



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Intercomparación de modelos ecofisiológicos para el análisis de la productividad del cultivo de arroz en Colombia

Jeferson Rodriguez-Espinoza

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ciencias agropecuarias
Palmira, Colombia

2023

Intercomparación de modelos ecofisiológicos para el análisis de la productividad del cultivo de arroz en Colombia

Jeferson Rodriguez-Espinoza

Tesis o trabajo de investigación presentada (o) como requisito parcial para optar al título
de:
Magister en Ciencias agrarias

Director:

Ph.D. Julian Armando Ramirez Villegas

Codirector (a):

Ph.D. Maria Sara Mejía de Tafur

Línea de Investigación:

Fisiología vegetal

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ciencias agropecuarias
Palmira, Colombia

2023

Dedicatoria

A mi querida madre, Nubia. Como la tierra firme, siempre has sostenido mis sueños. Te debo cada éxito.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Jeferson Rodriguez Espinoza

Fecha 26/01/2024

Agradecimientos

En primer lugar, mi gratitud a la Alianza de Bioversity International y al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), particularmente a los programas de investigación de Arroz y al legado del área de investigación en Análisis de Políticas y Decisiones (DAPA), A todos mis colegas del equipo de modelación de Climate Action, gracias por sus aportes, discusiones, y debates, han enriquecido enormemente este trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia, Siempre orgullo por esta institución. Agradezco a todo el personal docente y a todas las personas involucradas en la formación y desarrollo profesional de sus estudiantes.

Mi agradecimiento a la Federación Nacional de Arroceros de Colombia, FEDEARROZ, y en particular a la Subgerencia Técnica y su equipo de profesionales. Su constante apoyo, conocimiento y amabilidad han sido indispensables en cada zona arrocera del país.

Agradezco a la Gobernación del Valle del Cauca por su apoyo como becario del programa de Formación de Alto Nivel (FAN).

A mis directores, los doctores Julián Ramírez Villegas (Científico de Bioversity-CIAT) y María Sara Mejía de Tafur (Profesora de la Universidad Nacional), por su asesoría académica y guía en la realización de este trabajo de investigación.

Resumen

Intercomparación de modelos ecofisiológicos para el análisis de la productividad del cultivo de arroz en Colombia

Este estudio aborda la intercomparación de tres modelos ecofisiológicos del cultivo de arroz (ORYZA v3, DSSAT-CERES-Rice y Aquacrop), evaluados en tres ambientes de producción en Colombia: Zona Centro, Llanos Orientales y Bajo Cauca. Se implementó un Algoritmo Genético para la optimización de parámetros y se evaluaron las predicciones de los modelos en variables como fenología, biomasa aérea, área foliar y rendimiento en grano. Además, se analizó la respuesta de los modelos a las condiciones de variabilidad climática ENSO utilizando el conjunto de datos del cultivar Fedearroz 2000, sembrado en todas las regiones. Los resultados mostraron variaciones en las predicciones de los modelos, indicando una interacción significativa entre las variaciones climáticas y el sistema de cultivo. La intercomparación proporcionó conocimientos valiosos sobre las fortalezas y debilidades de cada modelo, esencial para futuras aplicaciones en la planificación agronómica y la adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Modelos de Cultivo, ORYZA, DSSAT, AquaCrop, Variabilidad climática y Algoritmo Genético, agroclimR.

Abstract

Intercomparison of ecophysiological models for the analysis of rice crop productivity in Colombia

This study addresses the intercomparison of three ecophysiological models of rice cultivation (ORYZA v3, DSSAT-CERES-Rice, and Aquacrop), evaluated with three cultivars in three production environments in Colombia: Central Zone, Eastern Plains, and Lower Cauca. A Genetic Algorithm was implemented for parameter optimization, and the models' predictions were evaluated in variables such as phenology, aerial biomass, leaf area, and grain yield. Additionally, the models' response to ENSO climatic variability conditions was analyzed using the dataset of the Fedearroz 2000 cultivar, planted in all regions. The results showed variations in the models' predictions, indicating a significant interaction between climatic variations and the cultivation system. In conclusion, the intercomparison provided valuable insights into the strengths and weaknesses of each model, essential for future applications in agronomic planning and adaptation to climate change.

Keywords: Crop Modeling, ORYZA, DSSAT, AquaCrop, Climate Variability, Genetic Algorithm, agroclimR.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Contenido	XI
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
1. Capítulo 1: Marco teórico	5
1.1 Generalidades de la especie (<i>Oryza sativa</i> L.).....	5
1.2 Importancia del cultivo a nivel global.....	6
1.3 El cultivo de arroz en un contexto de cambio climático y variabilidad climática....	7
1.4 Modelación de cultivos y procesos fisiológicos simulados.....	9
1.5 Desafíos de la implementación de modelos de cultivos.....	11
1.6 Metodo de Optimizacion de parametros - Algoritmo genético.....	12
1.7 Intercomparación de Modelos de Cultivo de Arroz.....	13
2. Capítulo 2: Materiales y métodos	15
2.1 Descripción de las regiones, sitios experimentales, suelo, clima y sistema de cultivo 15	
2.1.1 Saldaña, Tolima (SDTO).....	16
2.1.2 Aipe, Huila (AIHU).....	16
2.1.3 Montería, Córdoba (MRCO).....	17
2.1.4 Villavicencio, Meta (VVME).....	18
2.1.5 Yopal, Casanare (YOCS).....	19
2.2 Datos de campo.....	19
2.3 Modelos del cultivo de arroz.....	25
2.3.1 ORYZA v3.x.....	26
2.3.2 CERES-Rice (DSSAT v4.x).....	27
2.3.3 AquaCrop v6.x.....	29
2.4 Procesamiento de datos.....	30
2.5 Esquema de simulación y evaluación de los modelos.....	31
2.5.1 Selección de conjuntos de datos por cultivar:.....	31
2.5.2 Selección de parámetros:.....	33
Parámetros del modelo ORYZA v3.....	34
Parámetros del modelo DSSAT-CERES-Rice:.....	36
Parámetros del modelo Aquacrop.....	37
2.5.3 Método de estimación de parámetros y optimización:.....	39
2.5.4 Evaluación de la calibración:.....	41
2.5.5 Evaluación del modelo con un conjunto de datos independiente:.....	42
2.6 Intercomparación de los modelos.....	42
3. Capítulo 3: Resultados y discusión	45
3.1 Características de los conjuntos de datos de calibración y evaluación.....	45
3.2 Estimación de parámetros en los modelos (Calibración).....	47
3.2.1 Parámetros del modelo ORYZA.....	47

3.2.2	Parámetros del modelo CERES-Rice.....	49
3.2.3	Parámetros del modelo Aquacrop.....	49
3.3	Optimización de parámetros con Algoritmo Genético.....	51
3.3.1	Fenología.....	51
3.3.2	Biomasa aérea.....	53
3.3.3	Área Foliar.....	56
3.3.4	Rendimiento.....	57
3.4	Evaluación de los modelos.....	59
3.4.1	Fenología.....	60
3.4.2	Biomasa aérea.....	61
3.4.3	Área Foliar.....	63
3.4.4	Rendimiento.....	65
3.5	Intercomparación de modelos de cultivo.....	67
3.6	Respuesta de los modelos a condiciones de variabilidad climática.....	72
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	77
4.1	Conclusiones.....	77
4.2	Recomendaciones.....	78
A.	Anexo A: Metadata de base de datos.....	79
	Bibliografía.....	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama de flujo de procesos en un modelo de cultivo.....	11
Figura 2-2: Zonas de estudio, localidades experimentales de arroz.....	20
Figura 2-3: Series climáticas mensuales durante el periodo experimental (2013-2016)...	21
Figura 2-4: Diseño de Parcela de los experimentos de modelación.....	24
Figura 2-5: Esquema de procesamiento de datos.....	32
Figura 2-6: Diagrama de flujo de la calibración y optimización de parámetros.....	40
Figura 3-7: Gráficos de dispersión la calibración de Fenología.....	53
Figura 3-8: Gráficos de dispersión la calibración de Biomasa Seca Total.....	55
Figura 3-9: Gráficos de dispersión la calibración del Área Foliar.....	57
Figura 3-10: Gráficos de dispersión la calibración del Rendimiento en grano.....	59
Figura 3-11: Gráficos de dispersión la evaluación de la Fenología.....	61
Figura 3-12: Gráficos de dispersión la evaluación de producción de Biomasa seca total.	63
Figura 3-13: Gráficos de dispersión la evaluación del Area Foliar.....	65
Figura 3-14: Gráficos de dispersión la evaluación del rendimiento en grano.....	67
Figura 3-15: Comparación del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE).....	68

Figura 3-16: Comparación de las simulaciones de Rendimiento en grano.....	69
Figura 3-17: Comparación de gráficos de cajas de grupos de datos de F2000.....	70
Figura 3-18: Comparación de la simulación de distintas variables de salida.....	71
Figura 3-19: Distribución en el tiempo de los experimentos objetivo.....	72
Figura 3-20: Gráfico de correlación de los grupos de datos de F2000.....	73
Figura 3-21: Comparación de promedios de grupos de datos de F2000.....	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Promedios anuales (2013-2016) de variables climáticas durante la fase de ensayos experimentales.....	21
Tabla 2-2: Perfiles de suelo en las cinco localidades experimentales.....	22
Tabla 2-3: Distribución de conjuntos de datos experimentales por cultivar.....	33
Tabla 2-4: Parámetros seleccionados del modelo ORYZA v3.....	35
Tabla 2-5: Parámetros seleccionados del modelo DSSAT-CERES-Rice.....	37
Tabla 2-6: Parámetros seleccionados del modelo Aquacrop v6.....	38
Tabla 3-7: Promedios observados y coeficiente de variación de las variables de respuesta.....	46
Tabla 3-8: Parámetros del modelo ORYZA v3 optimizados con GA.....	48
Tabla 3-9: Parámetros del modelo CERES-Rice optimizados con GA.....	49
Tabla 3-10: Parámetros del modelo Aquacrop v6 optimizados con GA.....	50
Tabla 3-11: Medidas de ajuste de la calibración de Fenología.....	51
Tabla 3-12: Medidas de ajuste de la calibración de la Biomasa total aérea.....	54
Tabla 3-13: Medidas de ajuste de la calibración del Índice de Área Foliar (% CC para Aquacrop).....	56
Tabla 3-14: Medidas de ajuste de la calibración de Rendimiento en grano.....	58
Tabla 3-15: Medidas de ajuste de la evaluación de Fenología.....	60
Tabla 3-16: Medidas de ajuste de la evaluación de la Biomasa total aérea.....	62
Tabla 3-17: Medidas de ajuste de la evaluación del Índice de Área Foliar (% CC para Aquacrop).....	64
Tabla 3-18: Medidas de ajuste de la evaluación de Rendimiento en grano.....	66
Tabla 3-19: Comparación de los ANOVAs para Rendimiento, Biomasa y Ciclo de cultivo.	75

Introducción

El incremento de la productividad agrícola es una prioridad para la humanidad, más aún con las proyecciones de crecimiento poblacional que indican un incremento en la demanda de alimentos de un 70% para el 2050, cuando se espera que seamos más de 9 billones de habitantes (FAO, 2009). Sin embargo, este desafío se presenta en un contexto desfavorable. Los fenómenos de variabilidad climática, el cambio climático y la degradación de los recursos naturales, amenazan la sostenibilidad de la producción alimentaria.

En este panorama, el arroz emerge como uno de los cultivos de gran importancia para la seguridad alimentaria, siendo un componente esencial en la dieta de más de la mitad de la población mundial, debido a su alto contenido calórico y proteico, además de ser la principal fuente de ingresos de más de 200 millones de hogares en países en desarrollo (Muthayya et al., 2014). En Colombia, el arroz se siembra en dos temporadas al año en cinco grandes zonas geográficas, abarcando un área de 570.800 hectáreas distribuidas en 23 departamentos y 211 municipios. De este cultivo dependen 16.378 productores en 25.256 unidades productoras de arroz (DANE & FEDEARROZ, 2016).

Sin embargo, la agricultura es uno de los sectores más vulnerables a las variaciones climáticas. Los patrones alterados de precipitación y temperatura, junto con la creciente frecuencia de eventos extremos de sequía e inundación, amenazan la seguridad alimentaria de millones de familias en todo el mundo (Iizumi et al., 2014). Esta problemática se ve exacerbada por la influencia del clima en la planificación agronómica y en el desarrollo de los cultivos en el campo. Las anomalías en los patrones de precipitación y el aumento de las temperaturas extremas son eventos que pueden presentarse con mayor frecuencia e intensidad debido al cambio climático (Cai et al., 2014), afectando diferentes componentes de la productividad de los sistemas agrícolas.

En el caso del cultivo de arroz, se estima que casi una tercera parte de las variaciones espacio-temporales en los rendimientos mundiales son explicadas por estos fenómenos interanuales (Ray et al., 2015). En Colombia, algunos estudios han encontrado que la variabilidad climática es responsable de entre el 32% y el 39% de la variabilidad en el rendimiento del arroz año tras año (Delerce et al., 2016).

Ante este panorama, se vuelve esencial la aplicación de tecnologías que permitan una evaluación integral de los sistemas agrícolas para entender el comportamiento del cultivo de arroz frente a la diversidad de ambientes, así como las características fisiológicas relacionadas con su productividad. En este sentido, los modelos de cultivo emergen como herramientas de software con el potencial para evaluar el crecimiento y desarrollo del cultivo en diferentes escenarios de producción (Ewert et al., 2015; Semenov & Porter, 1995). El uso de modelos de cultivo en Colombia comienza a formar parte integral de los procesos de planificación agronómica (MADR, 2015). En sinergia con la generación de pronósticos agroclimáticos, se busca apoyar decisiones fundamentales como la elección adecuada de las fechas de siembra y la variedad de mejor adaptación frente al escenario pronosticado (Sotelo et al., 2020).

Estrategias convencionales como la elección adecuada de la fecha de siembra, podrían apoyarse en modelos de cultivo para evaluar cual es la mejor oferta ambiental y alcanzar el máximo rendimiento del cultivo. No obstante, cada modelo cuenta con diferentes mecanismos e interacciones para representar los sistemas agrícolas (Amiri et al., 2014), lo cual puede generar resultados disímiles y aumentar la incertidumbre. Esta situación puede comprometer la confiabilidad de los modelos para su aplicación en la toma de decisiones y desarrollo de aplicaciones. La intercomparación de modelos es una estrategia que permite comparar las diferencias, ventajas y limitaciones de cada herramienta, reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad de los ambientes de producción, así como cuantificar la habilidad propia de cada modelo (Li et al., 2013).

Esta investigación comparó el desempeño de tres modelos ecofisiológicas del cultivo de arroz (ORYZA_v3 (Bouman et al., 2001), DSSAT-CERES Rice (Singh et al., 1990) y Aquacrop (Raes et al., 2009) para tres cultivares (o variedades) en 5 ambientes de producción de Colombia: Zona Centro (Tolima, Huila), Llanos Orientales (Meta y Casanare) y Bajo Cauca (Córdoba). Para esto se implementa un esquema de estimación

de parámetros con la ayuda de un algoritmo genético (GA, por sus siglas en inglés). Cada modelo se evaluó usando medidas de ajuste para cuantificar o calificar las diferencias de los valores simulados respecto a los observados. En cuanto a la intercomparación, se analizaron las respuestas de los modelos con respecto a un conjunto de datos único, las simulaciones por modelo se agruparon (Localidad, Riego y Fase ENSO) y se discutieron las diferencias y correlaciones de cada herramienta en tres aspectos de gran relevancia agronómica descritos por (Brouder & Volenec, 2008): rendimiento, crecimiento, desarrollo y eficiencia en el uso de agua.

Observación: Los desarrollos derivados de esta investigación, se encuentran alojados en los repositorios de Github (<https://github.com/jrodriguez88/agroclimR>, <https://jrodriguez88.github.io/agroclimR/>), siendo de libre acceso para los investigadores que busquen replicar las metodologías y flujos de datos.

1. Capítulo 1: Marco teórico

1.1 Generalidades de la especie (*Oryza sativa* L.)

Oryza sativa L., conocida comúnmente como arroz, es un cereal que pertenece al género *Oryza* y a la familia Poaceae. Entre aproximadamente 25 especies identificadas en este género, 23 son silvestres y sólo dos son cultivadas a escala global: *Oryza sativa* y *Oryza glaberrima*. Estas especies de arroz tienen un papel fundamental en la alimentación humana a nivel mundial, gracias a su alta adaptabilidad a una amplia gama de condiciones ambientales, lo que les permite desarrollarse en todos los continentes, con excepción de la Antártida.

La *Oryza sativa* es la especie de arroz más ampliamente distribuida, siendo cultivada en más de 100 países. Esta especie se puede clasificar en tres grandes grupos ecológicos: las variedades índicas, que se adaptan a climas tropicales y subtropicales y se caracterizan por tener granos largos; las variedades japónicas, destinadas a zonas templadas y que presentan granos de longitud corta a media; y las variedades javanicas, que presentan granos de longitud media y se cultivan principalmente en las Filipinas y en las regiones montañosas de Madagascar e Indonesia.

La planta de *Oryza sativa* es una gramínea anual, caracterizada por su sistema radicular fibroso que juega un papel esencial en la absorción de agua y nutrientes. Este sistema radicular puede verse influenciado por varios factores, entre ellos, la textura del suelo, el pH y la disponibilidad de minerales. Aunque el arroz puede crecer en una amplia variedad de suelos, tiende a preferir suelos arcillosos y ricos en materia orgánica.

En términos climáticos, el arroz requiere una temperatura óptima de crecimiento que oscila entre 25 a 30°C, pero puede tolerar temperaturas más bajas y más altas en diferentes etapas de su desarrollo. En este sentido, la germinación puede ocurrir a

temperaturas tan bajas como 10°C, mientras que la floración y la formación de granos pueden ser afectadas negativamente a temperaturas superiores a 35°C.

Uno de los aspectos más notables del arroz es su alta demanda de agua. Se estima que la planta requiere entre 500 y 1500 mm de agua por ciclo de cultivo, dependiendo de la variedad y las condiciones locales. Esta demanda es especialmente alta durante el crecimiento vegetativo y la floración, y disminuye después de la formación del grano. Sin embargo, es importante destacar que, aunque el arroz muestra una tolerancia relativamente alta al estrés hídrico durante las etapas vegetativas y reproductivas, es particularmente sensible durante la formación y el llenado del grano. Durante estos períodos, la deficiencia de agua puede reducir significativamente el rendimiento del cultivo.

Por último, es importante resaltar la importancia socioeconómica del cultivo de arroz. A nivel mundial, más de la mitad de la población depende del arroz como fuente principal de calorías y proteínas. Además, el cultivo de arroz proporciona empleo e ingresos a millones de pequeños agricultores en los países en desarrollo. En algunos países, el arroz también juega un papel central en las tradiciones culturales y religiosas. En síntesis, es mucho más que un simple cultivo, es un pilar fundamental en la alimentación, economía y cultura de gran parte de la humanidad.

1.2 Importancia del cultivo a nivel global

El arroz es un cultivo de vital importancia en la alimentación y economía mundial. Con más de la mitad de la población global que depende del arroz como fuente principal de calorías y proteínas, su relevancia no puede ser subestimada. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción mundial de arroz en 2022 alcanzó aproximadamente 769.7 millones de toneladas. Asia, como principal región productora, contribuyó con cerca del 90% de esta producción total.

A nivel económico, el cultivo de arroz desempeña un papel crucial, especialmente en las economías en desarrollo. Proporciona empleo e ingresos a millones de pequeños agricultores, contribuyendo de manera significativa a la lucha contra la pobreza y el

hambre. Además, debido a su valor en la exportación, el arroz es una importante fuente de ingresos para muchos países.

El cultivo de arroz no sólo es relevante desde el punto de vista alimentario y económico, sino también cultural. En muchos países de Asia, donde el arroz es un componente básico de la dieta, este cereal ocupa un lugar central en las tradiciones culturales y religiosas. Los rituales y festividades asociados con la siembra, cosecha y consumo de arroz reflejan la estrecha relación entre este cultivo y la vida cotidiana de las comunidades.

El cultivo del arroz también es de gran importancia en términos de sostenibilidad. El sistema de cultivo de arroz en terrazas, que es común en muchos países asiáticos, es un ejemplo notable de un sistema de producción sostenible que ha contribuido a la conservación de la biodiversidad y la gestión sostenible del agua y del suelo.

1.3 El cultivo de arroz en un contexto de cambio climático y variabilidad climática

El cambio climático y la variabilidad climática representan desafíos significativos para la producción agrícola en todo el mundo. Factores como el incremento en las temperaturas, la variabilidad en las precipitaciones y el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos pueden tener un impacto significativo en el rendimiento de los cultivos (Wassmann et al., 2009).

La variabilidad climática se define como la variación en la media estadística del clima en todas las escalas espacio-temporales. Por lo tanto, la medición de la variabilidad climática es una medición del cambio climático (IPCC, 2014). Como consecuencia, se esperan cambios en los sistemas agrícolas porque el crecimiento, desarrollo y rendimiento son producto de procesos ecofisiológicos regulados por la interacción de variables ambientales con la genética de la especie, variables de manejo y variables climáticas relacionadas, como la temperatura, precipitación y radiación solar (Anwar, Liu, Macadam, & Kelly, 2013).

La variación en las temperaturas durante las etapas de desarrollo puede afectar drásticamente la producción de un cultivo, ya sea por superar los umbrales de tolerancia

o por las implicaciones en el crecimiento y desarrollo en el campo (Krishnan, Ramakrishnan, Reddy, & Reddy, 2011; Sánchez, Rasmussen, & Porter, 2014). Un ejemplo de esto es el cultivo de arroz, que es termófilo y requiere altas temperaturas para su desarrollo óptimo, entre 25 y 30°C. Sin embargo, un aumento excesivo en la temperatura, especialmente durante la etapa de floración, puede provocar la esterilidad de las espigas y disminuir el rendimiento.

Además de la temperatura, otros factores abióticos, como las precipitaciones y la radiación solar, también juegan un papel crucial en el rendimiento del cultivo de arroz. El arroz requiere una cantidad significativa de agua para su desarrollo, y las sequías prolongadas pueden provocar estrés hídrico en el cultivo y reducir su rendimiento. Por otro lado, la radiación solar influye en la fotosíntesis y, por ende, en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Periodos prolongados de nubosidad pueden limitar la disponibilidad de luz para la planta y afectar su rendimiento.

Entre los cultivos de riego, el arroz generalmente requiere entre dos y tres veces más irrigación que otros cereales. La huella hídrica del cultivo de arroz se encuentra entre las más altas en diferentes análisis a nivel mundial (Lovarelli, Bacenetti, & Fiala, 2016). Esto significa que la producción de arroz puede tener un impacto ambiental significativo, especialmente en regiones donde el agua es un recurso escaso. Por esta razón, incrementar la productividad hídrica de este cultivo es una prioridad frente a la escasez mundial del recurso agua (Ali & Talukder, 2008).

La adaptación al cambio climático en el cultivo de arroz puede implicar una serie de estrategias, que van desde el cambio en las prácticas de manejo, como la selección de variedades resistentes al estrés climático, hasta la implementación de tecnologías de irrigación más eficientes. Por ejemplo, el uso de variedades de arroz tolerantes a la sequía o a las altas temperaturas puede ser una estrategia eficaz para adaptarse a cambios en el patrón de precipitaciones o a aumentos en la temperatura media. Del mismo modo, la adopción de tecnologías de irrigación eficientes puede ayudar a reducir el consumo de agua en el cultivo de arroz, mitigando así el impacto de la escasez de agua (Bouman, Lampayan, & Toung, 2007).

La elección de las estrategias de adaptación adecuadas dependerá de las condiciones específicas de cada región y sistema de producción. En algunas áreas, por ejemplo,

puede ser más adecuado centrarse en la adaptación a sequías, mientras que en otras áreas puede ser más importante desarrollar estrategias de adaptación a inundaciones. Al mismo tiempo, es importante tener en cuenta que las estrategias de adaptación pueden tener implicaciones tanto para la sostenibilidad del sistema de producción de arroz como para la seguridad alimentaria de las poblaciones que dependen de este cultivo para su subsistencia (Ziska, Manalo, Ordonez, & Sanico, 1996)

En Colombia, un análisis de minería de datos realizado con la Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ) (Delerce et al., 2016) encontró una fuerte correlación entre variables climáticas y rendimiento del grano. Se estima que la variabilidad climática es responsable de entre un 32% y un 39% de la variabilidad en el rendimiento año tras año. Este dato evidencia el alto grado de dependencia del cultivo de arroz con las condiciones climáticas y subraya la necesidad de implementar estrategias de adaptación y mitigación para enfrentar los desafíos presentes y futuros del cambio climático.

1.4 Modelación de cultivos y procesos fisiológicos simulados

La modelación de cultivos es una disciplina que fusiona matemáticas, biología, física y computación para describir las relaciones entre varios componentes de un sistema complejo, como la planta, el suelo, el clima y las prácticas de manejo (James W Jones, Antle, Basso, Boote, Conant, Foster, Godfray, et al., 2016). Esta disciplina ha experimentado grandes avances en las últimas décadas, impulsados principalmente por la revolución tecnológica y la necesidad cada vez mayor de comprender y manejar la interacción entre los cultivos y su entorno.

A partir de su origen como una herramienta puramente de investigación, la modelación de cultivos ha evolucionado para convertirse en un soporte invaluable para la toma de decisiones agronómicas. Hoy día se utiliza para proporcionar información crucial que permite planificar y optimizar la producción de alimentos, al tiempo que mitiga los impactos del cambio climático en la agricultura (Holzworth et al., 2015).

Un modelo de cultivo, una vez parametrizado y validado, puede aplicarse para apoyar el análisis e interpretación de los datos experimentales. Asimismo, permite la simulación de una amplia gama de prácticas de manejo y condiciones ambientales a través de la

extrapolación (Belder, Bouman, & Spiertz, 2007). En otras palabras, estos modelos pueden brindar una plataforma para la evaluación y mejora de prácticas de manejo, así como para la exploración y comprensión de los efectos de distintos escenarios climáticos sobre el rendimiento de los cultivos.

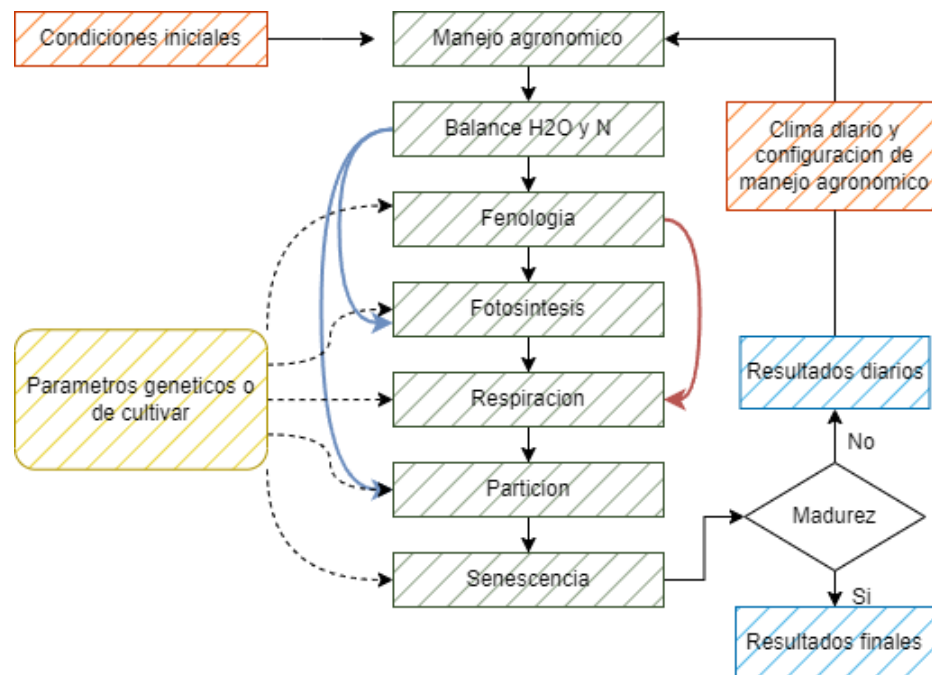
Conforme a lo planteado por Holzworth et al. (2015), en la última década, los modelos de cultivos han ampliado su espectro de aplicación y se han usado para analizar una serie de temas críticos. Estos incluyen el cambio climático y la adaptación de los cultivos, la seguridad alimentaria, la evaluación de políticas agrícolas, el apoyo al desarrollo de herramientas para agricultores, asistencia técnica, eficiencia en el uso de recursos, mejoramiento genético, bioenergía, ganadería y sistemas mixtos, y análisis de brechas de rendimiento.

En este contexto de cambio climático, la modelación de cultivos emerge como una herramienta valiosa para evaluar las posibles estrategias de adaptación. Mediante la simulación de diferentes escenarios climáticos y de manejo, los modelos de cultivo pueden proporcionar información valiosa para la toma de decisiones agronómicas y políticas de adaptación al cambio climático (Antle, Capalbo, Elliott, & Paustian, 2004). Por ejemplo, los modelos de cultivo pueden ayudar a identificar variedades de arroz que sean resistentes a condiciones climáticas adversas, o a desarrollar prácticas de manejo que puedan reducir el impacto de eventos extremos.

A pesar de la complejidad de los sistemas que integran y las ecuaciones que emplean, algunos equipos de modelación han desarrollado interfaces de usuario más amigables en un entorno de escritorio. Los modelos ecofisiológicos de cultivo, por ejemplo, suelen incorporar una serie de mecanismos y módulos que permiten simular el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos en respuesta a las condiciones ambientales y de manejo. Generalmente, los modelos ecofisiológicos de cultivo integran los mecanismos y módulos descritos en la Figura 1-1, un diagrama de flujo simplificado de procesos integrados en un modelo de cultivo que simula producción diaria. Las líneas sólidas azules y rojas indican puntos clave para flujo de información, Las flechas con líneas punteadas indican parámetros genéticos o entradas para un cultivo específico.

Específicamente para el arroz, la investigación del cultivo ha permitido conocer a profundidad los procesos fisiológicos, dando como resultado múltiples modelos como ORYZA2000, CERES-Rice y APSIM-Rice, WOFOST, Aquacrop, entre otros. Estos modelos han sido calibrados y evaluados bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo, convirtiéndose en valiosas herramientas para la planificación y optimización del cultivo de arroz (Bouman, Kropff, Tuong, Wopereis, Ten Berge, & Van Laar, 2001; Li, Zhang, Liu, Chen, & Zeng, 2017).

Figura 1-1: Diagrama de flujo de procesos en un modelo de cultivo



Tomado y Traducido de (Boote, Jones, White, Asseng, & Lizaso, 2013)

1.5 Desafíos de la implementación de modelos de cultivos.

Los sistemas de cultivo son sistemas complejos que están influenciados por una amplia gama de factores, incluyendo el clima, el suelo, la gestión de los cultivos y las interacciones entre estos factores. Esta complejidad y la falta de datos de alta calidad puede dificultar la modelización precisa de los sistemas de cultivo. Los modelos de cultivo a menudo requieren una gran cantidad de parámetros, y la estimación de esos parámetros, comúnmente conocida como calibración es el proceso de obtener la mejor combinación de parámetros o coeficientes de determinado modelo a partir de datos

experimentales observados en diferentes ambientes de producción. Las metodologías son muy variadas y en muchos casos termina siendo un proceso de ensayo y error por parte del investigador, lo que puede volver la calibración difícil y costosa en términos de tiempo y recursos.

Adicionalmente, se debería considerar la incertidumbre inherente en las simulaciones, lo que puede ampliar o limitar su utilidad en la toma de decisiones del rango de condiciones en el que se haya evaluado determinado modelo.

Un paso esencial para la implementación de estas herramientas es establecer un enfoque de calibración que permita mejorar la calidad y precisión de la calibración de los modelos de cultivos, y aumentar la confianza en los resultados. Como lo plantea Seidel et al. (2018), para lograr esto, es esencial que cada modelo cuente con una meticulosa selección de datos representativos, de alta calidad y precisos. Los parámetros deben ser relevantes, identificables y sensibles al sistema agrícola y su entorno. Es aconsejable emplear métodos de calibración adecuados que gestionen la complejidad del modelo y los datos, identificando soluciones óptimas. Posteriormente, la calibración debe ser evaluada mediante medidas de ajuste pertinentes y el modelo validado con datos independientes para asegurar su precisión predictiva. Finalmente, cada etapa del proceso debe ser documentada con total transparencia.

1.6 Metodo de Optimizacion de parametros - Algoritmo genético

Métodos de optimización de parámetros son utilizados en diversas aplicaciones para mejorar el rendimiento y la precisión de los modelos. Estos métodos pueden ser aplicados tanto a modelos dinámicos, que cambian con el tiempo, como a modelos basados en procesos, que se centran en las etapas individuales de un sistema. Algunos de los métodos comunes incluyen la optimización por descenso de gradiente, el algoritmo de Newton, el algoritmo de Levenberg-Marquardt y los Algoritmos Genéticos.

El Algoritmo Genético (GA, por sus siglas en ingles) es una técnica de optimización metaheurística que se basa en los principios de la genética y la selección natural (McCall, J. 2005). GA utiliza operaciones inspiradas en la biología, como la mutación, el cruce y la selección, para generar soluciones a problemas de optimización. Estos métodos se han

utilizado para una variedad de propósitos, incluyendo: la programación del riego con el objetivo de maximizar el rendimiento de los cultivos y minimizar el uso del agua. Por ejemplo, un estudio (Raju & Kumar, 2013) aplicó un GA para optimizar la programación del riego de los cultivos de trigo en la India; Para optimizar las prácticas de fertilización con el objetivo de maximizar el rendimiento de los cultivos y minimizar el impacto ambiental. Por ejemplo, un estudio de (Bekele & Nicklow, 2008) aplicó un GA para optimizar las prácticas de fertilización de los cultivos de maíz en Illinois; Se han utilizado para calibrar modelos de crecimiento de cultivos, (Soundharajan, B., & Sudheer, K. P, 2013) para el modelo ORYZA v3. Otro ejemplo es un estudio que utilizó un GA para calibrar el modelo de crecimiento de cultivos DSSAT para el maíz (Confesor & Whittake, 2010). Los GA pueden explorar el espacio de parámetros de manera eficiente, identificando combinaciones de parámetros que resultan en mejores predicciones del modelo.

Los Algoritmos Genéticos (GA) son adecuados para problemas con óptimos locales y múltiples objetivos debido a su robustez. Sin embargo, presentan desafíos como la convergencia prematura, que limita la exploración de soluciones; el alto tiempo de computación, especialmente con muchos parámetros; la necesidad de ajustar correctamente sus parámetros para un rendimiento óptimo; la dependencia de datos de entrada de calidad; y la dificultad en la optimización de múltiples objetivos simultáneamente. Además, aunque los GA pueden calibrar modelos como ORYZA V3 o CERES, estos modelos son simplificaciones y pueden no reflejar todas las realidades del crecimiento de cultivos.

1.7 Intercomparación de Modelos de Cultivo de Arroz

La intercomparación de modelos de cultivo es una tarea que puede proporcionar información valiosa para los investigadores y los encargados de la toma de decisiones. Evaluar el desempeño de los modelos bajo diversas circunstancias permite identificar el rango de sus validaciones, así como las limitaciones de cada uno (Li et al., 2015). Al comparar diferentes enfoques de modelación, se facilita la selección de la herramienta más adecuada para una localidad específica, mejorando la precisión en las predicciones de productividad en un entorno proyectado (Ahmed et al., 2013). Por ejemplo, en el cálculo del balance hídrico, cada modelo responde de manera distinta a las variaciones

de la textura del suelo, perfiles y distribución de la humedad. Estas variables influyen en el inicio del estrés hídrico, la absorción de agua, la transpiración, entre otros procesos (Camargo & Kemanian, 2016).

Es así como surgen iniciativas que buscan estandarizar los protocolos para el uso y la aplicación de modelos de cultivos, como es el caso del proyecto AGMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) (Elliott et al., 2015; Li et al., 2015; Porter et al., 2014; Rosenzweig et al., 2012). AGMIP busca ofrecer un marco de comparación entre los modelos y reducir la incertidumbre asociada a la representación de cada modelo en las simulaciones de escenarios de cambio climático. Para el cultivo de arroz, AGMIP evalúa 13 modelos de cultivo ampliamente reconocidos por la comunidad científica (Li et al., 2015).

La elección del modelo más apropiado dependerá de los objetivos específicos de la investigación, las condiciones de cultivo y las limitaciones de recursos. Para maximizar la eficacia de la modelación de cultivos, es crucial considerar las características individuales de cada modelo y su idoneidad para las condiciones locales y las necesidades de la investigación.

Por último, es importante recordar que ningún modelo puede representar perfectamente todas las complejidades de un sistema de cultivo en el mundo real. Cada modelo tiene sus fortalezas y debilidades, y la comprensión de estas es crucial para interpretar correctamente los resultados de la modelación. La intercomparación de modelos ayuda a identificar estas fortalezas y debilidades, proporcionando una base sólida para la selección y aplicación de los modelos.

2. Capítulo 2: Materiales y métodos

2.1 Descripción de las regiones, sitios experimentales, suelo, clima y sistema de cultivo

Este estudio considera tres grandes zonas de producción de arroz altamente contrastantes en Colombia: Zona Centro, Bajo Cauca, y Llanos Orientales. De acuerdo al censo arrocero del 2016, la producción de estas tres zonas representa el 88% de la producción nacional, con un área sembrada cercana a las 500.000 hectáreas.

La Zona Centro se extiende a través de los departamentos de Huila, Tolima, Valle del Cauca entre otros. Su rango altitudinal varía entre los 250 y 1300 metros sobre el nivel del mar (msnm), brindando una gama única de microclimas que influyen directamente en la diversidad de cultivos y técnicas agrícolas empleadas. En esta zona las épocas del cultivo del arroz se centran en los meses de abril a julio y octubre a enero, contando con la participación anual de más de 15000 UPA con una producción promedio cercana a las 7 t/ha.

Por otro lado, el Bajo Cauca abarca los departamentos de Antioquia, Bolívar, Chocó, Córdoba y Sucre. Esta zona, reconocida por su planicie y altitudes relativamente bajas que oscilan entre los 5 y 500 msnm, favorece un tipo de agricultura distinto, adaptado a estas condiciones particulares. Según Briceño 2012, cerca del 90% del área agrícola sembrada es destinada a cereales (arroz y maíz principalmente), con una siembra promedio de unas 7300 hectáreas sembradas en arroz con una producción promedio cercana a las 4.7 ton/ha y una participación de 600 UPA anuales según cifras del DANE 2015

Finalmente, los Llanos Orientales, que comprenden los departamentos de la Orinoquia colombiana principalmente Meta y Casanare, representan una región geográficamente diversa y rica en recursos naturales. Los departamentos de Meta y Casanare se encuentran a una altitud que oscila entre los 350 y 500 msnm. Esta región,

principalmente compuesta por vastas sabanas y humedales, es crucial para la producción agrícola y pecuaria en el país. En estas zonas de producción, cinco sitios experimentales fueron parte esencial en el monitoreo y captura de datos:

2.1.1 Saldaña, Tolima (SDTO)

El departamento del Tolima, donde se encuentra el municipio de Saldaña, posee un clima cálido y húmedo, con una temperatura media anual que ronda los 26 °C. La región está influenciada por la Cordillera Central de los Andes, que dicta no sólo las condiciones climáticas, sino también la disponibilidad de agua. El clima es predominantemente tropical, caracterizado por dos temporadas de lluvias y dos temporadas secas al año.

Respecto a la precipitación, el municipio de Saldaña y las zonas circundantes experimentan una temporada de lluvias extendida, que va de marzo a noviembre, con un pico de precipitación en los meses de mayo y junio. Durante este período, la precipitación puede exceder los 200 mm mensuales. La temporada seca, comprendida entre los meses de diciembre y febrero, registra una precipitación media alrededor de 40 mm por mes. La humedad relativa en la región mantiene niveles bastante altos a lo largo del año, promediando alrededor del 75%. Sin embargo, la humedad puede escalar hasta un 90% durante la temporada de lluvias.

La región cuenta con suelos de textura franco-arcillosa a arcillosa, con buen drenaje y pH neutro y de acuerdo con el Censo Nacional Agropecuario (CNA) de 2014 y Fedearroz, el arroz en esta región se cultiva predominantemente bajo sistemas de riego, aunque también se utilizan sistemas de secano en ciertas áreas.

2.1.2 Aipe, Huila (AIHU)

Aipe, situado en el departamento del Huila, es conocido por su robusta industria agrícola. El municipio está ubicado en la región Andina de Colombia, a una altitud de aproximadamente 400 metros sobre el nivel del mar. La región goza de un clima tropical monzónico, con una temperatura media anual de alrededor de 28 °C.

El patrón climático de Aipe es caracterizado por una estación seca y una estación lluviosa. La estación seca suele ocurrir entre los meses de diciembre a marzo, y la estación lluviosa se extiende desde abril hasta noviembre. La precipitación mensual

puede superar los 250 mm durante el pico de la estación lluviosa, que ocurre en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre. Durante la estación seca, la precipitación puede disminuir a menos de 100 mm por mes. La humedad relativa en Aipe es alta durante todo el año, manteniéndose en promedio alrededor del 78%, con posibilidad de incrementarse durante la estación de lluvias.

En Aipe, la agricultura es una de las actividades económicas más importantes, y el cultivo de arroz es una parte esencial de ella. Las condiciones climáticas favorecen la producción de arroz, debido a que este cultivo demanda abundante agua para su crecimiento. Según el Censo Nacional Agropecuario (CNA) de 2014 y Fedearroz, el arroz en Aipe se cultiva principalmente bajo sistemas de riego, pero también se practican sistemas de secano en algunas áreas. Con respecto a los suelos, Aipe cuenta con suelos de textura arcillosa a franco-arcillosa, con buena capacidad de drenaje y pH neutro a ligeramente ácido.

2.1.3 Montería, Córdoba (MRCO)

Ubicada en la región norte de Colombia, Montería es la capital del departamento de Córdoba y se distingue por su marcado clima tropical, que resulta de su cercanía al mar Caribe y la influencia de los ríos Sinú y San Jorge. La temperatura media anual se mantiene alrededor de los 27 °C, lo que establece condiciones calurosas durante todo el año. El clima es asimismo húmedo, registrándose un promedio del 82% en humedad relativa, que da lugar a un ambiente propicio para la vegetación.

En Montería se observan dos picos de lluvias anuales, una característica de los regímenes bimodales de precipitación. El primer pico ocurre entre los meses de abril y junio, y el segundo se manifiesta desde agosto hasta noviembre. Es durante estos periodos cuando se registran las máximas precipitaciones, que pueden llegar hasta los 300 mm mensuales. La temporada seca, que transcurre principalmente desde diciembre hasta marzo, ve una considerable disminución de las precipitaciones, registrando en promedio unos 50 mm por mes.

En lo que respecta a la producción agrícola, particularmente de arroz, estas condiciones climáticas presentan ventajas y desafíos. El cultivo del arroz prospera en ambientes con abundante agua y una larga temporada de crecimiento, condiciones que se cumplen en

la región. No obstante, la variabilidad climática interanual puede introducir incertidumbre en la producción. Según datos del Censo Nacional Agropecuario (CNA) de 2014 y Fedearroz, la mayoría del arroz en Montería se cultiva bajo sistemas de secano, aunque en áreas específicas periféricas a los distritos de riego se utilizan también sistemas de riego.

El terreno de Montería está compuesto por suelos de textura franca a franco-arenosa principalmente (ampliar sobre contenido de arcillas en la proximidad a la costa y ampliar en general), con buena a moderada capacidad de drenaje y pH entre neutro y ligeramente ácido.

2.1.4 Villavicencio, Meta (VVME)

Villavicencio, una ciudad próspera situada en el departamento del Meta, es reconocida por su industria agrícola activa. La ciudad se encuentra en la región Orinoquía de Colombia, a una altitud de alrededor de 467 metros sobre el nivel del mar. El clima es tropical húmedo, con una temperatura media anual de aproximadamente 28 °C.

La ciudad experimenta una marcada estación seca y una estación lluviosa. La estación seca se extiende desde diciembre hasta febrero, y la estación lluviosa dura de marzo hasta noviembre. Durante la estación lluviosa, la precipitación mensual puede alcanzar más de 250 mm, con un pico en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre. Durante la estación seca, la precipitación puede disminuir a menos de 70 mm por mes. Villavicencio mantiene altos niveles de humedad relativa a lo largo del año, con un promedio alrededor del 80%, pudiendo incrementarse durante la estación de lluvias.

La agricultura es una parte crucial de la economía de Villavicencio, y el arroz es uno de los principales cultivos de la región. Las condiciones climáticas de la ciudad son favorables para la producción de arroz. Según el Censo Nacional Agropecuario (CNA) de 2014 y Fedearroz, el arroz en Villavicencio se cultiva predominantemente bajo sistemas de riego, aunque también se utilizan sistemas de secano en algunas áreas.

En cuanto a los suelos, Villavicencio posee suelos de textura franco-arcillosa a arcillosa, con un drenaje adecuado y pH neutro a ligeramente ácido.

2.1.5 Yopal, Casanare (YOCS)

Yopal, la capital del departamento de Casanare, se encuentra en la región de los Llanos Orientales de Colombia. Esta ciudad se sitúa a una altitud de cerca de 350 metros sobre el nivel del mar. Yopal goza de un clima tropical húmedo con una temperatura media anual cercana a los 27 °C.

En términos de precipitación, Yopal cuenta con dos temporadas bien definidas. La temporada seca se extiende desde diciembre hasta febrero, y la temporada de lluvias, notablemente más prolongada, se desarrolla de marzo a noviembre. Durante la estación de lluvias, la precipitación mensual puede superar los 200 mm, con picos en abril y mayo y de octubre a noviembre. En cambio, durante la temporada seca, la precipitación disminuye drásticamente a cerca de 50 mm mensuales. La humedad relativa en Yopal se mantiene alta durante todo el año, con un promedio cercano al 78%, aunque puede incrementar durante la temporada de lluvias.

La producción de arroz en Yopal es una actividad económica significativa, favorecida por las abundantes precipitaciones y las temperaturas cálidas. Sin embargo, los patrones climáticos pueden variar año tras año, lo que puede influir en los rendimientos del cultivo. Según datos del Censo Nacional Agropecuario (CNA) de 2014 y de Fedearroz, en Yopal, el arroz se cultiva principalmente bajo sistemas de riego, aunque también se utilizan sistemas de secano en ciertas áreas. En relación a los suelos, Yopal tiene suelos de textura franco-arcillosa a arcillosa, con buen drenaje y pH neutro a ligeramente ácido.

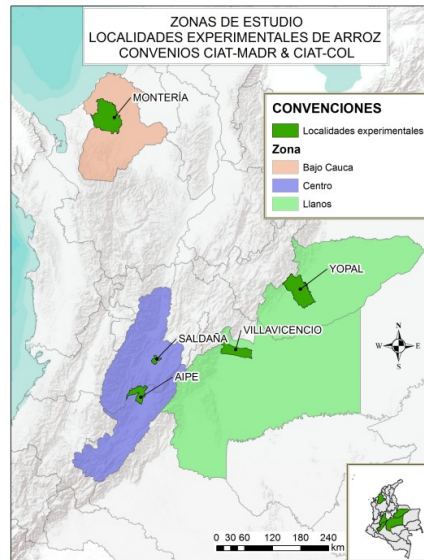
2.2 Datos de campo

Para este estudio se utilizaron datos derivados del convenio de cooperación técnica y científica desarrollado entre: (i) el programa de 'Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria' en América Latina (CCAFS por sus siglas en inglés), (ii) el Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT), (iii) La Federación de arroceros de Colombia (FEDEARROZ) y (iv) el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Este convenio se desarrolló entre los años 2013 y 2015 e incluyó el establecimiento de ensayos experimentales en las diferentes regiones de producción nacional y la colecta de datos de clima, suelo y fenología de cultivo. Además se incluyeron datos de proyectos

con COLCIENCIAS en donde se replicaron este tipo de experimentos durante los años 2015 y 2016.

Los sitios de evaluación del cultivo de arroz se pueden visualizar en la Figura 2-2, estos estuvieron ubicados en los centros experimentales (CI) de FEDEARROZ, en la zona Centro el CI-Lagunas en Saldaña (Tolima) y el CI-Piedra Pintada en Aipe (Huila); en la zona Llanos el CI-Santa Rosa de Villavicencio (Meta) y la alianza con la Universidad la Salle en Yopal (Casanare). Finalmente la zona Bajo cauca fue evaluada en el CI-La Victoria en Montería (Córdoba)

Figura 2-2: Zonas de estudio, localidades experimentales de arroz.



Fuente: Creado por el autor.

Durante ese periodo se colectaron datos climáticos mediante estaciones DAVIS Pro Vantage, pertenecientes a la red meteorológica de FEDEARROZ. Además se contó con series de datos climáticos de las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Los promedios calculados se presentan en la Tabla 2-1 para las variables climáticas que fueron objeto de uso en la modelación de cultivos.

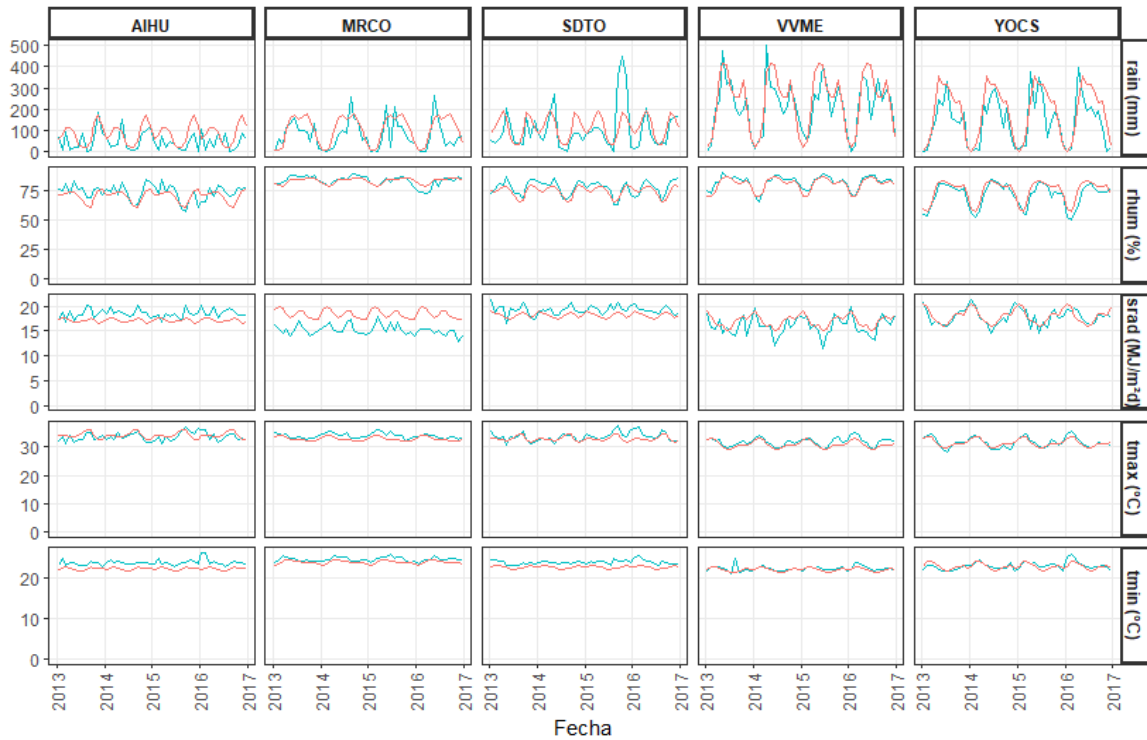
De igual manera en la Figura 2-3 se presenta una matriz gráfica de localidades versus variables climáticas donde se visualizan las series climáticas mensuales a lo largo de la fase experimental, es fácil identificar las diferencias y valores promedio de las variables climáticas, así como las variabilidad interanual comparado con la línea roja que representa la climatología calculada de estaciones del IDEAM.

Tabla 2-1: Promedios anuales (2013-2016) de variables climáticas durante la fase de ensayos experimentales.

Localidad	Lat.	Long.	Asnm	Temp. máxima (oC)	Temp. mínima (oC)	Precip. Anual (mm)	Rad. Solar Anual (MJ/m2)	Hum. Relat. (%)
Aipe (Huila)	3.25	- 75.24	380 (407)	33.5 (33.9)	23.6 (22.1)	567 (1053)	6772 (NA)	73.4 (69.3)
Montería (Córdoba)	8.81	- 75.85	15 (14)	33.9 (32.9)	24.4 (23.6)	921 (1117)	5575 (5163)	83.0 (82.5)
Saldaña (Tolima)	3.91	- 74.98	415 (307)	33.6 (33.0)	23.7 (22.5)	1223 (1370)	7045 (4138)	77.1 (73.2)
Villavicencio (Meta)	4.03	- 73.47	315 (336)	31.7 (30.9)	22.1 (21.8)	2523 (2527)	5865 (5100)	81.8 (79.3)
Yopal (Casanare)	5.33	- 72.30	250 (315)	31.6 (31.5)	22.8 (22.4)	1709 (2118)	6535 (4925)	70.8 (75.1)

Nota: En paréntesis la media climatológica de la estación más cercana de IDEAM.

Figura 2-3: Series climáticas mensuales durante el periodo experimental (2013-2016).



Fuente de datos: — Climatología Mensual (IDEAM) — Promedios mensuales observados (Davis)

Fuente: Creado por el autor. Series climáticas mensuales durante el periodo experimental (2013-2016). SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

Para el componente suelo se colectaron muestras al inicio de cada experimento, se realizó la caracterización de las variables físicas y químicas mediante análisis de laboratorio. El muestreo de suelo se hizo mediante una calicata que abarcara tres capas de 20 centímetros cada una, para tener un perfil de suelo de 60 cm de profundidad, suficiente para simular el desarrollo radicular de la planta de arroz y el balance hídrico en cada modelo. El detalle de los valores de suelo utilizados en este estudio se pueden observar en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Perfiles de suelo en las cinco localidades experimentales.

Localidad	Capa	Arenas (%)	Limos (%)	Arcillas (%)	Textura -USDA	DA (g/cm ³)	pH	SAT v/v (%)	CC v/v (%)	PMP v/v (%)
Aipe, Huila	1	11	27	62	Cl	1.41	6.7	51	43	34
	2	14	21	65	Cl	1.48	7.0	52	41	33
	3	12	19	69	Cl	1.47	7.1	52	41	33
Montería, Córdoba	1	18	36	46	Cl	1.47	7.0	50	42	34
	2	26	38	36	ClLo	1.57	7.6	44	39	32
	3	25	36	39	ClLo	1.52	7.6	46	40	34
Saldaña, Tolima	1	45	41	14	Lo	1.55	5.9	48	30	20
	2	57	29	14	SaLo	1.66	6.4	44	25	16
	3	67	18	15	SaLo	1.57	6.5	46	21	12
Villavicencio, Meta	1	16	49	35	SiClLo	1.41	5.4	56	42	35
	2	18	43	39	SiClLo	1.45	5.0	56	42	35
	3	22	40	38	ClLo	1.47	4.9	55	42	35
Yopal, Casanare	1	33	30	38	ClLo	1.34	4.4	52	39	27
	2	32	29	39	ClLo	1.65	4.6	47	33	24
	3	31	30	39	ClLo	1.62	4.8	48	36	27

DA: Densidad Aparente; Contenidos volumétricos de agua a SAT: Saturación, CC: Capacidad de Campo, PMP: Punto de MArchitez Permanente; Texturas - Cl:Arcilloso,

CILo: Franco Arcilloso, SaLo: Franco Arenoso, SiCILo: Franco Arcilloso Arenoso, CILo: Franco Arcilloso.

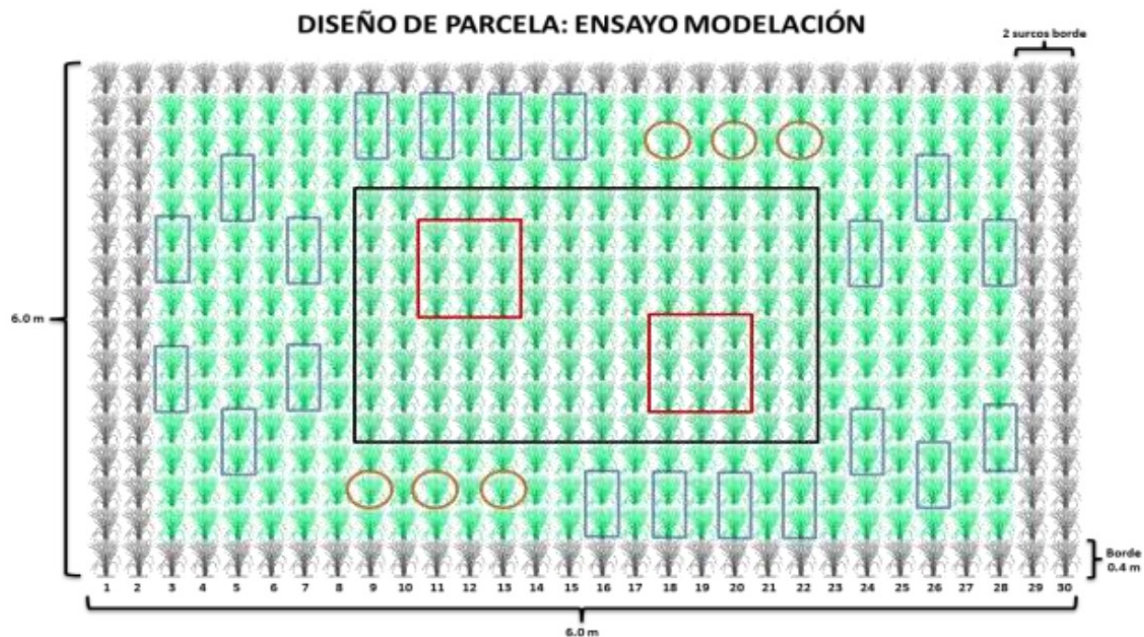
Los ensayos experimentales se desarrollaron con fechas definidas para cada localidad en función de las condiciones ambientales y el criterio de recomendación de fertilización y manejo agronómico del programa AMTEC de FEDEARROZ <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/transferencia-de-tecnologia/amtec/>.

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y diferentes números de genotipos por repetición dependiendo de la localidad. La Figura 2-4 es un ejemplo de una parcela o unidad experimental, cada unidad experimental tenía un área de 36 m² y estaba compuesta de 30 surcos a una distancia de 0.20 metros entre ellos. La siembra se realizó manualmente en todas las localidades para uniformizar el proceso.

Se realizaron alrededor de 11 muestreos detallados, en los cuales se midieron el número de tallos, hojas, panículas, el área foliar y la materia seca de los órganos. Cada parcela constaba de tres áreas de evaluación: área de muestreos, área de seguimiento fenológico y área de rendimiento.

Se realizó un seguimiento fenológico de las plantas, identificando las etapas de emergencia, iniciación de la panícula, floración y maduración. Se registraron las fechas de inicio y el 50% de cada etapa. Durante la etapa de maduración, se determinó el estado de madurez de la cosecha a través de un análisis visual, cuando dos tercios de la panícula alcanzaron una tonalidad pajiza y los granos tenían un aspecto vítreo.

También se realizó la determinación secuencial de la biomasa total producida por la planta en los diferentes estados de desarrollo del cultivo. Se contó el número de tallos totales en el metro lineal y se separaron las hojas verdes, muertas, panículas, y se contaron solo hojas verdes, tallos y panículas. Cada parte de la planta se secó en un horno a una temperatura estable de 65 °C hasta que alcanzaron un peso seco constante.

Figura 2-4: Diseño de Parcela de los experimentos de modelación.

Fuente: CIAT MADR COLCIENCIAS, 2016. Los rectángulos azules son áreas de muestreo destructivo para biomasa y área foliar, los círculos rojos para monitoreo de fenología, El cuadro principal en el centro es el área definida para estimar rendimiento en grano y los recuadros rojos para estimar componentes de rendimiento.

Se evaluó el rendimiento de cada parcela cuando el grano alcanzó la madurez de cosecha. Se cosecharon áreas específicas de cada parcela y se realizaron mediciones detalladas. El grano cosechado se secó a una humedad del 14% aproximadamente, se pesó y se estimó el rendimiento.

Se registró y llevó a cabo un manejo agronómico óptimo en cada localidad, Basadas en las recomendaciones del programa AMTEC de FEDEARROZ. Este incluye la adecuación de suelos, el manejo integrado de malezas, insectos y enfermedades, y el manejo de la lámina de riego. Así mismo se implementó un plan de fertilización basado en el análisis de suelo en cada lote de siembra, teniendo en cuenta la fertilidad del suelo, los requerimientos nutricionales de cada variedad y las condiciones ambientales de la zona.

Finalmente, la selección de cultivares de este estudio se basó en criterios como la disponibilidad y calidad de datos, el sistema de cultivo y las ubicaciones geográficas.

Como resultado, se eligieron las variedades Fedearroz 2000 (F2000), Fedearroz 60 (F60) y Fedearroz 174 (F174). Estas son variedades comerciales de arroz desarrolladas por FEDEARROZ, originarias de las estaciones experimentales. F60 es una variedad que se cultiva exclusivamente en sistemas de riego, mientras que F174 se cultiva solo en regiones de secano como la Orinoquia. Por su parte, F2000 se cultiva en todos los sitios experimentales, lo que permite identificar las diferencias en los resultados de cada modelo y actuar como un cultivar de control para la intercomparación.

Fedearroz 2000 destaca por su amplia adaptabilidad y estabilidad durante ambos semestres del año, y es resistente al virus de la hoja blanca, razón de su larga duración en el mercado. Fedearroz 174, originaria de la Estación Experimental Santa Rosa en el departamento del Meta, ha sido ampliamente cultivada en la Orinoquia en sistemas secanos favorecidos por la precipitación. Por otro lado, Fedearroz 60 se caracteriza por su alto macollamiento y excelente calidad molinera y de cocción. Además, se cultiva en lugares exclusivos del país destinados a la producción de arroz tipo premium, como la meseta de Ibagué y el Valle del Cauca. (<https://www.fedearroz.com.co/es/nuestros-productos/semilla-certificada/>)

2.3 Modelos del cultivo de arroz

En el marco de esta investigación, se han seleccionado tres modelos de cultivo de arroz que han sido evaluados globalmente en diversos contextos de producción. Estos modelos, respaldados por una extensa documentación, son: ORYZA_v3 (Bouman et al., 2001), DSSAT-CERES Rice (J.W Jones et al., 2003) y Aquacrop (Raes et al., 2009). Cada uno de estos modelos posee características distintivas.

De forma general, todos los modelos requieren entradas relacionadas con prácticas de manejo, propiedades del suelo, datos meteorológicos y parámetros específicos del cultivo. Además, comparten la suposición de que el cultivo está libre de enfermedades, plagas y malezas, lo que significa que no consideran la reducción del rendimiento debido a estos factores.

ORYZA y CERES-Rice tienen una estructura modular más compleja en comparación con AquaCrop, su enfoque se centra en la fotosíntesis, respiración y desarrollo diario del

cultivo. AquaCrop, por otro lado destaca por su simplicidad, se enfoca principalmente en la respuesta del rendimiento al agua.

2.3.1 ORYZA v3.x

El modelo ORYZA, originario de la 'Escuela de De Wit' (Bouman et al., 1996), es una herramienta ecofisiológica diseñada para simular el crecimiento, desarrollo y balance hídrico del arroz. Desde su concepción, ha experimentado diversas evoluciones, culminando en la versión ORYZA (v3) (<https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/home>).

ORYZA2000, una versión precursora, se destaca por su capacidad para simular el crecimiento y desarrollo del arroz en situaciones potenciales, limitadas por agua y nitrógeno en un esquema diario (Bouman et al., 2001). ORYZA2000 ha sido ampliamente evaluado en una amplia variedad de climas y condiciones de producción (Amiri et al., 2011; Bouman & van Laar, 2006; Kar et al., 2009; Larijani et al., 2011; Neto, 2010). Incorpora módulos para el crecimiento del cultivo por encima del suelo, evapotranspiración, dinámica del nitrógeno y balance del agua del suelo. La dinámica del agua se simula mediante un módulo unidimensional y multicapa, capaz de representar el balance hídrico del suelo bajo diversas condiciones de crecimiento.

La versión ORYZA (v3) representa una evolución significativa de ORYZA2000 (Li et al., 2017). Esta versión mejorada amplía su dominio de aplicabilidad, abarcando una gama más amplia de entornos de producción de arroz. Una de sus principales bondades es su capacidad mejorada para representar la dinámica del agua del suelo y el contenido de nitrógeno en las hojas del cultivo. A nivel fenológico, ORYZA (v3) simula con parámetros que varían según genotipo, ambiente y gestión. La producción diaria de materia seca se relaciona con variables como la radiación neta, temperatura y el índice de área foliar (LAI).

La fotosíntesis de las hojas individuales se basa en el contenido de N de las hojas, la radiación y la temperatura. Además, el modelo sigue un esquema de cálculo diario, integrando tasas a lo largo del tiempo para simular la producción de materia seca y el desarrollo fenológico a lo largo de la temporada de crecimiento (Bouman y van Laar, 2006).

Desde un punto de vista científico, el modelo ORYZA se basa en una sólida fundamentación. Todos los parámetros del modelo están listados en archivos de datos externos y pueden ser modificados por el usuario. Su capacidad para simular con precisión el crecimiento y desarrollo del arroz en una variedad de condiciones lo convierte en una referencia en el campo de la modelización del cultivo de arroz.

2.3.2 CERES-Rice (DSSAT v4.x)

El Sistema de Apoyo a la Decisión para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) (J.W Jones et al., 2003) es una suite de modelado de cultivos de renombre mundial, desarrollada por un consorcio internacional de científicos, ha estado en uso durante más de 20 años y ha sido aplicado en más de 180 países (<https://dssat.net/about/>).

Esta herramienta integra diversos modelos de cultivos para los que simula el crecimiento, desarrollo y rendimiento en función del continuo suelo-planta-atmósfera. Ha sido ampliamente utilizado para análisis del impacto del cambio y variabilidad climática (Kadiyala et al., 2012; Mishra et al., 2013; Subash & Ram Mohan, 2012; Yang et al., 2014). Dentro de DSSAT se incluyen 42 cultivos en su última versión (4.8), el modelo CERES-Rice destaca por su capacidad para simular el crecimiento y desarrollo del arroz.

El modelo CERES-Rice fue concebido en la década de 1980 bajo el proyecto IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer). Su diseño se centra en simular el crecimiento y desarrollo del arroz desde la siembra hasta la madurez de la cosecha, basándose en procesos fisiológicos que describen la respuesta del arroz a las condiciones locales de suelo y clima (Ritchie et al., 1987). Esta herramienta se estructura en módulos que incorporan datos climáticos, características del suelo, gestión agrícola y parámetros genéticos, generando resultados de simulación y análisis de datos que describen cuantitativamente el proceso de crecimiento y desarrollo del arroz en diversas condiciones ambientales. El CERES-Rice se estructura en tres módulos fundamentales:

- Módulo de entrada: Incorpora archivos de datos climáticos, características del suelo, gestión agrícola y parámetros genéticos de las especies.
- Módulo de salida y análisis: Genera resultados de simulación y archivos de análisis de datos.

- Módulo de simulación de procesos fisiológicos y ecológicos: Este módulo permite describir cuantitativamente el proceso básico de crecimiento y desarrollo del arroz en diversas condiciones ambientales.

Una de las principales bondades del CERES-Rice es su capacidad para simular diariamente la fotosíntesis, respiración, crecimiento y desarrollo del cultivo, basándose en la información de entrada, incluidas las condiciones climáticas diarias, propiedades del suelo, prácticas de manejo y características del cultivar (Jones et al., 2003). Esta herramienta ha demostrado ser invaluable en la investigación agronómica, la producción de cultivos y la planificación del uso de la tierra. Su aplicación ha sido evaluada en diversos agroambientes y estrategias de manejo de cultivos, ofreciendo oportunidades para determinar la gestión de cultivos con el objetivo de mejorar la productividad del arroz (Timsina and Connor, 2001; Sarkar and Kar, 2006; Timsina and Humphreys, 2006).

Desde el punto de vista científico, el modelo CERES-Rice se sustenta en una amplia gama de investigaciones y estudios. Ha sido desarrollado y perfeccionado por un equipo interdisciplinario de científicos de prestigiosas instituciones, incluyendo Michigan State University, International Fertilizer Development Center y University of Hawaii (Singh et al. 1990; Buresh et al. 1991; Singh et al., 1993; Ritchie, et al., 1987, 1998). Además, ha participado activamente en comparaciones intermodales relacionadas con AgMIP, evidenciando su relevancia y aplicabilidad en el ámbito agronómico (Li et al., 2014; Hasegawa et al., 2017; Wallach et al., 2018).

El modelo DSSAT CERES-Rice representa una herramienta avanzada y versátil que, a lo largo de las décadas, ha demostrado ser fundamental para la investigación y producción agrícola, especialmente en el ámbito del cultivo del arroz. Su diseño modular y capacidad para integrar una amplia gama de datos lo posicionan como un recurso invaluable para los profesionales del sector agrícola. Algunas de las limitaciones que se podrían encontrar se relacionan a su antigüedad, además es común que modelos de este tipo requieran datos precisos y detallados para funcionar correctamente.

2.3.3 AquaCrop v6.x

El modelo AquaCrop, desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO, se diseñó para abordar la seguridad alimentaria y evaluar el efecto del medio ambiente y la gestión en la producción de cultivos. Su principal objetivo es simular la respuesta del rendimiento al agua de los cultivos herbáceos, siendo especialmente adecuado para abordar condiciones donde el agua es un factor limitante clave en la producción de cultivos (<https://www.fao.org/aquacrop/software/es/>).

AquaCrop se basa en conceptos ampliamente utilizados en el balance hídrico y su relación con la fisiología de las plantas (FAO-56). El modelo incluye módulos meteorológicos, de cultivo, de gestión y de suelo. Estos módulos consideran aspectos como precipitación, evapotranspiración de referencia, desarrollo del dosel y fenológico, transpiración, biomasa, estrés hídrico y térmico, propiedades del suelo y parámetros del agua subterránea. Una característica distintiva es que AquaCrop separa la evapotranspiración en transpiración del cultivo y evaporación del suelo. La biomasa y el rendimiento se determinan principalmente por el agua disponible en el suelo, y el modelo simula principalmente la respuesta de la biomasa y el rendimiento del cultivo al agua.

AquaCrop destaca por su equilibrio entre simplicidad, precisión y robustez. Utiliza un número relativamente pequeño de parámetros explícitos y variables de entrada en gran medida intuitivas, lo que facilita su aplicación en diversos contextos. Además, ha sido ampliamente evaluado para el cultivo de arroz, mostrando una buena habilidad para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo. En Colombia, por ejemplo, se ha evaluado su uso para cultivos de arroz y maíz, mostrando resultados prometedores (Cortés et al., 2013).

El diseño de AquaCrop se basa en procesos biofísicos fundamentales para garantizar una simulación precisa de la respuesta del cultivo en el sistema planta-suelo. La determinación de la biomasa y el rendimiento se realiza mediante ecuaciones que consideran la transpiración del cultivo, la evapotranspiración de referencia y la productividad del agua, entre otros factores. A pesar de sus bondades, AquaCrop presenta ciertas limitaciones. Está diseñado para predecir rendimientos de cultivos a escala de campo único (simulaciones puntuales), asumiendo que el campo es uniforme

sin diferencias espaciales en desarrollo del cultivo, transpiración, características del suelo o gestión. Solo se consideran flujos de agua verticales entrantes y salientes, sin tener en cuenta flujos laterales o interacciones complejas a escalas más grandes.

El arroz, como cultivo fundamental en muchas regiones del mundo, ha sido un punto focal en la aplicación de AquaCrop. El modelo ha sido evaluado en diferentes contextos de producción, mostrando su capacidad para simular con precisión el rendimiento del arroz en función del suministro de agua y la gestión agronómica. Además, estudios en Colombia y otros lugares han confirmado la habilidad del modelo para simular el crecimiento y desarrollo del arroz (Cleves Leguizamo et al., 2016; Maniruzzaman et al., 2015; Saadati et al., 2011).

2.4 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos en el estudio se llevó a cabo considerando la diversidad de fuentes, formatos y archivos de datos, además de los requerimientos específicos de cada modelo. Se implementó un enfoque de ciencia de datos que se representa en la Figura 2-5. Esto implicó la fase ETL (Extracción, Transformación y Carga), donde se recopilaron datos crudos del campo y datos procesados de diversas fuentes. Se estandarizaron las unidades de las variables y se generaron sus metadatos de la base de datos resultante.

Para los datos climáticos, se aplicaron controles de calidad básicos recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y se llenaron los datos faltantes basándose en estaciones cercanas del Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El objetivo era garantizar la ausencia de datos faltantes para la modelación de cultivos.

En cuanto a los datos del suelo, se creó un perfil para cada localidad basado en los valores promedio de diferentes análisis de suelo realizados antes de cada siembra experimental. Esto proporcionó un perfil más estable en características físicas, esenciales para simular un balance adecuado de agua en el suelo.

Se desarrolló una base de datos relacional categorizada por componentes de: agronomía, clima, suelo, fenología, crecimiento de biomasa, área foliar y rendimiento.

Esta base de datos fue el insumo principal para la simulación y evaluación de cultivos, así como para la intercomparación, al establecer un esquema de datos organizados. La Metadata se describe en el Anexo A.

De esta base consolidada, se seleccionaron tres cultivares o variedades y cuatro variables de respuesta para evaluar los modelos de cultivo: fenología (días después de la emergencia, floración y madurez fisiológica), biomasa total aérea (kg/ha), crecimiento del área foliar (Índice de Área Foliar en los modelos ORYZA y CERES-Rice, y cobertura del dosel en Aquacrop) y rendimiento en grano (kg/ha), siendo esta última la variable de mayor interés comercial. Se realizó una conversión de unidades utilizando una ecuación exponencial con índice de área foliar y coeficiente de extinción de luz (k) como parámetros de entrada, dependiendo de la etapa de desarrollo (ver Ecuación (2.1)).

$$CC = 1 - \exp(-k * LAI)^{\square} \quad (2.1)$$

Todas las tareas de procesamiento de datos se realizaron utilizando el lenguaje de programación R, con el apoyo de paquetes como tidyverse para la lectura, transformación, modelación y visualización de datos. R también se utilizó para la implementación del esquema de simulación, intercomparación y consolidación de resultados. Se utilizó la librería agroclimR desarrollada en R para la automatización y gestión de datos agroclimáticos y modelos de cultivo.

2.5 Esquema de simulación y evaluación de los modelos

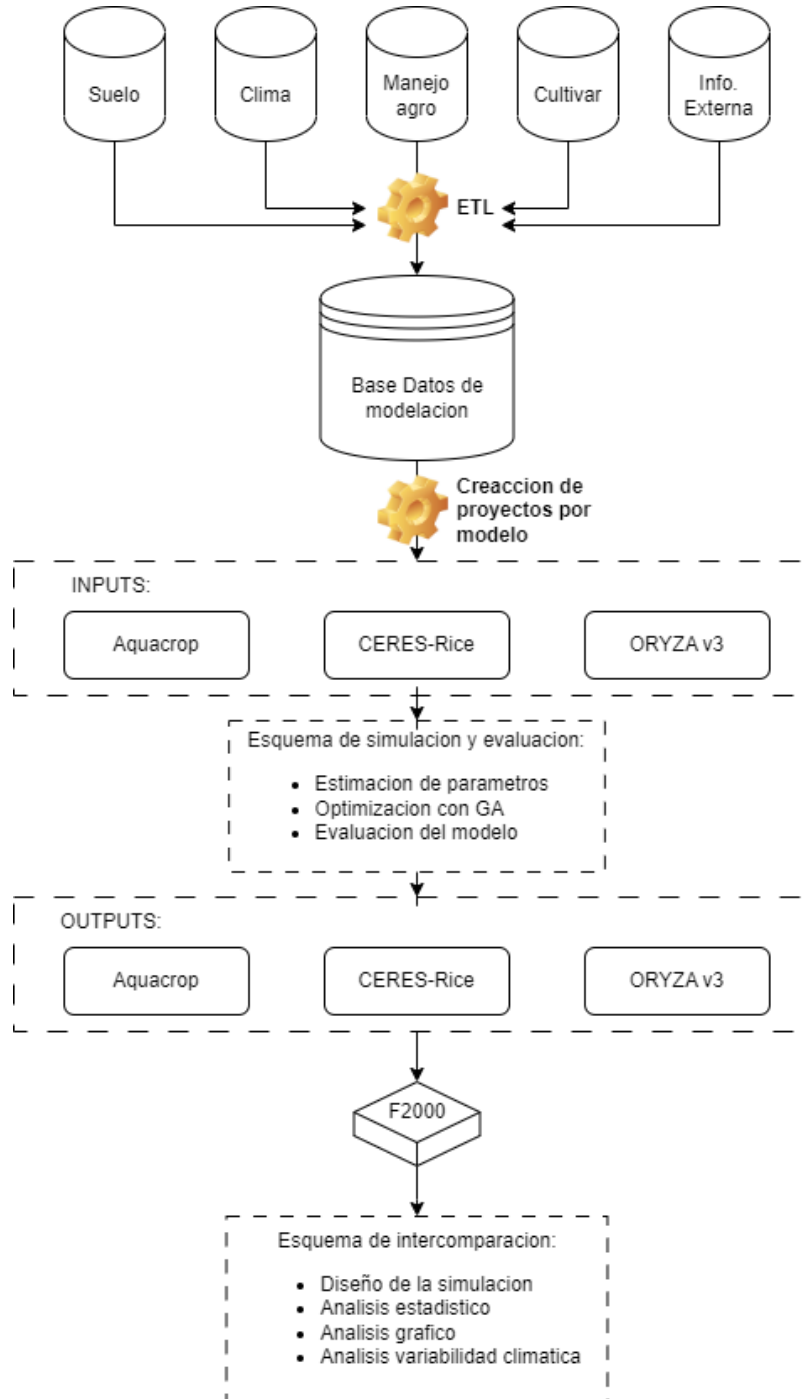
Se definió un esquema de trabajo generalizado para los tres modelos, que permitiera un control sobre sus requerimientos de entrada, así como las variables de respuesta utilizadas para la evaluación de desempeño, se buscó controlar algunos de los insumos de entrada a los modelos para la intercomparación como la selección de los conjuntos de datos y la categorización de los parámetros. El esquema incluye los siguientes pasos:

2.5.1 Selección de conjuntos de datos por cultivar:

Se seleccionó cuidadosamente el conjunto de datos para la calibración y evaluación, Aunque todos fueron ensayos en condiciones de centro experimental, el grupo de datos de calibración se seleccionó de experimentos que expresaran un rendimiento alto entre su localidad y que tuvieran una congruencia con crecimiento y desarrollo. Solo se

eligieron experimentos cuyo promedio de coeficiente de variación de las variables de respuesta fuera inferior al 30%.

Figura 2-5: Esquema de procesamiento de datos.



Fuente: Creado por el autor.

Por su parte, la **Tabla 2-3** resume la disponibilidad de experimentos disponibles para evaluar los tres modelos seleccionados.

Tabla 2-3: Distribución de conjuntos de datos experimentales por cultivar.

Cultivar	Etapa	Localidad	Sistema	No. Experimentos	Total Exp.
F2000	Calibración	AIHU	Riego	4	14
		MRCO		4	
		SDTO		4	
		VVME	Secano	1	
		YOCS		1	
	Evaluación	AIHU	Riego	2	18
		MRCO		4	
		SDTO		3	
		VVME	Secano	6	
		YOCS		3	
F60	Calibración	AIHU	Riego	2	5
		MRCO		2	
		SDTO		1	
	Evaluación	AIHU	Riego	2	4
		SDTO		2	
F174	Calibración	VVME	Secano	4	6
		YOCS		2	
	Evaluación	VVME	Secano	3	5
		YOCS		2	

SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare

2.5.2 Selección de parámetros:

Para garantizar una modelización precisa del sistema de cultivo y del entorno en cuestión, se establecieron criterios rigurosos para la selección de parámetros. Estos parámetros fueron elegidos en función de su relevancia, identificabilidad y sensibilidad.

Además, se categorizaron según componentes de evaluación, con el objetivo de identificar el proceso asociado en cada modelo.

A partir de la revisión bibliográfica, se observó que, en los tres modelos mencionados, los parámetros relacionados con la fenología son particularmente sensibles. Es importante destacar que el índice de sensibilidad de algunos parámetros puede verse modulado por factores externos, como las condiciones climáticas, y por la variable de respuesta específica que se esté evaluando. (Ge, H., Ma, F., Li, Z., & Du, C. (2021), Guo, D., Zhao, R., Xing, X., & Ma, X. (2020), Liu, J., Liu, Z., Zhu, A. X., Shen, F., Lei, Q., & Duan, Z. (2019))

Para esta investigación, se llevó a cabo una evaluación paramétrica exhaustiva para cada modelo. Esta decisión se basó en la disponibilidad de una base de datos experimental que abarcaba todos los componentes del crecimiento y desarrollo de la planta de arroz. Para mejorar la calibración de los modelos, fue esencial priorizar la calibración de los parámetros más sensibles, considerar las interacciones entre parámetros y reconocer las variaciones inherentes a diferentes niveles de estrés relacionados con la fertilidad y el riego. Es imperativo también considerar aquellos parámetros que describen las respuestas del cultivo al estrés hídrico, dada su relevancia en la simulación de las respuestas del rendimiento al agua (Tan, J., Zhao, S., Liu, B., Luo, Y., & Cui, Y., 2021).

- Parámetros del modelo ORYZA v3

Para este modelo se consideraron 22 parámetros detallados en la Tabla 2-4, incluyendo 6 tablas de coeficientes de partición de biomasa (FSHTB, FLVTB, FSTTB, FSOTB), evolución del área foliar específica (SLATB) y coeficiente de muerte de hojas (DRLVT).

En el componente de fenología, los parámetros relacionados con el desarrollo de la planta de arroz son DVRJ, DVRI, DVRP y DVRR, que representan los cambios en la etapa de desarrollo por día de grado. Las etapas clave del desarrollo del arroz son: emergencia (DVS = 0), final de la etapa juvenil (DVS = 0.4), iniciación de la panícula (DVS = 0.65), floración (DVS = 1) y madurez fisiológica (DVS = 2).

Tabla 2-4: Parámetros seleccionados del modelo ORYZA v3.

Componente	Parámetro	Unidad	Descripción
Fenología	DVRJ	1/°Cd	Tasa de desarrollo en fase juvenil
	DVRI	1/°Cd	Tasa de desarrollo en fase sensible al fotoperiodo
	DVRP	1/°Cd	Tasa de desarrollo en desarrollo de panícula
	DVRR	1/°Cd	Tasa de desarrollo en fase reproductiva
Crecimiento de biomasa y área foliar	RGRLMX	1/°Cd	Tasa máxima de crecimiento relativo del área foliar
	RGRLMN	1/°Cd	Tasa mínima de crecimiento relativo del área foliar
	SLAMAX	ha/kg	Valor máximo de SLA (Área Foliar Específica)
	SLATB	(ha/kg)	Tabla de área foliar específica, valor DVS
	FSTR	fraction	Fracción de carbohidratos asignados a los tallos que se almacena como reservas
	SPGF	No/kg	Factor de crecimiento de espiguilla
	WGRMX	kg/grain	Peso máximo individual del grano
	FSHTB	DVS fraction -	Tabla de fracción de materia seca total aérea
	FLVTB	DVS fraction -	Tabla de fracción de materia seca aérea destinada a las hojas
	FSTTB	DVS fraction -	Tabla de fracción de materia seca aérea destinada a los tallos
	FSOTB	DVS fraction -	Tabla de fracción de materia seca aérea destinada a las panículas
	DRLVT	DVS coeff -	Tabla del coeficiente de muerte foliar
	ZRTMCD	m	Profundidad máxima de raíces en caso de sequía
Estrés abiótico (Temperatura y sequía)	ULLE	kPa	Límite superior de expansión foliar
	LLLE	kPa	Límite inferior de expansión foliar
	FSWTD	fraction	Relación del agua disponible restante con la capacidad total de suministro de agua
	COLDREP	°C	La temperatura umbral para la esterilidad causada por el frío
	CTSTER	°C	La temperatura umbral para la esterilidad causada por el calor

Entre los parámetros de crecimiento de biomasa y área foliar, se destaca la tasa máxima de crecimiento relativo del área de la hoja (RGRLMX) como el parámetro más sensible que influye en el crecimiento de la hoja, según el estudio APSIM-ORyza. Además, la fracción de materia seca destinada al crecimiento de las hojas (FLV) en $DVS = 0.5$ determina la distribución de la biomasa entre las diferentes partes de la planta. En relación con el desarrollo de los granos de arroz, WGRMX controla el peso máximo individual del grano, mientras que SPGF describe el número de espiguillas por unidad de biomasa.

La calibración de los parámetros de estrés por agua puede mejorar aún más el rendimiento del modelo en condiciones de estrés hídrico. Por lo tanto, se consideraron los parámetros ULLE (Límite Superior de Expansión de las Hojas) y LLE (Límite Inferior de Expansión de las Hojas). ULLE afecta la tasa de expansión de las hojas en condiciones de sequía, mientras que LLE determina la tasa mínima de expansión de las hojas bajo dichas condiciones. FSWTD (Factor Límite Superior para la Disminución de la Transpiración) influye en la tasa de transpiración de las plantas de arroz en condiciones de sequía.

En cuanto al estrés por temperatura, se incluyeron los parámetros COLDREP y CTSTER para optimización. COLDREP actúa como el límite de temperatura que causa esterilidad en el polen debido al frío, mientras que CTSTER representa el límite de temperatura que inicia la esterilidad por calor.

- Parámetros del modelo DSSAT-CERES-Rice:

En el modelo DSSAT-CERES-Rice, se evaluaron nueve parámetros especificados en la **Tabla 2-5**. Esta cantidad es notablemente menor en comparación con los otros modelos. Esta organización se debe a que la plataforma DSSAT clasifica los parámetros de cultivo en distintos archivos. En el contexto de esta investigación, solo se ajustaron aquellos contenidos en el archivo con extensión *.CUL, que alberga los parámetros específicos de un determinado cultivar, ya sea variedad o híbrido.

Tabla 2-5: Parámetros seleccionados del modelo DSSAT-CERES-Rice.

Componente	Parámetro	Unidad	Descripción
Fenología	P1	GDD	Fase vegetativa básica
	P20	h	Fotoperiodo crítico o la duración del día más largo
	P2R	GDD	Grado en que se retrasa el desarrollo fásico que lleva a la iniciación de la panícula
	P5	GDD	Período de tiempo desde el comienzo del llenado del grano
Crecimiento de biomasa y área foliar	PHINT	GDD	Intervalo de filocrono
	G1	No/g	Coefficiente del número potencial de espiguillas
	G2	g	Peso de un solo grano
	G3	scalar	Coefficiente de macollamiento
Estrés abiótico (Temperatura y sequía)	G4	scalar	Coefficiente de tolerancia a la temperatura
	THOT	°C	Temperatura por encima de la cual se afecta la esterilidad de espiguillas
	TCLDP	°C	Temperatura por debajo de la cual se afecta la esterilidad de espiguillas

Es relevante mencionar que los parámetros G4 y P20 han sido reconocidos como los más determinantes en todas las respuestas del modelo a lo largo de la temporada de crecimiento para diferentes cultivares (Ge, H., Ma, F., Li, Z., & Du, C. (2021)). El parámetro G4 se asocia con el crecimiento y desarrollo del arroz, mientras que P20 se vincula con la fenología de la planta. Otros parámetros como P1, P2R y P5 denotan fases cruciales en el desarrollo del arroz. Adicionalmente, G1, G2 y G3 están relacionados con el crecimiento y desarrollo del grano, siendo G2 el encargado de regular el peso individual de cada grano.

- Parámetros del modelo Aquacrop

En el modelo Aquacrop, se llevaron a cabo evaluaciones con 17 parámetros de los cuales, cinco parámetros son de fenología, ocho de Crecimiento de biomasa y área foliar y 4 parámetros relacionados a estreses abióticos. Los detalles se observan en la Tabla 2-6.

Componente	Parámetro	Unidad	Descripción
Fenología	GDD_emergence	GDD	Grados-día desde la siembra hasta la emergencia
	GDD_CCx	GDD	Grados-día desde la emergencia hasta la máxima profundidad de enraizamiento/Cobertura máxima del dosel
	GDD_FL	GDD	Grados-día desde la emergencia hasta la floración
	GDD_FLL	GDD	Duración de la etapa de floración
	GDD_M	GDD	Grados-día desde la emergencia hasta la madurez
Crecimiento de biomasa y área foliar	CGC	%/d	Coefficiente de Crecimiento del Dosel
	GDD_senecence	GDD	Grados-día desde la emergencia hasta el inicio de la senescencia
	CCx	%	Cobertura máxima del dosel
	WP	g/m ²	Productividad del Agua en el Cultivo
	Hlo	%	Índice de Cosecha de Referencia
	GDD_HI	GDD	Acumulación del Índice de Cosecha durante la formación del rendimiento
	CDC	% / GDD	Coefficiente de Declinación del Dosel
	Zr	m	Profundidad máxima efectiva de enraizamiento
Estrés abiótico (Temperatura y sequía)	Kc	KcTr	Coefficiente del cultivo cuando el dosel está completo
	Ks_exp	p-exp	Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel - Umbral inferior
	Ks_polc	°C	Temperatura mínima del aire por debajo de la cual la polinización comienza a fallar
	Ks_polh	°C	Temperatura máxima del aire por encima de la cual la polinización comienza a fallar

Tabla 2-6: Parámetros seleccionados del modelo Aquacrop v6.

Los parámetros GDD_senecence, GDD_M y Kc han sido destacados como los más determinantes en relación a la biomasa máxima superficial (AGB) y el rendimiento, según estudios de Guo (2020) y XING et al. (2017). Tanto GDD_senecence como GDD_M están vinculados con la fenología de la planta, marcando las fases esenciales en el desarrollo del maíz. Por su parte, Kc se asocia con el coeficiente de cultivo basal, elemento crucial en la evapotranspiración del cultivo.

K_c y K_s_{polc} son parámetros que delimitan las reacciones del cultivo ante el estrés hídrico. A pesar de no ser identificados como los más sensibles, su relevancia se manifiesta en su capacidad para simular las respuestas de rendimiento frente a condiciones de escasez de agua.

Adicionalmente, en los estudios revisados, se observó que GDD_M ejerce un impacto significativo en la biomasa máxima superficial (AGB) durante la fase de crecimiento medio en todos los escenarios evaluados. Por otro lado, CCx , que denota la cobertura máxima del dosel, también fue reconocido por su sensibilidad en la respuesta de la biomasa AGB en todas las condiciones, y esta sensibilidad se intensificó con el incremento del estrés hídrico.

2.5.3 Método de estimación de parámetros y optimización:

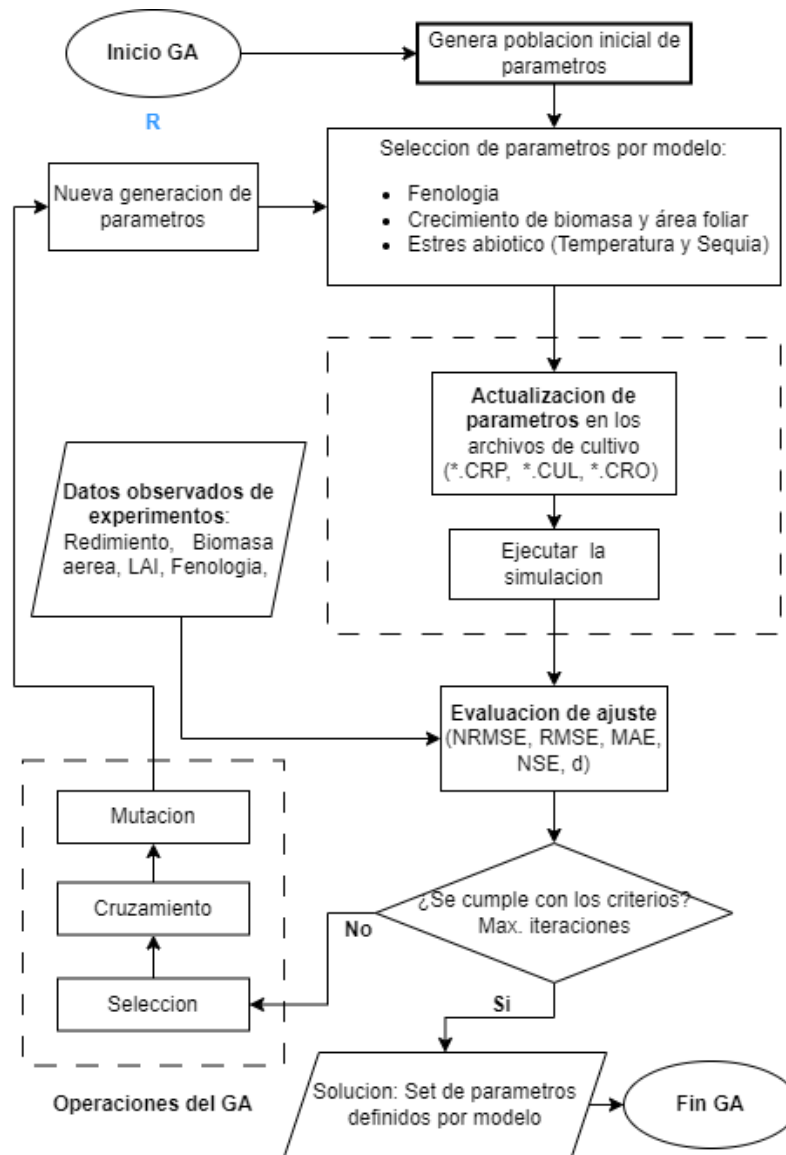
Para estimar valores medios, así como rangos mínimos y máximos con un intervalo de confianza definido, se optó por el método de bootstrapping mediante el paquete boot de R (<https://cran.r-project.org/web/packages/boot/index.html>). Este método permite realizar múltiples muestreos (con reemplazo) de un tamaño definido de una población, siendo particularmente útil cuando cada parámetro o variable de entrada puede tener una distribución desconocida o no normal.

El proceso de bootstrapping para cada parámetro involucró 2000 repeticiones y un intervalo de confianza del 95%, y los valores resultantes se utilizaron como rangos de variación. Para aquellos parámetros que carecían de datos para su estimación, se decidió utilizar un rango de variación del $\pm 30\%$ alrededor del valor predeterminado, similar a como lo sugieren (Tan, J., Cui, Y., & Luo, Y. , 2017).

Para la implementación del algoritmo genético, se empleó el paquete GA de R (Scrucca L., 2013). Se estableció un tamaño de población inicial de 250, con 20 generaciones/iteraciones, lo que resultó en un total de 1000 combinaciones diferentes de parámetros para cada variedad a calibrar en cada modelo. Este proceso se llevó a cabo en tres etapas. Primero, se optimizaron los parámetros de fenología mientras se mantenían estáticos los demás parámetros. En la segunda etapa, se optimizó el crecimiento de la biomasa y el área foliar. Finalmente, se combinaron los resultados de

crecimiento y desarrollo, y se optimizaron los parámetros de estrés abiótico. Cada etapa contó con una variable de respuesta que evaluó la función de optimización. En este caso, se utilizaron las observaciones de fenología (días hasta el inicio de la panícula, floración y madurez fisiológica) en la primera etapa, seguido de la adición de biomasa, área foliar y rendimiento en etapas posteriores, y finalmente todas las variables con parámetros de estrés abiótico. Una descripción más detallada del proceso se puede observar en la Figura 2-6.

Figura 2-6: Diagrama de flujo de la calibración y optimización de parámetros.



Fuente: Adaptado de la metodología de Soundharajan, B., & Sudheer, K. P. (2013).

2.5.4 Evaluación de la calibración:

Se evaluó la calidad de la calibración utilizando diferentes criterios o medidas de ajuste. Las medidas de ajuste o de bondad de ajuste deben ser capaces de responder a la pregunta ¿Qué tan bien lo hace la predicción del modelo con respecto a una variable de respuesta?. La elección de qué medidas de bondad de ajuste usar depende del tipo de modelo y del contexto en el que se esté trabajando.

Para la evaluación de los modelos se eligieron cinco medidas de ajuste, tres que cuantifican la distancia entre valores simulados y observados, y dos índices de habilidad (skill scores) que comparan la habilidad del modelo con respecto a un predictor simple, como el promedio de los valores observados. Estas medidas de ajuste han sido ampliamente utilizadas en modelación de cultivos (Li., et al 2015).

El Error Cuadrático Medio (**RMSE**, por sus siglas en inglés) cuantifica la diferencia entre valores predichos y observados, siendo sensible a valores atípicos (ver Ecuación (2.2)). Un RMSE más bajo indica un mejor ajuste del modelo. El Error Medio Absoluto (**MAE**, por sus siglas en inglés), en cambio, es el promedio de errores absolutos entre predicciones y observaciones, ofreciendo una visión clara del error medio sin penalizar errores grandes (ver Ecuación (2.3)). El **NRMSE**, una versión normalizada del RMSE, permite comparaciones entre modelos con diferentes escalas, aunque su interpretación puede variar según el valor de normalización, en este caso se normalizó con el promedio de los valores observados (ver Ecuación (2.4)).

Por otro lado, el Índice de Acuerdo de Willmott (**d**) evalúa el grado de error de predicción del modelo, tiene valores entre 0 y 1, siendo 1 el modelo perfecto (Observado=Simulado), su interpretación debe considerar que es un criterio sensible a valores extremos (ver Ecuación (2.5)). Por último, el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (**NSE**) compara la varianza residual con la varianza de los datos medidos, 1 indica un modelo perfecto, cuando su valor es menor a cero podría indicar que media observada es un predictor más preciso que el modelo (ver Ecuación (2.6)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (2.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (2.3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (2.4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (2.5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2} \quad (2.6)$$

2.5.5 Evaluación del modelo con un conjunto de datos independiente:

Después de la optimización de parámetros, se evaluó cada modelo-cultivar utilizando el conjunto de datos independiente "Evaluación". Esta etapa del proceso debe demostrar la capacidad de los modelos de predecir las variaciones en productividad del sistema de cultivo. Además, debería permitir identificar las limitaciones de cada modelo y las oportunidades de mejorar su desempeño.

Se simuló cada experimento del conjunto de datos con cada modelo y cultivar, se obtuvieron las medidas de ajuste para las variables de respuesta y se graficaron los resultados para su análisis.

2.6 Intercomparación de los modelos

La intercomparación de modelos tiene como principal propósito evaluar la precisión y eficacia de diferentes modelos al predecir o representar un conjunto específico de datos. En el contexto de esta investigación, se propone una metodología que compara el desempeño de tres modelos de cultivo en función de su rendimiento en grano, la biomasa total producida y la duración del ciclo de producción.

Se eligió el cultivar Fedearroz 2000 (F2000) debido a su amplia variedad de experimentos en todos los sitios de evaluación y su prevalencia en diversas regiones de Colombia, atribuida a su estabilidad genética y resistencia al virus de la hoja blanca.

Con los parámetros específicos para cada modelo de cultivo, estimados en la fase anterior, se realizaron simulaciones en 32 experimentos que corresponden a las fechas de siembra de los ensayos experimentales de F2000. De cada simulación, se extrajeron variables de evaluación, como el ciclo en días para fenología, biomasa total para crecimiento y rendimiento en peso seco. Además, se obtuvieron variables resultantes de los procesos de balance hídrico, como la evaporación y transpiración acumulada, para calcular el Uso de Eficiencia del Agua en cada modelo.

En el marco de la intercomparación, se categorizaron los experimentos según la fase de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) a la que estuvo expuesto el cultivo 15 días antes de la floración, considerada una etapa crítica para estreses abióticos. Para determinar la fase ENSO, se evaluaron cuatro índices disponibles en el paquete rsoi de R (<https://cran.r-project.org/web/packages/rsoi/index.html>) :

- ONI (Oceanic Oscillation Index): Define las fases de El Niño y La Niña basándose en la temperatura promedio de la superficie del mar en la región Niño 3.4.
- SOI (Southern Oscillation Index): Es un índice estandarizado basado en las diferencias de presión atmosférica observadas entre Tahití y Darwin, Australia.
- NPGO (North Pacific Gyre Oscillation): Representa la segunda modalidad dominante de variabilidad de la altura de la superficie del mar en el Noreste del Pacífico.
- MEI.v2: Es un índice bimensual que combina variables oceánicas y atmosféricas para evaluar ENSO.

Una vez agrupados los resultados, se llevó a cabo un análisis de correlación y de varianza para las variables de respuesta: Rendimiento, Biomasa Total a Madurez y Duración del Ciclo de Cultivo. Posteriormente, se graficaron los resultados para una visualización más clara.

3. Capítulo 3: Resultados y discusión

En este capítulo se exponen los resultados de los diferentes esquemas metodológicos para dar cumplimiento a los objetivos, se inicia con un resumen de los conjuntos de datos, luego se presentan los parámetros estimados por cada modelo y los tres cultivares seleccionados. Posteriormente se presentan los resultados de la optimización de parámetros con el GA en cada componente de evaluación: Fenología, Biomasa aérea, Área foliar y Rendimiento en grano. Se realiza el mismo paso con la evaluación de los modelos, donde se evalúa la simulación sobre el set de datos independiente y se generan gráficos y estadísticos. Finalmente se presentan los resultados de la intercomparación de modelos de cultivo sobre el conjunto de datos de Fedearroz 2000 y el análisis estadístico de la respuesta de los modelos a las condiciones de variabilidad climática ENSO presentadas durante el periodo experimental.

3.1 Características de los conjuntos de datos de calibración y evaluación.

Se examinaron los conjuntos de datos por cada variedad de arroz bajo distintas fases de modelación. La **Tabla 3-7** resume algunas diferencias y variaciones notables en las variables de respuesta, el Índice de Área foliar máximo (LAI max) y Biomasa aérea máxima, que requieren mediciones temporales y son propensas a errores debido al tamaño de muestra, mostraron una variabilidad significativa, con coeficientes de variación que, aunque elevados, se consideran aceptables hasta un 30% en este contexto. Para las otras variables, un CV más bajo indica mayor precisión. Específicamente, las fases de calibración generalmente presentaron valores medios más bajos, acorde a lo recomendado para estimación de parámetros.

Tabla 3-7: Promedios observados y coeficiente de variación de las variables de respuesta.

Cultivar	Etapas	Variable	Promedio Observado	Coficiente de variación (%)
F2000	Calibration	Fenología	78	5.7
		Rendimiento	5448	9.5
		LAI max	5.2	14.5
		Biomasa max	16651	21.3
	Evaluation	Fenología	80	4.3
		Rendimiento	5153	19.7
		LAI max	4.5	28.2
		Biomasa max	12149	28.6
F60	Calibration	Fenología	76	3.8
		Rendimiento	6609	17.0
		LAI max	5.0	12.2
		Biomasa max	15464	6.8
	Evaluation	Fenología	80	4.0
		Rendimiento	6326	19.6
		LAI max	6.1	21.2
		Biomasa max	13305	18.7
F174	Calibration	Fenología	83	2.7
		Rendimiento	5068	8.1
		LAI max	6.0	18.9
		Biomasa max	14104	9.1
	Evaluation	Fenología	84	2.4
		Rendimiento	4512	7.0
		LAI max	4.1	33.3
		Biomasa max	13120	25.2

3.2 Estimación de parámetros en los modelos (Calibración)

Se presentan los resultados comparativos de los parámetros obtenidos mediante bootstrapping y posterior optimización con GA. Los resultados evidencian algunas diferencias notables entre cultivares. La variabilidad observada entre F60 (cultivado en riego) y F174 (apto para arroz de secano) resalta la importancia de ajustar adecuadamente los rangos de calibración para reflejar las características específicas de cada cultivar.

3.2.1 Parámetros del modelo ORYZA

La **Tabla 3-8** presenta el comparativo de los valores de los parámetros del modelo ORYZA, SLATB, FSHTB, FLVTB, FSTTB, FSOTB y DRLVT son los parámetros de partición de biomasa y tasa de muerte de hojas que cambian en el tiempo (DVS).

En relación al valor base, todos los parámetros de los cultivares mostraron cambios en fenología: DVRJ aumentó en un 36.7%, 35.4% y 25% respectivamente, mientras que DVRP disminuyó en un 15.2%, 15.4% y 26.5%. Estas fluctuaciones en las fases de crecimiento sugieren que los cultivares evaluados cuentan con una fase vegetativa más corta con respecto al valor Base de IR72 y una fase de desarrollo de panícula más larga. En el crecimiento de biomasa y área foliar, el factor de crecimiento de espiguilla (SPGF) disminuyó entre 23.4% y 40.5% en los cultivares lo que podría deberse más a una respuesta del algoritmo genético para encontrar un valor cercano al rendimiento observado. En cuanto al estrés abiótico, se identificó un aumento general en la relación del agua disponible (FSWTD) en torno al 21% al 28% lo que podría interpretarse como una mayor tolerancia a condiciones de estrés abiótico, comparados con el cultivar de referencia. Además, se observaron variaciones en temperaturas umbral para esterilidad.

Tabla 3-8: Parámetros del modelo ORYZA v3 optimizados con GA.

Parámetro	Base	F2000	F60	F174
DVRJ	0.000656	0.0008965	0.000888	0.0008202
DVRI	0.0007576	0.0007576	0.0007576	0.0007576
DVRP	0.000681	0.0005775	0.0005759	0.0005004
DVRR	0.002351	0.0022122	0.0022275	0.0021914
SLATB DVS = 0, 0.16, 0.33, 0.65, 0.79, 2.1, 2.5	0.0045, 0.0045, 0.0033, 0.0028, 0.0024, 0.0023, 0.0023	0.00474, 0.00345, 0.00253, 0.00215, 0.00184, 0.00176, 0.00176	0.00398, 0.00398, 0.00292, 0.00247, 0.00212, 0.00203, 0.00203	0.00422, 0.00422, 0.00333, 0.00282, 0.00242, 0.00232, 0.00232
FSHTB DVS = 0, 0.43, 1, 2.5	0.5, 0.75, 1, 1	0.61096, 0.91644, 0.96096, 1	0.59595, 0.89392, 0.94595, 1	0.58423, 0.87635, 0.93423, 1
FLVTB DVS = 0, 0.5, 0.75, 1, 1.2, 2.5	0.6, 0.6, 0.3, 0, 0, 0	0.55, 0.615, 0.372, 0.074, 0.097, 0.022	0.709, 0.609, 0.371, 0.008, 0.032, 0	0.483, 0.694, 0.269, 0.017, 0.13, 0.047
FSTTB DVS = 0, 0.5, 0.75, 1, 1.2, 2.5	0.4, 0.4, 0.6, 0.1, 0, 0)	0.45, 0.385, 0.55, 0.101, 0.058, 0.006	0.291, 0.391, 0.474, 0.087, 0.018, 0.026	0.517, 0.306, 0.616, 0.094, 0.021, 0.031
FSOTB DVS = 0, 0.5, 0.75, 1, 1.2, 2.5	0, 0, 0.1, 0.9, 1, 1	0, 0, 0.078, 0.825, 0.845, 0.972	0, 0, 0.155, 0.905, 0.95, 0.974	0, 0, 0.115, 0.889, 0.849, 0.922
DRLVT DVS = 0, 0.6, 1, 1.6, 2.1, 2.5	0, 0, 0.015, 0.025, 0.05, 0.05	0, 0, 0.01518, 0.02529, 0.05059, 0.05059	0, 0, 0.01604, 0.02673, 0.05347, 0.05347	0, 0, 0.01395, 0.02325, 0.0465, 0.0465
RGRLMX	0.0085	0.008378	0.0083308	0.0081171
RGRLMN	0.004	0.0040963	0.0048902	0.0042426
SLAMAX	0.0045	0.0047442	0.0039	0.0042173
FSTR	0.2	0.20	0.22	0.20
SPGF	64900	49740	45296	38591
WGRMX	0.0000249	0.0000234	0.0000243	0.0000231
ZRTMCD	0.4	0.29	0.29	0.31
ULLE	1.45	1.42	1.77	1.63
LLLE	1404	1220	1336	1144
FSWTD	0.4	0.48	0.49	0.51
COLDREP	21	18.41	19.86	16.22
CTSTER	36.5	37.38	41.34	44.71

3.2.2 Parámetros del modelo CERES-Rice

En la Tabla 3-9 se muestra un comparativo de los parámetros del modelo CERES-Rice para distintos cultivares. Se identifican variaciones relevantes en "PHINT" y "P2R" con respecto al valor base. El parámetro "PHINT" regula el intervalo de filocrono, con un rango típico de 55-90 °C-d y un valor predeterminado de 83 °C-d. Todos los cultivares presentaron valores atípicamente bajos, lo que sugiere la necesidad de una recalibración utilizando rangos más ajustados. Por otro lado, "P2R" está vinculado al desarrollo fásico que conduce a la iniciación de la panícula y su retraso debido al fotoperiodo. Aunque su rango va de 5-300 °C-d, es notable que variedades modernas de arroz presenten valores en el extremo inferior, como lo vemos en F60. Igualmente es importante destacar que los parámetros estimados para estreses abióticos muestran un aumento en el límite superior de temperatura que afecta la esterilidad de espiguillas (THOT) y un valor algo superior para el límite inferior TCLDP lo que es teóricamente apropiado para las variedades desarrolladas para condiciones de trópico.

Tabla 3-9: Parámetros del modelo CERES-Rice optimizados con GA.

Parameter	Base	F2000	F60	F174
P1	500	543	633	505
P2O	12	12	12	12
P2R	100	129	55	151
P5	450	388	381	423
PHINT	83	56	55	55
G1	55	70	71	57
G2	0.025	0.024	0.031	0.026
G3	1	0.8	1.0	1.1
THOT	28	31.5	38.5	39.5
TCLDP	15	15.6	16.5	18.6

3.2.3 Parámetros del modelo Aquacrop

En la Tabla 3-10 se observan los parámetros de los cultivares de arroz F2000, F60 y F174 con respecto al modelo estándar AquaCrop, se observan variaciones significativas en varios componentes. En el componente de Frenología, por ejemplo, el parámetro

GDD emergence muestra un aumento del 30,67% tanto para F2000 como para F60 en comparación con el valor base, mientras que F174 tiene una ligera disminución del 1,33%. Similarmente, GDD_CCx experimenta incrementos de 141,89%, 152,70% y 125,95% para F2000, F60 y F174 respectivamente. Estas variaciones en los grados-día desde la siembra hasta ciertas fases fenológicas indican cambios específicos que deben realizarse a un modelo como Aquacrop que es genérico para muchos cultivos.

Por otro lado, en el componente de Crecimiento de biomasa y área foliar, valores como CGC y CDC muestran reducciones porcentuales drásticas en los tres cultivares en relación al valor base. Estas reducciones sugieren diferencias en la dinámica de crecimiento del dosel y la declinación del mismo entre los cultivares y el estándar AquaCrop para arroz paddy.

Tabla 3-10: Parámetros del modelo Aquacrop v6 optimizados con GA.

Parameter	Base	F2000	F60	F174
GDD_emergence	150	196	196	148
GDD_CCx	370	895	935	836
GDD_FL	1150	1486	1513	1487
GDD_FLL	350	204	206	191
GDD_M	1900	2308	2323	2203
CGC	0.12257	0.00654	0.00787	0.00520
GDD_senecence	1300	1744	1752	1725
CCx	0.95	0.87	0.87	0.94
WP	19	16	17	17
Hlo	43	39	46	35
GDD_HI	680	568	572	544
CDC	0.0933	0.00406	0.00552	0.00256
Zr	0.45	0.39	0.46	0.40
NPLDS	150000	1429550	1164318	1581721
Kc	1.1	1.24	1.00	0.97
Ks_exp	0.4	0.31	0.31	0.50
Ks_polc	8	5.78	9.02	7.91
Ks_polh	35	34	39	38

3.3 Optimización de parámetros con Algoritmo Genético

Los resultados de calibración se presentan divididos por las cuatro variables de respuesta, para cada uno se presenta un tabla resumen con las medidas de ajuste y gráficos de dispersión observados vs simulados y comparativos entre modelos vs cultivar. Los gráficos cuentan con líneas de referencia 1:1 y de dispersión +/- 15%, así como las medidas de ajuste en texto.

3.3.1 Fenología

Todos los modelos evaluados demostraron una capacidad predictiva notable en la etapa de calibración. En la Tabla 3-11, se presenta una comparativa detallada de los tres modelos en relación con tres variedades específicas de arroz. Para cada combinación de variedad y modelo, se resaltan dos parámetros clave: el "Promedio Observado" de DAE (Días Después de la Emergencia) y el "Promedio Simulado" de DAE. Estos valores se complementan con métricas de error y ajuste definidas en el esquema metodológico. Ver la Figura 3-7

Tabla 3-11: Medidas de ajuste de la calibración de Fenología.

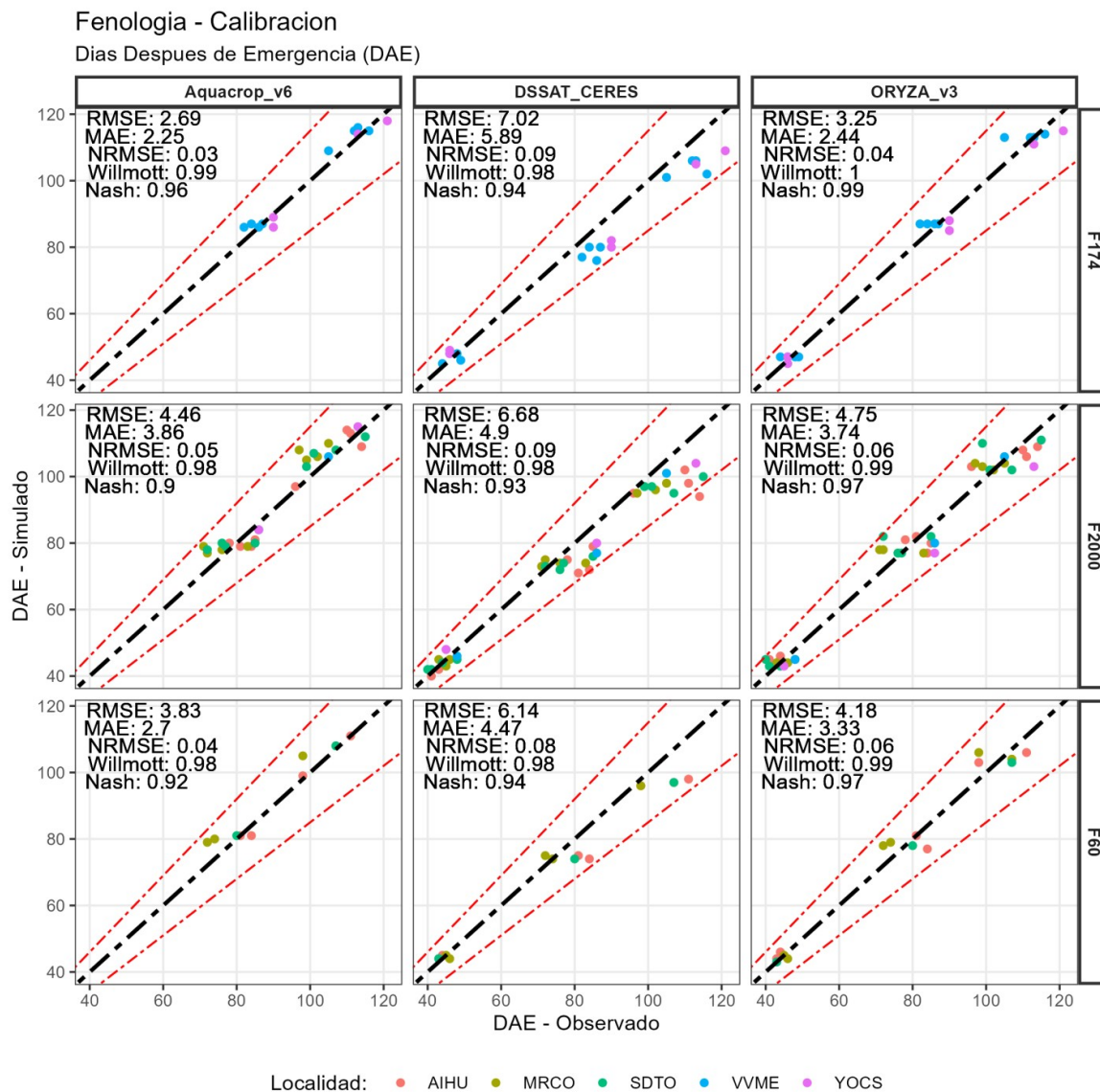
Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	100	101	0.03	2.7	2.3	0.99	0.96
	DSSAT_CERES	100	92	0.09	7.0	5.9	0.98	0.94
	ORYZA_v3	100	100	0.04	3.2	2.4	1.00	0.99
F2000	Aquacrop_v6	92	94	0.05	4.5	3.9	0.98	0.90
	DSSAT_CERES	92	86	0.09	6.7	4.9	0.98	0.93
	ORYZA_v3	92	92	0.06	4.7	3.7	0.99	0.97
F60	Aquacrop_v6	91	93	0.04	3.8	2.7	0.98	0.92
	DSSAT_CERES	91	86	0.08	6.1	4.5	0.98	0.94
	ORYZA_v3	91	92	0.06	4.2	3.3	0.99	0.97

Entre las variedades evaluadas, el modelo ORYZA v3 mostró una precisión excepcional para el cultivar F174. No solo su promedio simulado global coincidió perfectamente con el observado, sino que también registró los valores más altos en las métricas d y NSE, reflejando un gran ajuste y eficiencia.

Para el cultivar F2000, aunque los tres modelos presentaron desempeños similares, ORYZA v3 continuó sobresaliendo. Su promedio simulado se alineó de manera impecable con el observado, y, al igual que con F174, mostró los valores más destacados en d y NSE. En el caso del cultivar F60, tanto Aquacrop V6 como ORYZA v3 mostraron resultados comparables, con promedios muy cercanos al valor observado. Sin embargo, ORYZA v3 tuvo una ligera ventaja, como lo demuestra su NSE ligeramente superior.

Al considerar las métricas de error, ORYZA v3 consistentemente registró valores inferiores en NRMSE, RMSE y MAE, consolidándose como el modelo más preciso de los tres al simular la fenología del arroz en estas variedades. Además, aunque todos los modelos mostraron valores elevados de d y NSE, ORYZA v3 tendió a alcanzar los valores pico, lo que refuerza su posición como el modelo con el mejor ajuste.

Figura 3-7: Gráficos de dispersión la calibración de Fenología.



Gráficos de dispersión la calibración de Fenología, Observado y Simulado. SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare..

3.3.2 Biomasa aérea

En el proceso de calibración de tres modelos de cultivo de arroz para la variable de biomasa total, se observaron diferencias significativas en su desempeño y se presentan en la Tabla 3-12 y figura 8.

El modelo Aquacrop_v6 demostró una precisión superior en la simulación de la biomasa seca total para los cultivares F174 y F2000, con promedios simulados que se acercan estrechamente a los valores observados. Específicamente, para el cultivar F174, Aquacrop_v6 presentó un promedio simulado de 7494.44, muy cercano al observado de 7397.77, con métricas de error NRMSE y RMSE de 0.1906 y 1409.97, respectivamente. Por otro lado, ORYZA_v3 y DSSAT_CERES mostraron tendencias a subestimar la biomasa en el cultivar F174. ORYZA_v3, en particular, tuvo un desempeño destacado en el cultivar F60, con el menor NRMSE y RMSE, y el NSE más alto, indicando un ajuste más preciso. Sin embargo, enfrentó desafíos en los otros dos cultivares.

DSSAT_CERES, en su conjunto, mostró un desempeño inferior en comparación con los otros dos modelos, especialmente en términos de RMSE y NRMSE. Aunque todos los modelos ofrecen una simulación razonablemente precisa de la biomasa seca total del arroz, Aquacrop_v6 emerge como el modelo más consistente y preciso en los tres cultivares evaluados.

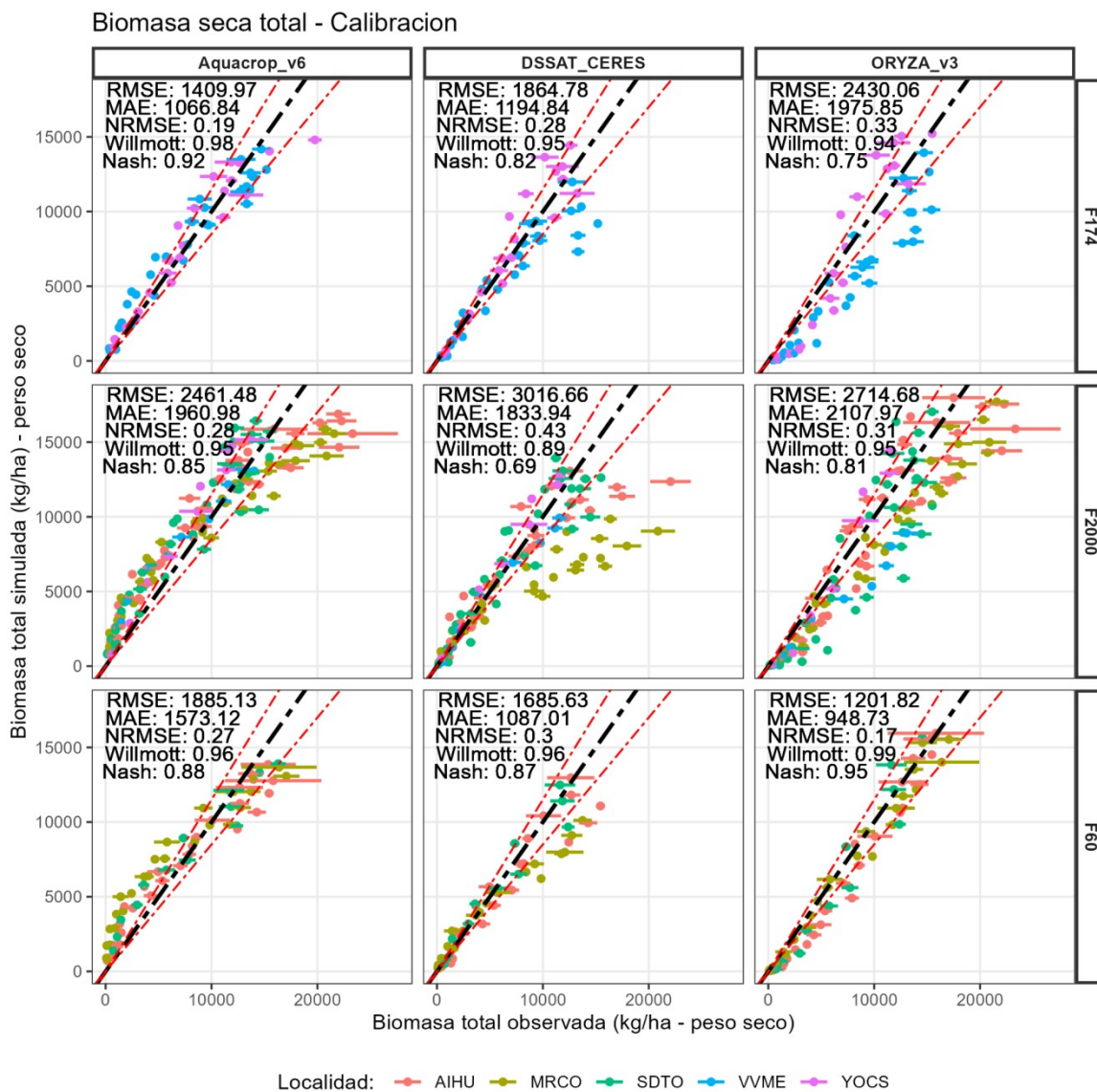
Tabla 3-12: Medidas de ajuste de la calibración de la Biomasa total aérea.

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	7398	7494	0.19	1410	1067	0.98	0.92
	DSSAT_CERES	6587	6152	0.28	1865	1195	0.95	0.82
	ORYZA_v3	7319	5988	0.33	2430	1976	0.94	0.75
F2000	Aquacrop_v6	8690	9037	0.28	2461	1961	0.95	0.85
	DSSAT_CERES	7082	5968	0.43	3017	1834	0.89	0.69
	ORYZA_v3	8669	7160	0.31	2715	2108	0.95	0.81
F60	Aquacrop_v6	6935	7321	0.27	1885	1573	0.96	0.88
	DSSAT_CERES	5706	5013	0.30	1686	1087	0.96	0.87
	ORYZA_v3	6907	6192	0.17	1202	949	0.99	0.95

En el análisis gráfico es posible apreciar algunas diferencias o particularidades en las simulaciones de biomasa Figura 3-8. Es posible ver ciertos agrupamientos por localidad, como el caso de la simulación de F174 con ORYZA v3 y F2000 con DSSAT_CERES, posiblemente esto se deba a que estos dos modelos cuentan con algún parámetro que

logra discriminar las condiciones específicas de esas localidades. Por otro lado, se observa cierta sobreestimación en la simulación de Aquacrop en etapas tempranas lo que puede estar relacionado al mecanismo que representa la producción de biomasa en hojas y área foliar en etapa vegetativa.

Figura 3-8: Gráficos de dispersión la calibración de Biomasa Seca Total.



SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.3.3 Área Foliar

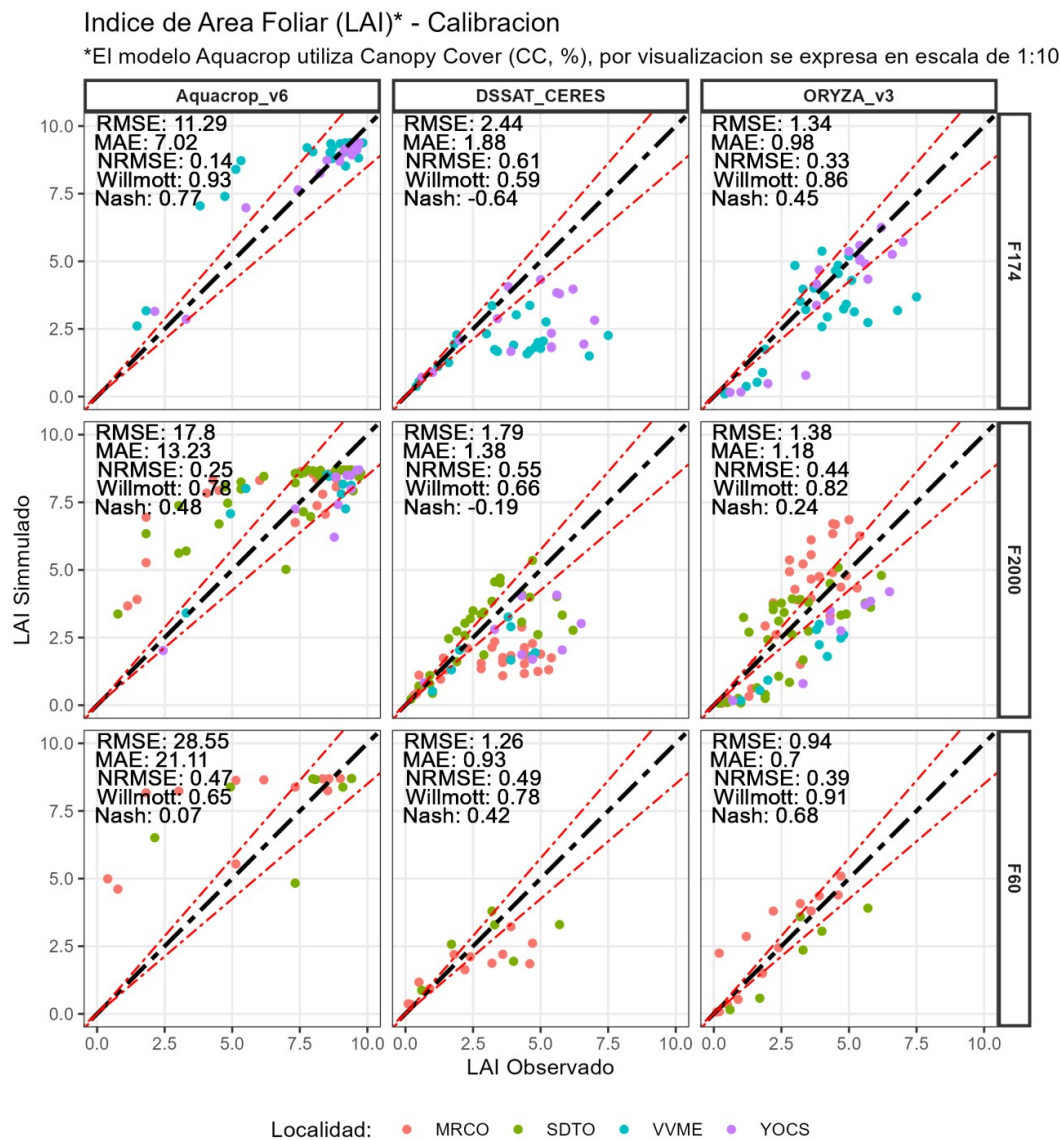
En la calibración del Índice de Área Foliar, ORYZA_v3 demostró tener un desempeño más consistente y preciso en los tres cultivares evaluados. DSSAT_CERES enfrenta desafíos en ciertos cultivares, y aunque Aquacrop_v6 mostró una tendencia razonable, la simplificación de la dinámica de crecimiento de área foliar mediante cobertura del dosel (CC, por sus siglas en inglés) requiere de más investigación alrededor de los métodos de medición o estimaciones alométricas. Los resultados se detallan en la Tabla 3-13 y la Figura 3-9.

Para el cultivar F174, Aquacrop_v6 y ORYZA_v3 mostraron aproximaciones cercanas al valor observado, mientras que DSSAT_CERES subestimó el LAI. En el cultivar F2000, Aquacrop_v6 se aproximó al valor observado, pero DSSAT_CERES y ORYZA_v3 mostraron discrepancias en sus estimaciones relacionadas a la aglomeración por localidades. Para el cultivar F60, ORYZA_v3 tuvo el mejor ajuste, mientras que Aquacrop_v6 sobreestimó el LAI y DSSAT_CERES tuvo un desempeño cercano al valor observado lo que afirma su característica de ser un modelo principalmente para sistemas de riego.

Tabla 3-13: Medidas de ajuste de la calibración del Índice de Área Foliar (% CC para Aquacrop).

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	79	83	0.14	11	7	0.93	0.77
	DSSAT_CERES	4.0	2.2	0.61	2.4	1.9	0.59	-0.64
	ORYZA_v3	4.0	3.4	0.33	1.3	1.0	0.86	0.45
F2000	Aquacrop_v6	72	77	0.25	18	13	0.78	0.48
	DSSAT_CERES	3.3	2.2	0.55	1.8	1.4	0.66	-0.19
	ORYZA_v3	3.1	3.0	0.44	1.4	1.2	0.82	0.24
F60	Aquacrop_v6	61	77	0.47	29	21	0.65	0.07
	DSSAT_CERES	2.6	2.0	0.49	1.3	0.9	0.78	0.42
	ORYZA_v3	2.4	2.5	0.39	0.9	0.7	0.91	0.68

Figura 3-9: Gráficos de dispersión la calibración del Área Foliar.



SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.3.4 Rendimiento

En la Tabla 3-14 se comparan las medidas de ajuste, se observa que el modelo Aquacrop_v6 presenta un desempeño notablemente cercano al valor observado en términos de simulación del rendimiento en grano. Específicamente, en el cultivar F174, Aquacrop_v6 muestra el menor RMSE y NRMSE, mientras que DSSAT_CERES y ORYZA_v3 enfrentan desafíos significativos en sus predicciones, evidenciados por sus

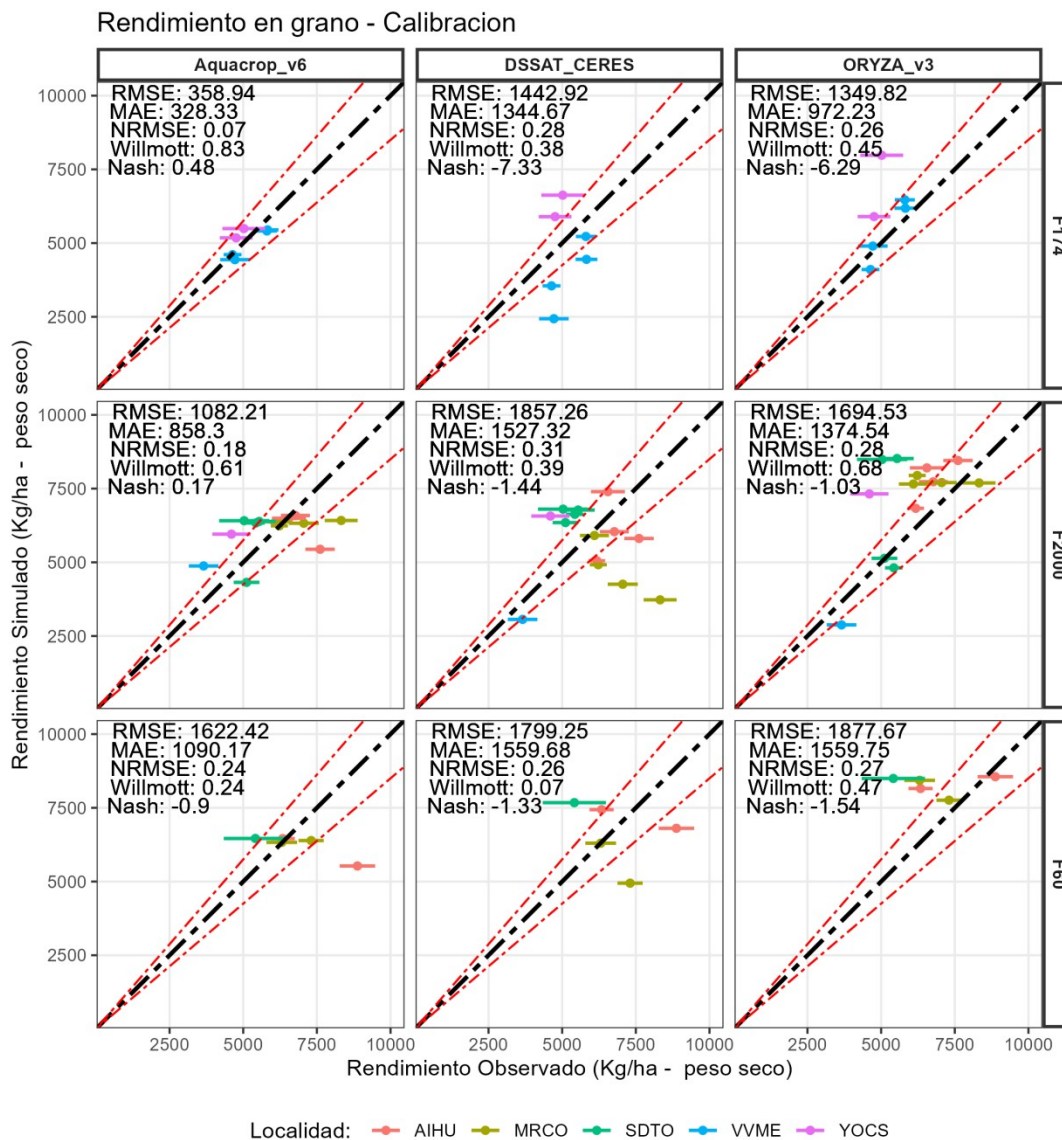
NSE negativos. Para el cultivar F2000, Aquacrop_v6 mantiene un promedio simulado cercano al observado con las métricas de error más bajas, mientras que DSSAT_CERES y ORYZA_v3 presentan discrepancias en sus estimaciones de rendimiento. En el caso del cultivar F60, aunque Aquacrop_v6 subestima el rendimiento, su desempeño sigue siendo superior al de los otros dos modelos Figura 3-10.

Tabla 3-14: Medidas de ajuste de la calibración de Rendimiento en grano.

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	5128	5096	0.07	359	328	0.83	0.48
	DSSAT_CERES	5128	4697	0.28	1443	1345	0.38	-7.33
	ORYZA_v3	5128	5922	0.26	1350	972	0.45	-6.29
F2000	Aquacrop_v6	6013	6037	0.18	1082	858	0.61	0.17
	DSSAT_CERES	6013	5664	0.31	1857	1527	0.39	-1.44
	ORYZA_v3	6013	7098	0.28	1695	1375	0.68	-1.03
F60	Aquacrop_v6	6848	6233	0.24	1622	1090	0.24	-0.90
	DSSAT_CERES	6848	6633	0.26	1799	1560	0.07	-1.33
	ORYZA_v3	6848	8280	0.27	1878	1560	0.47	-1.54

Es crucial destacar que los valores extremadamente bajos de NSE para DSSAT_CERES y ORYZA_v3, incluso superando el valor de -1, resaltan un desempeño deficiente en la calibración para el rendimiento en grano de estos modelos. Sin embargo, si tomamos NRMSE como medida de ajuste, vemos que todos los modelos cuentan con un valor menor a 0.3, siendo un resultado similar en múltiples estudios de modelación de cultivos.

Figura 3-10: Gráficos de dispersión la calibración del Rendimiento en grano.



SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.4 Evaluación de los modelos

Se presentan los resultados de la evaluación de los modelos con el set de datos independiente de Evaluación. Se replica el paso anterior estimando las medidas de ajuste entre valores observados y simulados para las 4 variables de respuesta.

3.4.1 Fenología

En la etapa de evaluación de fenología en los modelos con el conjunto de datos independiente, se destaca que ORYZA_v3 y Aquacrop_v6 exhiben una precisión y robustez notables en la simulación de la fenología del arroz (Tabla 3-15).

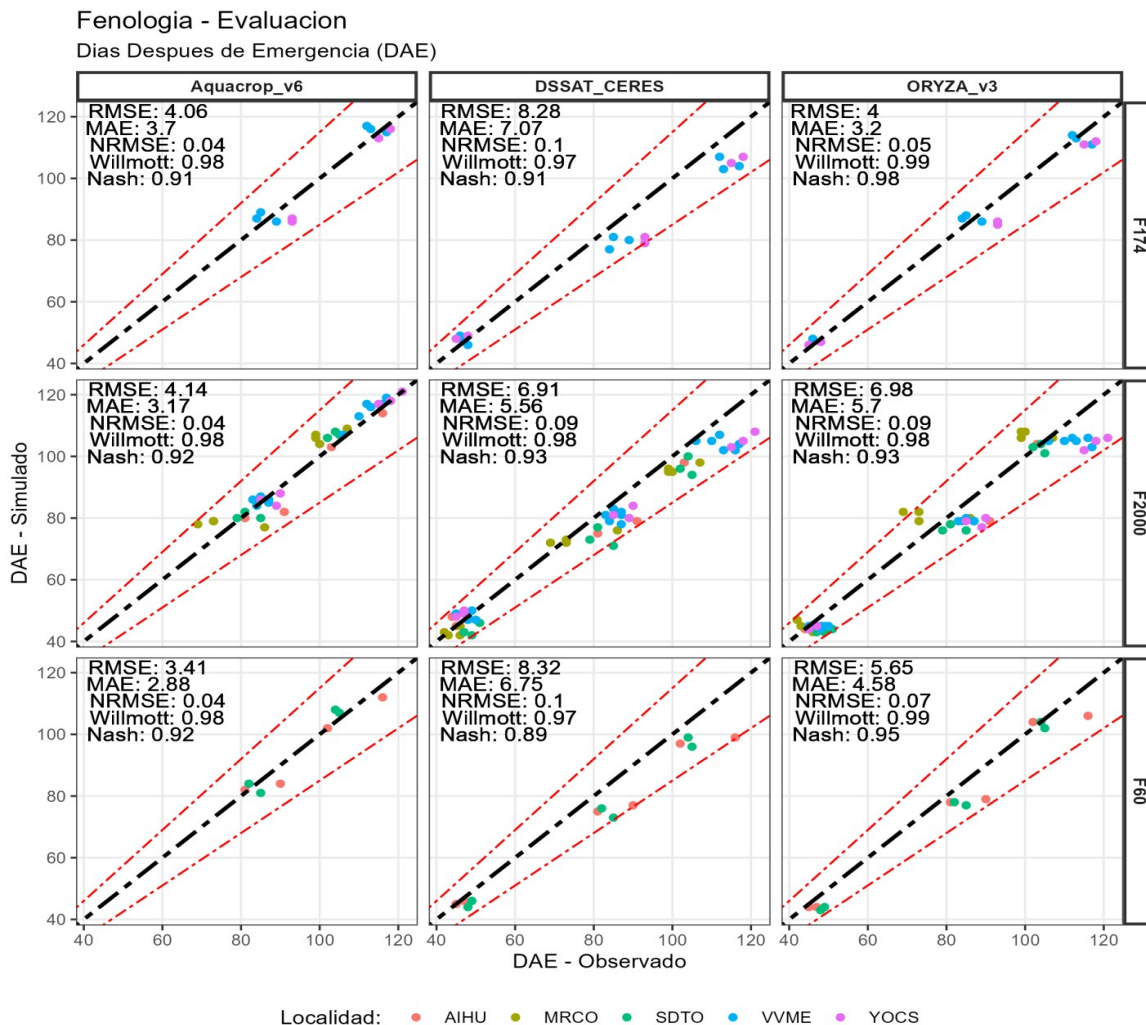
Aunque DSSAT_CERES sigue siendo un modelo competente, su rendimiento es marginalmente inferior al de los modelos mencionados anteriormente en este conjunto de datos específico. Al analizar el cultivar F174, ORYZA_v3 se consolida como el modelo más preciso, evidenciado por un promedio simulado que se alinea estrechamente con el observado y valores superiores de d y NSE.

Por otro lado, en el cultivar F2000, Aquacrop_v6 refleja el promedio simulado más cercano al observado, aunque las métricas de error y ajuste sugieren un rendimiento comparable entre los tres modelos. Para el cultivar F60, a pesar de que Aquacrop_v6 simula un promedio cercano al observado, ORYZA_v3 demuestra un ajuste superior, con un NSE elevado y errores reducidos en relación con DSSAT_CERES. Es pertinente señalar que DSSAT_CERES tiende a subestimar el promedio observado en todos los cultivares, lo que podría reflejar una tendencia sistemática del modelo o de la estimación con GA.

Tabla 3-15: Medidas de ajuste de la evaluación de Fenología

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	102	101	0.04	4.1	3.7	0.98	0.91
	DSSAT_CERES	102	92	0.10	8.3	7.1	0.97	0.91
	ORYZA_v3	102	99	0.05	4.0	3.2	0.99	0.98
F2000	Aquacrop_v6	96	97	0.04	4.1	3.2	0.98	0.92
	DSSAT_CERES	96	89	0.09	6.9	5.6	0.98	0.93
	ORYZA_v3	96	92	0.09	7.0	5.7	0.98	0.93
F60	Aquacrop_v6	96	95	0.04	3.4	2.9	0.98	0.92
	DSSAT_CERES	96	87	0.10	8.3	6.8	0.97	0.89
	ORYZA_v3	96	91	0.07	5.6	4.6	0.99	0.95

Figura 3-11: Gráficos de dispersión la evaluación de la Fenología.



SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.4.2 Biomasa aérea

En la fase de evaluación con un conjunto de datos independiente, DSSAT_CERES y ORYZA_v3 se distinguen por su consistencia en la simulación de la biomasa seca total del arroz. A pesar de que Aquacrop_v6 sigue siendo un modelo competente, enfrenta dificultades en ciertos cultivares dentro de este conjunto específico de datos Tabla 3-16.

Al examinar el cultivar F174, se observa que Aquacrop_v6 tiende a sobreestimar la biomasa en contraste con el valor observado, mientras que ORYZA_v3 y

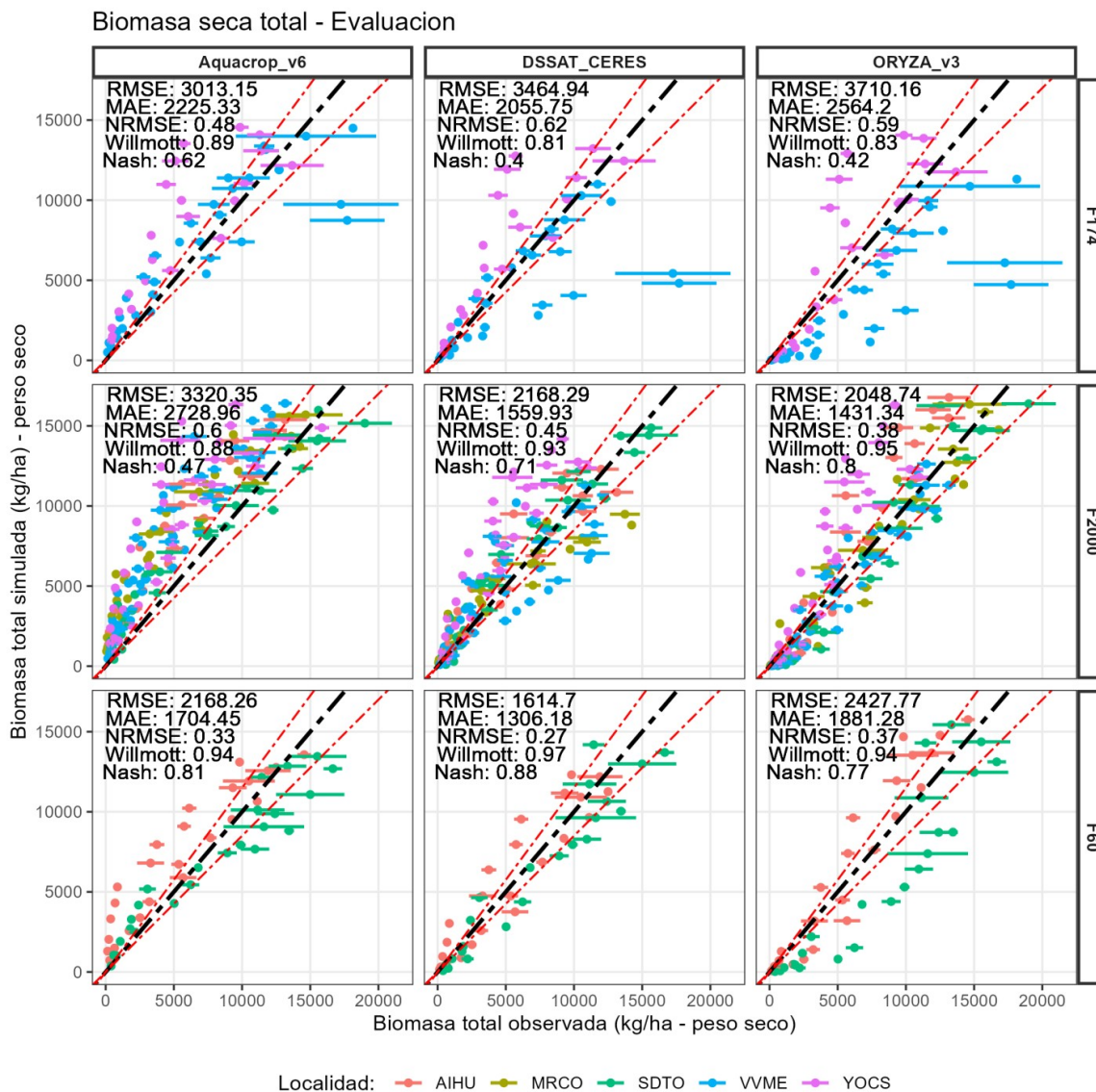
DSSAT_CERES la subestiman. Específicamente, DSSAT_CERES simula un promedio más alineado con el observado, aunque todos los modelos presentan errores notables y disminuciones en las métricas de ajuste en relación con la fase de calibración.

En el cultivar F2000, tanto DSSAT_CERES como ORYZA_v3 reflejan un rendimiento más cercano al valor observado que Aquacrop_v6, que sobreestima la biomasa de manera significativa. ORYZA_v3 destaca por su ajuste superior en términos de NSE y menores métricas de error. Para el cultivar F60, todos los modelos muestran un rendimiento cercano al valor observado, con DSSAT_CERES simulando el promedio más próximo. Aunque ORYZA_v3 y Aquacrop_v6 presentan métricas de ajuste comparables, DSSAT_CERES exhibe el NSE más elevado.

Tabla 3-16: Medidas de ajuste de la evaluación de la Biomasa total aérea.

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	6284	7395	0.48	3013	2225	0.89	0.62
	DSSAT_CERES	5586	5442	0.62	3465	2056	0.81	0.40
	ORYZA_v3	6284	4929	0.59	3710	2564	0.83	0.42
F2000	Aquacrop_v6	5514	8089	0.60	3320	2729	0.88	0.47
	DSSAT_CERES	4813	5502	0.45	2168	1560	0.93	0.71
	ORYZA_v3	5417	5707	0.38	2049	1431	0.95	0.80
F60	Aquacrop_v6	6527	6960	0.33	2168	1704	0.94	0.81
	DSSAT_CERES	6009	5769	0.27	1615	1306	0.97	0.88
	ORYZA_v3	6527	5818	0.37	2428	1881	0.94	0.77

Figura 3-12: Gráficos de dispersión la evaluación de producción de Biomasa seca total



SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.4.3 Área Foliar

En el conjunto de datos destinado a la evaluación, ORYZA_v3 se destaca por su consistencia en la simulación del Índice de Área Foliar (LAI) Tabla 3-17.

Aunque Aquacrop_v6 sigue siendo un modelo competente, enfrenta dificultades en determinados cultivos dentro de este conjunto específico de datos. Por su parte, DSSAT_CERES muestra un rendimiento que varía según el cultivar. Es esencial

considerar las diferencias en las unidades al analizar los resultados de Aquacrop_v6 en contraposición a los otros dos modelos.

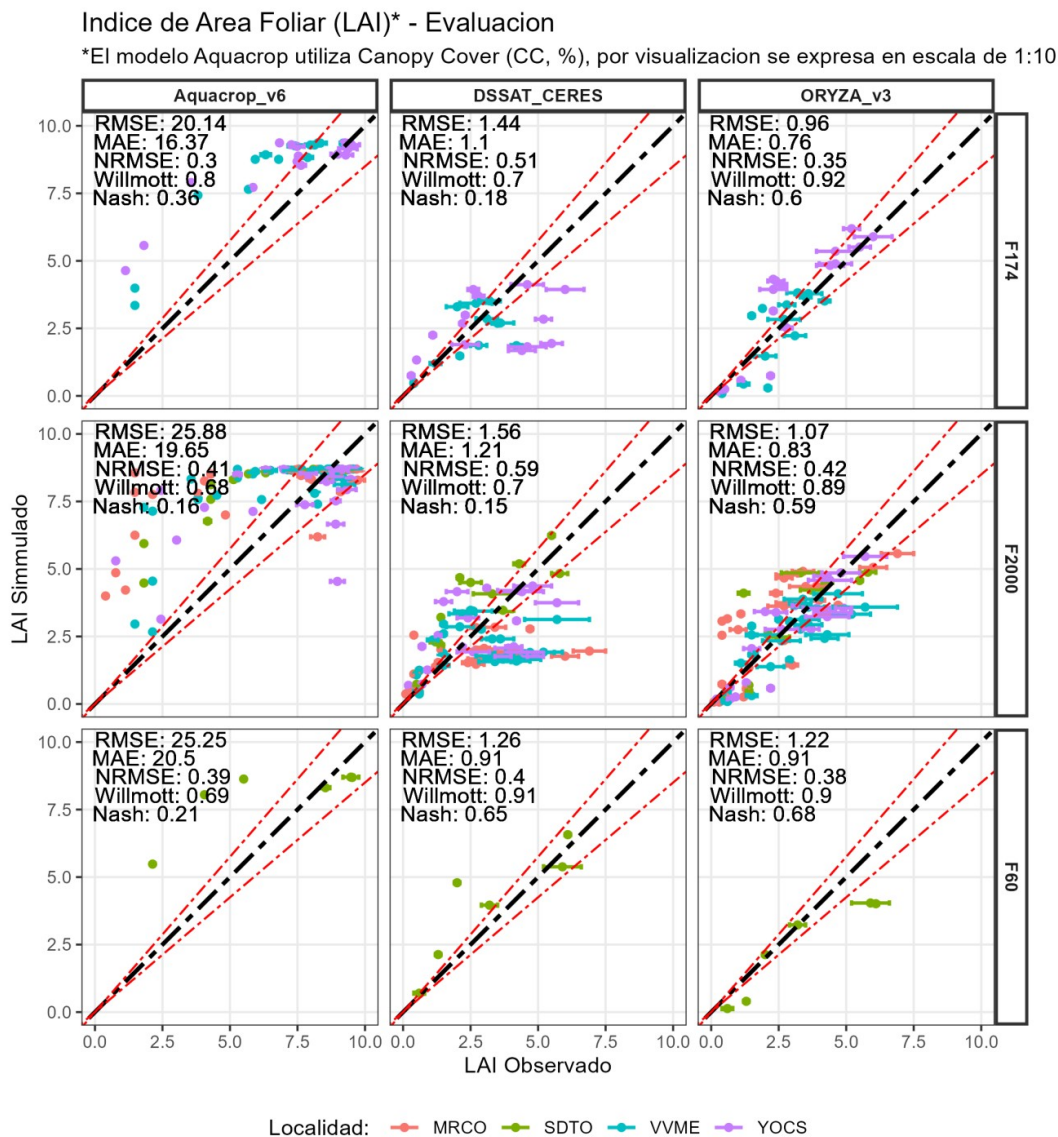
Al examinar el cultivar F174, Aquacrop_v6 tiende a sobreestimar el LAI, mientras que ORYZA_v3 simula un promedio más alineado con el observado y destaca por su superior ajuste en términos de NSE y menores errores. DSSAT_CERES, en cambio, subestima ligeramente el LAI. En el cultivar F2000, Aquacrop_v6 persiste en su tendencia a sobreestimar el LAI, y ORYZA_v3 mantiene un rendimiento cercano al valor observado con un ajuste adecuado en términos de NSE y errores. DSSAT_CERES continúa subestimando el LAI.

Para el cultivar F60, mientras Aquacrop_v6 sobreestima el LAI, DSSAT_CERES lo sobreestima, pero con un ajuste favorable en términos de NSE. ORYZA_v3, por otro lado, subestima el LAI pero presenta métricas de ajuste comparables a DSSAT_CERES.

Tabla 3-17: Medidas de ajuste de la evaluación del Índice de Área Foliar (% CC para Aquacrop).

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	67	83	0.30	20	16	0.80	0.36
	DSSAT_CERES	2.8	2.4	0.51	1.4	1.1	0.70	0.18
	ORYZA_v3	2.7	3.0	0.35	1.0	0.8	0.92	0.60
F2000	Aquacrop_v6	64	77	0.41	26	20	0.68	0.16
	DSSAT_CERES	2.6	2.3	0.59	1.6	1.2	0.70	0.15
	ORYZA_v3	2.6	2.6	0.42	1.1	0.8	0.89	0.59
F60	Aquacrop_v6	65	80	0.39	25	21	0.69	0.21
	DSSAT_CERES	3.2	3.9	0.40	1.3	0.9	0.91	0.65
	ORYZA_v3	3.2	2.3	0.38	1.2	0.9	0.90	0.68

Figura 3-13: Gráficos de dispersión la evaluación del Area Foliar.



SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.4.4 Rendimiento

Los datos de evaluación de rendimiento se especifican en la Tabla 3-18. En el cultivar F174, específico para sistemas de secano dependientes de precipitación, Aquacrop_v6 tiende a sobreestimar el rendimiento, aunque con menor error que DSSAT_CERES y ORYZA_v3. Estos dos últimos también exceden las estimaciones, siendo ORYZA_v3 el más impreciso.

El cultivar F2000, que se siembra en variados ambientes de producción, presenta una alta variabilidad en los datos. Todos los modelos sobreestiman el rendimiento, pero Aquacrop_v6 muestra el mayor error. La diversidad de condiciones para F2000 podría influir en la variabilidad de las predicciones.

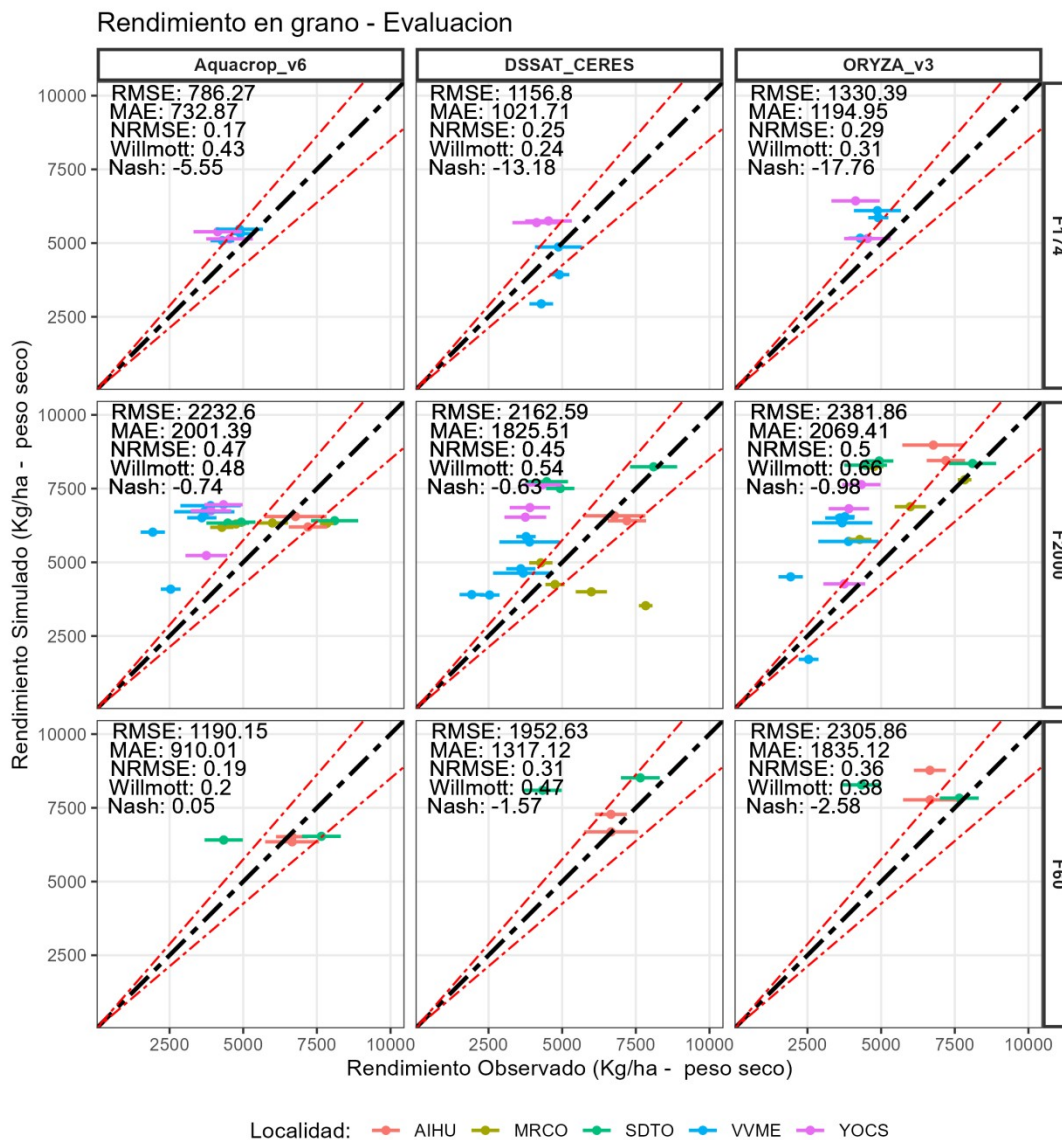
Para el cultivar F60, de alta productividad y específico para sistemas de riego, Aquacrop_v6 se aproxima al valor observado, mientras que DSSAT_CERES y ORYZA_v3 sobreestiman el rendimiento. A pesar de los bajos NSE en todos los modelos, solo Aquacrop_v6 presenta un NSE marginalmente positivo.

Tabla 3-18: Medidas de ajuste de la evaluación de Rendimiento en grano.

Cultivar	Modelo	Promedio Obs.	Promedio Sim.	NRMSE	RMSE	MAE	d	NSE
F174	Aquacrop_v6	4547	5280	0.17	786	733	0.43	-5.55
	DSSAT_CERES	4547	4636	0.25	1157	1022	0.24	-13.18
	ORYZA_v3	4547	5742	0.29	1330	1195	0.31	-17.76
F2000	Aquacrop_v6	4763	6272	0.47	2233	2001	0.48	-0.74
	DSSAT_CERES	4763	5723	0.45	2163	1826	0.54	-0.63
	ORYZA_v3	4763	6736	0.50	2382	2069	0.66	-0.98
F60	Aquacrop_v6	6326	6453	0.19	1190	910	0.20	0.05
	DSSAT_CERES	6326	7644	0.31	1953	1317	0.47	-1.57
	ORYZA_v3	6326	8162	0.36	2306	1835	0.38	-2.58

Aquacrop_v6 es el modelo más fiable en el conjunto de datos evaluado, mientras que DSSAT_CERES y ORYZA_v3 requieren optimizaciones, especialmente en su capacidad de ajuste. La variabilidad observada en las predicciones puede estar influenciada por las características específicas de cada cultivar y las diferencias entre las fases de calibración y evaluación.

Figura 3-14: Gráficos de dispersión la evaluación del rendimiento en grano.



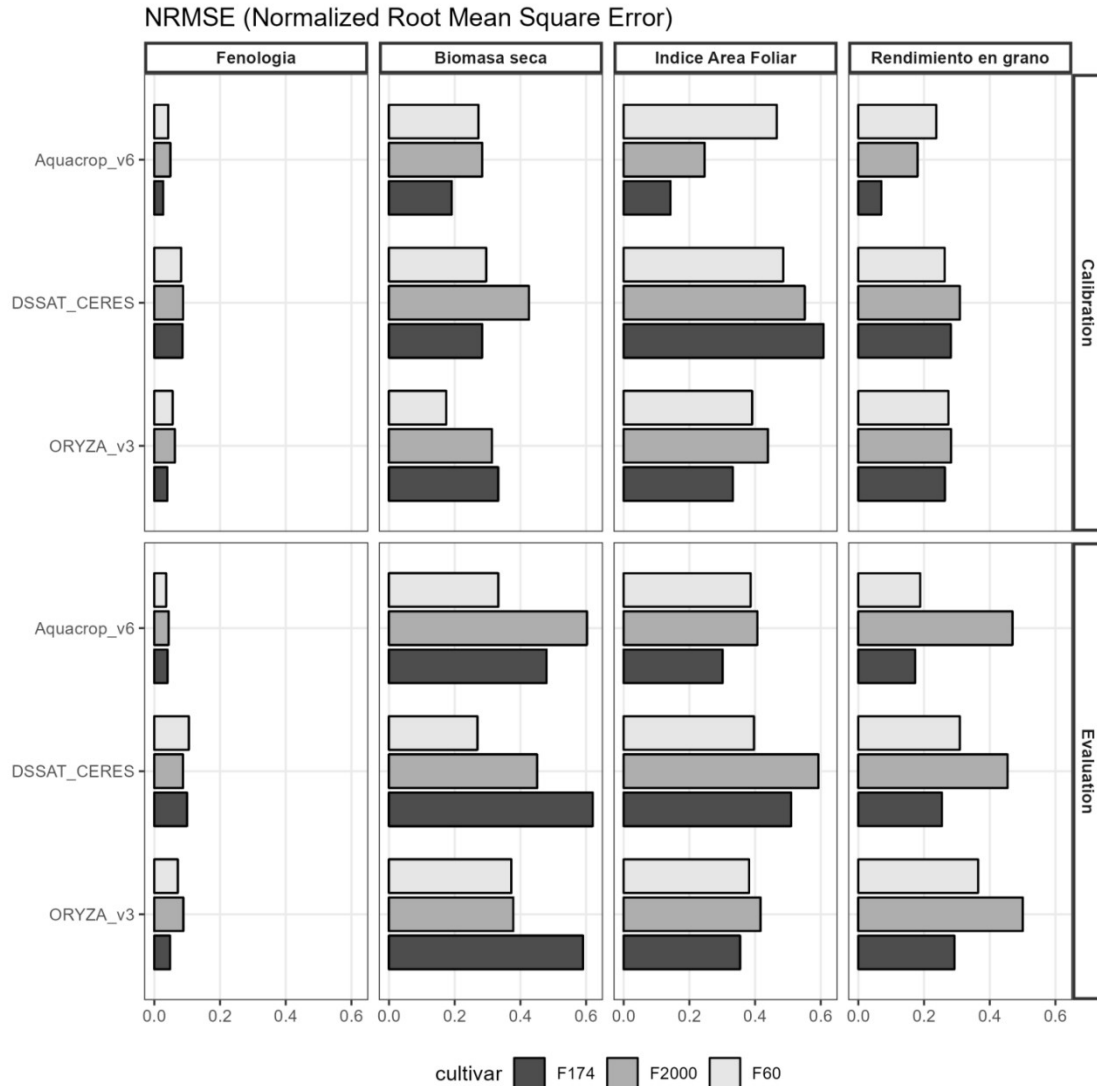
SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

3.5 Intercomparación de modelos de cultivo

En la Figura 3-15 se presentan los resultados de una intercomparación de modelos, donde la medida de ajuste NRMSE permite contrastar entre diferentes modelos y métodos. En la figura 15, se muestra una comparativa de esta medida para tres modelos a lo largo de distintas etapas de modelación y cuatro variables de respuesta. Es notable

el eficiente desempeño de los modelos en simular fenología. Durante la fase de calibración, se observa un ajuste más preciso en los valores de NRMSE en comparación con la evaluación, que presenta una mayor variabilidad.

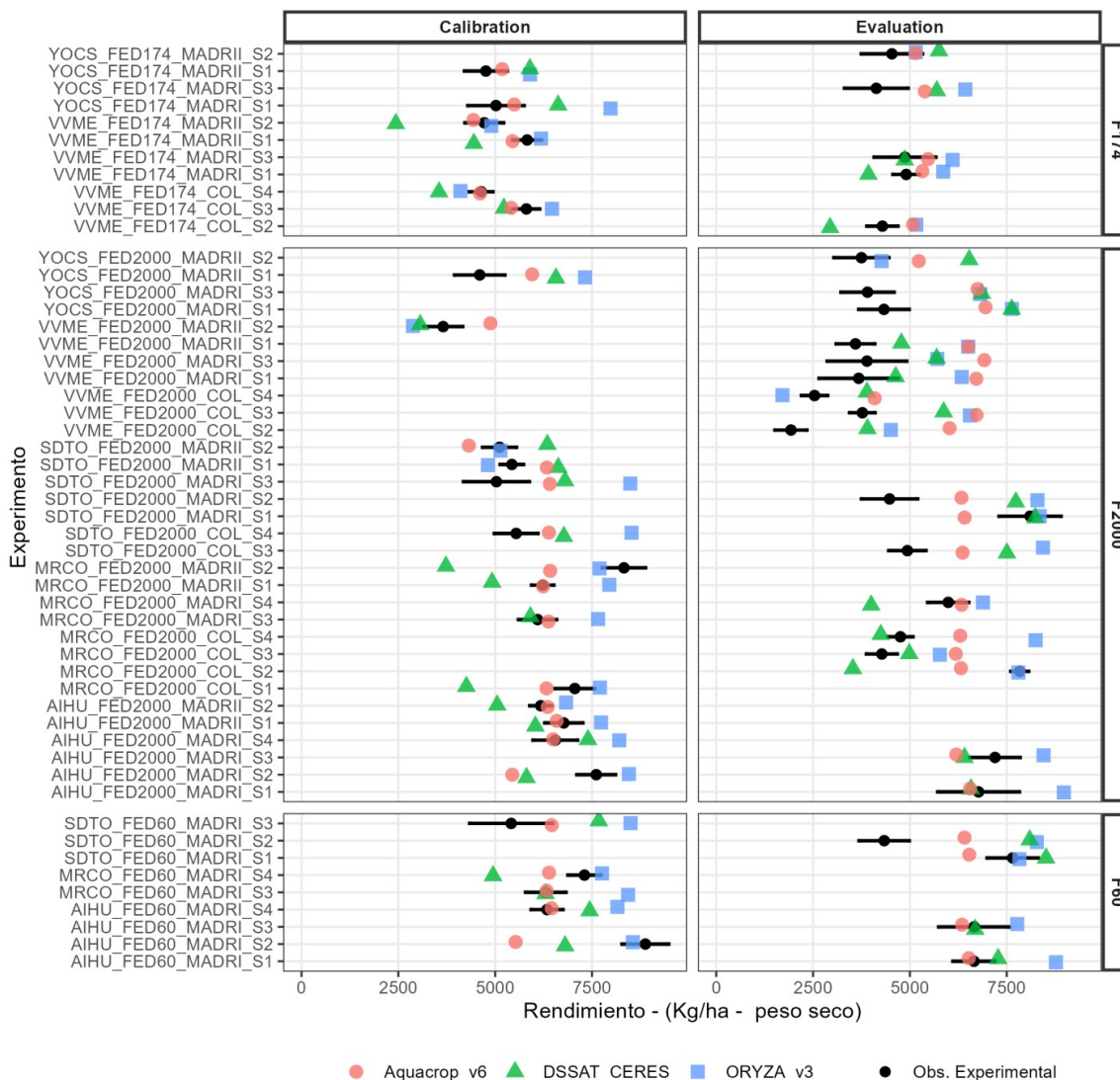
Figura 3-15: Comparación del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE).



En cuanto al rendimiento en grano, los cultivares F174-secano y F60-riego tienen valores de NRMSE inferiores a 0.30, en línea con lo documentado en diferentes estudios (Li et al., 2017 &). Sin embargo, el F2000 muestra valores más altos en todos los modelos, lo que se atribuye a variaciones en sus ubicaciones experimentales.

La Figura 3-16 ofrece otra perspectiva de las simulaciones de rendimiento en grano. Aquacrop muestra una menor variabilidad en ambas fases de modelación, mientras que ORYZA y CERES tienen más variaciones. Esto podría indicar un desempeño inferior o la necesidad de mejorar ciertos parámetros en la calibración.

Figura 3-16: Comparación de las simulaciones de Rendimiento en grano.

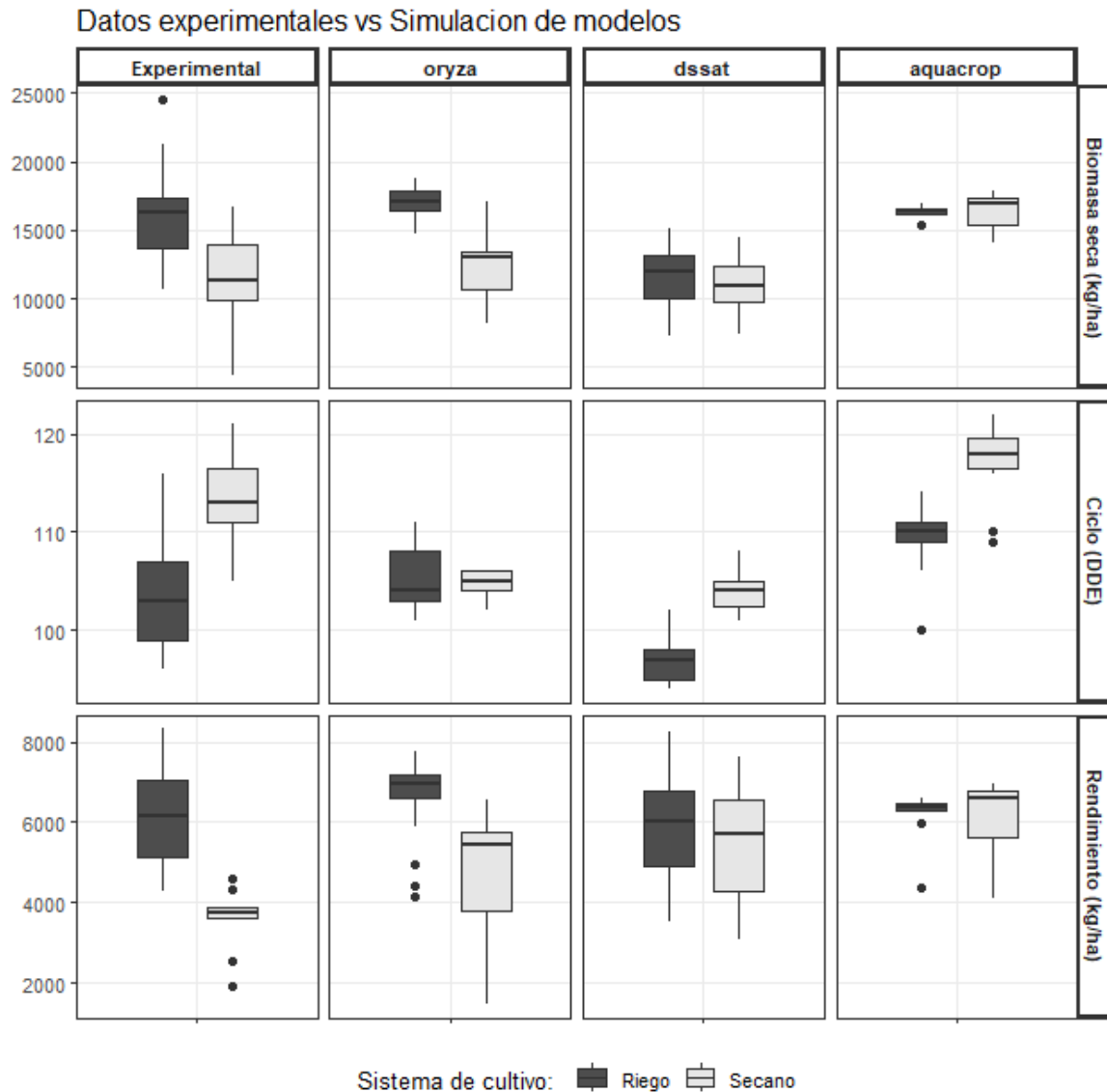


SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

Al analizar los resultados del F2000 por sistema de cultivo, se destaca ORYZA por su consistencia en simular rendimiento y biomasa seca. CERES y Aquacrop, en cambio, muestran variaciones en la duración del ciclo de cultivo. De estos, Aquacrop es el que

más se acerca a los datos observados. La Figura 3-17 compara mediante cajas de grupos de datos de F2000 (experimental vs modelos), agrupados por sistema de cultivo (Riego y Secano).

Figura 3-17: Comparación de gráficos de cajas de grupos de datos de F2000.

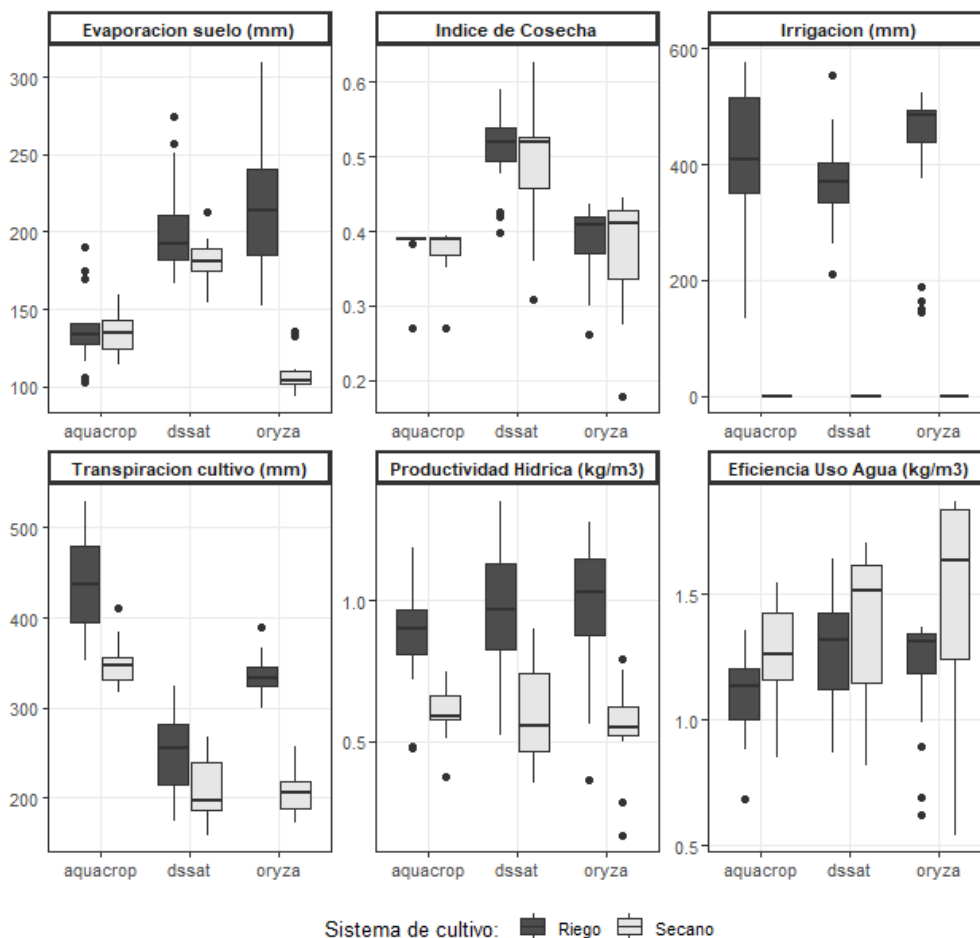


La **Figura 3-18** presenta diferencias en varias variables de salida agrupadas por sistema de cultivo. Las mayores discrepancias se observan en procesos de balance hídrico, como la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, en línea con lo reportado por Camargo, G. G. T., & Kemanian, A. R. (2016). Estas variaciones podrían ser la causa de

ciertas agrupaciones en algunas localidades, lo que sugiere una oportunidad para investigar parámetros de estrés que puedan influir en estos resultados.

En la estimación de los requisitos netos de agua, los tres modelos ofrecen valores parecidos. Aquacrop, sin embargo, muestra una transpiración superior a los otros dos modelos. Es esencial continuar investigando el comportamiento de estos modelos en distintos escenarios de riego. En los resultados actuales, se observa que todos simulan de manera similar la eficiencia en el uso del agua y la productividad hídrica, coincidiendo en las variaciones según el sistema de cultivo.

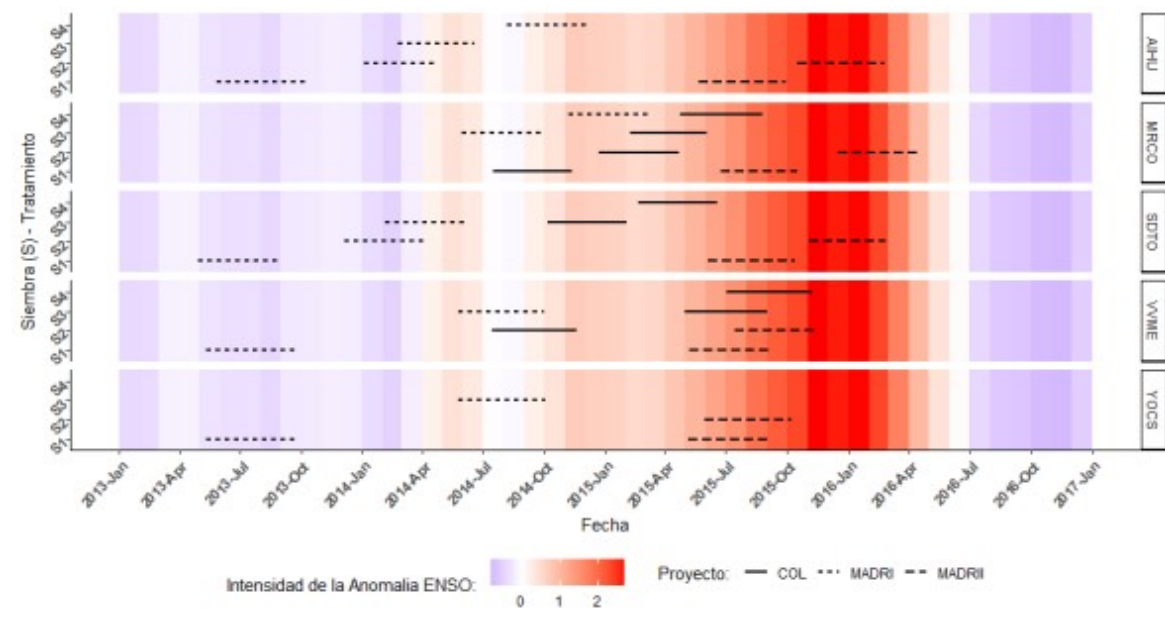
Figura 3-18: Comparación de la simulación de distintas variables de salida.



3.6 Respuesta de los modelos a condiciones de variabilidad climática

Dado el periodo de estudio, en los cuatro años evaluados fue posible tener una buena cantidad de experimentos bajo influencia del fenómeno ENSO el Niño, en la Figura 3-19 se puede visualizar la distribución en el tiempo de los experimentos de simulación, de particular interés el periodo El Niño ocurrido entre finales del 2015 e inicios del 2016.

Figura 3-19: Distribución en el tiempo de los experimentos objetivo.



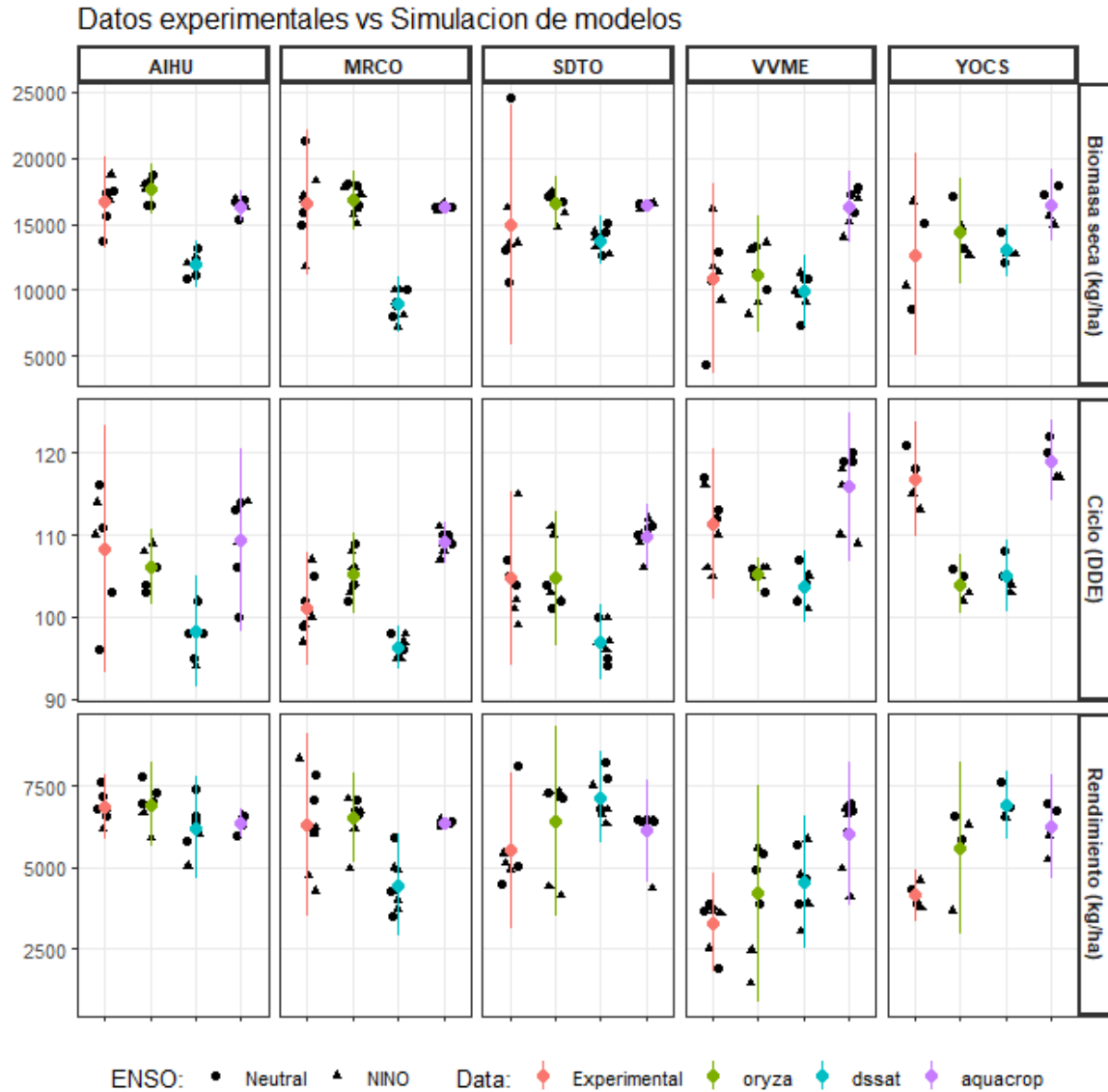
Se utiliza el ONI como índice de anomalía para ENSO. SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCC: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare

Al igual que el ONI, se evaluó la correlación entre variables de respuesta y diferentes índices ENSO. La Figura 3-20 muestra que las correlaciones del grupo experimental entre Biomasa y rendimiento son bien simuladas por los modelos. Sin embargo, no se evidencia la misma correlación de ciclo con biomasa

Figura 3-20: Gráfico de correlación de los grupos de datos de F2000.



La Figura 3-21 muestra los valores medios de los conjuntos de datos de F2000 para todas las localidades. Es posible identificar la categoría del ENSO a partir de la forma del punto. De igual manera es posible identificar que existe una alta variabilidad del grupo de datos Observado, lo que pudo traducir en los bajos desempeños de ciertas variables, estos experimentos deberían estudiarse para descartar su uso en futuros procesos de calibración.

Figura 3-21: Comparación de promedios de grupos de datos de F2000.

SDTO: Saldaña, Tolima; AIHU: Aipe, Huila; MRCO: Montería, Córdoba; VVME: Villavicencio, Meta; YOCS: Yopal, Casanare.

Se llevaron a cabo cuatro ANOVAs para investigar el impacto de diversas variables en el rendimiento del cultivo de arroz, los resultados se resumen en la Tabla 3-19. Estos análisis se realizaron en diferentes conjuntos de datos, cada uno representando situaciones experimentales específicas o escenarios simulados con modelos de cultivo.

Tabla 3-19: Comparación de los ANOVAs para Rendimiento, Biomasa y Ciclo de cultivo.

Grupo	Factor	p.value Rendimiento	p.value Biomasa	p.value Ciclo
Experimental	ENSO	0.1161451	0.871055	0.2284933
	crop_sys	0.0000011	0.0027309	0.0001048
	localidad	0.1323395	0.6567144	0.0554744
	ENSO:crop_sys	0.2458738	0.2720021	0.1672544
	ENSO:localidad	0.9638545	0.8279883	0.6292967
Oryza V3	ENSO	0.0178711	0.1086167	0.1359215
	crop_sys	0.0003985	0.0000001	0.5148274
	localidad	0.3669125	0.0248264	0.5712233
	ENSO:crop_sys	0.9115011	0.790069	0.089538
	ENSO:localidad	0.904093	0.8264717	0.2610185
DSSAT – CERES	ENSO	0.0154656	0.3579553	0.4269942
	crop_sys	0.1587232	0.3587637	0.0000001
	localidad	0.0000011	0.0000001	0.5069301
	ENSO:crop_sys	0.8125629	0.9280159	0.314329
	ENSO:localidad	0.7917329	0.8642017	0.8119759
Aquacrop V6	ENSO	0.0433711	0.0686231	0.1537116
	crop_sys	0.4776196	0.9976997	0.0000024
	localidad	0.868061	0.9495588	0.4908581
	ENSO:crop_sys	0.0769961	0.0123658	0.0393752
	ENSO:localidad	0.7781272	0.5633397	0.5702012

En todos los ANOVAs, las variables "ENSO" (fenómeno ENSO) y "crop_sys" (sistema de cultivo) fueron de interés principal. Se observó que, mientras que "crop_sys" mostró un impacto significativo en la mayoría de los grupos, el efecto de "ENSO" varió entre los conjuntos de datos. Específicamente, el modelo "aquacrop" mostró una interacción

significativa entre "ENSO" y "crop_sys", sugiriendo que el impacto del fenómeno ENSO podría depender del sistema de cultivo utilizado, lo que es particularmente lógico.

Las similitudes entre los ANOVAs incluyen la consideración constante de las variables "ENSO" y "crop_sys" y su interacción. Sin embargo, las diferencias radican en los grupos de datos específicos utilizados para cada ANOVA y en los resultados significativos obtenidos. Por ejemplo, mientras que "crop_sys" fue significativo en los grupos "Experimental" y "oryza", no lo fue en "dssat" y "aquacrop" para ciertas respuestas.

Al comparar los grupos de datos simulados con el grupo "Experimental", "oryza" se destacó como el más similar en términos de efectos de las variables en rendimiento y biomasa. Sin embargo, es crucial considerar que las similitudes y diferencias observadas pueden estar influenciadas por otros factores no mencionados en el análisis.

Aunque los modelos simulados mostraron variaciones en sus respuestas a las variables estudiadas, todos subrayan la importancia del sistema de cultivo en el rendimiento del arroz. Además, los mecanismos del modelo "aquacrop" sugieren que el impacto del fenómeno ENSO podría ser modulado por el sistema de cultivo, lo que podría ser crucial para futuras investigaciones sobre el cultivo de arroz y las variaciones climáticas.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Los resultados indican que hay una variabilidad notable en la capacidad predictiva de estos modelos para diferentes variedades de arroz. Esta variabilidad puede deberse a las diferencias en cómo cada modelo simula los efectos de temperaturas extremas en la fenología, biomasa y rendimiento del cultivo. Es importante señalar que los errores y métricas de ajuste fueron generalmente más altos en el conjunto de datos de evaluación que en la calibración, lo que sugiere que los modelos pueden tener dificultades al adaptarse a nuevos datos.

En la calibración de fenología, Aquacrop y ORYZA se acercaron a los valores observados en todos los cultivares, mientras que DSSAT_CERES mostró variaciones. ORYZA se destacó por su precisión en el conjunto de datos de evaluación.

En cuanto a la biomasa seca total, todos los modelos enfrentaron desafíos en todos los cultivares del conjunto de datos de evaluación,

Respecto al LAI, ORYZA_v3 fue el más consistente en términos de ajuste. Aquacrop_v6 utiliza una métrica porcentual, mientras que los otros modelos emplean un índice adimensional. Aquacrop tiende a “producir” la biomasa en poco tiempo y el LAI es sobreestimado.

El rendimiento en grano, una métrica esencial que refleja la producción total, mostró que Aquacrop_v6 fue el modelo más preciso en la fase de calibración. Sin embargo, en la evaluación, DSSAT_CERES y ORYZA_v3 presentaron áreas de mejora significativas.

En términos de intercomparación usando el conjunto de datos de F2000, ORYZA_v3 fue el modelo que mejor se alineó con los datos observados en el campo, lo que sugiere que podría ser el más adecuado para replicar y predecir el comportamiento real del cultivo de arroz bajo condiciones similares a las observadas.

La relación entre el fenómeno ENSO y el sistema de cultivo es esencial para comprender el rendimiento del arroz. En algunos modelos, como ORYZA_v3, el fenómeno ENSO no tuvo un impacto significativo en el rendimiento, mientras que en otros, como Aquacrop_v6, sí se observó una interacción notable entre estas variables.

4.2 Recomendaciones

Considerando las diferencias en habilidad predictiva, es recomendable implementar un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que influyen los resultados por sistema productivo (riego y seco) y localidad.

Reducir el número de pasos y parámetros en el algoritmo genético, esto permitiría su evaluación a una mayor amplitud de escenarios.

Implementar un análisis multivariado de las salidas de los modelos en diferentes etapas de desarrollo.

Desarrollar capacidades en conjuntos de datos que incluyan evaluaciones en diferentes ambientes de producción y evaluación de parámetros de estrés hídrico y por temperatura, entre otros.

Evaluar otros modelos de conversión de Índice de área Foliar a Cobertura del Canopy para Aquacrop.

A. Anexo A: Metadata de base de datos

COMPONENT	VAR_NAME	DESCRIPTION	TYPE	UNITS
AGRO	ID	Trial ID	character	XXXX
	LOC_ID	locality ID	character	name
	PROJECT	Project ID	character	name
	CULTIVAR	Cultivar name	character	name
	TR_N	Treatment number	character	cn
	LATITUD	Latitud	numeric	Decimal deggrees
	LONGITUD	Longitud	numeric	Decimal deggrees
	ASNM	Elevation(m above sea level)	numeric	meters
	PDAT	Planting date	date	MM/DD/YYYY
	CROP_SYS	Crop system	character	IRRIGATED-RAINFED
	ESTAB	Establishment	character	TRANSPLANT-DIRECT-SEED
	NPLDS	Number of plants/m2	numeric	number/m ²
	SBDUR	Seed-bed duration	numeric	days
	TRDAT	Transplanting date	date	MM/DD/YYYY
FERT	FERT_No	Fertilize app number	numeric	number
	DDE	Days after Emergence	numeric	days
	N	Nitrogen	numeric	kg/ha
	P	Phosphate	numeric	kg/ha
	K	Potassium	numeric	kg/ha
PHEN	EDAT	Emergence date	date	MM/DD/YYYY
	IDAT	Panicle initiation date	date	MM/DD/YYYY
	FDAT	Flowering date	date	MM/DD/YYYY
	MDAT	Maturity date	date	MM/DD/YYYY
PLANT	SAMPLING_DATE	Sampling date	date	MM/DD/YYYY
	LAI_OBS	Leaf Area Index observed	numeric	m ² leaf / m ² ground
	LAI_SE	LAI standard deviation	numeric	m ² leaf / m ² ground
	WLVG_OBS	Green leaf dry weight	numeric	kg/ha
	WLVG_SE	WLVG Standard Error	numeric	kg/ha
	WLVD_OBS	Dead leaf dry weight	numeric	kg/ha
	WLVD_SE	WLVD Standard Error	numeric	kg/ha
	WST_OBS	Stem dry weight	numeric	kg/ha
	WST_SE	WST Standard Error	numeric	kg/ha

	WSO_OBS	Panicle dry weight	numeric	kg/ha
	WSO_SE	WSO Standard Error	numeric	kg/ha
	WAGT_OBS	Total dry weight	numeric	kg/ha
	WAGT_SE	WAGT Standard Error	numeric	kg/ha
	NLV_OBS	Number of green leaves	numeric	number/m ²
	NLV_SE	NLV Standard Error	numeric	number/m ²
	NST_OBS	Number of Stem	numeric	number/m ²
	NST_SE	NST Standard Error	numeric	number/m ²
	NP_OBS	Number of Panicles	numeric	number/m ²
	NP_SE	NP Standard Error	numeric	number/m ²
YIELD	YIELD_AVG	Yield average	numeric	kg/ha
	YIELD_MIN	Yield minimum	numeric	kg/ha
	YIELD_MAX	Yield maximum	numeric	kg/ha
	HIAM	Harvest index at maturity	numeric	ratio
	HIAM_SE	HIAM Standard Error	numeric	ratio
	PAN_fert	Panicle fertility	numeric	%
	PAN_fert_SE	PAN_fert Standard Error	numeric	%
	GW1000	1000-Grain weight	numeric	g
	GW1000_SE	GW1000 Standard Error	numeric	g
	ST_M2	Number of Stem	numeric	number/m ²
	ST_M2_SE	ST_M2 Standard Error	numeric	number/m ²
	PAN_M2	Number of Panicles	numeric	number/m ²
	PAN_M2_SE	PAN_M2 Standard Error	numeric	number/m ²
	GT_PAN	Number of total grains per panicle	numeric	number/panicle
	GT_PAN_SE	GT_PAN Standard Error	numeric	number/panicle
	GF_PAN	Number of fill grains per panicle	numeric	number/panicle
	GF_PAN_SE	GF_PAN Standard Error	numeric	number/panicle
SOIL	NL	Number of soil layers (maximum is 10)	numeric	number
	DEPTH	Thickness of each soil layer	numeric	cm
	STC	Soil Texture Class (12-USDA)	character	USDA texture class
	SAND	Soil sand content	numeric	%
	SILT	Soil silt content	numeric	%
	CLAY	Soil clay content	numeric	%
	SBDM	Soil Bulk Density	numeric	g/cm ³
	SC	Total soil carbon	numeric	g/kg
	SLON	Soil Organic Nitrogen	numeric	mg/kg
	SNH4	Ammonium, KCl, g elemental N	numeric	mg/kg
	SNO3	Nitrate, KCl, g elemental N	numeric	mg/kg
	PH	pH	numeric	number
	SCEC	Cation exchange capacity	numeric	cmol/kg
WCST	Saturated volumetric water	numeric	%	

		content		
	WCFC	Volumetric water content at field capacity	numeric	%
	WCWP	Volumetric water content at wilting point	numeric	%
	WCAD	Volumetric water content at air dryness	numeric	%
	SSKS	Saturated hydraulic conductivity	numeric	cm/h
WTH	WS_ID	Weather Station ID	numeric	number
	DATE	Date	date	MM/DD/YYYY
	TMAX	Maximum temperature	numeric	celcius deggres
	TMIN	Minimum temperature	numeric	celcius deggres
	RAIN	Rain	numeric	milimeters
	SRAD	Solar Radiation	numeric	MJ/m ² *dia
	RHUM	Relative humity	numeric	%
	WVEL	Wind Velocity	numeric	m/s

Bibliografía

Ahmed, M., Asif, M., Hirani, A. H., Akram, M. N., & Goyal, A. (2013). Modeling for agricultural sustainability: A review. *Agricultural Sustainability*. Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-404560-6.00007-1>

Ali, M. H., & Talukder, M. S. U. (2008). Increasing water productivity in crop production-A synthesis. *Agricultural Water Management*, 95(11), 1201–1213. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.008>

Amiri, E., Razavipour, T., Farid, A., & Bannayan, M. (2011). Effects of Crop Density and Irrigation Management on Water Productivity of Rice Production in Northern Iran: Field and Modeling Approach. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(17), 2085–2099. <http://doi.org/10.1080/00103624.2011.596238>

Amiri, E., Rezaei, M., Rezaei, E. E., & Bannayan, M. (2014). Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 Models in Simulation of Rice Yield Response to Different Irrigation and Nitrogen Management Strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 37(11), 1749–1769. <http://doi.org/10.1080/01904167.2014.888750>

Anwar, M. R., Liu, D. L., Macadam, I., & Kelly, G. (2013). Adapting agriculture to climate change: A review. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1–2), 225–245. <http://doi.org/10.1007/s00704-012-0780-1>

Belder, P., Bouman, B. A. M., & Spiertz, J. H. J. (2007). Exploring options for water savings in lowland rice using a modelling approach. *Agricultural Systems*, 92(1–3), 91–114. <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.03.001>

Boote, K. J., Jones, J. W., White, J. W., Asseng, S., & Lizaso, J. I. (2013). Putting mechanisms into crop production models. *Plant, Cell and Environment*, 36(9), 1658–1672. <http://doi.org/10.1111/pce.12119>

Bouman, B. a. M., & van Laar, H. H. (2006). Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems*, 87(3), 249–273. <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.09.011>

Bouman, B. a M., Kropff, M., Tuong, T., Wopereis, M., Ten Berge, H., & van Laar, H. (2001). ORYZA2000: Modeling lowland rice.

Brouder, S. M., & Volenec, J. J. (2008). Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 705–724. <http://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01136.x>

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., ... Jin, F.-F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 1–6. <http://doi.org/10.1038/nclimate2100>

Camargo, G. G. T., & Kemanian, A. R. (2016). Six crop models differ in their simulation of water uptake. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 116–129. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.01.013>

Cao, H., Hanan, J. S., Liu, Y., Liu, Y., Yue, Y., Zhu, D., ... Bao, T. (2012). Comparison of Crop Model Validation Methods. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(8), 1274–1285. [http://doi.org/10.1016/S2095-3119\(12\)60124-5](http://doi.org/10.1016/S2095-3119(12)60124-5)

Cleves Leguízamo, J. A., Martínez Bernal, L. F., & Toro C., J. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 149–163. <http://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>

Cortés, C., Bernal, J., Díaz, E., & Méndez, J. (2013). uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los Departamentos de Tolima y Meta, 53. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/field/009/i3430s/i3430s.pdf>

DANE, & FEDEARROZ. (2016). 4 ° Censo Nacional Arrocerero 2016. Retrieved from <http://www.dane.gov.co/>

Delerce, S., Dorado, H., Grillon, A., Rebolledo, M. C., Prager, S. D., Patiño, V. H., ... Jimenez, D. (2016). Assessing weather-yield relationships in rice at local scale using data mining approaches. *PLoS ONE*, 11(8). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0161620>

Elliott, J., Müller, C., Deryng, D., Chryssanthacopoulos, J., Boote, K. J., Büchner, M., ... Sheffield, J. (2015). The Global Gridded Crop Model Intercomparison: Data and modeling protocols for Phase 1 (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 8(2), 261–277. <http://doi.org/10.5194/gmd-8-261-2015>

Ewert, F., Rotter, R. P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K. C., ... Asseng, S. (2015). Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environmental Modelling and Software*, 72. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.003>

FAO. (2009). How to Feed the World in 2050. Insights from an Expert Meeting at FAO, 2050(1), 1–35. <http://doi.org/10.1111/j.1728-4457.2009.00312.x>

Ge, H., Ma, F., Li, Z., & Du, C. (2021). Global sensitivity analysis for ceres-rice model under different cultivars and specific-stage variations of climate parameters. *Agronomy*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy11122446>

Gonzalez-Dugo, V., Durand, J.-L., & Gastal, F. (2010). Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 529–544. <http://doi.org/10.1051/agro/2009059>

Guo, D., Zhao, R., Xing, X., & Ma, X. (2020). Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(8), 1115–1133. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1657845>

Holzworth, D. P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I. N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., ... Thorburn, P. (2015). Environmental Modelling & Software Agricultural production systems modelling and software : Current status and future prospects *, (2014), 1–11.

Iizumi, T., Luo, J.-J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., ... Yamagata, T. (2014). Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications*, 5(May), 3712. <http://doi.org/10.1038/ncomms4712>

IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas. Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis, 2–38. [http://doi.org/10.1016/S1353-8020\(09\)70300-1](http://doi.org/10.1016/S1353-8020(09)70300-1)

Janssen, S. J. C., Porter, C. H., Moore, A. D., Athanasiadis, I. N., Foster, I., Jones, J. W., & Antle, J. M. (2017). Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Information and communication technology. *Agricultural Systems*. <http://doi.org/10.1016/j.agry.2016.09.017>

Jin, X. L., Feng, H. K., Zhu, X. K., Li, Z. H., Song, S. N., Song, X. Y., ... & Guo, W. S. (2014). Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China Plain. *PloS one*, 9(1), e86938.

Jing, Q. (2007). Improving resource use efficiency in rice-based cropping systems: Experimentation and modelling. *Production Ecology and Resource Conservation* (Vol. Ph.D.).

Jones, J. ., Hoogenboom, G., Porter, C. ., Boote, K. J., Batchelor, W. ., Hunt, L. ., ... Ritchie, J. . (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* (Vol. 18). [http://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](http://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... Wheeler, T. R. (2016). Brief history of agricultural systems modeling. *Agsy*. <http://doi.org/10.1016/j.agry.2016.05.014>

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... Wheeler, T. R. (2016). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*. <http://doi.org/10.1016/j.agry.2016.09.021>

Kadiyala, M. D. M., Jones, J. W., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Reddy, M. D. (2012). Identifying irrigation and nitrogen best management practices for aerobic rice-maize cropping system for semi-arid tropics using CERES-rice and maize models. *Agricultural Water Management*, 149, 23–32. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.019>

Kar, G., Kumar, A., & Chandra Bhaskar Burla, B. (2009). Simulation of growth and productivity of rice (*Oryza sativa*) under tropical monsoon climate. *Indian Journal of Agronomy*, 54(1), 52–57.

Krishnan, P., Ramakrishnan, B., Reddy, K. R., & Reddy, V. R. (2011). High-Temperature Effects on Rice Growth, Yield, and Grain Quality. *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 111). Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-387689-8.00004-7>

Larijani, B. A., Sarvestani, Z. T., Nematzadeh, G., Manschadi, a. M., & Amiri, E. (2011). Simulating Phenology, Growth and Yield of Transplanted Rice at Different Seedling Ages in Northern Iran Using ORYZA2000. *Rice Science*, 18(4), 321–334. [http://doi.org/10.1016/S1672-6308\(12\)60011-0](http://doi.org/10.1016/S1672-6308(12)60011-0)

Li, T., Angeles, O., Marcaida Iii, M., Manalo, E., Manalili, M. P., Radanielson, A., & Mohanty, S. (2017). From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237, 246–256. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.025>

Li, T., Hasegawa, T., Yin, X., Zhu, Y., Boote, K. J., Adam, M., ... Bouman, B. (2015). Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Global Change Biology*, 21(3), 1328–1341. <http://doi.org/10.1111/gcb.12758>

Li, T., Raman, A. K., Marcaida, M., Kumar, A., Angeles, O., & Radanielson, A. M. (2013). Simulation of genotype performances across a larger number of environments for rice breeding using ORYZA2000. *Field Crops Research*, 149, 312–321. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.006>

Liu, J., Liu, Z., Zhu, A. X., Shen, F., Lei, Q., & Duan, Z. (2019). Global sensitivity analysis of the APSIM-Oryza rice growth model under different environmental conditions. *Science of the Total Environment*, 651, 953–968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.254>

Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water Footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment*, 548–549, 236–251. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>

Maniruzzaman, M., Talukder, M. S. U., Khan, M. H., Biswas, J. C., & Nemes, A. (2015). Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 159, 331–340. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.022>

Matthews, R. B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A. C., & Hallett, P. D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. *Global Food Security*, 2(1), 24–28. <http://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.11.009>

McCall, J. (2005). Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of computational and Applied Mathematics*, 184(1), 205-222.

Mishra, A., Singh, R., Raghuwanshi, N. S., Chatterjee, C., & Froebrich, J. (2013). Spatial variability of climate change impacts on yield of rice and wheat in the Indian Ganga Basin. *The Science of the Total Environment*, 468–469 Su, S132-8. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.080>

Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G. F. (2014). An overview of global rice production , supply , trade , and consumption, 7–14. <http://doi.org/10.1111/nyas.12540>

Neto, D. D. (2010). Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil 1 Calibration and evaluation of the ORYZA-APSIM crop model for upland rice in Material e métodos, 605–613.

Nissanka, S. P., Karunaratne, A. S., Perera, R., Weerakoon, W. M. W., Thorburn, P. J., & Wallach, D. (2015). Calibration of the phenology sub-model of APSIM-Oryza: Going beyond goodness of fit. *Environmental Modelling and Software*, 70, 128–137. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.04.007>

Porter, C. H., Villalobos, C., Holzworth, D., Nelson, R., White, J. W., Athanasiadis, I. N., ... Jones, J. W. (2014). Harmonization and translation of crop modeling data to ensure interoperability. *Environmental Modelling and Software*, 62, 495–508. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.004>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <http://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6, 5989. <http://doi.org/10.1038/ncomms6989>

Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P., ... Winter, J. M. (2012). The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1–17. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>

Saadati, Z., Pirmoradian, N., & Rezaei, M. (2011). CALIBRATION AND EVALUATION OF AquaCrop MODEL IN RICE GROWTH SIMULATION UNDER DIFFERENT IRRIGATION

Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 20(2), 408–417. <http://doi.org/10.1111/gcb.12389>

Sanint, L. (2010). Nuevos retos y grandes oportunidades tecnológicas para los sistemas arroceros: Producción, seguridad alimentaria y disminución de la pobreza en América Latina y el Caribe. Producción eco-eficiente del arroz en América latina. Retrieved from http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/2010_Degiovanni-Produccion_eco-eficiente_del_arroz.pdf

Scrucca L (2013). "GA: A Package for Genetic Algorithms in R." *Journal of Statistical Software*, 53(4), 1–37. doi:10.18637/jss.v053.i04.

Scrucca L (2017). "On some extensions to GA package: hybrid optimisation, parallelisation and islands evolution." *The R Journal*, 9(1), 187–206. doi:10.32614/RJ-2017-008.

Semenov, M. A., & Porter, J. R. (1995). Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73(3–4), 265–283. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)05078-K](http://doi.org/10.1016/0168-1923(94)05078-K)

Singh, U., Tsuji, G.Y., Godwin, D.C. 1990. Planting new ideas in DSSAT: the CERES-Rice model. *Agrotechnology Transfer*, 10:1-7. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.

Sotelo, S., Guevara, E., Llanos-Herrera, L., Agudelo, D., Esquivel, A., Rodriguez, J., ... & Ramirez-Villegas, J. (2020). Pronosticos AClimateColombia: A system for the provision of information for climate risk reduction in Colombia. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105486. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105486>

Subash, N., & Ram Mohan, H. S. (2012). Evaluation of the impact of climatic trends and variability in rice–wheat system productivity using Cropping System Model DSSAT over the Indo-Gangetic Plains of India. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 71–81. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.008>

- Soundharajan, B., & Sudheer, K. P. (2013). Sensitivity analysis and auto-calibration of ORYZA2000 using simulation-optimization framework. *Paddy and Water Environment*, 11(1–4), 59–71. <https://doi.org/10.1007/s10333-011-0293-z>
- Tan, J., Cui, Y., & Luo, Y. (2017). Assessment of uncertainty and sensitivity analyses for ORYZA model under different ranges of parameter variation. *European Journal of Agronomy*, 91(August), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.001>
- Tan, J., Zhao, S., Liu, B., Luo, Y., & Cui, Y. (2021). Global sensitivity analysis and uncertainty analysis for drought stress parameters in the ORYZA (v3) model. *Agronomy Journal*, 113(2), 1407–1419. <https://doi.org/10.1002/agj2.20580>
- Tan, J., Cui, Y., & Luo, Y. (2016). Global sensitivity analysis of outputs over rice-growth process in ORYZA model. *Environmental Modelling and Software*, 83, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.001>
- Van Nguyen, N., & Ferrero, A. (2006). Meeting the challenges of global rice production. *Paddy and Water Environment*, 4(1), 1–9. <http://doi.org/10.1007/s10333-005-0031-5>
- Yang, J. M., Yang, J. Y., Liu, S., & Hoogenboom, G. (2014). An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*, 127, 81–89. <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.008>
- XING, H. min, XU, X. gang, LI, Z. hai, CHEN, Y. jin, FENG, H. kuan, YANG, G. jun, & CHEN, Z. xia. (2017). Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(11), 2444–2458. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61626-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61626-X)