

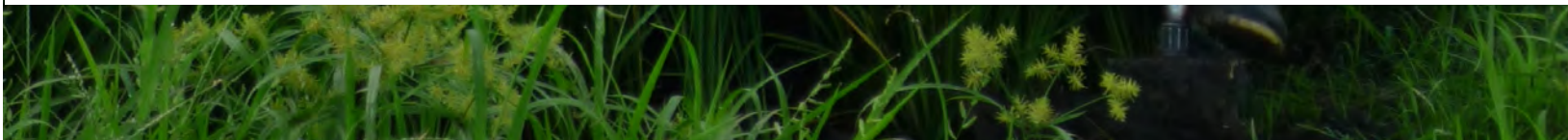


Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta



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
Consultores nacionales 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.

I3430S/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 o a copyright@fao.org.

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

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), Federación de productores de arroz (FEDEARROZ), 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, Myriam Patricia Guzmán García, Elkin Flórez, Luis Armando Castilla Lozano, Dagoberto Bonilla.

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





PRESENTACIÓN

La división de Agua y Suelo 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. 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 la productividad 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 Impacto Económico de 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), quien a su vez suministró información climática y meteorológica necesaria para la adaptación de AquaCrop.

En este documento se presentan resultados obtenidos de la adaptación del modelo AquaCrop a las condiciones agrometeorológicas de Colombia y los posibles efectos de variabilidad y cambio climático sobre los rendimientos agrícolas del arroz en los departamentos de Tolima y Meta.





TABLA DE SIGLAS

CC	Canopy Cover o Cobertura de Dosel
CCo	Canopy Cover o Cobertura de Dosel inicial
CCSM-WRF	Community Climate System Model - Weather Research and Forecast de los Estados Unidos
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)
FEDEARROZ	Federación Nacional de Arroceros de Colombia
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)
PRECIS	Providing Regional Climates for Impacts Studies del Reino Unido
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 arroz.....	3
2.2.	Fenómenos climáticos.....	4
2.2.1.	La Variabilidad climática.....	4
2.2.2.	El Cambio Climático.....	5
2.3.	Descripción del modelo AquaCrop.....	7
3.	Descripción de la metodología.....	12
3.1.	Agroclimatología de la zona de estudio.....	14
3.2.	Descripción de módulos y parámetros a implementar.....	15
3.3.	Adaptación del modelo de AquaCrop.....	18
3.4.	Análisis de Sensibilidad.....	20
3.5.	Validación de AquaCrop.....	21
3.6.	Aplicación de AquaCrop.....	22
3.6.1.	Variabilidad Climática.....	22
3.6.2.	Cambio Climático.....	22
4.	Resultados.....	24
4.1.	Análisis agroclimático.....	24
4.2.	Ajuste del modelo.....	26
4.3.	Análisis de sensibilidad.....	31
4.3.1.	Comportamiento del modelo AquaCrop a diferente profundidad de nivel freático.....	31
4.3.2.	Comportamiento del modelo AquaCrop a diferente nivel de fertilidad de suelos.....	31
4.3.3.	Comportamiento del modelo AquaCrop a diferente nivel de profundidad de capas compactas.....	32
4.3.4.	Comportamiento del modelo AquaCrop a diferentes texturas de suelo.....	33
4.4.	Validación.....	33
4.5.	Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático.....	35



4.5.1.	Variabilidad Climática.....	35
4.5.2.	Afectaciones del Cambio Climático sobre el cultivo de arroz.....	39
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	41
	Anexo.....	43

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 arroz en zonas productoras de la Altillanura – Meta y el Valle interandino del alto Magdalena -Tolima. De esta manera se determinan rendimientos agrícolas a través de características de la zona de siembra, tales como suelo, clima, cultivo y manejo de este, 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 arroz. Este cultivo se adapta muy bien a una gran variedad de zonas del país, por lo que fue necesario escoger aquellos lugares que tuvieran mayor representatividad en términos de producción. De acuerdo a este criterio, el proceso de adaptación del modelo AquaCrop para este cultivo se llevó a cabo en los departamentos de Tolima y Meta. Este proceso se llevó a buen término gracias a la información proporcionada por IDEAM y por la Federación Nacional de Arroceros de Colombia (FEDEARROZ).

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 CO₂ 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 Arroz, 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 arroz

El arroz es el alimento básico para más de la mitad de la población del planeta. A nivel mundial ocupa el segundo lugar en superficie cosechada después del trigo, entre los cereales. Este producto proporciona más calorías por hectárea que cualquier otro de estos granos y semillas cultivados (Barona, 2010). Es un cultivo característico de los trópicos húmedos con requerimientos de alta precipitación, alta radiación solar, altas temperaturas y baja humedad relativa (FONAIAP, 1982).

En Colombia, según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) en 2009, el arroz constituyó el cultivo más importante de ciclo corto, representando el 33% del total del área sembrada. La producción de este cultivo se realiza bajo condiciones de secano ó bajo condiciones de riego, donde el primer manejo se caracteriza por utilizar únicamente el agua proveniente de la precipitación como fuente hídrica para el desarrollo del cereal y el segundo manejo utiliza, además de la precipitación, alguna tecnología de riego, siendo el riego por inundación el utilizado para este cultivo.

Se realizan dos siembras a nivel nacional, que coinciden principalmente con el inicio de la época de lluvia para la mayoría de los lugares en los cuales se siembra este cereal. Esta variable climática está condicionada por el tránsito de la zona de confluencia intertropical (ZCIT) a través del territorio nacional, que ocurre a escala de tiempo intra-anual.

Los departamentos con mayor área sembrada en 2010 de arroz riego, según presenta el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) en su portal de Agronet, fueron: Tolima, Casanare, Meta, Huila y Norte de Santander. Las mayores producciones se obtuvieron en Tolima, Casanare, Huila, Norte de Santander y Meta. En contraposición, para arroz secano el 87% de la producción se obtuvo en Meta y Casanare, con alrededor del 50% y 37%, respectivamente.

Este mismo portal presenta que los rendimientos a nivel nacional fueron mayores para la producción bajo riego en el periodo 2000 a 2010, oscilando entre 5.5 a 6.8 t*ha⁻¹, creciendo para alcanzar el máximo en 2007, y posteriormente disminuyendo cerca al límite inferior. Por otro lado, los rendimientos del cultivo de arroz secano fluctuaron entre 4.1 a 5.1 t*ha⁻¹, pero permaneciendo constante la mayor parte del periodo con una producción cercana a 5.0 t*ha⁻¹, apreciándose disminución importante en el 2000, 2001 y 2009.



Esta variación en los rendimientos del cultivo de arroz está en función de las prácticas de manejo del cultivo, épocas de siembra, materiales sembrados y de la disponibilidad de radiación solar, agua y nutrientes durante el ciclo de cultivo, así como del régimen térmico de la zona.

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 climatología 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°C para el 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°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.

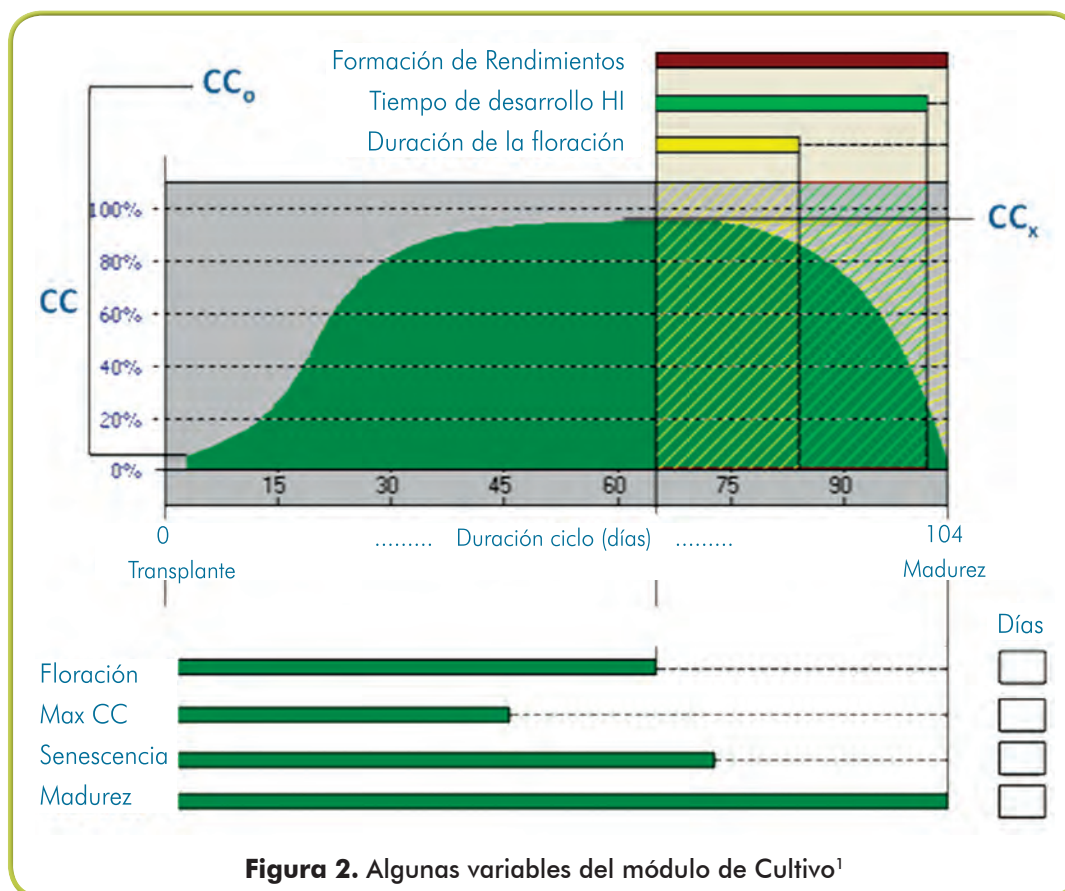
Además de simular satisfactoriamente el rendimiento agrícola, AquaCrop es un modelo que utilizando un conjunto pequeño de parámetros y principios, logra describir de forma simple y directa los procesos que determinan la producción agrícola del cultivo y de esta manera hace más fácil el manejo del mismo 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", se encuentran cuatro módulos que componen el modelo: Clima, Cultivo, Prácticas de Manejo y Suelos (los cuales serán descritos en la próxima sección). Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros (ventana del lado derecho). 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, CCo (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, CCx (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.



[1] 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 cultivo². 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, 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

[2] $Y = HI * B$, 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 arroz en Colombia. Se escogieron dos departamentos (Tolima y Meta) debido a su representatividad en términos de producción de arroz. Además se exigió en cada departamento un material a evaluar, que hubiera sido de buena acogida por los productores de la zona y contara con información para el estudio. Con el apoyo de FEDEARROZ se seleccionaron municipios representativos de cada departamento escogido (Armero, Ibagué, Espinal, Venadillo, Ambalema y Villavicencio). 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.

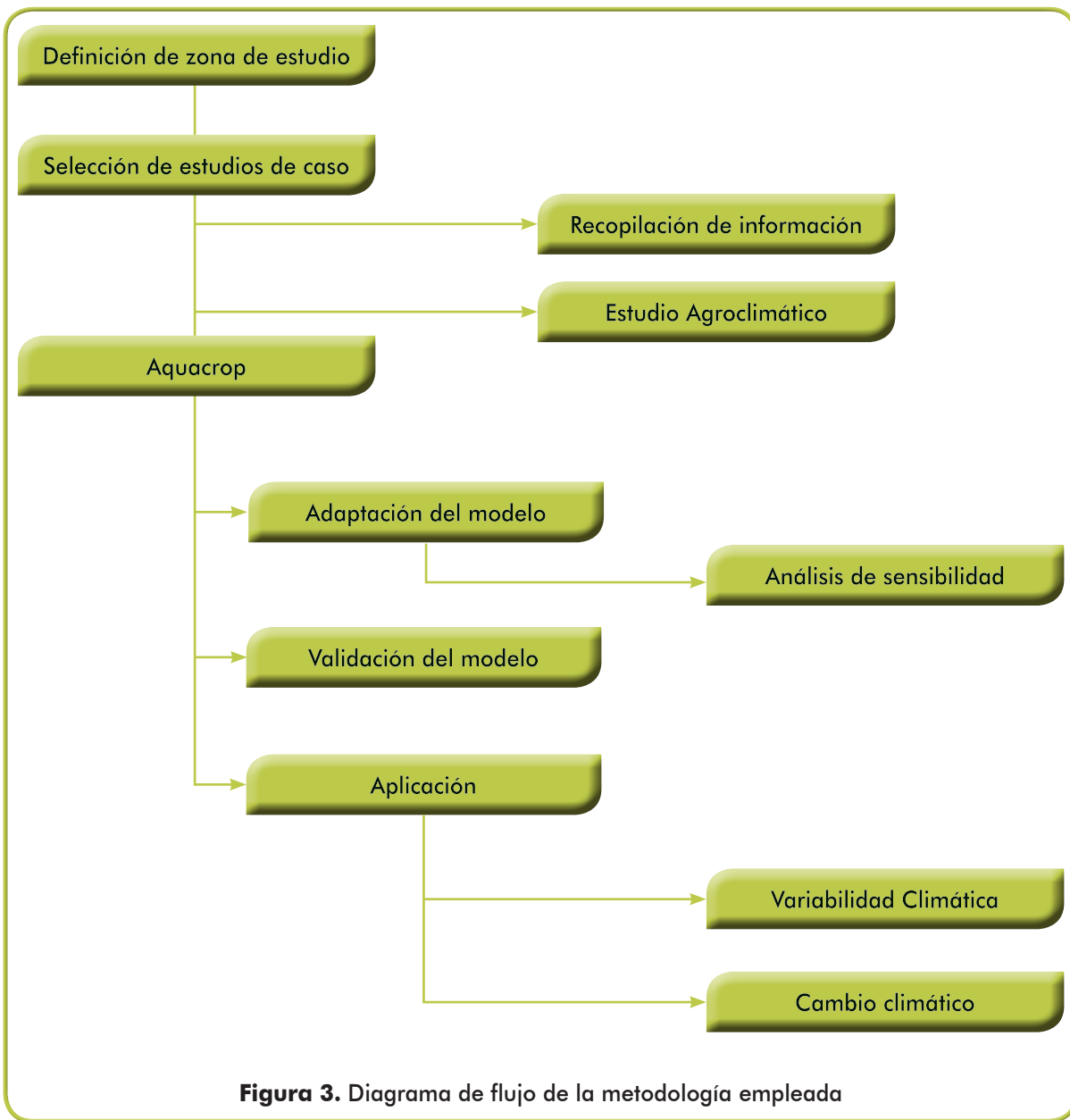


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología empleada

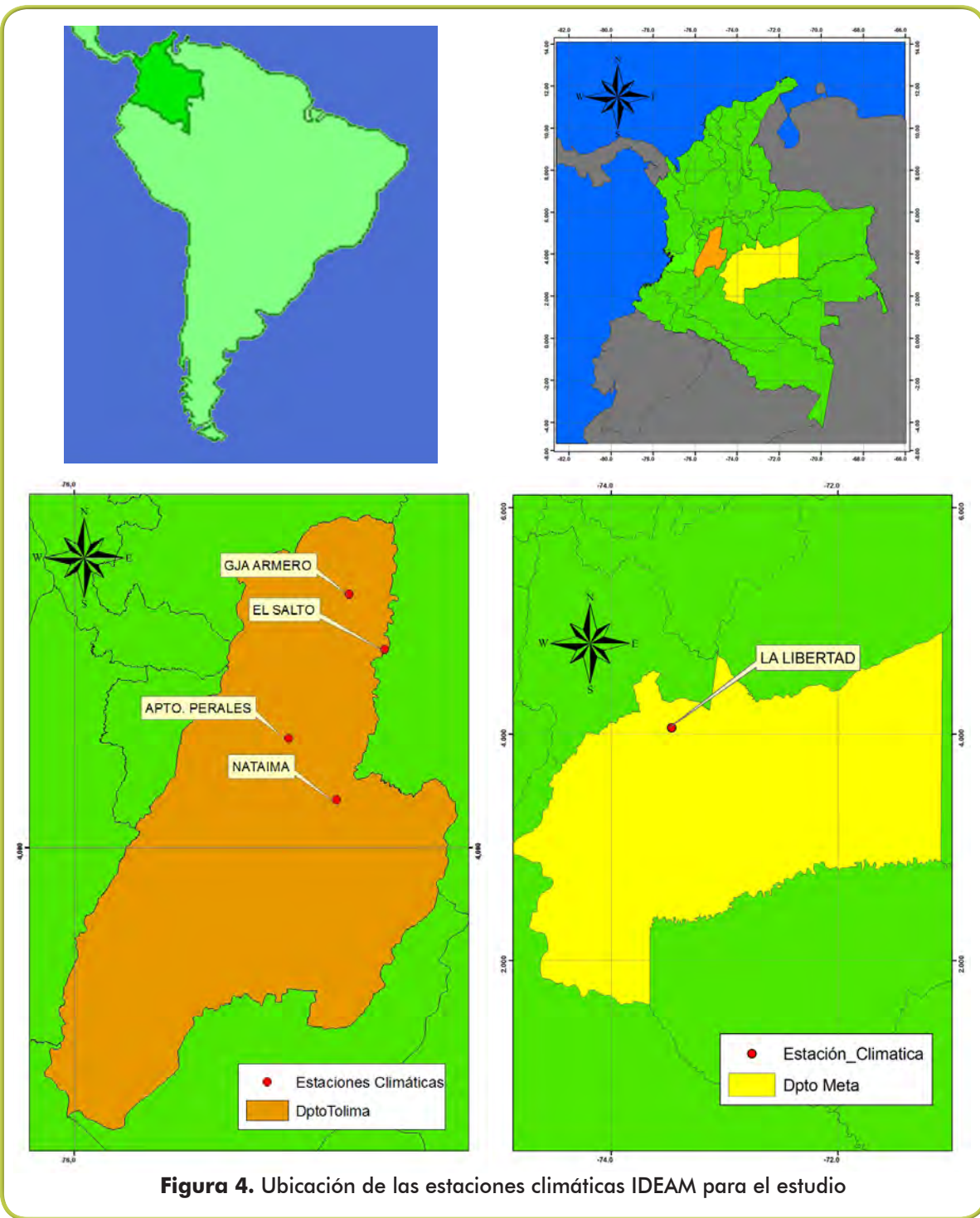
3.1. Información climática de la zona de estudio

La caracterización climática se realiza en estaciones meteorológicas cercanas a las zonas seleccionadas donde se tiene la información de cultivo necesaria 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 departamentos seleccionados se observa en la figura 4.

Utilizando la información de la red climática de IDEAM de las estaciones descritas en la tabla 2, se realizó un estudio climático de la zona de interés, entre los años 1981 a 2010, al cual se le calculó la normal ó mensual-multi-anual de las variables climáticas, precipitación (PPT), temperatura máxima (T máx.), temperatura mínima (T mín.), Humedad relativa (HR), Brillo solar (Br. Solar) y Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_o). Además la velocidad del viento, al ser una variable que no se cuenta con suficiente información de calidad, es tomada como constante.

Tabla 2. Zonas productoras, estaciones meteorológicas y materiales de arroz evaluados

Departamento	Zona	Municipio	Nombre estación	Altitud	Cod est	Coordenadas geográficas		Material
						Latitud	Longitud	
Tolima	Norte	Ambalema	El Salto	450	2125508	4.78	-74.77	Fedearroz 60
		Venadillo						
		Armero	Armero Gja	300	2125509	5.00	-74.91	
	Meseta	Ibagué	Apto Perales	928	2124504	4.43	-75.15	
		Espinal	Nataima	431	2118502	4.19	-74.96	
Meta	Villavicencio	Villavicencio	La Libertad	336	3502502	4.06	-73.47	Fedearroz 174





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 estaciones de la red meteorológica de IDEAM: precipitación, temperatura máxima y mínima, y evapotranspiración de referencia (ET_o); concentración de CO₂ asignada por defecto del modelo AquaCrop; y los resultados de las proyecciones de cambio climático simuladas por el modelo PRECIS usado por IDEAM con los registros de las estaciones de IDEAM.

La evapotranspiración se estimó con el modelo ET_o Calculator por medio de registros diarios de las variables de temperatura máxima y mínima, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento. Aunque la velocidad del viento se tomó constante, con un valor de 2 m*s⁻¹.

La ET_o 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_o) son parámetros climáticos. Por lo tanto la ET_o, también es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de los datos meteorológicos (Allen, 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_o 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**

Para el ajuste del modelo AquaCrop se realizan simulaciones, inicialmente sin modificar los parámetros “conservativos”³ del cultivo y se comparan las salidas en cuanto a rendimiento respecto a la información de campo. A su vez se evaluó estadísticamente el seguimiento de las variables agronómicas biomasa seca, rendimiento del grano seco, índice de cosecha y follaje (Canopy Cover), durante el ciclo de cultivo. De acuerdo a los resultados encontrados en el proceso de ajuste se han modificado algunos parámetros conservativos con el apoyo de los desarrolladores del modelo en FAO-ROMA (anexo).

- **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. Además se tomó una profundidad del nivel freático inicial constante de 2 m. Esta información se refirió a perfiles de calicatas medidas en campo en cercanías a los lotes bajo estudio, suministrados por C.I La Libertad- CORPOICA, levantamiento de suelo del IGAC, y el gremio FEDEARROZ.

- **Módulo de manejo de cultivo**

- ▶ **Riego**

Este módulo se creó para dos escenarios: (1) requerimiento hídrico provisto por la precipitación en el ciclo (secano) y (2) aplicando una lamina de riego fija de $2 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$.

- ▶ **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 corroborado por los técnicos de la zona bajo estudio.

[3] Parámetros conservativos son específicos para cada cultivo que no cambian sustancialmente con el tiempo, las prácticas de gestión, la ubicación geográfica o el clima. También se supone que no cambian con cultivares a menos que se demuestre lo contrario. Se calibran con datos de la cosecha cultivados en condiciones favorables y no con limitantes, pero siguen siendo aplicables para condiciones de estrés a través de su modulación por funciones de respuesta al estrés (Steduto et al., 2012).

3.3. Adaptación del modelo de AquaCrop

El ajuste del modelo AquaCrop para los materiales del cultivo de arroz seleccionados (tabla 2) se realizó siguiendo el esquema presentado en la figura 5, haciendo uso de la información suministrada por actores relacionados con el cultivo bajo estudio (tabla 3). El ajuste del modelo AquaCrop para Colombia se llevó a cabo utilizando información recopilada de investigaciones realizadas por FEDEARROZ, en el primer semestre de 2010 y 2011 para la zona Norte del departamento del Tolima, y para el municipio de Villavicencio en el departamento del Meta.

Tabla 3. Actores que suministraron información para el proceso de ajuste, Validación y aplicación del modulo de Arroz del modelo AquaCrop

Módulo	Actores
Clima	IDEAM
Cultivo	FEDEARROZ-ICA
SUELO	CORPOICA-IGAC- FEDEARROZ
Manejo agronómico	FEDEARROZ-FEDERRIEGO

Una descripción general del proceso de ajuste se puede encontrar en la figura 5. El esquema de trabajo para el ajuste del modelo AquaCrop 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 aprobar o desaprobado el ajuste, en tanto que los valores simulados son comparados (hacia uso de una medida de ajuste apropiada) con los resultados obtenidos en campo, la información histórica o la información secundaria que se tenga de los mismos. Si el ajuste obtenido no es el adecuado se procede a cambiar algún/algunos parámetros conservativos y se vuelve a iniciar el proceso descrito. En el caso del arroz, la bondad de ajuste se determinó por medio del seguimiento de la materia seca: se analizó que tan bien se ajustaba la acumulación de biomasa y rendimiento seco, el cambio en el índice de cosecha, y la evolución de la cobertura del dosel que arroja AquaCrop. El parámetro no conservativo que se movió para mejorar el ajuste del modelo fue el potencial de fertilidad, pues en los análisis de sensibilidad se encontró que el ajuste era bastante sensible al mismo.

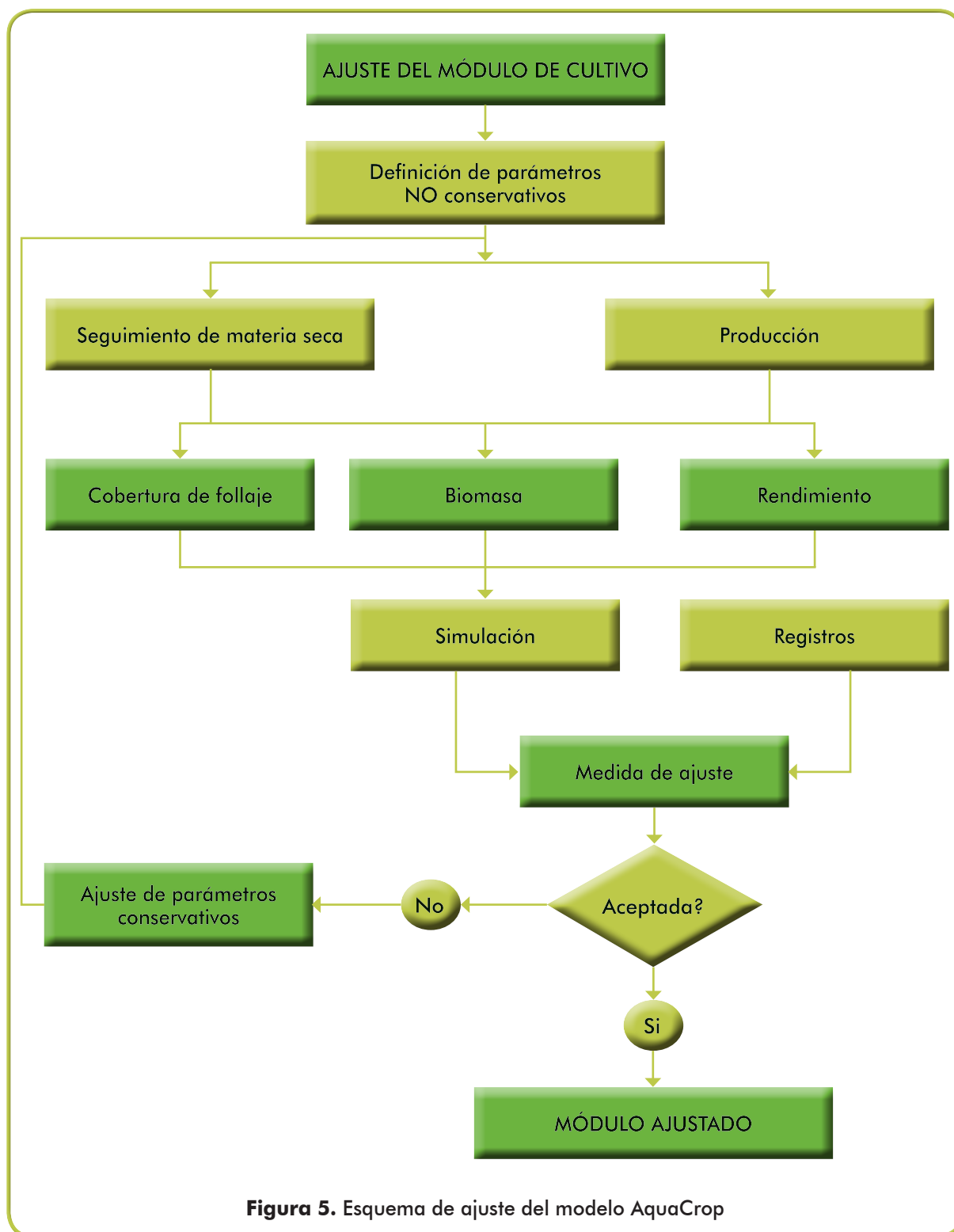


Figura 5. Esquema de ajuste del modelo AquaCrop

Toda la información empleada tanto en el proceso de ajuste, como en el de validación y aplicación del modelo AquaCrop se encuentra resumida en la tabla 4, agrupada 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 _o), Concentraciones de CO ₂ .	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. Todas las comparaciones de variación

porcentuales que se realizaron fueron respecto a los valores de los rendimientos finales en la etapa de ajuste del modelo. El análisis de sensibilidad se llevó a cabo sobre las siguientes entradas:

- Diferentes láminas netas de riego aplicadas
- Nivel freático
- Nivel de fertilidad del suelo
- Diferentes texturas de suelo

3.5. Validación de AquaCrop

La validación del modelo AquaCrop para el cultivo de Arroz se realizó en las zonas, materiales y en el primer semestre agrícola de los años indicados en la tabla 5 y consistió en realizar simulaciones utilizando el módulo del cultivo ajustado previamente, cambiando el tiempo de la fenología, de días a grados térmicos acumulados (GDA)⁴, con las condiciones de clima, suelo y manejo agronómico de cada zona en estudio. Se compararon las salidas del rendimiento del grano seco final, con las obtenidas en campo.

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

Lugar del experimento		Fecha de siembra	
Departamento	Municipio	F60	F174
Tolima	Armero	2010 - 2011	
	Ambalema		
	Venadillo		
Meta	Villavicencio ⁵		2009 - 2011

[4] El tiempo térmico o grados días acumulados (GDA) para el cultivo se obtuvo por medio de la siguiente ecuación, la cual está implícita en el modelo AquaCrop.

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$$

Donde n es el número de días, T_i es la temperatura media del día y T_b es la temperatura base, que es el umbral por encima del cual el vegetal está en condiciones de realizar sus funciones fisiológicas, por lo tanto crece y se desarrolla. Se tomó un T_b = 8 °C y una temperatura crítica de 35 °C para todo el ciclo del cultivo, las cuales son las indicadas por defecto en el modelo. Se usan éstas debido a que no se conocen las respectivas temperaturas bajo las condiciones tropicales de Colombia.

[5] La validación se hizo para cosechas diferentes a las utilizadas para hacer el ajuste.



Este proceso se desarrollo con información y colaboración suministrada por los actores relacionados con el cultivo bajo estudio (tabla 3).

3.6. Aplicación de AquaCrop

Con el objetivo de analizar (y validar) por medio de AquaCrop cuál es el comportamiento de los rendimientos del arroz ante variaciones en los patrones climáticos se procedió a aplicar el modelo AquaCrop ajustado previamente a tres fenómenos climáticos de vital importancia para el país: la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el fenómeno del Niño (ENSO) y el fenómeno del cambio climático. En las siguientes secciones se describen someramente estos fenómenos y se analiza el impacto que tienen sobre la productividad del cultivo de arroz.

3.6.1. Variabilidad Climática

Para analizar el impacto de la variabilidad climática sobre los rendimiento de arroz se realizaron simulaciones del cultivo de arroz manteniendo la oferta edáfica y tecnológica actual, sin limitación de fertilidad del cultivo, bajo escenarios de variabilidad climática intra-anual e inter-anual, entre los años 2000 a 2010, para los municipios de Villavicencio (Meta), Ambalema, Armero y Venadillo -región Norte- departamento del Tolima y entre 1981-2010 para los municipios de Espinal e Ibagué -región Norte- del departamento el Tolima.

Para el análisis de los efectos de la variabilidad climática intra-anual se propone realizar dos siembras en los dos semestres agrícolas (A y B). Para el análisis de los efectos de la variabilidad inter-anual, se identificará cada uno de los semestres (en los 10 años de análisis) bajo el efecto de alguna de las fases del ENSO: Niño, Niña o Neutro. Posteriormente se promediarán las salidas de rendimiento, por semestres agrícolas y por fase ENSO, con la intención de identificar máximas y mínimas producciones, y analizar las posibles razones de estos comportamientos.

Adicionalmente, para el departamento del Meta se evaluó el rendimiento bajo sistemas de riego, satisfaciendo la necesidad hídrica requerida por la planta, por lo que la lámina neta requerida por el cultivo de arroz también se determinó en el ejercicio de validación, mientras que para el departamento del Tolima se utilizaron dos dotaciones de riego: 4800 m³*ha⁻¹*ciclo y 2400 m³*ha⁻¹*ciclo para la zona de Mesetas y 4800 m³*ha⁻¹*ciclo y 3600 m³*ha⁻¹*ciclo par la zona Norte.

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 mutimodelo (IDEAM, 2010),

donde utilizaron tres modelos regionales: el modelo global de alta resolución GSM-MRI⁶ con resolución horizontal de 20 km * 20 km, el modelo PRECIS⁷ con resolución horizontal de 25 km * 25 km y el modelo CCSM-WRF⁸ 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.

Haciendo uso de estas predicciones se llevaron a cabo unas simulaciones utilizando la herramienta AquaCrop, con la intención de estudiar tanto los efectos del cambio climático, como las posibles medidas de adaptación del cultivo de arroz. Bajo los escenarios A2 y B2 de cambio climático se evaluó el porcentaje de cambio respecto al rendimiento del grano simulado con la normal de 1981-2010. Se resalta que en cada simulación se mantiene la oferta edáfica y tecnológica actual, y se asumen temperaturas máximas críticas que afectan la fase de floración y llenado del grano, las cuales han sido estudiadas en condiciones diferentes a las colombianas. Además no se tiene en cuenta la adaptación del cultivo a cambios en las condiciones climáticas. 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.

Para el caso del departamento del Tolima se estimaron los rendimientos aplicando una lámina de riego de 2 mm/día/ha y todas las demás condiciones se mantuvieron similares.

[6] Global Spectral Model - Meteorological Research Institute del Japón

[7] Providing Regional Climates for Impacts Studies del Reino Unido

[8] Community Climate System Model - Weather Research and Forecast de los Estados Unidos



4. RESULTADOS

4.1. Análisis agroclimático

En figura 6, se presentan climogramas que muestran la distribución intra-anual en la precipitación y temperatura mensual-multianual representativa de zonas productoras de arroz. Para La zona Norte del departamento del Tolima el análisis se realizó para la estación con mayor la disponibilidad de registros, que en este caso es la estación Granja Armero. En estas figuras se aprecia que en el Espinal, Ibagué y Armero presentan dos temporadas lluviosas comprendidas entre abril-mayo y octubre-noviembre, donde la distribución de las lluvias es irregular y dos épocas secas entre enero-febrero y julio-agosto. Por otro lado, Villavicencio presenta una época lluviosa entre marzo-noviembre y una seca entre diciembre - febrero.

En las zona de Tolima la siembra y desarrollo del cultivo del arroz están determinados por la disponibilidad hídrica, la cual está regulada principalmente por el riego, que es permanente y la fecha de siembra, la cual es determinada normalmente por el distrito de riego.

En la zona de Meta se cultivan principalmente dos ciclos, el primero está regido por la entrada de la temporada de lluvia y la disponibilidad de semilla en la zona. En este departamento el uso de riego es usado por una menor población, la cual puede tener acceso a tal sistema y es usado principalmente en la cosecha del segundo semestre agrícola del año.

La alta temperatura es una de las principales características de las zonas seleccionadas para el estudio, cuya altitud oscila alrededor de los 300 a 600 msnm. En la zona de Ibagué se presenta una temperatura media anual de 24 °C, temperatura mínima de 15.6 °C y temperatura máxima de 34.6 °C, siendo el trimestre Junio-Agosto el periodo donde se registran los valores más altos (figura 6. a).

En El Espinal se registra una temperatura media anual de 27 °C, temperatura máxima y mínima absoluta de 38.1 °C y 17.6 °C respectivamente. Siendo los periodos de Abril - Junio y Octubre – Diciembre cuando se registran medias mensuales más bajas; las mínimas más bajas se han presentado normalmente entre Junio y Julio, mientras que las máximas más altas se han presentan de Julio a Septiembre (figura 6. b).

En Armero se registra una temperatura media multianual de 27 °C, máxima y mínima de 33.4 °C y 12 °C respectivamente; esta temperatura mínima se registra normalmente en Agosto y Marzo (figura 6. c). Por otro lado, en Villavicencio se registra una temperatura media anual-multianual de 26.3 °C y temperatura máxima de 33 °C y mínima de 21 °C, las cuales se presentan en Febrero y Julio respectivamente (figura 6. d).

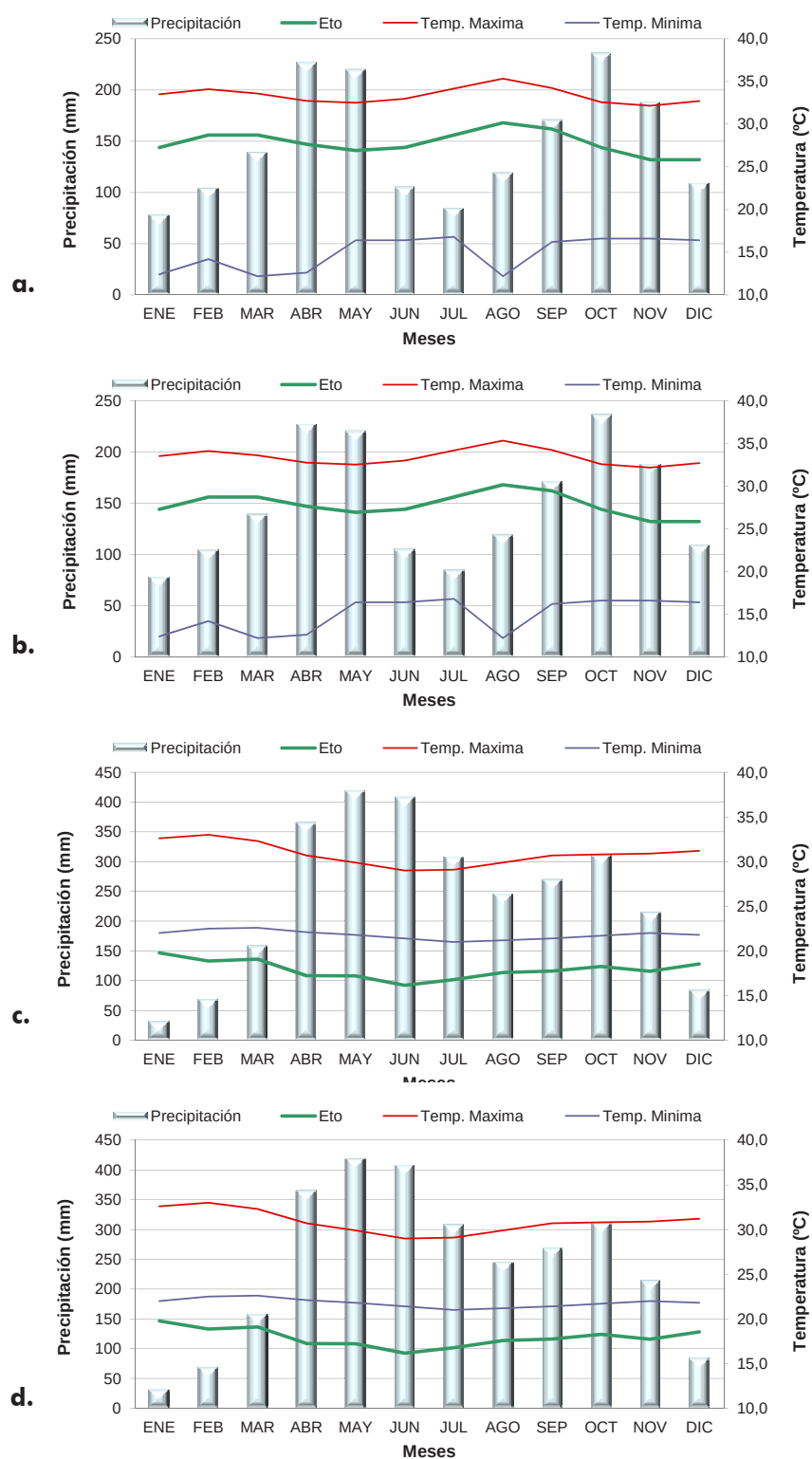


Figura 6. Climograma representativo de zonas productoras del Cultivo de Arroz en Colombia. En **a** Municipio de Ibagué, Tolima. En **b** Municipio de El Espinal, Tolima. En **c** Municipio de Armero, Tolima. En **d** Municipio de Villavicencio, Meta

A vertical strip on the left side of the page shows a close-up of rice panicles, with green glumes and yellowish grains, set against a blurred green background.

Las temperaturas mínimas bajas (15°C a 19°C), afectan el crecimiento y desarrollo de la planta de arroz. Especialmente cuando las plántulas de arroz están en el estado meiosis de las células madre del polen, o sea, de 10 a 11 días antes de la floración, pues causan alta esterilidad en las plantas (Satake 1969 citado por Degiovanni et al, 2010).

Las zonas de Tolima y Meta (figura 6), presentan altas tasas de evapotranspiración de referencia, influenciadas por el número de horas-día de brillo solar, altas temperaturas y moderados vientos en la región. La mayor tasa se presenta en época seca; en Tolima, en la temporada seca de mediados de año. El Espinal presenta las condiciones más secas, registrando mayor déficit hídrico (figura 6. b), en comparación a Armero (figura 6. c), Ibagué y Villavicencio, los cuales presentan mayores excesos hídricos (figura 6. a y 6. d).

4.2. Ajuste del modelo

Al momento de la elaboración de este documento no se contaba con información del seguimiento del desarrollo fenológico del cultivo de arroz o alguna otra medida que permitiera hacer un contraste entre valores simulados y valores medidos. No obstante, se presentan a continuación las salidas de algunas simulaciones del modelo que han mostrado rendimientos similares a los obtenidos en las dos zonas de estudio.

En la figura 7 se presentan salidas de simulaciones del modelo AquaCrop del seguimiento de la biomasa seca, rendimiento agronómico seco, índice de cosecha y Canopy Cover (CC) o follaje para los materiales de Arroz, FEDEARROZ 60 (F 60) y FEDEARROZ 174 (F 174), bajo las condiciones ambientales del departamento del Tolima y Meta respetivamente, para el primer semestre agrícola de 2009.

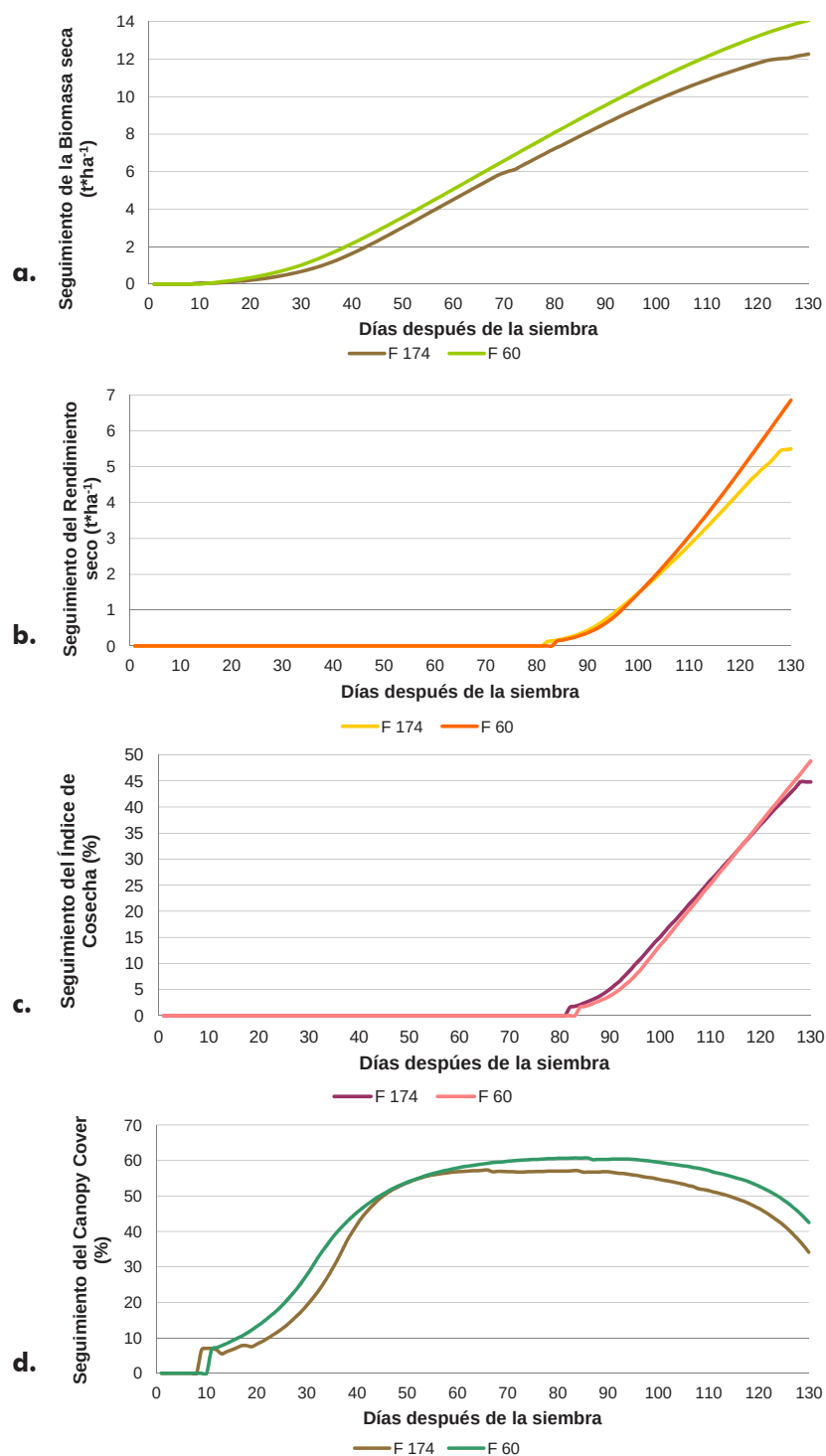


Figura 7. Simulaciones con el modelo AquaCrop para la variedad F 60 en el Norte del Tolima y el material F 174 en Villavicencio-Meta bajo las condiciones del primer semestre agrícola de 2009; del seguimiento de:
a. Biomasa seca; **b.** Rendimiento del grano seco; **c.** Índice de Cosecha y **d.** Canopy Cover.

El nivel de fertilidad del cultivo en el municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta, que mejor describe los rendimientos simulados corresponde a 65% aproximadamente, que representa un nivel de fertilidad moderado, acorde al indicado por los técnicos de la zona en las capacitaciones regionales. En el departamento del Tolima, específicamente para los municipios de la zona agroecológica del Norte (Armero, Ambalema y Venadillo), el nivel de fertilidad del cultivo que mejor se ajustó fue aproximadamente del 60 %, es decir unas condiciones moderadas. En la tabla 5 se presentan los valores finales de rendimiento del grano seco medidos en campo y los simulados para cada fecha de siembra de cada zona de estudio, en la cual se aprecia una similitud entre los valores finales simulados y los medidos en campo. Esto es corroborado en la figura 8, donde se presentan gráficamente los resultados de la tabla 5 y se observa con mayor claridad una similitud entre los valores de rendimiento de grano seco simulados con el modelo AquaCrop y los obtenidos a nivel de campo para las zonas de estudio, con los respectivos ajustes en el nivel de fertilidad del cultivo. Estos resultados están en un rango de aceptación del 15 % de diferencia entre los valores simulados y los obtenidos en campo (figura 8).

Tabla 5. Rendimiento del grano seco final de los materiales F 174 y F 60 medidos en campo y simulados con el modelo AquaCrop.

Material	Fecha de siembra	Lugar	Rendimiento simulado (t*ha ⁻¹)	Rendimiento Observado (t*ha ⁻¹)
F 174	6 de Mayo de 2009	Villavicencio - Meta	5.58	5.36
	15 de Mayo de 2009		5.50	5.31
F 60	15 de Abril de 2010	Armero - Tolima	5.19	4.86
	15 de Abril de 2010	Ambalema - Tolima	5.11	4.82
	15 de Abril de 2011		4.12	4.92
	15 de Abril de 2010	Venadillo - Tolima	5.25	5.0
	15 de Abril de 2011		4.42	4.97

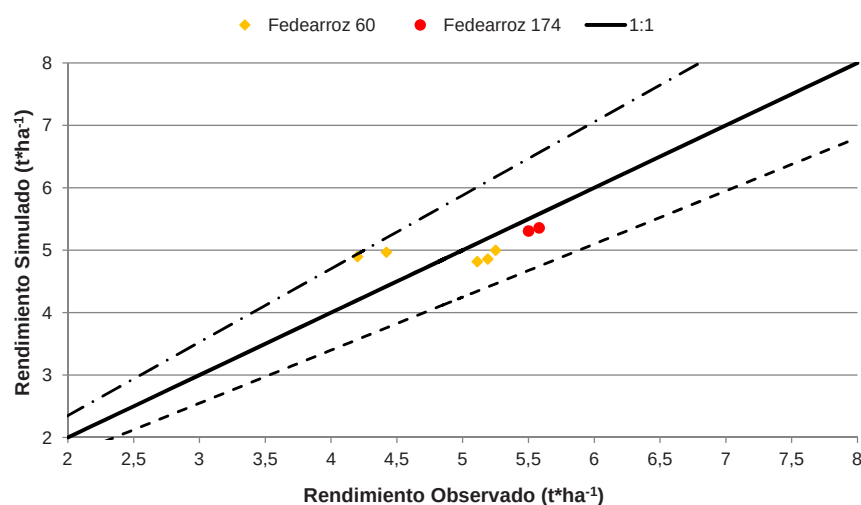


Figura 8. Valores del rendimiento agronómico simulado y observado del cultivo de Arroz para los materiales F 60 y F 174 en zonas de Tolima y Meta respectivamente, en fase de ajuste.

En la figura 9 se presenta la salida del modelo AquaCrop para el cultivo de Arroz para los materiales F60 con aplicación de riego, corrido en el norte de Tolima (figura 9. a) y F174 en secano en Villavicencio –Meta (Figura 9. b). Al analizar el desarrollo del follaje (CC-franja verde sombreada) y la disponibilidad de agua en la zona radicular (Dr-franja azul sombreada) para los materiales bajo estudio, se observa en la figura 9. a que las condiciones hídricas del Norte de Tolima fueron satisfechas por el riego corrido, el cual permitió que siempre se encontrara el suelo en condiciones saturadas y el rendimiento estuviera condicionado a la fertilidad del cultivo, y a otros factores que el modelo no evalúa, como manejo agronómico y control de plagas y enfermedades. El modelo en la figura 9. b indica que para las condiciones de Villavicencio-Meta en la fase de desarrollo del cultivo y de floración se presentó estrés hídrico por déficit de humedad en el suelo, lo que indujo una reducción de la expansión foliar y cierre de estomas, generando una reducción de la capacidad transpirativa de la planta, y ocasionando una disminución en la producción de biomasa seca y en consecuencia disminución de la producción del grano. En ocasiones la humedad en el suelo disminuyó a niveles por debajo del punto de marchitez permanente, causándose cierre estomático (línea roja) y algunas veces induciendo un inicio rápido de la senescencia (línea amarilla), lo que afectó el potencial de producción del grano de arroz. La franja gris sombreada indica el desarrollo de follaje potencial el cual no se alcanzó debido a algún efecto causado por estrés hídrico.

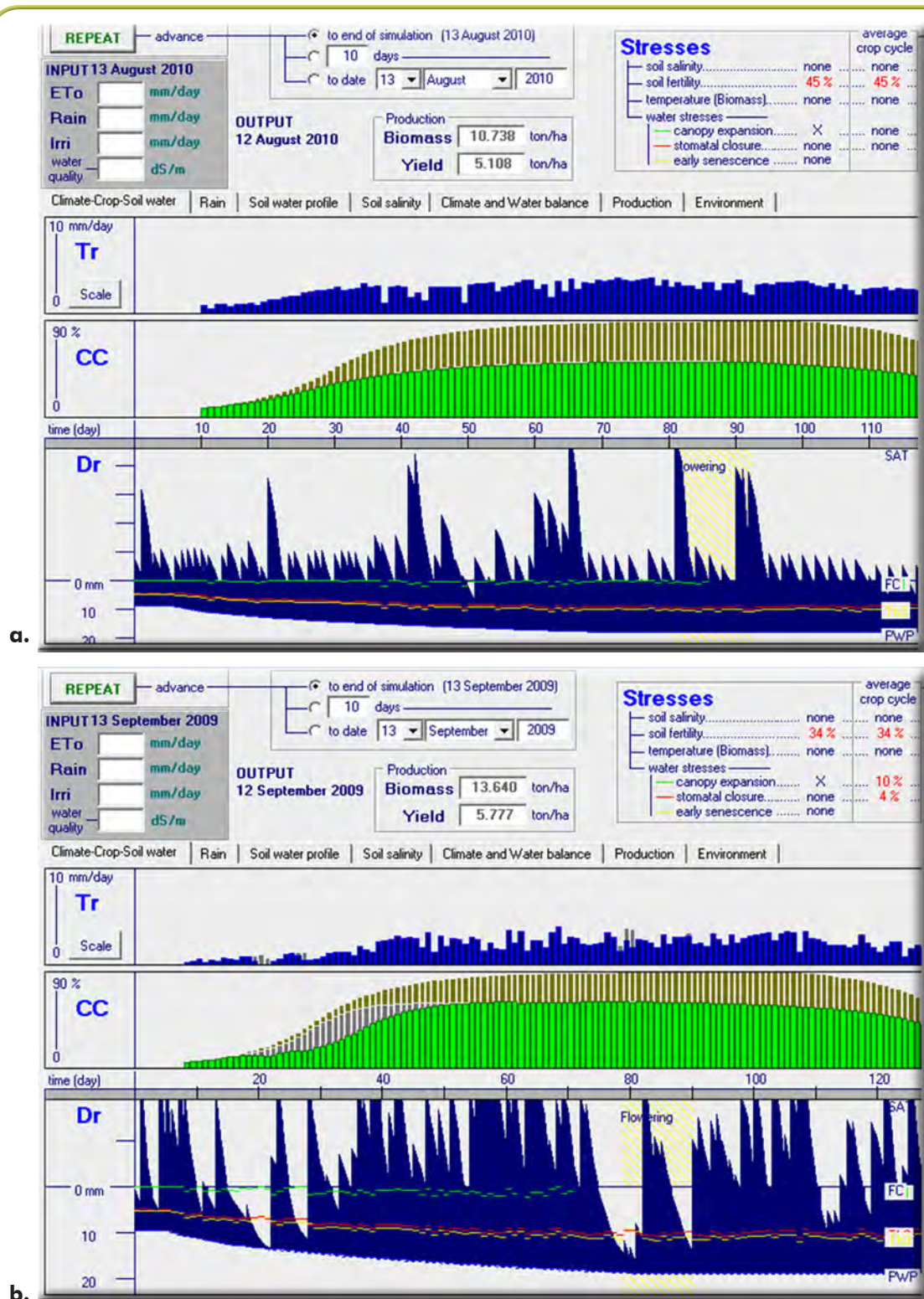


Figura 9. Salida del modelo AquaCrop para el cultivo de Arroz: **a.** Material F60 bajo las condiciones del Sem A- 2010 en Norte de Tolima con riego, y **b.** Material F174 bajo las condiciones del Sem A - 2009 en Villavicencio-Meta en seco.

4.3. Análisis de sensibilidad

4.3.1. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferente aplicaciones de riego

En la figura 10 se muestra la variación del rendimiento de grano seco para diferentes láminas netas de riego aplicadas para la totalidad del ciclo vegetativo. Según el modelo AquaCrop, las variaciones más altas respecto al rendimiento observado (4.9 t*ha^{-1}) se obtienen con láminas netas entre 4800 y $6000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ciclo}$ del cultivo, lo que equivale a una dotación diaria que va de 1.1 L*s^{-1} a 1.4 L*s^{-1} , en jornadas de riego de 10 hora*día^{-1} para mantener el suelo en condiciones de saturación. Observe que el modelo estima una variación negativa respecto al rendimiento observado para volúmenes menores a $3600 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ciclo}$ del cultivo, lo que equivale a una dotación diaria menor de 1 L*s^{-1} .

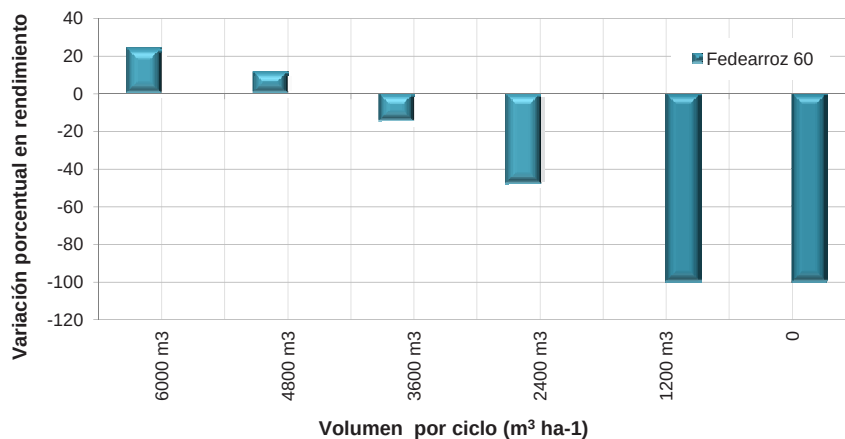


Figura 10. Variación del rendimiento de grano seco respecto al rendimiento observado según el modelo AQUACROP variando la lámina neta total de riego.

4.3.2. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles freáticos

Al evaluar el comportamiento del rendimiento del grano en relación con el nivel freático, como se aprecia en la figura 11, se observa que para un rango de profundidades del nivel freático cercano 1.2 metros se presentaría una disminución en el rendimiento del grano hasta del 15% , y para niveles freáticos elevados aproximadamente a 0.8 metros de la superficie, se tendría un aumento en el rendimiento del grano cercano al 20% . Cabe anotar que el cultivo de arroz-riego no tuvo en cuenta el nivel freático para la realización para este ejercicio.

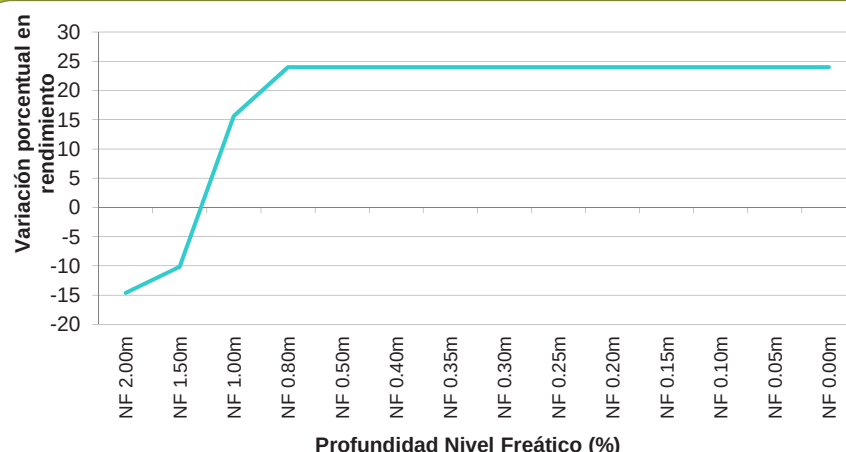


Figura 11. Variación del rendimiento del grano seco simulado con el modelo AquaCrop bajo diferentes profundidades del nivel freático

4.3.3. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de fertilidad de suelos

En la figura 12 se presenta la variación del rendimiento del grano seco para diferentes niveles de fertilidad del cultivo usados por la herramienta AquaCrop. El modelo indica una alta sensibilidad al nivel de fertilidad del cultivo; al presentarse una reducción ó aumento de la fertilidad del cultivo, se castiga o fortalece el desarrollo del follaje y en consecuencia la producción de biomasa seca total y rendimiento del grano. En la figura 12 se observa que para condiciones de fertilidad del cultivo del 100% se puede lograr un aumento potencial del rendimiento cercano al 40%, con respecto al rendimiento del grano estimado en la fase de ajuste con un nivel de fertilidad del 70%.

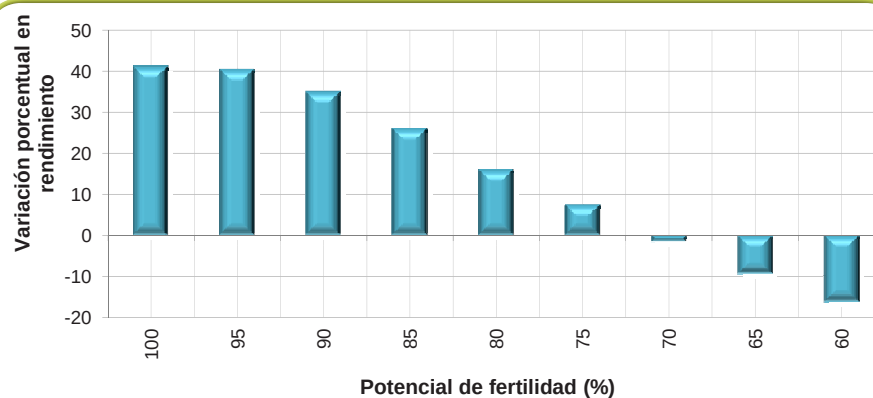
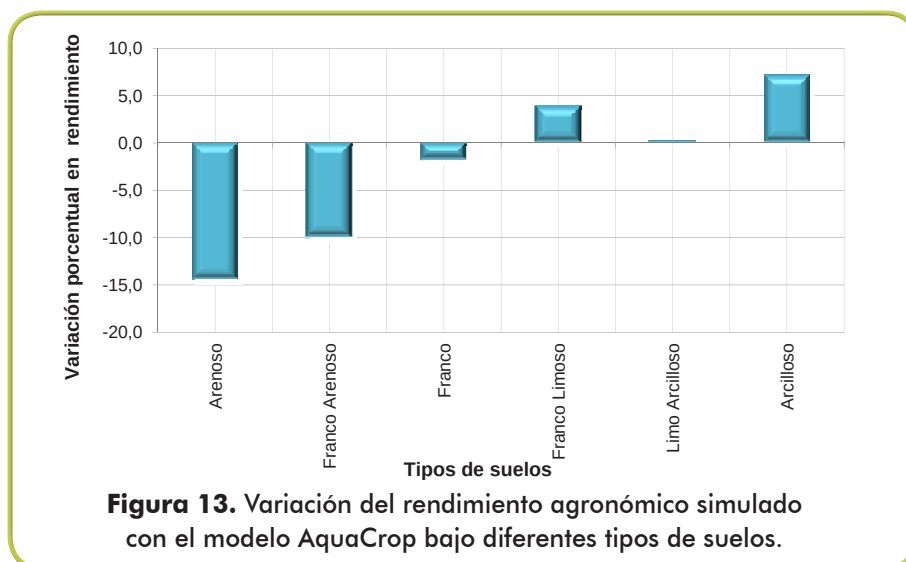


Figura 12. Variación del rendimiento del grano seco simulado con el modelo AquaCrop bajo diferentes niveles de fertilidad del cultivo

4.3.4. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas de suelo

En la figura 13 se puede apreciar la variación del rendimiento en grano seco en función del tipo de suelo, donde cada tipo de suelo posee unas características hidrofísicas diferentes. Observe que el desarrollo del cultivo de arroz lo favorece en general los tipos de suelos finos (franco limoso, franco arcilloso y arcilloso); en contraste los suelos más porosos (arenoso, franco arenoso y franco) presentan una disminución hasta de en un 15% en el rendimiento.



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).

En la tabla 6, se observan los resultados de rendimiento de grano seco simulados respecto de los valores observados en campo para cada zona de estudio. Para el caso de las simulaciones realizadas para el departamento del Meta se puede apreciar una buena concordancia, es decir el grupo de parámetros conservativos y no conservativos empleados en la fase de ajuste reproducen de manera óptima los periodos seleccionados para la validación, y cuando se comparan los promedios semestrales municipales del rendimiento real del grano de arroz de la variedad F 174, con un promedio de varias simulaciones en diferentes fechas de siembra en dicho semestre evaluado, con dos niveles de fertilidad del cultivo 50 y 60 %, correspondientes a un nivel moderado, se encuentra una similitud entre los

valores simulados y los obtenidos en campo. Para el caso del departamento del Tolima, los mismos parámetros No Conservativos usados para la zona Norte se ajustaron muy bien para la zona Mesetas, realizando solo una variación en la lámina de riego aplicada ($4 \text{ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}$) y el porcentaje del nivel de fertilidad de 70%.

Los datos de la tabla 6 se representan gráficamente en la figura 14, la cual corrobora indica y corrobora la similitud entre los valores de rendimiento de grano seco simulados con el modelo AquaCrop y los obtenidos a nivel experimental en campo, para las zonas de estudio, con respectivos ajustes en el nivel de fertilidad del cultivo. Estos resultados están en un rango de aceptación del 15 % de diferencia entre los valores simulados y los obtenidos en campo (figura 14). Estos niveles de fertilidad del cultivo, de acuerdo a las simulaciones del modelo AquaCrop, presentan coherencia con los esperados en los ensayos establecidos por el gremio, centros de investigación y productores de la zona. Siendo así, el módulo de Arroz ajustado para los materiales F60 y F 174 representa con aceptable precisión los rendimientos esperados en campo en las zonas y fechas evaluadas (tabla 6).

Tabla 6. Rendimiento en grano seco final del material F 174 y F 60 medido en campo y simulado con el modelo AquaCrop, fase de validación.

Material	Fecha de siembra	Lugar	Rendimiento simulado ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Rendimiento Observado ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)
F174	Primer semestre de 2009	Villavicencio – Meta	4.85	5.1
	Primer semestre de 2010		4.76	4.1
	Primer semestre de 2011		4.8	4.31
F60	Primer semestre de 2008	El Espinal – Tolima	6.94	6.84
	Primer semestre de 2009		6.12	6.33
	Primer semestre de 2008	Ibagué – Tolima	7.30	6.84
	Primer semestre de 2009		7.24	6.86
	Primer semestre de 2010		6.10	6.9

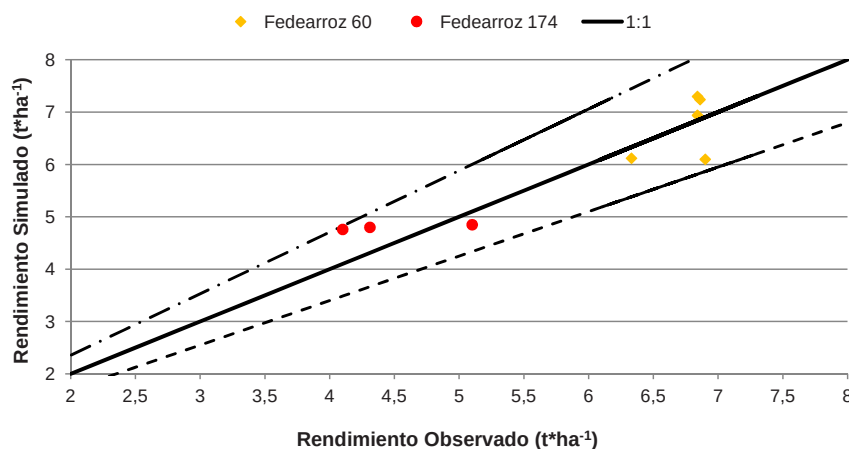


Figura 14. Valores del rendimiento agronómico simulado y observado del cultivo de Arroz para los materiales F 60 y F 174 en zonas de Tolima y Meta respectivamente, en la fase de validación.

Los resultados presentados en el ajuste y validación del modelo AquaCrop para el módulo del cultivo de Arroz para los materiales F60 y F174, corrobora los resultados encontrados por Saadati et al., (2011), quienes calibraron y validaron el modelo AquaCrop para una variedad de arroz de tierras bajas locales (Champa-Kamfiroozi) en el área de Kooshkak (clima semi-árido), provincia de Fars – Irán; según este estudio, el modelo es eficiente en la simulación de cobertura de follaje y en el rendimiento de grano de arroz bajo diferentes gestiones de riego.

4.5. Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático

Los umbrales climáticos para los cuales el arroz puede presentar un rendimiento adecuado son: rango de temperatura base entre 8 °C a 35 °C y de precipitación entre 180 a 300 mm*mes, (Yoshida, 1981).

En las siguientes subsecciones se presentan los resultados de la aplicación del modelo AquaCrop a los fenómenos de variabilidad y cambio climático. El comportamiento de los rendimientos del cultivo de arroz está determinado por los cambios climáticos en relación con los rangos óptimos mencionados anteriormente.

4.5.1. Variabilidad Climática

En la figura 15 se presentan los resultados del rendimiento potencial del grano seco del cultivo de arroz simulados bajo condiciones de fenómenos de variabilidad climática intra-anual (ZCIT) e inter-anual (ENSO) en Villavicencio - Meta, además se evalúa el rendimiento bajo sistemas de riego, satisfaciendo la necesidad hídrica requerida por la planta, determinando por lo que la lámina neta requerida por el cultivo de arroz. Estos resultados indican que en el primer semestre agrícola del año se registrarían los mayores valores del rendimiento debido a que las condiciones climáticas son más adecuadas que las presentes en el segundo semestre, en el cual se espera que se presente una mayor variabilidad del rendimiento esperado (figura 15. a), debido a la disminución del volumen de lluvia y la irregularidad de la distribución de ella; en consecuencia, los requerimientos hídricos adicionales suministrados por sistemas de riego son mayores en el segundo semestre agrícola (figura 15. b). Además, el modelo indica que bajo las mismas condiciones tecnológicas del cultivo y satisfaciendo la necesidad hídrica de la planta con un sistema eficiente, los rendimientos esperados en ambos semestres no presentan diferencias significativas ($P > 0.05$).

En la figura 15.c se aprecia el promedio del rendimiento del grano seco simulado bajo condiciones influenciadas por el fenómeno ENSO, donde se observa que el obtenido en escenarios Niña es más alto en comparación con el simulado en condiciones de fase Niño ó neutro; aunque la demanda hídrica por riego es mayor bajo condiciones Niño del fenómeno (figura 15. d). Bajo cualquier fase del fenómeno ENSO se presenta una variabilidad del rendimiento agronómico (figura 15. c), lo que está asociada a una incertidumbre de las condiciones climáticas de Villavicencio-Meta lo que induce a que el cultivo de arroz presente variación en desarrollo, producción, y alto rendimiento del grano, siendo más apreciable en el segundo semestre agrícola del año.

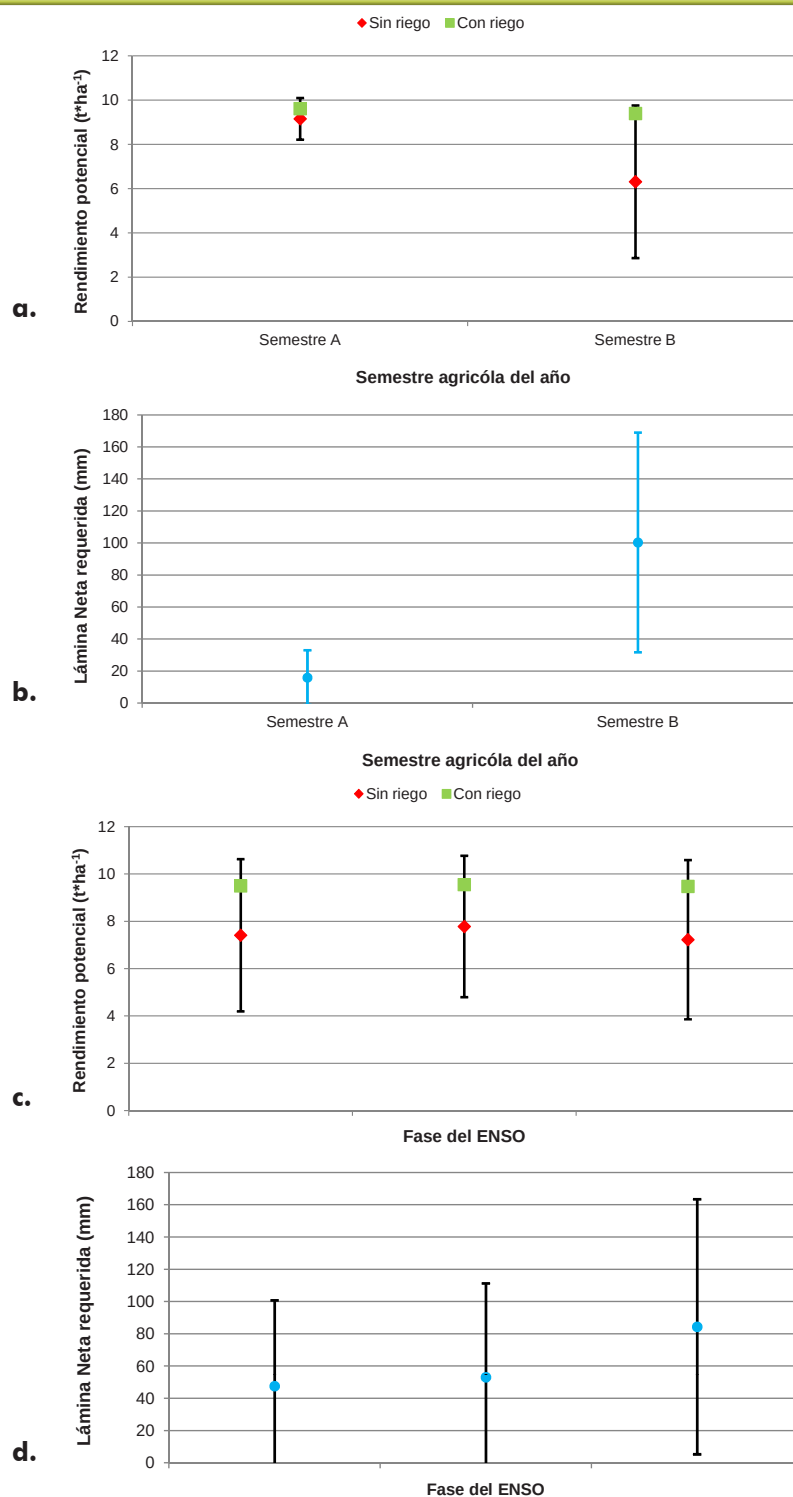


Figura 15. Rendimiento agronómico seco del cultivo de arroz y la lámina neta requerida simulado con el modelo AquaCrop bajo condiciones de variabilidad climática en Villavicencio – Meta. En **a** Variabilidad intra-anual-ZCIT. En **b** Lámina neta requerida por el cultivo (ZCIT). En **c** Variabilidad inter-anual -ENSO. En **d** Lámina Neta requerida por el cultivo (ENSO).

Al analizar el comportamiento del rendimiento potencial agronómico del cultivo de arroz simulado con dos dotaciones de riego bajo condiciones de fenómenos de variabilidad climática intra-anual (ZCIT) en la zona de la Meseta y Norte del Tolima, los resultados indican que en ambas zonas con una dotación de $2400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ciclo}$ y $3600 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ciclo}$ respectivamente, los mayores valores del rendimiento en promedio se presentarían en el segundo semestre agrícola del año (figura 16. a y figura 17. a). Al evaluar el rendimiento del grano con aplicación de riego de $4800 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ciclo}$ en ambas zonas, el modelo indica que esta lamina satisface el requerimiento hídrico del cultivo, manteniendo el cultivo inundado en todo momento, lo que muestra que los rendimientos más altos se esperan en el segundo semestre agrícola, lo cual se debe a que en este semestre la temperatura favorece mejor al cultivo, además que los niveles de radiación solar son mayores.

En la figura 16. b y 17. b se aprecia el promedio del rendimiento del grano seco simulado bajo condiciones influenciadas por el fenómeno ENSO, donde se observa que en la zona de la Meseta – Tolima, se presentaría bajo condiciones Niño el rendimiento más bajo, seguido del esperado bajo condiciones neutras (figura 16. b) y en la zona Norte el rendimiento más bajo se presentaría bajo condiciones Niño (figura 17. b). Lo anterior se aprecia en ambas zonas bajo las dos diferentes láminas de riego. El rendimiento potencial obtenido de simulaciones realizadas bajo condiciones Niño y Neutro según la clasificación del ONI⁹, presenta gran variabilidad, asociado con la incertidumbre de las condiciones climáticas que se presentan en esta zona, especialmente una irregularidad en la distribución y volúmenes de lluvias, lo que influye en un adecuado desarrollo y producción de la planta, para así obtener un alto rendimiento del grano de arroz.

[9] Oceanic Niño Index.



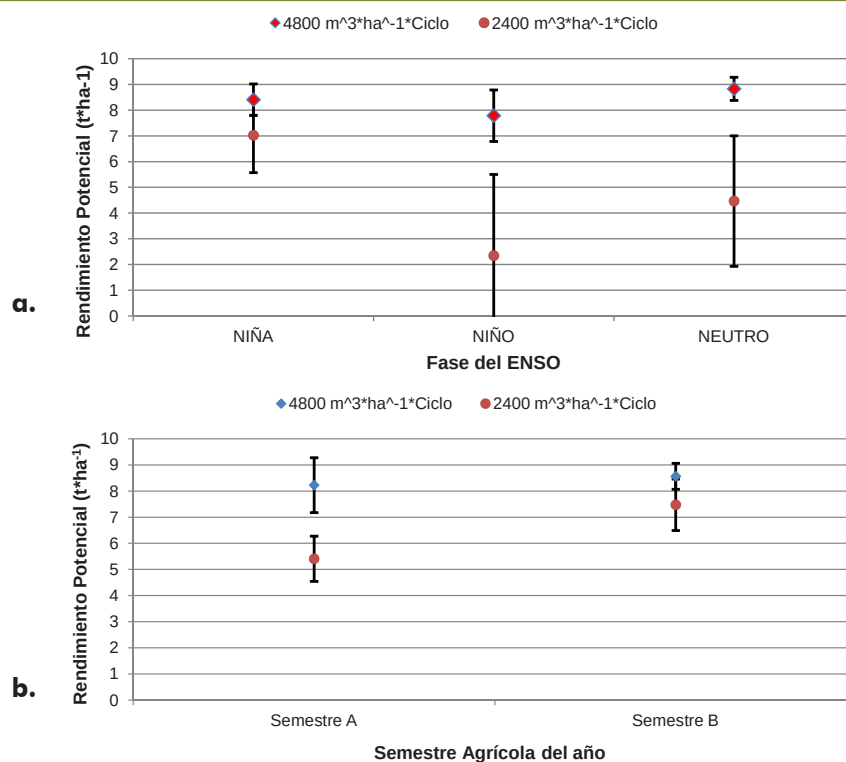


Figura 16. Rendimiento agronómico seco del cultivo de arroz y la lamina neta requerida simulado con el modelo AquaCrop bajo condiciones de variabilidad climática en la región de la Meseta de Tolima. En **a** Variabilidad intra-anual-ZCIT. En **b** Variabilidad inter-anual -ENSO.

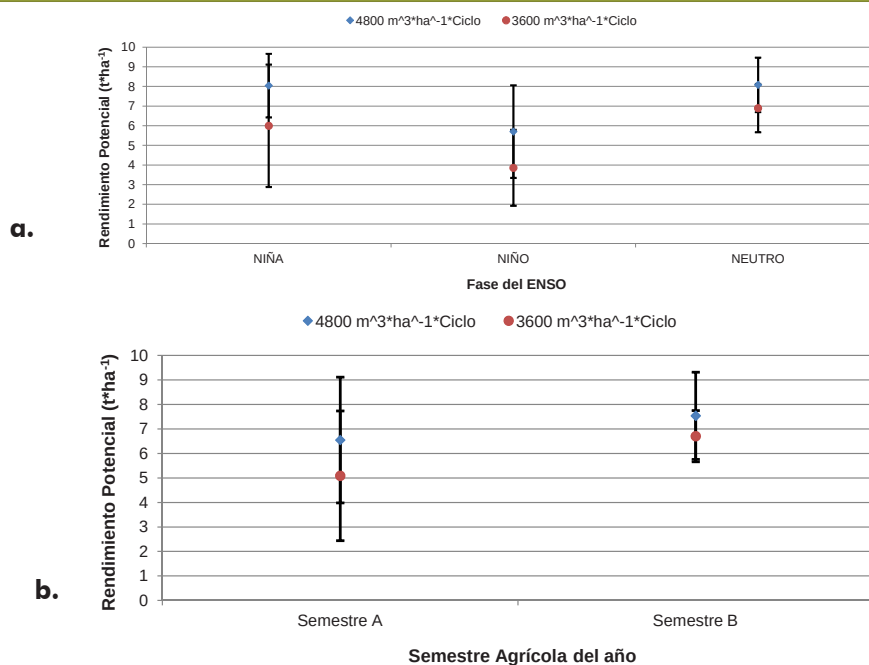


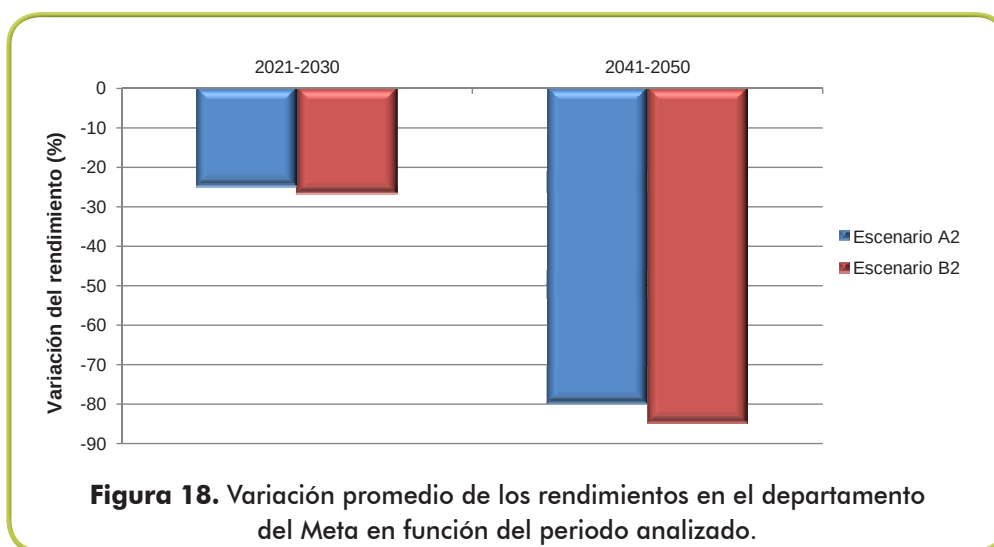
Figura 17. Rendimiento agronómico seco del cultivo de arroz y la lamina neta requerida simulado con el modelo AquaCrop bajo condiciones de variabilidad climática en la región del Norte de Tolima. En **a** Variabilidad intra-anual-ZCIT. En **b** Variabilidad inter-anual -ENSO.

En general las fechas de siembra para obtener rendimientos altos del cultivo de arroz en las zonas evaluadas entre 2000 a 2010, bajo influencia del ENSO fase Niño, se debieron retrasar en el primer semestre y adelantar en el segundo semestre agrícola del año. Si el primer semestre esta bajo la influencia de la fase Niña, las fechas de siembra se pueden adelantar y si es el segundo semestre agrícola se pueden retrasar. En condiciones neutras las fechas de siembra son más aleatorias.

4.5.2. *Afectaciones del Cambio Climático sobre el arroz*

El rendimiento potencial promedio simulado con el modelo AquaCrop entre 1981 a 2010 para la zona de Villavicencio-Meta es de $9.3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, rendimiento que se podría obtener con un excelente manejo agrícola.

Según las condiciones climáticas proyectadas por el escenario A2 el rendimiento del arroz tendría una reducción hasta del 25% y 80% para las décadas del 2021 a 2030 y 2041 a 2050 respectivamente. Bajo las condiciones del escenario B2 para las décadas 2021 a 2030 y 2041 a 2050 se espera una disminución en el rendimiento del grano hasta de 27% y 85% respectivamente (figura 18). Dicha disminución en ambos escenarios y décadas sería debido a la presencia de altas temperaturas máximas ($>35^\circ\text{C}$), que afectarían el proceso de floración de la planta de arroz. A demás en ambos escenarios la mayor afectación se presentaría en el segundo semestre agrícola del año.

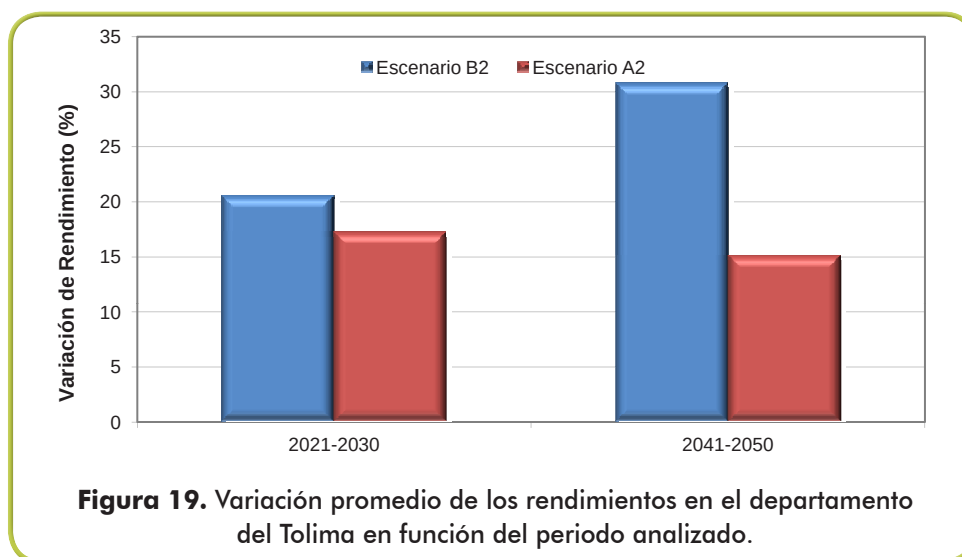


En relación con la aplicación del modelo en el departamento del Tolima, el rendimiento para el periodo 1981-2010 (correspondiente al promedio de los registros disponibles) es de 7.1 Ton/ha . Para el caso de los escenarios A2 en la década 2021-2030 y manteniendo una aplicación de riego de 2 mm/día/ha se aprecia un incremento de 17.2% respecto al periodo de referencia 1981-2010. Para el mismo escenario pero en el periodo 2041-2050 con la misma aplicación de riego mencionada se aprecia un incremento 15.1% respecto al periodo 1981.2010, ver figura 19.

Para los escenarios B2 en la década 2021-2030 y manteniendo una aplicación de riego de 2 mm/día/ha se aprecia un incremento de 20.6% respecto al periodo de referencia 1981-2010. Para el mismo escenario pero en el periodo 2041-2050 con la misma aplicación de riego mencionada se aprecia un incremento 30.8% respecto al periodo 1981.2010.

Para los dos casos se aprecia un incremento superior en el escenario B2 sobre el A2. En el escenario A2 se aprecia un incremento menor para la década 2041-2050, mientras que en esa misma década para el escenario B2 se puede observar un aumento en el rendimiento respecto a la década 2021-2030. De este comportamiento se puede inferir que en la simulación del cultivo de arroz con el modelo AquaCrop para estos escenarios de cambio climático; un incremento en concentraciones de CO₂ (no muy alto) y un incremento de temperaturas (no muy alto) puede llegar a beneficiar el rendimiento del grano cosechado al menos para el departamento del Tolima.

Es importante mencionar que los datos de clima proyectados para cada uno de los escenarios se obtienen a una escala mensual, y el modelo AquaCrop los recibe y redistribuye a escala diaria, proporcionando a cada día del mes un dato de lluvia lo cual no corresponde con lo que ocurre realmente en el espacio. Esta asunción implica que los registros sin riego y con riego que estima el modelo pueden ser similares dado que siempre se tendrá una oferta hídrica disponible a nivel diario.



Las proyecciones climáticas para las décadas de 2021 a 2030 y 2041 a 2050, que son generados de los escenarios A2 y B2, indican que el volumen de precipitación disminuye, y la temperatura del aire aumenta, lo que provocaría un incremento en la tasa de la evapotranspiración, en consecuencia se presentaría una mayor demanda de lámina de riego en el cultivo. Es de anotar que para el presente ejercicio de simulación, se tomaron proyecciones de escenarios climáticos con alta incertidumbre y se mantuvo la oferta tecnológica actual en el manejo del cultivo. Además de lo anterior; no se tuvo en cuenta la resiliencia del cultivo de arroz a un posible incremento de la temperatura máxima del aire.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados presentados en esta cartilla sugieren que el modelo AquaCrop presenta similitud con los resultados del rendimiento del grano de las variedades del cultivo de arroz evaluadas en las zonas productoras bajo estudio. El modelo AquaCrop y ETo Calculator son una buena herramienta para la simulación de cultivo y para el diseño de estrategias en la toma de decisiones frente a los efectos de la variabilidad y cambio climático o para optimizar la productividad del cultivo.

Los resultados indican que los fenómenos de variabilidad climática inter-anual (Fenómeno ENSO) y intra-anual (ZCIT), tienen influencia en el desarrollo y rendimiento agronómico del cultivo de arroz en las zonas de estudio. En lo concerniente a cambio climático, se observa que bajo los escenarios A2 y B2 las zonas productoras de arroz del Tolima y Meta presentarían afectaciones al presentarse cambios en el patrón de precipitación e incremento de las temperaturas máximas del aire. Estas condiciones afectarían el cultivo de arroz, reduciendo considerablemente el desarrollo y rendimiento del grano. Bajo los dos Escenario sería necesario la aplicación de riego para establecer el cultivo. Así mismo, se observó que bajo estos dos escenarios las fechas de siembra no estarían en el rango normal.

Con base en los ejercicios llevados a cabo en esta cartilla, puede concluirse que AquaCrop es una herramienta útil para elegir apropiadamente fechas idóneas de siembra y para tomar decisiones de adaptación a efectos asociados con fenómenos (variabilidad climática) ambientales y antropógeno (precios, demanda, oferta). Adicionalmente, también es útil para hacer un uso eficiente del agua en los sistemas de riego, diseñar políticas públicas de uso y manejo eficiente del agua en el sector agropecuario de Colombia, realizar una zonificación agroclimáticamente para cultivos estudiados y tomar decisiones para aumentar la productividad del cultivo, haciendo más productiva el agua.

Por último y a pesar de los buenos resultados obtenidos con el modelo, existe aún una serie de elementos que pueden mejorarse. Para el proceso de calibración y validación del modelo AquaCrop, es necesario hacer mediciones en campo de las variables del cultivo, como el seguimiento del canopy cover o follaje, la biomasa seca, rendimiento del grano seco, índice de cosecha, así como conocer el porcentaje de fertilidad del suelo asimilado por la planta, en ensayos diseñados bajo condiciones óptimas de manejo agronómico, control de plagas y enfermedades. También es necesario conocer el nivel de fertilidad del suelo para cada simulación y el índice de cosecha potencial (Hlo), ya que estos dos parámetros son muy sensibles y son determinantes para obtener un buen resultado de la salida del modelo.



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.
- Barona, E. (2010). *Importancia de la semilla de arroz*. Revista Arroz.
- Castillo, F., & Castellvi Sentis, F. (1996). *Agrometeorología*. Madrid: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación.
- DANE. (2011). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Bogotá D.C: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)- Dirección de Metodología y Producción Estadística (DIMPE).
- DANE. (2011). *Resultados de la encuesta nacional agropecuaria*. Bogotá: Departamento nacional de estadísticas.
- Degiovanni, V., Martinez, C., & Motta, F. (2010). *Producción ecoeficiente del arroz en América Latina*. Cali: CIAT.
- Evans, L. (1975). *Crop Fisiology*. Cambridge: Cambridge University.
- FAO. (2000). *Evapotranspiración del cultivo*. ROMA: FAO.
- Finagro. (2012). *Fondo para el financiamiento del sector agropecuario*. Recuperado el 21 de Marzo de 2012, de <http://www.finagro.com.co>
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *2° 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). *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.
- IPCC. (1996). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Obtenido de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html>.
- IPCC. (2000). *SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS*. A Special Report of IPCC Working Group III: Summary for Policymakers.
- Labrín, N. (2007). *Estudio de la resistencia en variedades de arroz (Oriza Sativa L.) venezolanas al virus de la hoja blanca*. Turrialba: CATIE.
- 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.
- 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.
- Raes, D., & et Al. (2011). *AquaCrop User's Guide*. Roma: FAO.
- 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.
- Ruíz, F. (2010). *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100)*. IDEAM-METEO, Bogotá D.C.
- Saadati Z., P. N. (2011). Calibration and evaluation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. 2011, . R.56.5/Poster/14 . ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 15-23 October. Tehran, Iran.
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. Manila: The international rice research institute.

Anexo

ADAPTACIÓN DEL MODELO AQUACROP

Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad FEDEARROZ 60	Variable	Parámetro		Fuente
					Conser- vativo	No Conser- vativo	
CLIMA	PRECIPITACIÓN	Precipitación	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
	TEMPERATURA	Temperatura Máxima	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
		Temperatura Mínima	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
	ETO	Humedad Relativa	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
		Insolación	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
		Velocidad del Viento	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
		Evapotranspiración de referencia	EST. NATAIMA 2008	X			IDEAM
	CONCENTRACIONES DE CO ₂	Concentraciones de CO ₂	Mauna Loa-Hawai				Escenarios IPCC SRES
CULTIVO	DESARROLLO	Fecha de siembra	15 de Abril de 2009				
		Tipo de Siembra	Directa			X	FEDEARROZ 2012
		Densidad de Siembra (Plantas /ha)	3500000			X	Resultado ajuste del modelo
		Tamaño de follaje a la siembra (cm ² /planta)	350		X		Resultado ajuste del modelo
		Cobertura de dosel inicial	8,99			X	Resultado ajuste del modelo
		Días a emergencia	10			X	FEDEARROZ 2012
		Dosel máximo (%)	94			X	Resultado ajuste del modelo
		Días a dosel máximo	10			X	Resultado ajuste del modelo
		Coficiente de crecimiento de dosel	8,1			X	Por defecto en el modelo
		Coficiente de decaimiento del dosel	8,1			X	Por defecto en el modelo
		Días a senescencia	100			X	Fereres (2012), comunicación personal
		Duración ciclo	120			X	FEDEARROZ 2012
		Días tuberización				X	
		Duración de tuberización			X		
		Profundidad mínima de raíces (mts)	0,1			X	FEDEARROZ 2012
		Profundidad máxima de raíces (mts)	0,2			X	FEDEARROZ 2012
		Días a máxima profundidad de raíces	70			X	FEDEARROZ 2012
		Tbase min (°C)	8		X		
		Tbase max (°C)	35		X		
	ET	Efceto de follaje muerto en la última etapa (%)	50		X		Por defecto en el modelo
		Coefiente de transpiración (Kc)	1,1		X		Por defecto en el modelo
CULTIVO	PRODUCCIÓN	Índice de cosecha- HI-(%)	50			X	No aplica
		Productividad hídrica (g/m ²)	19		X		Fereres (2012), comunicación personal

Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad	Variable	Parámetro		Fuente
			FEDEARROZ 60		Conser- vativo	No Conser- vativo	
CULTIVO	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	10		X		Por defecto en el modelo
	ESTRÉS SALINIDAD	Tipo de salinidad	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
SUELOS	CARACTERÍSTICAS DE HORIZONTES	Horizontes	2	X			
		Descripción 1	Franco Arcilloso	X			IGAC 2004
		Espesor	0,30				
		Punto de Marchitez Permanente	10	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Capacidad de Campo	20	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Punto de Saturación	43	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Conductividad Hidráulica Saturada	273	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Descripción 2	Franco Arenoso	X			IGAC 2004
		Espesor	0,90				
		Punto de Marchitez Permanente	10	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Capacidad de Campo	18	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Punto de Saturación	41	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
		Conductividad Hidráulica Saturada	496	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
	SUPERFICIE	Curva Numero	75	X			Por defecto
		Agua rápidamente evaporable (REW)	9	X			Por defecto
	CAPA RESTRICTIVA	Profundidad de capa restrictiva	No considerada	X			NO APLICA
	AGUA SUBTERRÁNEA	Profundidad de Nivel Freático	No considerada	X			
MANEJO	RIEGOS	Requerimientos netos de riego		X			Riego corrido aplicación 4 mm diarios, FEDERRIEGO 2012
	FERTILIDAD	Nivel de fertilidad	No limitante	X			Resultado ajuste del modelo
SIMULACIÓN	PERIODO DE SIMULACIÓN	Fecha inicio de simulación	19/04/2009	X			
		Fecha fin de la simulación	12-ago-09	X			
	CONDICIONES INICIALES	Condiciones iniciales de humedad	Capacidad de Campo	X			