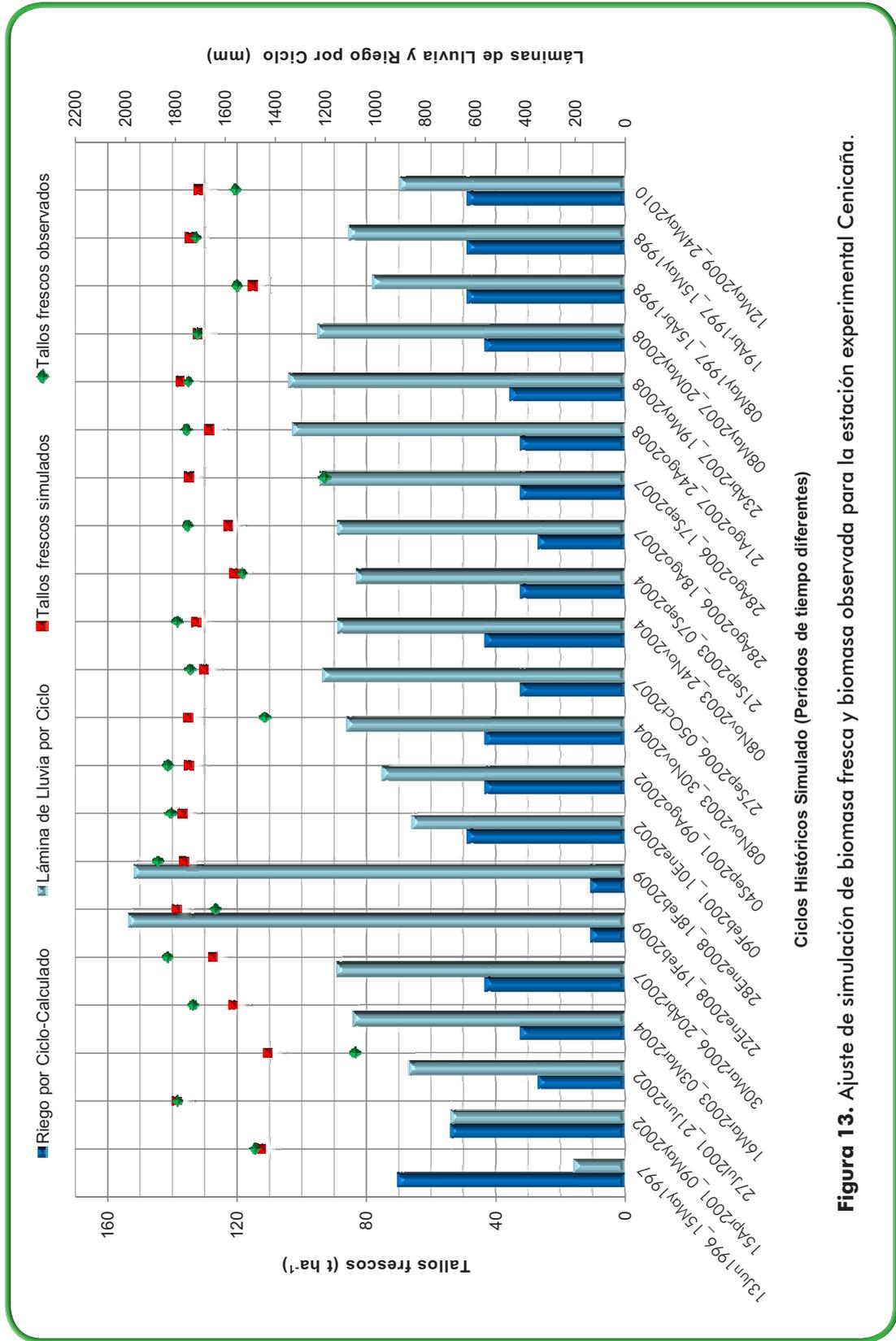


Inicialmente se procedió a realizar un total de 21 simulaciones que cumplieron con los requisitos mencionados. Se encontró que el porcentaje de fertilidad que mejor ajustaba era de 80 %. La figura 13 presenta los tallos frescos observados y simulados, así como las láminas de lluvia y de riego por ciclo, para este porcentaje de fertilidad. Las salidas del modelo AquaCrop obtenidas describen de manera adecuada la producción de tallos frescos de caña de azúcar en la zona sur del valle geográfico, con un coeficiente de correlación (Pearson) de 0.86 respecto a los valores observados.

La mayoría de las simulaciones en condiciones de potencial de fertilidad *Cercana al Óptimo*, (16) se ajustaron adecuadamente y las 5 simulaciones restantes que no coincidieron fueron evaluadas para conocer que factor o parámetro estaba afectando esta anomalía en las simulaciones. El resultado de esta exploración indica que el aspecto más relevante para que estos valores no coincidan es la aplicación de diferentes láminas de riego e incluso la no aplicación de las mismas.

Como ya se mencionó, para realizar la simulación de tallos frescos de caña de azúcar en el valle geográfico del Río Cauca se tuvo en cuenta un valor estándar de lámina neta de riego de 70 mm, fijando como umbral de agotamiento el 60 % de la lámina de agua rápidamente aprovechable-RAW, (figura 13). En el caso de las 5 simulaciones que no se ajustaron de buena manera se procedió a evaluar distintas aplicaciones de láminas de riego para conocer su respuesta, modificando el criterio de aplicación de riego indicado por CENICAÑA.

La tabla 7 muestra la exploración de estas cinco simulaciones. En ésta se expone el ajuste de las simulaciones y los tallos frescos observados cambiando la cantidad de lámina aplicada e incluso para algunos casos se consideró la no aplicación de lámina riego.



**Tabla 7.** Variación de la producción de tallos frescos en función de la lámina aplicada.

Número de simulación	Biomasa observada	Biomasa simulada	Prueba*	Lámina aplicada
3	83.6	85.9	sin riego	0
6	126.7	127.5	mitad lámina estándar	105
10	111.5	108.4	mitad lámina estándar	385
13	118.3	121.8	sin riego	0
21	120.6	123.0	mitad lámina estándar	490

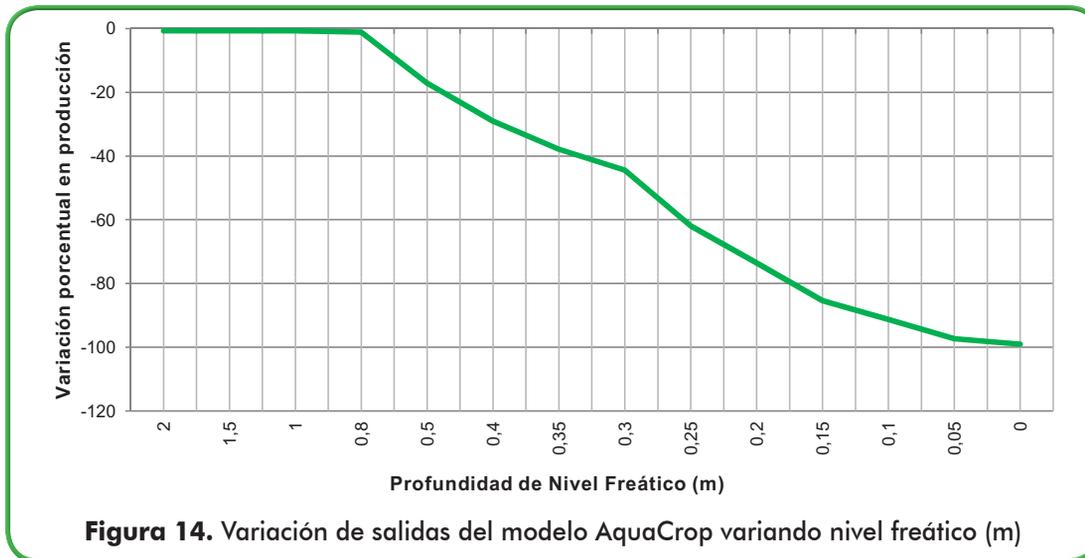
\*Corresponde a la modificación del criterio de riego indicado por CENICAÑA

Observe que la aplicación o no, puede explicar la concordancia entre los valores de tallos frescos observados y los simulados. No obstante para poder corroborar esta hipótesis se hace necesario contar con los datos de las láminas aplicadas o realizar un experimento controlado para verificar que el factor determinante para lograr un mejor ajuste en las simulaciones es efectivamente el riego.

## 4.3. Análisis de sensibilidad

### 4.3.1. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles freáticos

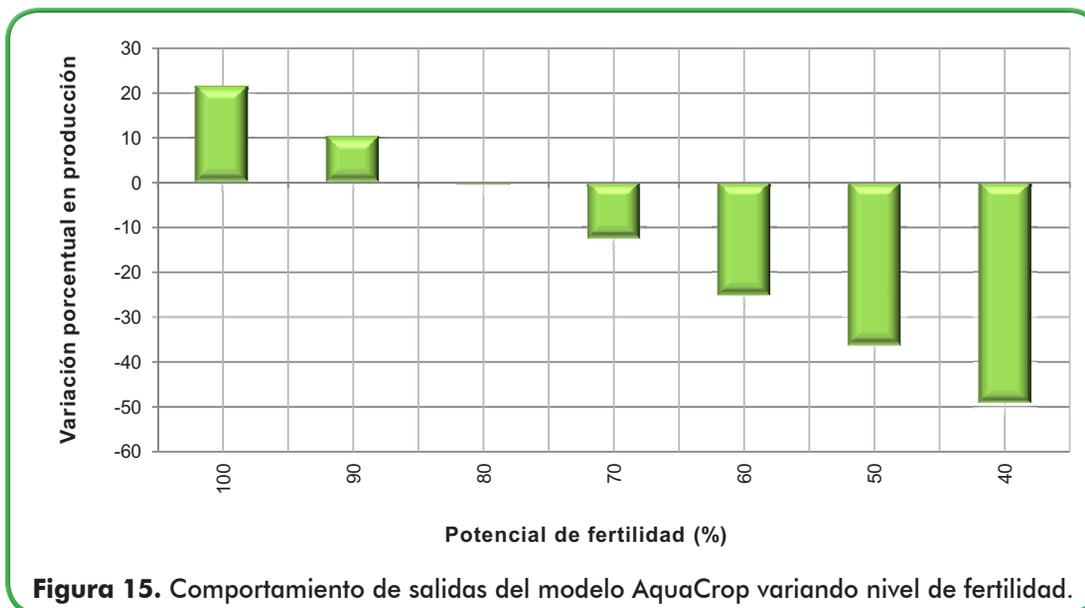
En cuanto a la variación en la producción de tallos frescos, respecto de niveles freáticos a diferentes profundidades se observa en la figura 14 que para profundidades de nivel freático entre los 0.8 metros y 2 metros no se presenta ninguna afectación en la producción. Para valores menores a los 0.8 metros la producción de tallos frescos se ve disminuida de manera gradual hasta el punto de no producir biomasa, dadas las condiciones de encharcamiento. Cabe anotar que el cultivo de caña de azúcar se ha venido simulando con valores de profundidad radicular igual a 0.8 metros.



### 4.3.2. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de fertilidad de suelos

Las prácticas agrícolas como la fertilización son un limitante para la obtención de producciones óptimas. En la figura 15 se presenta la variación de producción de tallos frescos en función de diferentes niveles de fertilidad en la herramienta AquaCrop.

En el modelo AquaCrop la reducción de fertilidad del suelo incide en algunos parámetros de desarrollo de follaje, y en consecuencia en producción de biomasa y rendimiento. Se observa este efecto en la figura 15, en donde se puede apreciar que por debajo de niveles de fertilidad del 80 % utilizado en el ajuste del modelo, se inicia un descenso gradual en la producción de tallos frescos.

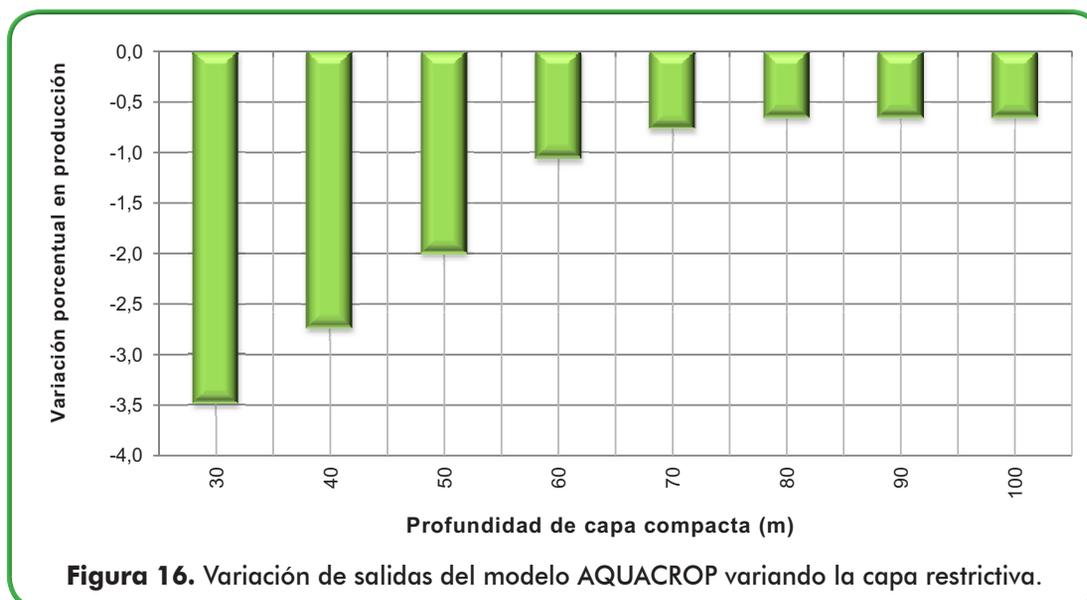


### 4.3.3. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de profundidad de horizontes restrictivos en el suelo

El suelo es uno de los factores más determinantes para el buen desarrollo del cultivo de caña de azúcar, dado que posibilita el avance radicular, la disponibilidad de nutrientes y está directamente relacionado con el almacenamiento de agua para las plantas.

En la figura 16 se observa la variación en la producción de tallos frescos que generaría la ubicación de una capa compacta a distintas profundidades en el perfil del suelo. Se evaluaron capas compactas desde los 30 cm hasta una profundidad de 100 cm.

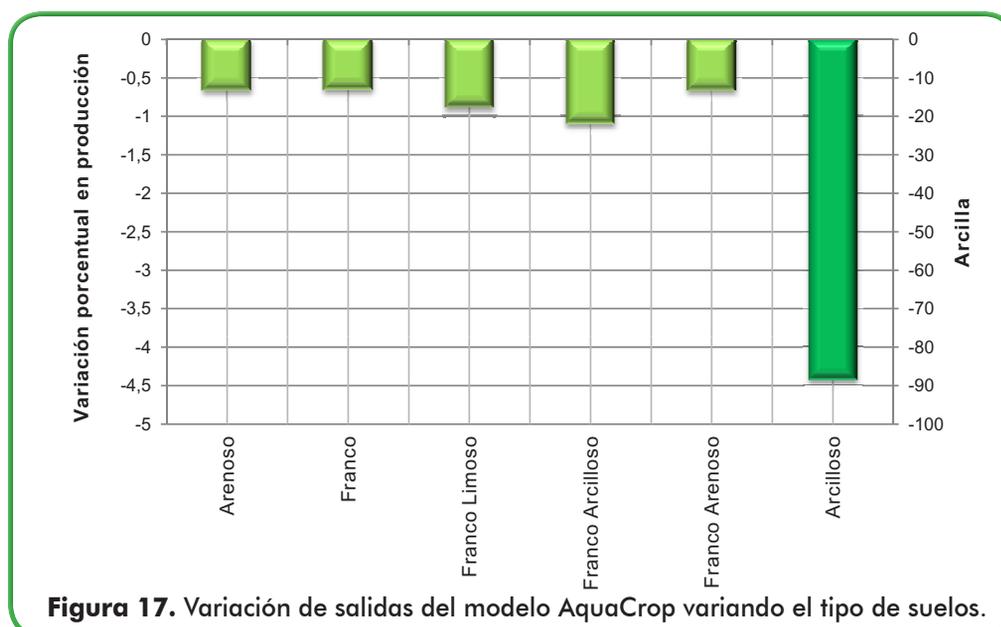
Utilizando el modelo AquaCrop se observa que la producción de tallos frescos no se reduce si la capa restrictiva se ubica por debajo de la profundidad radicular (0.8 m), caso contrario ocurre con las capas restrictivas localizadas en cercanía de la superficie en donde se alcanzan disminuciones en la producción de hasta 3.5 %. En el ajuste del modelo no se estableció ninguna limitación sobre la capa compacta.



### 4.3.4. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas de suelo

Respecto a las características hidrofísicas del suelo se simularon los valores de biomasa y rendimiento para diferentes texturas. En la figura 17 se puede apreciar el comportamiento de la variación porcentual de producción de tallos, en función del tipo de suelo (en el ajuste del modelo se utilizó un suelo franco arenoso arcilloso, para el primer horizonte). Esta evaluación se realizó asumiendo que todo el perfil corresponde al mismo tipo de suelo, lo cual no necesariamente representa a las características de los suelos del valle geográfico del Río Cauca, en donde se tienen perfiles de tres horizontes o más, como es el caso del suelo usado

para la adaptación del modelo. No obstante, observe que los suelos arcillosos o pesados pueden conducir a disminuciones en la producción de tallos de hasta 90%.

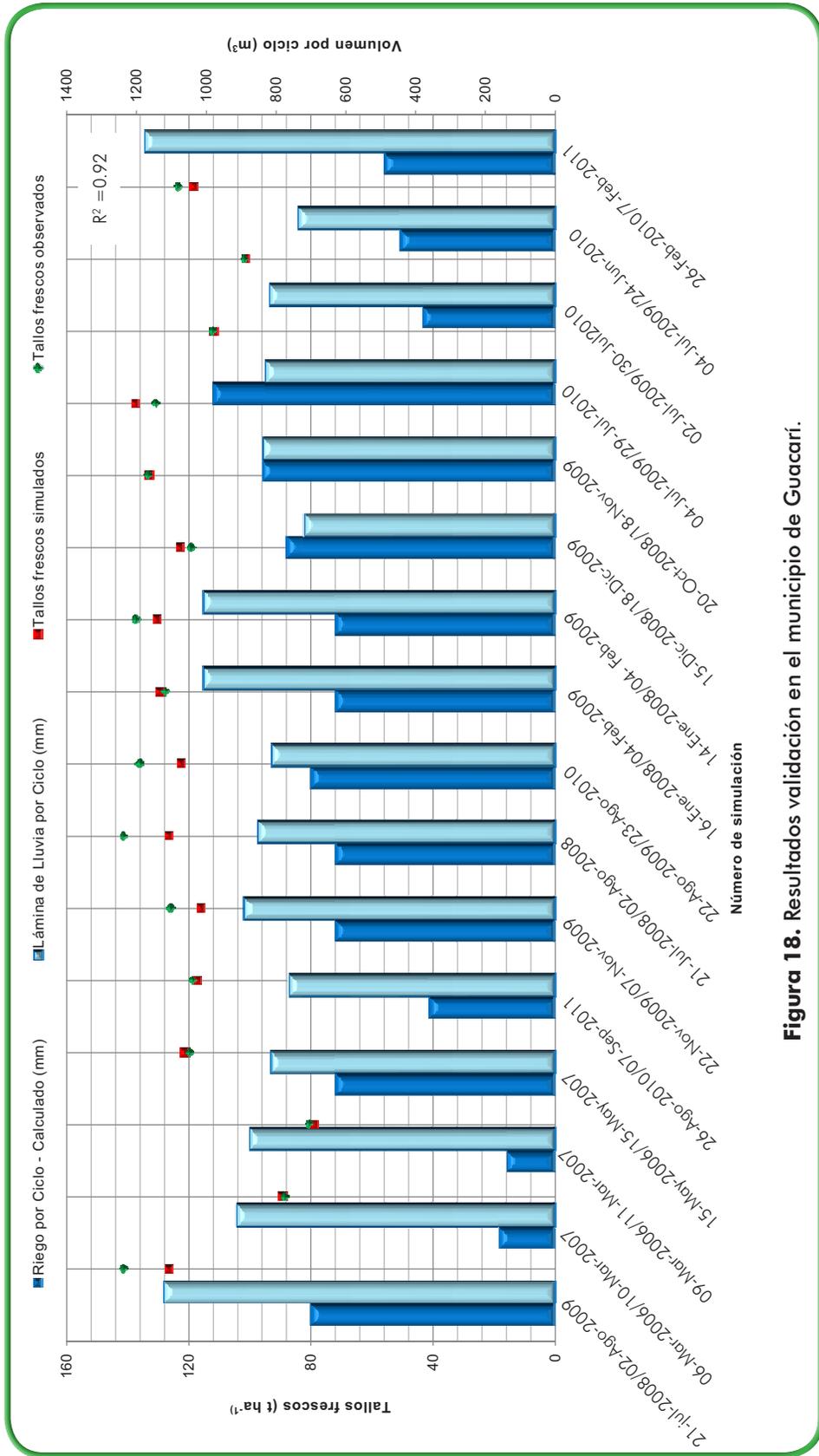


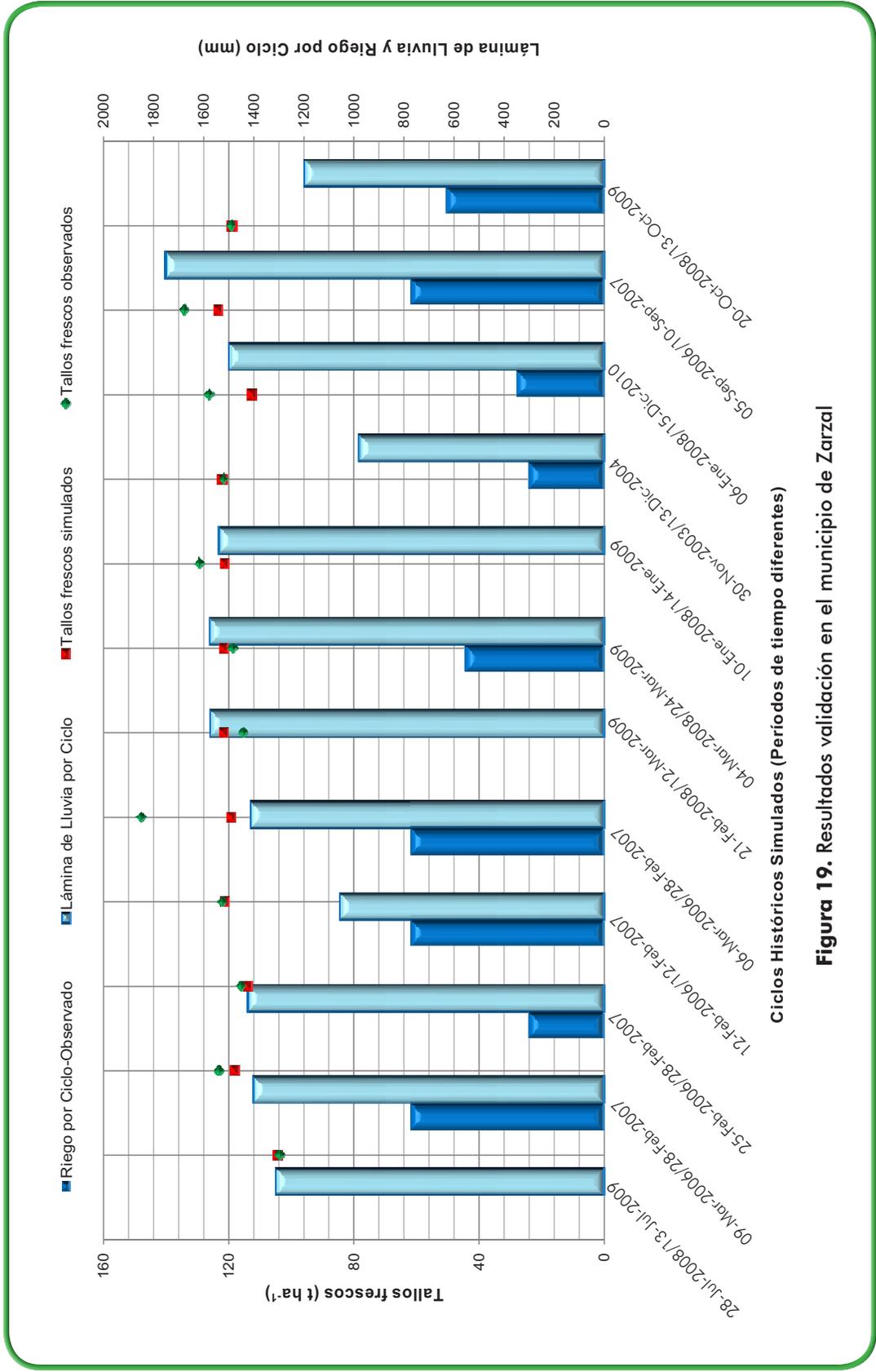
## 4.4. Validación

Los modelos son generalmente definidos como una simplificación o abstracción de un sistema real. Este es particularmente el caso de sistemas biológicos, como los cultivos, donde la realidad está compuesta de muchos componentes y procesos interactuando sobre un amplio rango de niveles organizacionales (Sinclar and Seligman 1996 citados por Raes et Al, 2009).

Para las zonas de Zarzal y Guacarí se realizaron alrededor de treinta simulaciones, encontrando correlación entre los valores de tallos frescos simulados y medidos para varios ciclos de cultivo en diferentes periodos de las últimas décadas. Adicionalmente, se pudo constatar que el menor error medio cuadrático ( $R^2$ ) para las dos estaciones (Guacarí = 0.92 y La Paila = 0.91) se obtuvo con un 75 % de potencial de fertilidad en contraste con el 80 % obtenido para la estación CENICAÑA.

Dado que no se contó con información de láminas aplicadas en cada uno de los ciclos evaluados para los dos lugares en proceso de validación, al igual que para la estación CENICAÑA, se continuó usando el criterio de aplicación de 70 mm de lámina neta cada vez que la lámina de agua rápidamente aprovechable RAW se agotara en un 60%. Este criterio resultó acorde para algunos de los ciclos vegetativos evaluados, sin embargo se varió la aplicación de distintas láminas de riego en aquellos ciclos que presentaron diferencias en la producción de tallos frescos respecto de los registros históricos. En la figura 18 se aprecian los rendimientos observados, los rendimientos simulados y los volúmenes netos totales aplicados por ciclo vegetativo para el municipio de Guacarí.







Algunas de las simulaciones que presentan diferencias con los datos reales, responden al variar el porcentaje de potencial de fertilidad de suelo. De igual forma se procedió para la validación del modelo en el municipio de Zarzal (Estación La Paila). El grupo de simulaciones realizadas para esta zona muestra en la mayoría de los casos buen ajuste respecto a los registros históricos. No obstante, para mejorar el ajuste del modelo se realizaron variaciones en las láminas de riego aplicadas, obteniendo los resultados que se presentan en la figura 19. Observe el caso de las simulaciones 1, 6 y 8 las cuales según el modelo no requirieron de ninguna aplicación de riego durante su ciclo vegetativo pues la oferta de lluvias fue suficiente.

De acuerdo a los resultados de la validación, se puede decir que la aplicación de láminas de riego ayuda a explicar las variaciones en producción de tallos frescos simulados. En aquellos casos donde las simulaciones no se aproximan a los valores reales esa diferencia se puede explicar por medio del potencial de fertilidad del suelo.

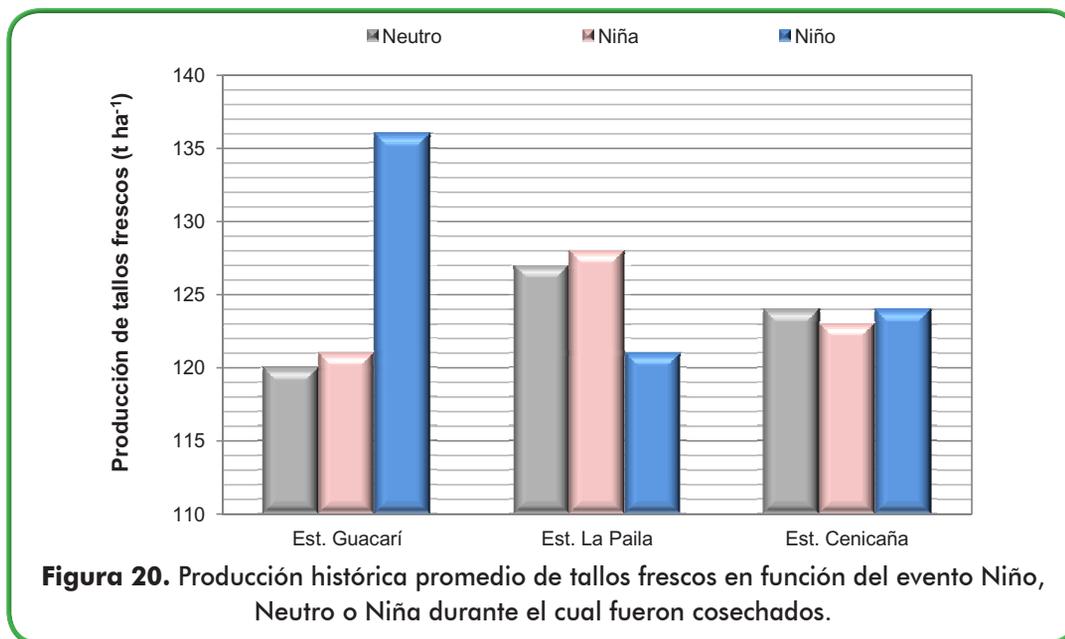
Sí aun haciendo esta variación en los niveles de fertilidad no se obtiene buen ajuste se deben explorar otros parámetros como la densidad de siembra, el máximo Canopy Cover, el cual varía de acuerdo a la edad de la soca.

## 4.5. Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático

Los umbrales climáticos para los cuales la caña de azúcar puede presentar un rendimiento adecuado son: rango de temperatura base entre 9 °C y 32 °C, tasas de evapotranspiración entre 6 a 15 mm día<sup>-1</sup> (Thompson 1976 citado por Singels, 2012), una evapotranspiración anual entre 800 y 2000 mm y al menos 850 mm de lluvia para mantener el cultivo bajo modalidad de secano (FAO, 2012).

### 4.5.1. Variabilidad Climática

La figura 20 presenta las tendencias promedio en producción de tallos frescos diferenciados por el evento climático durante el cual fueron cosechados, para el periodo 1994-2010.



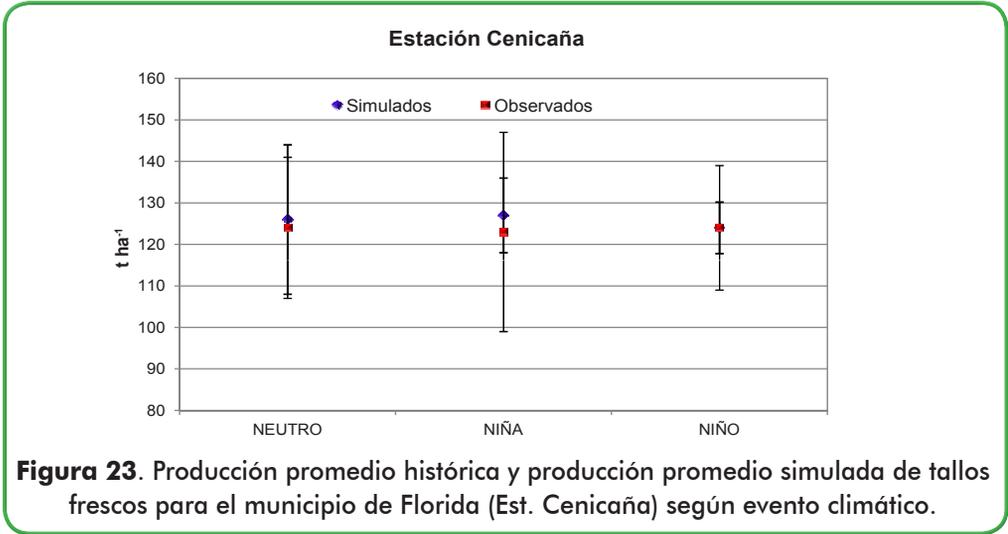
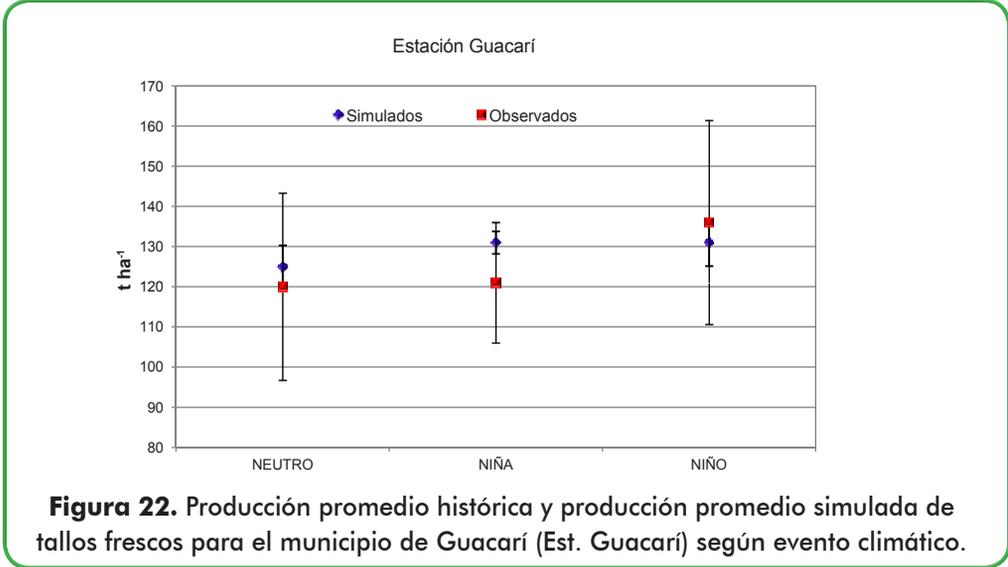
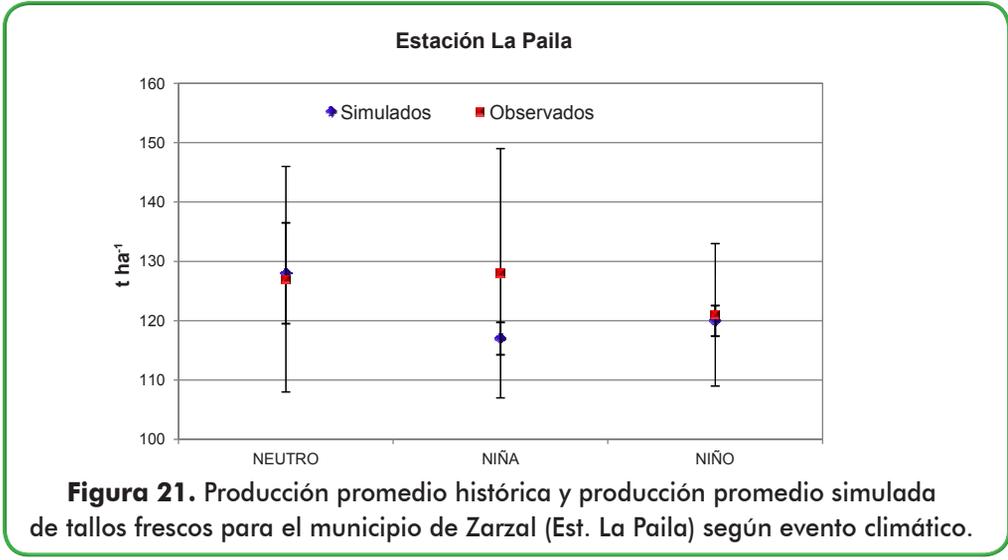
Entre las principales observaciones que se pueden derivar de esta figura están: en el municipio de Guacarí (Est. Guacarí) los promedios más altos en cosecha de tallos frescos de caña de azúcar se obtienen en periodos Niño, en el municipio de Zarzal (Est. La Paila) los promedios más altos en producción de tallos frescos se obtienen en eventos Neutros y eventos Niña, mientras que en el municipio de Florida (Est. Cenicaña) no hay una diferencia considerable en la producción de tallos frescos para cada uno de los eventos climáticos mencionados.

Las tendencias mencionadas no necesariamente se traducen en mejores rendimientos en azúcar. Tal es el caso de aquellos umbrales de temperatura (11°C a 12°C) bajo los cuales la sacarosa se degrada a fructuosa y glucosa reduciendo la concentración de azúcar final. Es decir, un tallo muy jugoso no implica altos contenidos de sacarosa.

Por otra parte, la selección de los grupos de datos que aquí se presentan también llevan consigo incertidumbre debido a factores tales como el grado de compactación del suelo, la densidad de siembra, las características hidrofísicas de los suelos, prácticas de fertilización, entre otras, las cuales propician un grado de “ruido” adicional, el cual no alcanza a ser percibido por los estadísticos básicos que aquí se han implementado.

Las figuras 21 a la 23 presentan en diagrama de cajas la producción de tallos frescos observados y de tallos frescos simulados con AquaCrop 4.0 para los tres eventos climáticos mencionados.





En términos generales, según los registros históricos se observa lo siguiente:

- Para el municipio de Zarzal (Est. La Paila) la producción media de tallos frescos en eventos Niño respecto a los eventos Neutro se redujo en un 5%, mientras que en eventos Niña no se observó un comportamiento sobresaliente.
- Para el municipio de Guacarí (Est. Guacarí) la producción de tallos frescos en eventos Niño respecto a los eventos Neutro aumentó en un 13%, mientras que en eventos Niña no se observa un comportamiento anómalo.
- En el municipio de Florida (Est. Cenicaña) no se ha evidenciado una diferencia marcada para la producción promedio en los eventos climáticos analizados.

En la tabla 8 se encuentra consignada la información respectiva a los promedios y desviación estándar de cada caso analizado, así como los resultados obtenidos utilizando el modelo AquaCrop. A continuación se discute la capacidad del modelo AquaCrop para describir adecuadamente el comportamiento de los rendimientos de la caña de azúcar ante el fenómeno del Niño.

**Tabla 8. Promedios históricos de producción de tallos frescos y promedios de resultados de las simulaciones por municipio según evento climático**

Periodo	Florida			Guacarí			Zarzal		
	OBS	DesvEst	SIM	OBS	DesvEst	SIM	OBS	DesvEst	SIM
NEUTRO	124	17	126	120	23.3	125	127	19	128
NIÑA	123	24	127	121	15	131	128	21	117
NIÑO	124	15	124	136	25.4	131	121	12	120

De acuerdo a las variables de entrada (clima y suelos) suministradas para reproducir el comportamiento del cultivo en caña de azúcar en el municipio de Zarzal, se tiene que los valores simulados tuvieron buena coincidencia con los valores observados para los eventos Neutro y Niño, mientras que para los eventos Niña se presenta una diferencia de 11 toneladas entre los promedios históricos y los promedios resultado de las simulaciones.

Para el caso del municipio de Guacarí, los promedios históricos de tallos frescos cosechados bajo eventos Niño y Neutro presentan una diferencia de 5 toneladas respecto a los promedios resultado de las simulaciones. En eventos Niña se presenta una diferencia de 10 toneladas.

Bajo las condiciones del municipio de Florida, se presentan las mejores concordancias de las tres zonas analizadas, exhibiendo bajas diferencias entre los promedios observados y los simulados. Quizá los resultados para esta zona se pueden explicar debido a que las variables y parámetros empleados para alimentar el modelo han sido medidas en la estación

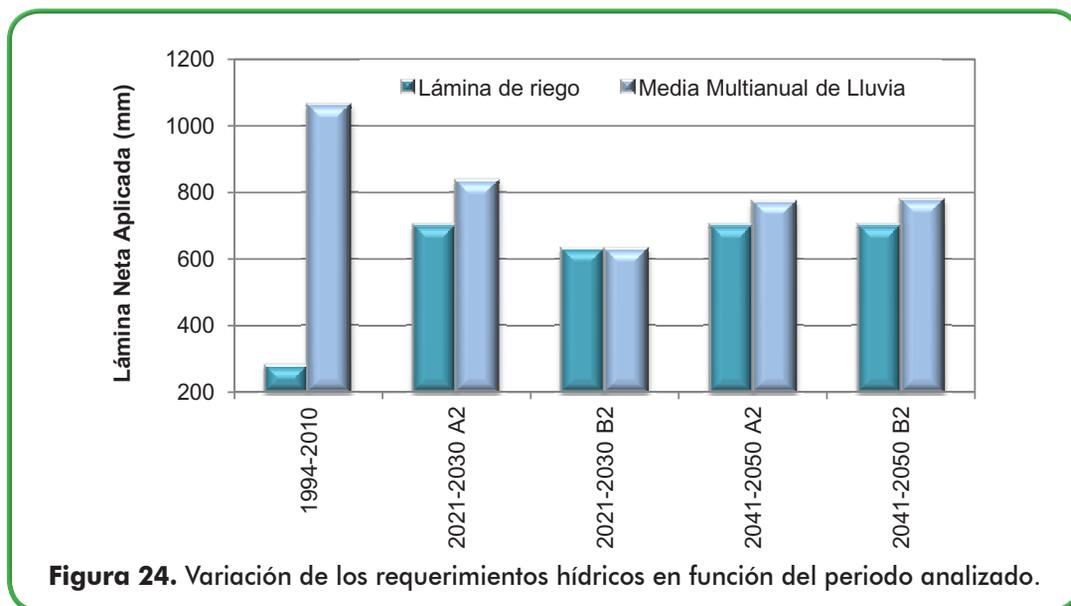


experimental de Cenicaña y describen de buena manera las características medioambientales de la región, y no corresponden a información secundaria, como es el caso de los municipios de Zarzal y Guacarí.

No obstante existe una tendencia general para las simulaciones del comportamiento de la caña de azúcar frente a eventos Niña para los tres municipios. Para este evento se tienen las mayores diferencias entre los promedios históricos observados y los promedios resultado de las simulaciones. Dada la alta incertidumbre que se ha venido planteando desde algunas líneas atrás, aún es prematuro atribuir esa diferencia a algún factor específico, pero vale la pena que en futuros estudios se revise aquellos umbrales ambientales bajo los cuales el modelo reproduce algún tipo de reacción del cultivo frente a altas o bajas temperaturas y frente al tema del estrés por exceso o déficit hídrico.

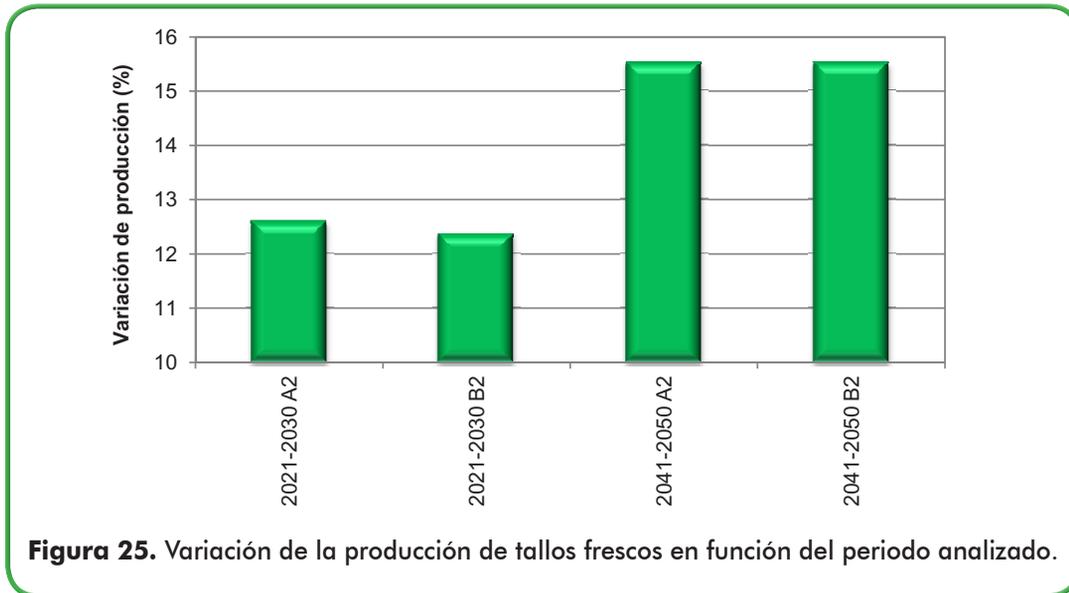
#### 4.5.2. *Afectaciones del Cambio Climático sobre la caña de azúcar*

En la figura 24 se observa la comparación de las láminas medias multianuales de lluvia para cada periodo evaluado, con la misma oferta tecnológica presente, y las láminas netas de riego estimadas de acuerdo al criterio mencionado para el primer ejercicio planteado. Observe que el periodo 1994-2010 (correspondiente al promedio de los registros disponibles) presenta una media mayor de precipitación, mientras que las precipitaciones proyectadas para la década 2021-2030 y 2041-2050 alcanzan disminuciones de hasta el 40% del periodo de referencia. Para el caso de las láminas de riego requeridas para obtener una producción similar a la actual, el modelo estima que se deben aplicar hasta 50% más de riego que el suministrado en el periodo 1994-2010, si se llegara a presentar el escenario más crítico o A2.

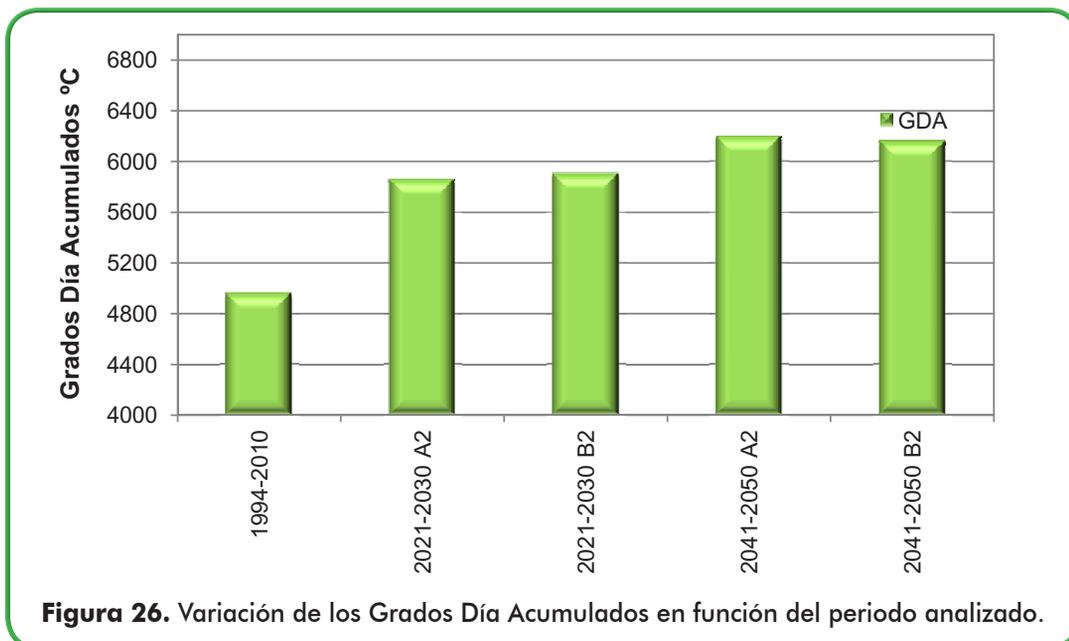


**Figura 24.** Variación de los requerimientos hídricos en función del periodo analizado.

En la figura 25 se observa la variación porcentual de la producción de tallos frescos respecto al periodo de referencia (1994-2010). Se puede apreciar que aun cuando se proyecta una disminución de las lluvias para esos periodos, la producción de tallos frescos se favorece ante el posible aumento de las temperaturas o de las concentraciones de CO<sub>2</sub>. La producción potencial de tallos frescos según el modelo AquaCrop en el periodo 1994-2010 es de 139 Ton ha<sup>-1</sup>, y en los periodos analizados, la década 2041-2050 es la más favorecida, con incrementos en la producción mayores al 15%.



En la figura 26 se puede observar la acumulación de grados día -GDA- para la duración de un mismo periodo vegetativo (Enero 22-Dicimbre 22), es decir 11 meses de ciclo.





Según el modelo AquaCrop, de esta gráfica se puede inferir que la producción de tallos potencial estimada para el periodo 1994-2010 se alcanzaría con 5000 GDA aproximadamente; en la década de 2021-2030 la acumulación de GDA se incrementa para el mismo ciclo vegetativo (11 meses) cerca de 16%, mientras que en la década 2041-2050 la acumulación de GDA puede alcanzar un incremento cercano al 22%.

En el municipio de Florida no se observó ninguna diferencia considerable en producción de tallos frescos por semestre, pero sí se ha podido observar que los ciclos vegetativos pueden llegar a ser más cortos. Según los escenarios de cambio climático analizados y los ciclos vegetativos estimados, se puede decir que en la zona Sur del Valle del Cauca la longitud del periodo vegetativo puede disminuirse hasta en un mes, es decir, para el mismo ciclo vegetativo la acumulación de GDA será mayor y por consiguiente se espera un posible incremento en la producción de sacarosa.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo AquaCrop es una buena herramienta para simular el rendimiento de tallos del cultivo de caña de azúcar. Los parámetros no conservativos empleados para las simulaciones fueron en su mayoría tomados de las investigaciones realizadas en la estación experimental del centro de investigaciones de la Caña de Azúcar, los cuales se emplearon para el resto de la zona plana del valle geográfico del Río Cauca. Se hace necesario iniciar un proceso de evaluación de parámetros no conservativos para todas aquellas regiones donde se pretenda evaluar el modelo con mayor precisión. Estos parámetros son: potencial de fertilidad de suelos, láminas y frecuencia de aplicación de riego, profundidad de raíces, porcentaje de cobertura de follaje entre otros.

Por otra parte, las simulaciones para obtener la producción de tallos frescos deben considerar un factor de conversión de materia seca en materia húmeda, dado que el modelo AquaCrop presenta los resultados en términos de materia seca. De igual forma la producción de sacarosa no es estimada por el modelo y siendo este el elemento que determina la producción de azúcar, se recomienda realizar investigaciones que permitan involucrar un módulo específico para el cultivo de caña de azúcar y que conduzcan a la obtención de la producción de sacarosa.

Se considera importante avanzar en el mejoramiento del conocimiento de posibles umbrales de tolerancia de cada una de las etapas del ciclo vegetativo debido a extremos de humedad, sequía y temperatura. De acuerdo a los resultados, el modelo está sobre estimando los umbrales de estrés hídrico, lo cual difiere de los umbrales de tolerancia de la caña de azúcar a la ausencia parcial o total de humedad, esto en particular porque algunos resultados de bajas producciones no se explican de manera satisfactoria con un grupo de umbrales estandarizados.

Según el modelo AquaCrop el nivel de potencial de fertilidad y las láminas de riego aplicadas durante el ciclo vegetativo son los mayores determinantes en la producción de tallos frescos de caña de azúcar. De tal forma se recomienda realizar seguimiento a estas variables que permita mejorar el ajuste del módulo de cultivo.

En términos de eventos climáticos extremos, se pudo evidenciar que los rendimientos de producción de tallos frescos se ven afectados principalmente por la ocurrencia de extrema humedad al inicio del ciclo vegetativo o en los últimos meses del mismo. Pese a que en eventos de sequía el modelo no reproduce afectaciones muy acentuadas debido a que





siempre se suministró una lámina de riego equivalente a 70 milímetros, sin embargo, se puede apreciar disminución en la producción de tallos. Para corroborar esto se deben realizar experimentaciones para determinar el grado de afectación de los incrementos de temperatura y de ausencia de humedad.

De acuerdo a los resultados de producción de caña de azúcar para fenómeno de cambio climático se observa que las láminas de riego requeridas para obtener una producción similar a la actual, incluyendo la misma oferta tecnológica evaluada para la adaptación del modelo, deben incrementarse; el modelo estima que se debe aplicar hasta 50% más de riego que el suministrado en el periodo 1994-2010, si se llegara a presentar el escenario más crítico (A2).

Según el modelo, ante los escenarios de aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero y del aumento de temperaturas, se puede esperar que los rendimientos en producción de tallos frescos puedan incrementarse entre 12% y 15% manteniendo una oferta tecnológica adecuada o al menos similar a la suministrada en los módulos de prácticas culturales y de suelos.

El modelo evidencia que en escenarios de cambio climático el número de grados día acumulados -GDA- requeridos para alcanzar producciones similares a las actuales, se verán disminuidos entre 30 y 50 días, esto quiere decir que si un cultivo de caña de azúcar se deja con una duración similar a los ciclos vegetativos actuales los grados días acumulados serán mucho mayores.

## Bibliografía

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. N° 56). Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje 56. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. FAO.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *FAO 56*. Roma: FAO.
- Bernal, J. G. (2012). *III INFORME DE ACTIVIDADES CONTRATO 075/2012-CAÑA DE AZÚCAR (SACCHARUM OFFICINARUM / VARIEDAD CC 85-92) EN LA ZONA DEL VALLE DEL CAUCA*. Bogota D.C: Convenio FAO-IDEAM-DNP Financiado MADR.
- Castillo, F., & Castellvi Sentis, F. (1996). *Agrometeorología*. Madrid: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación.
- CENICAÑA. (2002). *Características agronómicas de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 85-92*. Cali: Cenicaña.
- Cenicaña. (2010 a). *Producción de caña y azúcar en el valle del Río Cauca, estadísticas descriptivas*. Cali: Cenicaña.
- Cenicaña. (2010). *Producción de caña y azúcar en el valle del Río Cauca, estadísticas descriptivas*. Cali: Cenicaña.
- Cenicaña. (2010). *Programa de agronomía*. Cali: Cenicaña.
- Chow, V., Maidment, R., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogota: McGrawHill.
- DANE. (2011). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Bogotá D.C: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)- Dirección de Metodología y Producción Estadística (DIMPE).

- DANE. (2011). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Bogotá D.C: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)- Dirección de Metodología y Producción Estadística (DIMPE).
- EEAOC. (2009). *El manual del cañero*. Tucuman: Estación experimental arzobispo colombres.
- Evans, L. (1975). *Crop Physiology*. Cambridge: Cambridge University.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. Nº 56). Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje .
- FAO. (2012). Sugarcane. En FAO, *Crop yield to response to water* (págs. 174 - 184). Roma: FAO.
- Fereres, E. (2012). *Curso Teorico Practico-Uso del Modelo AQUACROP*. Bogotá D.C.
- Ferrari. (1978). *Elements of systems - dynamics simulation*. Wageningen. The Netherlands.: Center fro Agricultural Publishing and Documentation.
- Finagro. (2012). *Fondo para el financiamiento del sector agropecuario*. Recuperado el 21 de Marzo de 2012, de <http://www.finagro.com.co>
- Hillel. (1979). *Computer Simulation of Soil - Water Dynamics: A compendium of Recent Work*. Ottawa, Canada: International Developing Research Centre.
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *2º Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –Ideam–.
- IDEAM. (2012). <http://modelos.ideam.gov.co/escenarios/cambio-climatico/consulta-de-escenarios/>.
- IDEAM. (2012). *Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia*. Bogotá D. C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM-UPME. (2005). *Atlas de Radiación Solar para Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-Unidad de Planeación Minero Energética.
- IPCC. (2000). *SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS*. A Special Report of IPCC Working Group III: Summary for Policymakers.
- Knox, J., & Carr, M. (2010). The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*sacharum Officinarum*): A review. *Exploration Agricultural*, 1-25.
- Larrahondo, J. (1995). Calidad de la caña de azúcar. En CENICAÑA, *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (págs. 337 - 354). Cali: CENICAÑA.
- Larrahondo, J., & Villegas, F. (1995). Control y características de la maduración. En CENICAÑA, *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (págs. 297 - 313). Cali: CENICAÑA.
- Minambiente. (2005). *Guía ambiental para el subsector de caña de azúcar*. Bogotá: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- Montealegre. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Informe Final contrato 022 - 2009. IDEAM.
- Montealegre, J. (2007). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia*. Informe Final contrato 063-2007. IDEAM.
- NOAA. (2012). *National Weather Service-Climate Prediction Center*. Obtenido de [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- Pabón, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia- CAR.

- 
- Rabbinge, & DeWit. (1989). *Theory of modelling and systems management. Simulation and systems management in crop protection*. Wageningen, The Netherlands: R. Rabbinge, S.A. Ward & H.H. van Laar (eds.). Simulation Monographs 32.
- Raes, D., & et Al. (2011). *AquaCrop User's Guide*. Roma: FAO.
- Raes, D., Steduto, P., C.Hsiao, T., & Fereres, E. (2011). *Aqua Crop version 3.1 plus. Reference Manual*. Rome, Italy: FAO, Land and Water Division.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Journal of Agronomy*, 438-447.
- Raes, D.; Et Al. (2009). AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Journal of Agronomy*, 438-447.
- Singels, A. (2012). *Sugarcane*. Mount Edgecombe: FAO.
- Torres Aguas, J. (1995). Riegos. En CENICAÑA, *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (págs. 193 - 210). Cali: Cenicaña.
- Waneger, T., Wheeler, H., & Gupta, H. (2004). *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. London: Imperial College Press.

# Anexo

## ADAPTACIÓN DEL MODELO AGUACROP

Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad	Variable	Parámetro		Fuente
			CC 8592		Conser- vativo	No conser- vativo	
CLIMA	PRECIPITACIÓN	Precipitación	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
	TEMPERATURA	Temperatura Máxima	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
		Temperatura Mínima	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
	ETO	Humedad Relativa	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
		Insolación	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
		Velocidad del Viento	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
		Evapotranspiración de referencia	EST. CENICAÑA 2001	X			CENICAÑA
CONCENTRACIONES DE CO <sub>2</sub>	Concentraciones de CO <sub>2</sub>	Mauna Loa-Hawai	X			Escenarios IPCC SRES	
CULTIVO	DESARROLLO	Fecha de siembra	Ver Tabla 3				CENICAÑA
		Tipo de Siembra	Directa			X	CENICAÑA 2012
		Densidad de Siembra (Plantas /ha)	500000			X	Resultado ajuste del modelo
		Tamaño de follaje a la siembra (cm <sup>2</sup> /planta)	5		X		Resultado ajuste del modelo
		Cobertura de dosel inicial	2,5			X	Experimento CENICAÑA 2012
		Días a emergencia	10			X	Experimento CENICAÑA 2012
		Dosel máximo (%)	94			X	Experimento CENICAÑA 2012
		Días a dosel máximo	180			X	Experimento CENICAÑA 2012
		Coficiente de crecimiento de dosel	3,6			X	Por defecto en el modelo
		Coficiente de decaimiento del dosel	7,3			X	Por defecto en el modelo
		Días a senescencia	50 Días antes de cosecha			X	Fereres (2012), comunicación personal
		Duración ciclo				X	VARIABLE
		Días tuberización				X	NA
		Duración de tuberización			X		NA
		Profundidad mínima de raíces (mts)	0,2			X	CENICAÑA
Profundidad máxima de raíces (mts)	0,8			X	CENICAÑA		



Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad	Variable	Parámetro		Fuente
			CC 8592		Conser- vativo	No conser- vativo	
CULTIVO	DESARROLLO	Días a máxima profundidad de raíces	70			X	CENICAÑA
		Tbase min (oC)	9		X		CENICAÑA
		Tbase max (oC)	36		X		CENICAÑA
	ET	Efceto de follaje muerto en la última etapa (%)	60		X		Por defecto en el modelo
		Coeffiente de transpiración (Kc)	1,1		X		Por defecto en el modelo
	PRODUCCIÓN	Índice de cosecha- HI-(%)	35			X	NA
		Productividad hídrica (g/m2)	30		X		Fereres (2012), comunicación personal
	ESTRÉS HDIRICO	Expansión del follaje	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
		Cierre estomático	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
		Inicio rápido de senescencia	moderadamente tolerante		X		Por defecto en el modelo
		Estrés por aireación	moderadamente tolerante			X	Por defecto en el modelo
	ESTRÉS TEMPERATURA	Rango de GD para afectación por bajas temperaturas (°C) desde 0 °C a	12		X		Por defecto en el modelo
	ESTRÉS SALINIDAD	Tipo de salinidad	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
	SUELOS	CARACTERÍSTICAS DE HORIZONTES	Horizontes	3	X		
Descripción 1			Franco				CENICAÑA 2012
Espesor			0,30				CENICAÑA 2012
Punto de Marchitez Permanente			16				Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Capacidad de Campo			32				Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Punto de Saturación			48,5				Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Conductividad Hidráulica Saturada			112,8				CENICAÑA 2012
Descripción 2			Franco - arcilloso				CENICAÑA 2012
Espesor			0,30				CENICAÑA 2012
Punto de Marchitez Permanente			23				Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Capacidad de Campo			45				Estimado con ecuaciones de pedotransferencia

Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad	Variable	Parámetro		Fuente
			CC 8592		Conser- vativo	No conser- vativo	
SUELOS	CARACTERÍSTICAS DE HORIZONTES	Punto de Saturación	60				Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Conductividad Hidráulica Saturada	108				CENICAÑA 2012
		Descripción 3	Arcilloso	X			CENICAÑA 2012
		Espesor	0,20	X			CENICAÑA 2012
		Punto de Marchitez Permanente	42	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Capacidad de Campo	69	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Punto de Saturación	32	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Conductividad Hidráulica Saturada	127,2	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
	SUPERFICIE	Curva Número	75	X			Por defecto
		Agua rápidamente evaporable (REW)	9	X			Por defecto
	CAPA RESTRICTIVA	Profundidad de capa restrictiva	No considerada	X			NA
	AGUA SUBTERRÁNEA	Profundidad de Nivel Freático	1,8	X			NA
MANEJO	RIEGOS	Requerimientos netos de riego	60%RAW	X			APLICACIÓN DE 70 mm
	FERTILIDAD	Nivel de fertilidad	No limitante	X			Resultado ajuste del modelo
SIMULACIÓN	PERIODO DE SIMULACIÓN	Fecha inicio de simulación	Ver Tabla 3	X			CENICAÑA
		Fecha fin de la simulación	Ver Tabla 3	X			CENICAÑA
	CONDICIONES INICIALES	Condiciones iniciales de humedad	Capacidad de Campo	X			CENICAÑA



