

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

---

**Utilización del modelo AquaCrop para analizar el impacto de dos escenarios de cambio climático sobre el requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas, Cartago, Costa Rica**

---

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado académico de  
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

**María Fernanda Mayorga Quesada**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

Julio, 2024

## Aprobación

Trabajo Final de Graduación bajo la modalidad de proyecto de graduación, aprobado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



---

María Fernanda Mayorga Quesada  
Sustentante



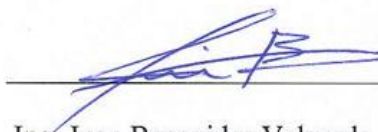
---

Ing. M. Melissa Rojas Downing, Ph. D.  
Directora, Comité Asesor



---

Ing. Alejandra M. Rojas González, Ph. D.  
Comité Asesor



---

Ing. Juan Benavides Valverde, Ph. D.  
Comité Asesor



---

Ing. Marianela Alfaro Santamaría, Ph. D.  
Miembro, Tribunal Examinador



---

Ing. Felipe Calleja Apéstegui, Ph. D.  
Miembro, Tribunal Examinador

## **DEDICATORIA**

*A mis padres por acompañarme durante estos años de carrera, por todo el apoyo que me brindan cada día y por todas las enseñanzas que me han convertido en la persona que soy.*

*A mi hermano por ser esa persona incondicional a la cual recurrir y por acompañarme en todo momento.*

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios.*

*A mis padres Rita y Gregorio por su esfuerzo, perseverancia, motivación y apoyo incondicional durante el desarrollo de este proyecto.*

*A mí hermano Gregory por ser mi soporte durante toda la carrera universitaria.*

*A Ana Victoria Mora por brindarme su apoyo desinteresado durante la etapa inicial de este proyecto de graduación.*

*A Kendell Matarrita por ser un amigo incondicional y brindarme su ayuda durante el proceso de caracterización del sitio de estudio en las etapas iniciales del proyecto.*

*A mis amigos por ser parte importante de mi carrera universitaria y llenar mis días de conversaciones, risas y motivación. En especial a Yos y Dani por todos sus consejos y apoyo.*

*A Melissa Rojas Downing, directora de este proyecto final de graduación por todo su apoyo, motivación, consejo, buena disposición y acompañamiento a lo largo del proyecto.*

*A los lectores del comité asesor Alejandra Rojas González y Juan Benavides Valverde por sus múltiples aportes al proyecto, todos sus consejos, motivación y seguimiento.*

*A la Hacienda Juan Viñas y en especial al Ing. Danny Rivera por abrirme las puertas de la empresa para desarrollar este proyecto, por su buena disposición y hospitalidad.*

*Al Instituto Meteorológico Nacional por facilitarme los datos meteorológicos necesarios para el desarrollo de este proyecto de graduación.*

*Al Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica por facilitarme los escenarios de cambio climático necesarios para concluir satisfactoriamente este proyecto.*

*A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por formar parte de mi desarrollo profesional.*

*Finalmente, a la Universidad de Costa Rica por todo el aprendizaje brindado y formar parte de mi crecimiento intelectual y personal.*

## RESUMEN

---

Actualmente, el cambio climático es una realidad que tiene repercusiones a nivel mundial y afecta diferentes aspectos sociales, económicos y ambientales. Costa Rica es considerado un país vulnerable ante los efectos del cambio climático debido a sus características geográficas, climáticas, socioeconómicas y ambientales. Los estudios que evalúan el impacto del cambio climático sobre los cultivos son utilizados para mejorar la capacidad adaptativa de los sistemas productivos, brindando una herramienta para disminuir el riesgo ante los cambios en las condiciones climáticas. El presente proyecto tiene como objetivo analizar el impacto del cambio climático sobre el requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum L.*) ubicado en la Hacienda Juan Viñas, Cartago, Costa Rica. Por medio del programa AquaCrop y la implementación de escenarios de cambio climático como medida de adaptación. El registro histórico de datos climáticos fue proporcionado por la Hacienda Juan Viñas y el Instituto Meteorológico Nacional, mientras que los escenarios de cambio climático fueron facilitados por el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (CIGEFI). Los datos de entrada para el modelo son precipitación (mm), temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>) para el módulo del clima. El módulo de suelo requiere capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), textura del suelo, conductividad hidráulica (Ks), entre otros. El módulo de cultivo se utiliza para ajustar el modelo mediante la incorporación de parámetros no conservativos como el coeficiente del cultivo (Kc), profundidad radicular, cobertura del dosel (CCd), entre otros. Estos valores se obtuvieron a partir de la caracterización del sitio de estudio mediante pruebas en campo, análisis de laboratorio e investigación bibliográfica (objetivo 1).

Para simular el requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar y ajustar las variables del modelo relacionadas con la variedad LAICA 04-250 (objetivo 2) se realizó un proceso de estimación de parámetros no conservativos del cultivo. Los resultados obtenidos indican un ajuste para la biomasa simulada de un  $r^2$  de 0,80, un RMSE de 14,34, RMSE/MAE de 1,45 y un 12,75% de variación promedio con respecto a la biomasa real observada. Las simulaciones del requerimiento hídrico incorporando escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, evalúa los efectos sobre la necesidad hídrica del cultivo, la producción de biomasa y el rendimiento obtenido al final de cada ciclo productivo a futuro (objetivo 3). Los resultados obtenidos revelan que los periodos de sequía afectan el desarrollo del dosel generando poca productividad de biomasa y déficit en los rendimientos, la reducción observada varía entre 11 – 97%. Para solventar esta problemática se realizó una simulación aplicando riego como medida de adaptación para los ciclos del cultivo que presentaron rendimientos deficientes. Los resultados indican que la medida de adaptación sugerida aumenta la producción de biomasa y rendimiento en un 80% favoreciendo a los productores y disminuyendo la vulnerabilidad del cultivo en la zona de Juan Viñas. Los resultados obtenidos evidencian la importancia de incorporar modelos matemáticos a los procesos productivos, que permita a los agricultores tener una mejor gestión de los recursos en función de las condiciones climáticas cambiantes. Herramientas como AquaCrop facilitan la optimización del consumo de agua mediante información específica de la relación agua-suelo-planta que se presenta en la finca, lo cual permite aumentar la productividad en cuanto a biomasa y rendimiento.

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos del proyecto</b> .....	<b>4</b>
1.1.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1. <i>Cambio climático</i> .....	5
2.1.1. <i>Efectos de cambio climático</i> .....	6
2.1.2. <i>Impacto del cambio climático sobre la agricultura</i> .....	7
2.1.3. <i>Adaptación al cambio climático</i> .....	8
2.2. <i>Investigación del cambio climático</i> .....	10
2.3. <i>Escenarios de cambio climático</i> .....	11
2.4. <i>Aplicación del programa AquaCrop para el análisis del impacto del cambio climático sobre el requerimiento hídrico de un cultivo</i> .....	12
2.4.1. <i>Definición del programa AquaCrop</i> .....	15
2.4.2. <i>Módulo de clima</i> .....	16
2.4.3. <i>Módulo de cultivo</i> .....	16
2.4.4. <i>Módulo de suelo</i> .....	16
2.4.5. <i>Módulo de manejo</i> .....	17
2.4.6. <i>Fundamentos teóricos del programa AquaCrop</i> .....	18
2.4.6.1. <i>Simulación del balance hídrico del suelo</i> .....	18
2.4.6.2. <i>Simulación del desarrollo del dosel</i> .....	19
2.4.6.3. <i>Simulación de la transpiración del cultivo</i> .....	19
2.4.6.4. <i>Simulación de la producción de biomasa</i> .....	20
2.4.6.5. <i>Simulación del rendimiento del cultivo</i> .....	20
2.5. <i>Información del sitio de estudio</i> .....	21
2.5.1. <i>Hacienda Juan Viñas</i> .....	21
2.5.2. <i>Condiciones climáticas y ambientales</i> .....	21
2.5.3. <i>Cultivo de caña de azúcar</i> .....	22
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>24</b>
3.1. <i>Diagrama metodológico</i> .....	24
3.2. <i>Sitio de estudio</i> .....	25
3.3. <i>Objetivo 1: Caracterización de la zona de estudio</i> .....	26
3.3.1. <i>Manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar en la Hacienda Juan Viñas</i> ..	26
3.3.2. <i>Condiciones climáticas</i> .....	26
3.3.2.1. <i>Estaciones meteorológicas disponibles</i> .....	26
3.3.2.2. <i>Caracterización de la información meteorológica disponible</i> .....	27
3.3.2.3. <i>Estimación de datos ausentes</i> .....	27
3.3.2.4. <i>Determinación del error al estimar datos ausentes</i> .....	29
3.3.3. <i>Condiciones edáficas</i> .....	29
3.3.3.1. <i>Muestreo de homogeneidad en la textura del suelo</i> .....	29
3.3.3.2. <i>Textura del suelo</i> .....	31
3.3.3.3. <i>Tasa de infiltración</i> .....	34
3.3.3.4. <i>Retención de humedad</i> .....	37

3.4. Objetivo 2: Determinación del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar .....	38
3.4.1. Programa AquaCrop.....	38
3.4.2. Datos de entrada para el programa AquaCrop.....	39
3.4.2.1. Módulo de clima.....	40
3.4.2.2. Módulo de cultivo.....	41
3.4.2.3. Módulo de suelo.....	45
3.4.2.4. Módulo de gestión o manejo .....	46
3.4.3. Ajuste del modelo .....	47
3.4.4. Análisis de sensibilidad.....	50
3.4.4.1. Textura del suelo .....	50
3.4.4.2. Espesor y cantidad de horizontes en el suelo.....	51
3.4.4.3. Nivel freático .....	51
3.5. Objetivo 3: Determinación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar utilizando dos escenarios de cambio climático como medida de adaptación...	52
3.5.1. Escenarios de cambio climático.....	52
3.5.2. Predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar .	52
3.5.3. Medidas de adaptación al cambio climático para el cultivo de caña de azúcar evaluado en la Hacienda Juan Viñas .....	54
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>55</b>
4.1. Objetivo 1: Caracterización de la zona de estudio .....	55
4.1.1. Manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar.....	55
4.1.2. Condiciones climáticas.....	57
4.1.2.1. Caracterización de la información meteorológica disponible.....	57
4.1.2.2. Estimación de datos ausentes.....	59
4.1.3. Condiciones edáficas .....	64
4.1.3.1. Homogeneidad en la textura del suelo .....	64
4.1.3.2. Textura del suelo .....	66
4.1.3.3. Tasa de infiltración.....	67
4.1.3.4. Retención de humedad.....	69
4.2. Objetivo 2: Determinación del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar .....	70
4.2.1. Programa AquaCrop .....	70
4.2.2. Datos de entrada para el modelo AquaCrop .....	70
4.2.2.1. Análisis del registro meteorológico histórico .....	72
4.2.3. Ajuste del modelo .....	76
4.2.3.1. Requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar ajustado a la variedad LAICA 04.250.....	83
4.2.4. Análisis de sensibilidad.....	89
4.2.4.1. Textura del suelo .....	89
4.2.4.2. Espesor y cantidad de horizontes en el suelo.....	92
4.2.4.3. Nivel freático .....	94
4.3. Objetivo 3: Determinación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar utilizando dos escenarios de cambio climático como medida de adaptación...	95
4.3.1. Análisis de la precipitación y temperatura de los escenarios de cambio climático .....	95
4.3.1.1. Precipitación .....	96

4.3.1.1.1. <i>Periodo a mediano plazo (2040 – 2069)</i> .....	96
4.3.1.1.2. <i>Periodo a largo plazo (2070 – 2099)</i> .....	98
4.3.1.2. <i>Temperatura</i> .....	99
4.3.2. <i>Predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar</i> .....	103
4.3.2.1. <i>Requerimiento hídrico</i> .....	103
4.3.2.1.1. <i>Periodo a mediano plazo (2040 – 2050)</i> .....	103
4.3.2.1.2. <i>Periodo a largo plazo (2070 – 2080)</i> .....	105
4.3.2.2. <i>Biomasa</i> .....	107
4.3.2.2.1. <i>Periodo a mediano plazo (2040 – 2050)</i> .....	107
4.3.2.2.2. <i>Periodo a largo plazo (2070 – 2080)</i> .....	109
4.3.2.3. <i>Rendimiento</i> .....	111
4.3.2.4. <i>Predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar</i> .....	112
4.3.3. <i>Medidas de adaptación al cambio climático para el cultivo de caña de azúcar evaluado en la Hacienda Juan Viñas</i> .....	115
4.3.3.1. <i>Biomasa según el escenario SSP2-4.5</i> .....	115
4.3.3.2. <i>Biomasa según el escenario SSP5-8.5</i> .....	119
4.3.3.3. <i>Rendimiento</i> .....	121
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>124</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>126</b>
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	<b>127</b>
<b>8. APÉNDICES</b> .....	<b>137</b>
<b>9. ANEXOS</b> .....	<b>164</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Estaciones meteorológicas seleccionadas.....	26
<b>Tabla 2.</b> Identificación de las muestras analizadas para la prueba de Bouyoucos .....	32
<b>Tabla 3.</b> Definición de las variables requeridas para complementar los parámetros de adaptación del modelo utilizados como datos de entrada en el módulo de cultivo para el modelo AquaCrop .....	44
<b>Tabla 4.</b> Datos de entrada ingresados en el módulo de suelo del programa AquaCrop para la modelación y ajuste del registro histórico .....	45
<b>Tabla 5.</b> Proceso de ajuste del modelo variando el coeficiente de crecimiento y decaimiento del cultivo .....	49
<b>Tabla 6.</b> Casos evaluados durante el análisis de sensibilidad para el parámetro de textura del suelo.....	51
<b>Tabla 7.</b> Casos evaluados durante el análisis de sensibilidad para el parámetro de espesor y cantidad de horizontes presentes en el suelo .....	51
<b>Tabla 8.</b> Registro del rendimiento (toneladas/hectárea) por año del lote de estudio.....	57
<b>Tabla 9.</b> Datos ausentes en el registro meteorológico .....	58
<b>Tabla 10.</b> Error al estimar datos ausentes utilizando el modelo de regresión lineal.....	63
<b>Tabla 11.</b> Determinación de la textura del suelo según los porcentajes de arcilla, limo y arena obtenidos a partir de la prueba de Bouyoucos .....	67
<b>Tabla 12.</b> Lámina de infiltración constante a saturación del suelo en el lote de estudio.....	68
<b>Tabla 13.</b> Valores obtenidos para la capacidad de campo y punto de marchitez permanente a partir de la prueba de retención de humedad. ....	70
<b>Tabla 14.</b> Datos de entrada de AquaCrop considerados para el modelaje del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar.....	71
<b>Tabla 15.</b> Resultados del proceso de ajuste del modelo variando el coeficiente de crecimiento y decaimiento del cultivo.....	78
<b>Tabla 16.</b> Resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad variando la textura del suelo.....	90
<b>Tabla 17.</b> Resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad variando el espesor y la cantidad de horizontes en el perfil del suelo.....	92
<b>Tabla 18.</b> Resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad variando la consideración y profundidad del nivel freático en el perfil del suelo.....	94
<b>Tabla 19.</b> Resultados estimados para la precipitación promedio mensual del registro futuro para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del periodo a mediano plazo (2040 – 2069).....	97
<b>Tabla 20.</b> Resultados estimados para la precipitación promedio mensual del registro futuro para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del periodo a largo plazo (2070 – 2099).....	99
<b>Tabla 21.</b> Resultados estimados para la precipitación promedio mensual del registro futuro para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para cada periodo evaluado .....	100
<b>Tabla 22.</b> Porcentajes de estrés del cultivo de caña de azúcar obtenidos para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2040 – 2050 .....	103
<b>Tabla 23.</b> Porcentajes de estrés del cultivo de caña de azúcar obtenidos para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2070 – 2080 .....	105

<b>Tabla 24.</b> Resultados obtenidos de la simulación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando el escenario de cambio climático SSP2-4.5 para cada periodo evaluado.....	116
<b>Tabla 25.</b> Resultados obtenidos de la simulación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando el escenario de cambio climático SSP5-8.5 para cada periodo evaluado.....	119
<b>Tabla A1.</b> Registro histórico del rendimiento obtenido por parte de la Hacienda Juan Viñas durante el periodo evaluado para la variedad LAICA 04-250 en el lote de estudio .....	137
<b>Tabla A2.</b> Registro histórico de las enmiendas aplicadas por parte de la Hacienda Juan Viñas durante el periodo evaluado para la variedad LAICA 04-250 en el lote de estudio .....	137
<b>Tabla A3.</b> Resultado del análisis de retención de humedad y conductividad hidráulica realizado por el Centro de Investigaciones Agronómicas .....	138
<b>Tabla A4.</b> Resultado del análisis de homogeneidad del suelo en el lote 75 de la finca LARA .....	138
<b>Tabla A5.</b> Resultado de la prueba de Bouyoucos realizada en el laboratorio de aguas, suelos y ambientes de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica aplicado a las muestras tomadas en el lote 75 de la finca LARA.....	139
<b>Tabla A6.</b> Resultados de la determinación de la textura del suelo para cada horizonte considerado en el lote 75 de la finca LARA.....	140
<b>Tabla B1.</b> Resultados obtenidos durante la etapa de ajuste del modelo para las simulaciones realizadas modificando los parámetros no conservativos del módulo de cultivo en el programa AquaCrop .....	142
<b>Tabla B2.</b> Resultados obtenidos durante la etapa de análisis de sensibilidad para las simulaciones realizadas modificando la textura del suelo en el programa AquaCrop .....	145
<b>Tabla B3.</b> Resultados obtenidos durante la etapa de análisis de sensibilidad para las simulaciones realizadas modificando el espesor y cantidad de horizontes del suelo en el programa AquaCrop .....	146
<b>Tabla B4.</b> Resultados obtenidos durante la etapa de análisis de sensibilidad para las simulaciones realizadas modificando el espesor y cantidad de horizontes del suelo en el programa AquaCrop .....	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Flujo de agua a través de la zona radicular del cultivo .....	18
<b>Figura 2.</b> Diagrama metodológico.....	24
<b>Figura 3.</b> Ubicación del área de estudio .....	25
<b>Figura 4.</b> Relación de las series temporales utilizadas para la estimación de datos ausentes .....	28
<b>Figura 5.</b> Muestreo al azar en recorrido zigzag .....	30
<b>Figura 6.</b> Puntos de muestreo para la prueba de homogeneidad en la textura del suelo .....	30
<b>Figura 7.</b> Puntos de muestreo para la prueba de textura del suelo .....	31
<b>Figura 8.</b> Procedimiento seguido en el laboratorio al realizar la prueba de Bouyoucos .....	32
<b>Figura 9.</b> Triángulo textural de acuerdo con el USDA.....	34
<b>Figura 10.</b> Puntos de muestreo para la prueba de infiltración. ....	35
<b>Figura 11.</b> Instalación del infiltrómetro de doble anillo en campo.....	36
<b>Figura 12.</b> Dimensiones del muestreador tipo anillo.....	37
<b>Figura 13.</b> Recolección de las muestras para la prueba de retención de humedad.....	38
<b>Figura 14.</b> Interfaz principal del modelo AquaCrop .....	39
<b>Figura 15.</b> Ciclo fenológico para la variedad LAICA 04-250.....	42
<b>Figura 16.</b> Esquema de ajuste del modelo AquaCrop .....	48
<b>Figura 17.</b> Registro del manejo agronómico para el periodo entre el año 2010 y 2022.....	55
<b>Figura 18.</b> Registro de las enmiendas aplicadas por año en el lote de estudio.....	56
<b>Figura 19.</b> Gráfico del modelo de regresión lineal para la temperatura máxima .....	59
<b>Figura 20.</b> Gráfico del modelo de regresión lineal para la temperatura mínima.....	60
<b>Figura 21.</b> Gráfico del modelo de regresión lineal para la humedad relativa máxima.....	60
<b>Figura 22.</b> Gráfico del modelo de regresión lineal para la humedad relativa mínima .....	62
<b>Figura 23.</b> Gráfico del modelo de regresión lineal para la radiación solar.....	62
<b>Figura 24.</b> Prueba de homogeneidad del punto 1 al punto 6 .....	65
<b>Figura 25.</b> Prueba de homogeneidad del punto 7 al punto 12 .....	66
<b>Figura 26.</b> Tasa de infiltración del suelo obtenida para la parte alta del lote de estudio ....	68
<b>Figura 27.</b> Tasa de infiltración del suelo obtenida para la parte baja del lote de estudio....	69
<b>Figura 28.</b> Registro histórico de la precipitación diaria .....	72
<b>Figura 29.</b> Registro histórico de la temperatura máxima y mínima diaria. ....	73
<b>Figura 30.</b> Registro histórico de la presión de vapor diaria.....	74
<b>Figura 31.</b> Registro histórico de la radiación solar diaria.....	75
<b>Figura 32.</b> Registro histórico de la velocidad del viento diaria.....	75
<b>Figura 33.</b> Resultados de biomasa para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop .....	76
<b>Figura 34.</b> Ajuste de la biomasa producida en el proceso de ajuste del modelo .....	81
<b>Figura 35.</b> Biomasa total producida para las simulaciones con mejor ajuste.....	82
<b>Figura 36.</b> Resultados del modelo AquaCrop ajustado para el primer ciclo productivo.....	84
<b>Figura 37.</b> Resultados del modelo AquaCrop ajustado para el segundo ciclo productivo ..	85
<b>Figura 38.</b> Resultados del modelo AquaCrop ajustado para el tercer ciclo productivo .....	86
<b>Figura 39.</b> Resultados del modelo AquaCrop ajustado para el cuarto ciclo productivo .....	87
<b>Figura 40.</b> Resultados del modelo AquaCrop ajustado para el quinto ciclo productivo .....	88
<b>Figura 41.</b> Registro del estrés por transpiración, expansión del dosel y cierre estomático debido al agotamiento hídrico en la zona radicular para cada ciclo del cultivo evaluado ...	89

<b>Figura 42.</b> Comparación porcentual de la producción obtenida como resultado de las simulaciones realizadas variando la textura del suelo como análisis de sensibilidad .....	91
<b>Figura 43.</b> Comparación porcentual de la producción obtenida variando el espesor y cantidad de horizontes en el perfil del suelo como análisis de sensibilidad .....	93
<b>Figura 44.</b> Comparación porcentual de la producción obtenida variando la profundidad del nivel freático dentro del perfil del suelo como análisis de sensibilidad .....	95
<b>Figura 45.</b> Registro futuro de la precipitación estimada para el periodo a mediano plazo .	96
<b>Figura 46.</b> Registro futuro de la precipitación estimada para el periodo a largo plazo .....	98
<b>Figura 47.</b> Registro futuro de la temperatura máxima.....	101
<b>Figura 48.</b> Registro futuro de la temperatura mínima .....	102
<b>Figura 49.</b> Porcentaje de estrés hídrico para el periodo a mediano plazo .....	104
<b>Figura 50.</b> Porcentaje de estrés hídrico para el periodo a largo plazo .....	106
<b>Figura 51.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción de la biomasa para el periodo a mediano plazo .....	108
<b>Figura 52.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción de la biomasa para el periodo a largo plazo.....	110
<b>Figura 53.</b> Comparación de la predicción del rendimiento .....	111
<b>Figura 54.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la simulación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el primer ciclo productivo.....	113
<b>Figura 55.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la simulación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el primer ciclo productivo.....	114
<b>Figura 56.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la simulación de la biomasa producida a futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2 – 4.5 al aplicar medidas de adaptación.....	118
<b>Figura 57.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la simulación de la biomasa producida a futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5 – 8.5 al aplicar medidas de adaptación para .....	121
<b>Figura 58.</b> Comparación de la predicción del rendimiento al considerar los escenarios de cambio climático SSP2 – 4.5 y el SSP5 – 8.5 .....	122
<b>Figura B1.</b> Biomasa total resultante del análisis de sensibilidad variando la textura del suelo comparado con la biomasa ajustada .....	144
<b>Figura B2.</b> Biomasa total resultante del análisis de sensibilidad variando la textura del suelo comparado con la biomasa ajustada .....	145
<b>Figura B3.</b> Biomasa total resultante del análisis de sensibilidad variando la textura del suelo comparado con la biomasa ajustada .....	146
<b>Figura C1.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2040 – 2042) .....	149
<b>Figura C2.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2042 – 2044). .....	149
<b>Figura C3.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2044 – 2046) .....	150
<b>Figura C4.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2046 – 2048) .....	150
<b>Figura C5.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2048 – 2050) .....	151
<b>Figura C6.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2070 – 2072) .....	151

<b>Figura C7.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2072 – 2074) .....	152
<b>Figura C8.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2074 – 2076) .....	152
<b>Figura C9.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2076 – 2078) .....	153
<b>Figura C10.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2078 – 2080) .....	153
<b>Figura C11.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2040 – 2042) .....	154
<b>Figura C12.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2042 – 2044) .....	154
<b>Figura C13.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2044 – 2046) .....	155
<b>Figura C14.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2046 – 2048) .....	155
<b>Figura C15.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2048 – 2050) .....	156
<b>Figura C16.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2070 – 2072) .....	156
<b>Figura C17.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2072 – 2074) .....	157
<b>Figura C18.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2074 – 2076).....	157
<b>Figura C19.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2076 – 2078).....	158
<b>Figura C20.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2078 – 2080).....	158
<b>Figura C21.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2040 – 2042).....	159
<b>Figura C22.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2046 – 2048).....	159
<b>Figura C23.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2070 – 2072).....	160
<b>Figura C24.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 (2076 – 2078).....	160
<b>Figura C25.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2040 – 2042).....	161
<b>Figura C26.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2046 – 2048).....	161
<b>Figura C27.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2070 – 2072).....	162
<b>Figura C28.</b> Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 (2076 – 2078).....	162

## ABREVIATURAS

---

CC	Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
GEI	Gases de Efecto Invernadero
PIB	Producto Interno Bruto
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CGIAR	Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional
LAICA	Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMM	Organización Meteorológica Mundial
UACJ	Universidad Autónoma de Ciudad
ENCC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
GCMs	Modelos de Circulación General
AOGCMs	Modelo de Circulación General Acoplado Atmósfera – Océano
DCC-MINAE	Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía
CFCs	Componentes Clorofluorocarbonados
CMIP	Intercomparación de Modelos Acoplados
CMIP6	Intercomparación de Modelos Acoplados Sexta Fase
SSP	Trayectorias Socioeconómicas Compartidas
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
DSSAT	Sistema de Toma de Decisiones para la Transferencia de Tecnología Agrícola
CIGEFI	Centro de Investigaciones Geofísicas
ICAP	Instituto Centroamericano de Administración Pública
StExp	Estrés hídrico relacionado con la disminución de la expansión del dosel
StSto	Estrés hídrico que induce el cierre estomático
StTr	Estrés térmico
APSIM	El simulador de sistemas de producción agrícola
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
SEPSA	Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria
RCP	Vías de Concentración Representativas
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
RL	Regresión Lineal
DRI	Instituto de Investigación del Desierto de la Universidad de Nevada
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos
NIDIS	Sistema Nacional Integrado de Información sobre Sequías
RMSE	Error Cuadrático Medio
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación
USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos
CIA	Centro de Investigaciones Agronómicas
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
K <sub>s</sub>	Conductividad hidráulica saturada del suelo o coeficiente de infiltración
K <sub>c</sub>	Coefficiente de transpiración
PVC	Policloruro de vinilo

%SA	Porcentaje de saturación de acidez del suelo
Ac. Intr.	Acidez intercambiable
CICE	Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva
DIECA	Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria
Coef.	Coefficiente
CDC	Coefficiente de decaimiento
CGC	Coefficiente de crecimiento
PC	Parámetro conservativo
PNC	Parámetro no conservativo
FC	Capacidad de Campo
PWP	Punto de Marchitez Permanente
SAT	Punto de Saturación
DR	Agotamiento en la zona radicular o requerimiento hídrico
Tr	Transpiración
ET	Evapotranspiración
HI	Índice de Cosecha
HIo	Índice de Cosecha de referencia
CCd	Cobertura del dosel
CCo	Cobertura del dosel inicial
CCx	Cobertura del dosel máxima
CN	Número de curva
REW	Valor del agua fácilmente evaporable
Wr	Agua retenida en la zona radicular
Dr	Agotamiento hídrico dado en la zona radicular
Kst	Estrés térmico
GDD	Grados de crecimiento por día
CC*	Cobertura fraccional del dosel
ET <sub>0</sub>	Evapotranspiración del cultivo
B	Biomasa
HR <sub>máx</sub>	Humedad Relativa Máxima
HR <sub>mín</sub>	Humedad Relativa Mínima
T <sub>máx</sub>	Temperatura máxima
T <sub>mín</sub>	Temperatura mínima
WP	Productividad hídrica del cultivo
WP*	Productividad hídrica normalizada
Y	Rendimiento del cultivo

## **1. INTRODUCCIÓN**

---

El cambio climático (CC) es un fenómeno definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como una variación en las condiciones climáticas atribuida a la actividad humana, sea de forma directa o indirecta (Naciones Unidas, 1992). Esto provoca una alteración atmosférica a nivel mundial que tiene implicaciones negativas sobre el bienestar humano, afectando aspectos económicos, ecológicos y de salubridad (Ordaz et al., 2010).

Las fluctuaciones en la economía a nivel mundial crean problemáticas sumamente complejas como la desigualdad social, crisis financiera e inseguridad alimentaria. Esta última es de gran importancia, ya que provoca una serie de consecuencias que afectan la calidad de vida de miles de personas como malnutrición, problemas sanitarios y hambruna. Estas secuelas aumentan debido a la creciente incertidumbre climática que tiene efectos devastadores sobre el sector agrícola (Lutz Porras, 2017).

Estos efectos negativos se acrecientan en los países en vías de desarrollo donde la economía depende en gran medida del sector agrícola. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés, 2017) estos países absorben un 22% de las implicaciones económicas producto del CC a nivel mundial. Además, se estima que para el año 2030 más de 122 millones de personas podrían sufrir pobreza extrema producto de los riesgos asociados a los fenómenos naturales extremos que se han presentado con mayor frecuencia en los últimos años.

Las principales actividades relacionadas con los patrones de desarrollo como los combustibles fósiles, medios de transporte, manejo de residuos, servicios públicos, asentamientos urbanos y alimentación, los cuales son considerados como los mayores precursores del CC (Carazo et al., 2012). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, 2019), durante el periodo comprendido entre el 2007 al 2018, el sector agrícola contribuyó con el 23% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen humano.

El incremento en las emisiones de GEI genera efectos significativos en las precipitaciones anuales, la temperatura media y la frecuencia de fenómenos naturales extremos. Esto repercute negativamente en el rendimiento de los cultivos, dependiendo de la ubicación geográfica en que se desarrolla el sistema productivo. Por ejemplo, en zonas tropicales, como Centroamérica, la variación del clima causa bajos rendimientos, mientras que en latitudes altas ocurre el efecto contrario (IPCC, 2019).

Centroamérica representa el 2,8% del territorio de América Latina y el Caribe de los cuales el 35,5% se destina a la agricultura. En el año 2017, la región generó un 5,6% del producto interno bruto (PIB) de Latinoamérica, lo que representó un 0,4% del PIB a nivel mundial, esto denota la importancia de la producción agrícola para los países de la región (Flores et al., 2020). Los efectos del CC en esta zona son cada vez más intensos, lo que provoca una mayor exposición a fenómenos naturales como sequías, huracanes, ciclones e inundaciones (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2015).



En el caso de Costa Rica, las proyecciones presentadas por el programa de investigación en cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria desarrollado por el Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR, por sus siglas en inglés) indican que el promedio de temperatura anual en el país aumentará 1,3 °C para el año 2030, afectando principalmente la región de Guanacaste y las zonas de San José, Cartago y Pacífico Sur. Esto ocasionará una reducción en el rendimiento agrícola y serías implicaciones económicas para el país (Bouroncie et al., 2015).

El Plan Nacional de Descarbonización 2018 – 2050 propuesto por el Gobierno de Costa Rica (2017), menciona que las emisiones de GEI atribuidas a la agricultura se concentran en cuatro productos: café, caña de azúcar, banano y arroz. La caña de azúcar (*Saccharum spp L.*) es un cultivo de gran importancia a nivel nacional en aspectos históricos, culturales y sociales. Durante el periodo 2019 – 2020 la cosecha de caña de azúcar fue del 90,6% lo que corresponde a un total de 56.689 ha (Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar [LAICA], 2021). En la zona de Turrialba y Juan Viñas, al año se cosecha un 7,49% de la producción nacional de caña de azúcar, correspondiente a un total de 2.664 ha (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

Actualmente el aumento de eventos climáticos extremos ha provocado fuertes pérdidas económicas y de infraestructura en el país. Particularmente el sector agropecuario ha sido fuertemente afectado por estos eventos, lo que provoca una disminución generalizada de los rendimientos anuales y, por ende, pérdidas económicas (Carazo et al., 2012). Por esta razón, el sector azucarero en Turrialba y Juan Viñas requiere implementar medidas de adaptación al CC por medio de la incorporación de modelos agroclimáticos que permitan formular un plan de acción agronómico y sostenible en el tiempo (Lutz Porras, 2017).

Para ello, existe el compromiso de generar una transformación que permita un desarrollo integrado, implementando medidas sostenibles en conformidad con La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la CEPAL. Una de las principales metas en el área ambiental, relacionada con la producción agropecuaria, es la ejecución de medidas para combatir el CC y sus efectos negativos, a través de una producción sustentable. Por esta razón, es relevante el estudio de las consecuencias del CC sobre el requerimiento hídrico de los cultivos, con tal de tener la información necesaria para la toma de decisiones, así como adaptar la producción a las variaciones futuras del clima (CEPAL, 2018).

En este sentido, los modelos agroclimáticos son una herramienta que permite identificar los puntos débiles en los sistemas productivos y crear soluciones sostenibles sin comprometer el rendimiento de la cosecha, ni el medio ambiente circundante (Fernández, 2013). El programa AquaCrop es un modelo de simulación del crecimiento de los cultivos creado por la División de Tierras y Aguas de la FAO que tiene como objetivo facilitar la evaluación del impacto ambiental y la gestión del requerimiento hídrico en las labores agrícolas (FAO, s.f.).

Este modelo ha sido ampliamente validado en diferentes estudios, como los realizados por Alvar Beltrán et al. (2021), Castillo Iglesias et al. (2020) y Arce Romero (2017) en regiones como el Sindh y Punjab en Pakistán, el municipio Alquizar en Cuba y en diferentes zonas agrícolas de México. Esta metodología ha sido utilizada para calcular el requerimiento

hídrico para diferentes cultivos como maíz, frijol, trigo, soja, cebada y caña de azúcar. Además, permite evaluar, calibrar y validar proyecciones de la necesidad hídrica del cultivo a futuro, al incorporar escenarios de CC, lo que resulta de gran importancia para implementar medidas de adaptación para el sector azucarero del país (Fernández, 2013).

Por este motivo, el presente proyecto analizó los efectos que tiene el CC sobre el requerimiento hídrico de un cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas en la provincia de Cartago, Costa Rica. Juan Viñas es una zona productora de caña de azúcar única en el país, debido a la alta capacidad productiva. Sin embargo, la producción se ha visto afectada debido a su alta sensibilidad ante la variación climática, disminuyendo los rendimientos, así como la cantidad de área destinada para la siembra y cosecha (Lutz Porras, 2017).

Evaluar los efectos del CC sobre la necesidad hídrica del cultivo de caña de azúcar en la zona de Juan Viñas, permitirá establecer una referencia de investigación sobre modelación del CC en el país, mientras que, a los productores les permitirá mejorar los rendimientos y disminuir las pérdidas del cultivo. Además, se pretende contribuir con los ODS, específicamente con el objetivo 2 fomentando la sostenibilidad de los sistemas agrícolas mediante la resiliencia y adaptación al cambio climático para aumentar la productividad. Además, se considera el objetivo 13 ya que se identificarán medidas de carácter urgente que permitan luchar contra los efectos del CC. Por último, se contribuirá con el objetivo 12, el cual hace referencia a contribuir a la generación de conocimiento favoreciendo la capacidad científica y tecnológica de los países en vías de desarrollo (Naciones Unidas, 2015).

Por esta razón, se llevó a cabo una modelación por medio del programa AquaCrop del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas, Cartago, Costa Rica, a partir de datos climáticos, agronómicos y edáficos. Además, se evaluaron los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 con el objetivo de estimar el requerimiento hídrico del cultivo, la producción de biomasa y los rendimientos del cultivo durante dos periodos de evaluación. El primero de ellos representa los efectos del cambio climático a mediano plazo (2040 – 2069), mientras el segundo evalúa dichos efectos a largo plazo (2070 – 2099). Esto con el fin de generar herramientas que les permitan a los productores de la zona sobrellevar los efectos del cambio climático a través de la implementación de medidas de adaptación responsables y sostenibles (FAO, 2022).

## **1.1 Objetivos del proyecto**

### **1.1.1 Objetivo general**

Analizar el impacto de dos escenarios de cambio climático sobre el requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas, Cartago, Costa Rica utilizando el programa AquaCrop como medida de adaptación.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- 1.1.2.1 Caracterizar el manejo, las condiciones climáticas, agronómicas y edáficas propias de un cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas, Cartago, Costa Rica.
- 1.1.2.2 Determinar el requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas, Cartago, a través del programa AquaCrop, con el fin de evaluar los efectos de la variabilidad climática sobre el rendimiento del cultivo.
- 1.1.2.3 Evaluar dos escenarios de cambio climático para predecir el requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas, utilizando el programa computacional AquaCrop, como medida de adaptación al cambio climático.

## **2. MARCO TEÓRICO**

---

### **2.1 Cambio climático**

El cambio climático supone uno de los retos más relevantes para la humanidad en este momento. Si bien la variación en las condiciones climáticas es un proceso natural que ocurre gradualmente, en la actualidad este fenómeno se ha acelerado significativamente debido a razones antropogénicas (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez [UACJ] et al., 2019). Esta constante variación en los diversos componentes meteorológicos ha desestabilizado los medios de vida, ocasionando un impacto importante en los sistemas sociales, la agricultura, biodiversidad, disponibilidad de agua potable, entre otros aspectos relevantes (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021). Según Las Naciones Unidas (1992), el cambio climático se define como una variación del clima que tiene implicaciones adversas sobre la composición de las condiciones atmosféricas a nivel mundial debido a la injerencia directa o indirecta de la actividad humana.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2019) define el concepto de variabilidad climática como la desviación en las condiciones climáticas con respecto a la media estadística calculada temporal o espacialmente, esta variación se conoce como anomalía y describe los fenómenos meteorológicos atípicos. La variabilidad del clima depende de la relación que existe entre la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y la cantidad de radiación solar que ingresa hacia la superficie de la Tierra. Las Naciones Unidas (1997) define gases de efecto invernadero como aquellos componentes gaseosos de la atmósfera que absorben y remiten radiación infrarroja. Los principales GEI son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ) y los componentes clorofluorocarbonados (CFCs).

Estos gases tienen la función de absorber la radiación infrarroja proveniente del sol y remitirla hacia la superficie terrestre permitiendo un equilibrio natural del flujo de energía a través de la atmósfera. Esto produce un efecto invernadero natural que permite regular la temperatura del planeta posibilitando el desarrollo biológico de ecosistemas y seres vivos (Benavides Ballesteros y León Aristizabal, 2007).

Sin embargo, actualmente se presentan altas concentraciones de GEI en la atmósfera, lo que provoca un aumento en la radiación infrarroja absorbida. Esto a su vez produce un incremento significativo en la temperatura del planeta, a este fenómeno se le conoce como calentamiento global y es una de las principales causas del cambio climático (Benavides Ballesteros y León Aristizabal, 2007). En este sentido, el sistema climático juega un papel predominante, ya que es el encargado de regular el desbalance energético que ocurre producto del incremento de la concentración de GEI en la atmósfera, y es debido a esta función que actualmente existe una mayor sensibilidad climática (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

El concepto de sensibilidad climática es ampliamente utilizado para describir el comportamiento actual del clima, ya que se refiere a la injerencia del forzamiento radiactivo en el aumento de la temperatura media del aire en la superficie de la Tierra. La sensibilidad

depende del equilibrio entre la radiación solar emitida y la absorbida, cuando hay un incremento en la energía solar también incrementa la temperatura y la emisión de radiación infrarroja hacia el espacio (Benavides Ballesteros y León Aristizabal, 2007). Cuando este equilibrio se ve alterado provoca una deficiencia en la rapidez con que se devuelve el exceso de calor al espacio exterior dando lugar a cambios en las condiciones climáticas habituales (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

La variabilidad climática, el calentamiento global y el efecto invernadero constituyen las principales causas del cambio climático. Estos fenómenos actualmente ocurren con mayor frecuencia e intensidad provocando un impacto significativo en los medios de vida. El cambio climático es una problemática que llegó para quedarse, los esfuerzos por mitigar sus efectos adversos se ven limitados debido a la complejidad que representa el fenómeno en sí. Las múltiples aristas que constituyen el cambio climático y que relacionan diversos procesos físicos, químicos, biológicos y meteorológicos que tienen un impacto importante a nivel social, económico y ambiental en la humanidad (Forero Cantor et al., 2017).

### **2.1.1 Efectos del cambio climático**

Los efectos adversos del CC se pueden conceptualizar como una alteración en la biota del planeta, que tiene repercusiones en la constitución, resiliencia y productividad de los ecosistemas, lo que causa un efecto negativo en el bienestar del ser humano (Naciones Unidas, 2015). Los modos de vida se ven perjudicados debido a la presencia de fenómenos meteorológicos que ocurren con mayor frecuencia e intensidad teniendo implicaciones serias sobre la calidad de vida de las personas (FAO, 2017).

Uno de los principales efectos del cambio climático es la presencia de eventos climáticos extremos que ocurren debido al aumento en las temperaturas máxima y mínimas registradas, lo que provoca un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos. El cambio climático tiene serias implicaciones en las fluctuaciones de los regímenes de precipitación, lo que da lugar a la presencia de tormentas tropicales intensas, inundaciones, huracanes, olas de frío o calor y un mayor vigor en las sequías (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

Las variaciones en las condiciones climáticas normales tienen implicaciones importantes en la forma de vida en el planeta. Debido a que aumenta la vulnerabilidad de las especies producto de la alteración, reducción o desaparición de hábitats y ecosistemas (Guerra Martínez, 2021). Además, el cambio climático propicia alteraciones en la fisiología, crecimiento, reproducción, desarrollo, comportamiento y migración de las diferentes especies debido a los cambios en el ciclo hidrológico y la estacionalidad del clima (Uribe Botero, 2015).

La afectación no solo involucra aspectos ambientales, sino también sociales y económicos principalmente para los países en vías de desarrollo que tienen una mayor vulnerabilidad debido a su modelo económico. América Latina y en especial Centroamérica cuentan con un modelo de desarrollo centralizado en la producción y comercialización de productos agrícolas y otros recursos naturales que dependen en gran medida de las condiciones climáticas y ambientales. Esta dependencia económica del clima afecta significativamente el

crecimiento económico de la zona, provocando un aumento en la pobreza, hambruna y en la desigualdad social (Bárcena et al., 2012). Debido a la ubicación geográfica de Costa Rica y al modelo socioeconómico que se practica actualmente, el país se cataloga como de alto riesgo ante los efectos del cambio climático que afectan diversos sectores como el productivo, social y ambiental. De los principales impactos que se pueden presentar se encuentran los ciclones tropicales, precipitaciones extremas y periodos de sequías prolongados (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

En Costa Rica se han presentado eventos extremos como el aumento en la frecuencia y prolongación de las sequías, temperaturas extremas principalmente durante la época seca y el aumento en la intensidad de tormentas y huracanes. Además, se reporta la pérdida de biodiversidad, aumento en el nivel del mar que provoca pérdida territorial e implicaciones económicas en zonas costeras, degradación de los suelos afectando considerablemente la producción agrícola y la acidificación oceánica e intrusión salina (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

### **2.1.2 Impacto del cambio climático sobre la agricultura**

El impacto del cambio climático se define como una respuesta generada de la relación que surge entre factores estrictamente climáticos y aquellos que no lo son. En esta relación interactúan diversos aspectos sociales, políticos, económicos, institucionales, de salubridad, geográficos, biológicos y ambientales que conforman un determinado sistema. El impacto se ve medido en cuanto a la distribución, severidad y magnitud de las consecuencias percibidas por las diferentes regiones o personas (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

En este sentido, los sectores que tienen mayor vulnerabilidad ante el impacto del cambio climático en América Central y Costa Rica son la agricultura, pesca, biodiversidad, infraestructura, recurso hídrico, turismo, salud y desarrollo territorial. De los cuales el sector agrícola presenta mayor riesgo debido a que depende en su totalidad de la disponibilidad de los recursos naturales y de las condiciones meteorológicas (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021). La productividad agrícola se ve perjudicada debido al impacto del cambio climático en la temperatura, eventos meteorológicos extremos y precipitaciones que se presentan con mayor frecuencia e intensidad. Esto ocasiona variaciones en la evapotranspiración y requerimientos hídricos de los cultivos, afectando considerablemente la gestión de los sistemas de riego y los rendimientos e ingresos económicos (Ojeda Bustamante et al., 2011).

Además, el cambio climático favorece el aumento en la aparición, composición y cantidad de plagas y enfermedades que atacan los cultivos generando una disminución de los rendimientos percibidos por los agricultores. Por otra parte, la variación en las condiciones ambientales ocasiona cambios en los patrones de crecimiento, desarrollo y distribución de los cultivos. Así como, una disminución en la disponibilidad de agua potable para fines agrícolas lo que impacta en gran medida la productividad, rendimiento y calidad de las cosechas generando afectaciones económicas y sociales importantes en el sector (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

En Costa Rica el sector agrícola simboliza el 5,1% del PIB del país, la producción está orientada a la exportación de frutas como piña y banano que alcanzaron el 64% de las exportaciones nacionales en el año 2017. El cultivo de caña de azúcar representó una producción bruta de 136,55 millones de dólares en el año 2016, un 4,2% de la producción bruta del país y un 2,3% de las exportaciones del sector agropecuario en el año 2017 (Flores et al., 2020). Sin embargo, para el periodo entre los años 1988 y 2019 se registraron alrededor de 5.994 afectaciones producto del cambio climático de las cuales un 98,8% se relacionan con eventos hidrometeorológicos extremos, lo cual representó una pérdida económica de 460 millones de dólares para el sector (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022). Uno de los principales riesgos, producto del CC que persiste hasta la actualidad, es la seguridad alimentaria. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2017), Centroamérica y el Caribe representan zonas donde los cultivos experimentan una mayor sensibilidad a las variaciones del clima y se destacan los cultivos de yuca, maíz, trigo, arroz y caña de azúcar como los más vulnerables en este sentido.

La Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA, 2020) indica que la caña de azúcar cuenta con una participación del 5,4% dentro de los principales productos exportados por la industria alimentaria en Costa Rica, durante el año 2019. Sin embargo, la producción mostró una variación negativa del 22,5% con respecto al periodo anterior, que corresponde al año 2017-2018, debido a una disminución en los rendimientos producto de las afectaciones sufridas a consecuencia del cambio climático.

El comportamiento que sufrió la producción de caña de azúcar en el país, durante el periodo mencionado anteriormente, evidencia la susceptibilidad de este cultivo ante las variaciones del clima. Lo cual se debe a que el sistema de producción de caña de azúcar necesita una combinación idónea de altas y bajas temperaturas dependiendo de la etapa fenológica en que se encuentre el cultivo. Por otra parte, el requerimiento hídrico del cultivo demanda 1.500 mm al año de precipitación, distribuida durante el periodo de crecimiento (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], s.f., como se citó en MAG, 1991). Dentro de las zonas con mayor concentración de fincas destinadas a la producción de caña de azúcar se encuentra la provincia de Cartago que alberga lugares como Turrialba, Juan Viñas y Paraíso donde se cosecha caña de alta calidad debido a la ubicación geográfica y condiciones climáticas favorables. Sin embargo, la producción de caña de azúcar en estas zonas del país está siendo amenazada a causa de los efectos del CC (Chavarría Soto et al., 2017).

### **2.1.3 Adaptación al cambio climático**

La adaptación al cambio climático se define como una serie de acciones que tienen por objetivo proponer e impulsar mecanismos de ajuste para los diversos sistemas biológicos, naturales y humanos como respuesta ante los efectos negativos del cambio climático. Este concepto es de gran importancia debido a que permite moderar los daños ocasionados por las variaciones climáticas. Además, brinda la oportunidad de sacar provecho de aquellos escenarios positivos que pueden surgir como consecuencia del CC. Por lo cual, la adaptación representa un instrumento para construir resiliencia ante los efectos adversos del cambio climático (IPCC, 2021). La resiliencia climática se define como la capacidad que tienen los sistemas biológicos y antropológicos de hacerle frente a los escenarios adversos producto del

cambio climático, con el fin de preservar, restaurar y recuperar aquellas estructuras o funciones que se vieron perjudicadas inicialmente. La adaptación no solo involucra aspectos ambientales, sino también sociales y de desarrollo ya que los eventos climáticos extremos afectan las poblaciones, infraestructura y la industria en general (Chavarría Soto et al., 2017). Costa Rica ha trabajado arduamente en temas de adaptación al cambio climático a nivel institucional, por medio de la aplicación de planes que involucran objetivos de descarbonización y resiliencia como mecanismos para la transformación del modelo de desarrollo actual. En este sentido, se creó como política pública la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) 2010-2020 como un primer intento de contrarrestar los efectos adversos del CC en el país. Posteriormente, en el año 2011, se creó la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía (DCC-MINAE) con el objetivo de centralizar en una entidad la coordinación de la política climática y la dirección del ENCC (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

Estos esfuerzos en temas climáticos impulsaron al país a firmar el Acuerdo de París en el año 2015 propuesto por la CMNUCC con el objetivo de combatir el CC y contribuir activamente con acciones que permitan a los países involucrados disminuir las emisiones de carbono para garantizar un futuro sostenible. Lo cual marcó un precedente para Costa Rica ya que se comprometió en desarrollar un nuevo marco legal e institucional cuyo eje temático es la acción por el clima, donde se muestran iniciativas tanto de mitigación como de adaptación al cambio climático (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

Actualmente el país dirige sus esfuerzos en involucrar la adaptación al CC en la planificación del desarrollo con el objetivo de fortalecer la resiliencia climática para contribuir a la mejora de las políticas públicas y los planes sectoriales. En este sentido, durante los últimos 10 años, Costa Rica ha venido desarrollando e impulsando diferentes políticas de adaptación como la Política Nacional de Saneamiento y Aguas Residuales, Plan Nacional de Descarbonización, Plan Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres, entre otros (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

Estas políticas de adaptación marcaron un precedente y contribuyeron a la creación del Plan Nacional de Adaptación 2022 – 2026, que tiene un alcance establecido en orientar las acciones a realizar por las diferentes instituciones hacia la implementación de un modelo de desarrollo basado en la resiliencia climática. Esto como medida para evitar las pérdidas humanas y disminuir los daños materiales provocados por los eventos meteorológicos extremos y los efectos del cambio climático, con el objetivo de garantizar una mejor calidad de vida. Este plan involucra a todos los sectores del país incluyendo al sector agrícola (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

Dentro de las medidas propuestas para el sector agrícola se encuentran el aseguramiento del recurso hídrico, mejoras en las prácticas agrícolas por medio de la implementación de sistemas productivos novedosos y sustentables, investigación e implementación de nuevas tecnologías, entre otras. Como parte de introducción de la resiliencia y adaptación en las prácticas agrícolas comunes se establecen actividades de recuperación, rehabilitación y restauración del medio ambiente y en especial de los suelos para garantizar una mayor productividad. Así como el apoyo gubernamental en temas de disponibilidad de seguros,



préstamos e incentivos económicos para los productores más vulnerables y el desarrollo de programas de agricultura urbana que fomenten un estilo de vida autosustentable para la población urbana vulnerable (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

## **2.2 Investigación del cambio climático**

El cambio climático representa una problemática de gran importancia a nivel mundial, este fenómeno involucra una gran cantidad de variables lo que lo hace sumamente complejo de entender y estudiar. Sin embargo, actualmente las investigaciones en este campo van dirigidas a las proyecciones climáticas futuras para la generación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Para ello se utiliza la modelación y se puede aplicar a cada sector perjudicado por los efectos adversos del cambio climático.

La modelación es sumamente utilizada para el estudio del CC desde hace ya muchos años. El IPCC (1997) publicó un manual introductorio a los modelos climáticos simples que fueron utilizados durante el desarrollo del segundo informe de evaluación. En el cual se define modelación como la representación matemática de un proceso o sistema que debido a su complejidad se realiza por medio de un programa informático que se denomina modelo. Aquel modelo que contiene todas aquellas variables o elementos que conforman el sistema climático bajo estudio se denomina modelo climático el cual es ampliamente utilizado para el análisis del CC en la actualidad.

En este sentido, existen múltiples modelos relacionados con el estudio del cambio climático dentro de los cuales se encuentra el conocido modelo del balance de energía unidimensional. Este modelo involucra una sola capa de información donde se ve representada la variación en la latitud y las condiciones atmosféricas. Sin embargo, presenta la limitante de no involucrar los procesos de transporte de calor que se dan a través de la atmósfera y afectan la modelación ya que se ven representados como difusión. Por otro lado, el modelo atmosférico y oceánico bidimensional surgió como respuesta ante la limitante en el modelo unidimensional, ya que involucra las variables de altura y profundidad permitiendo calcular el transporte de calor a través de la atmósfera (IPCC, 1997).

Por último, el Modelo de Circulación General Acoplado Atmósfera – Océano Tridimensional (AOGCMs, por sus siglas en inglés) es uno de los más complejos y exactos que se han desarrollado ya que interpretan la atmósfera o el océano como un sistema de rejillas colocadas horizontalmente a una resolución de 1 - 4° con 10 - 20 capas verticales. Estos modelos tienen la capacidad de simular el estado de la atmósfera y del océano en cuanto al intercambio de calor, las corrientes oceánicas, los vientos, variables en la humedad, cambios en la temperatura y la transferencia de radiación a través de la atmósfera (IPCC, 1997).

Los Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés) son ampliamente utilizados para el estudio de las afectaciones, producto del cambio climático proyectadas a futuro. Una de las problemáticas más estudiadas en la actualidad es la disponibilidad del recurso hídrico, en vista de que se ve seriamente limitada debido a los cambios en la temperatura, así como a las variaciones en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones. A través de los GCMs se desarrollan proyecciones climáticas que permiten cuantificar e

identificar cambios potenciales, estimar la disponibilidad del recurso a futuro, detectar periodos de deficiencia hídrica y generar planes de acción en cuanto a adaptación a las condiciones futuras (Gateño Meneses, 2022).

Al igual que se utilizan los modelos de circulación general para estudios hidrológicos, también son ampliamente empleados en estudios ambientales, ecológicos y agrícolas. Debido al estrés que el cambio climático ejerce sobre la agricultura, las implicaciones que estas afectaciones tienen sobre la seguridad alimentaria y los efectos adversos sobre el rendimiento de los cultivos, el interés en estudiar estos temas a través de la modelación climática ha incrementado considerablemente.

### **2.3 Escenarios de cambio climático**

El IPCC ha liderado todos los esfuerzos y avances en temas de investigación del cambio climático. Por lo cual desarrolló una metodología experimental estandarizada para la utilización de los Modelos de Circulación General Acoplado Atmósfera – Océano denominada Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) (Camarena Pérez, 2022). Actualmente, el proyecto se encuentra en la sexta fase (CMIP6) e involucra al menos 60 GCMs en el proceso comparativo, estos modelos se encargan de simular a escala mensual y diaria la serie climatológica histórica y futura iniciando en 1850 y finalizando en 2100 a nivel global bajo diferentes escenarios de cambio climático (Gateño Meneses, 2022).

Un escenario de cambio climático se define como una descripción del clima futuro que se realiza por medio de proyecciones que permiten obtener una representación consistente y coherente de las condiciones meteorológicas a futuro. El término proyección hace referencia a la descripción de un conjunto de condiciones o características que podrían suceder como consecuencia de la aplicación de un conjunto de supuestos que se definen en términos de datos observados (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

Con ayuda del proyecto CMIP6 se puede intercomparar un conjunto de GCMs a escala temporal del siglo e incorporar los escenarios de cambio climático. Esta novedosa metodología se estableció en el subproyecto denominado ScenariMIP que fue desarrollado por el IPCC para facilitar el estudio del CC. Este proyecto tiene como objetivo crear conciencia sobre las consecuencias que se pueden percibir por medio de los escenarios climáticos y la accesibilidad a la investigación integrada del cambio climático (Camarena Pérez, 2022). Para el desarrollo del proyecto ScenariMIP se definen los escenarios de cambio climático con base en dos diferentes representaciones del clima futuro. La primera representación se denomina Trayectorias de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) y se definen por su capacidad de aproximar el forzamiento radiativo para el año 2100 a partir de un rango establecido de emisiones de GEI y la concentración de estos en la atmósfera (Camarena Pérez, 2022).

De los RCPs se desprenden cuatro escenarios de cambio climático el primero es el RCP2.6 que corresponde a un forzamiento radiativo de  $2,6 \text{ W/m}^2$  lo que representa niveles bajos debido a una mitigación agresiva y una temperatura promedio global inferior a los  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . El

segundo es el RCP4.5 que corresponde a  $4,5 \text{ W/m}^2$  de forzamiento radiativo lo que proyectó un escenario de mitigación media y una temperatura promedio global de  $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , así como el RCP6.0 presenta un total de  $6,0 \text{ W/m}^2$  de forzamiento radiativo y una temperatura promedio global de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por último, el escenario RCP8.5, que es considerado como pesimista, ya que asume que las emisiones futuras siguen la tendencia de aumento actual donde la temperatura promedio global podría aumentar hasta los  $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$  (Alvarado Gamboa, 2021).

La segunda representación utilizada en el proyecto ScenariMIP se conoce como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) e involucran variables como la economía, desigualdad social, cambios tecnológicos, cambios demográficos, entre otros factores que se relacionen con las emisiones de GEI. Por si solos, este conjunto de escenarios no toma en consideración los efectos del cambio climático como tal, debido a que no involucran variables meteorológicas, política climática, procesos de mitigación y adaptación en las proyecciones. Sin embargo, se centran en los desafíos que representan a futuro las condiciones socioeconómicas de los países del mundo para los procesos de adaptación y mitigación del cambio climático (Escoto Castillo et al., 2017).

Los SSP cuentan con cinco escenarios, el primero se denomina trayectoria SSP1 el cual representa emisiones de GEI bajas lo cual corresponde a una proyección de sustentabilidad, seguidamente se tiene la trayectoria SSP2 calificado como intermedio. La trayectoria SSP3 corresponde a un escenario de fragmentación y describe un uso intensivo de recursos especialmente de combustibles fósiles, la trayectoria SSP4 referente a desigualdad y la trayectoria SSP5 que representa un alto desarrollo económico basado en el uso de combustibles fósiles (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

Con el objetivo de describir con mayor precisión y exactitud los efectos futuros del cambio climático, se combinan ambos tipos de escenarios integrando las variables climáticas por medio de los valores de forzamiento radiativo y temperatura promedio global con los factores socioeconómicos. Dando lugar a cinco nuevos escenarios donde se incluye emisiones de GEI elevadas con las trayectorias SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con concentraciones de  $\text{CO}_2$  que duplican el valor actual, emisión intermedia con la trayectoria SSP2-4.5 que refleja una constante en las concentraciones de  $\text{CO}_2$  con referencia en el valor actual. Por último, escenarios con bajas emisiones con las trayectorias SSP1-1.9 y SSP1-2.6 con una concentración de  $\text{CO}_2$  con valores netos negativos (IPCC, 2021). Estos escenarios corresponden a la última generación desarrollada por el IPCC, presentados en el sexto informe de evaluación publicado en el año 2022, por lo que contienen los datos más actualizados, lo cual permite analizar cualquier eje temático relacionado con los efectos del cambio climático, así como los diferentes procesos de mitigación y adaptación.

#### **2.4 Aplicación del programa AquaCrop para el análisis del impacto del cambio climático sobre el requerimiento hídrico de un cultivo.**

A partir del modelo AquaCrop se puede realizar una estimación de los efectos en el rendimiento de los cultivos debido al estrés hídrico. Esto permite incorporar al programa AquaCrop los escenarios de CC que incluyan variaciones en la precipitación y temperatura media, así como los cambios en las concentraciones de  $\text{CO}_2$  con el objetivo de identificar el

impacto sobre las necesidades hídricas de un cultivo en específico a futuro (Toro Trujillo et al., 2016).

Según la FAO (2017), las repercusiones que han sufrido los sistemas agrícolas producto del aumento en las temperaturas y precipitaciones anuales se deben principalmente al CC. La variabilidad climática causa escasez de humedad en el suelo, aumento en la temperatura media, mayor incidencia de plagas y enfermedades, disminución en la intensidad y frecuencia de la precipitación anual y decrecimiento en la disponibilidad del agua. Esto origina que las cosechas no cubran la demanda de alimentos, lo que lleva a bajos rendimientos, ocasionando problemáticas sanitarias, sociales y económicas más complejas (Jiménez et al., 2011).

Por esta razón, diferentes instituciones como la FAO, el IPCC, la CMNUCC y la CEPAL buscan canalizar sus esfuerzos en la evaluación del impacto que tiene el CC sobre la agricultura, con el fin de proponer y ejecutar medidas de mitigación y adaptación. Por ello se han desarrollado una gran cantidad de metodologías, programas computacionales, algoritmos y tecnologías que facilitan el análisis de los efectos del CC sobre el sistema agua – suelo – planta. Por esta razón, existe un gran número de estudios enfocados en cuantificar los efectos de la variabilidad climática sobre el rendimiento de los cultivos. Uno de los programas más utilizados actualmente para el análisis de la relación existente entre el rendimiento obtenido y el requerimiento hídrico del cultivo afectado por el cambio climático es AquaCrop (FAO, 2017).

AquaCrop es un programa que fue creado por la FAO para modelar el balance hídrico de los cultivos, así como el rendimiento obtenido en cuanto a la necesidad hídrica presentada durante el ciclo fenológico. Debido a esto, Montenegro y Chaves (2011), realizaron una investigación para identificar la contribución de la producción de caña de azúcar a la adaptación del CC en Costa Rica, mediante una estimación de la fijación de carbono en el área destinada a este cultivo. La información de absorción de CO<sub>2</sub> se obtuvo por medio de la revisión bibliográfica y tratamiento estadístico. Del estudio se puede concluir que el cultivo de caña de azúcar tiene un índice de fijación aproximada de 312 kg de CO<sub>2</sub> en promedio, por hectárea por año, lo que representa una contribución significativa como medida de adaptación.

Otra de las investigaciones realizadas en las provincias de Sindh y Punjab, Pakistán, destaca la modelación por medio del programa AquaCrop para el manejo del recurso hídrico y la planeación de diferentes sistemas productivos de caña de azúcar y trigo. Donde se incorporaron datos climatológicos para el cálculo de la ET<sub>0</sub>, información de los cultivos y fechas de siembra, con el objetivo de calcular el requerimiento hídrico para cada cultivo. Los principales resultados obtenidos indicaron que los rendimientos del trigo serán constantes a lo largo del tiempo, mientras que la caña de azúcar experimentará una disminución considerable en la provincia de Sindh para el año 2080 (Alvar Beltrán et al., 2021).

Fernández (2013), se encargó de realizar una evaluación del riesgo climático en Colombia, a partir del estudio del impacto del CC sobre el rendimiento de la producción de diferentes cultivos a través de modelos agroclimáticos. El objetivo fue identificar el mejor modelo para realizar evaluaciones de este tipo, por ello, se caracterizaron programas como DSSAT que es un modelo predictivo de la dinámica edáfica, comportamiento hídrico y los efectos del CC

según las emisiones GEI. El modelo APSIM que permite evaluar el balance hídrico, composición edáfica y manejo de la plantación, el AquaCrop que se encarga de la simulación de biomasa, rendimiento potencial y requerimientos hídricos del cultivo, a partir de datos climáticos y edáficos, entre otros. Los resultados obtenidos validan la efectividad de todos los modelos estudiados, por lo que, la escogencia de alguno se debe al tipo de estudio que se desea realizar y la accesibilidad a datos meteorológicos.

Arce Romero (2017), realizó una investigación donde estimó el requerimiento hídrico y los rendimientos potenciales para los cultivos de maíz, frijol, trigo y soja, para los años 2050 y 2100, en las principales zonas agrícolas de México, empleando el programa AquaCrop. Para ello, evaluó 30 años de datos climáticos y utilizó los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, para estimar los valores de temperatura máxima y precipitación como parámetros de evaluación. El estudio mostró que la productividad del agua fue menor para todos los cultivos analizados, lo que implica un aumento en los requerimientos hídricos en un tiempo cercano. Además, el estrés hídrico durante el desarrollo fenológico de los cultivos implica la pérdida de biomasa durante las etapas iniciales del crecimiento.

Además, Castillo Iglesias et al. (2020), realizó un estudio del impacto del CC sobre el requerimiento hídrico y el rendimiento del maíz en un suelo compactado de tipo ferralítico rojo en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje en Alquizar, Cuba. Para las proyecciones mensuales a futuro utilizaron el escenario A2, para un periodo evaluado desde el 2019 al 2050, analizando las variaciones en la temperatura y precipitación. Por último, para el cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo se utilizó la metodología propuesta por la FAO a partir de la ecuación Penman-Monteith, a través del programa AquaCrop. Los resultados señalaron que el modelo es una alternativa viable para simular los rendimientos y fenología del cultivo bajo diferentes escenarios de CC.

El estudio ejecutado en el Esquema de Irrigación del Noroeste de Selangor en Malasia, realizado por Houma et al. (2021), plantea una modelación de los requerimientos hídricos incorporando escenarios de cambio climático, para un cultivo de arroz. Dicha modelación fue realizada en el programa computacional AquaCrop a partir de datos climatológicos, edáficos y de riego. Además, se emplearon escenarios de CC para las proyecciones futuras, los cuales fueron el RCP4.5 para bajas emisiones, RCP 6.0 para moderadas emisiones y RCP8.5 relacionado con altas emisiones, para los años 2070 y 2100. Los resultados demuestran una disminución en los volúmenes netos de requerimiento hídrico del 10%, lo que tiene implicaciones en los rendimientos anuales.

Por otro lado, la investigación realizada por Ahmed Elhassan et al. (2022), se basó en la evaluación del impacto del CC y el manejo en general de la producción de sorgo, a partir de una modelación en el software AquaCrop. Realizando proyecciones a futuro para el periodo entre los años del 1985 al 2050 utilizando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, en el norte de Gedaref, Sudán. Los resultados obtenidos demuestran que los rendimientos estimados, la productividad hídrica, la evapotranspiración y el ciclo fenológico presentaron una disminución para el periodo de estudio analizado.

Por último, Saretto et al. (2024) analizó el efecto del CC en la producción de cebada en Almería, España utilizando el modelo AquaCrop para los periodos de 2041 – 2070 y 2071 –

2100 a través de los escenarios de cambio climático SSP1 – 2.6, SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5. En el estudio evaluaron la eficiencia de estrategias de adaptación como riego, acolchado y cambio en las fechas de siembra, los resultados obtenidos indican que el riego aumenta los rendimientos en un 21,1% y los mantillos mejoran el rendimiento en la aplicación de riego en un 6,9%.

#### **2.4.1 Definición del programa AquaCrop**

Un modelo agroclimático es definido como una metodología que permite estimar el impacto que tiene la variabilidad climática sobre un sistema productivo agrícola. Generalmente, toma en cuenta variables ambientales como la precipitación y temperatura, variables agronómicas que abarcan el manejo óptimo del cultivo y variables edáficas referente a la composición del suelo destinado para la siembra (Ordaz et al., 2010). Este tipo de modelos permite estimar los efectos del CC sobre el rendimiento de un sistema productivo en específico, convirtiéndose en una de las herramientas de mayor importancia en temas de mitigación y adaptación del CC para el sector agrícola (Fernández, 2013).

Actualmente, existen múltiples modelos agroclimáticos que son utilizados como herramientas para lograr un manejo eficiente y responsable de los sistemas productivos, a partir de diferentes variables que permitan obtener información sobre la fisiología, conducta y desarrollo del cultivo. Para generar medidas de respuesta ante eventos climáticos adversos, que les permita a los agricultores mantener un rendimiento constante. Dentro de los modelos más utilizados se encuentra el programa AquaCrop, el cual fue creado por la División de Tierras y Aguas de la FAO, que tiene como principal objetivo funcionar como una herramienta para estimar el rendimiento, biomasa y las necesidades hídricas de los cultivos agrícolas (Fernández, 2013).

AquaCrop permite incorporar variables climáticas, edáficas y de riego, para calcular a partir de ellas el requerimiento hídrico, rendimientos, cantidad de biomasa, planificación del riego y esquematizar la provisión de agua para un cultivo en específico. El programa requiere información sobre la evapotranspiración del cultivo, este dato puede ser ingresado en caso de ser conocido. O bien el programa permite ingresar datos de precipitación, humedad, velocidad del viento, temperatura y radiación para que sea calculado automáticamente (Cortés Bello et al., 2013).

La  $ET_0$  es calculada por medio de la metodología propuesta por la FAO en su publicación No. 56 de la Serie de Riego y Drenaje donde utiliza la ecuación de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración del cultivo estudiado (FAO, s.f.). Este programa cuenta con una interfaz amigable con el usuario donde se detallan los datos de entrada que deben ser suministrados para poder realizar la modelación requerida. Los datos de entrada se dividen en cuatro diferentes módulos que corresponden a clima, cultivo, manejo y suelo, en cada uno de estos módulos se ingresan las variables climáticas, agronómicas, de gestión de la producción y edáficas respectivamente (Cortés Bello et al., 2013).

## **2.4.2 Módulo de clima**

El módulo de clima del programa AquaCrop se alimenta de datos meteorológicos a frecuencia diarios, cada 10 días, mensuales y anuales. El modelo permite incluir gran diversidad de datos para cada variable requerida para el proceso de simulación. Los datos obligatorios son referentes a las variables relacionadas a la temperatura del aire, humedad del aire, velocidad del viento, radiación solar y evapotranspiración de referencia (FAO, 2017).

Para cada tipo de dato obligatorio se puede trabajar con diferentes variables, por ejemplo, para los datos de temperatura del aire se puede disponer de series de temperatura máxima, temperatura mínima o temperatura media. Los datos de humedad del aire pueden ser descritos por variables de humedad relativa máxima, mínima, media, temperatura del punto de rocío, presión de vapor real, temperatura de bulbo seco o temperatura de bulbo húmedo. La velocidad del viento solo admite la velocidad medida sobre la superficie del suelo, mientras que los datos de radiación contienen variables de duración real de la insolación diaria, duración relativa de la insolación, radiación solar de onda corta o radiación neta. Por último, los datos de evapotranspiración de referencia del cultivo pueden ser agregados como tal, si se conocen para la serie temporal evaluada, o bien se incorporan los datos de precipitación para que el programa calcule la  $ET_0$  del cultivo durante la modelación (FAO, 2017).

## **2.4.3 Módulo de cultivo**

El módulo de cultivo es uno de los más importantes del programa AquaCrop ya que corresponde a los parámetros utilizados para ajustar la simulación a las condiciones reales observadas en campo. Este módulo se compone de parámetros conservadores los cuales no cambian significativamente en el tiempo por lo que se asumen como constantes y los parámetros no conservadores describen características específicas del cultivo analizado que pueden ser variables en el tiempo. Estos parámetros varían en función de las condiciones del cultivo, tipo de plantación, prácticas de manejo, propiedades del perfil del suelo, condiciones climáticas y ambientales propias de la zona de estudio (FAO, 2022).

Los datos solicitados por el programa requieren la fecha de siembra para especificar el inicio del ciclo fenológico, la cobertura del dosel inicial (CCo) que describe la expansión del dosel alcanzada durante los primeros días después de la siembra. Mientras que la cobertura máxima del dosel (CCx) representa el nivel alcanzado por el cultivo al final del ciclo fenológico en condiciones óptimas de desarrollo, la duración del ciclo, días de duración para cada etapa del ciclo fenológico, índice de cosecha (HI), densidad de siembra, entre otros parámetros (Cortés Bello et al., 2013).

## **2.4.4 Módulo de suelo**

En el módulo de suelo se introducen al programa variables edáficas características de la zona de estudio, específicamente propiedades físicas de cada horizonte del suelo, así como de la capa superficial. Para cada horizonte se establece el espesor, textura del suelo, el punto de marchitez permanente (PWP, por sus siglas en inglés), capacidad de campo (FC, por sus siglas en inglés), saturación (SAT) y conductividad hidráulica (Ks). Para la superficie del suelo se establece el valor del número de curva (CN) y el valor del agua fácilmente

evaporable (REW), estos valores se pueden ajustar en función de la información colocada en el programa inicialmente para cada horizonte del suelo considerado (FAO, 2017).

La capacidad de campo se define como la cantidad máxima de agua que el suelo tiene la capacidad de retener en contra de la gravedad. Esta variable tiene una relación cercana con el punto de marchitez permanente que se define como el contenido de agua mínimo aprovechable por los cultivos antes de entrar en la etapa de marchitamiento definitivo e irreversible por falta de hidratación. Mientras que el valor de saturación representa la cantidad de agua que se requiere para llenar en su totalidad los poros que componen la matriz del suelo. Por último, la conductividad hidráulica o coeficiente de infiltración del suelo se define como la facilidad con que se mueve el agua verticalmente a través de los espacios vacíos que se encuentran en el perfil del suelo (Escobar Rodríguez, 2021, como se citó en Cabrera González, 1999).

Por otro lado, la textura es una característica utilizada para clasificar el suelo en cuanto a su constitución, cantidad y tamaño de las partículas o aglomerados que lo componen. Lo cual permite conocer la capacidad de retención hidráulica, compactación y la conformación física de cada uno de los horizontes que componen el perfil del suelo. El perfil del suelo se considera un segmento tridimensional extraído mediante un corte vertical del suelo utilizado para comprender la composición y las propiedades físicas del suelo (Maldonado Paucar, 2016). Una de las metodologías más utilizadas para determinar la textura del suelo se denomina método de Bouyoucos el cual consiste en la utilización de un hidrómetro para medir la densidad en suspensión y la distribución de las partículas del suelo debido al proceso de asentamiento que ocurre en el tiempo. Lo cual permite determinar la cantidad y el tamaño de las partículas primarias del suelo por medio de un agente dispersante (Maldonado Paucar, 2016).

#### **2.4.5 Módulo de manejo**

En el módulo de manejo se incluye información referente a las condiciones y prácticas agrícolas empleadas por los agricultores para mantener, producir y conservar el campo y el cultivo, se basa en los diferentes procesos biofísicos que describen las características del manejo del cultivo. En este sentido, el programa AquaCrop permite incorporar información sobre los niveles de fertilidad del suelo, control de malezas, prácticas de preparación del suelo que pueden afectar el grado de compactación del suelo y por ende el equilibrio hídrico del suelo (FAO, 2022).

Además, medidas de conservación como la aplicación del mantillo que permite reducir la transpiración del suelo, el almacenamiento de agua mediante diques o prácticas de labranza responsables. Por último, se incorporan niveles de fertilidad de manera general que se clasifican entre niveles no limitantes para el cultivo y niveles pobres que afectan el desarrollo adecuado del cultivo. Este módulo también permite establecer parámetros para la gestión del riego donde se especifica el método de aplicación que incluye riego por aspersión, goteo o gravedad, así como la cantidad de agua aplicada, la fracción de superficie mojada, calidad del agua y establecer un calendario para la aplicación del riego según la necesidad del cultivo (FAO, 2022).



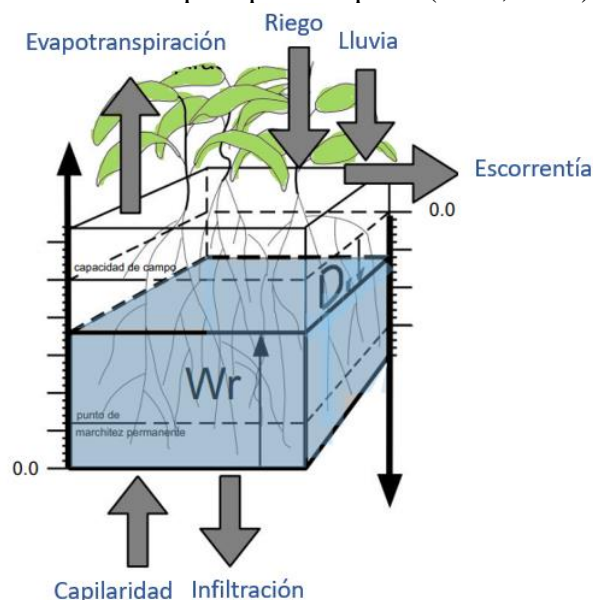
## 2.4.6 Fundamentos teóricos del programa AquaCrop

### 2.4.6.1 Simulación del balance hídrico del suelo

El modelo utiliza los datos de entrada para evaluar los flujos de agua que ocurren a través de la zona radicular del cultivo. En este sentido se estima la cantidad total de agua saliente de la matriz del suelo debido a la escorrentía, percolación y evapotranspiración del cultivo para ser restados a las entradas de agua que ocurren debido a la lluvia, riego o ascenso capilar desde el nivel freático. A partir de estos parámetros se determina la cantidad de agua retenida en la zona radicular ( $W_r$ , por sus siglas en inglés) y el agotamiento hídrico dado en la zona radicular ( $D_r$ , por sus siglas en inglés) para cualquier temporada modelada (FAO, 2022).

AquaCrop realiza esta simulación empleando una división en pequeñas fracciones del perfil del suelo que se encuentra previamente relacionado con el flujo hídrico que ocurre a través de él, en función del tiempo. Lo que permite describir con mayor precisión la infiltración, escorrentía y la retención de humedad, ya que las simulaciones son ejecutadas en intervalos diarios en función del balance hídrico que ocurre en las secciones del perfil del suelo que abarcan la zona radicular (FAO, 2022)

Deficiencias en el balance de agua en la zona radicular tienen un efecto negativo sobre el cultivo, provocando estrés hídrico ( $K_s$ ). Cuando la cantidad de agua en la zona radicular se encuentra en un nivel superior al umbral de agotamiento el estrés hídrico es inexistente lo cual indica que  $K_s$  es igual a 1 y el cultivo no es afectado. Mientras que, cuando la cantidad de agua en la matriz del suelo es inferior al umbral de agotamiento el estrés hídrico que siente el cultivo es máximo lo cual se representa con un  $K_s$  igual a 0 lo cual implica que el ciclo fenológico del cultivo se ve interrumpido por completo (FAO, 2022).



**Figura 1.** Flujo de agua a través de la zona radicular del cultivo representando el umbral de agotamiento ( $D_r$ ) y el agua retenida ( $W_r$ ) simulado por AquaCrop al determinar el balance hídrico del suelo (Modificado de FAO, 2022).

### 2.4.6.2 Simulación del desarrollo del dosel

Para la simulación del desarrollo del dosel AquaCrop utiliza la variable denominada cobertura del dosel para referirse al desarrollo vegetativo de las plantas lo que se relaciona directamente con la fracción de suelo que se encuentra cubierta por el follaje del cultivo. En este punto el programa relaciona la simulación del balance hídrico realizada previamente con el desarrollo vegetativo, calculando el efecto que tiene el estrés hídrico sobre la correcta expansión del dosel (FAO, 2022).

El estrés hídrico ( $K_s$ ) provoca una significativa reducción del desarrollo del dosel, ya que a medida que aumenta el agotamiento hídrico en la zona radicular el coeficiente de expansión del follaje se vuelve menor a 1, lo cual provoca que el crecimiento de la copa se reduzca considerablemente. Mientras que, cuando el agotamiento hídrico es tal que se encuentra por debajo del umbral mínimo alcanzando el punto de marchitez permanente la expansión del dosel es 0 y el proceso de crecimiento y desarrollo del cultivo se detiene por completo (FAO, 2022).

Además, el programa AquaCrop considera el efecto del estrés térmico ( $K_{st}$ ) debido a cambios en la temperatura del aire y estrés por déficit en los nutrientes debido a la poca o nula fertilización durante el manejo del cultivo. El estrés debido a la temperatura del aire es simulado por los grados de crecimiento por día (GDD) estableciendo una temperatura base que es establecida como límite. En caso de que la temperatura del aire sea inferior a la temperatura base el desarrollo del cultivo se ve considerablemente afectado, mientras que si se encuentra por encima de este límite el crecimiento del cultivo se estanca dejando de aumentar (FAO, 2022).

En cuanto al estrés debido al déficit nutricional, el programa permite simular el efecto de la fertilidad del suelo sobre el desarrollo del dosel mediante un conjunto de coeficientes relacionados a la fertilización del suelo calculados por medio de los datos de entrada proporcionados por el usuario (FAO, 2022).

### 2.4.6.3 Simulación de la transpiración del cultivo

El cálculo del coeficiente de transpiración del cultivo ( $Tr$ ) es de suma importancia para simular la respuesta del rendimiento de los cultivos al requerimiento hídrico, su valor es proporcional a la cobertura fraccional del dosel y se determina por medio de la ecuación 1.

$$Tr = K_s * K_{st} (K_c * CC^*) ET_0 \quad (1)$$

Donde  $K_s$  corresponde al coeficiente de estrés hídrico,  $K_{st}$  al coeficiente de estrés térmico,  $K_c$  al coeficiente del cultivo,  $CC^*$  indica la cobertura fraccional del dosel y  $ET_0$  a la evapotranspiración del cultivo calculado por AquaCrop mediante la ecuación de Penman-Monteith. Lo cual permite simular el comportamiento estomático del cultivo debido a las variaciones en la cantidad de agua almacenada en la zona radicular (FAO, 2022).

En este sentido, considera que los diferentes coeficientes de estrés utilizados para calcular la transpiración causan el cierre estomático cuando los niveles de agua alcanzan los puntos críticos. Ya que el estrés hídrico provoca cierre estomático cuando el contenido de agua en el perfil del suelo se acerca al punto de marchitez permanente. Además, cuando la temperatura del aire disminuye provoca un decaimiento en la transpiración del cultivo debido al cierre estomático por bajas temperaturas (FAO, 2022).

#### **2.4.6.4 Simulación de la producción de biomasa**

La estimación de la biomasa producida (B) se basa en la relación existente entre la biomasa producida con el agua consumida por el cultivo, esta relación resulta lineal para una especie bajo condiciones climáticas específicas. La productividad hídrica del cultivo (WP) representa la cantidad de materia seca aérea que es producida por la unidad de superficie de terreno y por unidad de agua transpirada (FAO, 2022). La cantidad de biomasa aérea producida se obtiene por medio de la ecuación 2.

$$B = WP^* * \frac{Tr}{ET_0} \quad (2)$$

AquaCrop utiliza la productividad hídrica normalizada (WP\*) para estimar la biomasa aérea producida durante el ciclo fenológico del cultivo, este valor normalizado se obtiene al considerar la productividad hídrica para una concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico de referencia. Cuando el factor de correlación obtenido al normalizar la productividad hídrica es mayor a 1 y las concentraciones de CO<sub>2</sub> superan el valor de referencia se debe utilizar un factor de corrección para ajustar la simulación a las variables en las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> (FAO, 2022).

#### **2.4.6.5 Simulación del rendimiento del cultivo**

Por último, la simulación del rendimiento del cultivo (Y) se basa en el índice de cosecha (HI), el cual aumenta gradualmente desde el inicio de la floración hasta alcanzar un valor de referencia (HI<sub>0</sub>) en la madurez fisiológica del cultivo (FAO, 2022). Este valor se obtiene a partir de la ecuación 3.

$$Y = fHI * HI_0 * B \quad (3)$$

Donde fHI corresponde a un factor multiplicador que incluye las tensiones que son utilizados para ajustar el índice de cosecha respecto a un valor definido de referencia, este ajuste corresponde a las implicaciones que tiene los déficits de estrés hídrico y térmico sobre el rendimiento. Sin embargo, los efectos del estrés sobre los cultivos pueden ser positivos o negativos dependiendo de las condiciones climáticas y ambientales presentadas en campo, lo cual tiene un efecto directamente proporcional sobre la producción de biomasa y el rendimiento resultante al final de ciclo productivo (FAO, 2022).

## **2.5 Información del sitio de estudio**

La zona de estudio corresponde al lote destinado a la producción de caña de azúcar perteneciente a la Hacienda Juan Viña S.A. Esta empresa se encuentra ubicada en el distrito de Juan Viñas situado en el cantón de Jiménez perteneciente a la provincia de Cartago, Costa Rica. Específicamente se encuentra a 32 km este del centro de Cartago y 10 km oeste del cantón de Turrialba, tiene una extensión territorial de 41,18 km<sup>2</sup>, una altitud de 1.165 m.s.n.m. (Bolaños Esquivel y Quesada Méndez, 2019). Contiene una población aproximada de 7.106 habitantes según la proyección realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) al 30 de junio del año 2019 (Municipalidad de Jiménez, 2023).

Juan Viñas se caracteriza por un uso de suelo dedicado en gran medida a la producción agrícola de café y mayoritariamente de caña de azúcar. Hacia el norte del distrito se encuentran zonas boscosas y pastos para ganadería, además, pertenece a la cuenca hidrográfica Reventazón – Parismina por lo que hacia el sur limita con el río Reventazón. En la zona central de Juan Viñas se presenta un uso de suelo compartido donde se asienta la mayoría de la población en pequeños caseríos que se encuentran rodeados por plantaciones de caña de azúcar principalmente (Zúñiga Mora y Ramírez Granados, 2015). El sistema fluvial de la zona corresponde a la vertiente del Caribe, subvertiente Caribe, el área es drenada por medio del río Reventazón el cual es el más predominante de la zona. El índice de desarrollo social del distrito es de 69,43 y corresponde a la posición 167, el cual fue establecido por medio del Índice de Progreso Social Cantonal que es asignado a través del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (Municipalidad de Jiménez, 2023).

### **2.5.1 Hacienda Juan Viñas**

La Hacienda Juan Viñas fue fundada como ingenio azucarero en el año 1945 con capital 100% costarricense y que actualmente cuenta con alrededor de 4.000 hectáreas dedicadas a la producción agrícola. De las cuales 1.520 hectáreas se dedican a la siembra de caña de azúcar que corresponde al cultivo que la empresa produce mayoritariamente. Sin embargo, en miras de diversificar su producción también cuentan con 480 hectáreas destinadas a la siembra de café, 350 hectáreas son utilizadas para reforestación y las restantes 80 hectáreas son dedicadas para el cultivo de macadamia (Hacienda Juan Viñas, s.f.).

Actualmente la Hacienda Juan Viñas es considerada como uno de los ingenios más grandes del país con una capacidad para moler producto de al menos 1.590 toneladas métricas de caña diarias para la generación de azúcar en crudo y en blanco. En los últimos diez años ha sido una constante que la Hacienda Juan Viñas produzca alrededor del 75% de la del total de caña de azúcar producido en la zona de Juan Viñas y Turrialba lo cual corresponde a 20.000 toneladas de azúcar anualmente aproximadamente (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

### **2.5.2 Condiciones climáticas y ambientales**

Juan Viñas es una zona que se caracteriza por la presencia de variaciones frecuentes y significativas en cortos periodos de los patrones de precipitación y temperaturas, esta variación tiene repercusiones importantes en el manejo agronómico, crecimiento y desarrollo

de los cultivos de la zona. En este sentido La Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar desarrolló una guía técnica del cultivo de caña de azúcar en la región donde se detalla que durante el periodo de 2016-2019 la cantidad de lluvia promedio medida fue de 2.375,6 mm. Este valor fue obtenido de las estaciones meteorológicas ubicadas en la Hacienda Juan Viñas, el CATIE y en Turrialba centro, durante el periodo evaluado se presentó un valor extremo de 2.411,2 mm (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

Los meses donde se registran los puntos más elevados de precipitación son julio, mayo y enero con valores de 318,2 mm, 309,0 mm y 261,0 mm, respectivamente. Mientras que los meses donde se presentan muy pocas lluvias son abril y marzo con 84,5 mm y 98,7 mm, respectivamente representando el periodo más seco del año para esta zona del país. Por otra parte, Juan Viñas es una zona alta que se caracteriza por ser una localidad relativamente fría que presenta temperaturas mínimas promedio entre los 14,7 – 15,5 °C durante los meses de febrero, enero y marzo. Mientras que los meses que registran las temperaturas más altas son mayo, junio y abril con un promedio entre 28,5 – 28,2 °C (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

La topografía de Turrialba y Juan Viñas es principalmente ondulada con pendientes y quebraduras que facilitan el rápido drenaje del suelo. Presenta una combinación de tres tipos de suelo el primero de ellos y el más predominante es el andisol de origen volcánico que se extiende por el 53,7% del territorio, en medida se encuentra el orden inceptisol con un 31,1% del territorio y por último se encuentra el tipo de suelo ultisol con un 15,2% de extensión territorial (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020). Estos órdenes se caracterizan por ser de origen volcánico, horizontes definidos, coloración oscura, condiciones físicas buenas y presenta texturas franco y franco arcillosas (Chaves Solera y Chavarría Soto, 2017).

La geomorfología del cantón de Jiménez se caracteriza por estar formado debido a cuatro diferentes unidades de origen morfológico, dentro de las cuales se encuentra el volcánico, por sedimentación aluvial, técnico por erosión y estructural. Razón por la cual en algunas zonas se presentan laderas con grandes pendientes que rodean pequeños valles profundos, así como suelos ricos en nutrientes debido al origen volcánico y la presencia de diversidad de rocas, pliegues y fallas características del origen estructural (Municipalidad de Jiménez, 2023).

En general, la zona de Juan Viñas reúne una serie de propiedades ambientales que favorecen la producción agrícola, ya que el comportamiento climático condiciona el metabolismo y por ende la fisiología de los cultivos. Lo cual tiene una repercusión importante sobre el rendimiento agroindustrial percibido al final de la temporada de producción. Por esta razón, Juan Viñas es considerado como una de las regiones productoras de caña de azúcar en altura más importantes del país.

### **2.5.3 Cultivo de caña de azúcar**

Debido a que Juan Viñas presenta una mayor altitud al ser comparado con otras zonas productoras de caña de azúcar en el país, las condiciones ambientales y meteorológicas de producción para este cultivo cambian considerablemente. Esto ocasiona que el ciclo vegetativo de la caña de azúcar se vea alterado significativamente producto de alteraciones

en los patrones metabólicos y biológicos que desencadenan en un crecimiento mucho más lento que va de los 12 a 24 meses (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

Las características agronómicas también varían según la variedad del cultivo, en el caso específico de la Hacienda Juan Viñas se trabaja con la variedad H 77-4643 que es de origen hawaiana, presenta tallos gruesos y se desarrolla en un ciclo de 18 – 24 meses. Debido a su altura, presenta volcamientos de los tallos y es susceptible a la roya naranja (*Puccinia kuehnii*) la cual es una enfermedad que afecta principalmente las hojas de la planta Calderón Araya y Chaves Solera, 2020.

También se trabaja con la variedad LAICA 04-250 que es producto de un cruce entre variedades hawaianas y de origen costarricenses, tiene un ciclo óptimo entre los 22 – 24 meses, se desarrolla a una altura entre 900 – 1.550 m.s.n.m. y también es susceptible a la enfermedad conocida como roya naranja (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020). Por otra parte, la cantidad de precipitación óptima para este cultivo es de 1.500 mm anuales, la cuales deben ser equitativamente distribuidas durante los nueve meses que corresponden a la etapa de crecimiento. En cuanto a las características del suelo adecuadas para la producción de caña de azúcar, se considera una textura franca o franco arcillosa, con un pH entre 5,5 – 7,5 para garantizar la adsorción de nutrientes, además se debe asegurar una adecuada profundidad de las raíces y un adecuado drenaje (MAG, s.f.).

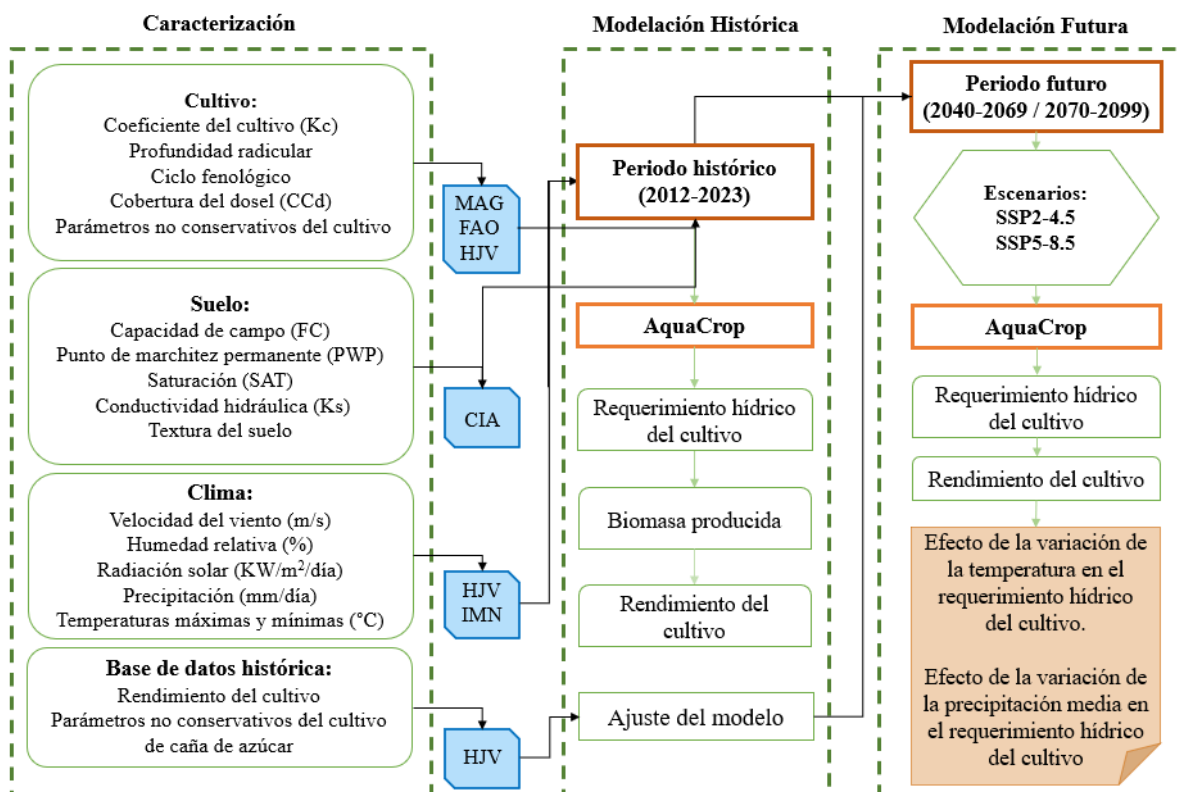
La radiación es un punto importante en el crecimiento de la caña de azúcar, ya que las hojas son capaces de absorber hasta el 70% de la radiación solar (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2015). La profundidad radicular recomendable varía entre 40 – 60 cm, por lo que se recomienda prácticas de laboreo a esta profundidad (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020). El requerimiento hídrico de la caña de azúcar varía entre los 1.600 – 2.500 mm/año, este rango tiene relación con la ubicación geográfica y la cantidad de precipitación anual. Lo cual tiene un efecto en la eficiencia del consumo de agua por parte del cultivo (40% en sistemas sin riego), por lo que es necesario aplicar una mayor cantidad de agua que la recomendada por la literatura (MAG, s.f.).

Por último, la fertilización en caña de azúcar depende de la variedad y del sistema productivo, sin embargo, el manejo mínimo en la fertilización implica una aplicación con altos contenidos de fósforo ( $P_2O_5$ ) durante la siembra, siempre y cuando las condiciones edáficas lo requieran. Además, durante el ahijamiento del cultivo, se debe agregar nitrógeno y potasio, específicamente de 2 a 3 meses después de la etapa de germinación dependiendo del ciclo vegetativo (MAG, s.f.). Específicamente para el cultivo de caña de azúcar, un aumento de 2 °C en la temperatura óptima de desarrollo ocasiona un incremento en la tasa de respiración, disminución fotosintética, reducción en el crecimiento, deficiencias en la acumulación de sacarosa y presencia de marchitez. Además, los cambios en la temperatura del suelo tienen un efecto directo en el desarrollo radicular y por ende en la adecuada absorción de nutrientes por parte de la planta. Estos aspectos llevan a la conclusión de que la caña de azúcar es un cultivo altamente susceptible a los efectos del CC por lo cual se deben tomar medidas de adaptación que permita a los productores del país mantener altos rendimientos (Guerra y Hernández, 2017, como se citó en Subirós, 2000).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción general

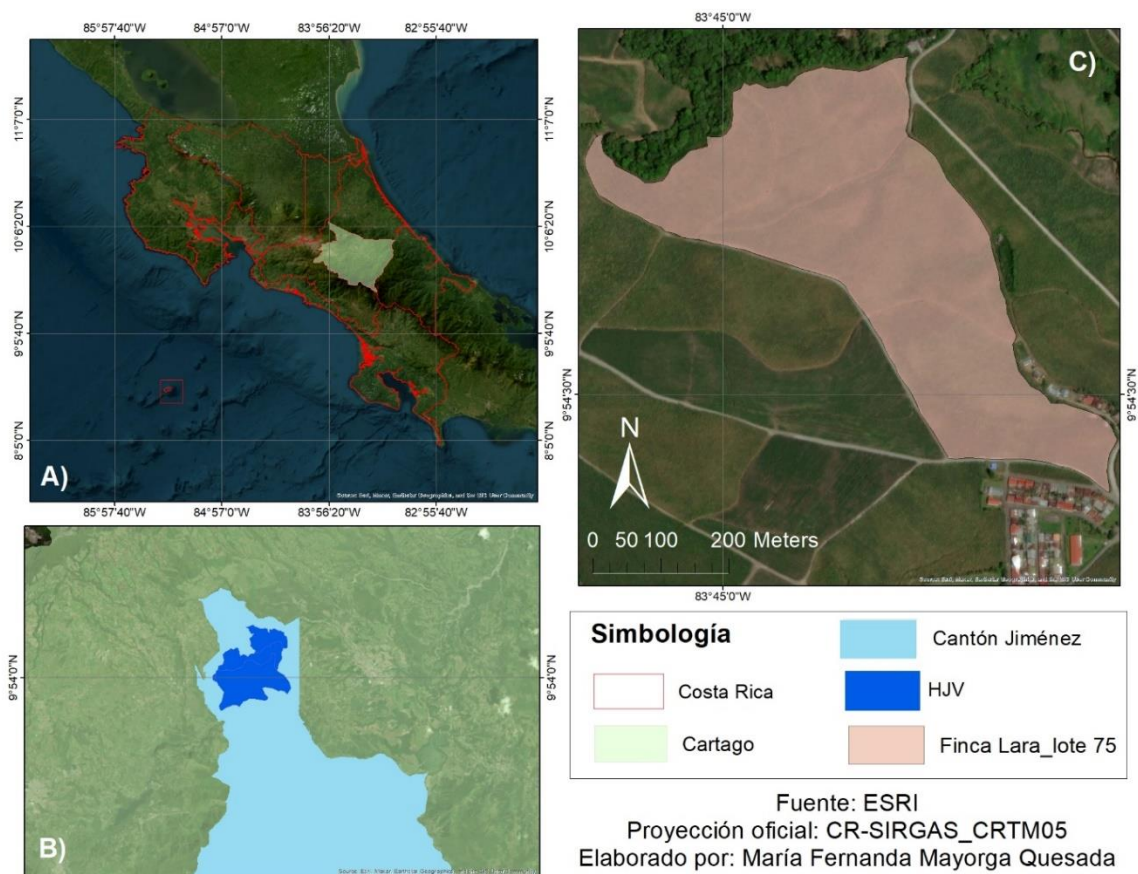
La metodología consiste en el procesamiento de datos meteorológicos, agronómicos y edáficos relacionados al cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas (HJV) para calcular la biomasa y rendimiento del cultivo en función del requerimiento hídrico incorporando escenarios de CC. Se recopilaron antecedentes meteorológicos como precipitación (mm), temperatura (°C), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s). Datos edáficos como textura, tipo de suelo, infiltración, PWP, FC, entre otros, así como información referente al cultivo. El programa AquaCrop fue utilizado para estimar el requerimiento hídrico de la caña de azúcar, así como para simular el impacto del CC sobre el rendimiento y los efectos percibidos por el cultivo al incorporar medidas de adaptación. Durante la simulación se realizó un ajuste del modelo, a partir de la modificación de los parámetros no conservativos de la variedad de caña producida en la HJV. Por último, se utilizaron dos escenarios de CC los cuales corresponden a SSP2-4.5 y SSP5-8.5 que incorporan las trayectorias socioeconómicas compartidas y las de concentración representativas, regionalizados para la zona de Juan Viñas por el CIGEFI. Los cuales fueron empleados para evaluar los efectos de la variación en la precipitación y temperatura sobre la producción de biomasa y el rendimiento a futuro (Figura 2).



**Figura 2.** Diagrama metodológico (MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería, FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas, HJV: Hacienda Juan Viñas, IMN: Instituto Meteorológico Nacional).

### 3.2 Sitio de estudio

El estudio se desarrolló en el Ingenio Hacienda Juan Viñas (HJV), ubicado en el distrito de Juan Viñas, cantón de Jiménez, provincia de Cartago, Costa Rica (Figura 3). La empresa se dedica a la siembra, cosecha y procesamiento de café, macadamia y principalmente caña de azúcar. Las instalaciones cuentan con un área de 1.600 ha destinadas al cultivo de caña de azúcar, en las cuales se producen alrededor de 20.000 toneladas de azúcar anualmente (Hacienda Juan Viñas, s.f.). La modelación se realizó específicamente en la finca Lara, lote 75, el cual se encuentra ubicado a una latitud de  $9^{\circ}54'30''\text{N}$  y una longitud de  $83^{\circ}44'48''\text{O}$  a 1.324 m.s.n.m. y cuentan con un área total de 14,63 ha (Figura 3). En el lote 75 se siembra únicamente la variedad LAICA 04-250, la cual tiene un ciclo fenológico óptimo entre los 18 – 24 meses (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020) (Anexo 2).



**Figura 3.** Ubicación del área de estudio con detalle de A) mapa de Costa Rica identificando la provincia de Cartago, B) cantón de Jiménez ubicando la Hacienda Juan Viñas (HJV) y C) área de estudio Finca Lara lote 75.



### 3.3 Objetivo 1: Caracterización de la zona de estudio

#### 3.3.1 Manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar en la Hacienda Juan Viñas

La información referente al manejo agronómico y rendimientos del cultivo de caña de azúcar en el área de estudio fue proporcionada por el ingeniero encargado de dirigir la producción de caña de azúcar para la empresa Hacienda Juan Viñas S. A. La información proporcionada incluye el registro histórico para el periodo analizado (2012 – 2022) de las enmiendas aplicadas, tipo de enmienda, cantidad suministrada por año (Tabla A2) y el rendimiento obtenido en kilogramos de azúcar por tonelada de caña (Tabla A1).

#### 3.3.2 Condiciones climáticas

El registro de datos climáticos fue proporcionado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). La resolución temporal solicitada fue para el periodo que inicia el 1/1/1997 y finaliza el 31/12/2022 con formato diario. Además, se cuenta con los datos climáticos procedentes de la estación meteorológica propiedad de la empresa Hacienda Juan Viñas S. A para el periodo comprendido entre el 23/5/2012 y el 30/5/2023

##### 3.3.2.1 Estaciones meteorológicas disponibles

Se seleccionaron seis estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, las cuales cuentan con los elementos meteorológicos de precipitación (mm), temperatura máxima y mínima (°C), humedad relativa máxima y mínima (%), radiación solar (KW/m<sup>2</sup>) y velocidad del viento (m/s) (Tabla 1). La selección de las estaciones meteorológicas se realizó considerando la cercanía a la zona de estudio, la altitud a la que se encuentra la estación, así como la cantidad y calidad de los datos disponibles. Se realizó una revisión del catálogo de estaciones propiedad del IMN donde se identificaron aquellas ubicadas en Turrialba, Juan Viñas y alrededores. Descartando aquellas estaciones que se encuentran a una altitud inferior a los 800 m.s.n.m., que cuenten con variables meteorológicas faltantes o bien una cantidad considerable de datos diarios ausentes.

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas seleccionadas.

Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo	
				Inicio	Fin
Sitio Mata, Turrialba	09° 52' 42"	83° 37'33"	900	1/1/1997	30/10/2022
Guayabo, Turrialba	09° 58' 21"	83° 41' 33"	1003	1/2/1997	27/2/2018
Maravilla, Juan Viñas	09° 53' 46"	83° 44' 53"	1181	16/2/2012	31/12/2022
Hacienda Juan Viñas	9°53'46,0"	83°44'53,0"	1181	23/6/2012	30/5/2023
Matas, Turrialba	09° 52' 45,98"	83° 37'33,18"	800	27/9/2013	31/12/2022
Monumento Nacional Guayabo	09° 58' 10,33"	83° 41' 25,54"	1107	7/5/2015	31/12/2022
Turrialba Centro	09° 54' 36,21"	83° 40' 44,43"	630	7/5/2015	31/12/2022

### 3.3.2.2 Caracterización de la información meteorológica disponible

Las series temporales obtenidas de cada estación meteorológica presentan periodos de datos ausentes o elementos meteorológicos inexistentes. Debido a esto no se cuenta con un registro completo para el periodo de estudio establecido inicialmente (1997 – 2022). Por ello, se realizó una caracterización de las series meteorológicas disponibles para determinar cuáles estaciones meteorológicas cuentan con el registro climático más completo. El proceso de caracterización consistió en una evaluación de la cantidad de datos disponibles para cada estación solicitada. Se calculó el número de años existentes, total de datos disponibles y el porcentaje de datos ausentes para cada serie temporal obtenida según la estación meteorológica consultada.

### 3.3.2.3 Estimación de datos ausentes

Según Alvarado Gamboa (2021), el estudio del clima para la determinación del cambio climático a nivel regional requiere de al menos 10 años de datos meteorológicos fiables y completos. Por esta razón, y debido a la cantidad de valores faltantes en las series de datos obtenidos se estableció un periodo de estudio de 10 años, el cual inicia el 23/06/2012 y finaliza el 30/05/2023. Se utilizó la estación ubicada en la Hacienda Juan Viñas como fuente principal de información, ya que cuenta con la serie de datos más completa y cercana a la zona de estudio. Para el periodo seleccionado se realizó un relleno de datos faltantes de las variables de temperatura máxima y mínima, radiación solar y humedad relativa máxima y mínima. Para ello se utilizó el método de regresión lineal (RL), el cual consiste en estimar los datos faltantes por medio de la correlación existente entre las variables dependientes e independientes de un conjunto de valores (Medina Rivera, 2008). La estructura del modelo de RL se basa en la ecuación 4.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i \quad (4)$$

Donde:

- $y_i$  = Variables dependientes.
- $\beta_0$  = Valor que toma  $y_i$  cuando  $x_i$  es igual a cero.
- $\beta_1$  = Representa la pendiente de la recta.
- $x_i$  = Variables independientes.
- $e_i$  = Representación de la perturbación aleatoria o residuo.

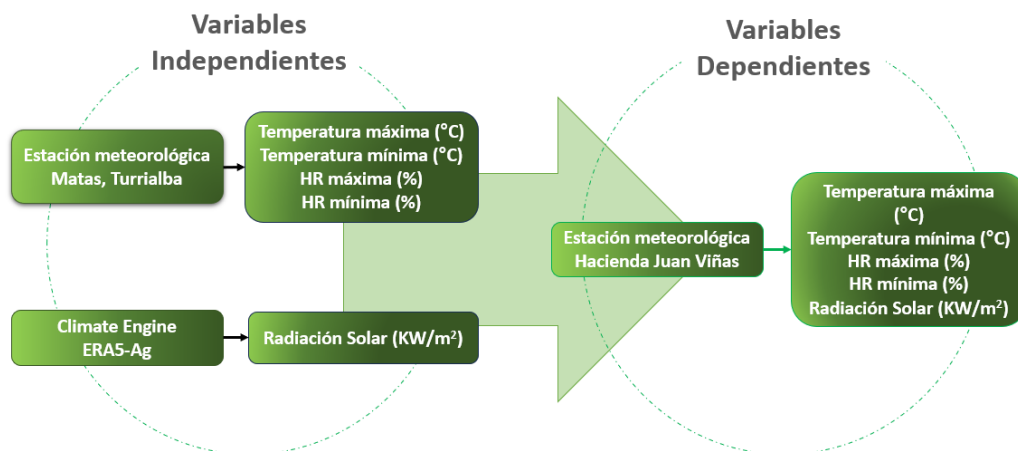
El procedimiento seguido para obtener la ecuación de la recta según la metodología de regresión lineal se realizó por medio del programa Microsoft Excel versión 2306, licencia estudiantil proporcionada por la Universidad de Costa Rica número 10032001E7BDA1EE. Para ello, se definieron las variables dependientes del modelo como la serie de datos climáticos proveniente de la estación meteorológica Hacienda Juan Viñas ubicada a 9°53'46,0"N y 83°44'53,0"O a una altura de 1.181 m.s.n.m. (Figura 4). Por otra parte, las variables independientes fueron seleccionadas de una estación meteorológica cuya serie de datos climáticos contiene registro en las fechas exactas donde se presentaron valores faltantes en la serie definida como variable dependiente. Además, se consideró la cercanía a la zona de estudio, la altitud y la cantidad de elementos meteorológicos disponibles. Por esta razón, se seleccionó la estación denominada Matas en la zona de Turrialba, la cual se ubica a 09°

52' 45,98"N y 83° 37'33,18"O a una altura de 800 m.s.n.m. y cuenta con temperatura máxima y mínima y humedad relativa máxima y mínima (Figura 4).

Para el caso específico de la radiación solar, las series de datos proporcionadas por el IMN no contaban con esta variable climática, por esta razón se utilizó el recurso en línea denominado “*Climate Engine*”. El cual proporciona datos climáticos de origen satelital en colaboración con el Instituto de Investigación del Desierto de la Universidad de Nevada (DRI, por sus siglas en inglés), la Universidad de California, Google, la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), el Sistema Nacional Integrado de Información sobre Sequías (NIDIS, por sus siglas en inglés) y la Oficina de Administración de Tierras de Estados Unidos (Climate Engine, s.f.) (Figura 4).

Se utilizó Climate Engine debido a que cuenta con un amplio catálogo de recursos meteorológicos, permite escoger entre diferentes fuentes, es de acceso gratuito y ampliamente utilizado en estudios sobre teledetección y cambio climático (Vega Araya y Alvarado Barrantes, 2019). Esta herramienta utiliza Google Earth Engine para procesar los datos satelitales permitiendo una visualización, análisis y descarga de las series temporales sin la necesidad de codificar (Climate Engine, s.f.). A partir de esta herramienta, se obtuvo una serie de datos de radiación solar para el periodo de estudio establecido. Se seleccionó el conjunto de datos meteorológicos del recurso ERA5-Ag, debido a que presenta la serie temporal más completa a la menor resolución disponible para Latinoamérica, específicamente con una resolución espacial de 9.600 m (1/10 de grado), (Servicio de Cambio Climático de Copernicus, 2017).

Además, se determinó el porcentaje de variación existente entre los datos tomados de ERA5-Ag y los datos reales procedentes de la estación meteorológica Hacienda Juan Viñas para cada día evaluado dentro del periodo de estudio. Esto permitió establecer la confiabilidad de los datos satelitales ya que el rango de variación obtenido fue de 0,02% como mínimo y 40,58% como máximo. Esta información se utilizó como variable independiente en el modelo de RL para rellenar los valores faltantes en la serie de datos base obtenida de la Hacienda Juan Viñas S. A. (Figura 4).



**Figura 4.** Relación de las series temporales utilizadas para la estimación de datos por medio del método de regresión lineal.

### 3.3.2.4 Determinación del error al estimar datos ausentes

Para determinar la exactitud de la correlación obtenida al aplicar el modelo de regresión lineal a las variables meteorológicas de temperatura máxima y mínima, radiación solar y humedad relativa máxima y mínima se calculó el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ). El error cuadrático medio indica la desviación estándar de la distancia que existe entre los datos correlacionados en la línea de regresión, un buen ajuste se obtiene cuando  $RMSE \approx 0$  y se calcula por medio de la ecuación 5 (Valencia González et al., 2022).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |V_{obs_i} - V_{est_i}|^2}{n}} \quad (5)$$

Donde:

- $V_{obs_i}$  = Dato observado.
- $V_{est_i}$  = Dato estimado.
- $n$  = Número de datos observados o estimaciones.

Por otra parte, se calculó el coeficiente de correlación ( $r^2$ ), el cual indica el porcentaje de variación que existe para el conjunto de variables dependientes. El valor de  $r^2$  se encuentra entre 0 y 1, el mejor ajuste se obtiene cuando  $r^2 \approx 1$  y se calcula por medio de la ecuación 6 (Medina Rivera, 2008).

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (6)$$

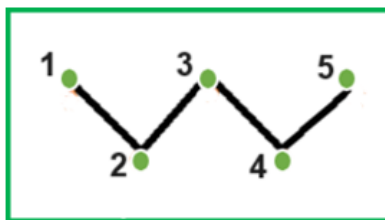
Donde:

- $\hat{Y}_i$  =  $i$  – ésima estimación de  $Y$ .
- $Y_i$  =  $i$  – ésimo valor de  $Y$ .
- $\bar{Y}$  = Medida de  $Y$ .

### 3.3.3 Condiciones edáficas

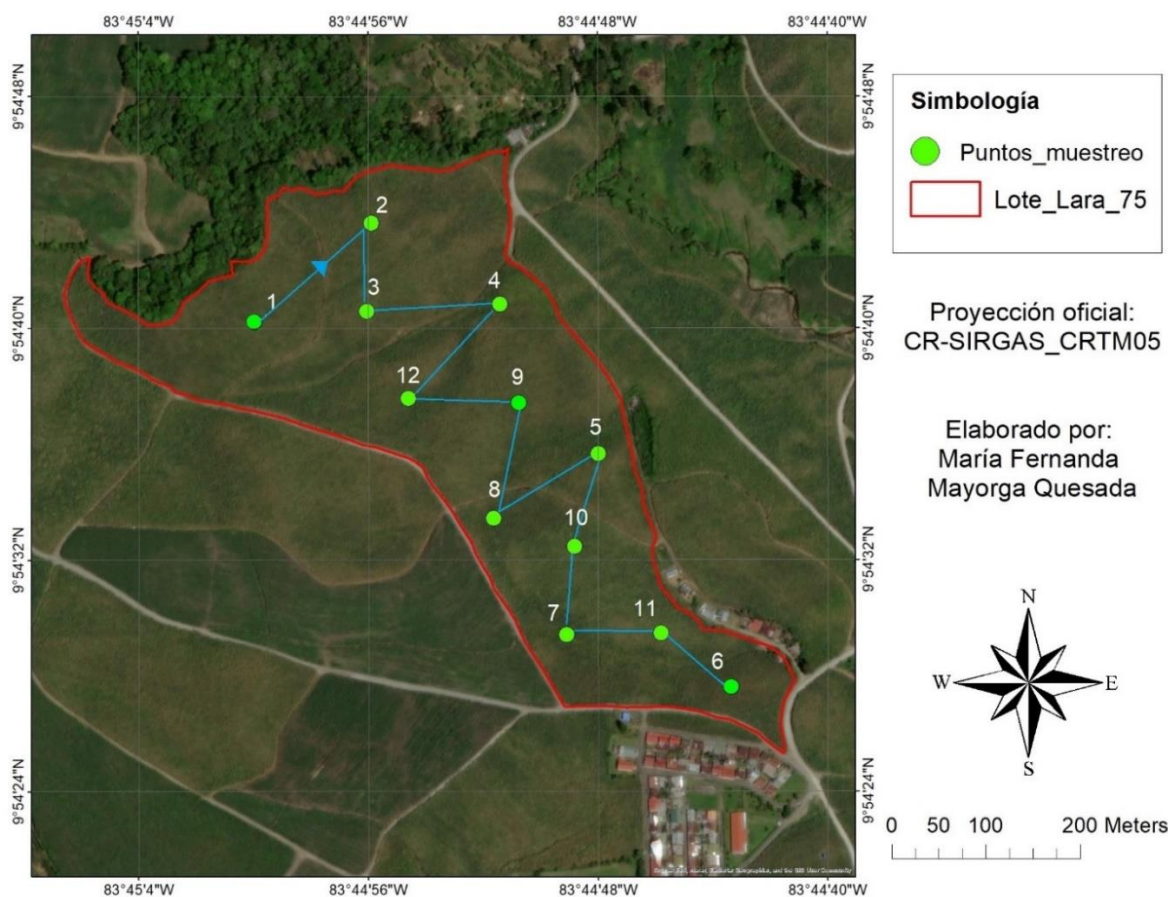
#### 3.3.3.1 Muestreo de homogeneidad en la textura del suelo

Se realizó un muestreo para determinar la homogeneidad en la textura del suelo mediante una prueba visual en el lote de estudio a tres diferentes profundidades. Para ello, se llevó a cabo una extracción del perfil de suelo en diferentes puntos del terreno utilizando un barreno, en total se analizaron 12 puntos de muestreo. Los cuales fueron ubicados siguiendo la metodología propuesta por Mendoza y Espinoza (2017) en la Guía Técnica para Muestreo de Suelos. El método utilizado se denomina muestreo al azar en recorrido zigzag, el cual consiste en realizar un recorrido en líneas cruzadas en zigzag, con un distanciamiento entre los puntos de muestreo de aproximadamente 25 a 30 pasos, lo que corresponde a 25 o 30 m como medida estándar (Mendoza y Espinoza, 2017) (Figura 5).



**Figura 5.** Muestreo al azar en recorrido zigzag (modificado de Mendoza y Espinoza, 2017).

Esta metodología se utiliza específicamente para realizar análisis en las propiedades químicas del suelo. Sin embargo, como el objetivo de la prueba es determinar la homogeneidad preliminar en la textura del suelo, se aplicó variando el distanciamiento entre los puntos de muestreo. Esto debido a que los cambios en las propiedades físicas del suelo, así como en la textura se presentan a un mayor distanciamiento, por esta razón la separación entre muestras aplicada durante la prueba de homogeneidad en campo fue de 100 m (Figura 6).



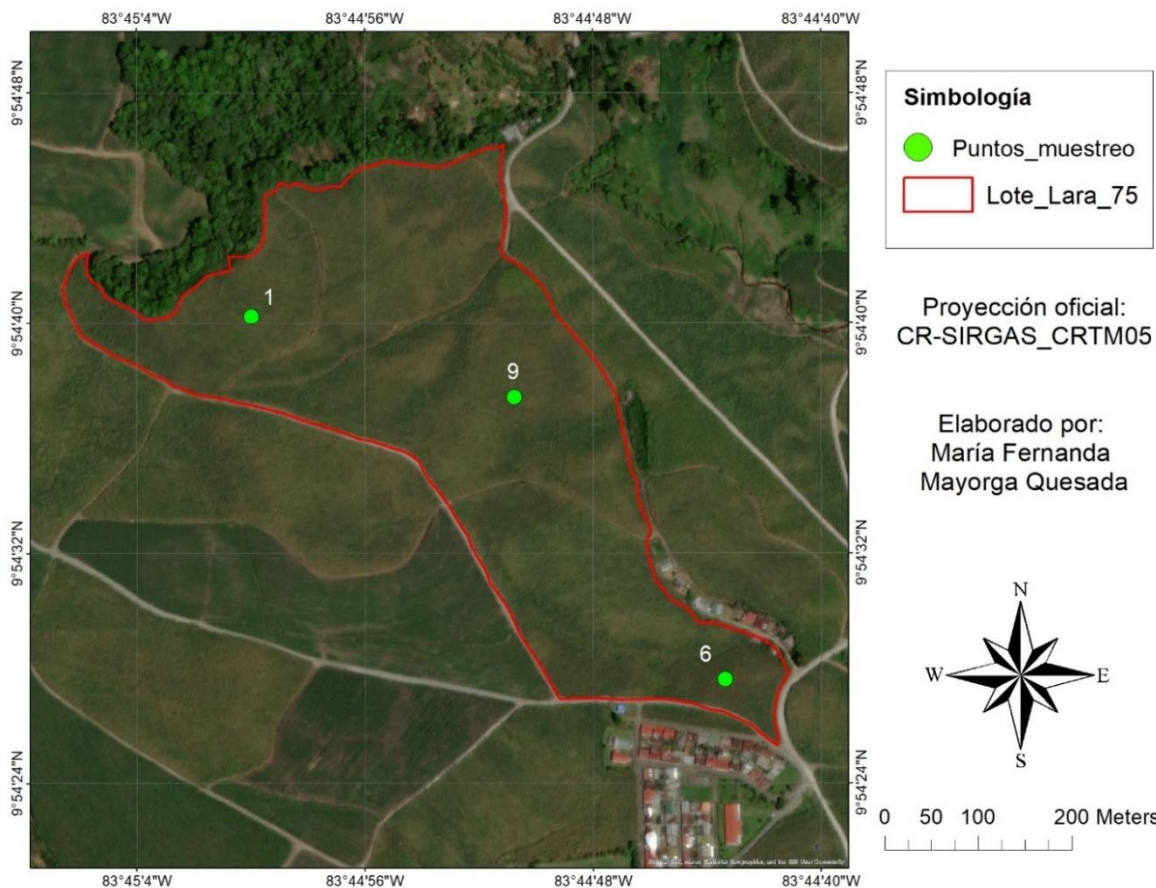
**Figura 6.** Ubicación de los puntos de muestreo al realizar la prueba de homogeneidad en la textura del suelo.

En cada punto de muestreo se extrajo un perfil de suelo donde se analizaron tres diferentes profundidades a 20 cm, 40 cm y 60 cm. En la Figura 6 se puede observar el recorrido seguido durante la recolección de las muestras, los puntos se identificaron con la ubicación geográfica

dentro del lote de estudio y se enumeraron posteriormente, por esta razón la numeración no es secuencial al recorrido seguido en campo. Dicho análisis se realizó de forma visual observando el color del suelo y manual sintiendo las propiedades físicas y texturales del mismo (Ciancaglini, 2016). Los resultados obtenidos del análisis de homogeneidad preliminar en la textura del suelo fueron utilizados para establecer la cantidad de muestras requeridas para la prueba de textura en el laboratorio y la prueba de infiltración realizada en campo. Esta metodología fue adaptada a las condiciones ambientales, geográficas y edáficas del lote de estudio a partir del manual para muestreo de suelo y ensayos en campo desarrollado por el Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Santos et al., 2012).

### 3.3.3.2 Textura del suelo

Para determinar la textura del suelo se seleccionaron tres puntos representativos a lo largo del lote de estudio de las doce muestras de suelo extraídas durante la prueba de homogeneidad (Figura 6). Posteriormente, las muestras recolectadas se llevaron al laboratorio de aguas, suelos y ambientes de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, para determinar la textura del suelo aplicando la metodología de Bouyoucos (Figura 7).



**Figura 7.** Ubicación de los puntos de muestreo seleccionados para la prueba de Bouyoucos.

Esta prueba relaciona la tasa de sedimentación del suelo con el tamaño de partículas, donde la velocidad de sedimentación aumenta conforme el diámetro de las partículas es mayor (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA, por sus siglas en inglés], 2014).

Las muestras se identificaron utilizando el punto seleccionado en el lote de estudio y la profundidad a la cual se extrajo la muestra de suelo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Identificación de las muestras analizadas para la prueba de Bouyoucos.

Muestra	Localización		Profundidad (cm)
	Latitud Norte	Longitud Oeste	
JV-P1 (0-20)	9°54'37"	83°44'51"	20
JV-P1 (20-40)	9°54'37"	83°44'51"	40
JV-P1 (40-60)	9°54'37"	83°44'51"	60
JV-P6 (0-20)	9°54'27"	83°44'43"	20
JV-P6 (20-40)	9°54'27"	83°44'43"	40
JV-P6 (40-60)	9°54'27"	83°44'43"	60
JV-P9 (0-20)	9°54'37"	83°44'50"	20
JV-P9 (20-40)	9°54'37"	83°44'50"	40
JV-P9 (40-60)	9°54'37"	83°44'50"	60

La metodología empleada consistió en agregar 40 g de suelo seco y tamizarlo (tamiz de 2 mm) a una disolución de hexametáfosfato de sodio (50 g/L) diluida a 1 L. Posteriormente se dispersaron los agregados del suelo por medio de agitación hasta separar completamente las partículas y se dejó reposar la mezcla por 24 horas (Figura 8) (Andrades et al., 2015). Seguidamente, se colocó la muestra en una probeta de 1 L, se agregó agua hasta la línea de lectura y se introdujo el hidrómetro con escala Bouyoucos. Las lecturas se tomaron a los 40 segundos y a las 2 horas después de iniciada la medición. Además, se tomó medida de la temperatura de la mezcla para cada lectura del hidrómetro (Figura 8). Este procedimiento se aplicó para cada punto de muestreo seleccionado (1, 6 y 9) y para cada profundidad analizada (20 cm, 40 cm y 60 cm) aplicando tres repeticiones en cada caso. Además, se utilizó información bibliográfica de la base de datos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA) y la información suministrada por la empresa para validar los resultados de las pruebas realizadas (Villaseñor Ortiz, 2016) (Anexo 1).



**Figura 8.** Procedimiento seguido en el laboratorio al realizar la prueba de Bouyoucos.

Una vez que se obtuvieron los resultados de la prueba de Bouyoucos se calcularon los porcentajes de arena (>0,05 mm), limo (0,002 a 0,05 mm) y arcilla (<0,002 mm) utilizando las siguientes ecuaciones:

- Contenido de limo + arcilla, en % (Villaseñor Ortiz, 2016):

$$\begin{aligned}
 & (\text{limo} + \text{arcilla})\% \\
 & = \frac{[La_{40s} - ((20 - ta_{40s})x0,35)] - [Lb_{40s} - ((20 - tb_{40s})x0,35)]}{mx(1 - 0,01xM.O)} x100
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Donde:

- $La_{40s}$  = lectura en  $g L^{-1}$  de muestra a los 40 s.
- $Lb_{40s}$  = lectura en  $g L^{-1}$  de blanco a los 40 s.
- $ta_{40s}$  = temperatura en  $^{\circ}C$  de muestra a los 40 s.
- $tb_{40s}$  = temperatura en  $^{\circ}C$  de blanco a los 40 s.
- $M.O$  = masa en g de muestra original.
- $m$  = masa en g de muestra.

- Contenido de arcilla, en % (Villaseñor Ortiz, 2016):

$$(\text{arcilla})\% = \frac{[La_{2h} - ((20 - ta_{2h})x0,35)] - [Lb_{2h} - ((20 - tb_{2h})x0,35)]}{mx(1 - 0,01xM.O)} x100
 \tag{8}$$

Donde:

- $La_{2h}$  = lectura en  $g L^{-1}$  de muestra a las 2 h.
- $Lb_{2h}$  = lectura en  $g L^{-1}$  de blanco a las 2 h.
- $ta_{2h}$  = temperatura en  $^{\circ}C$  de muestra a las 2 h.
- $tb_{2h}$  = temperatura en  $^{\circ}C$  de blanco a las 2 h.
- $M.O$  = masa en g de muestra original.
- $m$  = masa en g de muestra.

- Contenido de limo, en % (Villaseñor Ortiz, 2016):

$$(\text{limo})\% = (\text{limo} + \text{arcilla}) - (\text{arcilla})
 \tag{9}$$

Donde:

- $(\text{limo} + \text{arcilla})$  = porcentaje de limo y arcilla calculado.
- $(\text{arcilla})$  = porcentaje de arcilla calculado

- Contenido de arena, en % (Villaseñor Ortiz, 2016):

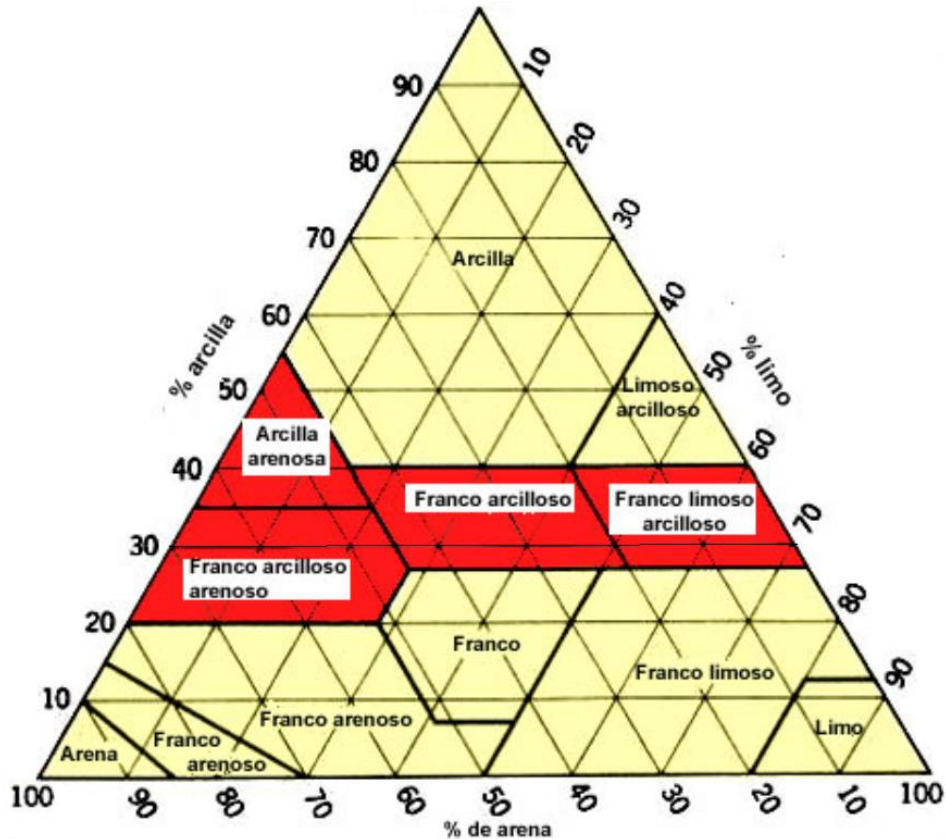
$$(\text{arena})\% = 100 - (\text{limo} + \text{arcilla})
 \tag{10}$$

Donde:

- $(\text{limo} + \text{arcilla})$  = porcentaje de limo y arcilla calculado.



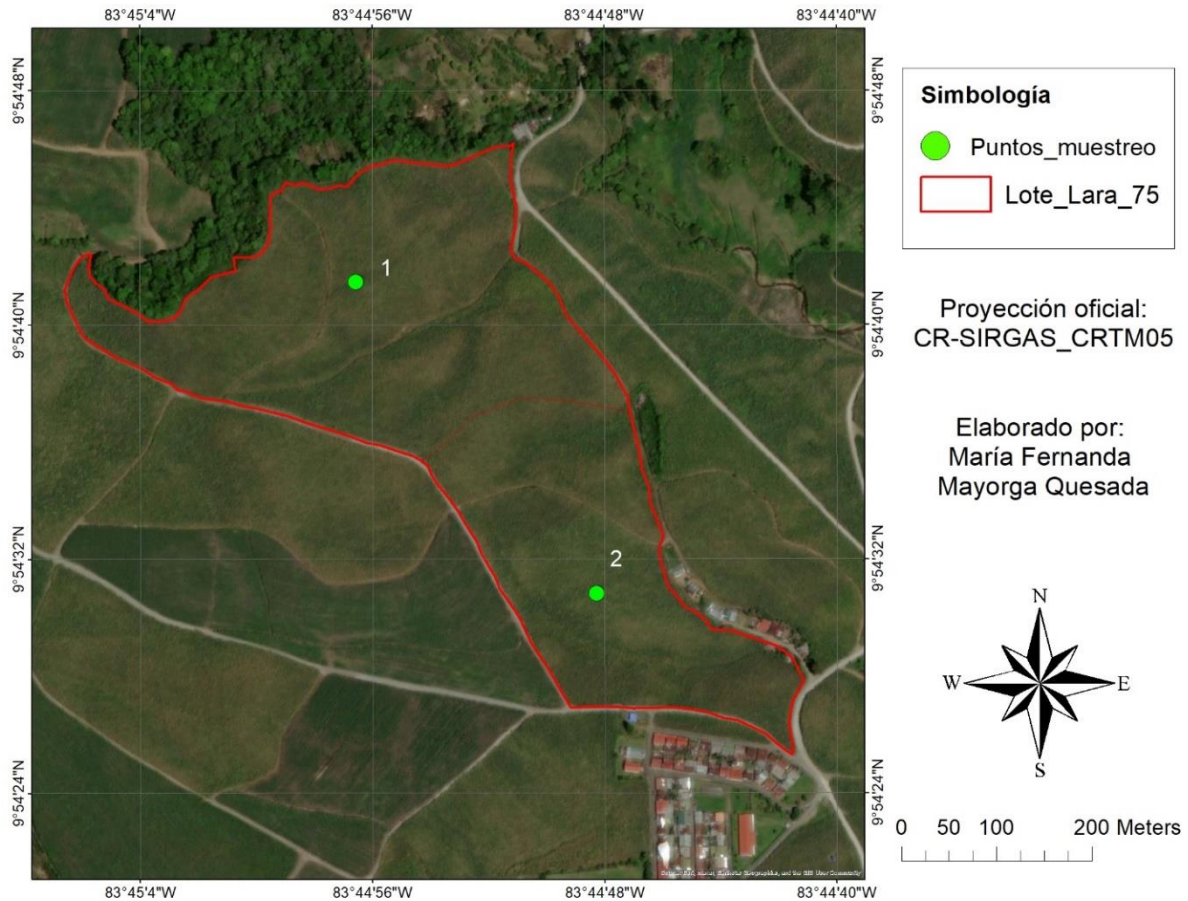
Por último, se determinó la textura del suelo a partir de los porcentajes calculados por medio del triángulo textural (Figura 9). El procedimiento seguido inició ubicando el porcentaje de arena en la base del triángulo, posteriormente se siguió la línea trazada inclinadamente hasta encontrar el porcentaje de arcilla que coincide y luego se continuó con la línea horizontal hasta determinar el porcentaje de limo correspondiente. Por último, se ubica el punto donde las líneas se intersecan, lo cual indica la textura del suelo de la muestra analizada.



**Figura 9.** Triángulo textural de acuerdo con el USDA (FAO, s.f.).

### 3.3.3.3 Tasa de infiltración

Para determinar el coeficiente de infiltración del suelo se seleccionaron dos puntos representativos de la zona alta y baja del lote de estudio. Esto con el objetivo de realizar la prueba de infiltración utilizando un infiltrómetro de doble anillo el cual fue facilitado por la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica (Figura 10). La metodología seguida para realizar la prueba en campo se basó en la norma ASTM D3385-03 donde se describe el procedimiento necesario para realizar la medición de la tasa de infiltración del suelo (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales [ASTM, por sus siglas en inglés], 2003).



**Figura 10.** Ubicación de los puntos de muestreo seleccionados para la prueba de infiltración.

La prueba realizada consistió en introducir los cilindros abiertos de forma concéntrica en el punto de muestreo seleccionado, aproximadamente a 10 cm de profundidad, por medio de la cruz metálica y asegurándose que los anillos tengan la misma profundidad en todo su perímetro. Posteriormente, se llenaron los anillos de agua iniciando con el anillo exterior hasta una altura de 10 cm, seguidamente incorporó agua al anillo interior. Tomando en cuenta que a la hora de introducir el agua se debe asegurar de no perturbar el suelo por lo que se colocó un plástico en la superficie, el cual se retira una vez alcanzada la altura de agua equivalente a 10 cm (Figura 11) (Macías et al., 2018).

El nivel de agua se mantuvo igual para ambos anillos durante la prueba, esto con el objetivo de evitar el flujo cruzado entre ambos, considerando que la altura de la lámina de agua no puede ser menor a 5 cm. Por esta razón, cada vez que la lámina de agua disminuye a un valor cercano al límite permisible se agregó agua nuevamente hasta alcanzar los 10 cm de altura. Una vez iniciada la prueba se tomó lectura de la tasa de infiltración del suelo hasta alcanzar una lectura constante (ASTM, 2003) (Anexo 4).



**Figura 11.** Instalación del infiltómetro de doble anillo en campo.

Inicialmente se tomó lectura del nivel del agua en intervalos de 1 min hasta registrar al menos 5 lecturas consecutivas con un nivel de agua constante. Posteriormente, se aumentó el intervalo de tiempo para tomar lectura del nivel del agua a cada 5 min, una vez que se registraron al menos 4 lecturas con un nivel constante se asumió que se alcanzó una tasa de infiltración constante (ASTM, 2003). Posteriormente, se aplicó la metodología desarrollada por Kostiakov en el año 1932 que permite calcular la infiltración acumulada por medio de la lámina de agua que se infiltra a través de la ecuación 11 (Forsythe, 1985).

$$D = K * t^m \quad (11)$$

Donde:

- $D =$  infiltración acumulada (mm).
- $t =$  tiempo (min).
- $K =$  Lámina que se infiltra constante a saturación (mm).
- $m =$  Constante  $0 > m < 1$ .

Es importante definir que la constante K se relaciona con la estabilidad en la estructura del suelo, por lo que se considera que para suelos con textura arenosa o franco arenosa los valores varían entre 10 a 30 mm, mientras que para texturas más estables los valores son mucho menores aproximados a 0,6 mm (Ecuación 9). Además, para determinar la conductividad hidráulica saturada del suelo o coeficiente de infiltración ( $K_s$ ) se debe despejar el logaritmo de la lámina que se infiltra de manera constante a saturación utilizando la ecuación 12 (Génova et al., 2016).

$$\text{Log}(K) = \frac{\text{Log}(D)}{n} - m \frac{\text{Log}(t)}{n} \quad (12)$$

Donde:

- $D =$  infiltración acumulada (mm).
- $t =$  tiempo (min).
- $K =$  Lámina que se infiltra constante a saturación (mm).
- $m =$  Constante  $0 > m < 1$ .
- $n =$  cantidad de lecturas realizadas durante la prueba.

Por otro lado, la constante m representa la estabilidad de la estructura del suelo con respecto al agua y se determina por medio de la ecuación 13 (Génova et al., 2017).

$$m = \frac{\frac{\sum(\text{Log}(t) * \text{Log}(D))}{n} - \frac{\sum \text{Log}(t)}{n} * \frac{\sum \text{Log}(D)}{n}}{\frac{\sum(\text{Log}(t))^2}{n} - \left(\frac{\sum \text{Log}(t)}{n}\right)^2} \quad (13)$$

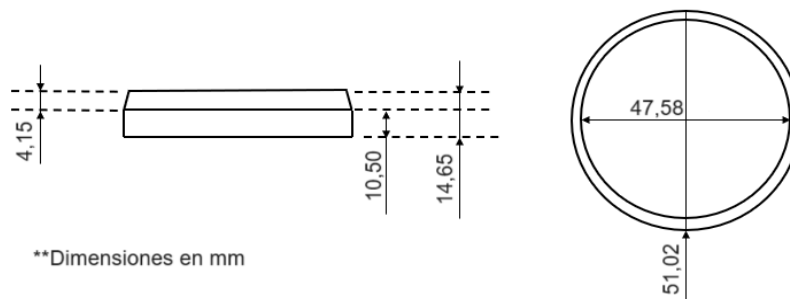
Donde:

- $D =$  infiltración acumulada (mm).
- $t =$  tiempo (min).
- $K =$  Lámina que se infiltra constante a saturación (mm).
- $m =$  Constante  $0 > m < 1$ .
- $n =$  cantidad de lecturas realizadas durante la prueba.

Por último, la conductividad hidráulica del suelo para cada horizonte evaluado a las profundidades de 20, 40 y 60 cm, se calculó por medio del modelo denominado Soil Water Characteristics. El cual funciona como una calculadora que utiliza funciones de pedotransferencia para determinar constantes hídricas a través de la textura del suelo. Posteriormente, se utilizaron los resultados de la tasa de infiltración, la prueba de retención de humedad y la textura del suelo para evaluar el resultado calculado de conductividad hidráulica al ser comparado con los valores medidos en campo del resto de variables asociadas a las fórmulas de pedotransferencia (Alonso et al., 2017).

### 3.3.3.4 Retención de humedad

Los valores referentes a la capacidad de campo y al punto de marchitez permanente se determinaron a partir de la prueba de retención de humedad, la cual fue realizada por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Las muestras se recolectaron por medio de un muestreador tipo anillo, el cual fue elaborado en el Taller de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas (Anexo 3). Las dimensiones son estándar establecidas por el CIA, con una altura de 1,46 cm, diámetro interno de 4,76 cm, diámetro externo de 5,10 cm, un espesor de la pared igual a 4 mm y el material utilizado fue policloruro de vinilo (PVC) para alta presión (Figura 12).



**Figura 12.** Dimensiones en milímetros del muestreador tipo anillo (modificado de CIA, 2021).

A la hora de recolectar las muestras en campo se hicieron dos calicatas de 1 m de profundidad ubicadas a 10 m de distancia de los puntos seleccionados para la prueba de infiltración (Figura 10). Se recolectaron dos muestras por profundidad evaluada (20 cm, 40 cm y 60 cm)

ya que el CIA solicita hacer el análisis de laboratorio con dos repeticiones. Las muestras se documentaron según su ubicación en zona alta y zona baja especificando la profundidad de la muestra y el lote evaluado (Figura 13). Posteriormente las muestras fueron enviadas al CIA por medio de la empresa Hacienda Juan Viñas S. A. para su análisis (CIA, 2021) (Tabla A3). Los resultados obtenidos de las dos repeticiones se promedian para obtener un solo valor por cada horizonte para se incorporados al modelo AquaCrop en el módulo de suelo.



**Figura 13.** Recolección, empaquetado y documentación de las muestras para la prueba de retención de humedad.

### 3.4 Objetivo 2: Determinación del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar

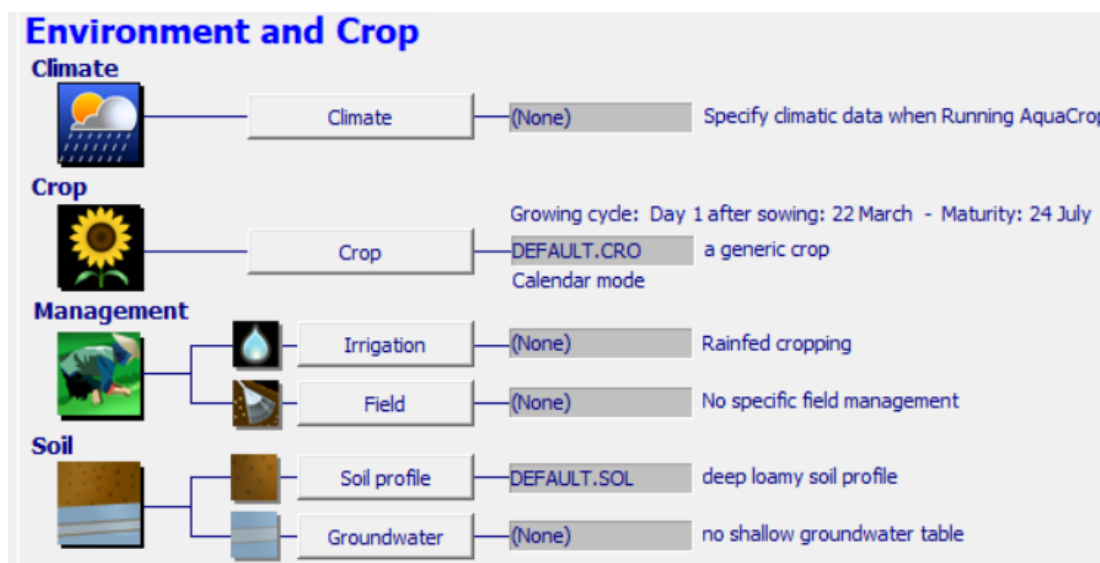
#### 3.4.1 Programa AquaCrop

La información referente al funcionamiento del modelo AquaCrop versión 6.1 – 2018 utilizado para la determinación del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar en la Hacienda Juan Viñas, fue obtenida del manual elaborado por la FAO para el programa AquaCrop. En el cual, se especifica el modelo de productividad del agua para cultivos específicos definidos por la FAO. Lo que permite establecer el procedimiento óptimo para simular la respuesta del rendimiento al agua indicando los principales componentes del suelo, planta y clima necesarios para la realización de la simulación correspondiente (FAO, 2022).

Además, la información fue complementada con el estudio elaborado por Cortés Bello et al., (2013) en colaboración con la FAO y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, el cual fue desarrollado en el Valle del Cauca. Esta investigación utilizó el modelo AquaCrop para estimar los rendimientos del cultivo de caña de azúcar, además, se consideraron los posibles efectos de la variabilidad climática al incorporar escenarios de CC. La información recopilada incluye la especificación de los datos de entrada y salida, descripción de los módulos de información e interpretación de resultados. Además, incluye los procesos de adaptación y ajuste del modelo, análisis de sensibilidad y la incorporación de escenarios de cambio climático.

### 3.4.2 Datos de entrada para el programa AquaCrop

El modelo AquaCrop se divide en cuatro módulos de información los cuales son: clima, cultivo, prácticas de manejo y suelo. Cada uno de estos módulos se componen de diferentes parámetros que conforman los datos de entrada del modelo. La interfaz muestra una sección inicial denominada medio ambiente y cultivo, donde se observa un bloque de clima necesario para especificar la información climática, al igual que ocurre en el caso del módulo de cultivo. En cuanto al bloque de prácticas de manejo se divide en irrigación y campo, mientras que el módulo de suelo se divide en perfil del suelo y agua subterránea (Figura 14).



**Figura 14.** Interfaz principal del modelo AquaCrop.

Los datos de entrada describen las condiciones específicas del cultivo a modelar para sus diferentes etapas de desarrollo. Por esta razón, el modelo requiere de series meteorológicas, datos del cultivo referentes al proceso de desarrollo, información de las características del suelo enfocada a la composición hidrofísica de los horizontes y en el balance de agua y sales. Por último, datos de las prácticas de manejo y rendimientos, estos parámetros constituyen la información base necesaria para realizar las simulaciones requeridas para determinar la respuesta al rendimiento del cultivo en función de la disponibilidad del recurso hídrico (Steduto et al., 2012).

AquaCrop se compone principalmente de tres tipos de variables diferentes, en primer lugar, se encuentran las variables de estado que son aquellas que el programa calcula por defecto basado en los datos de entrada que se proporcionan y son específicas para el cultivo simulado. Seguidamente se establecen las variables externas que son aquellas proporcionadas por el usuario producto de la caracterización o mediciones en campo utilizadas para definir el contexto del cultivo. Por último, se encuentran los parámetros no conservativos que describen las condiciones ambientales de la variedad del cultivo simulado presentadas específicamente en la zona de estudio, un ejemplo común es la fenología y el tipo de suelo (Cortés Bello et al., 2013).

### 3.4.2.1 Módulo de clima

Los datos de entrada requeridos para completar el módulo de clima del modelo AquaCrop son: precipitación (mm/día), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día), velocidad del viento (m/s) y presión de vapor real (kPa). Todas las variables, a excepción de la presión de vapor real, fueron obtenidas durante la etapa de caracterización de la zona de estudio. Por medio del registro climático proporcionado por la empresa Hacienda Juan Viñas S.A. y el IMN para el periodo de estudio establecido (23/06/2012 - 30/05/2023). La variable de presión de vapor real se calculó implementado la metodología establecida en los estudios de la FAO en riego y drenaje No. 56, a partir de la guía para la determinación de los requerimientos de agua y evapotranspiración de los cultivos (Allen et al., 2006). En primera instancia se determinó la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima registrada con la ecuación 14.

$$e^{\circ}(T_{\min}) = 0,6108 * \exp \left[ \frac{17,27 * T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right] \quad (14)$$

Donde:

- $e^{\circ}(T_{\min})$  = Presión de saturación a la temperatura mínima (kPa).
- $T_{\min}$  = Temperatura mínima (°C).

Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente para obtener la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima que se registró durante el mismo día evaluado en el caso de la temperatura mínima. Para ello se utilizó la ecuación 15.

$$e^{\circ}(T_{\max}) = 0,6108 * \exp \left[ \frac{17,27 * T_{\max}}{T_{\max} + 237,3} \right] \quad (15)$$

Donde:

- $e^{\circ}(T_{\max})$  = Presión de saturación a la temperatura máxima (kPa).
- $T_{\max}$  = Temperatura máxima (°C).

Por último, la presión de vapor real se obtiene a partir de la humedad relativa máxima y mínima, por medio de la ecuación 16.

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} + e^{\circ}(T_{\max}) \frac{HR_{\min}}{100}}{2} \quad (16)$$

Donde:

- $e_a$  = Presión de vapor real (kPa).
- $e^{\circ}(T_{\min})$  = Presión de saturación a la temperatura mínima (kPa).
- $e^{\circ}(T_{\max})$  = Presión de saturación a la temperatura máxima (kPa).
- $HR_{\max}$  = Humedad relativa máxima (%).
- $HR_{\min}$  = Humedad relativa mínima (%).

Para completar el módulo de clima en el programa AquaCrop seleccionó la opción de “Climate, Create Climate File”, posteriormente marcó la casilla de “Import Climatic Data,

Import/Create” y se seleccionó el archivo con la información climática correspondiente. Este archivo se elaboró en formato de texto (.txt) y se creó con anticipación estableciendo las columnas de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y presión de vapor. El documento solo contiene números, evitando colocar filas con texto con los encabezados y títulos de cada columna. Seguidamente, se seleccionó la ventana de “Time range” donde se indica el rango de tiempo establecido en el archivo de clima seleccionado y el tipo de datos. En este caso, se utilizaron datos diarios, iniciando el 23 de junio del 2012 y finalizando el 30 de mayo del 2023, con un total de 3.994 días analizados. Posteriormente, se continúa con la ventana de “Climatic Parameters” donde se especifica el parámetro climático para cada columna agregada en el archivo de clima con las unidades correspondientes.

El programa cuenta con valores límites para cada parámetro climático que se pueden modificar en caso de ser necesario en la opción de “Update Data Range”. En la ventana de “ET<sub>0</sub>” se especificó la altitud y la latitud de la estación meteorológica de donde se obtuvieron los datos climáticos. Posteriormente, se continuó con la ventana de “Import Climatic Data” donde se verificó que toda la información seleccionada se guardara adecuadamente, se nombró el archivo de clima para AquaCrop y por último se eligió la opción de “Create Climate File”.

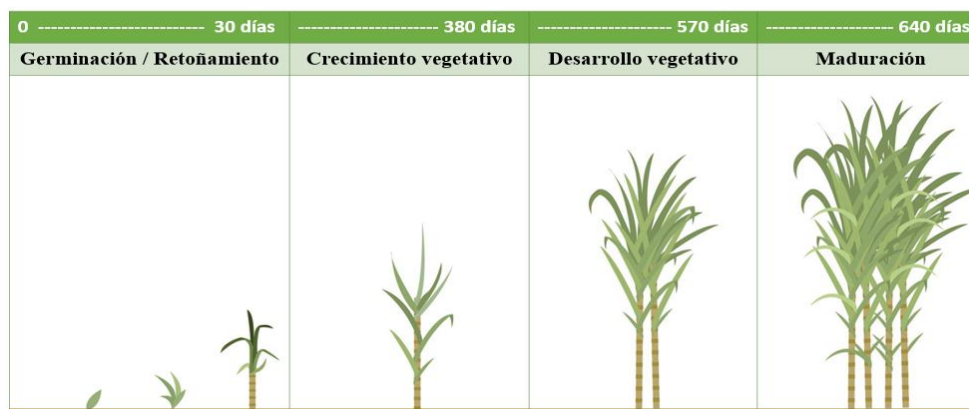
### **3.4.2.2 Módulo de cultivo**

El módulo de cultivo requiere información específica de la variedad a modelar, referente al desarrollo del dosel, ET<sub>0</sub>, requerimiento hídrico, temperatura óptima de crecimiento y fertilidad del suelo. En este caso se ajustó el modelo para el cultivo de caña de azúcar variedad LAICA 04-250 modificando solamente parámetros no conservativos referentes a la fenología, cobertura del dosel, densidad de plantas, prácticas de manejo, entre otras. La fenología para esta variedad se determinó mediante revisión bibliográfica y consultas al ingeniero encargado del cultivo de caña de azúcar en la empresa. La variedad LAICA 04-250 tiene la particularidad de que su ciclo fenológico tiene una duración de dos años, con una etapa inicial de germinación y crecimiento vegetativo considerablemente lentas en comparación con variedades comunes de caña de azúcar.

Esta particularidad limita la utilización del modelo para simular ciclos consecutivos, por esta razón se realizan simulaciones individuales para cada ciclo con una duración entre los 640 y 730 días. Debido a que la HVJ renueva la cosecha cada 5 ciclos consecutivos (10 años naturales) el requerimiento hídrico histórico se modeló individualmente para cada ciclo. Además, se consideró que al inicio de cada ciclo la empresa aplica riego, lo cual implica que se inicia a capacidad de campo cada simulación. En la Figura 15 se puede observar el diagrama del ciclo fenológico para la variedad LAICA 04-250 establecido en función de las propiedades del cultivo presentes en el lote de estudio. La fenología fue ajustada, ya que la duración de cada etapa varía dependiendo de la profundidad de la siembra, la humedad del suelo, la altura del terreno y la temperatura del sitio de siembra (Steduto et al., 2012). Por otra parte, se consideró que la caña de azúcar presenta una vía de fijación de carbono tipo C<sub>4</sub> lo cual indica que presenta una productividad hídrica entre 30 – 35 g/m<sup>2</sup> (Cadet Piedra, 2017). Según el ingeniero encargado de la plantación de caña de azúcar en la Hacienda Juan



Viñas, el espaciamiento entre surcos es de 1,50 m con un distanciamiento entre plantas de 11 cm a doble planta, lo que implica una densidad de 180.000 plantas/ha para el lote de estudio.



**Figura 15.** Ciclo fenológico para la variedad LAICA 04-250 (modificado Chaves Solera, 2019).

Otro de los parámetros ajustados fue la temperatura superior y base del modelo, en el caso de la caña de azúcar se estableció una temperatura base de 9°C y una temperatura superior de 36°C. En la Tabla 3 se muestran los valores introducidos en el módulo de clima en el programa AquaCrop especificando la fuente y el tipo de parámetro. Los parámetros referentes a prácticas de manejo propias de la empresa fueron definidos por medio de la asesoría del ingeniero encargado de la plantación y personal de la HJV, mientras que los valores propios del cultivo de caña de azúcar fueron obtenidos mediante referencias bibliográficas.

La cobertura inicial del dosel (CCo) es un parámetro que describe la expansión del follaje durante los primeros días de la siembra, por lo que el modelo AquaCrop lo ajusta automáticamente en función de la densidad de siembra obtenida en campo (Cortés Bello et al., 2013). Estos parámetros se establecieron siguiendo las recomendaciones del manual de la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua de la FAO. Por último, se consideró un índice de cosecha igual a 35%, este índice relaciona la biomasa producida y el rendimiento del cultivo, y se ve alterado con el estrés hídrico por lo que el modelo AquaCrop ajusta este valor inicial al llevarse a cabo la simulación (Steduto et al., 2012).

El primer paso necesario para completar el módulo de cultivo fue ingresar en la opción de “Crop, Select/Create Crop File, Create Crop File” donde se establece el tipo de cultivo, el método de siembra, la fecha de siembra y la duración del ciclo del cultivo, para finalizar se selecciona “Create”. Seguidamente, se completó la ventana de “Crop Characteristics, Description, Full set” esto permite editar una mayor cantidad de parámetros para definir con mayor precisión el cultivo a modelar. En la opción de “Mode, Crop Canopy Development, Calendar days” se indicó el tipo de desarrollo del cultivo en días calendario. Posteriormente, se ingresó a la ventana de “Development, Initial Canopy Cover” donde se establecen las condiciones iniciales del cultivo y la densidad de plantas por hectárea. En la opción de “Canopy Development” se indicó el porcentaje por día de expansión del dosel (CGC) y declive del dosel (CDC) en función de la duración de las etapas fenológicas del cultivo que

se establecieron según Chaves Solera (2019). Por último, en la opción “Root deepening” se seleccionó la profundidad máxima de las raíces y la cantidad de días necesarios para alcanzar dicha profundidad.

Luego, se ingresó en la ventana de “ET, Coefficients” donde se indicó el porcentaje de evaporación del suelo según la cobertura del dosel y la utilización de mantillos, así como la transpiración del cultivo según el tipo y la variedad. Mientras que en la opción “Water extraction pattern” donde se pueden variar los porcentajes de extracción de agua de las raíces según la profundidad de los perfiles del suelo. Seguidamente, se seleccionó la opción “Production, Crop Water Productivity” modificando el valor de WP en función del tipo de cultivo. Mientras que en la ventana de “Harvest Index, Reference Harvest Index” se indicó el índice de cosecha para la caña de azúcar. Por otra parte, en la opción de “Water, Canopy Expansion” se estableció información referente a la expansión del dosel, cierre estomático, senescencia temprana del dosel y estrés de aireación, inicialmente estos valores se aplicaron por defecto, solamente se ajustó el modelo a un ajuste lineal.

Posteriormente, en la ventana de “Temperature, Air temperature stresses, Crop Development” se indicó el rango de temperatura donde el cultivo se desarrolla adecuadamente. Posteriormente se ingresó a la ventana de “Salinity” donde se establecen los niveles de tolerancia a la salinidad y la respuesta del cultivo a la salinidad registrada. Estos datos fueron obtenidos durante la parte de caracterización de la zona de estudio en cuanto a la información del manejo del cultivo facilitada por la empresa.

La última ventana del módulo de cultivo se denomina “Fertility”. En esta sección se definió el cultivo en función del efecto del estrés por fertilidad del suelo en el desarrollo del dosel, la productividad debido al agua, calibración de la producción de biomasa producida y efectos en la biomasa por estrés. Al final del proceso, para crear el cultivo, se encuentra la ventana de “Calendar” donde se observó la información proporcionada anteriormente y se seleccionó la opción de “Save as” para guardar los cambios realizados. Los datos de entrada proporcionados al módulo de cultivo fueron obtenidos a partir de revisión bibliográfica. Utilizando como referencias principales la tesis de Cadet Piedra (2017) realizada en la Universidad de Costa Rica referente a la caracterización de las relaciones hídricas en diferentes variedades de caña de azúcar. El estudio elaborado por Cortés Bello et al., (2013) donde se utiliza el modelo AquaCrop para estimar los rendimientos del cultivo de caña de azúcar y el estudio FAO: Riego y drenaje N°66 en respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (Steduto et al., 2012).

El módulo de cultivo es de suma importancia para obtener una modelación que describa adecuadamente el comportamiento real del cultivo. Esto debido a que el modelo requiere la información del desarrollo del follaje para efectuar la simulación de la biomasa y rendimiento potencial de la cosecha en respuesta a la disponibilidad de agua (Cortés Bello et al., 2013). Este módulo fue utilizado para la etapa de ajuste del modelo, por lo que la información suministrada al modelo se relaciona específicamente con la variedad LAICA 04-250 de caña de azúcar y se modificaron únicamente los parámetros no conservativos del modelo. Dentro de las variables que se ajustaron se encuentran las relacionadas con el área de estudio, fenología, tipo de suelo y las prácticas de manejo que lleva a cabo la empresa.

**Tabla 3.** Definición de las variables requeridas para complementar los parámetros de adaptación del modelo utilizados como datos de entrada en el módulo de cultivo para el modelo AquaCrop.

Submódulo	Inputs	Valor ingresado	Tipo de parámetro		Fuente
			PC	PNC	
	Fecha de siembra	23/6/2012		X	HJV S.A.
	Densidad de siembra (Plantas/ha)	180 000			HJV S.A.
	Tamaño de follaje a la siembra (cm <sup>2</sup> /planta)	5	X		HJV S.A.
	Dosel inicial [CCo] (%)	90		X	Estimado AquaCrop
	Días a emergencia	30		X	Chaves Solera, 2019
	Dosel máximo [CCx] (%)	95		X	Steduto et al., 2012
	Días a dosel máximo	390		X	Parámetro ajustado
	Coef. de decaimiento (%/día) [CDC]	8		X	Parámetro ajustado
Desarrollo	Coef. de crecimiento (%/día) [CGC]	2		X	Parámetro ajustado
	Días a senescencia	570		X	Parámetro ajustado
	Duración del ciclo	640		X	HJV S.A.
	Profundidad radicular máxima (m)	0,8		X	Parámetro ajustado
	Profundidad radicular mínima (m)	0,6		X	Medición
	Días a profundidad radicular máxima	90		X	Cortés Bello et al., 2013
	Temperatura base máxima (°C)	9	X		Steduto et al., 2012
	Temperatura base mínima (°C)	36	X		Steduto et al., 2012
ET	Efecto de follaje muerto en la última etapa (%)	60	X		Cortés Bello et al., 2013
	Coef. de transpiración [Kc]	1,1	X		Steduto et al., 2012
Producción	Índice de cosecha [HI] (%)	35		X	Steduto et al., 2012
	Productividad hídrica (g/m <sup>2</sup> )	32	X		Cadet Piedra, 2017
	Expansión del follaje	moderadamente sensible	X		Cortés Bello et al., 2013
Estrés hídrico	Cierre estomático	moderadamente sensible	X		Cortés Bello et al., 2013
	Inicio rápido de senescencia	moderadamente tolerante	X		Cortés Bello et al., 2013
	Estrés por aireación	moderadamente tolerante		X	Cortés Bello et al., 2013
Estrés por temperatura	Rango GD para afectación por bajas temperaturas (°C)	12	X		Cortés Bello et al., 2013
Estrés por salinidad	Tipo de salinidad	moderadamente sensible	X		Cortés Bello et al., 2013

PC = Parámetro conservativo; PNC = Parámetro no conservativo; Coef. = Coeficiente.

### 3.4.2.3 Módulo de suelo

El módulo de suelo se divide en dos secciones, la primera incorpora información sobre el perfil de suelo, donde se añade los datos referente a textura, materia orgánica, tipo de suelo, capacidad de campo, punto de marchitez permanente e infiltración. Mientras que la segunda sección, considera información sobre la conformación del suelo en relación con el agua subterránea y es utilizada específicamente cuando el suelo presenta un nivel freático visible dentro de la profundidad radicular del cultivo estudiado o bien se determina su profundidad mediante muestreos. La sección de agua subterránea no fue considerada para este estudio debido a que no se identificó un nivel freático presente dentro de la profundidad radicular de la variedad LAICA 04-250 en el lote de estudio. En la Tabla 4 se muestran los valores que fueron ingresados en el módulo de suelo para cada parámetro considerado por el modelo AquaCrop.

**Tabla 4.** Datos de entrada ingresados en el módulo de suelo del programa AquaCrop.

Submódulo	Entradas	Valor ingresado			Fuente
Textura y horizontes	Horizontes	1	2	3	Prueba de campo
	Espesor (m)	0,2	0,2	0,2	Prueba de campo
	Textura	Franco arcilloso	Franco	Franco arcilloso	Determinado en laboratorio
	Arena (%)	36	40	37	Determinado en laboratorio
	Arcilla (%)	29	26	29	Determinado en laboratorio
	Limo (%)	36	34	33	Determinado en laboratorio
	Punto de marchitez permanente (%)	18,7	16,8	18,3	Prueba retención de humedad CIA
	Capacidad de campo (%)	32,5	30,1	31,8	Prueba retención de humedad CIA
	Punto de saturación (%)	46,6	44,8	45	Calculado
	Conductividad hidráulica (mm/día)	170	201,2	140,2	Calculado
Superficie	Número de curva		72		AquaCrop
	Agua rápidamente evaporable [REW] (mm)		9		AquaCrop
Capa restrictiva	Profundidad de la capa restrictiva	No considerado			Prueba de campo
Agua subterránea	Profundidad del nivel freático	No considerado			Prueba de campo

Por otro lado, la sección referente al perfil del suelo se completó con la información recolectada durante la etapa de caracterización de la zona de estudio, a partir de los parámetros necesarios para describir las propiedades fisicoquímicas y estructurales del suelo en el área de estudio. De los factores más importantes se encuentra la textura, infiltración,

capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Estos valores fueron obtenidos, en su mayoría, por medio de mediciones en campo realizadas en el lote de estudio (Tabla 4).

Para completar el módulo de suelo en el programa AquaCrop se ingresó en la opción “Soil Profile, Select/Create Soil Profile File, Create Soil Profile File” donde se estableció la cantidad de perfiles de suelo, la profundidad y el tipo de suelo de cada perfil a analizar. Posteriormente, en la sección de “Characteristics of Soil Horizons” se indicó los porcentajes de FC, PWP y saturación, así como la conductividad hidráulica o infiltración del suelo en mm/día para cada perfil. En la opción “Soil Surface” se estableció el número de curva (CN, por sus siglas en inglés) siguiendo la metodología descrita por Chow et al., (1987) con respecto a las indicaciones realizadas por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS). La información referente al CN se encuentra tabulada en función al uso y tipo de suelo, por lo que se utilizó las características del suelo determinadas durante la etapa de caracterización del sitio de estudio para seleccionar el CN correspondiente.

Seguidamente, se complementó la información sobre el agua fácilmente evaporable que fue ajustada de manera automática en función del CN establecido anteriormente. Por último, la ventana de “Capillary Rise, Calibration Parameters” se utilizó para calibrar los parámetros referentes al aumento de agua en el perfil del suelo por capilaridad desde la capa freática. El programa AquaCrop se encarga de calibrar el valor de capilaridad en función de la información suministrada con anterioridad al completar el módulo de suelo. Esto debido a que no se cuenta con información del comportamiento de la capa freática del suelo en la zona de estudio, ya que se encuentra por debajo de la profundidad radicular de la variedad LAICA 04-250.

#### **3.4.2.4 Módulo de gestión o manejo**

El módulo de gestión se divide en dos secciones, la primera es referente al riego o irrigación del cultivo y la segunda al manejo en términos de control de escorrentía, fertilidad del suelo, utilización de mantillos y cualquier práctica aplicada a la superficie del suelo. En este caso, la Hacienda Juan Viñas no cuenta con riego en las plantaciones de caña de azúcar por lo que no se toma en cuenta la sección de riego. Por otra parte, en la sección de manejo del campo, la empresa tampoco aplica medidas para el control de escorrentía, mantillos o técnicas aplicadas a la superficie del suelo debido a las características físicas y fenológicas de la caña de azúcar.

Sin embargo, se incluyeron parámetros relacionados con los niveles de fertilidad, las prácticas aplicadas al manejo de las malezas y lo vinculado al equilibrio hídrico del suelo. En el caso de la empresa HJV las prácticas utilizadas para el manejo del cultivo de caña de azúcar no se relacionan con los parámetros establecidos por el programa AquaCrop. Ya que solamente cuentan con un calendario de fertilización establecido en función de análisis químicos del suelo que realizan periódicamente (Apéndice 2).

Por otra parte, no implementan prácticas mecanizadas en las parcelas de caña de azúcar, lo que implica que el suelo no se ve afectado por temas de compactación, estableciendo un buen equilibrio hídrico, según lo característico de la textura del suelo presente en los perfiles analizados. Además, no aplican medidas para el control de escorrentía o técnicas de

coberturas del suelo. Por esta razón, solamente se creó un archivo para el submódulo de campo, donde se establecieron los parámetros requeridos con valores por defecto indicados por el modelo de AquaCrop para la fertilidad del suelo propias de un suelo con características no limitantes. Por último, se especificó que no se considera la utilización de mantillos y prácticas de superficie.

### **3.4.3 Ajuste del modelo**

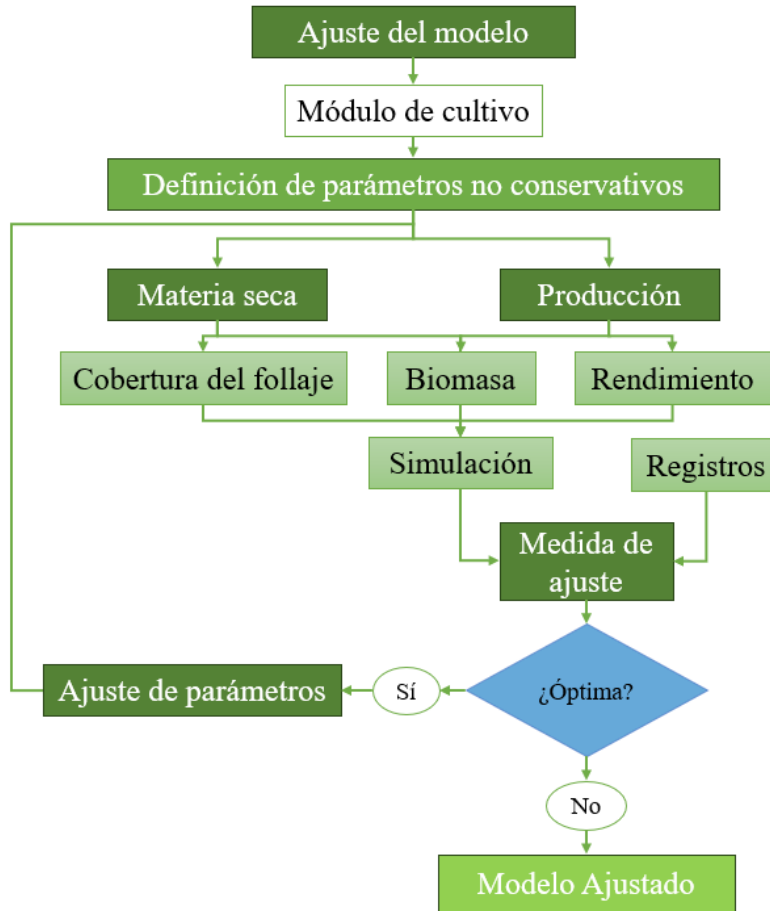
El modelo de AquaCrop requiere de un proceso de ajuste debido a que el programa no contiene la variedad LAICA 04-250 para el cultivo de caña de azúcar dentro de su base de datos. Para ello, se utilizó el registro histórico de datos climáticos y la totalidad de los datos recolectados durante la etapa de caracterización del área de estudio. Seguidamente se realizó un proceso de variación de parámetros pertenecientes al módulo de cultivo para identificar las variables relacionadas específicamente a la variedad considerada en este estudio.

En primera instancia se determinaron los parámetros no conservativos del modelo, los cuales fueron ajustados en función de la disponibilidad de información agronómica para las diferentes etapas fenológicas del cultivo y los registros históricos de rendimiento. La información faltante se complementa tomando como referencia bibliográfica los estudios de Cortés Bello et al., (2013), Flores Gallardo et al., (2013), Cadet Piedra (2017) y Steduto et al., (2012) donde estimaron el requerimiento hídrico, biomasa y rendimiento del cultivo de caña de azúcar bajo diferentes contextos.

El procedimiento seguido para el ajuste del modelo se basa en la metodología desarrollada por Cortés Bello et al. (2013) y la FAO, con el objetivo de ajustar y simular el requerimiento hídrico, biomasa y rendimiento de la caña de azúcar en Colombia. Dicha metodología indica que posterior a la identificación de los parámetros no conservativos referentes a la materia seca y producción del cultivo analizado, se deben establecer las variables relacionadas con la cobertura del dosel. Esto permite calcular la biomasa total producida y el rendimiento de la cosecha al realizar la simulación. Al comparar estos valores con los registros obtenidos de las mediciones en campo se puede calibrar el modelo hasta alcanzar la medida de ajuste óptima (Figura 16).

Los parámetros no conservativos que fueron utilizados durante el proceso de ajuste del modelo son coeficiente de crecimiento (CGC) y el coeficiente de decaimiento (CDC). Estos coeficientes varían según factores climáticos, fenológicos y ambientales propios de la variedad y la ubicación geográfica del cultivo estudiado. Sin embargo, existe un rango establecido teóricamente para cada coeficiente correspondiente específicamente al cultivo de caña de azúcar. En el caso de CGC el valor simulado puede variar entre 2,0 a 6,0 %/día. Mientras que el valor de CDC varía entre 3,1 a 9,2 %/día, estos rangos describen un cultivo que presenta una cobertura del dosel prácticamente total y una expansión lenta (FAO, 2022).

La variedad LAICA 04-250 fue desarrollada en el país utilizando un patrón o variedad progenitora denominada H77-4643 mediante un cruce múltiple actuando como femenino y masculino de la misma variedad (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020). Para el proceso de ajuste se utilizó como referencia el patrón para establecer el rango de variación del CGC que se encuentre entre 2,0 y 2,5 %/día, mientras que para el CDC fue de 6,5 a 8,5 %/día.



**Figura 16.** Esquema de ajuste del modelo AquaCrop.

El CGC fue utilizado como punto de partida para establecer el mejor ajuste del modelo, debido a que el rango de variación es menor que el establecido para el CDC. Considerando que el CGC es una medida del dosel en etapas iniciales del desarrollo y que la variedad LAICA 04-250 se caracteriza por un lento desarrollo vegetativo alcanzando un ciclo de 2 años, se partió inicialmente con un CGC de 2,5 %/día y se fue disminuyendo en 0,1 %/día hasta llegar a 2,0 %/día. Estos valores se combinaron con el CDC que inicialmente se varió entre 7,5 – 7 %/día disminuyendo en 0,1 %/día al igual que para el CGC. Al realizar estas simulaciones iniciales se identificó los valores de mejor ajuste para el parámetro de CGC reduciendo el rango de variación a únicamente dos valores 2,1 %/día y 2,0 %/día.

Sin embargo, estas combinaciones no consideraron los valores cercanos al límite superior e inferior del CDC, por lo que se realizaron simulaciones para los valores máximos y mínimo CDC en combinación con los índices ajustados de CGC. En este sentido, para un valor de CGC de 2,1 %/día se evaluaron valores de CDC dentro del rango de 8,5 – 7,5 %/día disminuyendo en 0,5 %/día, al igual que para un CGC de 2,0 %/día. Mientras que para considerar el límite inferior del rango se realizó una simulación para cada valor de CGC en combinación con un CDC de 6,5 %/día, como se muestra en la Tabla 5. En total se realizaron 14 simulaciones siguiendo la metodología descrita anteriormente.

**Tabla 5.** Proceso de ajuste del modelo variando el coeficiente de crecimiento y decaimiento del cultivo.

Número de simulación	Valores ajustados		Número de simulación	Valores ajustados	
	CGC (%/día)	CDC (%/día)		CGC (%/día)	CDC (%/día)
<b>1</b>	2,5	7,5	<b>8</b>	2,1	8,0
<b>2</b>	2,4	7,4	<b>9</b>	2,1	7,5
<b>3</b>	2,3	7,3	<b>10</b>	2,0	8,5
<b>4</b>	2,2	7,2	<b>11</b>	2,0	8,0
<b>5</b>	2,1	7,1	<b>12</b>	2,0	7,5
<b>6</b>	2,0	7,0	<b>13</b>	2,1	6,5
<b>7</b>	2,1	8,5	<b>14</b>	2,0	6,5

CGC = Coeficiente de crecimiento; CDC = Coeficiente de decaimiento.

Además, se incorporaron variables referentes al cultivo que fueron ajustadas teóricamente en función a la variedad para el cultivo de caña de azúcar, las cuales fueron la fecha de siembra, densidad de siembra (plantas/ha), tamaño de la planta a la siembra (cm<sup>2</sup>/planta), cobertura inicial del dosel y duración de cada etapa fenológica. También se consideró la profundidad radicular, los días en los que se alcanza la profundidad radicular máxima, temperatura base y temperatura máxima. Mientras que, para evaluar el proceso de ajuste, se utilizó el error porcentual ( $\varepsilon\%$ ) para determinar la sensibilidad de los parámetros utilizados. Este valor se calcula con el fin de comparar el cambio entre el conjunto de valores de salida del modelo con respecto a los datos reales obtenidos en campo, utilizando la ecuación 17 (Medina Rivera, 2017).

$$\varepsilon\% = \frac{|Valor\ modelado - Valor\ observado|}{Valor\ observado} * 100 \quad (17)$$

Seguidamente, se realizó una comparación entre las salidas del modelo y los datos observados en campo, en cuanto a la biomasa producida y el rendimiento obtenido. Este proceso se efectuó para los años donde se realizaron las cosechas y se calcularon los parámetros de error cuadrático medio y el coeficiente de determinación para evaluar la calidad del modelo con relación al comportamiento real del cultivo. Por último, se calculó la división entre el error cuadrático medio y el error absoluto medio (RMSE/MAE) con el objetivo de considerar la afectación que sufre el modelo con la presencia de valores extremos. En este sentido, cuando RMSE/MAE es cercano a 0 indica que el ajuste del modelo es el óptimo utilizando la ecuación 18 (Soto Bravo y González Lutz, 2019).

$$\frac{RMSE}{MAE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |V_{obs_i} - V_{est_i}|^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n |V_{obs_i} - V_{est_i}|}{n}} \quad (18)$$



Donde  $V_{obs}$  son los valores observados en campo y  $V_{est}$  son los datos estimados por el modelo. Por otra parte, la validación del modelo requiere valores dimensionalmente comparables, por ello se considera que el programa AquaCrop proporciona los resultados de biomasa y rendimiento en porcentaje de materia seca. Mientras que los valores de rendimiento facilitados por la empresa Hacienda Juan Viñas son reportados en porcentaje de materia humedad. Por esta razón, se realizó una conversión utilizando la ecuación 19 (Cortés Bello et al., 2013).

$$Tallos\ frescos = \frac{Tallos\ secos}{0,3} * 0,6 \quad (19)$$

Donde, el factor de 0,6 corresponde a la fracción de tallos recolectados descartando la hojarasca, mientras que el valor de 0,3 corresponde a la fracción de materia seca. Mientras que el valor del rendimiento se calcula a partir de la ecuación 20.

$$Y = B * HI \quad (20)$$

Donde Y es el rendimiento del cultivo en función de la biomasa producida, B es la biomasa obtenida y HI es el índice de cosecha el cual depende del tipo de cultivo modelado (FAO, 2022).

### 3.4.4 Análisis de sensibilidad

Una vez ajustado el modelo para la variedad LAICA 04-250 en el módulo de cultivo de AquaCrop, se realizó un análisis de sensibilidad. Esto con el objetivo de comprender la susceptibilidad del modelo a cambios en los parámetros relacionados con el medio ambiente y cómo afectan estas variables las salidas de la simulación, específicamente la biomasa producida y el rendimiento. Durante el proceso seguido para establecer las condiciones iniciales dentro del programa AquaCrop y el ajuste del módulo de cultivo se identificaron aquellos parámetros que inciden mayoritariamente en el comportamiento del rendimiento del cultivo. Dichos parámetros fueron modificados dentro de un rango específico establecido para cada variable durante el desarrollo del análisis de sensibilidad. Las variables seleccionadas fueron: textura del suelo, espesor y cantidad de horizontes en el suelo y el nivel freático.

#### 3.4.4.1 Textura del suelo

Se consideró variar la textura del suelo debido a que los resultados obtenidos a través de la prueba de Bouyoucos indicaron que los porcentajes de arcilla, limo y arena variaban ligeramente dentro del rango de un tipo de suelo franco y franco arcilloso. Sin embargo, algunas de las muestras estuvieron cerca de cruzar el límite entre los suelos de tipo arcilloso y franco arcillo limoso, específicamente aquellas muestras identificadas como suelo franco arcilloso. Al variar la textura del suelo de dichas muestras se puede comprender su incidencia en la producción de biomasa y rendimiento del cultivo de caña de azúcar en el funcionamiento del modelo. Se plantearon cuatro diferentes casos para analizar la

sensibilidad del modelo en función de cambios en la textura del suelo, los cuales se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Casos evaluados durante el análisis de sensibilidad para el parámetro de textura del suelo.

<b>Caso</b>	<b>Textura del suelo horizonte (0 – 20 cm)</b>	<b>Textura del suelo horizonte (20 – 40 cm)</b>	<b>Textura del suelo horizonte (40 – 60 cm)</b>
1	Franco arcillo limoso	Franco	Franco arcillo limoso
2	Arcilloso	Franco	Arcilloso
3	Franco arcillo limoso	Franco	Arcilloso
4	Arcilloso	Franco	Franco arcillo limoso

#### 3.4.4.2 Espesor y cantidad de horizontes en el suelo

En el caso del espesor y la cantidad de horizontes presentes en el suelo, se consideró la variabilidad observada en los porcentajes de arcilla, limo y arena obtenida a través de la prueba de Bouyoucos. Ya que, al calcular la textura para cada horizonte, los resultados obtenidos indicaron una diferencia mínima entre la textura franco y franco arcillosa. Considerando que en campo se identificaron tres horizontes diferentes en el suelo dentro de la profundidad radicular del cultivo, se establecieron tres diferentes casos para evaluar la susceptibilidad del modelo ante estos cambios en la estructura del suelo, los cuales se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Casos evaluados durante el análisis de sensibilidad para el parámetro de espesor y cantidad de horizontes presentes en el suelo.

<b>Caso</b>	<b>Cantidad de horizontes</b>	<b>Textura</b>	<b>Espesor (cm)</b>
1	2	Franco	40
		Franco arcilloso	20
2	1	Franco arcilloso	60
3	2	Franco arcilloso	20
		Franco	40

#### 3.4.4.3 Nivel freático

Este parámetro no fue considerado en la modelación del cultivo de caña de azúcar debido a que, durante el proceso de caracterización del área de estudio, el suelo no presentó un nivel freático visible dentro de la profundidad radicular máxima evaluada. Sin embargo, resulta importante variar este parámetro considerando los cambios en la estructura del suelo planteados anteriormente. Con el objetivo de considerar los efectos que implicaría tener un nivel freático en la producción de biomasa y rendimiento del cultivo. Por lo que se consideró plantear tres casos diferentes con un nivel freático a los 60 cm, 80 cm y 100 cm de profundidad.

### **3.5 Objetivo 3: Determinación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar utilizando dos escenarios de cambio climático como medida de adaptación**

#### **3.5.1 Escenarios de cambio climático**

Para la determinación del requerimiento hídrico a futuro del cultivo de caña de azúcar, se utilizaron dos escenarios de cambio climático, los cuales fueron desarrollados y publicados por el IPCC en su Sexto Informe de Evaluación del IPCC 2022. En este informe se muestra una evaluación detallada de los riesgos asociados al impacto del cambio climático para los medios de vida actuales y futuros. Además, se establecen los escenarios de CC actualizados que combinan las Trayectorias de Concentración Representativas con las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

La combinación de ambas trayectorias permite incorporar en las simulaciones el efecto de las emisiones de GEI sobre los sistemas socioeconómicos y las implicaciones que tienen sobre el forzamiento radiativo y la variabilidad climática. Tomando esto en consideración, se utilizaron los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 a escala mensual, facilitados por el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (CIGEFI) (Hidalgo et al., 2023). Dicha institución, desarrolló en el año 2021 el proyecto denominado “Generación de proyecciones de alta resolución para el Instituto Centroamericano de Administración Pública (ICAP)”. Esto con el objetivo de generar escenarios de cambio climático a una resolución de 1 km x 1 km regionalizados para Centroamérica y República Dominicana. El proceso de regionalización fue realizado por el CIGEFI a partir de ocho modelos de circulación general incluidos en el CMIP6 desarrollado por el IPCC para tres diferentes escenarios de última generación los cuales son SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para cuatro periodos de evaluación (Hidalgo et al., 2023).

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron dos escenarios de CC de última generación denominados SSP2-4.5, que representa emisiones futuras de GEI moderadas (0 – 20 GtCO<sub>2</sub>/año) y SSP5-8.5 (120 – 140 GtCO<sub>2</sub>/año), que indica concentraciones de GEI elevadas (IPCC, 2022). Para cada escenario solicitado se evaluaron dos periodos, el primero considera el impacto del CC a mediano plazo e inicia en el año 2040 y finaliza en el año 2069. Mientras que el segundo periodo, va desde el año 2070 hasta el año 2099 y representa el impacto a largo plazo. La escala proporcionada es mensual para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima a una resolución de 1x1 km regionalizados para Costa Rica. La información fue extraída para la zona de Turrialba y Juan Viñas con un punto de referencia a una latitud de 9°54'30"N y una longitud de 83°44'48"O a 1.324 m.s.n.m. (Hidalgo et al., 2023).

#### **3.5.2 Predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar**

Los datos de entrada suministrados al programa AquaCrop para predecir el desarrollo del dosel, requerimiento hídrico y rendimiento del cultivo de caña de azúcar con base en los escenarios de cambio climático son: precipitación (mm/día), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día), velocidad del viento (m/s) y presión

de vapor real (kPa). Estos datos se obtienen de los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 proporcionados por el CIGEFI para el periodo de estudio establecido (2040 – 2069 y 2070 – 2099).

Para completar el módulo de clima en el programa AquaCrop se seleccionó la opción de “Climate, Create Climate File”, posteriormente se marcó la casilla de “Import Climatic Data, Import/Create” y se seleccionó el archivo con la información climática correspondiente. Seguidamente, se selecciona la ventana de “Time range” donde se indicó el rango de tiempo establecido en el archivo de clima seleccionado y el tipo de datos. En este caso, se utilizaron datos mensuales para los periodos futuros establecidos en el análisis de cambio climático. Posteriormente, se continuó con la ventana de “Climatic Parameters” donde se especificó el parámetro climático para cada columna agregada en el archivo de clima con las unidades correspondientes. El programa cuenta con valores límites para cada parámetro climático que se pueden modificar en caso de ser necesario en la opción de “Update Data Range”.

Por otra parte, la información referente a los módulos de cultivo, suelo y manejo mantienen la misma información utilizada durante la modelación del registro histórico, esto debido a que el modelo fue ajustado para los parámetros no conservativos del cultivo. Los cuales fueron definidos y validados durante la estimación del requerimiento hídrico, biomasa y rendimiento realizada para el registro histórico del clima. Por ende, al incorporar los escenarios de cambio climático solamente se contemplan cambios relacionados a parámetros climáticos que varían en el tiempo, manteniendo constante las variables relacionadas al cultivo, suelo y manejo. Las variaciones futuras debido al CC serán consideradas al incluir los datos en el módulo de clima, ya que el comportamiento de la temperatura y la precipitación varían al incorporar los escenarios seleccionados al modelo AquaCrop (Cortés Bello et al., 2013).

Por ello se creó un archivo de datos meteorológicos para cada escenario de cambio climático evaluado y para cada periodo seleccionado. En este sentido, el planteamiento metodológico de la simulación futura consistió en cuatro etapas:

1. Como datos de entrada para el módulo de clima se utilizó el registro meteorológico para el escenario SSP2-4.5 y se simularon cinco ciclos fenológicos consecutivos iniciando el 1/1/2040.
2. A partir de los mismos datos de entrada para el escenario SSP2-4.5, se evaluaron cinco ciclos fenológicos consecutivos iniciando el 1/1/2070.
3. Como datos de entrada para el módulo de clima, se utilizó el registro meteorológico para el escenario SSP5-8.5 y se simularon cinco ciclos fenológicos consecutivos iniciando el 1/1/2040.
4. A partir de los mismos datos de entrada para el escenario SSP5-8.5, se evaluaron cinco ciclos fenológicos consecutivos iniciando el 1/1/2070.

Esto, con el objetivo de comparar el requerimiento hídrico del cultivo, la biomasa producida y el rendimiento resultante al final de cada uno de estos ciclos con los resultados alcanzados durante la modelación del registro histórico.

### **3.5.3 Medidas de adaptación al cambio climático para el cultivo de caña de azúcar evaluado en la Hacienda Juan Viñas**

Las medidas de adaptación debido a los efectos del cambio climático se establecieron en función de los resultados de biomasa y rendimiento obtenidos a partir de la simulación de los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para cada ciclo y periodo evaluado. El procedimiento seguido consistió en identificar los ciclos que presentaron un mayor impacto debido a la variabilidad climática y que obtuvieron valores de rendimiento bajos. A dichos ciclos se les aplicó una medida de adaptación específica con el objetivo de evaluar las mejoras en la biomasa y rendimiento.

AquaCrop permite identificar el déficit hídrico en diferentes etapas del desarrollo del cultivo que afectan significativamente la producción de biomasa y el rendimiento observado al final del ciclo. Por lo cual, al identificar aquellos ciclos que presentaron agotamiento hídrico excesivo en la zona radicular, se implementó el riego como medida de adaptación para este caso específico, ya que la finca no cuenta con riego para el cultivo de caña de azúcar. Por lo tanto, se creó un archivo de riego para la simulación en el módulo de manejo, ya que tiene una sección para programar la irrigación proporcionada al cultivo durante el ciclo fenológico evaluado.

La cantidad de lámina aplicada fue definida por el programa AquaCrop a partir de la precipitación incorporada al módulo de clima y el porcentaje de estrés hídrico que experimenta el cultivo durante el ciclo vegetativo. El modelo identifica la cantidad de agua requerida por el cultivo en un determinado momento del ciclo y recomienda la aplicación de la lámina de riego necesaria para garantizar un porcentaje de humedad en el suelo cercano a la línea de expansión del dosel durante todo el ciclo fenológico del cultivo. Esto permite minimizar la presencia de estrés hídrico relacionado con la disminución de la expansión del dosel (StExp) y estrés hídrico que induce el cierre estomático (StSto).

Para ello se ingresó al módulo de manejo en la sección de irrigación y se seleccionó la opción de “Select/Create Irrigation File”, posteriormente se marcó la casilla de “Generation of Irrigation Schedule” para estimar la lámina y el calendario de aplicación del riego requerido por el cultivo durante su desarrollo. Seguidamente, se seleccionó la opción “Create Irrigation File” donde se indicó el nombre y la descripción del archivo, posteriormente se seleccionó el tipo de riego que se aplicó. En este caso se propuso un riego por aspersión con el objetivo de proporcionar la cantidad de agua requerida por el cultivo con la mayor eficiencia posible, para ello se seleccionó la opción “Sprinkler Irrigation” y por último se seleccionó “Create File”. Con el archivo de riego ya generado, se realizó nuevamente la simulación para cada ciclo que presentó bajos rendimientos aplicando la lámina de riego estimada para evaluar los efectos de la medida de adaptación propuesta sobre la producción de biomasa y el rendimiento obtenido.

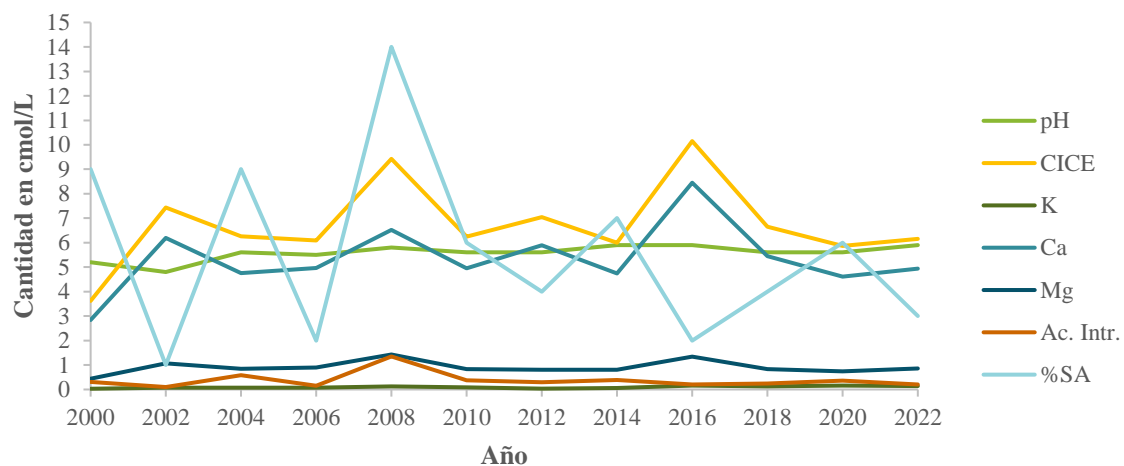
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Objetivo 1: Caracterización de la zona de estudio

#### 4.1.1 Manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar

Se obtuvo registro del manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar en el lote de estudio para un periodo de 22 años iniciando en el año 2000 y finalizando en el año 2022. La variedad utilizada en la finca Lara lote 75 es LAICA 04-250. El lote de estudio está ubicado en una zona con suelos predominantemente andisoles los cuales se componen en gran parte de arcillas de origen volcánico, lo que limita la correcta absorción y disponibilidad de nutrientes para la planta. Por esta razón, se deben aplicar enmiendas para acondicionar el suelo y corregir la acidez (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020). La variedad LAICA 04-250 se puede cosechar después de cumplir los 14 o 16 meses de edad. Sin embargo, en la Hacienda Juan Viñas la cosecha se realiza entre los 22 y 24 meses de edad, debido a que se presenta un mejor tonelaje en el total de caña cosechada (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

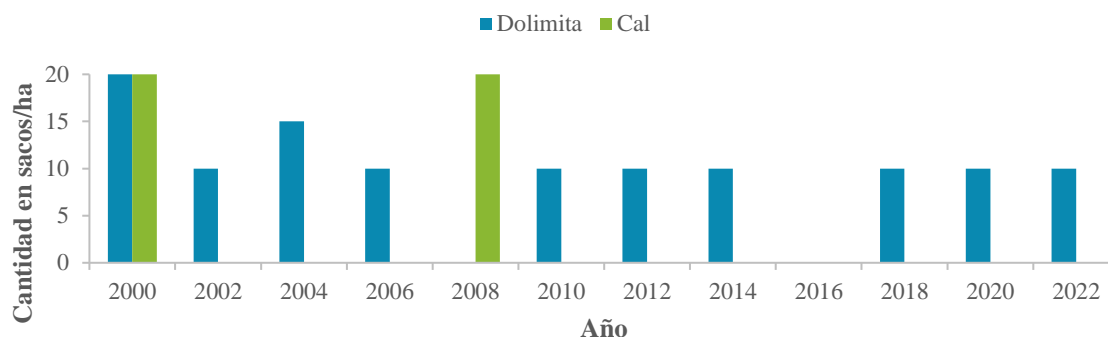
En el registro de enmiendas aplicadas se puede observar que dichas aplicaciones se realizan el primer año del ciclo fenológico de la planta, el cual es de dos años en total (Tabla A2). El lote de estudio presenta un pH sumamente estable con un porcentaje de variación en promedio para el periodo de años registrado de 4,62%, con un valor máximo de pH igual a 5,9 y un valor mínimo de 4,8. El pH se relaciona con el porcentaje de saturación de acidez del suelo (%SA), lo que indica que el valor de pH máximo aceptable para evitar que el contenido de aluminio intercambiable precipite es de 5,5 (Molina, 2007). Los valores registrados para el lote de estudio indican que el suelo mantiene un pH idóneo para la mayoría de los años evaluados (Figura 17).



**Figura 17.** Registro del manejo agronómico realizado por la empresa Hacienda Juan Viñas para el lote de estudio para el periodo entre el año 2010 y 2022 (CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico, K: Potasio, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, Ac. Intr: Acidez Intercambiable, %SA: Porcentaje de Saturación de Acidez).

La acidez intercambiable (Ac. Intr.) se relaciona con la cantidad de aluminio e hidrogeno intercambiable en la solución del suelo, donde el rango permisible es de 0,2 a 0,5 cmol/L. En el registro se puede observar que los datos no exceden el límite aceptable a excepción del año 2008 donde se registró un valor de 1,35 cmol/L. Por otra parte, el %SA tiene un efecto negativo en el desarrollo del cultivo cuando su valor excede el 10%, en el caso del lote de estudio esto ocurre solamente en el año 2008 que alcanzó el 14% (Figura 17).

Esto se relaciona con el pH y la Ac. Intr., por esta razón se realizó la aplicación de Cal correspondiente a 20 sacos/ha que se utiliza cuando se requiere corregir la acidez del suelo cuando se exceden los límites permisibles (Figura 18) (Molina, 2007). Por otra parte, la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) se refiere a la sumatoria del contenido de Ca, Mg, K, Al y H del suelo en cmol/L, por lo que está estrictamente relacionado con la fertilidad del suelo. Valores superiores a 12 cmol/L indican una alta fertilidad, mientras que una fertilidad media se obtiene dentro del rango de 5 a 12 cmol/L (Figura 17). En función del valor de CICE y los valores de Ca, Mg, K registrados se establece la cantidad de dolomita a aplicar por año (Figura 18) (Molina, 2007).



**Figura 18.** Registro de las enmiendas aplicadas por año en el lote de estudio.

En cuanto a las características de calidad para la variedad LAICA 04-250, según los ensayos realizados por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (2020), esta variedad presenta un valor de 17,40 °Brix, una pureza del 82,5% y un contenido de fibra igual a 12,2%. En cuanto al rendimiento se estima de 168,80 t caña/ha lo que corresponde a 95,50 kg azúcar/t y a 16,14 t azúcar/ha para una cosecha. En el registro se puede observar que para el lote de estudio el rendimiento reportado en toneladas de caña por hectárea presenta un porcentaje de variación promedio de 13,95% en comparación con el rendimiento teórico reportado para la variedad LAICA 04-250. Los rendimientos para los años registrados fueron similares al valor teórico de 168,80 t caña/ha, presentado un valor mínimo en el año 2006 que presentó un rendimiento de 82,00 t caña/ha y un máximo en el año 2000 con 215,00 t/ha (Tabla 8).

En el caso de la cantidad de azúcar blanca obtenida a partir del total de toneladas de caña por hectárea cosechada se obtiene un porcentaje de variación promedio de 5,65% para el total de kilogramos de azúcar blanca por tonelada de caña cosechada. Los años que presentaron un rendimiento inferior al teórico de 95,50 kg azúcar/t, fueron el año 2000 con 85,70 kg azúcar/t, 2004 con 94,50 kg azúcar/t y 2016 con 89,20 kg azúcar/t. Sin embargo, el rendimiento obtenido en kilogramos de azúcar blanca por tonelada de caña cosechada no tiene una relación directamente proporcional con la cantidad de azúcar que se produce por hectárea.

Como se puede observar en el registro, para el total de toneladas de azúcar blanca por hectárea obtenidas se presenta un porcentaje de variación promedio de 14,84% para un valor teórico de 16,14 t azúcar/ha.

**Tabla 8.** Registro del rendimiento (toneladas/hectárea) por año del lote de estudio.

<b>Año</b>	<b>Área cosechada (ha)</b>	<b>Caña cosechada (t/ha)</b>	<b>Biomasa (t/ha)</b>	<b>Rendimiento (t/ha)</b>
2000	14,63	215,00	107,50	37,63
2002	14,63	132,00	66,00	23,10
2004	14,63	113,00	56,50	19,78
2006	14,63	82,00	41,00	14,35
2008	14,63	181,00	90,50	31,68
2010	14,63	174,00	87,00	30,45
2012	14,63	166,00	83,00	29,05
2014	14,63	161,00	80,50	28,18
2016	14,63	162,00	81,00	28,35
2018	14,63	171,00	85,50	29,93
2020	14,63	168,00	84,00	29,40
2022	14,63	188,00	94,00	32,90

Se identificó que los años 2002, 2004, 2006 y 2016 cuentan con un rendimiento deficiente. Específicamente el año 2006 presenta el menor rendimiento con un porcentaje de variación del 49,81% con respecto al valor teórico esperado. Esto concuerda con los índices de producción y productividad de la caña de azúcar presentado por LAICA, donde se evidencia que para la zona de Turrialba y Juan Viñas los rendimientos fueron menores de lo reportado en el periodo anterior (2004-2005) (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020).

Lo cual dista de los indicadores presentados por Chaves Solera (2021) en el informe nacional de rendimiento de caña de azúcar desarrollado por el Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). Donde se indica que para el año 2006 el rendimiento obtenido fue de 77,91 t/ha lo cual está por encima del promedio (71,82 t/ha). Esto se debió al incremento de la producción de caña de azúcar en sectores como Guanacaste, Puntarenas y San Carlos. Sin embargo, para la zona de Turrialba y Juan Viñas se presentó una reducción en los rendimientos, lo cual concuerda con el registro presentado en la Tabla 5 para el lote de estudio.

#### **4.1.2 Condiciones climáticas**

##### **4.1.2.1 Caracterización de la información meteorológica disponible**

Como resultado de la caracterización de la información meteorológica disponible se identificó que la estación meteorológica Hacienda Juan Viñas cuenta con el registro continuo más completo de la colección de estaciones disponibles. Dicha estación contiene una serie de datos para un periodo de 10 años, 11 meses y 7 días, el cual inicia el 23/06/2012 y finaliza el 30/05/2023 con un 0% de datos ausentes para las variables meteorológicas de precipitación y velocidad del viento. Mientras que para la temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa mínima el registro cuenta con un 0,2% de datos ausentes lo que corresponde a 6 días sin datos registrados. Por otra parte, en el caso de la humedad relativa máxima el



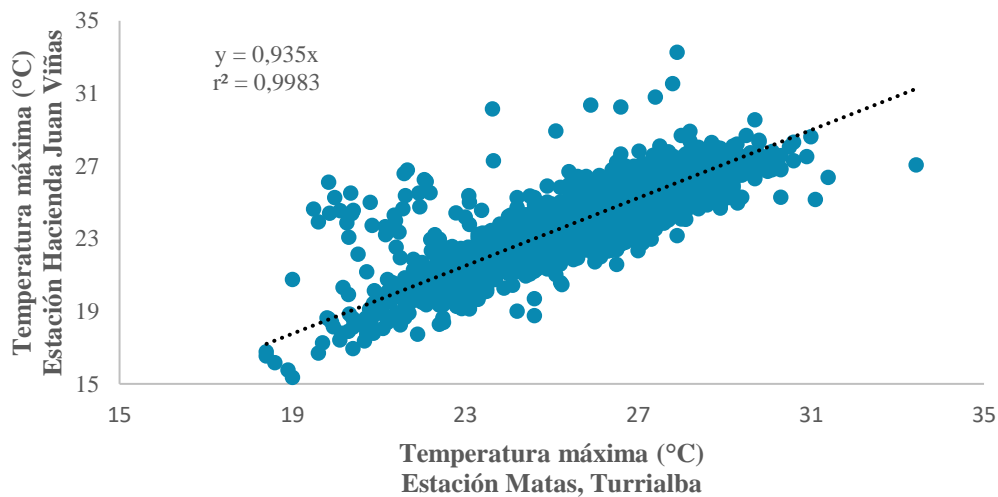
porcentaje de datos faltantes es de 4% lo cual indica un total de 152 días sin información de temperatura. Por último, la serie de radiación solar cuenta con un porcentaje de datos ausentes de 31% lo que es igual a 768 datos ausentes (Tabla 9).

**Tabla 9.** Datos ausentes en el registro meteorológico.

<b>Variable</b>	<b>Estación</b>	<b>Número de años existentes</b>	<b>Datos disponibles en total</b>	<b>Datos faltantes en total</b>	<b>Datos Ausentes</b>
Precipitación	Sitio Mata, Turrialba	25	9.433	419	5,0%
	Guayabo, Turrialba	21	7.696	739	11,0%
	Maravilla, Juan Viñas	10	3.971	80	2,0%
	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	10	3.993	0	0,0%
	Turrialba Centro	15	5.551	2.786	49,8%
	Matas, Turrialba	9	3.382	124	4,0%
	Monumento Nacional Guayabo	7	2.795	12	0,4%
Radiación Solar	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	9	3.225	768	31,0%
Velocidad del viento	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	10	3.993	0	0,0%
Temperatura máxima	Maravilla, Juan Viñas	10	3.971	92	2,0%
	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	10	3.993	6	0,2%
	Turrialba Centro	7	5.551	2.786	49,8%
	Matas, Turrialba	9	3.382	124	4,0%
	Monumento Nacional Guayabo	7	2.795	12	0,4%
Temperatura mínima	Maravilla, Juan Viñas	10	3.971	92	2,0%
	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	10	3.993	6	0,2%
	Turrialba Centro	7	5.551	2.786	49,8%
	Matas, Turrialba	9	3.382	124	4,0%
	Monumento Nacional Guayabo	7	2.795	12	0,4%
Humedad relativa máxima	Maravilla, Juan Viñas	10	3.971	92	2,0%
	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	10	3.993	152	4,0%
	Turrialba Centro	7	5.551	2.786	49,8%
	Matas, Turrialba	9	3.382	124	4,0%
	Monumento Nacional Guayabo	7	2.795	12	0,4%
Humedad relativa mínima	Maravilla, Juan Viñas	10	3.971	92	2,0%
	Hacienda Juan Viñas, Juan Viñas	10	3.993	6	0,2%
	Turrialba Centro	7	5.551	2.786	49,8%
	Matas, Turrialba	9	3.382	124	4,0%
	Monumento Nacional Guayabo	7	2.795	12	0,4%

#### 4.1.2.2 Estimación de datos ausentes

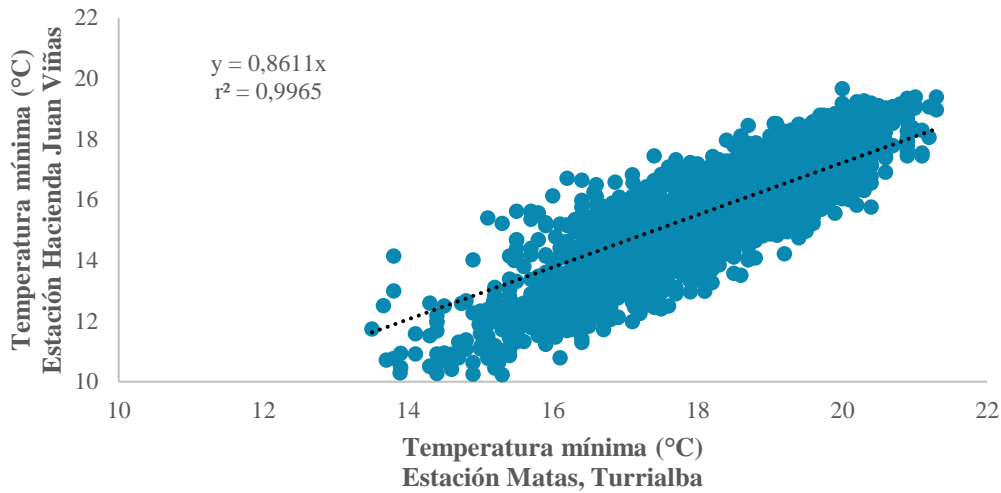
Se obtuvieron 5 modelos de regresión lineal en total. Cada modelo se utilizó para estimar los datos ausentes de las variables meteorológicas con series climáticas incompletas (temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa máxima, humedad relativa mínima y radiación solar). Inicialmente se calculó el modelo de RL para la temperatura máxima (Figura 19) utilizando como variable independiente el registro meteorológico de la estación meteorológica Matas ubicada en Turrialba, la cual cuenta con información para los días reportados como ausentes en la serie climática de la estación Hacienda Juan Viñas. La línea de tendencia tiene un coeficiente de determinación igual a 0,99 lo que indica que la bondad de ajuste del modelo es alta, esto muestra que la ecuación de la recta obtenida es capaz de estimar adecuadamente los datos faltantes del evento climático establecido (Medina Rivera, 2008). Se obtiene un valor de  $r^2$  alto debido a que la cantidad de datos ausentes es muy pequeña en comparación al registro total de datos utilizados para la construcción del modelo (Tabla 9). Además, la diferencia en la relación lineal existente entre las series meteorológicas utilizadas para construir el modelo es mínima.



**Figura 19.** Gráfico del modelo de regresión lineal para la estimación de datos ausentes de temperatura máxima.

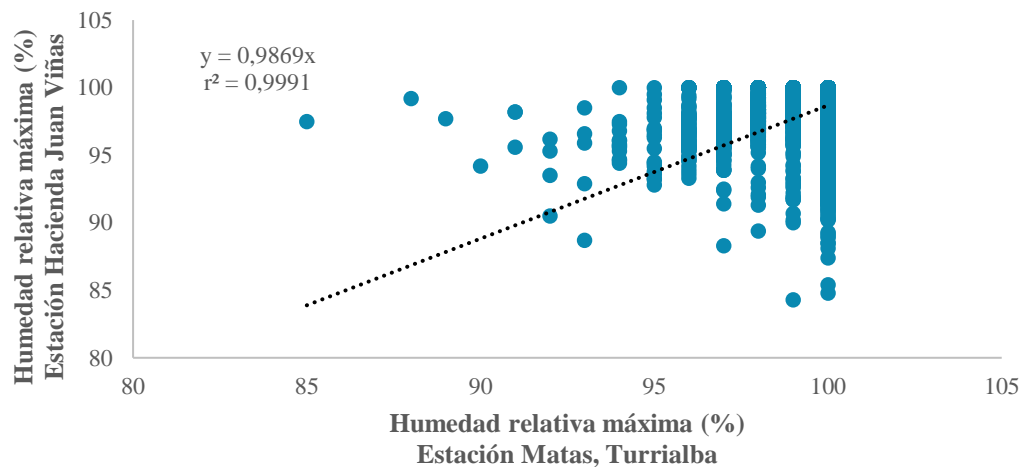
El resultado para el valor de  $r^2$  en el caso del modelo de RL construido para la temperatura mínima fue de 0,99 (Figura 20). En este caso se presentó un comportamiento similar al obtenido para la temperatura máxima debido a que ambas variables cuentan con la misma cantidad de datos ausentes. Lo que indica que la línea de tendencia representa una bondad de ajuste para el modelo óptimo entre los valores de las series de datos climáticos utilizadas, con un nivel de confianza del 95% para estimar los datos meteorológicos faltantes (Medina Rivera, 2008). Al comparar los valores de  $r^2$  para la temperatura máxima y mínima se puede observar que existe una pequeña diferencia entre ambos. Esto debido a que el registro climático obtenido para la temperatura mínima presenta un porcentaje de variación promedio de 8,65%, este valor es mayor al obtenido en el caso de la temperatura máxima el cual es de 5,79%. Por esta razón el valor de  $r^2$  es menor para la temperatura mínima que para la máxima, a pesar de tener la misma cantidad de datos ausentes. Sin embargo, ambos modelos de

regresión lineal son óptimos para la estimación de los datos faltantes con valores de  $r^2$  cercanos a 1.



**Figura 20.** Gráfico del modelo de regresión lineal para la estimación de datos ausentes de temperatura mínima.

En el caso de la humedad relativa máxima (HR<sub>máx</sub>) el coeficiente de determinación es de 0,99 lo que indica que el modelo de regresión lineal es adecuado para la estimación de datos ausentes. A pesar de que en este caso la cantidad de datos faltantes es mayor, representado por un 4%, el porcentaje de variación promedio entre los datos de humedad en la serie meteorológica evaluada es de 2,19%. Lo que indica que los valores de humedad relativa máxima alcanzados en un día, se encuentran en su mayoría entre los 95 – 100% haciendo que el porcentaje de variación sea bajo en comparación con las otras variables meteorológicas analizadas anteriormente, esto se relaciona con lo observado en la Figura 21.



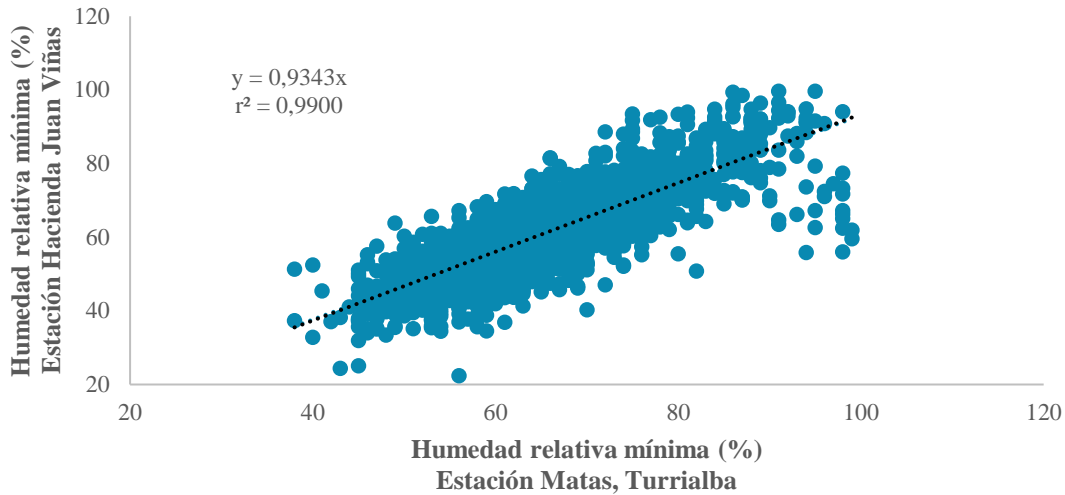
**Figura 21.** Gráfico del modelo de regresión lineal para la estimación de datos ausentes de humedad relativa máxima.

En la Figura 21 se puede observar que el comportamiento de los datos para la humedad relativa máxima presenta un patrón diferente en comparación a las otras variables meteorológicas analizadas. Al construir el modelo de regresión lineal se relaciona el valor de HR<sub>máx</sub> obtenido a través de dos estaciones meteorológicas geográficamente distintas, en un día. En el eje x se observan las mediciones de HR<sub>máx</sub> para la estación meteorológica ubicada en Matas de Turrialba, donde el valor que más se repite en la serie de datos graficada se encuentra en el rango de 95 – 100%. Mientras que para la estación ubicada en la HJV (eje y) el rango de valores con mayor ocurrencia es de 85 – 100%.

Para ambas variables la moda estadística es 100% de HR<sub>máx</sub> con una frecuencia del 58% para la estación Matas y un 57% para HJV. Lo cual implica que al relacionar ambos conjuntos de datos al menos el 57% de los valores va a contener un 100% de humedad relativa máxima en el par ordenado. Por esta razón, al graficar el modelo de RL se observa una distribución vertical de los datos para el rango de HR entre 95 – 100%. El comportamiento identificado en la Figura 21 indica que la variación entre ubicaciones geográficas para la variable meteorológica de HR<sub>máx</sub> es mínima del 3%. Debido a que la zonas de Juan Viñas y Turrialba comparten condiciones meteorológicas similares al comparar los valores máximos alcanzados en un día de medición, para las diferentes variables climáticas medidas en el sitio, como es el caso de la HR<sub>máx</sub>.

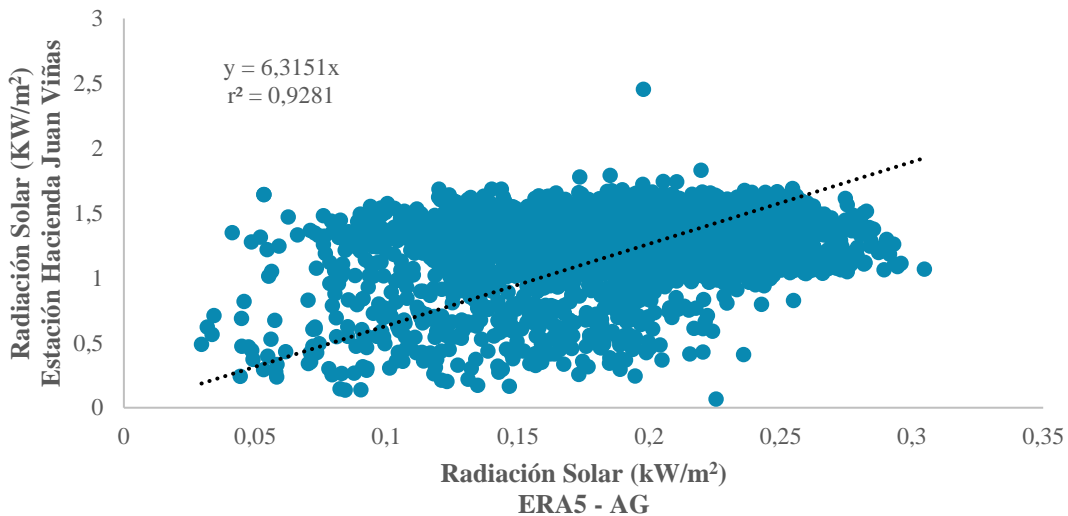
Al crear el modelo de RL para la humedad relativa mínima (HR<sub>mín</sub>) se obtuvo un  $r^2$  de 0,99 lo cual es igual al obtenido para las variables de temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa máxima (Figura 22). Sin embargo, presenta el porcentaje de variación promedio más elevado, el cual es de 12,77%, lo que indica que la humedad relativa mínima tiene una mayor variación de un día a otro y que los valores registrados en la serie meteorológica evaluada varían entre sí. Sin embargo, el modelo sigue siendo óptimo para la estimación de los datos faltantes ya que el valor de  $r^2$  es cercano a 1, con un nivel de confianza del 95%.

Este comportamiento se explica debido a que el vapor de agua que se encuentra suspendido en la atmósfera es capaz de cambiar las características térmicas del aire, lo que ocasiona un efecto invernadero que interactúa con las variaciones de temperatura durante el día. Este efecto se encuentra estrictamente relacionado con las variaciones en la humedad relativa que son más fluctuantes para los valores mínimos en un periodo determinado de tiempo. Por esta razón, el porcentaje de variación obtenido para los valores mínimos tanto de temperatura como de humedad relativa son mayores que para las series meteorológicas con registro de valores máximos (Tejeda Martínez et al., 2018).



**Figura 22.** Gráfico del modelo de regresión lineal para la estimación de datos ausentes de humedad relativa mínima.

Por último, se calculó el modelo de regresión lineal para la radiación solar, cuyo coeficiente de determinación es de 0,92 lo que indica que la bondad de ajuste del modelo es la más baja obtenida en comparación con el resto de las variables meteorológicas evaluadas anteriormente (Figura 23). Esto debido a que el registro de radiación solar cuenta con el mayor porcentaje de datos ausentes de todas las variables climáticas analizadas, correspondiente a un 31%. Además, el porcentaje de variación promedio entre los datos de la serie es igual a 16,56%, lo que representa una mayor variabilidad en la serie de radiación solar para el periodo evaluado. Sin embargo, a pesar de tener el  $r^2$  más bajo, el modelo sigue siendo útil para estimar los datos ausentes, ya que el valor es cercano a 1 y superior a 0,9 para un nivel de confianza del 95%.



**Figura 23.** Gráfico del modelo de regresión lineal para la estimación de datos ausentes de radiación solar.

Debido a que el modelo utilizado para estimar los datos ausentes es de RL, además del  $r^2$  se calculó el RMSE, el cual es un parámetro sumamente utilizado para evaluar el error en modelos de RL. Por sí mismo, el valor de RMSE no determina la fiabilidad del modelo, sin embargo, al utilizar ambos parámetros para evaluar el modelo los resultados son mucho más fiables. En este sentido, cuando se obtiene un valor de RMSE cercano a 0 y un valor de  $r^2$  cercano a 1 se puede decir que la precisión del modelo para estimar datos es la adecuada (Soto Bravo y González Lutz, 2019).

En este caso específico, se considera un valor de RMSE óptimo entre 0 y 5 °C para la temperatura máxima y mínima, entre 0 y 5% para la humedad relativa máxima y mínima, mientras que para la radiación solar el RMSE óptimo se encuentra entre 0 y 1,5 kW/m<sup>2</sup> (Leal et al., 2010). Debido a que los valores obtenidos para el  $r^2$  fueron los ideales (cercanos a 1). En el Tabla 10 se puede observar que la variable de humedad relativa mínima presenta el valor de RMSE mayor en comparación con el resto de las variables evaluadas. Para cada variable meteorológica estimada el valor del RMSE se encuentra dentro del rango óptimo lo cual indica que los datos observados (serie obtenida de la estación meteorológica Matas) y los datos estimados para la serie obtenida de la estación meteorológica Hacienda Juan Viñas se ajustan adecuadamente a la línea de tendencia. Por lo que se considera que el modelo de RL desarrollado cuenta con una alta precisión (Soto Bravo y González Lutz, 2019).

**Tabla 10.** Error al estimar datos ausentes utilizando el modelo de regresión lineal.

<b>Variable meteorológica</b>	<b>Modelo de regresión lineal</b>	<b><math>r^2</math></b>	<b>RMSE</b>
Temperatura máxima	$y = 0,935x$	0,99	1,75
Temperatura mínima	$y = 0,8611x$	0,99	2,64
Humedad relativa máxima	$y = 0,9869x$	0,99	1,29
Humedad relativa mínima	$y = 0,9343x$	0,99	4,37
Radiación solar	$y = 6,3151x$	0,92	0,06

Por otra parte, en el caso de la radiación solar el valor de RMSE fue el más bajo, correspondiente a 0,06. Por sí solo, el valor de RMSE nos indica que el modelo tiene un ajuste entre los valores observados y los estimados casi perfecto. Sin embargo, cuando analizamos ambos parámetros en conjunto,  $r^2$  y RMSE, se deduce que el ajuste logrado es el menos eficiente. Ya que la serie de radiación solar cuenta con la mayor cantidad de datos ausentes y el porcentaje de variación promedio más elevado, al compararlos con los valores calculados para el resto de las variables meteorológicas analizadas.

Sin embargo, los parámetros de evaluación del modelo obtenidos para la radiación solar se encuentran dentro del rango permisible, lo que permite categorizar el modelo de RL como óptimo para la estimación de datos ausentes. En cuanto al resto de variables meteorológicas analizadas (temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa máxima), los resultados obtenidos tanto para el  $r^2$  como para RMSE se encuentran dentro del rango permisible en cada caso. Por lo tanto, se puede categorizar los modelos desarrollados para la estimación de datos ausentes como óptimos según sea el caso.

### **4.1.3 Condiciones edáficas**

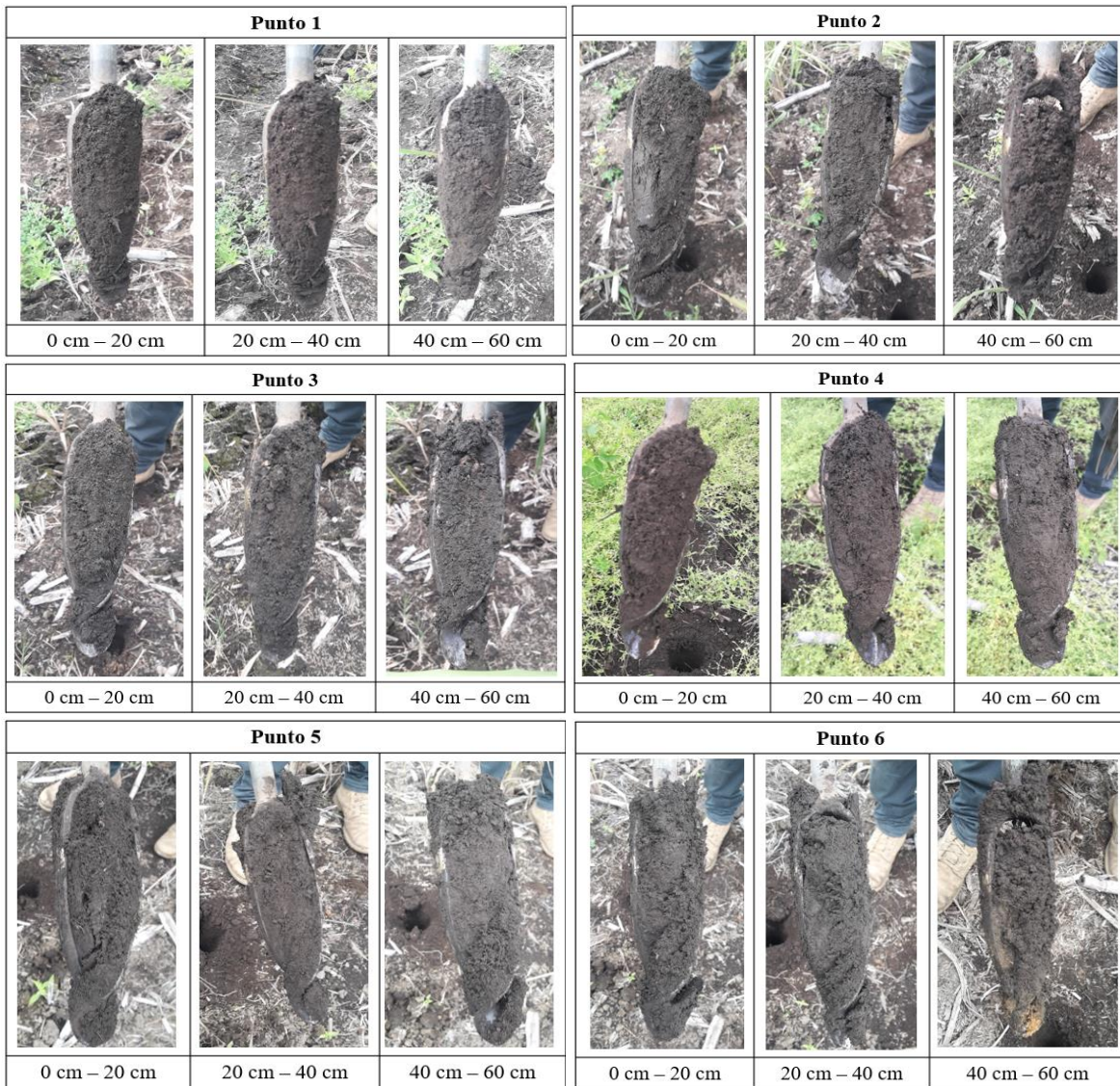
#### **4.1.3.1 Homogeneidad en la textura del suelo**

Para determinar la clase textural del suelo en el lote de estudio se realizó un procedimiento previo que consistió en la evaluación de la homogeneidad en la textura del suelo en campo. Esto permitió identificar las zonas y la profundidad donde ocurría un cambio de textura visible debido a diferencias en la coloración del suelo, dentro del lote de estudio (Tabla A4). Con el objetivo de establecer la ubicación y la cantidad de muestras que se debían recolectar y analizar en el laboratorio para determinar la clase textural del suelo por medio de la prueba de Bouyoucos.

Al analizar los 12 puntos de muestreo establecidos para llevar a cabo la prueba de homogeneidad, se puede observar que los cambios en la coloración del suelo son mínimos al comparar las muestras a la misma profundidad. Los horizontes ubicados a 20 cm y 40 cm de profundidad presentan una coloración oscura homogénea para todos los puntos analizados, lo cual indica que existe una alta presencia de materia orgánica en la composición física del suelo (Figuras 24 y 25).

Por otro lado, el perfil del suelo ubicado a 60 cm de profundidad presenta ligeros cambios en la coloración de la muestra que varían según el punto de muestreo. Dicho cambio de coloración se identifica en la parte inferior del prisma al extraer la muestra de suelo, específicamente para los puntos 6, 7 y 8 lo que indica una mayor presencia de arcilla en los perfiles más profundos del suelo (Figuras 24 y 25). Por otra parte, a los 60 cm de profundidad aproximadamente, ocurre un cambio significativo en la textura del suelo. Sin embargo, el análisis se realiza a una profundidad máxima de 60 cm, la cual corresponde a la profundidad radicular de la variedad LAICA 04-250.

Al analizar los resultados obtenidos a la profundidad máxima establecida, las muestras presentan un porcentaje de homogeneidad del 72,2%; evaluando todas las muestras de suelo tomadas en los 12 puntos seleccionados y a las 3 profundidades establecidas. Debido a los resultados obtenidos se clasificó el suelo del lote de estudio como homogéneo, lo cual indica que el perfil de suelo extraído para cada profundidad evaluada (20 cm, 40 cm y 60 cm) tiene una misma clase textural.



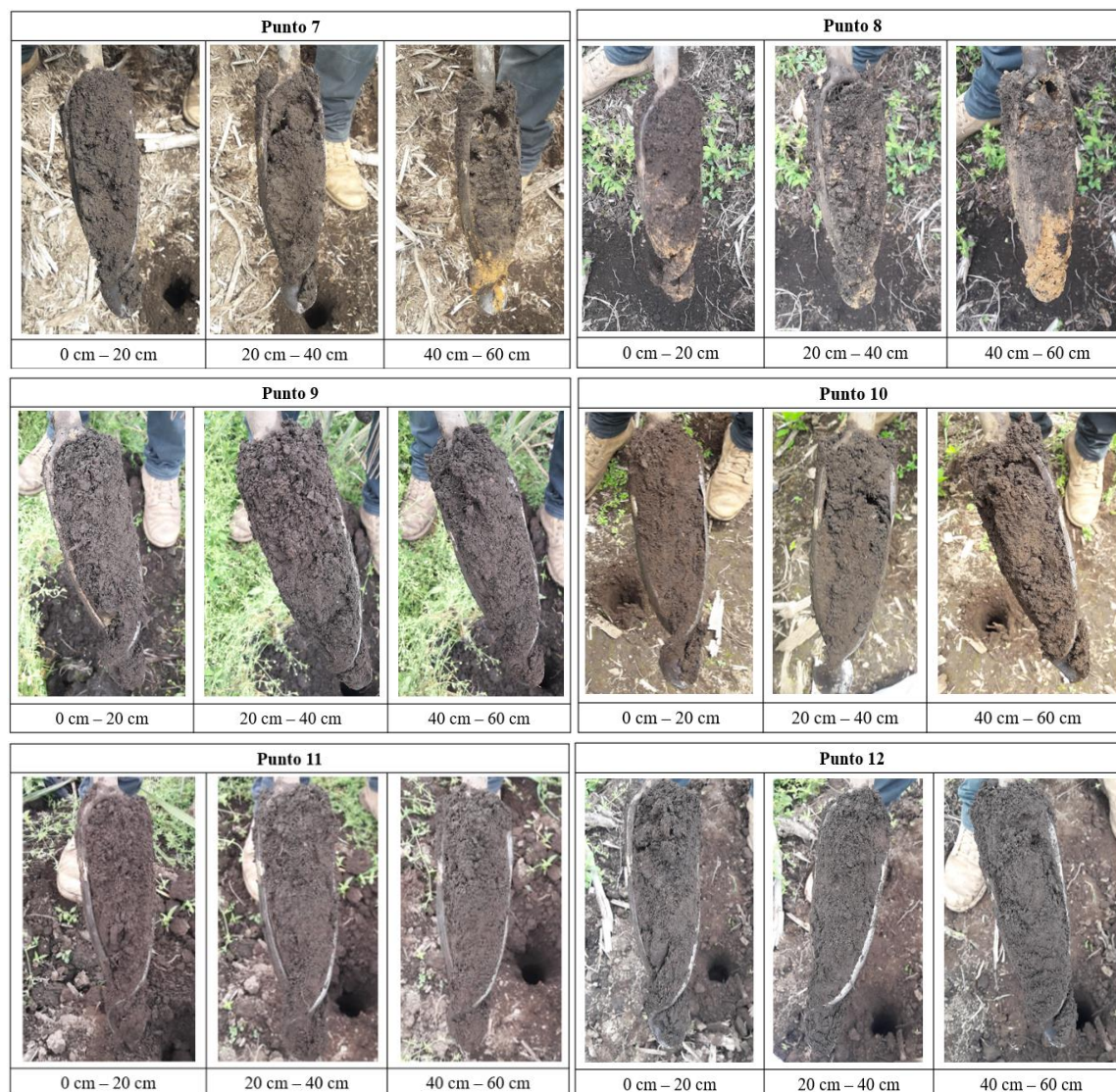
**Figura 24.** Prueba de homogeneidad del punto 1 al punto 6.

Según el mapa de suelos de Costa Rica creado por el Centro de Investigaciones Agronómicas, el cantón de Jiménez se constituye principalmente por un suelo de tipo andisol (Mata Chinchilla, 2019). Las características del suelo observadas durante la prueba de homogeneidad en el lote de estudio concuerdan con las propiedades físicas de los suelos andisoles. Ya que se caracterizan por ser derivados de material volcánico con altos contenidos de materia orgánica por ende su coloración varía de oscuro a pardo oscuro principalmente (Chaves Solera y Chavarría Soto, 2017).

Además, en perfiles profundos predominan las arcillas alófanicas por lo que la coloración cambia a pardo claro. Los suelos andisoles comúnmente presentan texturas de tipo medias como franco arenosas, francos, franco limosas o franco arcillosas (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2015). Estas tonalidades mencionadas anteriormente se presentaron en todas las muestras analizadas, lo que indica



que la categorización de suelo homogéneo es adecuada para definir el comportamiento de la textura en el lote de estudio.



**Figura 25.** Prueba de homogeneidad del punto 7 al punto 12.

#### 4.1.3.2 Textura del suelo

El análisis para determinar la textura del suelo en el lote de estudio se realizó partiendo de los resultados obtenidos durante la prueba de homogeneidad. La categorización de suelo homogéneo permitió establecer la cantidad de muestras a procesar en el laboratorio, identificando 3 puntos de interés para los cuales se realizó la prueba de Bouyoucos determinando así el porcentaje de arcilla, limo y arena presente en cada muestra (Tabla A5 y A6). Los resultados obtenidos al implementar la metodología de Bouyoucos concuerdan con un suelo homogéneo, ya que la textura determinada en cada punto de muestreo es igual para todas las muestras analizadas a la misma profundidad (Tabla 11). Para las profundidades de 0 - 20 cm y 40 - 60 cm la textura es franco arcillosa, mientras que para la profundidad de 20

- 40 cm la textura es franca. Estos resultados son los esperados ya que las clases texturales obtenidas coinciden con las indicadas teóricamente para los suelos de tipo andisol (INTA, 2015).

Además, los resultados obtenidos se compararon con el registro de calicatas realizado por el CIA para la elaboración del mapa de suelos de Costa Rica. Donde se encuentra información referente a los puntos muestreados por provincia identificando las propiedades fisicoquímicas del suelo como pH, acidez, clase textural, porosidad, CICE, material parental, fertilidad, clasificación taxonómica, entre otros. Analizando todas las calicatas cercanas a la zona de Juan Viñas se identificó que las principales clases texturales son de características medias como francas, franco arenosas, franco arcillosas y franco arcillo arenosas (Chaves Solera y Chavarría Soto, 2017).

**Tabla 11.** Determinación de la textura del suelo según los porcentajes de arcilla, limo y arena obtenidos a partir de la prueba de Bouyoucos.

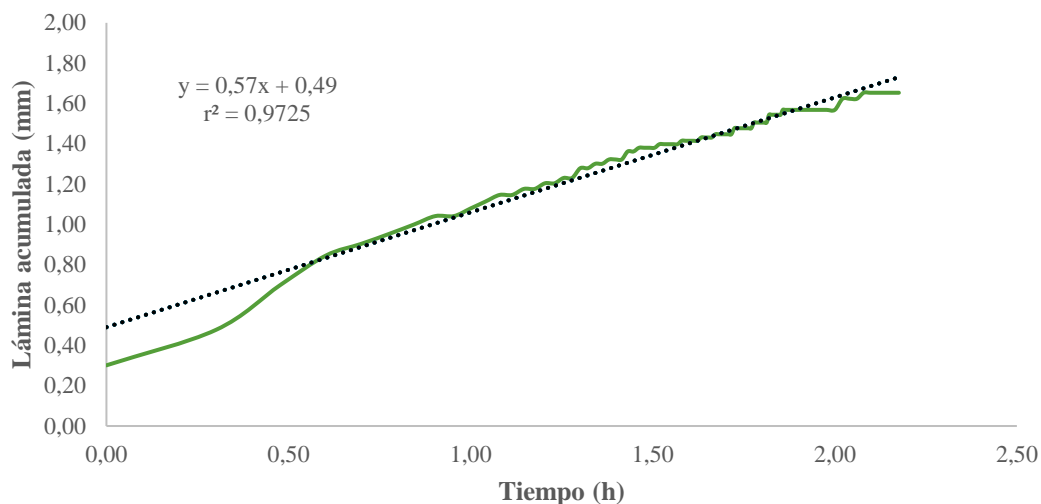
Punto	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura del suelo
1	0 - 20	28,77	31,82	39,41	Franco arcilloso
1	20 - 40	27,21	32,35	40,44	Franco
1	40 - 60	31,01	33,01	35,98	Franco arcilloso
6	0 - 20	29,16	38,31	32,54	Franco arcilloso
6	20 - 40	24,90	35,22	39,88	Franco
6	40 - 60	28,67	33,35	37,98	Franco arcilloso
9	0 - 20	28,13	36,91	34,96	Franco arcilloso
9	20 - 40	24,90	35,22	39,88	Franco
9	40 - 60	28,67	33,35	37,98	Franco arcilloso

Por otra parte, según Ciancaglini (2016) el porcentaje de arcilla para un suelo franco arcilloso debe encontrarse entre 28 – 40%, el porcentaje de limo debe estar dentro del rango de 25 – 50% aproximadamente y el contenido de arena debe rondar los 20 – 45%. Mientras que para un suelo franco el porcentaje de arcilla debe ser inferior al 28%, según lo visualizado en el triángulo textural. Tomando estos rangos en cuenta, se puede observar que los resultados obtenidos a partir de la prueba de Bouyoucos aplicada al análisis textural del suelo en el lote de estudio son los esperados (Tabla 11). Además, coinciden con el tipo de suelo característico de la zona y los resultados obtenidos en la prueba de homogeneidad realizada previamente.

#### 4.1.3.3 Tasa de infiltración

Al determinar la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica saturada se establecieron dos puntos de muestreo de interés, dividiendo el lote de estudio en una zona alta y una baja, esto debido a que anteriormente se clasificó el suelo como homogéneo. La tasa de infiltración del suelo relaciona la lámina parcial que se infiltra en función del tiempo, el comportamiento esperado indica que conforme pasa el tiempo menor es la cantidad de agua que se infiltra debido a que el suelo está llegando a saturación (Masías et al., 2018).

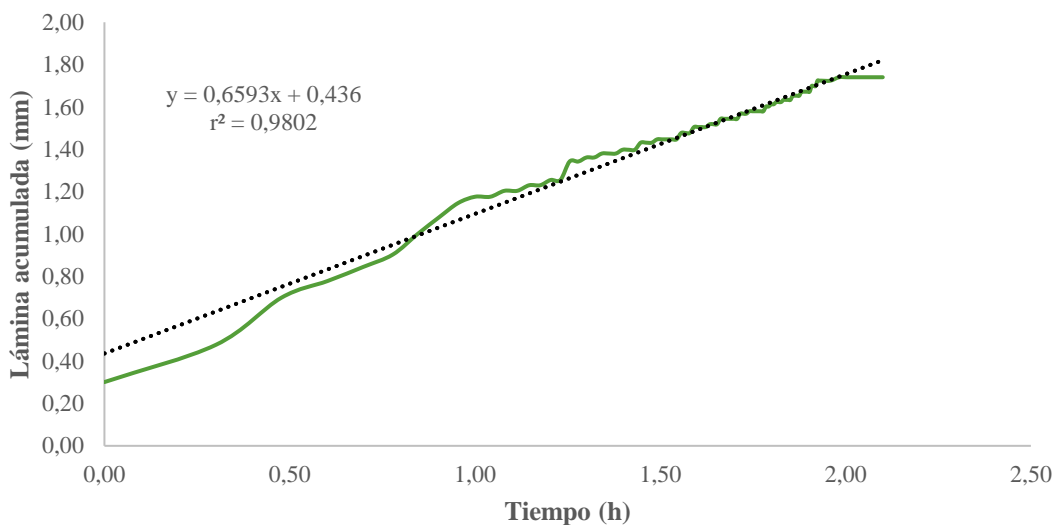
Los resultados obtenidos se representan en el gráfico de la Figura 26, en el cual se observa una tendencia creciente debido a que se utilizó la lámina acumulada para determinar la tasa de infiltración del suelo, la cual tiene su valor máximo al alcanzar la saturación. Por lo tanto, el comportamiento de la curva fue el esperado según lo establecido en la teoría. Además, el valor de  $r^2$  obtenido de la correlación fue de 0,97 esto indica que la bondad de ajuste de la tasa de infiltración es alta (Tabla 12).



**Figura 26.** Tasa de infiltración del suelo obtenida para la zona alta del lote de estudio.

Por otra parte, la tasa de infiltración obtenida para la zona baja del lote de estudio se representa en el gráfico de la Figura 27, donde se puede observar que el comportamiento es muy similar al obtenido para la zona alta. La conducta es creciente, su valor máximo se da cuando el suelo alcanza la saturación, esto coincide con los resultados obtenidos anteriormente para la parte alta del lote, además, el valor de  $r^2$  calculado fue de 0,98 lo que concuerda con una bondad de ajuste alta. Los resultados obtenidos se representan en el gráfico de la Figura 26, en el cual se observa una tendencia creciente debido a que se utilizó la lámina acumulada para determinar la tasa de infiltración del suelo, la cual tiene su valor máximo al alcanzar la saturación.

Por lo tanto, el comportamiento de la curva fue el esperado según lo establecido en la teoría. Además, el valor de  $r^2$  obtenido de la correlación fue de 0,97 esto indica que la bondad de ajuste es alta. El coeficiente de infiltración obtenido para la zona alta fue de 2,64 mm/min mientras que para la zona baja el valor fue de 2,36 mm/min, esto indica que la infiltración presente en el suelo es homogénea para todo el lote, ya que los valores obtenidos para ambos puntos de muestreo son muy similares con una diferencia de  $\pm 0,28$  mm/min (Tabla 12).



**Figura 27.** Tasa de infiltración del suelo obtenida para la zona baja del lote de estudio.

Según Génova et al. (2017) los suelos que se caracterizan por una textura arenosa o franco arenosa presentan valores para el coeficiente de infiltración entre los 10 y 30 mm/min, mientras que para texturas más estables los valores son mucho menores aproximados a 0,6 mm/min para suelos con altos contenidos de arcilla. Por otra parte, según Macías et al. (2018) el rango del coeficiente de infiltración común para suelos compuestos por limos, arenas finas, suelos francos o arcillas estratificadas se encuentra en el orden de  $10^{-7} - 10^{-3}$  cm/s lo cual coincide con los valores reportados correspondiente a un tipo de suelo franco y franco arcilloso (Tabla 12).

**Tabla 12.** Lámina de infiltración constante a saturación del suelo en el lote de estudio.

Punto de muestreo	$K_s$ (mm/min)	$K_s$ (cm/s)	$r^2$
Zona alta	2,64	$4,40 \times 10^{-3}$	0,97
Zona baja	2,36	$3,93 \times 10^{-3}$	0,98

Por último, los resultados obtenidos para la conductividad hidráulica calculados a partir de las ecuaciones de pedotransferencias para los horizontes 20, 40 y 60 cm corresponden a 170, 201,2 y 140,2 mm/día. Al evaluar la precisión del modelo utilizado para calcular la conductividad hidráulica se obtiene un error del 0,20% para la capacidad de campo, 0,12% para el punto de marchitez permanente y un 0,22% para la tasa de infiltración.

#### 4.1.3.4 Retención de humedad

El análisis de retención de humedad fue realizado por el Centro de Investigaciones Agronómicas, las muestras fueron recolectadas siguiendo la división establecida para la prueba de infiltración considerando una zona alta y una baja dentro del lote de estudio (Tabla A3). Los resultados reportados para la capacidad de campo a una profundidad de 20 cm fueron de 31% para la zona alta y de 34% para la zona baja. Este comportamiento se repite para las profundidades de 40 cm y 60 cm con diferencias de  $\pm 0,1\%$  entre ambos valores, lo

cual tiene concordancia con un suelo homogéneo (Tabla 13). Considerando las diferentes profundidades analizadas en conjunto un valor de capacidad de campo entre 30 – 35% indica que se requiere de al menos 30 g y hasta 35 g de agua en 100 g de suelo para alcanzar el punto en CDC (Cherlinka, 2022). Además, los valores obtenidos para el primer y tercer horizonte son similares debido a que cuentan con la misma textura franco arcillosa.

**Tabla 13.** Valores obtenidos para la capacidad de campo y punto de marchitez permanente a partir de la prueba de retención de humedad.

<b>Punto</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Capacidad de campo (%)</b>	<b>Punto de marchitez permanente (%)</b>	<b>Agua útil (%)</b>
Zona baja	0 - 20	34,00	19,00	13,00
Zona baja	20 - 40	31,20	16,80	14,00
Zona baja	40 - 60	33,00	11,30	23,00
Zona alta	0 - 20	31,00	14,00	18,00
Zona alta	20 - 40	29,00	12,80	19,00
Zona alta	40 - 60	30,50	23,50	7,00

Por otra parte, los resultados obtenidos para el punto de marchitez permanente presentan un comportamiento similar, en el caso de la zona alta a una profundidad de 20 cm se tiene un 14% y para la zona baja un valor de 19%. Lo que indica que para el perfil superficial del suelo se demanda una menor cantidad de agua para que la planta alcance el punto de marchitez permanente, debido a que se requiere de al menos 14 g de agua en 100 g de suelo. Mientras que para la profundidad de 40 cm el PWP es de 12,80% para la zona alta y 16,80% para la zona baja. Por el contrario, para los perfiles inferiores del suelo el requerimiento de agua es mayor, de al menos 23,50 g de agua para una profundidad de 60 cm en 100 g de suelo para la zona alta (Tabla 13) (Cherlinka, 2022).

El valor teórico para la variable de capacidad de campo para un suelo con propiedades granulométricas medias, como lo son la familia de suelos francos, se encuentra alrededor del 40,38% dependiendo del porcentaje de arcilla, limo y arena presentes en el suelo. Considerando este porcentaje como referencia, se puede decir que los resultados obtenidos fueron los esperados para el tipo de suelo analizado (franco y franco arcilloso), ya que el valor teórico es un promedio. Por otra parte, los valores teóricos para el PWP indican que para estos tipos de suelo el valor debe ser inferior al 14%, lo cual concuerda con los resultados obtenidos (Hossne García et al., 2009).

## **4.2 Objetivo 2: Determinación del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar**

### **4.2.1 Programa AquaCrop**

### **4.2.2 Datos de entrada para el modelo AquaCrop**

Según los parámetros requeridos por el modelo AquaCrop, se estableció la cantidad de datos de entrada necesarios para realizar la simulación del requerimiento hídrico del cultivo de

caña de azúcar para la zona de Juan Viñas. Estos datos incluyen las variables externas, las variables de estado y los parámetros no conservativos que componen cada módulo de información. Cada variable fue incorporada en el modelo durante el proceso de simulación histórica. Como se puede apreciar en el Tabla 14 el módulo del cultivo contiene una mayor cantidad de datos requeridos, esto ocurre ya que el cultivo es uno de los parámetros críticos del modelo AquaCrop. Debido a que la información específica sobre las propiedades fisiológicas y fenológicas permite calcular el rendimiento agrícola a partir del desarrollo del dosel y la producción de biomasa en función de la disponibilidad de agua que tiene el cultivo (Cortés Bello et al, 2013). Por esta razón, se debe garantizar una especificación de los datos de entrada relacionados con las características propias de la variedad y el tipo de cultivo que se está simulando.

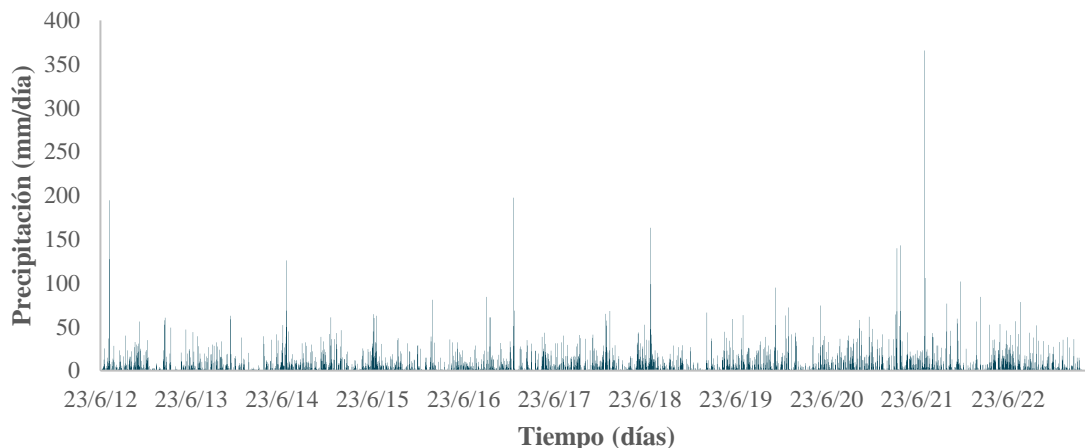
**Tabla 14.** Datos de entrada de AquaCrop considerados para el modelaje del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar (Cortés Bello et al., 2013).

Módulo de clima	Módulo de cultivo	Módulo de suelo	Módulo de gestión
Precipitación (mm/día)	Fenología del cultivo	Textura y tipo de suelo	Grado de fertilidad del suelo respecto al cultivo
Temperatura máxima y mínima (°C)	Emergencia y senescencia (días)	Número de perfiles	Presencia de acolchados o residuos de cosecha
Radiación Solar (MJ/m <sup>2</sup> /día)	Densidad de siembra (plantas/ha)	Punto de marchitez permanente (%)	Capa de agua permanente sobre el suelo
Velocidad del viento (m/s)	Cobertura inicial del dosel [CCo] (%)	Punto de saturación (%)	
Presión de vapor (kPa)	Cobertura máxima del dosel [CCx] (%)	Punto en capacidad de campo (%)	
	Índice de cosecha [HI] (%)	Infiltración (mm/día)	
	Fecha de siembra	Número de curva [CN]	
	Método de siembra	Lámina rápidamente evaporable [REW] (mm)	
	Temperatura base y máxima (°C)		
	Profundidad radicular (m)		
	Días a máxima profundidad radicular		
	Productividad de agua [WP*] (g/m <sup>2</sup> )		

#### 4.2.2.1 Análisis del registro meteorológico histórico

El análisis meteorológico se realizó utilizando el registro histórico proporcionado por la empresa Hacienda Juan Viñas S. A. y complementado con la información climática facilitada por el IMN. La estación ubicada dentro de la Hacienda Juan Viñas contiene el registro más completo de la información necesaria para completar los datos de entrada del modelo. Mientras que los datos ausentes fueron calculados utilizando la estación meteorológica Matas ubicada en Turrialba, la cual cuenta con información para los días que no presentan lecturas en la serie climática de la estación Hacienda Juan Viñas, que es utilizada como base para la serie climática requerida por el módulo del clima en AquaCrop. El clima en la zona de Juan Viñas se caracteriza por la presencia de un régimen estacional, lo que indica que la climatología de un año se divide en dos estaciones bien definidas. Considerando una época seca que se extiende desde diciembre hasta marzo con un periodo de transición situado en el mes de abril y una época lluviosa que inicia en el mes de mayo y finaliza en octubre, observando al mes de noviembre como un periodo transitorio (IMN, 2015).

La climatología requerida como datos de entrada para el módulo de clima en AquaCrop se caracteriza por el registro histórico de precipitación (mm), temperatura máxima y mínima (°C), presión de vapor (kPa), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día) y velocidad del viento (m/s) propias del área de estudio. En la Figura 28 se muestra la precipitación obtenida durante el periodo histórico establecido, iniciando el 23/6/2012 y finalizando el 30/5/2023. El registro presenta una precipitación promedio de 6,54 mm al día con un valor máximo de 365,6 mm medido el día 23 de julio de 2021.



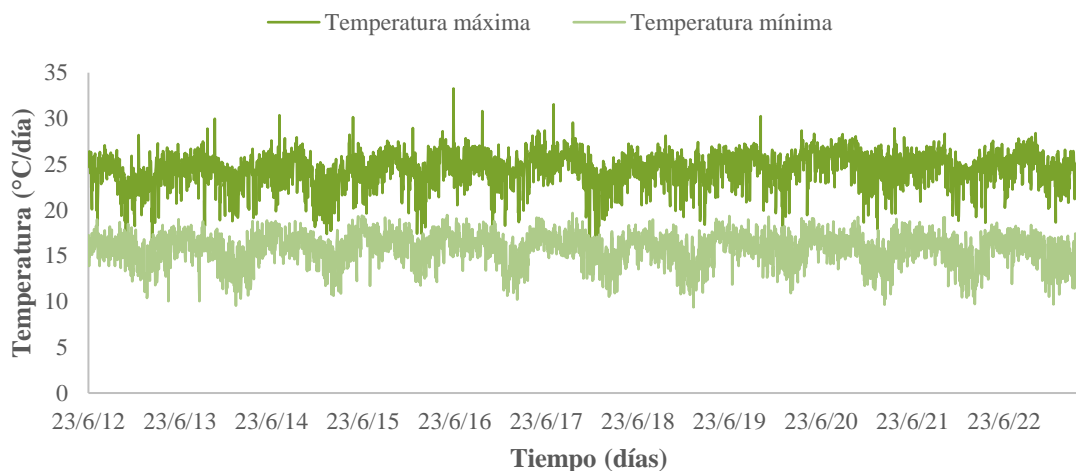
**Figura 28.** Registro histórico de la precipitación diaria presentada en el lote de estudio para el periodo comprendido entre el 23/6/2012 y el 30/5/2023 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima para el modelo AquaCrop.

Además, se puede observar un comportamiento estacional de la precipitación característica de la zona, ya que los valores pico se dan aproximadamente cada 2 años en el mes de julio, lo que indica la presencia de oscilaciones periódicas relacionadas a la tendencia propia de los datos climáticos. Por otra parte, se observan una diferencia en la cantidad y en la frecuencia obtenida al comparar la precipitación durante los primeros 5 años del registro (23/6/2012 –

10/12/2017) con un valor promedio de 5,95 mm al día con respecto a los últimos 5 años de la serie, donde se obtuvo un promedio de 7,12 mm al día (10/12/2017 – 30/5/2023).

Este comportamiento es atribuido a las características climáticas propias de la zona de Juan Viñas. Ya que, se encuentran moduladas por la variabilidad climática relacionada con la distribución temporal y espacial de los fenómenos meteorológicos en Costa Rica, su ubicación dentro del territorio nacional y la altitud (Lutz Porras, 2017). Además, según las estimaciones planteadas en el estudio sobre las proyecciones de CC regionalizadas para Costa Rica realizado por el IMN, la lluvia media anual presenta un incremento progresivo en el tiempo para esta zona del país (Alvarado Gamboa, 2021). Lo cual concuerda con el comportamiento observado en el registro histórico mostrado en la Figura 28.

Por otra parte, el comportamiento de la temperatura registrado en el periodo de estudio analizado se puede observar en la Figura 29. El promedio de la temperatura máxima es de 24,55 °C, la serie presenta un valor pico de 33,27 °C registrado el día 18 de junio de 2016, mientras que su valor mínimo fue de 15,36 °C. Mientras que, para la variable de temperatura mínima se obtuvo un promedio de 15,73 °C, el valor pico se presentó el 6 de octubre de 2017, mientras que su valor mínimo fue de 9,37 °C. Además, se puede observar que se presentan pocas variaciones en la temperatura máxima y mínima durante el periodo de tiempo analizado. Según Alvarado Gamboa (2021) el comportamiento de la temperatura refleja diferencias muy sutiles al comparar los periodos climáticos de corto plazo (10 a 30 años), lo que indica que el comportamiento de esta variable se mantiene sumamente constante a lo largo del periodo de estudio.



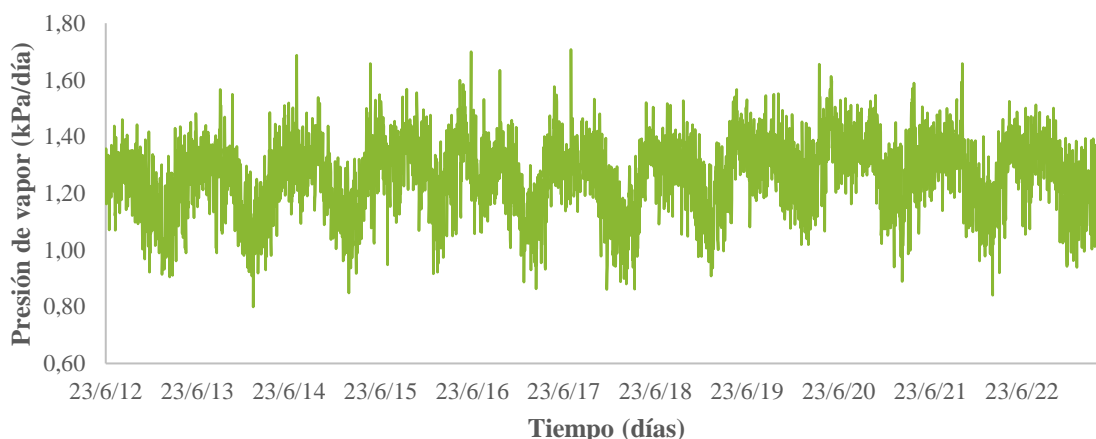
**Figura 29.** Registro histórico de la temperatura máxima y mínima diaria presentada en el lote de estudio para el periodo comprendido entre el 23/6/2012 y el 30/5/2023 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima para el modelo AquaCrop.

Sin embargo, al comparar el promedio de la temperatura obtenido para los primeros 5 años del registro climático con respecto al promedio alcanzado en los últimos 5 años, se puede deducir que existe una tendencia al incremento de la temperatura máxima y una disminución en la temperatura mínima. Ya que, en el caso de la temperatura máxima el promedio fue de



24,38 °C para la primera mitad del registro, mientras que para la segunda mitad fue de 24,72 °C. En el caso de la temperatura mínima el promedio correspondiente a los primeros 5 años fue de 15,90 °C, mientras para los años restantes fue de 15,55 °C. Esto indica un aumento en el rango de temperaturas registradas en función del tiempo, ya que los valores máximos aumentan y los valores mínimos disminuyen.

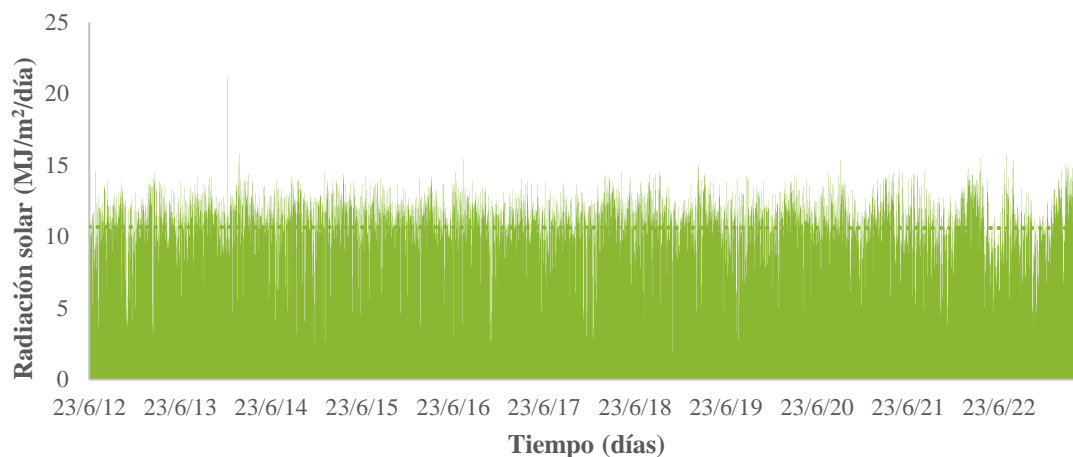
La presión de vapor fue una variable calculada con el objetivo de disminuir el tamaño del set de datos introducido al módulo de clima en AquaCrop. Esta variable está relacionada con la humedad relativa y la temperatura registrada en el sitio de estudio. Como se puede ver en la Figura 30, la presión de vapor registrada para el periodo de estudio analizado presenta un promedio de 1,26 kPa con un valor máximo de 1,71 kPa y un mínimo de 0,80 kPa. El comportamiento de la serie presenta variaciones sutiles en el tiempo, por lo que se puede considerar un comportamiento homogéneo según los periodos de fluctuación relacionados con la estacionalidad climática del país. Al comparar el comportamiento observado en la serie de temperatura (Figura 29) con la variación en la presión de vapor (Figura 30) se puede observar que existe una relación entre las variables. Lo cual indica que a pequeños cambios en la temperatura se producen grandes cambios en la presión de vapor, ya que guardan una relación exponencial cuando se analiza la presión de vapor en función de la temperatura (Allen et al., 2006).



**Figura 30.** Registro histórico de la presión de vapor diaria presentada en el lote de estudio para el periodo comprendido entre el 23/6/2012 y el 30/5/2023 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima para el modelo AquaCrop.

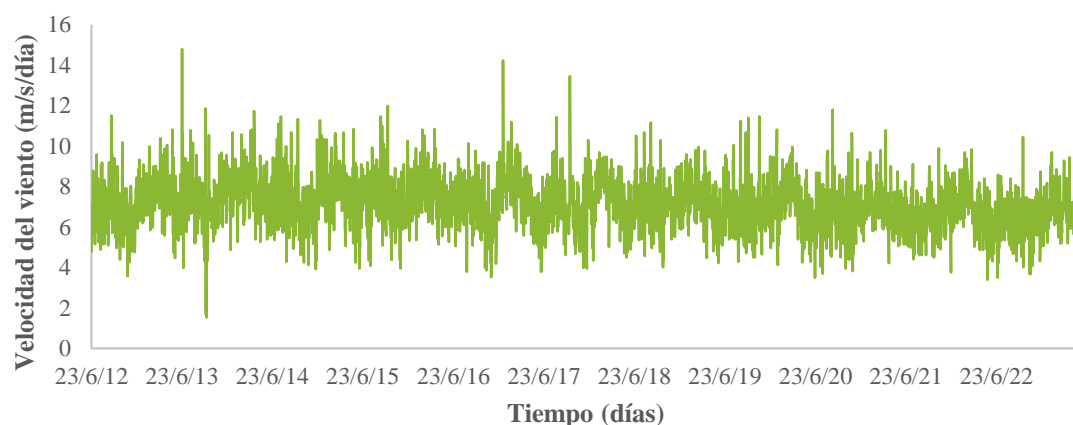
En el caso de la radiación solar los datos registrados durante el periodo de estudio se observan en la Figura 31. Esta variable representa la cantidad de radiación que no es absorbida, dispersada o reflejada por alguno de los componentes atmosféricos y logra llegar a la superficie terrestre en un plano horizontal (Allen et al., 2006). La serie refleja un promedio de 10,64 MJ/m<sup>2</sup>/día, con un valor máximo de 21,20 MJ/m<sup>2</sup>/día ocurrido el día 28 de diciembre de 2013 y un valor mínimo de 3,03 MJ/m<sup>2</sup>/día. El comportamiento de la radiación solar depende de las condiciones atmosféricas por lo que se observa un registro con poca variabilidad en el tiempo. El rango de incidencia exceptuando los valores máximos y mínimos se mantiene considerablemente homogéneo durante el periodo analizado.

Relacionando la serie de precipitación (Figura 28) con la radiación solar se puede observar que cuando se presentan los picos de lluvia se obtienen los mínimos de radiación y viceversa. Esta variable climática es de gran importancia para el modelo, ya que representa el principal insumo para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo realizado por AquaCrop.



**Figura 31.** Registro histórico de la radiación solar diaria presentada en el lote de estudio para el periodo comprendido entre el 23/6/2012 y el 30/5/2023 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima para el modelo AquaCrop.

Por último, en la Figura 32 se observa la serie correspondiente a la velocidad del viento registrada en el periodo de estudio. El valor promedio registrado fue de 7,12 m/s, el valor máximo fue de 14,80 m/s y se presentó el día 23 de junio de 2013. Mientras que el valor mínimo registrado ocurrió el día 30 de setiembre de 2013 y fue de 1,54 m/s. La variabilidad en la velocidad del viento está relacionada a las condiciones geográficas y topográficas presentes en el lote de estudio, además, se debe considerar la influencia de la altitud ya que el área de estudio se encuentra a 1.350 m.s.n.m. En general, según el IMN (2015) cuando se intensifica la velocidad e incidencia del viento la cantidad de lluvia disminuye.

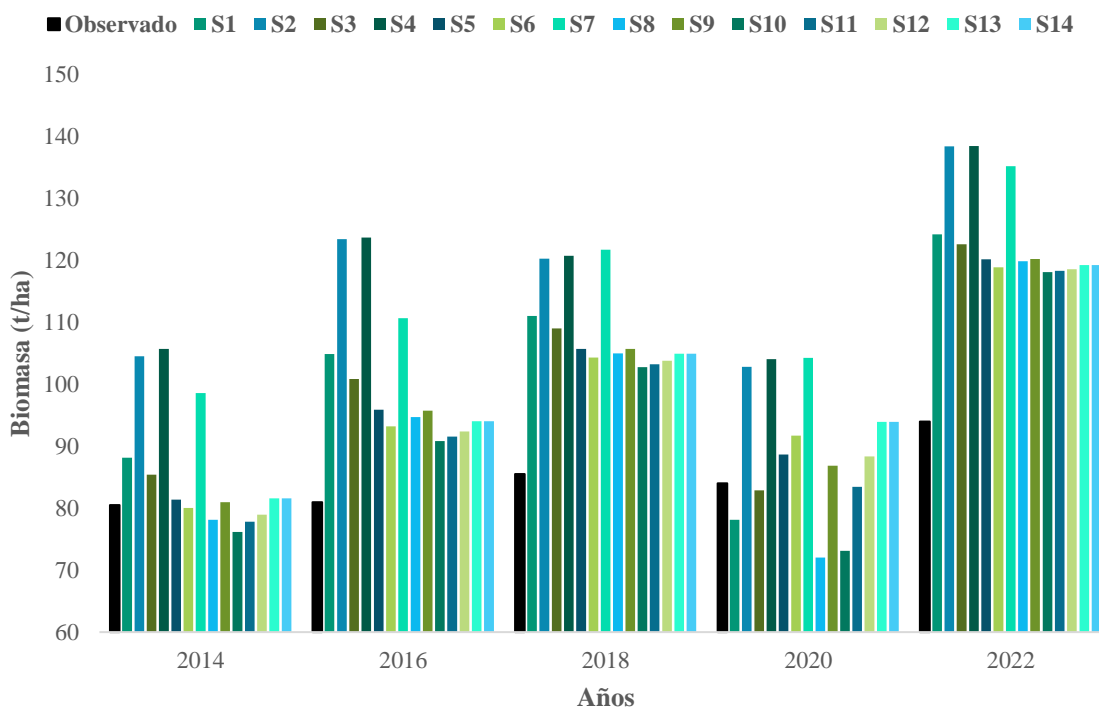


**Figura 32.** Registro histórico de la velocidad del viento diaria presentada en el lote de estudio para el periodo comprendido entre el 23/6/2012 y el 30/5/2023 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima para el modelo AquaCrop.

### 4.2.3 Ajuste del modelo

Los resultados obtenidos del proceso de ajuste del modelo AquaCrop, aplicado a los parámetros no conservativos del módulo de cultivo se observan en la Tabla 15. Se realizaron 14 simulaciones para las cuales se varió de 2,0 – 2,5 %/día el coeficiente de crecimiento (CGC) que es utilizado por el modelo para simular la expansión del dosel entre la emergencia del cultivo y el final del desarrollo. Y el coeficiente de decaimiento (CDC) de 6,5 – 8,5 %/día, que se utiliza para describir la etapa de senescencia del cultivo cuando se acerca a la madurez (FAO, 2022).

Además, se ajustó la duración de algunas de las etapas del ciclo fenológico, específicamente se variaron los días a máxima cobertura del dosel y la senescencia del cultivo. En la Figura 33 se pueden observar los resultados de producción de biomasa al final del ciclo del cultivo para cada una de las simulaciones realizadas durante el ajuste del modelo. Como se muestra a simple vista, las simulaciones 5, 6 y 11 presentan los valores de biomasa más cercanos al observado, sin embargo, se requiere de más información para seleccionar el mejor ajuste del modelo. Por esta razón se calcularon una serie de parámetros de evaluación del desempeño para identificar la simulación que presente el mejor ajuste del modelo al comportamiento real registrado por la empresa (Tabla B1).



**Figura 33.** Resultados de biomasa obtenidos al simular los 14 escenarios planteados para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop modificando el coeficiente de crecimiento y coeficiente de decaimiento (S1 = Simulado 1, S2 = Simulado 2, S3 = Simulado 3, S4 = Simulado 4, S5 = Simulado 5, S6 = Simulado 6, S7 = Simulado 7, S8 = Simulado 8, S9 = Simulado 9, S10 = Simulado 10, S11 = Simulado 11, S12 = Simulado 12, S13 = Simulado 13 y S14 = Simulado 14).

En la Tabla 15 se muestra el proceso de validación del ajuste del modelo ejecutado, los resultados obtenidos de biomasa modelada y los valores utilizados para los coeficientes de crecimiento y decaimiento en cada simulación realizada. El mecanismo de validación consistió en comparar los resultados de biomasa simulados con la biomasa observada en campo, con el fin de seleccionar el mejor ajuste del modelo a las condiciones reales registradas por la empresa Hacienda Juan Viñas durante los años evaluados.

Los resultados del ajuste muestran los parámetros de evaluación del desempeño de cada simulación ( $r^2$ , RMSE y RMSE/MAE). Al analizar el comportamiento de la biomasa observada se presenta una tendencia creciente a lo largo de los años, con un mínimo de 80,50 t/ha para el año 2014 y un máximo de 94,00 t/ha en el año 2022, exceptuando el año 2020 donde se presentó una disminución de 1,50 t/ha con respecto al año anterior.

Las simulaciones realizadas presentan un patrón similar a la biomasa observada con una tendencia creciente exceptuando el año 2020. Los criterios utilizados para evaluar el desempeño del modelo AquaCrop en cada simulación indican cuán distante está el valor real del modelado. En este sentido, se puede observar que la simulación 1 presenta ajuste más deficiente, con un promedio del error porcentual calculado para todos los años evaluados, igual a 21,60%. Esto debido a que, para los años 2016, 2018 y 2022 la variación porcentual alcanzó un 29,50%, 29,87% y 32,14% respectivamente. Además, el  $r^2$  fue de 0,49 lo cual se aleja considerablemente de lo esperado, indicando que el ajuste no es adecuado para describir el comportamiento de la producción de biomasa observada en campo.

Por otra parte, el mejor ajuste se obtuvo al utilizar un CGC de 2,0 %/día y un CDC de 8,0 %/día en la simulación número 11. El promedio del error porcentual es de 12,75% y los años que presentaron menores variaciones entre la biomasa observada y la simulada son 2014 con un 3,35% y el año 2020 con un 0,65%. Mientras que el año que registró la máxima variación fue 2022 con un porcentaje de error igual a 25,89%. El coeficiente de determinación es igual a 0,80, el valor de RMSE es de 14,33, mientras que la relación entre RMSE y MAE es de 1,45. Lo cual representa el mejor ajuste del modelo alcanzado al variar los coeficientes de crecimiento y decaimiento en función de los parámetros establecidos para la variable de caña utilizada como patrón de la variable LAICA 04-250.

**Tabla 15.** Resultados del proceso de ajuste del modelo variando el coeficiente de crecimiento y decaimiento del cultivo.

N°S	Año	Bo	Bs	Valores (%/día)		Error porcentual (%)	Error promedio (%)	r <sup>2</sup>	RMSE	MAE	RMSE/MAE
				ajustados CGC	CDC						
1	2014	80,50	88,14			9,48					
	2016	81,00	104,90			29,50					
	2018	85,50	111,04	2,5	7,5	29,87	21,60	0,49	21,11	16,28	1,30
	2020	84,00	78,13			6,99					
	2022	94,00	124,22			32,14					
2	2014	80,50	104,53			29,85					
	2016	81,00	123,44			52,39					
	2018	85,50	120,29	2,4	7,4	40,69	38,52	0,56	34,40	32,90	1,05
	2020	84,00	102,84			22,42					
	2022	94,00	138,43			47,26					
3	2014	80,50	85,40			6,09					
	2016	81,00	100,86			24,52					
	2018	85,50	109,02	2,3	7,3	27,51	17,97	0,63	18,93	15,15	1,25
	2020	84,00	82,89			1,32					
	2022	94,00	122,60			30,43					
4	2014	80,50	105,71			31,32					
	2016	81,00	123,73			52,75					
	2018	85,50	120,77	2,2	7,2	41,25	39,30	0,57	34,88	33,55	1,04
	2020	84,00	104,06			23,88					
	2022	94,00	138,46			47,30					
5	2014	80,50	81,37			1,08					
	2016	81,00	95,91			18,41					
	2018	85,50	105,74	2,1	7,1	23,68	15,33	0,81	16,38	13,39	1,22
	2020	84,00	88,70			5,60					
	2022	94,00	120,21			27,88					
6	2014	80,50	80,02			0,59					
	2016	81,00	93,20			15,06					
	2018	85,50	104,35	2,0	7,0	22,05	14,68	0,87	15,39	12,64	1,22
	2020	84,00	91,73			9,20					
	2022	94,00	118,90			26,49					
7	2014	80,50	98,60			22,48					
	2016	81,00	110,67			36,63					
	2018	85,50	121,72	2,1	8,5	42,36	33,90	0,82	30,43	29,10	1,05
	2020	84,00	104,29			24,15					
	2022	94,00	135,23			43,87					

Bo = Biomasa observada; Bs = Biomasa simulada; N°S = Número de simulación; CGC = Coeficiente de crecimiento; CDC = Coeficiente de decaimiento.

Continuación Tabla 15.

N°S	Año	Bo	Bs	Valores (%/día)		Error porcentual (%)	Error promedio (%)	r <sup>2</sup>	RMSE	MAE	RMSE/MAE
				CGC	CDC						
8	2014	80,50	78,15			2,92					
	2016	81,00	94,73			16,95					
	2018	85,50	105,01	2,1	8,0	22,81	16,89	0,60	16,65	8,96	1,86
	2020	84,00	72,02			14,26					
	2022	94,00	119,87			27,52					
9	2014	80,50	80,99			0,61					
	2016	81,00	95,74			18,20					
	2018	85,50	105,75	2,1	7,5	23,69	14,77	0,78	16,27	12,92	1,26
	2020	84,00	86,88			3,43					
	2022	94,00	120,24			27,91					
10	2014	80,50	76,18			5,36					
	2016	81,00	90,85			12,16					
	2018	85,50	102,76	2,0	8,5	20,19	15,27	0,67	14,93	7,20	2,07
	2020	84,00	73,11			12,97					
	2022	94,00	118,12			25,66					
11	2014	80,50	77,81			3,35					
	2016	81,00	91,59			13,07					
	2018	85,50	103,26	2,0	8,0	20,77	12,75	0,80	14,33	9,89	1,45
	2020	84,00	83,45			0,65					
	2022	94,00	118,34			25,89					
12	2014	80,50	78,98			1,88					
	2016	81,00	92,38			14,05					
	2018	85,50	103,79	2,0	7,5	21,39	13,73	0,85	14,77	11,42	1,29
	2020	84,00	88,35			5,18					
	2022	94,00	118,60			26,17					
13	2014	80,50	98,83			22,77					
	2016	81,00	118,24			45,98					
	2018	85,50	121,64	2,1	6,5	42,27	35,87	0,66	32,05	30,69	1,04
	2020	84,00	104,84			24,81					
	2022	94,00	134,90			43,51					
14	2014	80,50	81,59			1,35					
	2016	81,00	94,05			16,11					
	2018	85,50	104,95	2,0	6,5	22,75	15,78	0,88	16,05	13,76	1,17
	2020	84,00	93,93			11,82					
	2022	94,00	119,27			26,88					

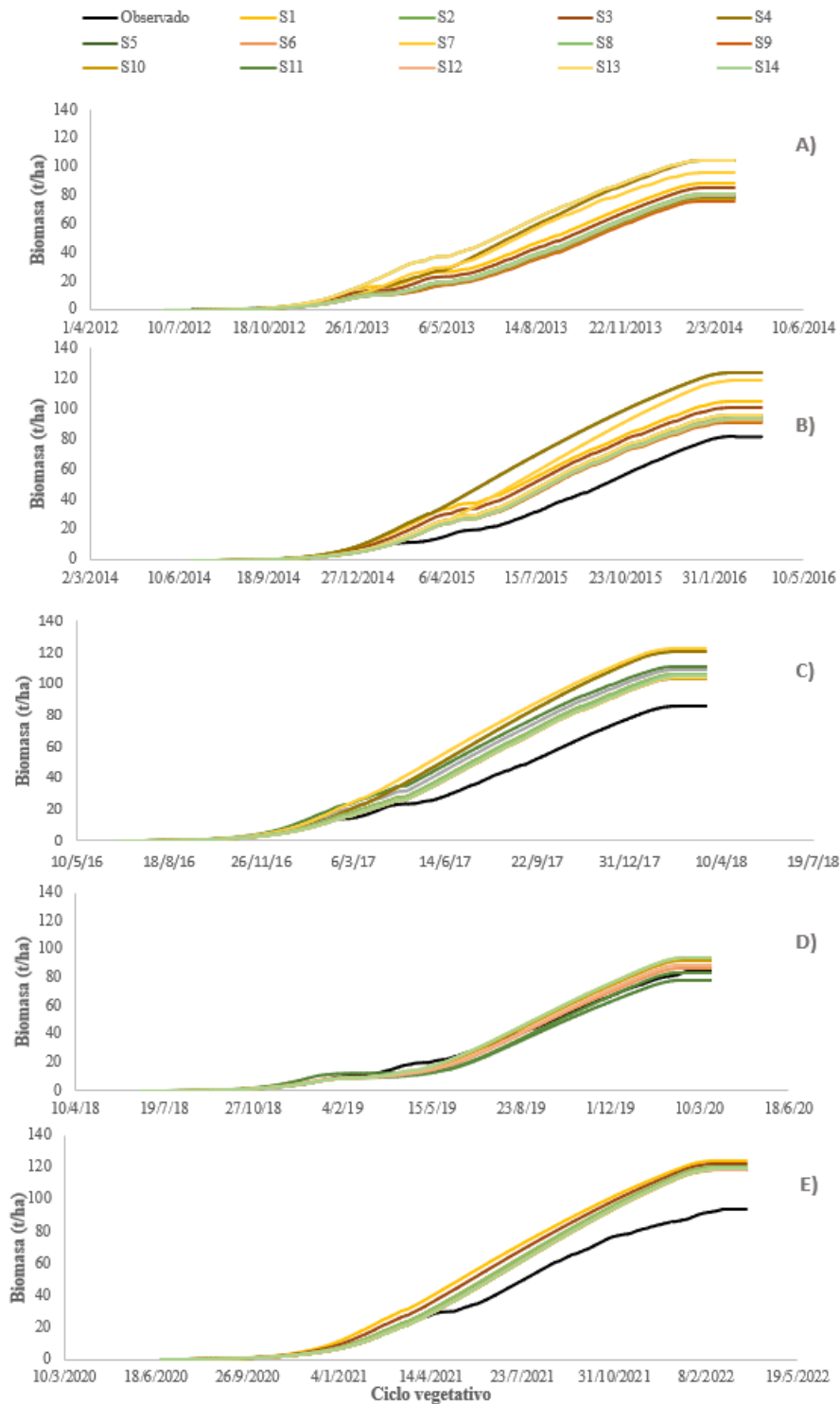
Bo = Biomasa observada; Bs = Biomasa simulada, N°S = Número de simulación; CGC = Coeficiente de crecimiento; CDC = Coeficiente de decaimiento.

En la Figura 34 se muestra la representación gráfica de la producción de biomasa diaria simulada con respecto a la biomasa real observada en campo en función del tiempo, para cada ciclo del cultivo evaluado. El primer ciclo inicia el 23/6/2012 y finaliza el 24/3/2014 (Figura 34 – A). En este caso, se puede observar que el comportamiento de las biomásas simuladas es similar a la biomasa observada a lo largo del primer ciclo del cultivo (S1 = 9,48%, S2 = 29,82%, S3 = 6,09%, S4 = 31,32%, S5 = 1,08%, S6 = 0,59%, S7 = 22,48%, S8 = 2,92%, S9 = 0,61%, S10 = 5,36%, S11 = 3,35%, S12 = 1,88%, S13 = 22,77% y S14 = 1,35). Se presenta una variación promedio en el comportamiento del desarrollo del dosel al comparar las 14 simulaciones realizadas igual a 9,94%. En este primer ciclo se evidencia un comportamiento típico esperado del crecimiento del dosel tanto de la biomasa observada como de la simulada.

Mientras que en la Figura 34-B se muestran los resultados para el segundo ciclo que inicia el 23/6/2014 y finaliza el 23/3/2016. Se puede identificar un comportamiento similar que, al evidenciado para el primer ciclo, sin embargo, al comparar las simulaciones con respecto al comportamiento observado se nota un aumento en la producción de biomasa en cada simulación (S1 = 29,50%, S2 = 52,39%, S3 = 24,52%, S4 = 52,75%, S5 = 18,41%, S6 = 15,06%, S7 = 36,63%, S8 = 16,95%, S9 = 18,20%, S10 = 12,16%, S11 = 13,07%, S12 = 14,05%, S13 = 45,98% y S14 = 16,11). Esto concuerda con el aumento observado en la variación del desarrollo del dosel al comparar el total de las simulaciones realizadas con el comportamiento observado, donde la variación promedio es de 26,13% para el segundo ciclo. Para el tercer ciclo (23/6/2016 - 23/3/2018) la variación promedio en la producción de biomasa simulada con respecto a lo observado fue de 28,66% (Figura 34-C).

Seguidamente, en el cuarto ciclo (23/6/2018 - 23/3/2020) el porcentaje de variación entre el desarrollo de la biomasa simulada versus la observada disminuye a un 11,91%, reflejando una tendencia similar a la observada para el primer ciclo (Figura 34-D). Esto debido, a que en el año 2020 se registra una ligera disminución en la producción de biomasa total al final del ciclo para el registro de datos observado, asociado a una disminución en la precipitación. Si bien, en la realidad la disminución de la biomasa es de 1,50 t/ha con respecto al año anterior, lo que resulta mínima, en la simulación número 11 la disminución en la producción de biomasa es de 19,81 t/ha en comparación al año anterior modelado. Esto debido a que AquaCrop interpreta la disminución en la precipitación con respecto a los valores de biomasa simulados según los años anteriores.

Por último, el comportamiento observado para el quinto ciclo evaluado muestra un aumento considerable con respecto al año anterior, resultando similar a lo observado en campo (Figura 34-E). La variación calculada entre el desarrollo de la biomasa simulado y la observada es de 32,78%. Analizando estos porcentajes de variación se observa una conducta creciente con respecto a los años anteriores exceptuando el año 2020, esto va acorde con el comportamiento del desarrollo del dosel observado en campo.



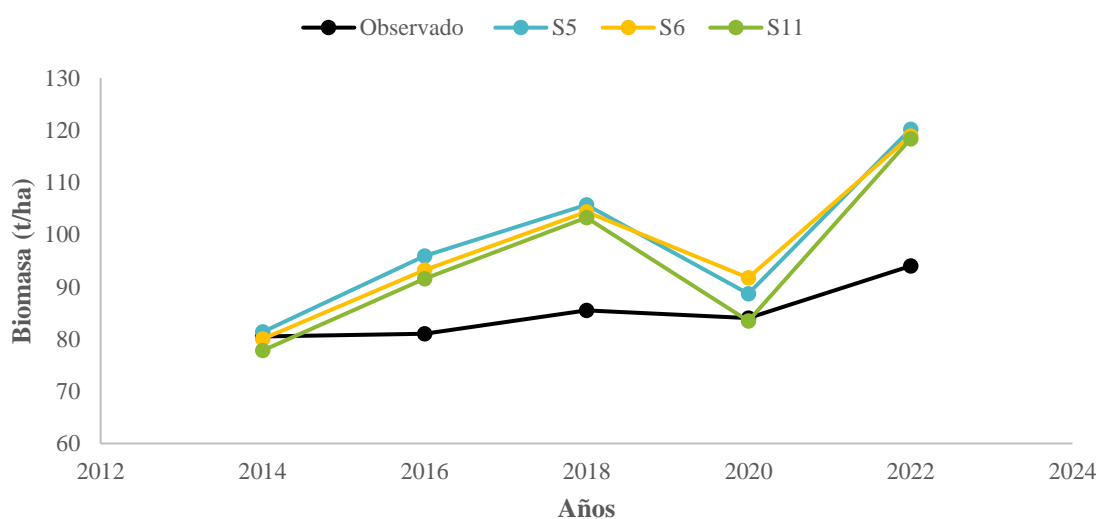
**Figura 34.** Ajuste de la biomasa producida en cada ciclo vegetativo para diferentes simulaciones del modelo AquaCrop durante el proceso de ajuste del modelo variando el coeficiente de crecimiento y decaimiento del cultivo (S1 = Simulado 1, S2 = Simulado 2, S3 = Simulado 3, S4 = Simulado 4, S5 = Simulado 5, S6 = Simulado 6, S7 = Simulado 7, S8 = Simulado 8, S9 = Simulado 9, S10 = Simulado 10, S11 = Simulado 11, S12 = Simulado 12, S13 = Simulado 13 y S14 = Simulado 14).



Por otra parte, las simulaciones que presentaron los mejores ajustes fueron la número 5, 6 y 11 (Figura 35), las cuales obtuvieron un porcentaje para el error promedio de 15,33%, 14,68% y 12,75%, respectivamente (Tabla 15). Sin embargo, para seleccionar el mejor ajuste posible se debe analizar en conjunto todos los parámetros de evaluación calculados y el porcentaje de error para cada ciclo del cultivo por separado.

En la Figura 35 se puede observar el comportamiento en la producción de biomasa total de cada ciclo. El modelo mantiene una tendencia similar entre las simulaciones (S5, S6 y S11), sin embargo, al comparar estas simulaciones con lo observado en campo, se aleja de la realidad en magnitud de biomasa producida. Generalizando, la línea de tendencia graficada en cada caso es creciente a excepción del año 2020 donde existe una caída en la producción de biomasa, lo cual se apega al comportamiento real del cultivo.

Mientras que para los años 2016 y 2018 el comportamiento observado representa una tendencia de desarrollo constante que dista de la conducta simulada, ya que para estos años se presenta un incremento en la cantidad de biomasa producida. Además, se debe considerar que la variedad LAICA 04-250 es desarrollada en Costa Rica y presenta condiciones de crecimiento y desarrollo sumamente particulares. Por esta razón, el modelo AquaCrop utiliza parámetros estandarizados que el modelo no permite modificar para simular esta variedad de caña de azúcar, lo cual hace que el ajuste no sea exacto, pero sí se considera óptimo dentro de las limitaciones del modelo y los objetivos de este proyecto.



**Figura 35.** Biomasa total producida al final de cada ciclo vegetativo evaluado para las simulaciones con mejor ajuste del modelo AquaCrop durante el proceso de ajuste variando el coeficiente de crecimiento y decaimiento del cultivo (S5 = Simulado 5, S6 = Simulado 6, S11 = Simulado 11).

Al analizar en conjunto los parámetros de evaluación calculados se puede deducir que el mejor ajuste del modelo se obtuvo en la simulación número 11 con un promedio del error igual a 12,75% calculado para todos los años evaluados. Además, se obtuvo un valor de  $r^2$  igual a 0,80 lo cual se considera un ajuste aceptable del modelo. Si bien no fue el coeficiente

de determinación más cercano a 1 obtenido durante el proceso de ajuste (Tabla 15), los valores de RMSE y RMSE/MAE fueron los más bajos obtenidos en comparación con el resto de las simulaciones realizadas, con un valor de 14,33 y 1,45, respectivamente. Anudado a esto, el error porcentual calculado individualmente para cada ciclo del cultivo evaluado fueron los menores registrados. Por lo que, al analizar los parámetros de evaluación en conjunto se toma la decisión de considerar la simulación número 11 como el mejor ajuste del modelo AquaCrop para la variedad LAICA 04-250.

#### **4.2.3.1 Requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar ajustado a la variedad LAICA 04-250**

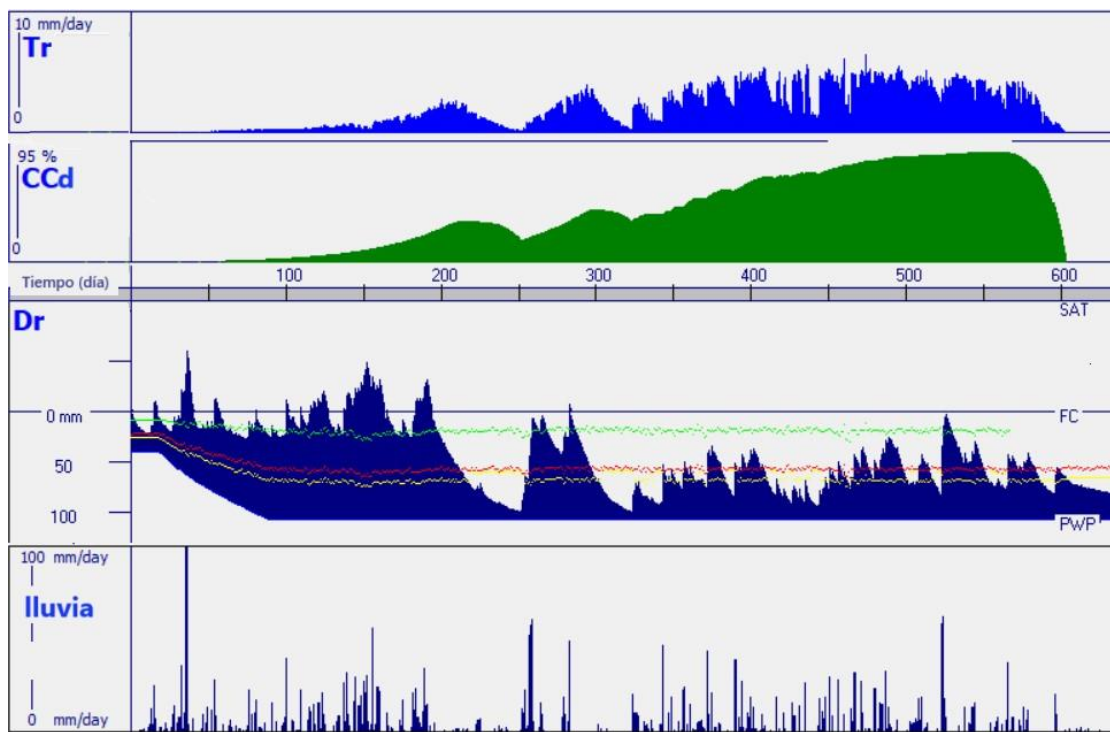
Los resultados obtenidos del modelo AquaCrop ajustado para la variedad LAICA 04-250 referentes al desarrollo del cultivo en función a las condiciones climáticas y edáficas simuladas para el primer ciclo productivo (23/6/2012 - 24/3/2014) se muestran en la Figura 36. Donde se puede observar que la transpiración ( $T_r$ ) sufrida por el cultivo presenta un comportamiento similar al desarrollo del dosel (CCd) durante todo el ciclo fenológico.

Esto se debe a que la transpiración es un fenómeno que ocurre en los tejidos de la planta generando un gradiente hídrico que moviliza el agua desde la raíz hasta los estomas y depende de las condiciones ambientales como la humedad, temperatura y precipitación. En este sentido, cuando la transpiración es demasiado alta o baja ocasiona un cierre estomático que provoca que el crecimiento de la planta sea mucho más lento de lo esperado (Squeo y León, 2007).

Al inicio del periodo el suelo se encuentra a capacidad de campo debido a que la empresa HJV aplica riego al inicio de cada ciclo. Debido a esta condición la transpiración es baja por lo que el desarrollo del dosel ocurre con normalidad. Cuando el ciclo alcanza los 250 días se presenta una disminución considerable tanto en la transpiración como en el desarrollo del dosel. Esto ocurre debido al efecto del agotamiento hídrico en la zona radicular ( $D_r$ ) que se presenta entre los 200 a 250 días del crecimiento vegetativo a causa de una disminución en las precipitaciones.

Como se observa en la Figura 36, durante ese periodo los niveles de agua en el suelo disminuyeron por debajo del umbral de senescencia temprana (línea amarilla) acercándose al punto de marchitez permanente. Sin embargo, las fuertes lluvias registradas el día 250 hacen subir los niveles hídricos en la matriz del suelo hasta alcanzar el límite de expansión del dosel (línea verde) cercano a capacidad de campo, incrementando la transpiración y el crecimiento vegetativo.

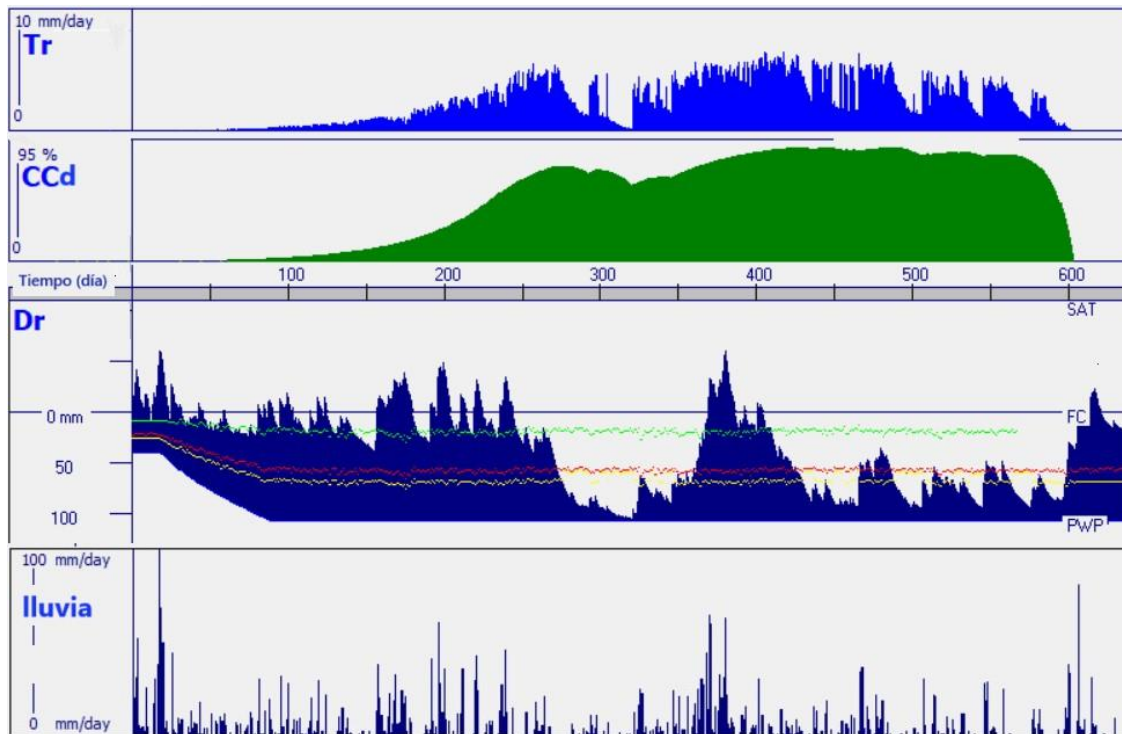
Este comportamiento se repite cuando el ciclo alcanza los 325 días donde el cultivo vuelve a sufrir un agotamiento hídrico en la zona radicular haciendo que disminuya la transpiración y el desarrollo del dosel. Sin embargo, al incrementar las lluvias la planta vuelve a un crecimiento vegetativo normal hasta el fin del ciclo. Durante este periodo existieron diferentes momentos donde la planta se acerca al punto de marchitez permanente debido a las fluctuaciones en la precipitación que afectaron la producción de biomasa total acumulada.



**Figura 36.** Resultados del modelo AquaCrop ajustado para la variedad LAICA 04-250 comparando el comportamiento de la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

En la Figura 37 se muestran los resultados obtenidos en el segundo ciclo vegetativo del cultivo (23/6/2014 - 23/3/2016), en el día 275 aproximadamente, el cultivo sufre un agotamiento hídrico en la zona radicular llegando al límite del PWP, este efecto se extiende hasta los 350 días donde la precipitación aumenta. Esto ocasiona una gran disminución en los niveles de transpiración que se traducen en una pequeña depreciación en el desarrollo del dosel. Esto se debe a que la disminución en las lluvias ocurrió al final de la etapa fenológica del crecimiento y al inicio del desarrollo vegetativo. Lo cual implica que la mayoría del cultivo ya se encontraba en su tamaño óptimo para el desarrollo de la biomasa, por lo que el aumento en el requerimiento hídrico no representó una disminución significativa en el CCd.

Por otra parte, en la Figura 37 se observa que al inicio del ciclo las lluvias hacen que la humedad del suelo se encuentre cercana a capacidad del campo, lo cual implica niveles de transpiración normales y un desarrollo del dosel óptimo característico de esta etapa fenológica. Al alcanzar los 200 días se vuelve a presentar un aumento en el requerimiento hídrico del cultivo, debido a que los niveles de agua en el suelo se encuentran por debajo del límite de senescencia temprana (línea amarilla). Esto es producto de una disminución en la precipitación, lo que desacelera el crecimiento vegetativo y provoca fluctuaciones en los niveles de transpiración registrados.

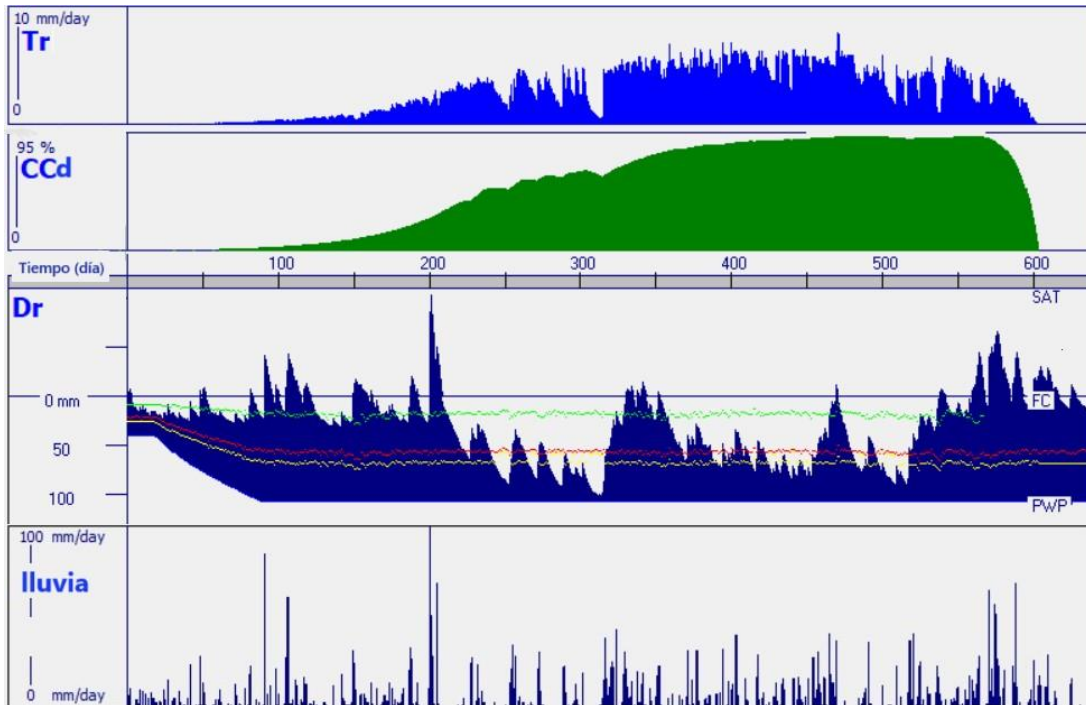


**Figura 37.** Resultados del modelo AquaCrop ajustado para la variedad LAICA 04-250 comparando el comportamiento de la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el segundo ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

Cuando el cultivo alcanza la etapa de maduración el CCd no se ve afectado por la disminución de agua en el suelo, no obstante, el rendimiento y la concentración de sacarosa se ven perjudicadas en el momento en que la planta experimenta déficit hídrico. Según Steduto et al. (2012) cuando el suelo presenta baja humedad (inferior al 50%) durante la etapa de maduración, el rendimiento de la caña de azúcar disminuye considerablemente.

Sin embargo, si se presenta una disminución leve entre 80 a 50% de la humedad en el suelo, se logra aumentar la concentración de sacarosa y elevar el rendimiento del cultivo. Esto se puede observar al final del tercer ciclo (Figura 38), ya que los niveles de agua disminuyeron hasta la línea de cierre estomático y posteriormente aumentó por encima de la capacidad de campo lo que incrementó el rendimiento del cultivo simulado.

Por otra parte, al inicio del tercer ciclo (Figura 38) se puede observar que al alcanzar el día 200 del crecimiento vegetativo, el cultivo experimenta un agotamiento hídrico en la zona radicular acercándose peligrosamente al PWP, esto afectó considerablemente el desarrollo del dosel y la transpiración. En la Figura 38 se puede apreciar que la curva del CCd se ralentiza después del periodo en déficit hídrico debido a que la disminución de agua en el suelo fue crítica, lo que implica que el cultivo no alcanzó el desarrollo máximo del dosel durante la etapa de crecimiento vegetativo disminuyendo el rendimiento obtenido al final del ciclo.

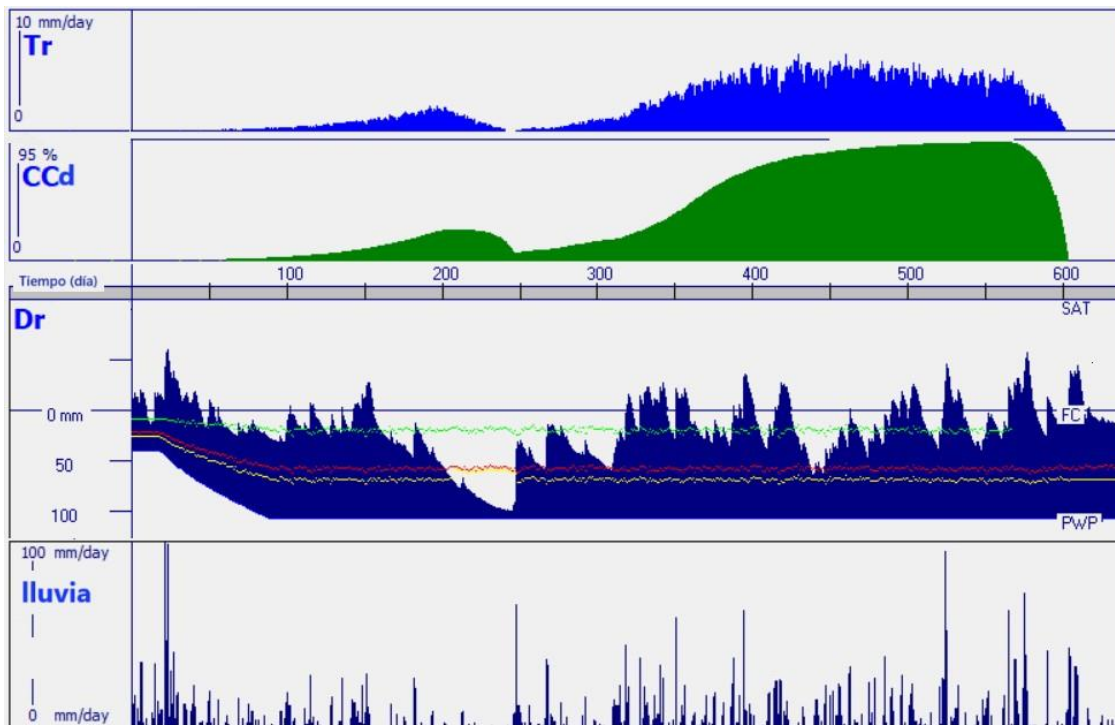


**Figura 38.** Resultados del modelo AquaCrop ajustado para la variedad LAICA 04-250 comparando el comportamiento de la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el tercer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

Por otra parte, al inicio del cuarto ciclo (Figura 39) se puede observar que al alcanzar el día 150 del crecimiento vegetativo, el cultivo experimenta un agotamiento hídrico en la zona radicular acercándose a niveles inferiores al límite del PWP. Esto afectó considerablemente el desarrollo del dosel y la transpiración del cultivo durante esa etapa específicamente.

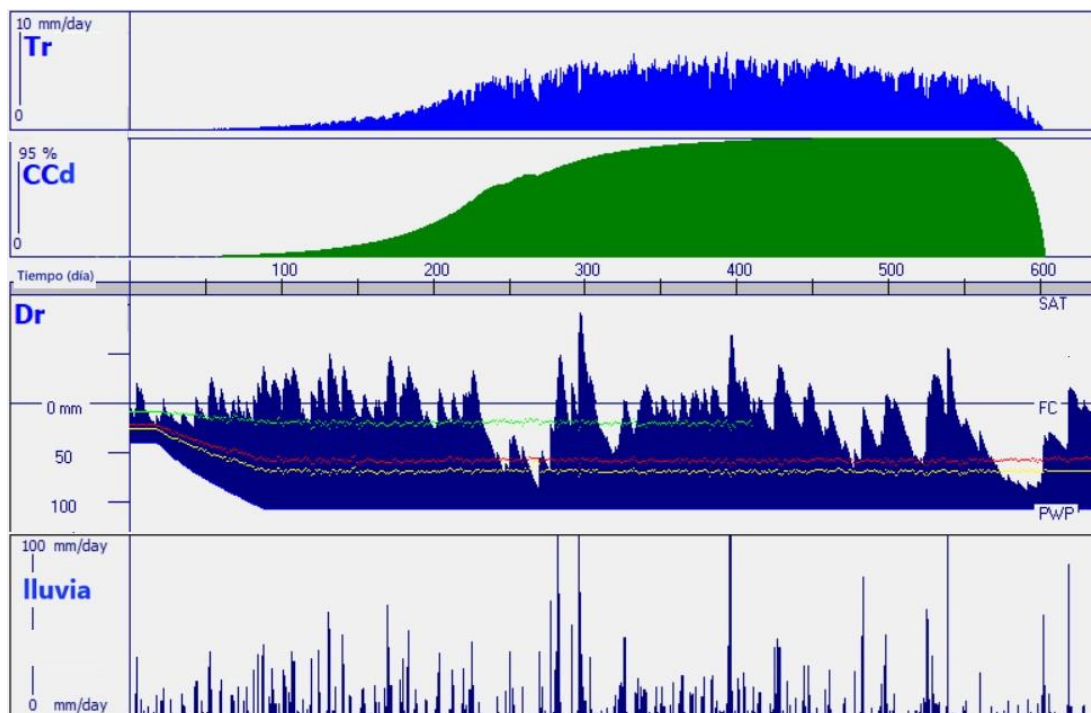
Sin embargo, el periodo de agotamiento tiene una duración de 50 días aproximadamente, lo cual permite que el cultivo recupere vigor posterior al inicio de las lluvias (250 días). Además, se puede apreciar que la curva del CCd se ralentiza después del periodo en déficit hídrico, lo cual implica que el cultivo no alcanzó el desarrollo máximo del dosel durante la etapa de crecimiento vegetativo disminuyendo el rendimiento obtenido al final del ciclo (Figura 39).

A pesar del corto periodo de agotamiento hídrico que sufrió el cultivo durante esta etapa, las repercusiones en la producción de biomasa y rendimiento son notorias, esto debido a que el estrés sufrido por la planta se presentó al inicio de la etapa de crecimiento. Esto impide un desarrollo óptimo a pesar de la recuperación de la planta que ocurre debido al inicio de las lluvias, en cuanto al desarrollo del dosel se refiere.



**Figura 39.** Resultados del modelo AquaCrop ajustado para la variedad LAICA 04-250 comparando el comportamiento de la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

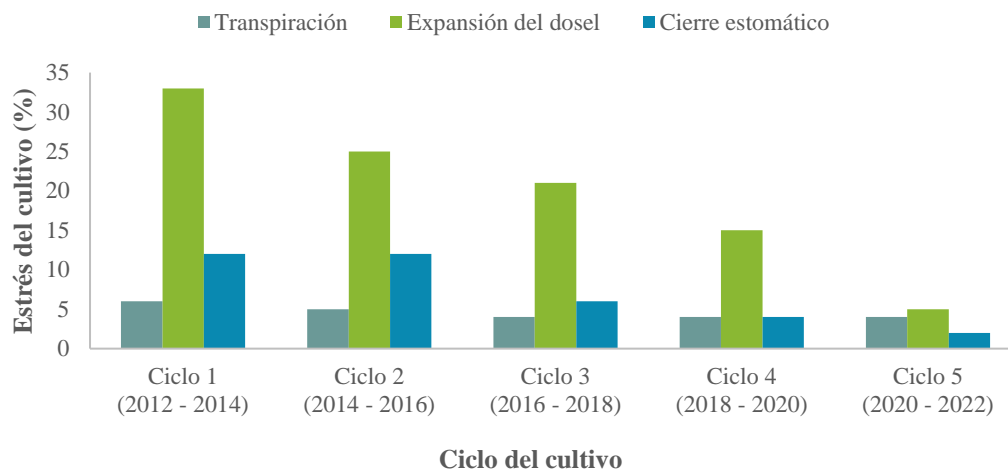
Por último, para el quinto ciclo los niveles de agua en el suelo se mantuvieron sumamente constantes durante todo el periodo. En la Figura 40 se puede observar que solamente existieron dos fases de agotamiento hídrico en la zona radicular, lo que implica un aumento en el requerimiento hídrico del cultivo. Sin embargo, los niveles de agua no estuvieron por debajo del umbral de senescencia temprana (línea amarilla) durante un tiempo prolongado, haciendo que el desarrollo del dosel fuese el esperado. Esto se ve reflejado en los resultados de producción de biomasa, ya que para este ciclo se registran los mayores rendimientos del cultivo simulado.



**Figura 40.** Resultados del modelo AquaCrop ajustado para la variedad LAICA 04-250 comparando el comportamiento de la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el quinto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

Comparando el comportamiento observado para cada ciclo del cultivo, se aprecia que los fenómenos de agotamiento hídrico en la zona radicular se presentan en etapas tempranas del crecimiento vegetativo entre los 200 y 300 días. Esto se explica debido a que esta etapa del ciclo fenológico ocurre entre los meses de enero a abril, los cuales son considerados los más secos de la época de verano (IMN, 2015). Además, se puede observar que para los primeros ciclos evaluados (2012 – 2016), el requerimiento hídrico el cultivo fue mayor que para los ciclos posteriores, esto se debe a que existe un aumento en la cantidad e intensidad de la precipitación durante los últimos años del registro climático simulado (2018 – 2022) (Figura 41).

Este comportamiento decreciente en el requerimiento hídrico del cultivo conforme pasa los ciclos se evidencia en el porcentaje de estrés por transpiración, expansión del dosel y cierre estomático registrado para cada simulación del cultivo realizada en AquaCrop (Figura 41). Donde se puede observar que los mayores porcentajes de estrés registrados se presentaron durante el primer ciclo del cultivo con un 33% en el caso de la expansión del dosel, un 12% para el cierre estomático y el estrés por transpiración fue de 6%. Por último, los niveles de estrés para cada parámetro evaluado disminuyeron considerablemente hasta alcanzar los porcentajes más bajos registrados en el quinto ciclo. Donde se obtuvo un estrés por transpiración del 4%, la expansión del dosel registró un 5% y el cierre estomático fue del 2%.



**Figura 41.** Registro del estrés por transpiración, expansión del dosel y cierre estomático debido al agotamiento hídrico en la zona radicular para cada ciclo del cultivo evaluado.

El estrés por transpiración se mantuvo sumamente constante durante todo el periodo evaluado (2012 – 2022) con una variación promedio del 4,6%. Por otra parte, los porcentajes de estrés obtenidos debido a la expansión del dosel presentan una variación promedio del 19,8% lo cual significó la mayor afectación para el cultivo durante el periodo de estudio. Este parámetro está relacionado con el agotamiento hídrico en la zona radicular, ya que los niveles de agua en el suelo disminuyen por debajo del límite que permite la adecuada expansión del dosel durante el crecimiento vegetativo de la caña de azúcar. Afectando el desarrollo de la biomasa y el rendimiento obtenido al final de cada ciclo.

#### 4.2.4 Análisis de sensibilidad

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad permiten comprender la susceptibilidad del modelo a cambios en los parámetros relacionados con el medio ambiente, específicamente los relacionados a la composición de la matriz del suelo. Además, se analiza la afectación de estas variables en las salidas de la simulación referente a la biomasa producida y el rendimiento total obtenido.

##### 4.2.4.1 Textura del suelo

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad, variando la textura del suelo se observan en la Tabla 16. Donde se muestra la variación porcentual calculada al comparar la biomasa ajustada con respecto a la biomasa resultante del análisis de sensibilidad planteado (Tabla B2). Para el primer caso (T1) se cambió la textura tipo franco arcilloso por franco arcillo limoso para el primer y tercer horizonte, mientras que para el segundo horizonte se conservó el tipo de suelo franco. Los resultados obtenidos indican un aumento en la producción de biomasa para todos los años exceptuando el 2018 donde se presentó una disminución de 1,95%. Mientras que para el año 2020 se presenta el mayor aumento en la biomasa resultante igual a 19,31%.



Este aumento se debe a que los límites de capacidad de campo y punto de marchitez permanente son mayores para el tipo de suelo franco arcillo limoso que los presentes en el franco arcilloso. Debido a esto el cultivo presenta una menor vulnerabilidad a los periodos de agotamiento hídrico en la zona radicular registrados para la simulación ajustada producto de la disminución en la precipitación durante la época seca (Rivera Gómez y Dolmos Reyes, 2022).

**Tabla 16.** Resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad variando la textura del suelo.

Caso	Simulación ajustada	Año	Biomasa ajustada (t/ha)	Análisis de sensibilidad	Biomasa resultante (t/ha)	Variación (%)
T1	0-20 cm:	2014	77,80	0-20 cm:	84,71	8,88
	Franco arcilloso	2016	91,58	Franco arcillo limoso	98,94	8,02
	20-40 cm:	2018	103,25	20-40 cm:	101,24	-1,95
	Franco	2020	83,45	Franco	99,57	19,31
	40-60 cm:	2022	118,34	40-60 cm:	108,50	-8,31
T2	0-20 cm:	2014	77,80	0-20 cm:	60,70	-21,97
	Franco arcilloso	2016	91,58	Arcilloso	75,39	-17,68
	20-40 cm:	2018	103,25	20-40 cm:	49,50	-52,05
	Franco	2020	83,45	Franco	28,44	-65,91
	40-60 cm:	2022	118,34	40-60 cm:	64,88	-45,16
T3	0-20 cm:	2014	77,80	0-20 cm:	75,95	-2,37
	Franco arcilloso	2016	91,58	Franco arcillo limoso	77,83	-15,01
	20-40 cm:	2018	103,25	20-40 cm:	88,33	-14,44
	Franco	2020	83,45	Franco	74,23	-11,04
	40-60 cm:	2022	118,34	40-60 cm:	89,62	-24,26
T4	0-20 cm:	2014	77,80	0-20 cm:	68,12	-12,43
	Franco arcilloso	2016	91,58	Arcilloso	87,65	-4,30
	20-40 cm:	2018	103,25	20-40 cm:	95,94	-7,08
	Franco	2020	83,45	Franco	68,06	-18,43
	40-60 cm:	2022	118,34	40-60 cm:	115,57	-2,33

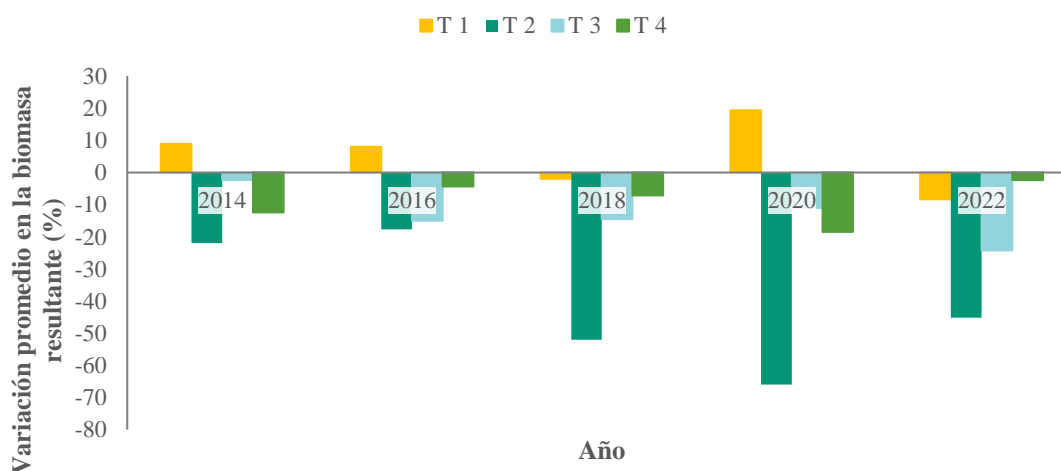
Para el segundo caso (T2) se varió el suelo tipo franco arcilloso por arcilloso para el primer y tercer horizonte, en el tercer caso (T3) se cambió el tipo de suelo franco arcilloso por franco arcillo limoso para el primer horizonte y franco arcilloso por arcilloso para el tercer horizonte. Mientras que para el cuarto caso (T4) se optó por cambiar el suelo tipo franco arcilloso por arcilloso para el primer horizonte y franco arcilloso por franco arcillo limoso para el tercer horizonte, en todos los casos se conservó igual el segundo horizonte con un suelo franco.

Para estos casos (T2, T3 y T4) los resultados muestran una disminución en la biomasa resultante del análisis de sensibilidad en comparación con la biomasa ajustada para cada ciclo del cultivo evaluado. Este comportamiento se debe a que la conformación planteada para cada caso contiene dentro del perfil del suelo la textura arcillosa lo que disminuye el porcentaje de infiltración de agua en el suelo y los límites de capacidad de campo y punto de

marchitez permanente. Lo cual contribuye a que el cultivo presente una afectación mayor durante los periodos en déficit hídrico propios de la época de verano (Rivera Gómez y Dolmos Reyes, 2022) (Figura B1).

Específicamente en el caso T2 se registraron las mayores disminuciones en la biomasa resultante con respecto a la obtenida durante el ajuste del modelo con un 65,91% para el año 2020. Esto debido a que la textura para el primer y tercer horizonte cambió a un suelo tipo arcilloso el cual se caracteriza por tener una velocidad de infiltración muy baja. Esto limita el adecuado drenaje del suelo en época lluviosa y afecta al cultivo en épocas donde existe un agotamiento hídrico en la zona radicular ya que el déficit hídrico alcanza el límite de senescencia temprana (Figura B1).

En la Figura 42 se muestra una comparación porcentual de la variación promedio de la biomasa resultante obtenida para cada caso planteado en el análisis de sensibilidad realizado para el parámetro de textura del suelo. Donde se puede observar que para T1 los resultados indican un aumento en la biomasa resultante, como se mencionó anteriormente, exceptuando los años 2018 y 2020. Mientras que para el caso T2, el porcentaje de variación promedio en la producción de biomasa indica una disminución superior al 50% para los últimos tres ciclos del cultivo. En el caso de T3, el comportamiento de la biomasa resultante es inferior a los valores ajustados. Por último, T4 presenta los porcentajes de variación promedio más bajos de todas las simulaciones realizadas, sin embargo, en cada ciclo los valores de biomasa son menores a los ajustados.



**Figura 42.** Comparación porcentual de la producción de biomasa obtenida como resultado de las simulaciones realizadas variando la textura del suelo como análisis de sensibilidad (T1 = Franco arcillo limoso, franco y franco arcillo limoso; T2 = Arcilloso, franco y arcilloso; T3 = Franco arcillo limoso, franco y arcilloso; T4 = Arcilloso, franco y franco arcillo limoso).

Esto indica que el modelo presenta una sensibilidad media ante variaciones en las texturas del suelo respetando la cantidad y el espesor de cada horizonte determinado durante la etapa de caracterización del área de estudio. En este sentido, los cambios en la producción de biomasa que se obtienen a partir de las simulaciones realizadas respetan lo mencionado en la teoría con respecto a las características para cada tipo de suelo evaluado (Rivera Gómez y

Dolmos Reyes, 2022). Por esta razón, la textura se considera un parámetro que tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo, pero se debe hacer la salvedad de que la composición textural del suelo es sumamente estable en periodos a corto y mediano plazo.

#### 4.2.4.2 Espesor y cantidad de horizontes en el suelo

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad planteado para las variables de espesor y cantidad de los horizontes que conforman el perfil del suelo se muestran en la Tabla 17. En el primer caso (E/H 1) se unificaron el primer y segundo horizonte para un suelo tipo franco con un espesor de 40 cm. Mientras que el último horizonte se mantuvo igual con una textura franco arcillosa y un espesor de 20 cm. Los resultados indican un aumento en la biomasa resultante para todos los ciclos simulados, el mayor porcentaje de variación registrado fue de 12,03% en el año 2020 y el menor fue de 0,21% para el año 2022 (Tabla B3).

Estos resultados concuerdan con el comportamiento observado para la simulación ajustada referente al desarrollo del dosel y la producción de biomasa, el cual presenta un ajuste creciente conforme pasan los ciclos exceptuando el año 2020. Por esta razón, se registra una mayor variación porcentual durante el cuarto ciclo (2018 – 2020). Mientras que para el año 2022 la cantidad de biomasa producida por el cultivo es máxima, por lo que se registraron valores similares tanto para el análisis de sensibilidad E/H 1 como para la simulación ajustada.

**Tabla 17.** Resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad variando el espesor y la cantidad de horizontes en el perfil del suelo.

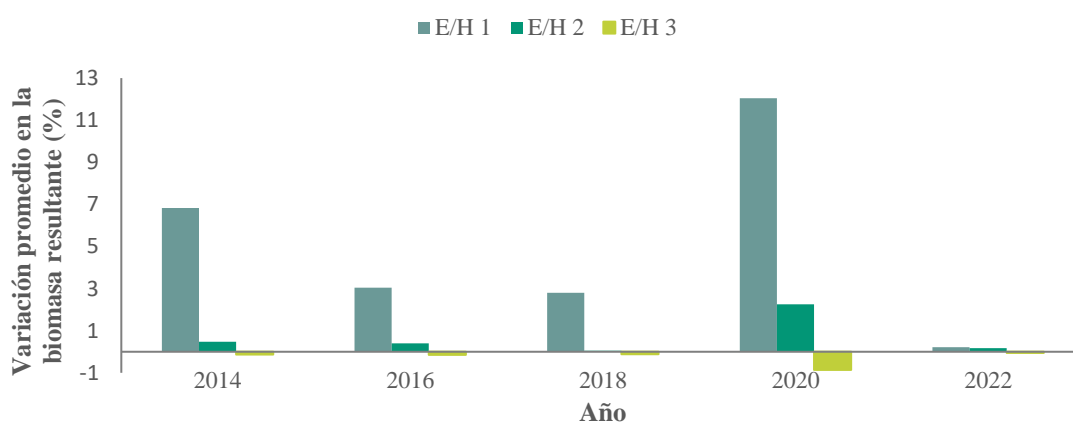
Caso	Simulación ajustada		Año	Biomasa ajustada (t/ha)	Análisis de sensibilidad		Biomasa resultante (t/ha)	Variación (%)
	Horizontes	Espesor (cm)			Horizontes	Espesor (cm)		
E/H 1	Franco - arcilloso	20	2014	77,80	Franco - arcilloso	40	83,11	6,82
			2016	91,58			94,37	3,04
	2018	103,25	106,14	2,79				
	2020	83,45	93,49	12,03				
	2022	118,34	118,60	0,21				
E/H 2	Franco - arcilloso	20	2014	77,80	Franco - arcilloso	60	78,17	0,47
			2016	91,58			91,95	0,40
	2018	103,25	103,30	0,04				
	2020	83,45	85,33	2,26				
	2022	118,34	118,54	0,17				
E/H 3	Franco - arcilloso	20	2014	77,80	Franco - arcilloso	20	77,70	-0,13
			2016	91,58			91,45	-0,14
	2018	103,25	103,14	-0,11				
	2020	83,45	82,72	-0,87				
	2022	118,34	118,28	-0,05				

En el caso E/H 2 se consideró solamente un horizonte de 60 cm de espesor, con una textura tipo franco arcillosa. En los resultados se observa que los porcentajes de variación obtenidos

al comparar la biomasa ajustada con respecto a la biomasa resultante del análisis de sensibilidad son inferiores al 3%. Esto indica que considerar un solo perfil de suelo para la profundidad radicular con una textura tipo franco arcillosa no tiene un efecto significativo en los resultados de la simulación. Además, el comportamiento concuerda con el primer caso (E/H 1) ya que el mayor porcentaje de variación registrado ocurrió en el año 2020 siendo del 2,26%, mientras que la variación promedio para todos los años fue de 0,67%.

Por último, para el caso E/H 3 se consideraron dos horizontes, el primero de 20 cm de espesor y un tipo de suelo franco arcilloso. Mientras que el segundo horizonte presenta una textura franca y un espesor de 40 cm. Los resultados muestran una disminución en la producción de biomasa registrada para cada ciclo, sin embargo, la variación porcentual promedio para todos los años evaluados fue de 0,26%, lo cual representa la menor variación simulada.

En la Figura 43 se observa la comparación porcentual de la variación promedio de la biomasa resultante obtenida para todos los años simulados durante el análisis de sensibilidad planteado con respecto a la biomasa ajustada. Los resultados indican que para el caso E/H 1 la variación fue mayor que para los casos E/H 2 y E/H 3. Esto se debe a que el primer horizonte tiene una textura franca que presenta una composición de los agregados media de consistencia blanda, un buen contenido de humedad y un adecuado drenaje. Lo cual mejora las condiciones iniciales del suelo haciendo que la producción de biomasa aumente, alejándose de los valores ajustados (Ciancaglini, 2016).



**Figura 43.** Comparación porcentual de la producción de biomasa obtenida como resultado de las simulaciones realizadas variando el espesor y cantidad de horizontes en el perfil de suelo como análisis de sensibilidad (E/H1 = Franco [40 cm] y franco arcilloso [20 cm]; E/H2 = Franco arcilloso [60 cm]; E/H3 = Franco arcilloso [20 cm] y franco [40 cm]).

Los casos E/H 2 y E/H 3 presentan resultados muy similares a los observados para la simulación ajustada ya que se considera la textura franco arcillosa como dominante para los primeros horizontes del suelo. La textura franco arcillosa tiene propiedades más limitantes con una estructura de los agregados más pesada y con periodos de drenaje más prolongados lo que disminuye la producción de biomasa cuando existe periodos de agotamiento hídrico en la zona radicular del cultivo (Ciancaglini, 2016) (Figura B2).

Por lo que se determina que el modelo no presenta una susceptibilidad significativa a variables en la composición del perfil del suelo en cuanto a cantidad y espesor de los horizontes. Esto se debe a que las características generales de los tipos de texturas encontradas en el área de estudio son similares en cuanto a los límites permisibles de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Además, la variación en los perfiles del suelo ocurre en periodos prolongados de tiempo por lo que a corto y mediano plazo estos cambios no se presentarán.

#### 4.2.4.3 Nivel freático

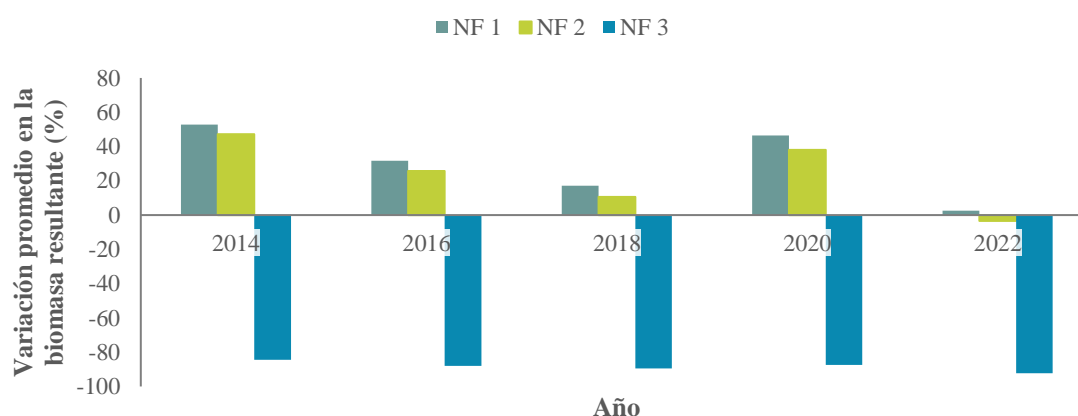
El análisis de sensibilidad planteado para la variable del nivel freático se debe a que durante la caracterización del área de estudio no se observó un nivel freático presente dentro de la profundidad radicular (Tabla B4). En este sentido, se consideró realizar un análisis para determinar qué tan sensible es el modelo y el cultivo de caña de azúcar a la presencia permanente de agua en el suelo, los resultados obtenidos para cada simulación se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad variando la profundidad del nivel freático en el perfil del suelo.

Parámetro	Simulación ajustada	Año	Biomasa ajustada (t/ha)	Análisis de sensibilidad	Biomasa simulada (t/ha)	Variación porcentual
NF 1	No considerado	2014	77,80	100 cm	118,91	52,82
		2016	91,58		120,59	31,66
		2018	103,25		120,94	17,12
		2020	83,45		122,17	46,39
		2022	118,34		121,47	2,64
NF 2	No considerado	2014	77,80	80 cm	114,54	47,21
		2016	91,58		115,13	25,71
		2018	103,25		114,20	10,60
		2020	83,45		115,22	38,07
		2022	118,34		114,24	-3,46
NF 3	No considerado	2014	77,80	60 cm	12,10	-84,44
		2016	91,58		11,02	-87,95
		2018	103,25		10,82	-89,51
		2020	83,45		10,43	-87,50
		2022	118,34		9,21	-92,21

Los resultados muestran que el modelo es sumamente sensible a la presencia de un nivel freático dentro de la matriz del suelo, principalmente para ubicaciones cercanas a la profundidad radicular. En los primeros dos casos planteados NF 1 (profundidad = 100 cm) y NF 2 (profundidad = 80 cm) se presenta un incremento en la producción de biomasa resultante. Debido a que el nivel freático se modeló por debajo de la profundidad radicular, lo que contribuye a que el suelo mantenga un contenido de humedad estable a lo largo de todos los ciclos evaluados. Favoreciendo a que durante periodos de déficit hídrico el cultivo

no alcance el límite de PWP, cierre estomático y senescencia temprana, lo que incrementa el rendimiento (Figura 44).



**Figura 44.** Comparación porcentual de la producción de biomasa obtenida como resultado de las simulaciones realizadas variando la consideración y profundidad del nivel freático dentro del perfil de suelo como análisis de sensibilidad (NF 1 = profundidad de 100 cm; NF 2 = profundidad de 80 cm; NF 3 = profundidad de 60 cm)

Por otra parte, en el caso NF 3 donde se planteó el nivel freático a los 60 cm de profundidad, lo cual se encuentra en el límite de la expansión máxima radicular del cultivo. Los resultados reflejan una afectación importante en el desarrollo del dosel y la producción de biomasa ya que se presenta una disminución significativa en la biomasa resultante que alcanza porcentajes de variación superiores al 80% (Figura B3). Al combinar el nivel freático con las lluvias registradas, la matriz del suelo se mantiene saturada lo cual hace que el cultivo no alcance su máximo desarrollo debido al exceso de agua en el perfil del suelo, limitando el crecimiento y disminuyendo el rendimiento (Figura 44).

### 4.3 Objetivo 3: Determinación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar utilizando dos escenarios de cambio climático como medida de adaptación

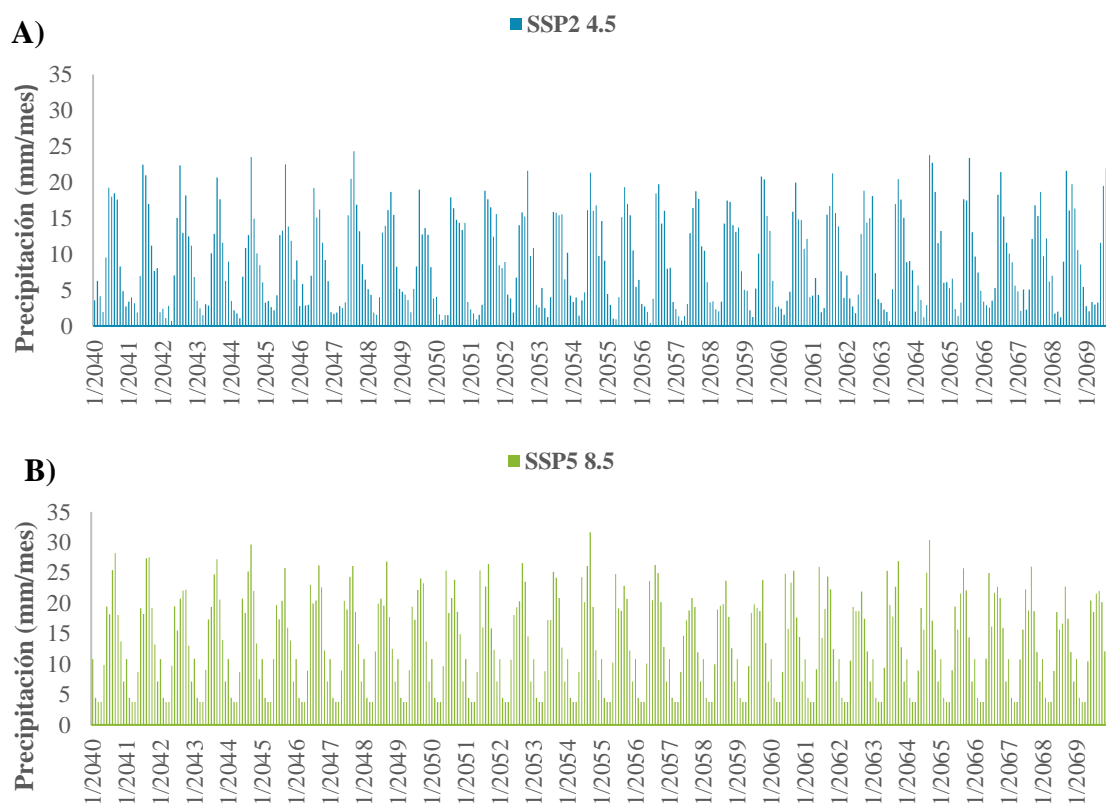
#### 4.3.1 Análisis de la precipitación y temperatura de los escenarios de cambio climático

El análisis meteorológico de dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) se realizó utilizando el registro mensual del clima futuro proporcionado por el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, estimado para dos periodos. El primero de ellos evalúa los efectos del cambio climático a mediano plazo sobre el cultivo analizado el cual inicia el 1/1/2040 y finaliza el 31/12/2069. Mientras que el segundo periodo considera el impacto del CC a largo plazo iniciando el 1/1/2070 y finaliza el 31/12/2099. La información proporcionada presenta una resolución de 1x1 km regionalizada para Costa Rica y extraída específicamente para la zona de Juan Viñas, usando como referencia las coordenadas del lote de estudio latitud de 9°54'30"N y una longitud de 83°44'48"O a 1.324 m.s.n.m.

### 4.3.1.1 Precipitación

#### 4.3.1.1.1 Periodo a mediano plazo (2040 - 2069)

La Figura 45 muestra el comportamiento de la precipitación estimado para el periodo comprendido entre los años 2040 y 2069 para los escenarios de cambio climático: A) SSP2-4.5 y B) SSP5-8.5. Se observa un aumento del 30,25% en la precipitación mensual al comparar el registro simulado para el escenario SSP5-8.5 con respecto al escenario SSP2-4.5.



**Figura 45.** Registro futuro de la precipitación mensual estimada a partir de los escenarios de cambio climático A) SSP2-4.5 y B) SSP5-8.5 para el lote de estudio en el periodo comprendido entre el 1/1/2040 y el 31/12/2069 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima del programa AquaCrop.

La serie de lluvia estimada para el escenario SSP2-4.5 presenta un máximo de precipitación de 24,30 mm/mes durante el mes de agosto del año 2047 y un mínimo de 0,42 mm/mes en el mes de abril del año 2056. Los meses que presentarán un promedio de precipitación deficiente para el periodo de estudio evaluado a mediano plazo (2040/2069) son marzo y abril con valores de 2,47 mm/mes y 1,86 mm/mes, respectivamente. Mientras que los meses más lluviosos serán julio y agosto con un promedio de precipitación para el mismo periodo de 17,97 mm/mes y 17,21 mm/mes, respectivamente (Tabla 19).

Por otro lado, para el registro de la serie de lluvia estimada para el escenario SSP5-8.5 durante el mismo periodo de evaluación, se observa un valor pico en la precipitación de 31,65 mm/mes durante el mes de setiembre del año 2054. Mientras que los valores de precipitación mínimos estimados fueron de 3,76 mm/mes para los meses de febrero y marzo del año 2067. La lluvia mensual mínima percibida para los meses de febrero y marzo se mantiene sumamente constante para todos los años simulados con una variación promedio igual a 0,43%. Los meses que presentarán un promedio de precipitación deficiente en el periodo entre 2040 y 2069 corresponden a febrero y marzo con valores de 3,76 mm/mes en ambos casos. Mientras que los meses más lluviosos serán agosto y setiembre con un promedio de precipitación igual a 21,76 mm/mes y 25,04 mm/mes, respectivamente (Tabla 19).

**Tabla 19.** Resultados estimados para la precipitación promedio mensual del registro futuro para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del periodo a mediano plazo (2040 – 2069).

Mes	SSP2-4.5	SSP5-8.5
	Precipitación promedio (mm/mes)	Precipitación promedio (mm/mes)
Enero	3,85	4,44
Febrero	3,47	3,77
Marzo	2,48	3,77
Abril	1,86	9,58
Mayo	4,72	20,76
Junio	15,53	18,12
Julio	17,97	21,76
Agosto	17,75	25,04
Setiembre	15,49	20,02
Octubre	11,24	13,10
Noviembre	8,85	7,17
Diciembre	5,34	11,49

Los cambios simulados en la lluvia percibida en la región de Juan Viñas, al comparar la estimación mensual obtenida para el escenario SSP2-4.5 con respecto al SSP5-8.5 corresponden al comportamiento y la cantidad de precipitación. El comportamiento de los periodos de lluvia varía de un escenario a otro, en este sentido, para el escenario SSP2-4.5, se presenta una estación seca definida entre los meses de diciembre hasta abril, mientras que la estación lluviosa inicia en junio y finaliza en noviembre. La estacionalidad de las lluvias descrita para el escenario definido a mediano plazo sigue una constante con los periodos secos y lluviosos presentados actualmente en el país.

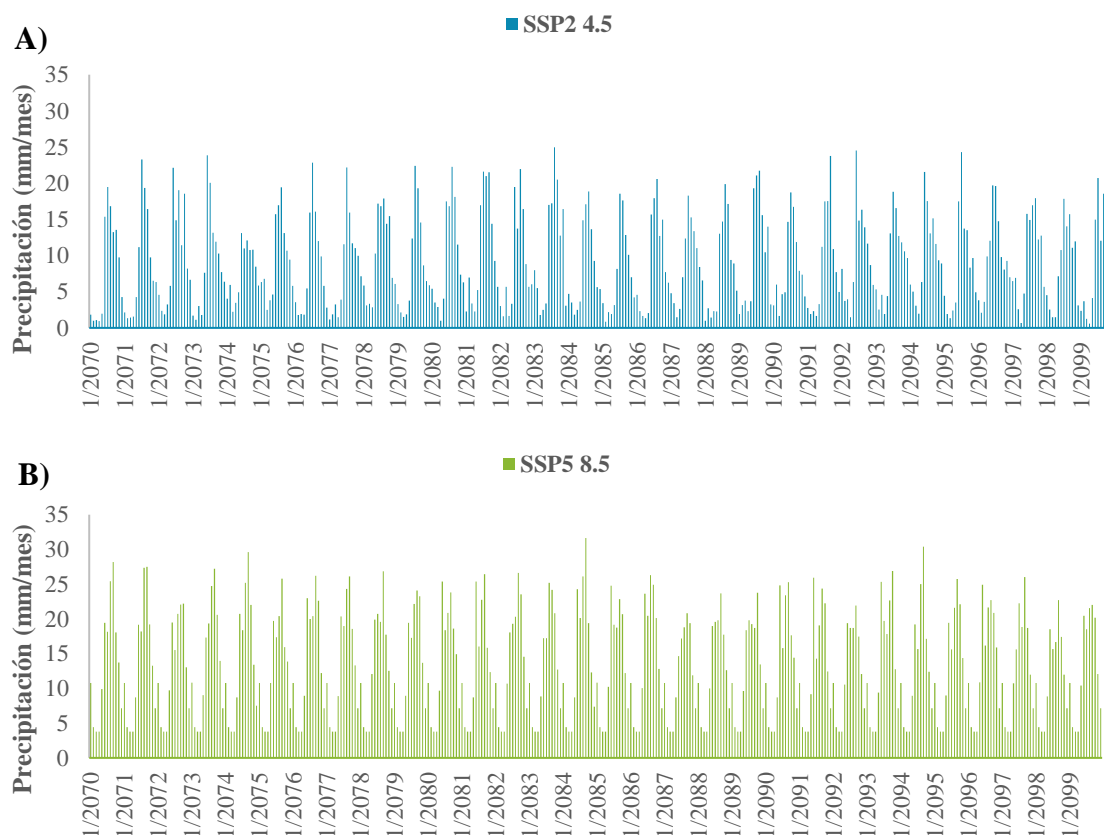
Sin embargo, en el caso del escenario SSP5-8.5 el comportamiento simulado presenta una alteración en la estacionalidad de las lluvias, ya que la época seca se acorta iniciando en el mes de enero y finalizando en marzo. Mientras que la época lluviosa es mucho más larga abarcando los meses de mayo hasta diciembre, presentando una mayor cantidad de lluvia en un periodo más prolongado al año, lo cual afecta significativamente los cultivos. Esto debido a que la época seca, a pesar de ser más corta, presenta niveles sumamente bajos de lluvias, lo que aumenta el estrés térmico e hídrico de los cultivos afectando el desarrollo del dosel, y



por ende la producción de biomasa aérea y el rendimiento total obtenido al final del ciclo fenológico. Además, una época lluviosa tan prolongada y con precipitaciones tan severas afecta los cultivos debido al exceso de agua provocando saturación del suelo y marchitez, así como el aumento en los desastres naturales como inundaciones, deslizamientos, entre otros, lo que impactan en gran manera el sector agrícola y tiene implicaciones sociales importantes (FAO, 2022).

#### 4.3.1.1.2 Periodo a largo plazo (2070 - 2099)

En la Figura 46 se puede observar el comportamiento de la precipitación en el periodo comprendido entre los años 2070 y 2099 para los escenarios de cambio climático: A) SSP2-4.5 y B) SSP5-8.5. En la cual se presenta un aumento en la precipitación mensual para el escenario SSP5-8.5 con respecto al escenario SSP2-4.5. Lo cual indica que la tendencia al aumento en las precipitaciones estimadas a mediano plazo continúa presentándose para este periodo (2070 – 2099). La serie de lluvia del escenario SSP5-8.5 presenta un máximo de precipitación igual a 30,93 mm/mes durante el mes de setiembre del año 2086. Esto presenta una similitud con el periodo analizado anteriormente (2040 – 2069) ya que el valor pico se presentó durante el mes de agosto y fue de 24,30 mm/mes, indicando un aumento del 21,43% con respecto al periodo establecido a mediano plazo.



**Figura 46.** Registro futuro de la precipitación mensual estimada a partir del escenario de cambio climático A) SSP2-4.5 y B) SSP5-8.5 para el lote de estudio en el periodo comprendido entre el 1/1/2070 y el 31/12/2099 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima del programa AquaCrop.

Mientras que el mínimo fue 0,60 mm/mes presentado en el mes de abril del año 2097. La estacionalidad para el escenario SSP2-4.5 se presenta una época seca definida entre los meses de diciembre hasta abril, mientras que la estación lluviosa inicia en junio y finaliza en noviembre, al igual que la presentada para el periodo entre 2040 – 2069. Sin embargo, para el escenario SSP5-8.5 los meses que se estiman con bajos niveles de precipitación son de febrero hasta abril, junto con el mes de diciembre. Lo cual indica que para este escenario a largo plazo se van a presentar periodos prolongados de lluvias al año con estaciones poco definidas.

En la Tabla 20 se muestran los valores promedio de precipitación para cada escenario de cambio climático evaluado para el periodo de 2070 – 2099 (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Donde se puede observar que al comparar la precipitación estimada para el escenario SSP2-4.5 con respecto al SSP5-8.5, para cada mes, se presenta un aumento promedio del 33,95%. Exceptuando el mes de julio donde se presenta una disminución del 4,49% en la precipitación para el escenario SSP5-8.5 con respecto al SSP2-4.5.

**Tabla 20.** Resultados simulados para la precipitación promedio mensual del registro futuro para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del periodo a largo plazo (2070 – 2099).

Mes	SSP2-4.5	SSP5-8.5
	Precipitación promedio (mm/mes)	Precipitación promedio (mm/mes)
Enero	4,02	10,79
Febrero	3,24	4,44
Marzo	2,47	3,77
Abril	2,33	3,77
Mayo	4,90	9,15
Junio	15,88	20,22
Julio	18,38	17,59
Agosto	17,49	19,44
Setiembre	14,81	22,51
Octubre	11,09	18,73
Noviembre	8,75	13,61
Diciembre	5,57	7,15

#### 4.3.1.2 Temperatura

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos para los cambios estimados para la temperatura máxima en los periodos comprendidos entre A) 1/1/2040 - 31/12/2069 y B) 1/1/2070 - 31/12/2099, la serie de datos presenta valores más altos para el escenario SSP5-8.5 durante los primeros 10 años del periodo evaluado (Figura 47). El rango de temperaturas máximas de SSP5-8.5 varía entre los 24,5 °C y los 30,2 °C donde los meses que presentan las temperaturas más elevadas son abril y mayo, los cuales son considerados con el final de la época seca y el periodo de transición a la época lluviosa, respectivamente. La presencia de

estas altas temperaturas en el mes de abril afecta gravemente al cultivo, debido a que estas condiciones ocurren en conjunto con la deficiencia hídrica en la zona radicular producto de la escasez de lluvias para este mes específicamente (FAO, 2022).

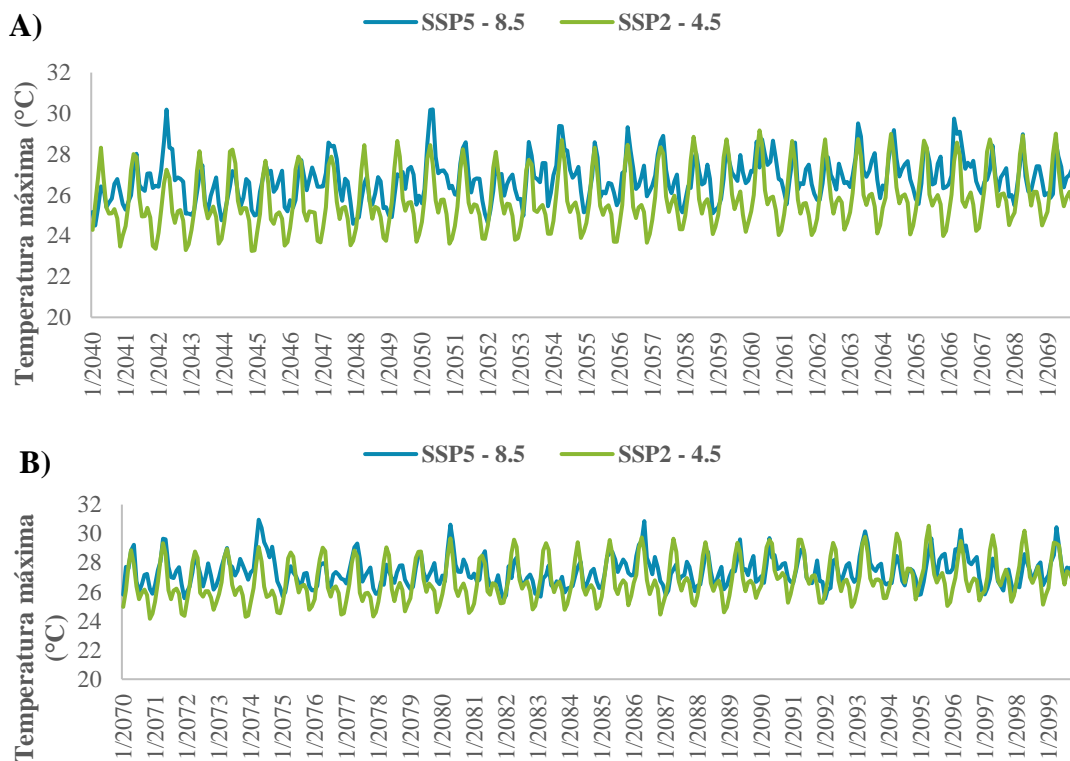
**Tabla 21.** Resultados estimados para la precipitación promedio mensual del registro futuro para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para cada periodo evaluado.

Mes	Periodo 2040 -2069				Periodo 2070 - 2099			
	SSP2 - 4.5		SSP5 - 8.5		SSP2 - 4.5		SSP5 - 8.5	
	Tmáx P (°C/mes)	Tmín P (°C/mes)	Tmáx P (°C/mes)	Tmín P (°C/mes)	Tmáx P (°C/mes)	Tmín P (°C/mes)	Tmáx P (°C/mes)	Tmín P (°C/mes)
Enero	25,78	18,27	24,73	14,43	26,45	19,05	25,91	15,97
Febrero	26,07	18,08	25,76	15,37	26,96	18,90	26,98	15,84
Marzo	27,09	18,61	27,51	16,92	27,74	19,40	28,63	16,86
Abril	28,14	19,12	28,42	17,95	28,75	20,13	29,41	18,48
Mayo	28,01	20,13	27,53	17,61	28,59	20,92	28,68	19,41
Junio	27,03	20,81	25,75	17,54	27,45	21,41	26,69	19,08
Julio	26,41	20,57	25,13	17,40	26,89	21,31	26,05	19,00
Agosto	26,60	20,73	25,55	17,14	27,15	21,42	26,60	18,97
Septiembre	27,16	20,84	25,68	16,75	27,64	21,52	26,78	18,77
Octubre	27,16	20,76	25,16	16,33	27,75	21,39	26,32	18,31
Noviembre	26,05	19,80	23,90	15,39	26,73	20,63	24,94	17,82
Diciembre	25,80	19,03	24,10	14,71	26,41	19,71	25,24	16,90

Tmáx P = Temperatura máxima promedio; Tmín P = Temperatura mínima promedio.

Sin embargo, la diferencia entre las temperaturas máximas para el escenario SSP2-4.5 y el escenario SSP5-8.5 son del 4,05%. Lo cual indica que el comportamiento de la temperatura máxima mantiene una tendencia estable durante el periodo analizado ante las variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Sin embargo, en comparación con los registros históricos de temperatura máxima observados se presenta un aumento significativo, lo que tiene repercusiones sobre el cultivo. Al analizar el registro histórico a escala mensual se observa que la temperatura máxima presenta un promedio de 24,54 °C con un valor pico de 25,94 °C en el mes de abril, mientras que el rango de temperatura máxima varía entre los 21,35 – 25,94 °C.

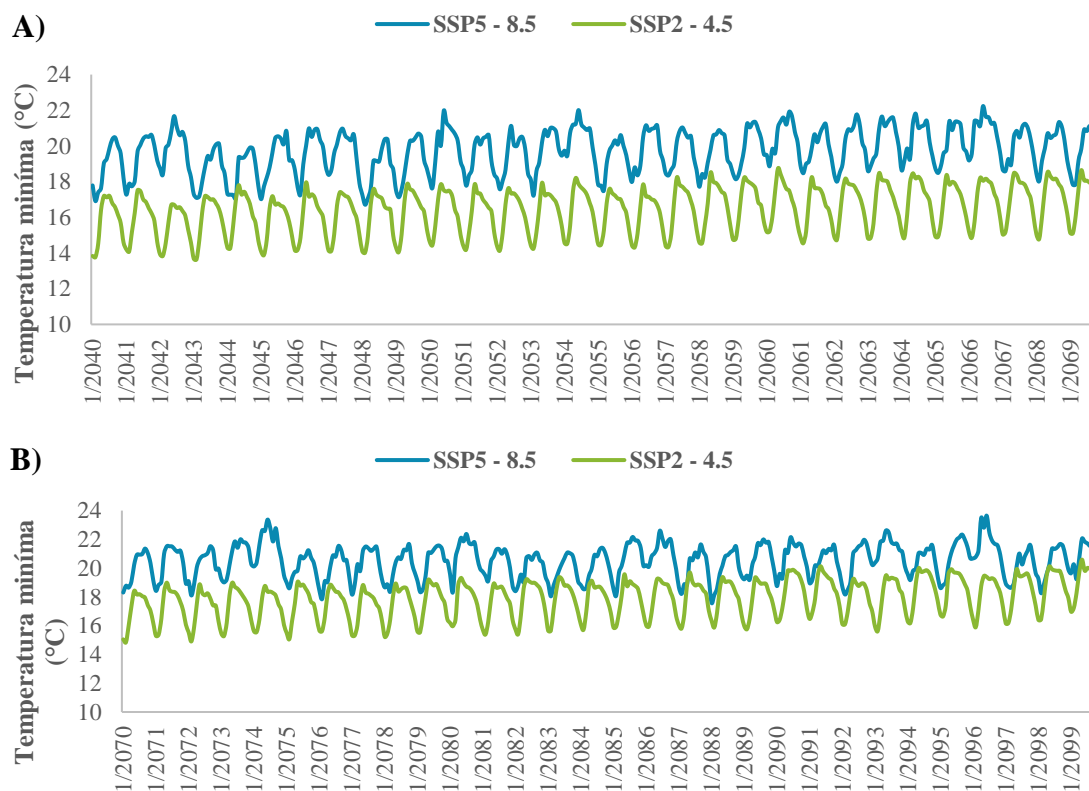
Al comparar el rango de variación de la temperatura máxima del registro histórico versus los rangos estimados para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 se observa una tendencia al aumento en la temperatura con respecto al tiempo. Donde los valores más elevados se presentan para el escenario SSP5-8.5 que resulta lo esperado según las proyecciones mostradas en el sexto informe de evaluación del IPCC que relaciona este escenario con una situación ambiental pesimista (IPCC, 2022).



**Figura 47.** Registro futuro de la temperatura máxima mensual estimada a partir del escenario de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el lote de estudio en los periodos comprendidos A) entre el 1/1/2040 y el 31/12/2069 y B) 1/1/2070 y el 31/12/2099 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima del programa AquaCrop.

Por otra parte, en la Figura 48 se pueden observar los cambios estimados de temperatura mínima para los periodos comprendidos entre el A) 1/1/2040 - 31/12/2069 y B) 1/1/2070 - 31/12/2099 referente a los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Donde se muestra que para esta variable climática se presenta una mayor diferencia entre las estimaciones futuras para cada escenario. En este sentido, se observa que para el escenario SSP2-4.5 las temperaturas mínimas son menores que las estimadas para el SSP5-8.5, en este caso el rango en el que varía la temperatura mínima es de 22,22 – 16,70 °C.

El escenario SSP2-4.5 presenta temperaturas mínimas más bajas con un valor máximo obtenido durante los meses de abril y diciembre igual a 18,74 °C, mientras que el valor mínimo registrado fue de 13,64 °C para el mes de enero. Las temperaturas observadas para este escenario presentan un comportamiento sumamente homogéneo en el tiempo tanto para el periodo de 2040 – 2069 como el periodo de 2070 – 2099 (Figura 48). Por otra parte, al analizar el registro histórico a escala mensual de la temperatura mínima se obtuvo un promedio de 15,72 °C donde el valor más bajo registrado fue de 13,34 °C en el mes de febrero y presenta un rango de variación entre los 17,74 – 13,34 °C. Esto denota el aumento que han sufrido los niveles de temperatura mínima al considerar los escenarios de cambio climático en función del tiempo.



**Figura 48.** Registro futuro de la temperatura mínima mensual estimada a partir del escenario de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el lote de estudio en los periodos comprendidos A) entre el 1/1/2040 y el 31/12/2069 y B) 1/1/2070 y el 31/12/2099 utilizado como datos de entrada en el módulo de clima del programa AquaCrop.

Al evaluar los rangos de temperatura máxima y mínima, se obtiene que el porcentaje promedio mensual de la variación registrada es de 11,40% para el periodo comprendido entre el año 2040 y 2069 y del 10,00% para el periodo de 2070-2099 del escenario SSP2-4.5. Mientras que, la serie observada para el escenario SSP5-8.5 presenta un mayor porcentaje de variación para el periodo a mediano plazo de 12,80% y de 11,45% para el periodo definido a largo plazo. Al ser comparados, se observa que el escenario SSP2-4.5 presenta temperaturas más elevadas y una variabilidad fluctuante en las temperaturas a lo largo del tiempo, lo cual afecta el desarrollo del dosel debido al estrés térmico provocando cierre estomático, lo cual limita el crecimiento del cultivo (FAO, 2022).

El comportamiento observado en la temperatura máxima y mínima estimada para cada escenario de cambio climático es consistente con los resultados presentados en el sexto informe del IPCC (2022). Donde se detalla el comportamiento del clima futuro para los escenarios de cambio climático SSP + RCP en cuanto a vulnerabilidad, adaptación e impactos que afectan los diferentes procesos sociales y ambientales. Los resultados divulgados en este informe se enfocan en las condiciones climáticas, considerando un escenario pesimista, donde las emisiones futuras siguen la tendencia de aumento actual debido a un alto desarrollo económico basado en el uso de combustibles fósiles. Se indica que, este escenario pesimista provoca un aumento en la temperatura promedio global, donde se podría alcanzar los 4,8 °C,

lo cual se ve representado en la tendencia de aumento progresivo en el tiempo (2040 – 2099) de la temperatura estimada para la zona de Juan Viñas.

### 4.3.2 Predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar

#### 4.3.2.1 Estrés hídrico y térmico

##### 4.3.2.1.1 Periodo a mediano plazo (2040 - 2050)

En el Tabla 22 se muestran los resultados estimados del modelo AquaCrop para la simulación del requerimiento hídrico, biomasa producida y rendimiento resultante del cultivo de caña de azúcar de la variedad LAICA 04-250 referentes al desarrollo del dosel en función de las condiciones climáticas y edáficas futuras. Se aplicaron los escenarios SSP2-4.5 con un impacto moderado y SSP5-8.5 establecido como un panorama pesimista, a cinco ciclos fenológicos consecutivos determinados para el periodos de 2040 – 2050. Los resultados muestran el requerimiento hídrico del cultivo en función de los porcentajes de estrés hídrico y térmico presentado por el cultivo durante el desarrollo, los cuales afectan considerablemente el crecimiento, la producción de biomasa y el rendimiento de la cosecha.

**Tabla 22.** Porcentajes de estrés del cultivo de caña de azúcar estimados para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2040 – 2050.

Ciclo	Periodo evaluado	Escenario simulado	Estrés			Biomasa obtenida (t/ha)	Rendimiento obtenido (t/ha)
			StExp (%)	StSto (%)	StTr (%)		
1	2040 - 2042	SSP2-4.5	14	7	3	21,54	7,54
2	2042 - 2044		17	7	2	106,65	37,33
3	2044 - 2046		28	11	2	90,86	31,80
4	2046 - 2048		28	12	1	7,83	2,74
5	2048 - 2050		16	2	2	105,42	36,90
1	2040 - 2042	SSP5-8.5	22	12	1	10,01	3,50
2	2042 - 2044		17	7	2	101,19	35,41
3	2044 - 2046		29	12	2	88,06	30,82
4	2046 - 2048		28	12	1	8,25	2,88
5	2048 - 2050		17	3	1	96,30	33,70

StExp: Porcentaje de estrés hídrico que reduce la expansión de las hojas

StSto: Porcentaje de estrés hídrico que induce el cierre estomático

StTr: Porcentaje de estrés térmico que afecta la transpiración del cultivo

Como se puede observar en la Figura 49, los porcentajes de estrés hídrico que sufre el cultivo son considerablemente elevados. El programa AquaCrop no establece un límite superior para definir el nivel de afectación, que representan los diferentes tipos de estrés evaluados, sobre el desarrollo del dosel. Sin embargo, entre más cercano a 0 se encuentren los porcentajes de estrés en cada caso (StExp, StSto y StTr) mejor será el crecimiento del cultivo y por ende

mayor será la producción de biomasa y rendimiento. Analizando el periodo comprendido entre 2040 y 2050, se pudo observar que los ciclos que se vieron mayormente afectados fueron el tercero (2044 – 2046) y el cuarto (2046 – 2048) con el escenario SSP2-4.5 (Figura 49-A).



**Figura 49.** Porcentaje de estrés hídrico relacionado con la disminución de la expansión del dosel (StExp), estrés hídrico que induce el cierre estomático durante el desarrollo del cultivo (StSto) y estrés térmico (StTr) que experimenta el cultivo en cada ciclo fenológico analizado considerando los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2040 – 2050.

Por otra parte, el porcentaje referente al estrés hídrico relacionado con la disminución de la expansión del dosel (StExp) alcanzó un 28% para el tercer ciclo (2044 – 2046). En el caso del estrés hídrico que induce el cierre estomático durante el desarrollo del cultivo (StSto) continúa la tendencia mostrada anteriormente donde los ciclos que presentan la mayor afectación son el tercero y cuarto para el escenario SSP2-4.5.

El valor máximo obtenido fue del 12% para el cuarto ciclo, mientras que el tercer ciclo presentó un 11% de estrés. Por último, el porcentaje de estrés debido a la temperatura (StTr) se mantuvo inferior al 5% para todos los ciclos evaluados, donde el valor máximo se presentó durante el primer ciclo con un 3%, lo cual concuerda con las condiciones en campo, ya que la siembra del cultivo se realiza en verano que se caracteriza por la presencia de temperatura altas (Figura 46-A).

Mientras que, para el escenario SSP5-8.5 el mayor porcentaje de estrés hídrico que reduce la expansión de las hojas (StExp) percibido por el cultivo fue de 29% para el tercer ciclo y de 28% para el cuarto ciclo (Figura 49-B). Por otra parte, el estrés hídrico que induce el cierre estomático durante el desarrollo del cultivo (StSto), presenta un valor máximo de 12% para el primero, tercero y cuarto ciclo. Por último, el porcentaje de estrés debido a la temperatura (StTr) se mantuvo inferior al 5% para todos los ciclos evaluados, en este caso el valor máximo fue del 2% para el segundo y tercer ciclo vegetativo (Figura 49-B).

#### 4.3.2.1.2 Periodo a largo plazo (2070 - 2080)

En el Tabla 23 se muestran los resultados estimados del modelo AquaCrop para la simulación del requerimiento hídrico de la variedad LAICA 04-250 referentes al desarrollo del dosel en función de las condiciones climáticas y edáficas futuras. Se aplicaron los escenarios SSP2-4.5 con un impacto moderado y SSP5-8.5 establecido como un panorama pesimista, a cinco ciclos fenológicos consecutivos determinados para el periodos de 2070 – 2080. Para determinar el requerimiento hídrico del cultivo en función de los porcentajes de estrés térmico (StTr) e hídrico (StExp y StSto).

**Tabla 23.** Porcentajes de estrés del cultivo de caña de azúcar obtenidos para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2070 – 2080.

Ciclo evaluado	Periodo evaluado	Escenario modelado	Estrés			Biomasa obtenida (t/ha)	Rendimiento obtenido (t/ha)
			StExp (%)	StSto (%)	StTr (%)		
1	2070 - 2072	SSP2-4.5	28	12	5	59,58	20,85
2	2072 - 2074		13	6	4	108,42	37,94
3	2074 - 2076		27	11	4	91,02	31,85
4	2076 - 2078		27	12	1	7,99	2,80
5	2078 - 2080		15	2	3	107,01	37,45
1	2070 - 2072	SSP5-8.5	25	11	4	50,50	17,67
2	2072 - 2074		12	5	2	108,89	38,11
3	2074 - 2076		28	11	3	86,42	30,24
4	2076 - 2078		28	12	1	8,36	2,92
5	2078 - 2080		16	2	2	97,96	34,28

StExp: Porcentaje de estrés hídrico que reduce la expansión de las hojas

StSto: Porcentaje de estrés hídrico que induce el cierre estomático

StTr: Porcentaje de estrés térmico que afecta la transpiración del cultivo

En la Figura 50, se muestran los porcentajes de estrés que sufre el cultivo para los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Analizando el periodo comprendido entre 2070 y 2080, se pudo observar que los ciclos que presentaron una mayor afectación fueron el primero (2070 – 2072), tercero (2074 – 2076) y el cuarto (2076 – 2078), para el escenario SSP2-4.5 (Figura 50-A). Ya que, el porcentaje referente al StExp alcanzó un 28% para el primer ciclo y un 27% para el tercer y cuarto ciclo.



En el caso del estrés hídrico que induce el cierre estomático durante el desarrollo del cultivo (StSto) continúa la tendencia mostrada anteriormente donde los ciclos que presentan la mayor afectación son el primero, tercero y cuarto. El valor máximo obtenido fue del 12% para el primer y cuarto ciclo, mientras que el tercer ciclo presentó un 11% de estrés. Por último, el porcentaje de estrés debido a la temperatura (StTr) se mantuvo inferior al 5% para todos los ciclos evaluados, donde el valor máximo se presentó durante el primer ciclo con un 5%, lo cual concuerda con las condiciones climáticas experimentadas por el cultivo durante la época de verano.



**Figura 50.** Porcentaje de estrés hídrico relacionado con la disminución de la expansión del dosel (StExp), estrés hídrico que induce el cierre estomático durante el desarrollo del cultivo (StSto) y estrés térmico (StTr) que experimenta el cultivo en cada ciclo fenológico analizado considerando los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2070 – 2080.

Mientras que, para el escenario SSP5-8.5 el mayor porcentaje de estrés hídrico que reduce la expansión de las hojas (StExp) percibido por el cultivo fue de 25% para el primer ciclo (2070 – 2072) y de 28% para el tercer (2074 – 2076) y cuarto ciclo (2076 – 2078) (Figura 50-B). Por otra parte, el estrés hídrico que induce el cierre estomático durante el desarrollo del cultivo (StSto), presenta un valor máximo de 12% para el cuarto ciclo. Por último, el porcentaje de estrés debido a la temperatura (StTr) se mantuvo inferior al 5% para todos los ciclos evaluados, en este caso el valor máximo fue del 4% para el primer ciclo.

Lo cual indica que la caña de azúcar se ve mucho más afectada por el estrés hídrico que por variaciones en la temperatura, este comportamiento se explica debido a las características fisiológicas de la caña de azúcar. Steduto et al. (2012) menciona que la caña de azúcar se ve afectada en gran medida por el estrés térmico a bajas temperaturas, inferiores a los 19 °C. Lo cual provoca un estancamiento en el crecimiento, senescencia temprana y disminución del rendimiento. Sin embargo, cultivos expuestos a altas temperaturas no presentan alteraciones significativas en el desarrollo del dosel y producción de biomasa. Por otra parte, los altos porcentajes de estrés hídrico afectan el desarrollo y el crecimiento del cultivo debido al cierre estomático y a la disminución en la expansión del dosel, esto tiene repercusiones sobre la cantidad de biomasa cosechada al término del ciclo fenológico.

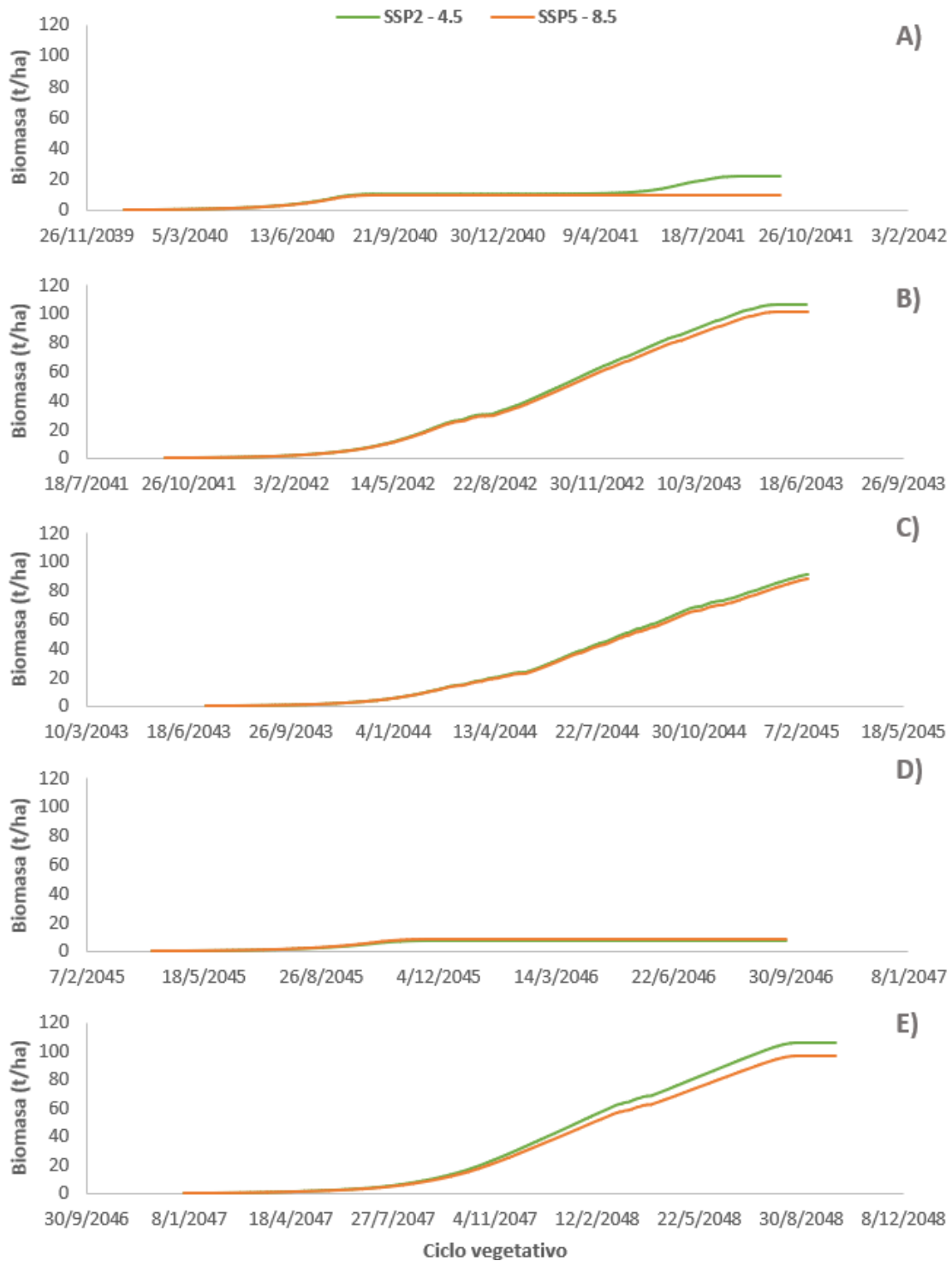
#### **4.3.2.2 Biomasa**

##### **4.3.2.2.1 Periodo a mediano plazo (2040 - 2050)**

En la Figura 51 se observa una comparación entre los resultados de biomasa simulada considerando el escenario SSP2-4.5 y el SSP5-8.5 para un periodo de 10 años iniciando en el año 2040 para cada uno de los cinco ciclos fenológicos modelados. La cantidad de biomasa simulada para cada uno de los ciclos productivos presenta poca variación entre los escenarios de cambio climático considerados.

En etapas tempranas del ciclo la cantidad de biomasa producida es igual para ambos escenarios. Sin embargo, cuando el cultivo alcanza la etapa de desarrollo vegetativo se comienza a notar la diferencia en la cantidad de biomasa producida según el escenario de cambio climático evaluado. Debido a la variabilidad en la cantidad y frecuencia de la precipitación, así como el aumento en la temperatura. En este sentido, para el escenario SSP5-8.5 se presenta una disminución en la biomasa total producida al término de cada ciclo evaluado, con respecto a los resultados obtenidos para el escenario de cambio climático SSP2-4.5.

Durante el primer y cuarto ciclo productivo se presentaron valores de biomasa igual a 21,54 t/ha y 7,84 t/ha, respectivamente para la simulación del escenario SSP2-4.5. Mientras que, los resultados obtenidos para el escenario SSP5-8.5 fueron de 10,01 t/ha para el primer ciclo y 8,25 t/ha para el cuarto ciclo. Estos valores de biomasa representan una pérdida en la producción del 80% con respecto a los ciclos que obtuvieron una cantidad de biomasa producida superior a las 90 t/ha (ciclos 2, 3 y 5), que resulta lo esperado según el registro histórico ajustado presentado por la Hacienda Juan Viñas para el cultivo de caña de azúcar.



**Figura 51.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción de la biomasa producida del cultivo de caña de azúcar comparando el escenario SSP2-4.5 versus el SSP5-8.5 para cada ciclo durante el periodo comprendido entre los años 2040 – 2050 donde A) corresponde al primer ciclo vegetativo, B) segundo ciclo, C) tercer ciclo, D) cuarto ciclo y E) quinto ciclo.

En la Figura 51 se puede observar que, para el primer ciclo fenológico simulado, la etapa que corresponde al desarrollo vegetativo inicia en el mes de abril el cual registra un promedio bajo de precipitación registrada alcanzando los 2,33 mm/mes. Lo cual ocasiona que se restrinja el crecimiento de las hojas y la fibra del tallo. La caña de azúcar es considerada como un cultivo sumamente resistente al encharcamiento y al suelo saturado, sin embargo, los periodos de sequía afectan significativamente al cultivo específicamente durante la etapa de desarrollo vegetativo. Ya que cuando el agotamiento de agua en la zona radicular se presenta durante esta etapa provoca muerte de los puntos de crecimiento impidiendo la acumulación de biomasa aérea y el correcto desarrollo del dosel (Steduto et al., 2012).

#### **4.3.2.2 Periodo a largo plazo (2070 - 2080)**

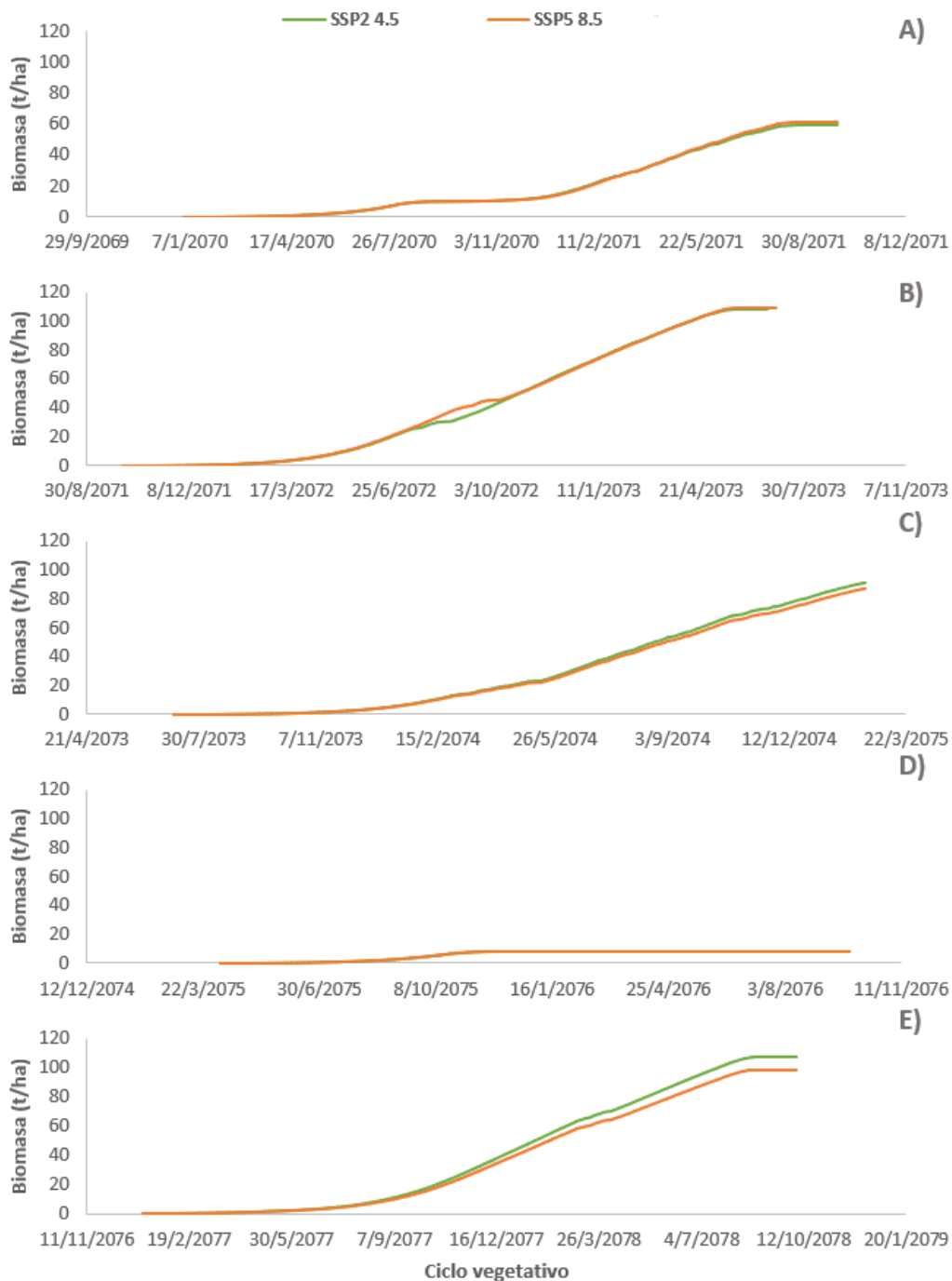
Figura 52 se observa una comparación entre los resultados de biomasa simulada considerando el escenario SSP2-4.5 y el SSP5-8.5 para un periodo de 10 años iniciando en el año 2070 para cada uno de los cinco ciclos fenológicos modelados. Al igual que el periodo analizado anteriormente (2040 – 2050), el comportamiento de la biomasa total producida presenta poca variación entre los escenarios de cambio climático considerados. De igual manera, durante las primeras etapas del ciclo fenológico la biomasa producida es igual para ambos escenarios, mientras que después de la etapa de desarrollo vegetativo del cultivo la cantidad de biomasa producida es inferior para el escenario SSP5-8.5 en comparación con los resultados obtenidos para el escenario SSP2-4.5 que presenta mayor cantidad de biomasa producida al final de cada ciclo evaluado.

Los ciclos que presentan una mayor afectación son el primero donde se obtuvo una biomasa total resultante de 59,581 t/ha (Figura 52-A) y el cuarto con 7,99 t/ha para el escenario SSP2-4.5 (Figura 52-D). Mientras que los ciclos más afectados al incorporar el escenario SSP5-8.5 fueron el primero con 50,51 t/ha y el cuarto con 8,37 t/ha. Para este periodo, se presentó un aumento significativo en la cantidad de biomasa producida para los primeros ciclos en cada escenario evaluado. Sin embargo, obtener valores de 50 t/ha en la biomasa representa una pérdida en la producción del 47%, lo cual es un porcentaje significativo, considerando que el registro histórico ajustado de la biomasa producida en el lote de estudio es de 94,90 t/ha en promedio.

Sin embargo, para este periodo de estudio (2070 – 2080) se presenta una mejoría en cuanto a la producción de biomasa para el primer ciclo, lo cual se debe al mes donde inicia la etapa de desarrollo vegetativo. En este caso, el mes de mayo, donde la cantidad de precipitación mensual es de 4,90 mm, esto indica que esta etapa inicia al finalizar la época seca durante el periodo de transición favoreciendo el desarrollo vegetativo hasta cierto punto. Debido a que el cultivo experimenta porcentajes de estrés debido al agotamiento hídrico en la zona radicular y posteriormente, cuando ya entró de lleno la época lluviosa se expone al estrés por anegamiento.

Mientras que, los resultados obtenidos para el cuarto ciclo para el periodo 2070 – 2080 son similares a los registrados para el periodo 2040 – 2050, ya que no cambian considerablemente las características meteorológicas para el mes en el cual inicia la etapa de desarrollo vegetativo. Lo cual repercute negativamente en el crecimiento y desarrollo del dosel afectando el rendimiento y la calidad del producto al final de la cosecha. En este caso se

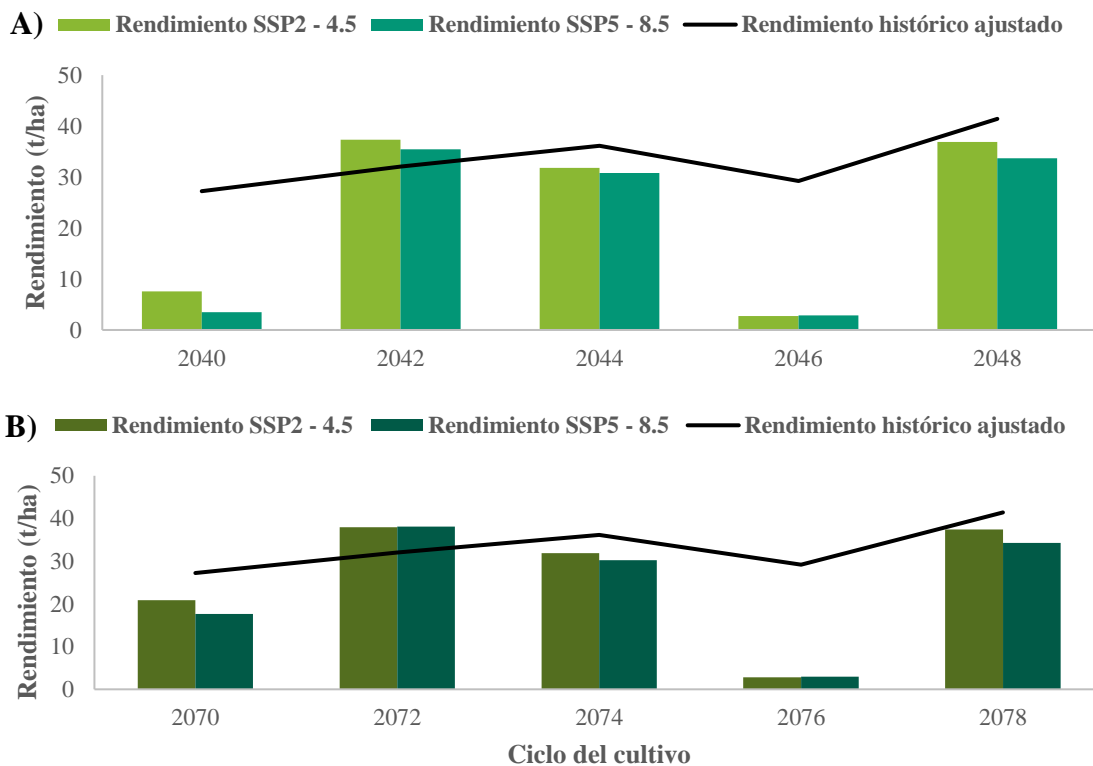
presenta una pérdida del 92% de la producción con respecto a la cantidad de biomasa ajustada producida históricamente en el lote de estudio.



**Figura 52.** Resultados del modelo AquaCrop para la simulación de la biomasa producida a futuro del cultivo de caña de azúcar comparando el escenario SSP2-4.5 versus el SSP5-8.5 para cada ciclo durante el periodo comprendido entre los años 2070 – 2080 donde A) corresponde al primer ciclo vegetativo, B) segundo ciclo, C) tercer ciclo, D) cuarto ciclo y E) quinto ciclo.

### 4.3.2.3 Rendimiento

La producción de biomasa está relacionada con el rendimiento estimado al final de cada ciclo productivo, en este sentido, cantidades pequeñas de biomasa total del cultivo indican rendimientos bajos. En la Figura 53, se observan los rendimientos obtenidos para cada simulación realizada. Al considerar el escenario SSP2-4.5 para el periodo entre 2040 y 2050 se puede observar que los rendimientos más bajos se obtuvieron para el primer (21,54 t/ha) y cuarto ciclo (7,83 t/ha) productivo del cultivo. Mientras que para el escenario SSP5-8.5 el comportamiento es similar, los bajos rendimientos se presentan durante los mismos ciclos productivos con valores entre los 2,74 t/ha y 2,89 t/ha para el primer y cuarto ciclo, respectivamente (Figura 53-A). Al comparar los rendimientos simulados a partir de los escenarios de cambio climático para el periodo 2040 – 2050 (Figura 53-A) con respecto al rendimiento histórico ajustado, se puede observar que el único ciclo en el que se obtiene un rendimiento superior al histórico es el segundo. En el cual se presentó un rendimiento de 37,33 t/ha para el escenario SSP2-4.5 y un 35,42 t/ha para el SSP5-8.5. Lo cual indica que el cambio climático tiene un efecto negativo en el desarrollo, crecimiento, producción de biomasa y rendimiento del cultivo de caña de azúcar.



**Figura 53.** Comparación del rendimiento obtenido al considerar los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y el SSP5-8.5 con respecto a los valores históricos ajustados para los periodos A) 2040 – 2050 y B) 2070 – 2080.

Por otra parte, en la Figura 53-B se observan los rendimientos obtenidos para el periodo entre los años 2070 y 2080 comparando ambos escenarios de cambio climático evaluados, donde se evidencia que los rendimientos más bajos se presentaron durante el primer y cuarto ciclo

productivo del cultivo. El escenario SSP2-4.5 presenta rendimientos del 20,85 t/ha para el primer ciclo y 2,80 t/ha para el cuarto ciclo, mientras que para el escenario SSP5-8.5 el comportamiento es similar. Esto se debe a las condiciones climáticas presentes en la etapa del desarrollo vegetativo del cultivo, donde los resultados para el primer ciclo productivo en cuanto al rendimiento fueron de 17,68 t/ha y 2,93 t/ha para el cuarto ciclo fenológico. Mientras que, al comparar los rendimientos simulados a partir de los escenarios de cambio climático con respecto al rendimiento histórico ajustado, se puede observar que nuevamente el único ciclo en el que se obtiene un rendimiento mayor al histórico ajustado es el segundo. En el cual se presentó un rendimiento de 37,95 t/ha para el escenario SSP2-4.5 y un 38,11 t/ha para el escenario SSP5-8.5. Además, al comparar los rendimientos obtenidos para cada ciclo en ambos periodos se observa una disminución para el periodo evaluado a largo plazo (2070 – 2080).

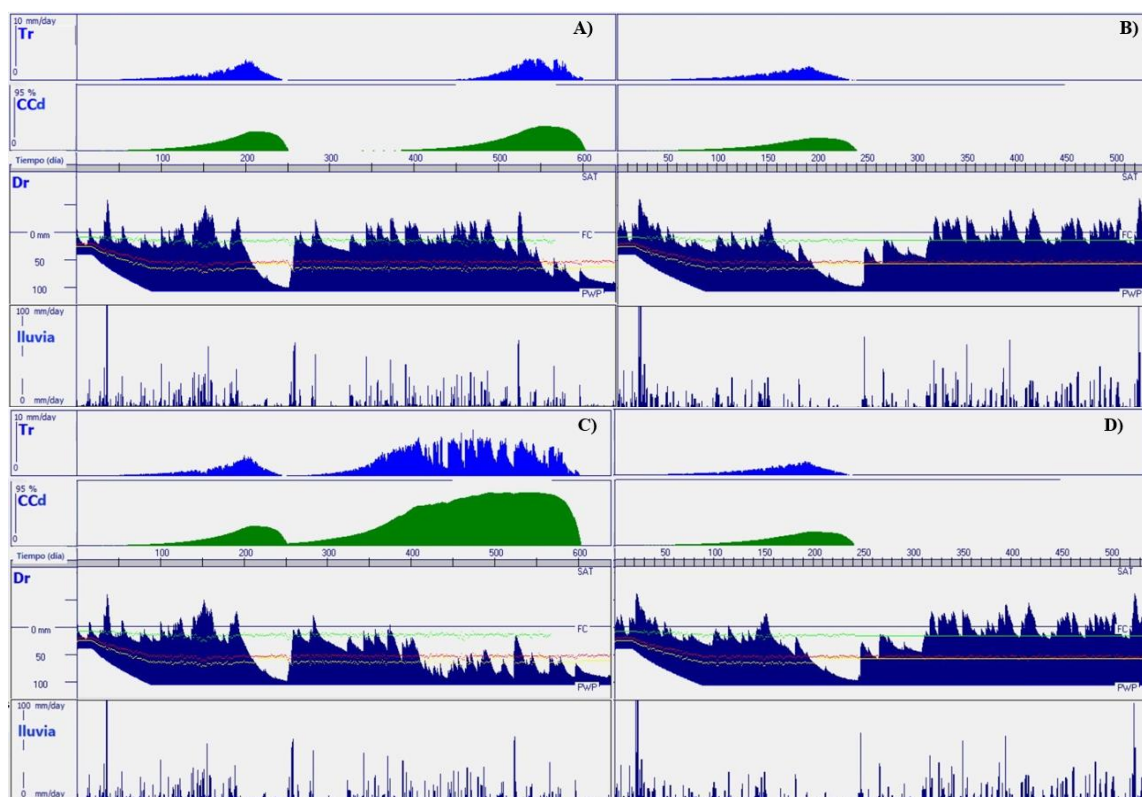
#### **4.3.2.4 Predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar**

En el Apéndice C, se observan los resultados obtenidos del modelo AquaCrop para la transpiración del cultivo, el desarrollo del dosel y el agotamiento en la zona radicular con respecto a la precipitación para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo a corto plazo (Apéndice C1, C2, C3, C4 y C5) y largo plazo (Apéndice C6, C7, C8, C9 y C10). Mientras que en la Figura 54, los resultados se muestran únicamente para aquellos ciclos que presentaron valores mínimos de biomasa y rendimiento para el escenario SSP2-4.5. Los ciclos 1 y 4 para ambos periodos (2040 – 2050 y 2070 – 2080), muestran que la transpiración del cultivo presenta un comportamiento similar al desarrollo del dosel durante todo el ciclo fenológico.

Esto se debe a que existe una relación directamente proporcional entre ambas variables. Al presentarse escasez en la zona radicular ( $D_r$ ) como la observada durante el primer ciclo del periodo 2040 – 2050 (Figura 54 – A), cuando el cultivo alcanza los 200 días después de la siembra los niveles de agua en el suelo se encuentran muy por debajo del límite de senescencia temprana (línea amarilla en gráfico de  $D_r$ ). Esto se debe a que los niveles de estrés hídrico alcanzaron valores severos producto de una reducción considerable en la transpiración del cultivo. Al comparar este comportamiento con lo observado durante el cuarto ciclo del mismo periodo (Figura 54 – B) se puede ver que el agotamiento hídrico en la zona radicular ( $D_r$ ) inicia a partir de los 150 días después de la siembra, al igual que para el primer ciclo. Sin embargo, en este caso el déficit es prolongado (100 días) lo cual provoca que el cultivo no se pueda recuperar y los rendimientos sean inferiores en comparación con el primer ciclo analizado (50 días).

Este comportamiento se repite para el periodo de 2070 – 2080, donde, en el ciclo 1 (Figura 54 – C), el estrés hídrico que sufre el cultivo es importante pero no se prolonga por 50 días, al igual que para el primer ciclo del periodo 2040 – 2050. Esto permite que el cultivo se recupere posterior al inicio de la temporada lluviosa, para este periodo se obtiene un desarrollo del dosel superior al primer ciclo del periodo 2040 – 2050 (Figura 54 – A). Debido a que se presenta un pequeño déficit hídrico después de los 400 días que coincide con la etapa de desarrollo vegetativo, donde limitando el riego se alcanza una mayor cantidad de biomasa (Calderón Araya y Chaves Solera, 2020). Mientras que, los resultados obtenidos para el cuarto ciclo del mismo periodo (figura 54 – D) presentan un déficit hídrico en la zona

radicular (Dr) mucho más severo (150 a 325 días), lo cual causa la senescencia temprana del dosel debido al estrés hídrico presentado entre los 200 y 300 días después de la siembra. Esta relación entre el decaimiento de la transpiración del cultivo y la disminución en el desarrollo del dosel producto del agotamiento hídrico en la zona radicular, se debe a que la transpiración es un fenómeno que ocurre en los tejidos de la planta generando un gradiente hídrico que moviliza el agua desde la raíz hasta los estomas. Cuando la transpiración es demasiado alta o baja ocasiona un cierre estomático que provoca que el crecimiento de la planta sea mucho más lento de lo esperado. En caso de que el agotamiento hídrico en la zona radicular sea severo, el cierre de estomas se prolonga llevando a una senescencia temprana y eventual muerte del cultivo (Squeo y León, 2007).

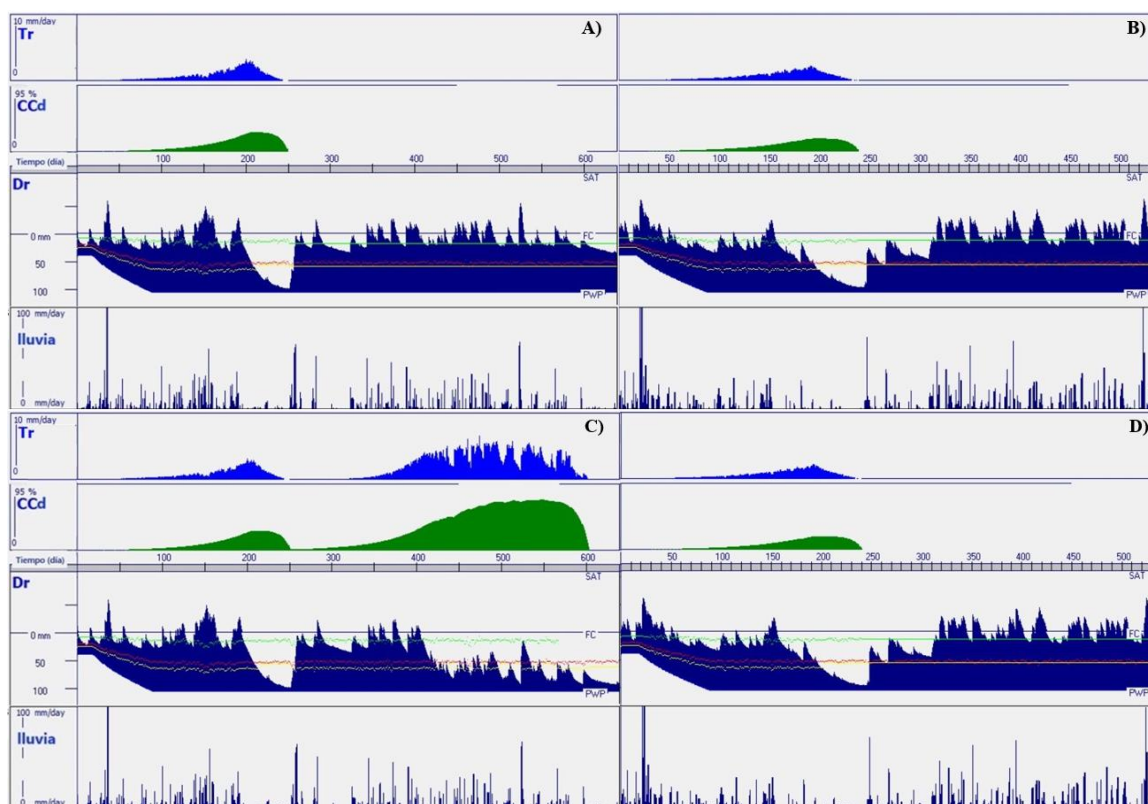


**Figura 54.** Resultados del modelo AquaCrop para la simulación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 donde: A) ciclo 1 periodo 2040 – 2050, B) ciclo 4 periodo 2040 – 2050, C) ciclo 1 periodo 2070 – 2080 y D) ciclo 4 periodo 2070 – 2080, para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

Por otra parte, los resultados obtenidos del modelo AquaCrop para la transpiración del cultivo (Tr), el desarrollo del dosel (CCd) y el agotamiento en la zona radicular (Dr) con respecto a la precipitación para los ciclos que presentaron valores mínimos de biomasa y rendimiento para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo a corto plazo (Apéndice C11, C12, C13, C14 y C15) y largo plazo (Apéndice C16, C17, C18, C19 y C20). En la Figura 55, se observa que el comportamiento para el escenario SSP5-8.5 resulta similar al obtenido para el escenario SSP2-4.5. Sin embargo, durante el primer ciclo del periodo 2040 – 2050 el cultivo presenta



una senescencia temprana severa (200 a 250 días) lo que impide la recuperación del cultivo (Figura 55 – A). Lo cual se ve reflejado en el comportamiento del desarrollo del dosel desde los 200 a 300 días (Figura 55 – A) y el rendimiento obtenido en este caso (10,01 t/ha).



**Figura 55.** Resultados del modelo AquaCrop para la simulación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 donde: A) ciclo 1 periodo 2040 – 2050, B) ciclo 4 periodo 2040 – 2050, C) ciclo 1 periodo 2070 – 2080 y D) ciclo 4 periodo 2070 – 2080, para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

Mientras que, para el primer ciclo del periodo 2070 – 2080 el agotamiento hídrico no fue prolongado (200 a 250 días) por lo que permite que el cultivo se recupere al iniciar la época lluviosa (300 días) (Figura 55 – C). En el caso del cuarto ciclo del periodo 2040 – 2050 (Figura 55– B) y del periodo 2070 – 2080 (Figura 55 – D) los niveles de agotamiento hídrico en la zona radicular (Dr) ocurren al alcanzar los 150 días después de la siembra y se prolonga hasta los 300 días, lo cual impide que el cultivo pueda recuperarse. El exceso de agua resulta en un suelo bajo condiciones anaeróbicas en la zona radicular, provocando que la transpiración del cultivo se detenga por completo, ya que los niveles de agua en el suelo resultan inferiores al punto de marchitez permanente provocando la muerte del cultivo. Esto ocurre cuando la cantidad de biomasa producida es escasa, lo cual afecta no solo el rendimiento de la cosecha, sino también la calidad del producto. Debido a que se restringe el crecimiento de las hojas y la fibra del tallo, además, afecta el proceso de almacenamiento de sacarosa por parte del tallo (Squeo y León, 2007). Los efectos del cambio climático son

notorios al evaluar las predicciones de los rendimientos en función del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar.

El porcentaje promedio de la disminución del rendimiento al incorporar los escenarios de CC a la simulación son del 74% para el escenario SSP2-4.5 y del 80% para el escenario SSP5-8.5. Estos porcentajes consideran solamente los ciclos que presentaron rendimientos inferiores a las 20 t/ha para ambos periodos establecidos. Lo cual indica la necesidad de considerar las variaciones climáticas a futuro para establecer medidas de adaptación al cambio climático que permitan tener una respuesta oportuna a la disminución del rendimiento. Permitiendo limitar los efectos adversos presentados sobre el cultivo de caña de azúcar ubicado en la Hacienda Juan Viñas producto del cambio climático, reduciendo la vulnerabilidad y favoreciendo la productividad (Uribe Botero, 2015).

#### **4.3.3 Medidas de adaptación al cambio climático para el cultivo de caña de azúcar evaluado en la Hacienda Juan Viñas**

La implementación de medidas de adaptación se aplicó a los ciclos donde el cultivo experimenta senescencia temprana debido al estrés hídrico provocado por un agotamiento severo de la cantidad de agua disponible en la zona radicular, considerando los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En dichos ciclos se presenta una calidad de biomasa total producida deficiente y rendimientos inferiores a las 20 t/ha. Por esta razón, se plantea la implementación de medidas de adaptación para evitar las pérdidas económicas asociadas a bajos rendimientos en la cosecha, el desperdicio de recursos y la afectación ambiental a un mal manejo del cultivo ante los efectos de la variabilidad climática. En este sentido, se aplicó riego por aspersión, como medida de adaptación, durante el primer y cuarto ciclo fenológico del cultivo en las simulaciones que incorporan los escenarios SSP2-4.5 (Apéndice C21, C22, C23 y C24) y SSP5-8.5 (Apéndice C25, C26, C27 y C28), para ambos periodos de evaluación (2040 – 2050 y 2070 – 2080). Esta medida de adaptación permite gestionar de una manera más controlada la lámina de riego aplicada, con el fin de manejar eficientemente los recursos y evitar el impacto del cambio climático sobre el rendimiento.

Como se analizó anteriormente, el comportamiento de la precipitación en la zona de Juan Viñas tiende a aumentar en la época lluviosa para los escenarios de CC evaluados. Sin embargo, la época seca resulta mucho más severa, por lo cual se presentan estos periodos de agotamiento hídrico en la zona radicular afectan significativamente la producción de biomasa y por ende los rendimientos. Por lo tanto, el riego pretende suplir esta demanda hídrica puntual que se presenta durante el ciclo fenológico del cultivo al alcanzar los 200 días después de la siembra como se observa en las Figuras 54 y 55. Implementar el riego por aspersión en caña de azúcar permite ajustar el riego según el requerimiento hídrico del cultivo en el tiempo, evita la compactación del suelo y se acopla a las características onduladas del terreno característico de la zona de Juan Viñas (Cruz y Torres, 2003).

##### **4.3.3.1 Biomasa según el escenario SSP2-4.5**

En el Tabla 24, se muestran los resultados obtenidos del programa AquaCrop referentes a las simulaciones realizadas para el escenario SSP2-4.5 implementando la medida de adaptación para el primer y cuarto ciclo productivo de los periodos 2040 – 2050 y 2070 – 2080. Además,

se especifica la lámina de riego aplicada durante los días que presentan mayor requerimiento hídrico y los efectos que esta medida tiene sobre la producción de biomasa y el rendimiento total obtenido al final de cada ciclo productivo. La cantidad de lámina aplicada fue definida por el programa AquaCrop a partir de la precipitación incorporada al módulo de clima y el porcentaje de estrés hídrico que experimenta el cultivo durante el ciclo vegetativo. El modelo identifica la cantidad de agua requerida por el cultivo en un determinado momento del ciclo y recomienda la aplicación de la lámina de riego necesaria para garantizar un porcentaje de humedad en el suelo cercano a la línea de expansión del dosel.

**Tabla 24.** Resultados obtenidos de la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando el escenario de cambio climático SSP2-4.5 para cada periodo evaluado.

Ciclo	Periodo evaluado	Rend. SMA (t/ha)	Calendario de riego propuesto		Lámina aplicada (mm)	Biomasa obtenida (t/ha)	Rend. CMA (t/ha)
			Días después de la siembra	Fecha de riego			
1	2040 - 2042	7,54	210	28/7/2040	64,70	119,60	41,86
			228	15/8/2040	62,40		
			241	28/8/2040	64,70		
			252	8/9/2040	61,00		
			276	2/10/2040	64,10		
			294	20/10/2040	63,10		
4	2046 - 2048	2,74	12	14/4/2046	19,60	109,69	38,39
			175	24/9/2046	45,80		
			199	18/10/2046	45,20		
			208	27/10/2046	45,40		
			221	9/11/2046	46,70		
			230	18/11/2046	46,50		
1	2070 - 2074	20,85	5	5/1/2070	18,30	119,60	41,86
			8	8/1/2070	16,60		
			22	22/1/2070	19,50		
			204	23/7/2070	44,70		
			215	3/8/2070	45,60		
			228	16/8/2070	48,50		
4	2076 - 2078	2,80	12	16/4/2076	18,50	108,72	38,05
			175	26/9/2076	44,90		
			199	20/10/2076	46,90		
			209	30/10/2076	43,70		
			223	13/11/2076	51,40		
			232	22/11/2076	43,50		

Rend. SMA: Rendimiento total sin medidas de adaptación al cambio climático (t/ha).

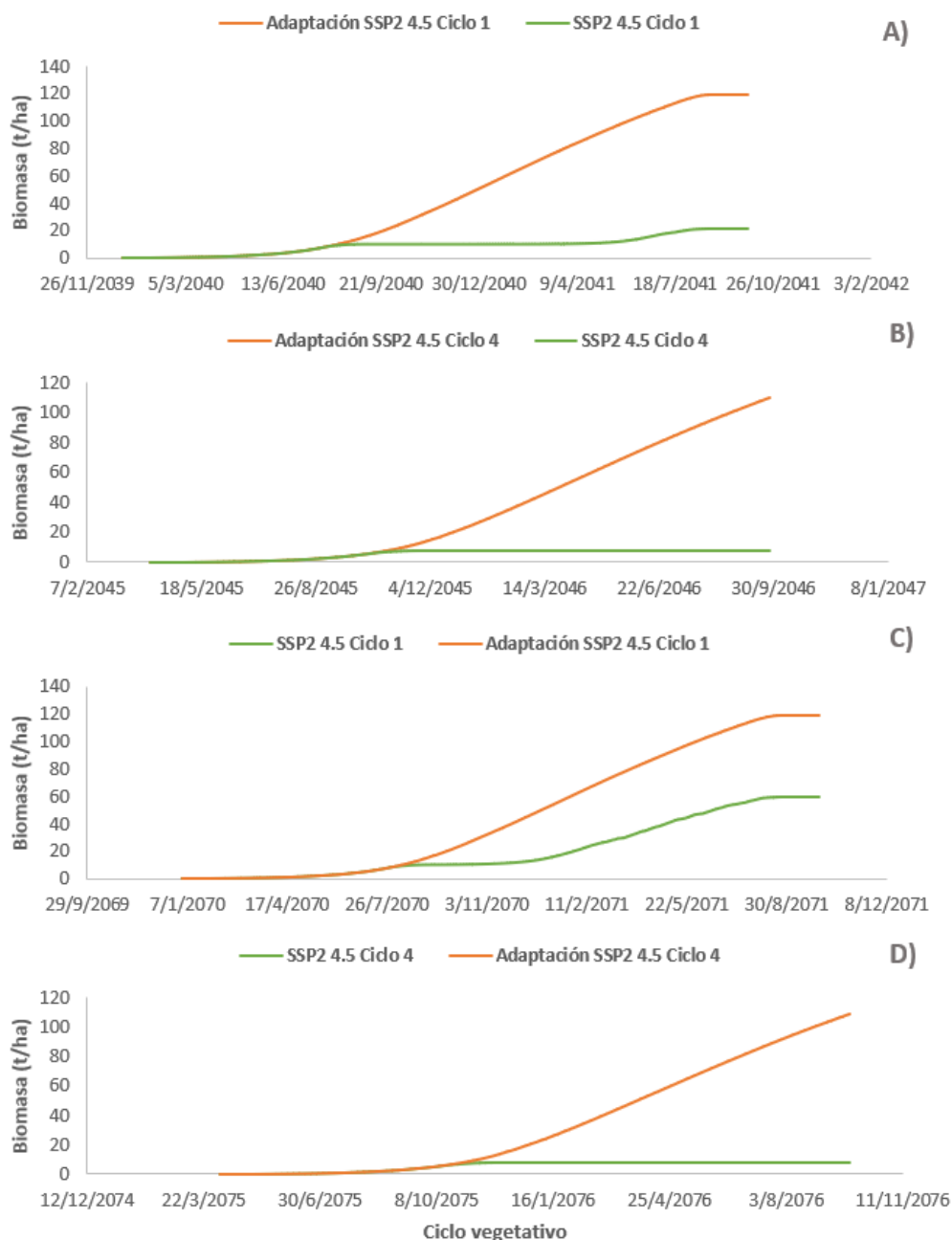
Rend. CMA: Rendimiento total con medidas de adaptación al cambio climático (t/ha).

La caña de azúcar se caracteriza por tener un ciclo fenológico prolongado y en el caso de la variedad LAICA 04-250 el ciclo es mucho más largo. Por lo que el desarrollo del dosel ocurre relativamente despacio exponiendo al cultivo a impactos negativos debido a la estacionalidad de los periodos de lluvia relacionados al cambio climático. Debido a esto, las tasas pico de evapotranspiración del cultivo se encuentran entre 6 y 15 mm/día lo cual indica que para evitar que el crecimiento del cultivo se vea afectado se requiere de al menos una lámina constante de 850 mm por año. En la zona de Juan Viñas se puede presentar una cantidad de precipitación anual mucho mayor a la requerida por el cultivo. El problema radica, en los periodos de sequías lo cuales son muy severos y hacen que la humedad presente en la matriz del suelo disminuya hasta alcanzar el límite de marchitez permanente (Squeo y León, 2007).

Por esta razón, se planteó aplicar una lámina de riego segmentada, supliendo la demanda hídrica que sufre el cultivo al alcanzar los 200 días después de la siembra, lo cual permite obtener una mejoría en la cantidad de biomasa producida al final de cada ciclo afectado. En la Figura 56 se muestran los resultados obtenidos al comparar la simulación del escenario SSP2-4.5 sin medida de adaptación con respecto a la simulación con riego incorporado como medida de adaptación.

Se observa que, para el primer ciclo evaluado en el periodo comprendido entre los años 2040 y 2050 (Figura 56 – A), al inicio del ciclo fenológico (100 – 250 días), la transpiración es baja por lo que el desarrollo del dosel ocurre con normalidad. Al realizar la primera aplicación del riego a los 210 días después de la siembra cuando inicia la etapa de agotamiento hídrico en la zona radicular, se logra evitar la disminución de la tasa de crecimiento del cultivo y la afectación debido al estrés hídrico. Esto permite que el desarrollo del dosel no se vea afectado y el crecimiento ocurra con normalidad, lo cual repercute positivamente en los resultados obtenidos durante la cosecha, ya que la biomasa total producida alcanza las 119,603 t/ha. Esto representa un aumento del 80% en comparación con la simulación realizada para el escenario SSP2-4.5 sin aplicar medida de adaptación.

En el caso del cuarto ciclo (figura 56 – B), la biomasa simulada presenta una mejoría del 97%, aplicando una lámina de riego definida según la necesidad hídrica del cultivo. La aplicación inicia a los 12 días después de la siembra con 19,6 mm/día y continuando a los 175 días después de la siembra aumentando la lámina a 45,8 mm/día. Lo cual permite mantener la zona radicular con un nivel de agua óptimo y constante durante la etapa fenológica correspondiente al desarrollo vegetativo permitiendo un adecuado crecimiento del dosel. Además, mejora la acumulación de sacarosa en los tallos aumentando no solo el rendimiento, sino también la calidad del producto final. Por otro lado, para el periodo comprendido entre los años 2070 y 2080 los resultados para el primer ciclo obtenidos para el escenario SSP2-4.5 se muestran en la Figura 56 – C, donde se observa un comportamiento similar al analizado anteriormente. La biomasa producida en este caso al aplicar la medida de adaptación presenta un aumento del 82%, ya que, se logra alcanzar un total de 119,60 t/ha al final del ciclo. Para este periodo de evaluación el cultivo presenta un cambio en el requerimiento hídrico, debido a que se debe aplicar la primera lámina de riego durante las etapas tempranas del ciclo vegetativo. El primer riego aplicado fue de 18,3 mm/día a los 5 días después de la siembra con el objetivo de garantizar un nivel de agua constante en la zona radicular del cultivo, lo que permite evitar periodos de agotamiento hídrico que afecten la producción de biomasa.



**Figura 56.** Resultados del modelo AquaCrop para la simulación de la biomasa producida a futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 al aplicar medidas de adaptación para el A) primer ciclo para el periodo 2040 – 2050, B) cuarto ciclo para el periodo 2040 – 2050 C) primer ciclo para el periodo 2070 – 2080 y D) cuarto ciclo para el periodo 2070 – 2080.

Por último, en la Figura 56 – D se observa el comportamiento de la biomasa total obtenida al final del cuarto ciclo productivo para el escenario SSP2-4.5, durante el periodo 2070 – 2080. En este caso la mejoría en la biomasa fue del 97%. La aplicación del riego inicia a los 12 días después de la siembra con una lámina de 18,5 mm/días; este primer riego permite que la tasa de crecimiento aumenta con normalidad. Mientras que el segundo riego se aplica a los 175

días después de la siembra con una lámina de 44,9 mm/días, lo cual permite evitar el agotamiento en la zona radicular debido al periodo de sequía identificando para este ciclo.

#### 4.3.3.2 Biomasa según el escenario SSP5-8.5

En la Tabla 25, se muestran los resultados obtenidos a partir del programa AquaCrop de las simulaciones realizadas para el escenario de cambio climático SSP5-8.5, implementando la medida de adaptación para el primer y cuarto ciclo productivo de los periodos 2040 – 2050 y 2070 – 2080. Se especifica la lámina de riego aplicada durante los días donde el cultivo presenta un mayor déficit hídrico, estimada por el programa AquaCrop.

**Tabla 25.** Resultados obtenidos de la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para cinco ciclos fenológicos consecutivos considerando el escenario de cambio climático SSP5-8.5 para cada periodo evaluado.

Ciclo	Periodo evaluado	Rend. SMA (t/ha)	Calendario de riego propuesto		Lámina aplicada (mm)	Biomasa obtenida (t/ha)	Rend. CMA (t/ha)
			Días después de la siembra	Fecha de riego			
1	2040 - 2041	3,50	4	4/1/2040	19,70	121,99	42,69
			8	8/1/2040	19,70		
			22	22/1/2040	20,40		
			202	20/7/2040	42,80		
			212	30/7/2040	43,40		
			221	8/8/2040	44,70		
4	2045 - 2047	2,88	12	14/4/2045	19,90	110,26	38,59
			98	9/7/2045	41,90		
			174	23/9/2045	44,30		
			197	16/10/2045	44,70		
			207	26/10/2045	44,90		
			219	7/11/2045	45,70		
1	2070 - 2071	17,67	5	5/1/2070	18,50	121,02	42,35
			8	8/1/2070	16,90		
			22	22/1/2070	19,90		
			202	21/7/2070	41,40		
			213	1/8/2070	45,90		
			222	10/8/2070	44,80		
4	2075 - 2076	2,92	12	16/4/2075	19,30	109,42	38,29
			175	26/9/2075	45,50		
			199	20/10/2075	48,00		
			209	30/10/2075	44,50		
			221	11/11/2075	45,80		
			230	20/11/2075	45,70		

Rend. SMA: Rendimiento total sin medidas de adaptación al cambio climático (t/ha).

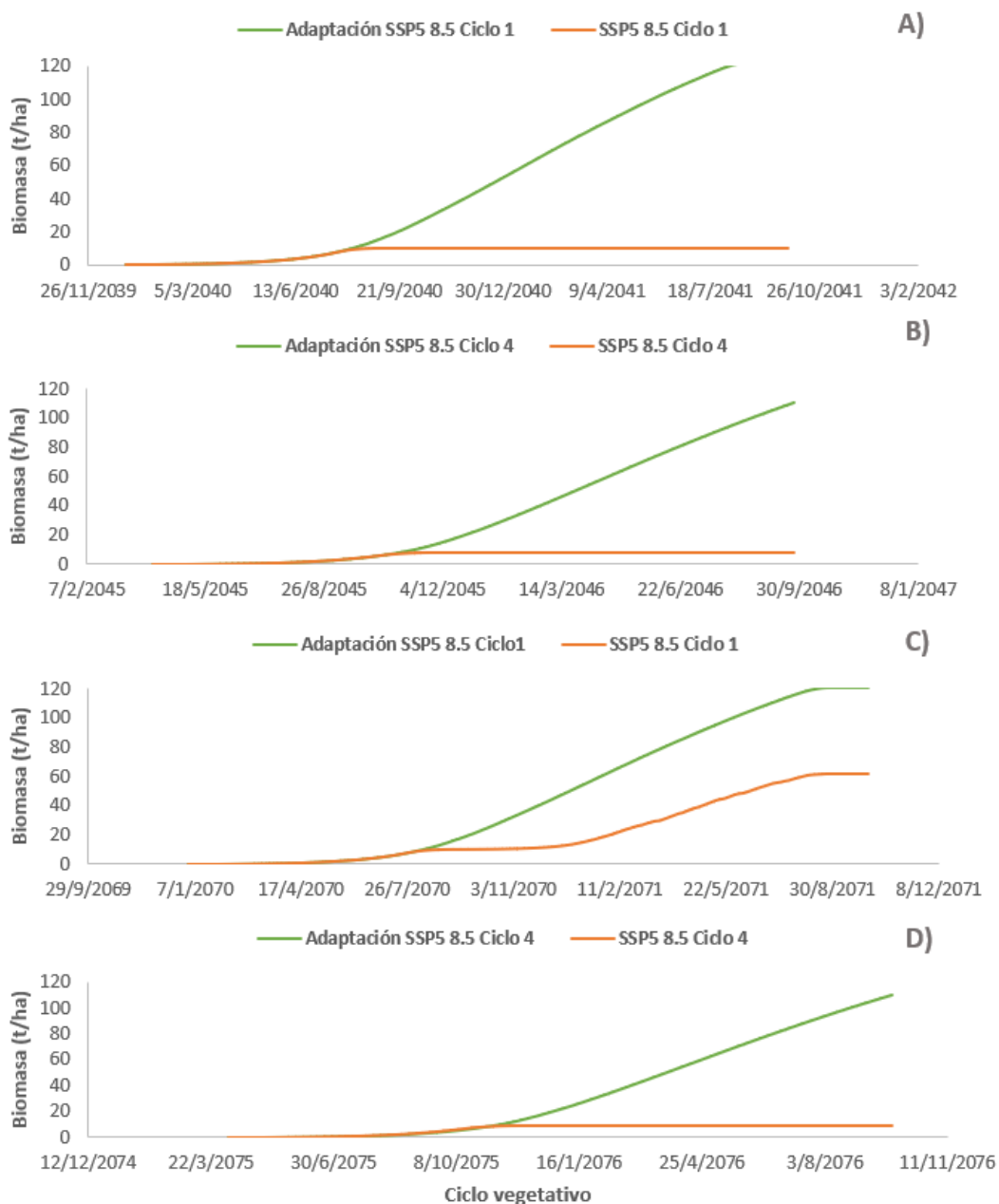
Rend. CMA: Rendimiento total con medidas de adaptación al cambio climático (t/ha).

En la Figura 57, se muestran los resultados obtenidos al comparar la simulación del escenario SSP5-8.5 con respecto a la simulación incorporando la medida de adaptación. Se observa, que para el primer ciclo evaluado y considerando el periodo 2040 - 2050 (Figura 57 – A), al inicio del ciclo fenológico (5 días) el desarrollo del dosel se ve afectado por deficiencia hídrica en la zona radicular y por ende en la transpiración del cultivo.

Debido a ello, la primera aplicación del riego se realiza a los 4 días después de la siembra con una lámina de 19,7 mm/día para evitar la disminución de la tasa de crecimiento del cultivo y la afectación debido al estrés hídrico. Lo cual permite que el desarrollo del dosel no se vea afectado impactando positivamente los resultados obtenidos de la biomasa total producida durante la cosecha, alcanzando un total de 121,99 t/ha. Esto representa un aumento del 97% en comparación con la simulación realizada para el escenario SSP5-8.5 sin aplicar medida de adaptación. En el caso del cuarto ciclo (Figura 57 – B), el comportamiento de la biomasa simulada aplicando la medida de adaptación presenta una mejoría del 97% al igual que para el ciclo anterior. Al aplicar una lámina de riego iniciando a los 12 días después de la siembra con 19,9 mm/día y continuando a los 98 días después de la siembra, aumentando la lámina a 41,9 mm/día se obtiene un total de biomasa igual a 110,262 t/ha.

Por otro lado, para el periodo comprendido entre los años 2070 y 2080, los resultados para el primer ciclo obtenidos para el escenario SSP5-8.5 se muestran en la Figura 57 – C. La biomasa producida en este caso al aplicar medidas de adaptación presenta un aumento del 85%, ya que se logra alcanzar un total de 121,02 t/ha al final del ciclo. El primer riego aplicado fue de 18,3 mm/día a los 5 días después de la siembra con el objetivo de garantizar un nivel de agua constante en la zona radicular del cultivo, lo que permite evitar periodos de agotamiento hídrico que afecten la producción de biomasa. El segundo riego se aplica a los 8 días después de la siembra con una lámina de 16,9 mm/día con el objetivo de mantener una humedad en el suelo entre los 50 – 80 %, permitiendo aumentar la concentración de sacarosa y eleva el rendimiento del cultivo (Steduto et al., 2012).

Por último, en la Figura 57 – D se observa el comportamiento de la biomasa total obtenida al final del cuarto ciclo productivo, para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo 2070 – 2080. En este caso la mejoría en la biomasa fue del 97%. La aplicación del riego inicia a los 12 días después de la siembra con una lámina de 19,30 mm/días. Este primer riego permite que la tasa de crecimiento aumente con normalidad, mientras que el segundo riego se aplica a los 175 días después de la siembra con una lámina de 45,5 mm/días. Lo cual permite mantener la zona radicular con un nivel de agua óptimo y constante durante la etapa fenológica correspondiente al desarrollo vegetativo, permitiendo un adecuado crecimiento del dosel. Además, mejora la acumulación de sacarosa en los tallos aumentando no solo el rendimiento, sino también la calidad del producto final.



**Figura 57.** Resultados del modelo AquaCrop para la simulación de la biomasa producida a futuro del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 al aplicar medidas de adaptación para A) primer ciclo para el periodo 2040 – 2050, B) cuarto ciclo para el periodo 2040 – 2050 C) primer ciclo para el periodo 2070 – 2080 y D) cuarto ciclo para el periodo 2070 – 2080.

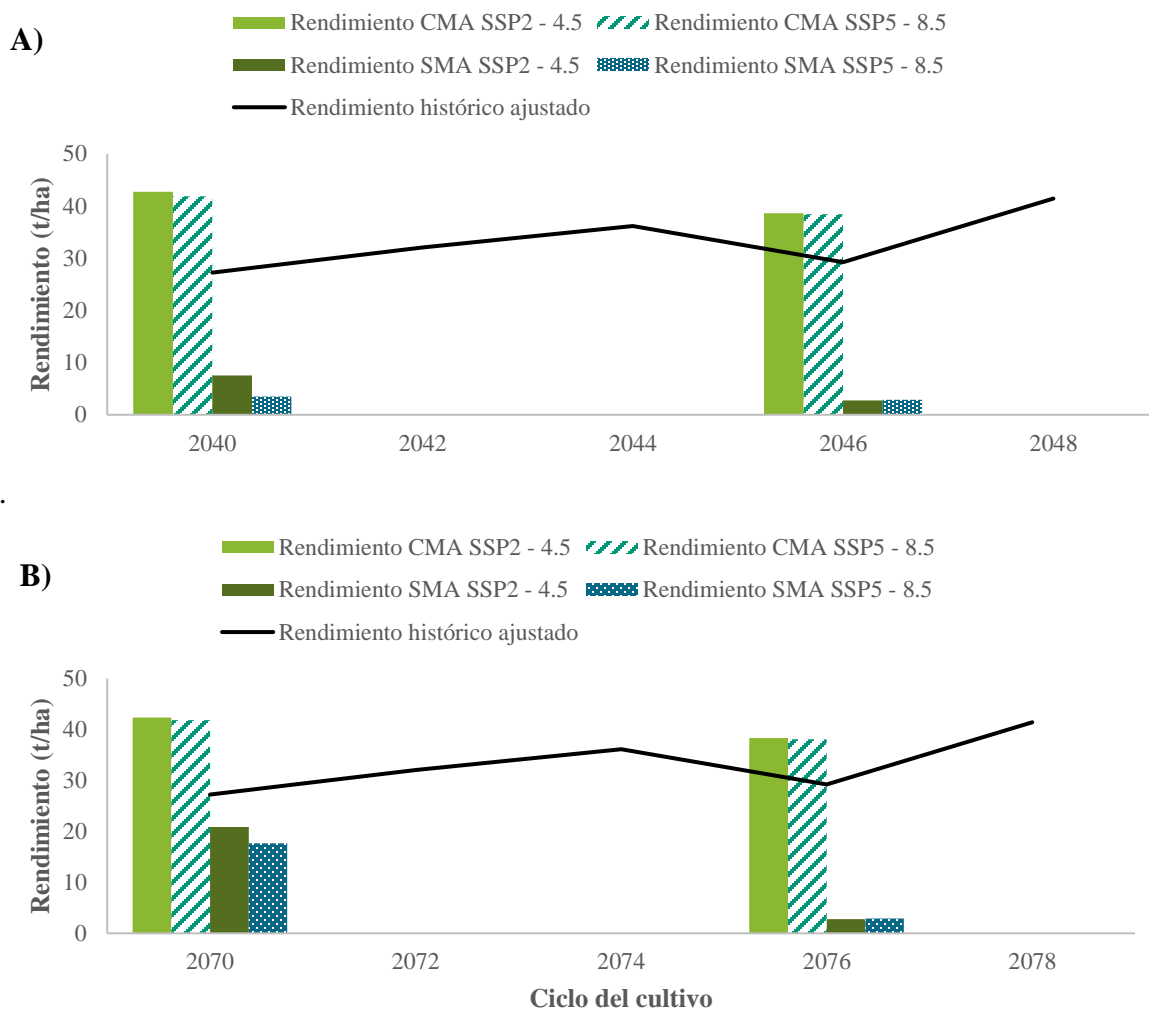
#### 4.3.3.3 Rendimiento

Por último, en la Figura 58 se muestra una comparación de los rendimientos simulados a partir de los escenarios de cambio climático para el periodo de A) 2040 – 2050 y B) 2070 – 2080 con respecto al rendimiento histórico ajustado. Se puede observar que la mejoría en el rendimiento obtenido al final de cada ciclo al incorporar el riego como medida de adaptación,



no solo evita las pérdidas observadas debido al cambio climático, sino también mejora los rendimientos observados durante la simulación del registro histórico ajustado.

Para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo de 2040 – 2050 se obtiene un rendimiento de 41,86 t/ha para el primer ciclo y un 38,39 t/ha para el cuarto ciclo. Mientras que para el periodo de 2070 – 2080 los rendimientos obtenidos fueron de 41,69 t/ha y 38,05 t/ha para el primer y cuarto ciclo fenológico del cultivo respectivamente (Figura 58 – A). Lo cual indica que la aplicación del riego impacta positivamente en el desarrollo, crecimiento, producción de biomasa y rendimiento del cultivo de caña de azúcar. Además, funciona como una herramienta que el permite al sector azucarero en la zona de Juan Viñas disminuir la vulnerabilidad del cultivo ante periodos prolongados de sequías a futuro.



**Figura 58.** Comparación del rendimiento obtenido al considerar los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y el SSP5-8.5 en comparación a la simulación modelada al contemplar el riego como medida de adaptación con respecto a los valores históricos ajustados para los periodos A) 2040 – 2050 y B) 2070 – 2080.

Por otra parte, en la Figura 58-B se observan los rendimientos obtenidos para el periodo entre los años 2070 y 2080 comparando ambos escenarios de cambio climático evaluados y el rendimiento histórico ajustado. Donde se evidencia el aumento del rendimiento obtenido para cada ciclo del cultivo analizado al incorporar riego durante el periodo de sequía que favorece el agotamiento hídrico como medida de adaptación. El escenario SSP2-4.5 presenta un 42,69 t/ha de rendimiento para el primer ciclo y 38,59 t/ha para el cuarto ciclo. Mientras que para el escenario SSP5-8.5 se obtuvo un rendimiento de 42,35 t/ha para el primer ciclo y 38,29 t/ha para el cuarto ciclo fenológico.

El riego es utilizado comúnmente como medida de adaptación para sistemas productivos que no cuentan con este manejo, como es el caso del cultivo de caña de azúcar producido en la Hacienda Juan Viñas. Conocer las condiciones de humedad del suelo y los niveles de agua que limitan el crecimiento del cultivo es de suma importancia para incorporar el riego responsable, ya que permite reducir los riesgos asociados a los periodos de sequías y controlar el déficit hídrico durante la etapa inicial del desarrollo vegetativo y en especial durante la etapa de maduración del cultivo ya que propicia el aumento del contenido de sacarosa por unidad de biomasa seca, lo que aumenta significativamente el rendimiento de azúcar producida y su calidad (Steduto et al., 2012).

## 5. CONCLUSIONES

---

- El registro agronómico (2000 – 2022) indica que para el año 2008 se presenta incremento en las concentraciones de pH (5,9), acidez intercambiable (1,35 cmol/L) y porcentaje de saturación de acidez (14%) en el suelo, estos valores superan los límites permisibles de 5,5, 0,5 cmol/L y 10%, respectivamente. Lo cual implica deficiencia en la disponibilidad de nutrientes debido a la precipitación de aluminio intercambiable afectando la solubilidad y movilidad de nutrientes.
- El lote de estudio presenta un promedio histórico de 159,42 t caña/ha, lo cual indica una biomasa de 79,71 t/ha y un rendimiento de 27,90 t/ha para el periodo comprendido entre 2000 y 2022.
- Según el análisis de estimación de datos meteorológicos ausentes, se obtuvo una serie completa para las variables climáticas de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa máxima, humedad relativa mínima y radiación solar con un  $r^2$  de 0,99, 0,99, 0,99, 0,99, 0,92 y un RMSE de 1,75, 2,64, 1,29, 4,37, 0,06, respectivamente. Se concluye que los parámetros meteorológicos estimados mediante el modelo de regresión presentan un ajuste satisfactorio en cada caso y las diferencias entre los datos estimados versus los observados son aceptables (< 5%).
- A partir de la estimación de la homogeneidad en el perfil del suelo aplicada al lote de estudio se obtuvo un 72,2% de compatibilidad entre muestras para un mismo horizonte. Se asume que el suelo es homogéneo para el área total del lote identificando tres horizontes bien definidos a 20 cm, 40 cm, 60 cm con texturas de franco arcilloso, franco y franco arcilloso, respectivamente.
- Al estimar el coeficiente de conductividad hidráulica se obtuvo un  $r^2 = 0,97$  para la zona alta y  $r^2 = 0,98$  para la zona baja del lote de estudio. Representado un ajuste de la tasa de infiltración acumulada óptimo. Los valores de Ks presentan una diferencia de  $\pm 0,28$  mm/min entre zonas, lo cual concuerda con un suelo homogéneo de textura entre franco y franco arcilloso.
- El ajuste del modelo fue un proceso exploratorio para establecer los parámetros no conservativos específicos de la variedad LAICA 04-250 y calibrar el programa AquaCrop. Los mejores ajustes se presentaron para las simulaciones 5, 6 y 11 con un  $r^2$  de 0,81, 0,87 y 0,80 un RMSE de 16,38, 15,39 y 14,33 y un error promedio de 15,33%, 14,68% y 12,75%, respectivamente. Al analizar los parámetros estadísticos obtenidos en conjunto, se concluye que la simulación 11 presenta una mayor precisión al estimar la biomasa y rendimiento de la variedad analizada.
- La simulación del requerimiento hídrico histórico indica la presencia de agotamiento hídrico en la zona radicular para los cinco ciclos del cultivo evaluados, principalmente durante la etapa de crecimiento vegetativo (200 – 350 días después de la siembra). Aquellos ciclos que presentaron una menor afectación por déficit hídrico son el tercero y quinto con una disminución entre el 80 y 50% de la humedad en el suelo.

- Según el análisis de sensibilidad, las variaciones en la textura del suelo considerando clases texturales aproximadas a las identificadas en el lote de estudio, provocan una disminución del 14,43% en la biomasa producida. La afectación aumenta al evaluar una textura arcillosa en el primer y último horizonte con una disminución máxima de 65,91% para el cuarto ciclo productivo.
- Variaciones en el espesor y cantidad de horizontes que conforman el perfil del suelo para texturas francas y franco arcillosas aumentan la producción de biomasa en promedio un 1,80%. Sin embargo, al evaluar una textura franco arcillosa en el primer horizonte del suelo el rendimiento disminuye un 0,27% debido a la baja permeabilidad característica de este tipo de suelo.
- Según el análisis de sensibilidad, variaciones en la presencia del nivel freático dentro de la zona de crecimiento radicular afecta significativamente el desarrollo del dosel, la producción de biomasa y el rendimiento obtenido al final del ciclo productivo con una disminución promedio del 88,32%. Mientras que, al evaluar el nivel freático a una profundidad mayor a la zona radicular la producción de biomasa aumenta un 26,89%.
- Al simular el cultivo ajustado incorporando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se obtiene que la biomasa y los rendimientos tienden a disminuir conforme transcurre el tiempo. Las implicaciones que sufre el cultivo aumentan para el escenario SSP5-8.5 donde el rendimiento disminuye un 26,18% para el periodo 2040 – 2050 y un 24,65% para el periodo 2070 – 2080. Mientras que la biomasa presenta una disminución del 26,48% para el periodo 2040 – 2050 y un 24,82% para el periodo 2070 – 2080.
- La simulación del cultivo incorporando los escenarios de cambio climático revelan el impacto de la variabilidad climática sobre el desarrollo del cultivo. Los niveles de estrés promedio son 21,75% para el estrés hídrico que reduce la expansión del dosel, 8,45% para el estrés hídrico que induce el cierre estomático y 2,3% para el estrés térmico que afecta la transpiración del cultivo. La mayor afectación ocurre debido al estrés hídrico producto de los periodos de sequía presentados durante la etapa de desarrollo vegetativo impidiendo el crecimiento y la acumulación de biomasa.
- Según las simulaciones realizadas al incorporar escenarios de cambio climático se concluye que la caña de azúcar es un cultivo vulnerable ante las variaciones climáticas, principalmente a los periodos de déficit hídrico que provoca una disminución en los rendimientos del 78% para los ciclos (primero y cuarto) que se vieron mayoritariamente afectados en comparación con el rendimiento histórico ajustado.
- Incorporar riego como medida de adaptación al cambio climático, beneficia al cultivo ya que aumenta el rendimiento del cultivo en un 92,10% para los ciclos (primero y cuarto) que presentaron una mayor afectación debido al agotamiento hídrico en la zona radicular.

## 6. RECOMENDACIONES

---

- Se recomienda ampliar el registro histórico de datos climáticos a 30 años, preferiblemente que la serie contenga información completa a escala diaria. Con el objetivo de mejorar la estimación del requerimiento hídrico del cultivo y permitir expresar de forma más precisa los efectos del cambio climático en las variaciones estadísticas presentadas en el orden superior de las variables simuladas.
- A modo de utilizar la metodología planteada para la obtención de los datos de entrada para el módulo de suelo del programa AquaCrop. Se sugiere aumentar la cantidad de muestras analizadas durante las pruebas de Bouyoucos a medida que aumente el perímetro del lote de estudio. Y simular las variaciones en la textura del suelo según corresponda, ya que el modelo es sensible a cambios en las propiedades físicas del suelo.
- Implementar un análisis de fertilidad del suelo contribuye al modelo de forma positiva, ya que permite explicar de una manera mucho más precisa el comportamiento del cultivo a lo largo del ciclo fenológico.
- Se recomienda realizar un muestreo en campo para determinar el nivel freático del suelo, con el objetivo de incorporar este parámetro a la simulación del requerimiento hídrico del cultivo debido a que se determinó que el crecimiento del cultivo es sensible a esta variable.
- Se recomienda realizar el proceso de ajuste del modelo a partir de datos experimentales reales observados o bien determinados mediante análisis de laboratorio y pruebas en campo para la variedad específica del cultivo estudiado. Con el objetivo de disminuir el porcentaje de error debido a datos teóricos estandarizados. Este proceso permite incorporar una nueva variedad al programa AquaCrop para contemplar aquellos parámetros no conservativos del cultivo que generan dispersión a la hora de realizar las simulaciones del desarrollo del dosel en función del requerimiento hídrico del cultivo.
- A modo de continuidad de esta investigación se recomienda ampliar la cantidad de ciclos productivos consecutivos e incorporar la renovación de la plantación y aspectos relacionados con las prácticas de siembra y cosecha tanto para la modelación histórica como para la simulación futura incorporando escenarios de cambio climático.
- Se recomienda incorporar al análisis del impacto del cambio climático los cinco escenarios disponibles en el sexto informe de evaluación del IPCC, con el objetivo de explicar ampliamente las implicaciones que tienen las condiciones climáticas a futuro sobre el rendimiento del cultivo.
- Se recomienda implementar el riego como medida de adaptación sujeto a la necesidad hídrica del cultivo para evitar afectar el adecuado desarrollo del dosel y gestionar adecuadamente los recursos naturales y económicos de la empresa.

## 7. REFERENCIAS

---

- Ahmed Elhassan, O. M., Ibrahim Musa, M., Jnad, I., Khalafalla Hassan, D., Hassan, A. E. y Abdalla Mohamed, A. (2022). Uso del modelo AquaCrop para evaluar el impacto del cambio climático en la productividad del sorgo en el norte de Gedaref, Sudán. *Revista ResearchGate*, 1-13. [https://www.researchgate.net/publication/360937737\\_Use\\_of\\_AquaCrop\\_model\\_for\\_assessing\\_the\\_impact\\_of\\_climate\\_change\\_on\\_sorghum\\_productivity\\_in\\_Northern\\_Gedaref\\_Sudan](https://www.researchgate.net/publication/360937737_Use_of_AquaCrop_model_for_assessing_the_impact_of_climate_change_on_sorghum_productivity_in_Northern_Gedaref_Sudan)
- Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. [Estudio FAO: Riego y Drenaje 56]. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8802ddc9-86b6-4f13-96b7-4871dd3aee65/content>
- Alonso, J. M., Carfagno, P. y Eiza, M. J. (2017). Aplicación del modelo soil wáter characteristics a las condiciones de la región Chaco-Pampeana semiárida para la determinación de constantes hídricas de suelos. *Revista de la Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias Universitarias de Morón*, 8(17), 47-64. [https://www.unimoron.edu.ar/static/media/doc\\_b08a09504cca11e9a04508002797af99\\_o.pdf](https://www.unimoron.edu.ar/static/media/doc_b08a09504cca11e9a04508002797af99_o.pdf)
- Alvar Beltrán, J., Heureux, A., Soldan, R., Manzanos, R., Khan, B. y Dalla Marta, A. (2021). Evaluación del impacto del cambio climático en el trigo y la caña de azúcar con el modelo AquaCrop a lo largo de la cuenca del río Indo, Pakistán. *Revista Gestión del agua agrícola*, 253(21), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106909>
- Alvarado Gamboa, L. F. (2021). Proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica. San José, Costa Rica: IMN-PNUD. <http://cgloba.imn.ac.cr/index.php/publicaciones/proyecciones-de-cambio-climatico-regionalizadas-para-costa-rica-escenarios-rcp-2-6-y-rcp-8-5/>
- Andrades, M., Moliner, A. y Masaguer, A. (2015). Prácticas de edafología: Métodos didácticos para análisis de suelos. Universidad de La Rioja. <https://publicaciones.unirioja.es/catalogo/monografias/mdaa15.shtml>
- Arce Romero, A. (2017). Estimación de rendimientos potenciales con escenarios de cambio climático para diversos cultivos agrícolas en México. [Proyecto 86487, IC-2016-083]. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/estimacion-de-rendimientos-potenciales-con-escenarios-de-cambio-climatico-para-diversos-cultivos-agricolas-en-mexico-informe>
- Bárcena, A., Prado, A., Beteta, H. E., Samaniego, J., Galiano, L. M. y Lennox, J. (2012). Cambio climático en Centroamérica: Guía de navegación. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/94ce8908-65aa-4b6f-8b03-96a8ff218d5e/content>
- Benavides Ballesteros, H. O. y León Aristizabal, G. E. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. [Instituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM].  
<http://ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

- Bolaños Esquivel, B. y Quesada Méndez, M. (2019). El conflicto de la Hacienda Juan Viñas (1977): De lo laboral a lo político. Repositorio Kérwá – UCR.  
<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/78489>
- Bouroncle, C., Imbach, P., Läderach, P., Rodríguez, B., Medellín, C., Fung, E., Martínez, M. y Donatti, C. (2015). La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? [Programa de investigación de Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria].  
<https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/c0e1f857-e237-4f49-8b90-f25f8107d746/content>
- Cadet Piedra, E. J. (2017). Caracterización de las relaciones hídricas en cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) sometidas a estrés hídrico en condiciones de invernadero en Costa Rica. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI – UCR.  
<https://repo.sibdi.ucr.ac.cr/bitstream/123456789/4878/1/42260.pdf>
- Calderón Araya, G. y Chaves Solera, M. A. (2020). Guía técnica para el cultivo de caña de azúcar en la región de Turrialba. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar.  
<https://cutt.ly/KTJshzI>
- Camarena Pérez, V. D. (2022). Variabilidad de alta frecuencia del viento en el sistema de afloramiento peruano bajo escenarios de cambio climático (CMIP6). [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio – UPCH. <https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/12851>
- Carazo, E., Figueroa, A., y Pentzke, C. (2012). Cambio climático y ecosistemas en Centroamérica: una oportunidad para la acción. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://cutt.ly/yROGYIx>
- Castillo Iglesias, Y., González Robaina, F., Hervis Granda, G., Hirán Rivero, L. y Cisneros Zayas, E. (2020). Impacto del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado. *Revista ingeniería agrícola*, 10(1), 49-60.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586262449008>
- Centro de Investigaciones Agronómicas. (2021). Dimensiones de cilindros y anillos para muestro de suelos. Universidad de Costa Rica.  
<http://www.cia.ucr.ac.cr/sites/default/files/2022-08/Dimensiones%20de%20anillos%20cilindros%20para%20muestreo%20de%20suelos.pdf>
- Chavarría Soto, E., Chaves Solera, M. A., Salazar Blanco, J. D. y Barrantes Mora, J. C. (2017). ¿Dónde se produce territorialmente la caña con que se fabrica el azúcar en Costa Rica? *Revista entre Cañeros*, Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar.  
<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/REC-n8-2017.pdf>

- Chaves Solera, M. A. y Chavarría Soto, E. (2017). Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica. I. Ordenes de suelo. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/bKkHwijyPFKqGFyANxJqzHxCWDaLMdMq>
- Chaves Solera, M. A. (2021). Indicadores históricos de producción y productividad de la agroindustria azucarera costarricense: Análisis del periodo 1969-2009 (51 Zafra). Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar, DIECA. Revista Entre Cañeros. 19. 9-66. <https://laica.cr/wp-content/uploads/2021/05/entre-caneros-no19.pdf>
- Cherlinka, A. (9 de agosto de 2022). Punto de marchitez permanente y temporal en las plantas. <https://acortar.link/FcLmwj>
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1987). Hidrología aplicada. Editorial: Martha Edna Suárez R.
- Ciancaglini, N. (2016). Guía para la determinación de textura de suelos por el método organoléptico. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. <https://acortar.link/t5rtfa>
- Climate Engine. (s.f.). Perspectivas bajo demanda a partir de datos de observaciones climáticas y terrestres. Recuperado el 18 de junio de 2023. <https://www.climateengine.org/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2015). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible. Naciones Unidas. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37310/S1420656\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37310/S1420656_es.pdf)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf)
- Cortés Bello, C., Bernal Patiño, J., Díaz Almanza, E. y Méndez Monroy, J. (2013). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca. [Proyecto de Cooperación Técnica TCP/COL/3302]. [https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/19/13886900624180/cartilla\\_caa\\_de\\_azucar.pdf](https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/19/13886900624180/cartilla_caa_de_azucar.pdf)
- Cruz, V. R. y Torres, J. S. (2003). Manejo del riego en campos con residuos de la cosecha. [Serie divulgativa No. 8 - ISSN 01216457]. Revista Cenicaña. [https://www.cenicana.org/pdf\\_privado/serie\\_divulgativa/sd\\_08/sd\\_08.pdf](https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_divulgativa/sd_08/sd_08.pdf)
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2014). Campo de levantamiento de suelos y métodos de laboratorio: Manual del informe de investigaciones de levantamiento de suelos. Revista NRCS: (2)51, 1-456. [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf)



- Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía. (2021) ¿A qué nos adaptamos y cómo nos adaptamos? Bases conceptuales para la adaptación al cambio climático en Costa Rica. [Proyecto Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio climático, DCC-MINAE]. [https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/09/Guia-de-Bases-conceptuales-para-la-adaptacion%CC%81n-al-cambio-clima%CC%81tico-en-Costa-Rica.pdf](https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/09/Guia-de-Bases-conceptuales-para-la-adaptacion-al-cambio-clima-tico-en-Costa-Rica.pdf)
- Dirección de Cambio Climático y Ministerio de Ambiente y Energía. (2022). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022 - 2026. [https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/NAP\\_Documento-2022-2026\\_VC.pdf](https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/NAP_Documento-2022-2026_VC.pdf)
- Escobar Rodríguez, V. A. (2021). Evaluación del desempeño hídrico de los suelos del Parque Estatal Sierra Morelos, Municipio de Toluca, Estado de México. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio – UAEMEX. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/111740/TESIS.ABRIL.ESCOBAR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L. y Gachuz Delgado, S. (2017). Trayectorias socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Revista de Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3), 669-693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- Fernández, M. E. (2013). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores: Evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://cutt.ly/bROX3lz>
- Flores Gallardo, H., Ojeda Bustamente, W., Flores Magdaleno, H., Sifuentes Ibarra, E. y Mejía Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Revista Agrociencia*, 47, 347-359. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a4.pdf>
- Flores, R., Muñoz, G., De Salvo, C., y Alcaraz, A. (2020). Análisis de políticas agropecuarias en Centroamérica y República Dominicana. Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0002942>
- Forero Cantor, G. A., Saldarriaga Muñoz, J. P. y Vargas Romero, M. (2017). Cambio climático: Impactos y perspectivas de investigación desde una visión multidisciplinar. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas – Universidad de Nariño*. 18(2), 122-138. <http://www.scielo.org.co/pdf/tend/v18n2/v18n2a08.pdf>
- Forsythe, W. (1985). Física de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Editorial IICA, Ed. 2, San José, Costa Rica. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7841/BVE19040149e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gateño Meneses, F. I. (2022). Propuesta metodológica para la selección de modelos de circulación general para estudios regionales. [Tesis de graduación de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio - UChile.

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/187203/Como-seleccionar-modelos-de-circulacion-general-para-estudios-regionales.pdf?sequence=1>

- Génova, L., Andreau, R., Etcheverry, M., Etchevers, P., Chale, W., Calvo, L. y Ramos, F. (2017). Hidrología aplicada al estudio y manejo de cuencas y de sistemas de riego y drenaje: Aplicación de metodologías para la medición y estimación del escurrimiento y la infiltración. Universidad Nacional de La Plata. [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/15618/mod\\_resource/content/2/unidad%202%202017.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/15618/mod_resource/content/2/unidad%202%202017.pdf)
- Gobierno de Costa Rica. (2017). Plan Nacional de Descarbonización 2018 – 2050. Poder Ejecutivo de Costa Rica. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (1997). Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2021). Cambio climático 2021: Bases físicas, resumen para responsables políticas. [Sexto Informe de Evaluación del IPCC]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf)
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2019). El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL\\_SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf)
- Guerra, A. y Hernández, A. (2017). El cambio climático y el cultivo de la caña de azúcar. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático ICC. 480-512 <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2017/06/cultivo-de-cana-de-azucar-en-guatemala-492-525.pdf>
- Guerra Martínez, F. (2021). Cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero, ¿Cuál es cuál? Revista Ciencia. 72(2), 48-55. [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/72\\_2/PDF/09\\_72\\_2\\_1239.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/72_2/PDF/09_72_2_1239.pdf)
- Hacienda Juan Viñas. (s.f.). El ingenio Juan Viñas ha producido azúcar desde 1925. <https://www.juanvinas.com/mobile-es.html#page>
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Pérez Briceño, P. M., Calderón Solera, B. y Cerda Escares, I. (2023). Escenarios de Cambio Climático de última generación para América Central y la República Dominicana: Implicancias en la gestión de la inversión pública. En: Primer lugar del Call for Papers 2023, "La Integración Centroamericana avanzando hacia el desarrollo sostenible, resiliente, innovador e inclusivo", BCIE-SIECA-SICA. Quinta edición.

- Hossne García, A., Mayorga Jaime, Y. N., Salazar Bastardo, L. D., Subero Llovera, F. A. y Zacillo Contreras, A. M. (2009). Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en dos suelos franco arenoso de sabana del estado de Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola*. 9(4), 937-950.
- Houma, A. A., Kamal, M. R., Mojid, M. A., Zawawi, M. y Rehan, B. M. (2021). Predicción del impacto del cambio climático en la productividad del arroz de regadío en Malasia utilizando el modelo FAO-AquaCrop. *Revista Ciencias Aplicadas*, 11(11253), 1-17.
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2015). Suelos de Costa Rica: orden andisol. Boletín técnico. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1828.PDF>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2015). Clima en Costa Rica: El clima y las regiones climáticas de Costa Rica. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>
- Jiménez, R., Amit, R. y Vindas, R. (2011). Políticas de cambio climático en Costa Rica, integrando esfuerzos para asumir los retos. Informe Ejecutivo. Universidad Estatal a Distancia, Centro de Investigación en Cultura y Desarrollo. [http://biblioteca.clacso.edu.ar/Costa\\_Rica/cicde-uned/20170628054324/pdf\\_709.pdf](http://biblioteca.clacso.edu.ar/Costa_Rica/cicde-uned/20170628054324/pdf_709.pdf)
- Leal Nares, O. A., Mendoza, M. E. y Carranza González, E. (2010). Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México. *Revista Investigaciones Geofísicas*, 72, 1-10. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112010000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000200005)
- Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. (2020). Programa de variedades: Informe de resultados 2020. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/nqzPcxajfJZzWMBznXLZEFHXLUTESWU>
- Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. (2021). Indicadores históricos de producción y productividad de la agroindustria azucarera costarricense: Análisis del periodo 1969-2019 (51 zafras). *Revista Entre Cañeros*. 19: 9-67 <https://cutt.ly/PROXZK8>
- Lutz Porras, J. R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en la producción de caña de azúcar: el caso del Ingenio Atirro en Turrialba, Costa Rica. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio del SIBDI – UCR. <https://cutt.ly/tROSRma>
- Macías, J., Vargas, A. y Arellano, F. (2018). Conductividad hidráulica en dos sitios del Valle Central de Costa Rica: Análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada. *Revista Geológica América Central*, 59, 75-100. <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v59i0.34160>
- Maldonado Paucar, A. D. (2016). Evaluación de diferentes dosis de hexametáfosfato de sodio (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> en la determinación de tres tipos texturales de suelo, mediante el método de

- Bouyoucos. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad Central de Ecuador]. Repositorio – UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/8135>
- Mata Chinchilla, R. (2019). Actualización del mapa digital de suelos de Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>
- Medina Rivera, R. D. (2008). Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia. [Tesis de graduación de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio de la UTP. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/75a869b6-a3b6-43d6-96f0-abcd4e512f17/content>
- Medina Rivera, S. (2017). Breve introducción a la teoría de errores y la graficación. Universidad Autónoma de Aguascalientes. ISBN 978-607-8523-50-4. [https://editorial.uaa.mx/docs/breve\\_introduccion\\_teor%C3%ADa\\_errores.pdf](https://editorial.uaa.mx/docs/breve_introduccion_teor%C3%ADa_errores.pdf)
- Mendoza, R. y Espinoza, A. (2017). Guía técnica para muestreo de suelos. Universidad Nacional Agraria y Católica Relief Servives. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Ministerio de Agricultura & Ganadería. (s.f.). Caña de azúcar. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658cana.pdf>
- Molina, E. (2007). Análisis de suelos y su interpretación. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/SUELOS-AMINOGROWanalisisinterpretacion.pdf>
- Montenegro Ballester, J. y Chaves Solera, M. (2011). Contribución del sector cañero a la mitigación del cambio climático. XVIII Congreso Azucarero de Costa Rica. 1-14. [http://www.infoagro.go.cr/Documents/Contribucion\\_Sector\\_Canero\\_a\\_la\\_Mitigacion\\_del\\_Cambio\\_Climatico.pdf](http://www.infoagro.go.cr/Documents/Contribucion_Sector_Canero_a_la_Mitigacion_del_Cambio_Climatico.pdf)
- Municipalidad de Jiménez. (10 de octubre, 2023). Datos demográficos del cantón. <https://www.munijimenez.go.cr/index.php/mn-conozcanos/mn-micanton/datos-demograficos-del-canton#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20poblaci%C3%B3n%20proyectada%20por,los%20cantones%20de%20Cartago>
- Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>
- Naciones Unidas. (2015). Proyecto de resolución remitido a la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015 para la Asamblea General en su sexagésimo noveno periodo de sesiones. <https://cutt.ly/NTJkMFT>
- Ojeda Bustamante, W., Sifuentes Ibarra, E., Íñiguez Covarrubias, M. y Montero Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos

- de los cultivos. *Revista Agrociencia*. 45, 1-11. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n1/v45n1a1.pdf>
- Ordaz, J., Ramírez, D., Mora, J., Acosta, A y Serna, B. (2010). Costa Rica: Efectos del cambio climático sobre la agricultura. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://cutt.ly/RTeQix6>
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). Métodos sencillos para el tratamiento del suelo para acuicultura. Capítulo 6. Textura del suelo. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). La estrategia de la FAO sobre el cambio climático. MYAMAR. <https://www.fao.org/3/i7175s/i7175s.pdf>
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (s.f.). AquaCrop. Recuperado el 5 de octubre de 2022, de <https://www.fao.org/aquacrop/overview/whatisaquacrop/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2022). Manual sobre el funcionamiento de AquaCrop. <https://www.fao.org/3/BR246E/br246e.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial. (2019). Organización Meteorológica Mundial (2019). Preguntas Frecuentes: ¿Qué es el sistema climático? Recuperado de: <https://wmo.int/es/busqueda?key=que+es+el+cambio+climatico+>. Consultado el 3 de abril, 2024.
- Rivera Gómez, S. J. y Dolmos Reyes, Y. M. (2022). Efecto de las propiedades físicas del suelo en la infiltración del agua en la finca el plantel UNA 2020 – 2022. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de Nicaragua]. Repositorio – UNA. <https://repositorio.una.edu.ni/4542/1/tnp33r621.pdf>
- Santos, D. J., Wilson, M. G. y Ostinelli, M. (2012). Metodología de muestreos de suelo y ensayos a campo: Protocolos básicos comunes. [Manual técnico, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria]. ISBN 978-987-679-160-1. [https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Wilson/publication/284173760\\_METODOLOGIA\\_DE\\_MUESTREO\\_DE\\_SUELO\\_Y\\_ENSAYOS\\_A\\_CAMPO\\_Protocolos\\_basicos\\_comunes/links/564ddc8608ae1ef9296b0864/METODOLOGIA-DE-MUESTREO-DE-SUELO-Y-ENSAYOS-A-CAMPO-Protocolos-basicos-comunes.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Wilson/publication/284173760_METODOLOGIA_DE_MUESTREO_DE_SUELO_Y_ENSAYOS_A_CAMPO_Protocolos_basicos_comunes/links/564ddc8608ae1ef9296b0864/METODOLOGIA-DE-MUESTREO-DE-SUELO-Y-ENSAYOS-A-CAMPO-Protocolos-basicos-comunes.pdf)
- Saretto, F., Roy, B., Encarnacao, R., Reder, A., Fedele, G., Oakes, R., Brandimarte, L. y Capela, T. (2024). Impactos del cambio climático y estrategias de adaptación para la producción de cebada de secano en la provincia de Almería, España. *Revista – Atmosphere*, 15 (5), 606 – 631. <https://doi.org/10.3390/atmos15050606>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Revista del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. 1-19.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/141823/Ficha\\_Tecnica\\_Ca\\_a\\_de\\_Az\\_car.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/141823/Ficha_Tecnica_Ca_a_de_Az_car.pdf)

- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. (2020). Comercio Exterior del Sector Agropecuario 2018 – 2019. [http://www.sepsa.go.cr/docs/2020-002-Comercio\\_Exterior\\_2018-2019.pdf](http://www.sepsa.go.cr/docs/2020-002-Comercio_Exterior_2018-2019.pdf)
- Servicio de Cambio Climático de Copernicus. (2017). ERAS5 Ag: Indicadores agrometeorológicos desde 1979 hasta el presente derivados de reanálisis. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agrometeorological-indicators?tab=overview>
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. (2003). Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de suelos en el campo usando infiltrómetro de doble anillo. ASTM D3385-9403.
- Soto Bravo, F. y González Lutz, M. I. (2019). Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Revista Agronomía Mesoamericana*, 30(2), 517-534. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v30n2/2215-3608-am-30-02-00517.pdf>
- Squeo, F. A. y León, M. F. (2007). Transpiración. *Revista de fisiología vegetal*, Universidad de La Serena, 3, 67-84. <http://www.biouls.cl/librofv/web/index03.php>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. y Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. [Estudio FAO: Riego y Drenaje 66]. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/82bd842b-862d-4e51-8794-d80156ddab2e/content>
- Tejeda Martínez, A., Méndez Pérez, I. R., Rodríguez, N. C. y Tejeda Zacarías, E. (2018). La humedad en la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. Universidad de Colima. [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera\\_466.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf)
- Toro Trujillo, A. M., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A. & Ibáñez Castillo, L.A. (2016). Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*. 7(6), 105-122. <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353549830007.pdf>
- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. (2019). Cambio Climático. [ Hoja técnica de divulgación científica No. 17]. Repositorio Institucional – UACJ. <https://www.uacj.mx/ICB/UEB/documentos/17.%20Cambio%20Climatico.pdf>
- Uribe Botero, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://acortar.link/8KyuKP>
- Valencia González, J. N., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A. y Quevedo Nolasco, A. (2022). Relleno de datos diarios faltantes en registros de series climatológicas

- temporales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4), 617-629. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2514>
- Vega Araya, M. y Alvarado Barrantes, R. (2019). Análisis de las series de tiempo de variables biofísicas para cuatro ecorregiones de Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 60-96. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.4>
- Villaseñor Ortiz, D. (2016). Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo. Universidad técnica de Machala. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/10690>
- Zúñiga Mora, H. y Ramírez Granado, P. (2015). Delimitación y caracterización de unidades geológicas a partir del modelo numérico del terreno en el distrito de Juan Viñas, Cartago. *Revista Geográfica de América Central*, 1(54), 89-111. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.1-54.4>

## **8. APÉNDICES**

---

### **8.1. Apéndice A**

**Objetivo 1: Caracterización de la zona de estudio**



**Tabla A1.** Registro histórico del rendimiento obtenido por parte de la Hacienda Juan Viñas durante el periodo evaluado para la variedad LAICA 04-250 en el sitio de estudio.

Año	Área cosechada (ha)	Área efectiva (ha)	Caña de azúcar sembrada (t/lote)	Caña de azúcar sembrada (t/ha)	Azúcar producida (kg Az Bla/t Caña)	Azúcar producida (t Az Bla/ha)	Azúcar producida (t Az Bla/mes/ha)
2000	14,63	14,63	3151,00	215,00	85,70	18,50	0,74
2002	14,63	14,63	1934,00	132,00	103,30	13,70	0,57
2004	14,63	14,63	1654,00	113,00	94,50	10,70	0,44
2006	14,63	14,63	1199,00	82,00	99,20	8,10	0,37
2008	14,63	14,63	2646,00	181,00	102,80	18,60	0,89
2010	14,63	14,63	2550,00	174,00	101,00	17,60	0,80
2012	14,63	14,63	2432,00	166,00	104,20	17,30	0,79
2014	14,63	14,63	2361,00	161,00	100,40	16,20	0,74
2016	14,63	14,63	2365,00	162,00	89,20	14,40	0,63
2018	14,63	14,63	2497,00	171,00	98,80	16,90	0,73
2020	14,63	14,63	2459,00	168,00	100,10	16,80	0,76
2022	14,63	14,63	2752,00	188,00	97,40	18,30	0,80

T Caña/lote = Toneladas de caña por lote, T Caña/ha = Toneladas de caña por hectárea.

kg Az Bla/T Caña = Kilogramos de azúcar blanca por tonelada de caña.

T Az Bla/ha = Toneladas de azúcar blanca por hectárea.

T Az Bla/mes/ha = Toneladas de azúcar blanca por mes por hectárea.

**Tabla A2.** Registro histórico de las enmiendas aplicadas por parte de la Hacienda Juan Viñas durante el periodo evaluado para la variedad LAICA 04-250 en el sitio de estudio.

Año	Edad	pH	Acidez	CICE	K	Ca	Mg	% SA	Dol	Cal
2000	25	5,20	0,31	3,62	0,03	2,84	0,44	9,00	20,00	20,00
2002	24	4,80	0,10	7,44	0,07	6,20	1,07	1,00	10,00	0,00
2004	24	5,60	0,58	6,26	0,07	4,76	0,85	9,00	15,00	0,00
2006	22	5,50	0,15	6,09	0,07	4,97	0,90	2,00	10,00	0,00
2008	21	5,80	1,35	9,43	0,13	6,52	1,43	14,00	0,00	20,00
2010	22	5,60	0,37	6,24	0,09	4,95	0,83	6,00	10,00	0,00
2012	22	5,60	0,30	7,04	0,04	5,89	0,81	4,00	10,00	0,00
2014	22	5,90	0,39	6,00	0,06	4,74	0,81	7,00	10,00	0,00
2016	23	5,90	0,20	10,15	0,16	8,45	1,34	2,00	0,00	0,00
2018	23	5,60	0,24	6,65	0,13	5,45	0,83	4,00	10,00	0,00
2020	22	5,60	0,36	5,87	0,16	4,61	0,74	6,00	10,00	0,00
2022	23	5,90	0,21	6,15	0,14	4,94	0,86	3,00	10,00	0,00

CICE = Capacidad de Intercambio Catiónico, %SA = Porcentaje de Saturación de Acidez, Dol = Dolomita.

**Tabla A3.** Resultado del análisis de retención de humedad y conductividad hidráulica realizado por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

<b>ANÁLISIS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA</b>				
<b>ID USUARIO</b>	<b>ID LAB</b>	<b>RETENCIÓN DE HUMEDAD</b>		
		<b>% Retención</b>		<b>% Agua útil</b>
		<b>% vol.</b>	<b>% vol.</b>	
LARA 75 BAJA 0-20	RN-23-00540	<b>34</b>	<b>20</b>	<b>13</b>
LARA 75 BAJA 20-40	RN-23-00541	<b>31</b>	<b>17</b>	<b>14</b>
LARA 75 BAJA 40-60	RN-23-00542	<b>33</b>	<b>11</b>	<b>23</b>
LARA 75 ALTA 0-20	RN-23-00543	<b>31</b>	<b>14</b>	<b>18</b>
LARA 75 ALTA 20-40	RN-23-00544	<b>29</b>	<b>12</b>	<b>19</b>
LARA 75 ALTA 40-60	RN-23-00545	<b>31</b>	<b>24</b>	<b>7</b>

**Tabla A4.** Resultado del análisis de homogeneidad del suelo en el sitio de estudio.

<b>Punto</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Color</b>	<b>Punto</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Color</b>
1	20,00	1	7	20,00	1
1	40,00	1	7	40,00	1
1	60,00	1	7	60,00	3
2	20,00	1	8	20,00	1
2	40,00	1	8	40,00	2
2	60,00	1	8	60,00	3
3	20,00	1	9	20,00	1
3	40,00	1	9	40,00	1
3	60,00	1	9	60,00	1
4	20,00	1	10	20,00	2
4	40,00	1	10	40,00	2
4	60,00	1	10	60,00	2
5	20,00	1	11	20,00	1
5	40,00	1	11	40,00	1
5	60,00	1	11	60,00	1
6	20,00	1	12	20,00	1
6	40,00	1	12	40,00	1
6	60,00	3	12	60,00	1

**Tabla A5.** Resultado de la prueba de Bouyoucos realizada en el laboratorio de aguas, suelos y ambientes de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica aplicado a las muestras tomadas en el sitio de estudio.

<b>JV-P1 (0 - 20) R1:</b>		<b>JV-P1 (20 - 40) R1:</b>		<b>JV-P1 (40 - 60) R1:</b>	
Hidrometro 40 s	13,00 g/L	Hidrometro 40 s	12,50 g/L	Hidrometro 40 s	13,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,00 g/L	Hidrometro 2 h	9,00 g/L	Hidrometro 2 h	8,50 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P9 (0 - 20) R1:</b>		<b>JV-P9 (20 - 40) R1:</b>		<b>JV-P9 (40 - 60) R1:</b>	
Hidrometro 40 s	14,00 g/L	Hidrometro 40 s	12,50 g/L	Hidrometro 40 s	12,00 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,50 g/L	Hidrometro 2 h	7,00 g/L	Hidrometro 2 h	8,00 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P6 (0 - 20) R1:</b>		<b>JV-P6 (20 - 40) R1:</b>		<b>JV-P6 (40 - 60) R1:</b>	
Hidrometro 40 s	15,50 g/L	Hidrometro 40 s	15,00 g/L	Hidrometro 40 s	15,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	10,00 g/L	Hidrometro 2 h	10,00 g/L	Hidrometro 2 h	10,00 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P1 (0 - 20) R2:</b>		<b>JV-P1 (20 - 40) R2:</b>		<b>JV-P1 (40 - 60) R2:</b>	
Hidrometro 40 s	14,00 g/L	Hidrometro 40 s	13,00 g/L	Hidrometro 40 s	14,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	9,00 g/L	Hidrometro 2 h	7,00 g/L	Hidrometro 2 h	8,50 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P9 (0 - 20) R2:</b>		<b>JV-P9 (20 - 40) R2:</b>		<b>JV-P9 (40 - 60) R2:</b>	
Hidrometro 40 s	14,00 g/L	Hidrometro 40 s	12,50 g/L	Hidrometro 40 s	15,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,00 g/L	Hidrometro 2 h	7,00 g/L	Hidrometro 2 h	8,50 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P6 (0 - 20) R2:</b>		<b>JV-P6 (20 - 40) R2:</b>		<b>JV-P6 (40 - 60) R2:</b>	
Hidrometro 40 s	15,50 g/L	Hidrometro 40 s	15,00 g/L	Hidrometro 40 s	15,00 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,00 g/L	Hidrometro 2 h	9,50 g/L	Hidrometro 2 h	8,00 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P1 (0 - 20) R3:</b>		<b>JV-P1 (20 - 40) R3:</b>		<b>JV-P1 (40 - 60) R3:</b>	
Hidrometro 40 s	14,00 g/L	Hidrometro 40 s	12,00 g/L	Hidrometro 40 s	13,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,50 g/L	Hidrometro 2 h	7,50 g/L	Hidrometro 2 h	9,00 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P9 (0 - 20) R3:</b>		<b>JV-P9 (20 - 40) R3:</b>		<b>JV-P9 (40 - 60) R3:</b>	
Hidrometro 40 s	13,50 g/L	Hidrometro 40 s	13,00 g/L	Hidrometro 40 s	13,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,00 g/L	Hidrometro 2 h	8,50 g/L	Hidrometro 2 h	8,50 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C
<b>JV-P6 (0 - 20) R3:</b>		<b>JV-P6 (20 - 40) R3:</b>		<b>JV-P6 (40 - 60) R3:</b>	
Hidrometro 40 s	15,50 g/L	Hidrometro 40 s	15,00 g/L	Hidrometro 40 s	15,50 g/L
Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C	Temperatura 40 s	21,00 °C
Hidrometro 2 h	8,00 g/L	Hidrometro 2 h	10,00 g/L	Hidrometro 2 h	8,50 g/L
Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C	Temperatura 2 h	21,00 °C

**Tabla A6.** Resultados de la determinación de la textura del suelo para cada horizonte considerado en el sitio de estudio.

<b>JV-P1 (0 - 20) R1:</b>		<b>JV-P1 (20 - 40) R1:</b>		<b>JV-P1 (40 - 60) R1:</b>	
(arcilla)	23,65 %	(arcilla)	33,30 %	(arcilla)	32,48 %
(limo)	28,38 %	(limo)	21,98 %	(limo)	34,64 %
(arena)	47,97 %	(arena)	44,73 %	(arena)	32,88 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>
<b>JV-P1 (0 - 20) R2:</b>		<b>JV-P1 (20 - 40) R2:</b>		<b>JV-P1 (40 - 60) R2:</b>	
(arcilla)	30,86 %	(arcilla)	22,30 %	(arcilla)	28,68 %
(limo)	29,62 %	(limo)	43,12 %	(limo)	36,97 %
(arena)	39,52 %	(arena)	34,58 %	(arena)	34,34 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>
<b>JV-P1 (0 - 20) R3:</b>		<b>JV-P1 (20 - 40) R3:</b>		<b>JV-P1 (40 - 60) R3:</b>	
(arcilla)	31,81 %	(arcilla)	26,02 %	(arcilla)	31,87 %
(limo)	37,46 %	(limo)	31,97 %	(limo)	27,41 %
(arena)	30,73 %	(arena)	42,01 %	(arena)	40,72 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>
<b>JV-P9 (0 - 20) R1:</b>		<b>JV-P9 (20 - 40) R1:</b>		<b>JV-P9 (40 - 60) R1:</b>	
(arcilla)	29,04 %	(arcilla)	19,79 %	(arcilla)	29,02 %
(limo)	34,20 %	(limo)	34,95 %	(limo)	27,57 %
(arena)	36,76 %	(arena)	45,26 %	(arena)	43,40 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>
<b>JV-P9 (0 - 20) R2:</b>		<b>JV-P9 (20 - 40) R2:</b>		<b>JV-P9 (40 - 60) R2:</b>	
(arcilla)	25,43 %	(arcilla)	22,50 %	(arcilla)	26,30 %
(limo)	36,87 %	(limo)	39,75 %	(limo)	39,74 %
(arena)	37,71 %	(arena)	37,75 %	(arena)	33,96 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>
<b>JV-P9 (0 - 20) R3:</b>		<b>JV-P9 (20 - 40) R3:</b>		<b>JV-P9 (40 - 60) R3:</b>	
(arcilla)	29,93 %	(arcilla)	32,40 %	(arcilla)	30,69 %
(limo)	39,65 %	(limo)	30,96 %	(limo)	32,74 %
(arena)	30,42 %	(arena)	36,63 %	(arena)	36,57 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>
<b>JV-P6 (0 - 20) R1:</b>		<b>JV-P6 (20 - 40) R1:</b>		<b>JV-P6 (40 - 60) R1:</b>	
(arcilla)	37,34 %	(arcilla)	35,22 %	(arcilla)	38,72 %
(limo)	32,98 %	(limo)	28,18 %	(limo)	34,20 %
(arena)	29,67 %	(arena)	36,60 %	(arena)	27,08 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcillosa</b>
<b>JV-P6 (0 - 20) R2:</b>		<b>JV-P6 (20 - 40) R2:</b>		<b>JV-P6 (40 - 60) R2:</b>	
(arcilla)	25,43 %	(arcilla)	22,50 %	(arcilla)	26,30 %
(limo)	36,87 %	(limo)	39,75 %	(limo)	39,74 %
(arena)	37,71 %	(arena)	37,75 %	(arena)	33,96 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>
<b>JV-P6 (0 - 20) R3:</b>		<b>JV-P6 (20 - 40) R3:</b>		<b>JV-P6 (40 - 60) R3:</b>	
(arcilla)	24,70 %	(arcilla)	37,05 %	(arcilla)	28,58 %
(limo)	45,07 %	(limo)	29,64 %	(limo)	43,19 %
(arena)	30,23 %	(arena)	33,32 %	(arena)	28,23 %
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Franco arcilloso</b>

## 8.2. Apéndice 2

### Objetivo 2: Determinación del requerimiento hídrico histórico del cultivo de caña de azúcar

**Tabla B1.** Resultados obtenidos durante la etapa de ajuste del modelo para las simulaciones realizadas modificando los parámetros no conservativos del módulo de cultivo en el programa AquaCrop.

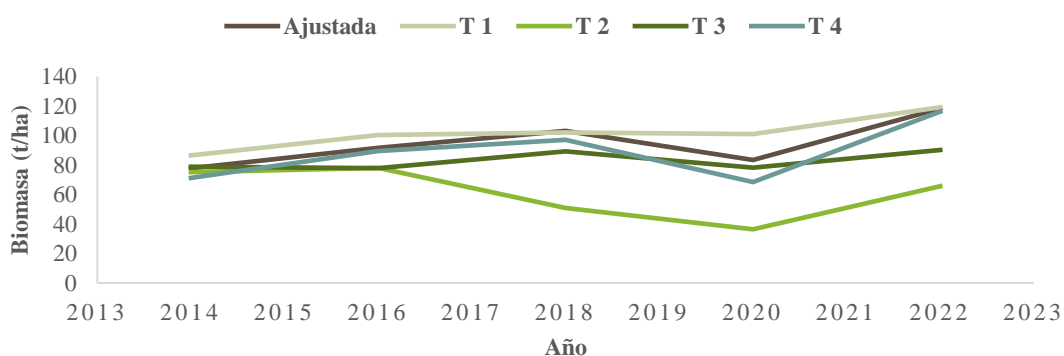
Cultivo Ajustado 1										Datos ajustados	
Real			Modelado		Estadística						
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	88,14	30,85	9,48	0,49	21,11	16,28	1,30	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	104,90	36,71	29,50					CGC	2,5
2018	85,50	29,93	111,04	38,86	29,87					CDC	7,5
2020	84,00	29,40	78,13	27,35	6,99					MCC	95
2022	94,00	32,90	124,22	43,48	32,14					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 2										Datos ajustados	
Real			Modelado		Estadística						
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	104,53	36,59	22,99	0,56	34,40	32,90	1,05	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	123,44	43,20	34,38					CGC	2,4
2018	85,50	29,93	120,29	42,10	28,92					CDC	7,4
2020	84,00	29,40	102,84	35,99	18,32					MCC	99
2022	94,00	32,90	138,43	48,45	32,10					Días raíz	365
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 3										Datos ajustados	
Real			Modelado		Estadística						
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	85,40	29,89	6,09	0,63	18,93	15,15	1,25	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	100,86	35,30	24,52					CGC	2,3
2018	85,50	29,93	109,02	38,16	27,51					CDC	7,3
2020	84,00	29,40	82,89	29,01	1,32					MCC	95
2022	94,00	32,90	122,60	42,91	30,43					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 4										Datos ajustados	
Real			Modelado		Estadística						
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	105,71	37,00	23,85	0,57	34,88	33,55	1,04	Cco	0,9
2016	81,00	28,35	123,73	43,30	34,53					CGC	2,2
2018	85,50	29,93	120,77	42,27	29,21					CDC	7,2
2020	84,00	29,40	104,06	36,42	19,28					MCC	99
2022	94,00	32,90	138,46	48,46	32,11					Días raíz	365
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 5										Datos ajustados	
Real			Modelado		Estadística						
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	78,15	27,35	2,92	0,60	16,65	8,96	1,86	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	94,73	33,16	16,95					CGC	2,1
2018	85,50	29,93	105,01	36,75	22,81					CDC	8
2020	84,00	29,40	72,02	25,21	14,26					MCC	95
2022	94,00	32,90	119,87	41,95	27,52					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12

Continuación Tabla B1.

Cultivo Ajustado 6										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística							
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	80,99	28,35	0,61	0,78	16,27	12,92	1,26	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	95,74	33,51	18,20					CGC	2,1
2018	85,50	29,93	105,75	37,01	23,69					CDC	7,3
2020	84,00	29,40	86,88	30,41	3,43					MCC	95
2022	94,00	32,90	120,24	42,08	27,91					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 7										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística							
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	98,60	34,51	18,35	0,82	30,43	29,10	1,05	Cco	0,9
2016	81,00	28,35	110,67	41,53	26,81					CGC	2,1
2018	85,50	29,93	121,72	42,60	29,76					CDC	8,5
2020	84,00	29,40	104,29	36,50	19,45					MCC	95
2022	94,00	32,90	135,23	47,33	30,49					Días raíz	120
										Emergencia	27
										WP	32
										GD range	11,1
Cultivo Ajustado 8										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística							
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	81,37	28,48	1,08	0,81	16,38	13,39	1,22	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	95,91	33,57	18,41					CGC	2,1
2018	85,50	29,93	105,74	37,01	23,68					CDC	7,1
2020	84,00	29,40	88,70	31,05	5,60					MCC	95
2022	94,00	32,90	120,21	42,07	27,88					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 9										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística							
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	76,18	26,66	5,36	0,67	14,93	7,20	2,07	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	90,85	31,80	12,16					CGC	2
2018	85,50	29,93	102,76	35,97	20,19					CDC	8,5
2020	84,00	29,40	73,11	25,59	12,97					MCC	95
2022	94,00	32,90	118,12	41,34	25,66					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 10										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística							
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	77,81	27,23	3,35	0,80	14,33	9,89	1,45	CCo	0,9
2016	81,00	28,35	91,59	32,06	13,07					CGC	2
2018	85,50	29,93	103,26	36,14	20,77					CDC	8
2020	84,00	29,40	83,45	29,21	0,65					MCC	95
2022	94,00	32,90	118,34	41,42	25,89					Días raíz	90
										Emergencia	30
										WP	32
										GD range	12

Continuación Tabla B1.

Cultivo Ajustado 11										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística						CCo	0,9
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	78,98	27,64	1,88	0,85	14,77	11,42	1,29	CDC	7,5
2016	81,00	28,35	92,38	32,33	14,05					MCC	95
2018	85,50	29,93	103,79	36,33	21,39					Días raíz	90
2020	84,00	29,40	88,35	30,92	5,18					Emergencia	30
2022	94,00	32,90	118,60	41,51	26,17					WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 12										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística						CCo	0,9
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	80,02	28,01	0,59	0,87	15,39	12,64	1,22	CDC	7
2016	81,00	28,35	93,20	32,62	15,06					MCC	95
2018	85,50	29,93	104,35	36,52	22,05					Días raíz	90
2020	84,00	29,40	91,73	32,11	9,20					Emergencia	30
2022	94,00	32,90	118,90	41,62	26,49					WP	32
										GD range	12
Cultivo Ajustado 13										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística						Cco	0,9
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	98,83	34,59	22,77	0,66	32,05	30,69	1,04	CDC	6,5
2016	81,00	28,35	118,24	41,39	45,98					MCC	95
2018	85,50	29,93	121,64	42,58	42,27					Días raíz	120
2020	84,00	29,40	104,84	36,69	24,81					Emergencia	27
2022	94,00	32,90	134,90	47,21	43,51					WP	30
										GD range	11,1
Cultivo Ajustado 14										Datos ajustados	
Real		Modelado		Estadística						CCo	0,9
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	81,59	28,56	1,35	0,88	16,05	13,76	1,17	CDC	6,5
2016	81,00	28,35	94,05	32,92	16,11					MCC	95
2018	85,50	29,93	104,95	36,73	22,75					Días raíz	90
2020	84,00	29,40	93,93	32,88	11,82					Emergencia	30
2022	94,00	32,90	119,27	41,75	26,88					WP	32
										GD range	12

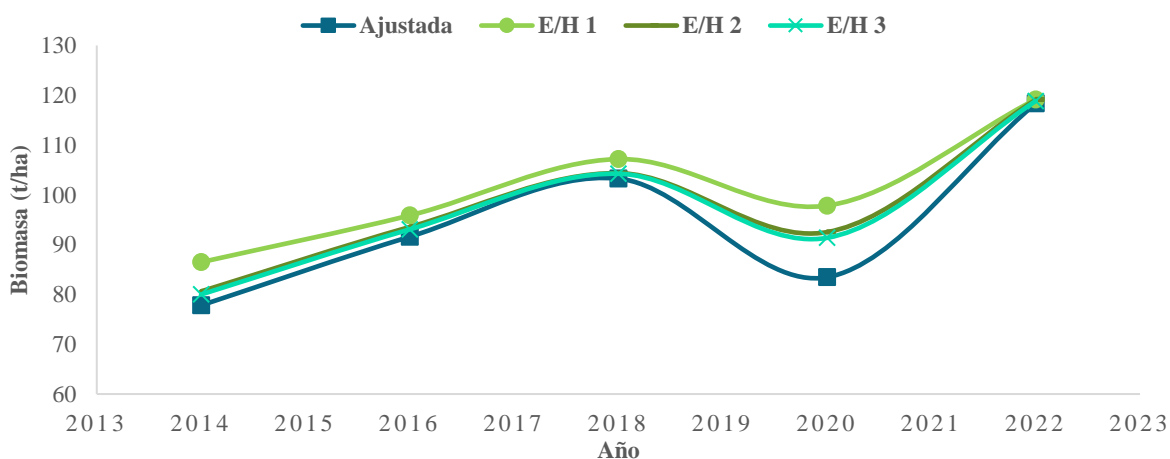


**Figura B1.** Biomasa total resultante del análisis de sensibilidad variando la textura del suelo comparado con la biomasa ajustada (T1 = Franco arcillo limoso, franco y franco arcillo limoso; T2 = Arcilloso, franco y arcilloso; T3 = Franco arcillo limoso, franco y arcilloso; T4 = Arcilloso, franco y franco arcillo limoso).



**Tabla B2.** Resultados obtenidos durante la etapa de análisis de sensibilidad para las simulaciones realizadas modificando la textura del suelo en el programa AquaCrop.

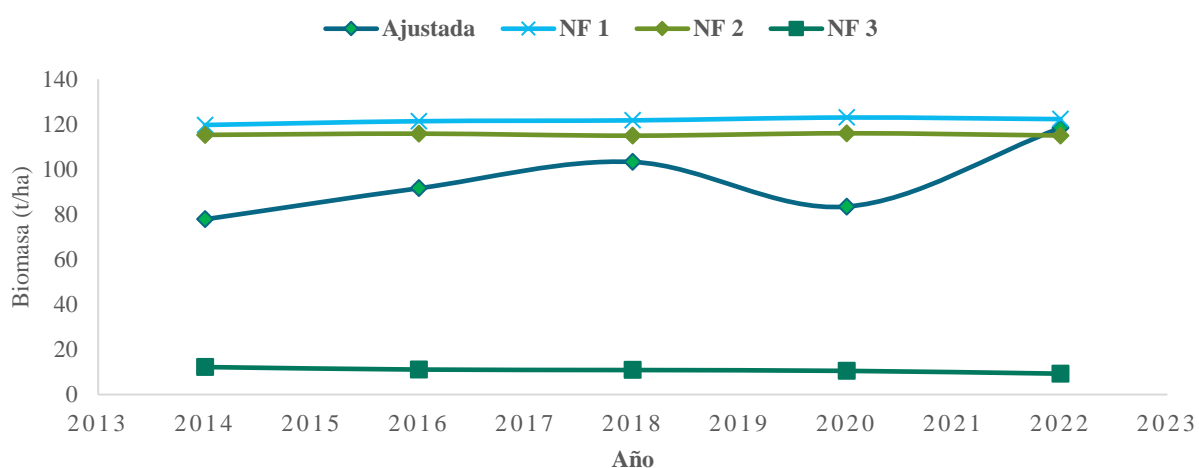
Simulación Textura 1										Datos concideados	
Real			Modelación		Validación					Tipo de suelo	Esesor
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	86,538	30,288	7,50	0,843	17,924	16,817	1,066	Franco arcillo limoso	0,2
2016	81,00	28,35	100,335	35,117	23,87					Franco	0,2
2018	85,50	29,93	102,049	35,717	19,36					Franco arcillo limoso	0,2
2020	84,00	29,40	101,000	35,350	20,24						
2022	94,00	32,90	119,162	41,707	26,77						
Simulación Textura 2										Datos concideados	
Real			Modelación		Validación					Tipo de suelo	Esesor
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	75,098	26,284	6,71	0,035	29,393	23,830	1,233	Arcilloso	0,2
2016	81,00	28,35	78,049	27,317	3,64					Franco	0,2
2018	85,50	29,93	50,781	17,773	40,61					Arcilloso	0,2
2020	84,00	29,40	36,407	12,743	56,66						
2022	94,00	32,90	65,514	22,93	30,30						
Simulación Textura 3										Datos concideados	
Real			Modelación		Validación					Tipo de suelo	Esesor
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	78,820	27,587	2,09	0,671	3,882	2,150	1,805	Franco arcillo limoso	0,2
2016	81,00	28,35	77,880	27,258	3,85					Franco	0,2
2018	85,50	29,93	89,223	31,228	4,35					Arcilloso	0,2
2020	84,00	29,40	78,133	27,347	6,98						
2022	94,00	32,90	90,193	31,567	4,05						
Simulación Textura 4										Datos concideados	
Real			Modelación		Validación					Tipo de suelo	Esesor
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE		
2014	80,50	28,18	71,291	24,952	11,44	0,660	14,333	3,518	4,075	Arcilloso	0,2
2016	81,00	28,35	89,528	31,335	10,53					Franco	0,2
2018	85,50	29,93	97,099	33,985	13,57					Franco arcillo limoso	0,2
2020	84,00	29,40	68,455	23,959	18,51						
2022	94,00	32,90	116,215	40,675	23,63						



**Figura B2.** Biomasa total resultante del análisis de sensibilidad variando la textura del suelo comparado con la biomasa ajustada (E/H1 = Franco [0,4 m] y franco arcilloso [0,2 m]; E/H2 = Franco arcilloso [0,6 m]; E/H3 = Franco arcilloso [0,2 m] y franco [0,4 m]).

**Tabla B3.** Resultados obtenidos durante la etapa de análisis de sensibilidad para las simulaciones realizadas modificando el espesor y cantidad de horizontes del suelo en el programa AquaCrop.

Simulación Espesor/horizontes 1							Datos concideados		
Real		Modelado		Validación			Tipo de suelo	Espesor	
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE
2014	80,50	28,18	86,480	30,268	7,43	0,897	17,612	16,303	1,080
2016	81,00	28,35	95,866	33,553					
2018	85,50	29,93	107,18	37,512					
2020	84,00	29,40	97,831	34,241					
2022	94,00	32,90	119,16	41,706					
Simulación Espesor/horizontes 2							Datos concideados		
Real		Modelado		Validación			Tipo de suelo	Espesor	
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE
2014	80,50	28,18	80,616	28,215	0,14	0,874	15,596	13,030	1,197
2016	81,00	28,35	93,549	32,742					
2018	85,50	29,93	104,36	36,525					
2020	84,00	29,40	92,517	32,381					
2022	94,00	32,90	119,11	41,689					
Simulación Espesor/horizontes 3							Datos concideados		
Real		Modelado		Validación			Tipo de suelo	Espesor	
Año	Biomasa	Rendimiento	Biomasa	Rendimiento	Error	R2	RMSE	MAE	RMSE/MAE
2014	80,50	28,18	79,996	27,998	0,63	0,867	15,289	12,505	1,223
2016	81,00	28,35	93,073	32,576					
2018	85,50	29,93	104,24	36,485					
2020	84,00	29,40	91,370	31,980					
2022	94,00	32,90	118,84	41,595					



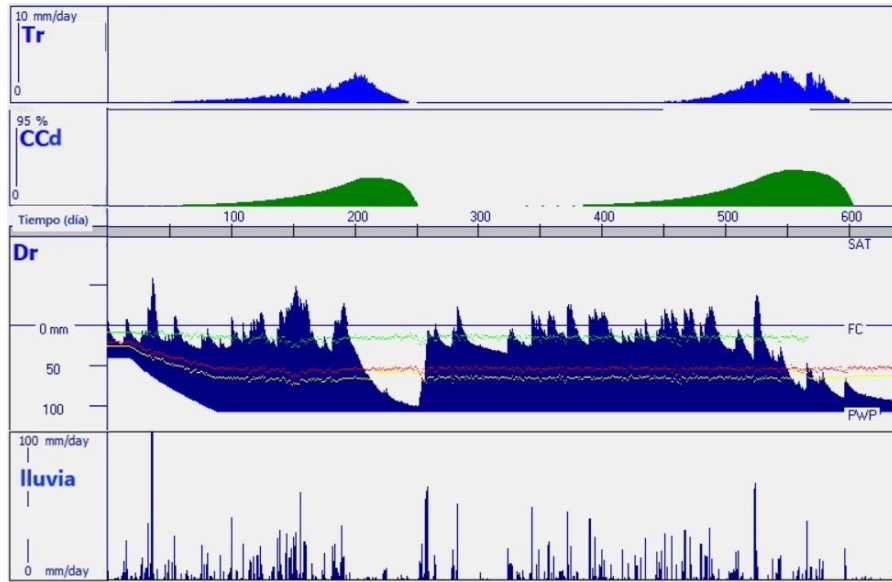
**Figura B3.** Biomasa total resultante del análisis de sensibilidad variando la textura del suelo comparado con la biomasa ajustada (NF 1 = profundidad de 1 m; NF 2 = profundidad de 0,8 m; NF 3 = profundidad de 0,6 m).

**Tabla B4.** Resultados obtenidos durante la etapa de análisis de sensibilidad para las simulaciones realizadas modificando el espesor y cantidad de horizontes del suelo en el programa AquaCrop.

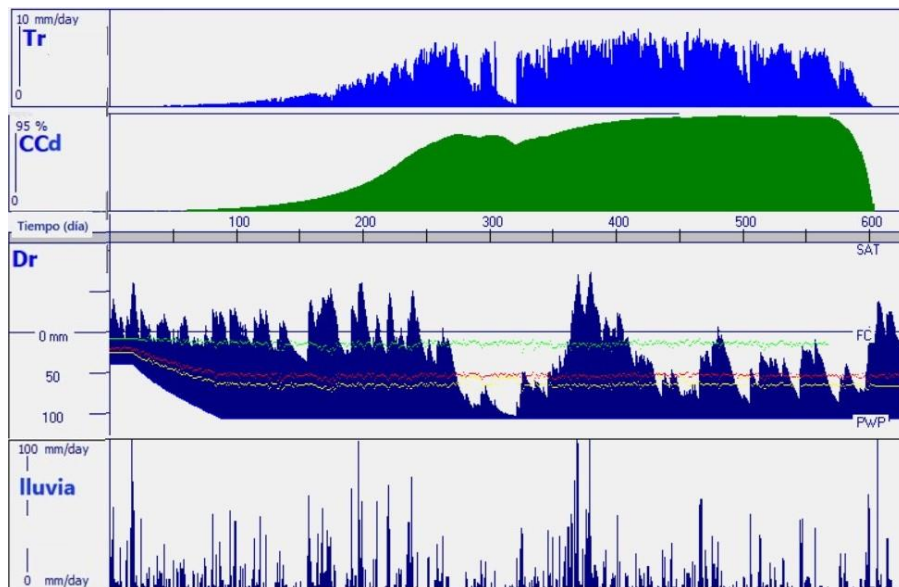
<b>Simulación Nivel freatico a 1 m</b>									
<b>Real</b>			<b>Modelado</b>		<b>Validación</b>				
<b>Año</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Error</b>	<b>R2</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE/MAE</b>
2014	80,50	28,18	119,683	41,889	48,67	0,284	36,867	36,606	1,007
2016	81,00	28,35	121,354	42,474	49,82				
2018	85,50	29,93	121,725	42,604	42,37				
2020	84,00	29,40	122,990	43,046	46,42				
2022	94,00	32,90	122,278	42,797	30,08				
<b>Simulación Nivel freatico a 0,8 m</b>									
<b>Real</b>			<b>Modelado</b>		<b>Validación</b>				
<b>Año</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Error</b>	<b>R2</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE/MAE</b>
2014	80,50	28,18	115,283	40,349	94,28	0,02	1902,59	1902,59	1,00
2016	81,00	28,35	115,837	40,543	94,25				
2018	85,50	29,93	114,927	40,224	94,30				
2020	84,00	29,40	115,993	40,598	94,26				
2022	94,00	32,90	114,998	40,249	94,31				
<b>Simulación Nivel freatico a 0,6 m</b>									
<b>Real</b>			<b>Modelado</b>		<b>Validación</b>				
<b>Año</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Error</b>	<b>R2</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE/MAE</b>
2014	80,50	28,18	12,201	4,270	84,84	0,83	74,43	74,21	1,00
2016	81,00	28,35	11,092	3,882	86,31				
2018	85,50	29,93	10,874	3,806	87,28				
2020	84,00	29,40	10,513	3,680	87,48				
2022	94,00	32,90	9,262	3,242	90,15				

### **8.3. Apéndice 3**

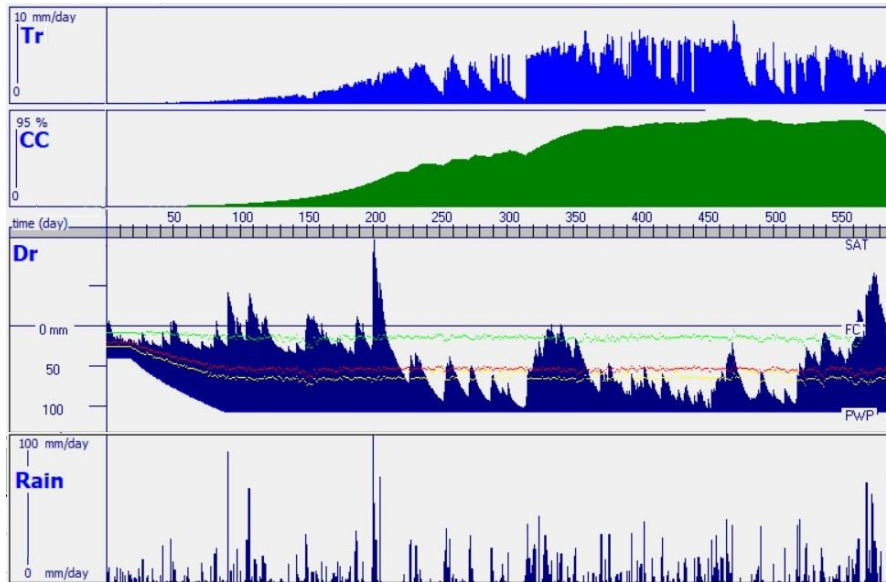
**Objetivo 3: Determinación del requerimiento hídrico futuro del cultivo de caña de azúcar utilizando dos escenarios de cambio climático como medida de adaptación**



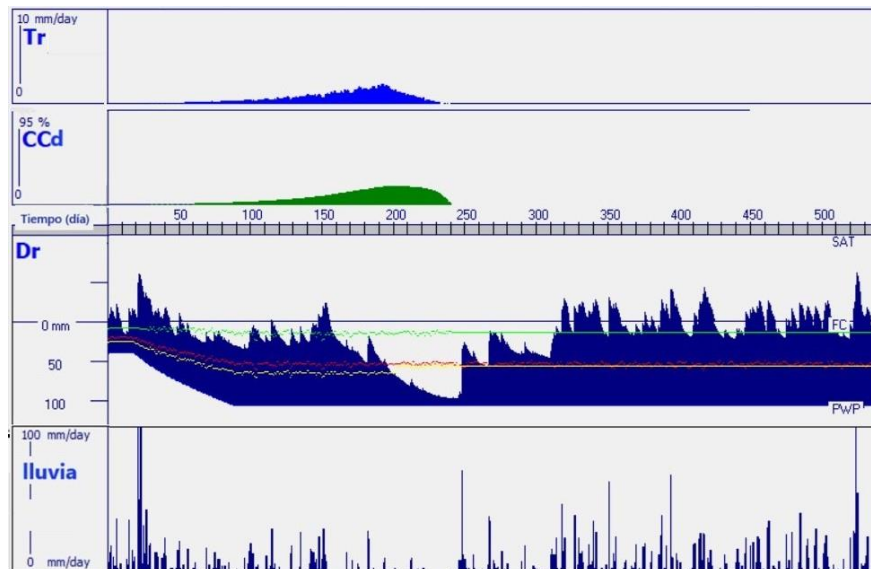
**Figura C1.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2040 – 2042 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



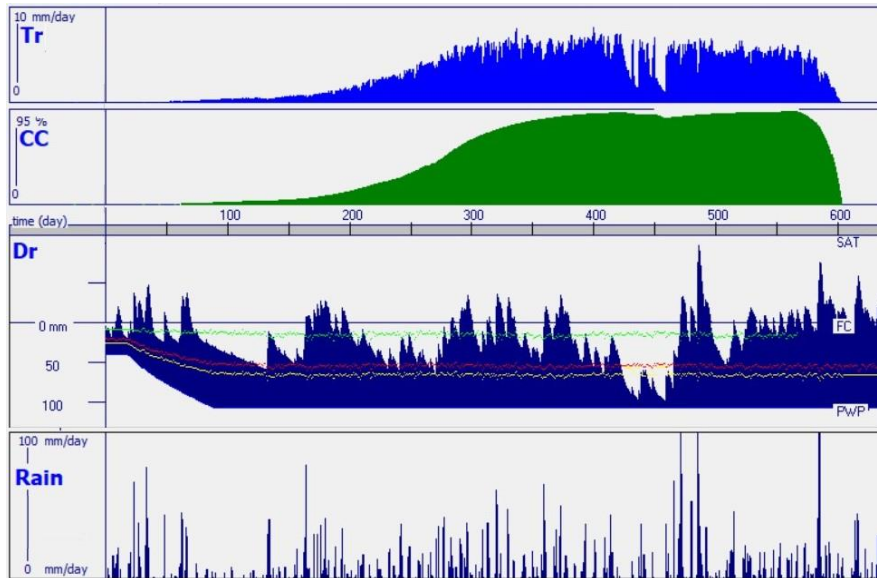
**Figura C2.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2042 – 2044 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



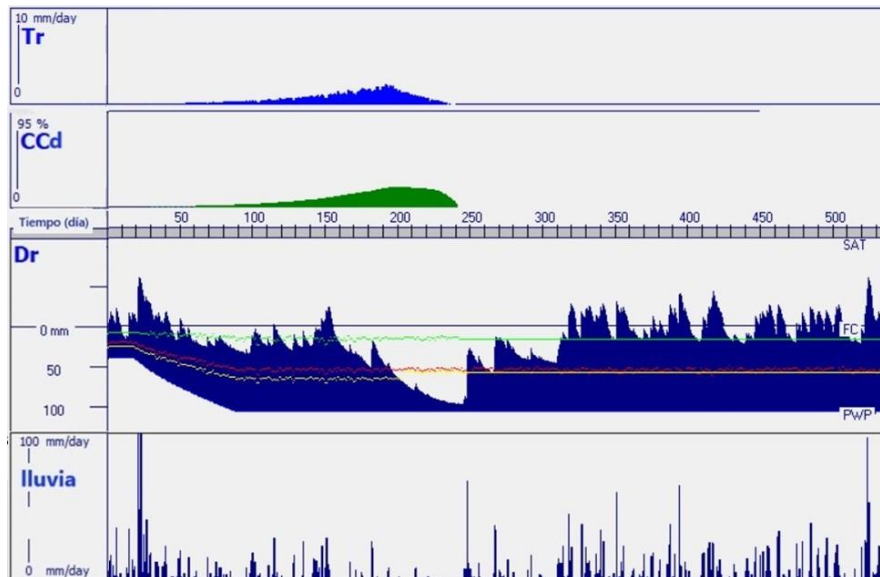
**Figura C3.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2044 – 2046 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



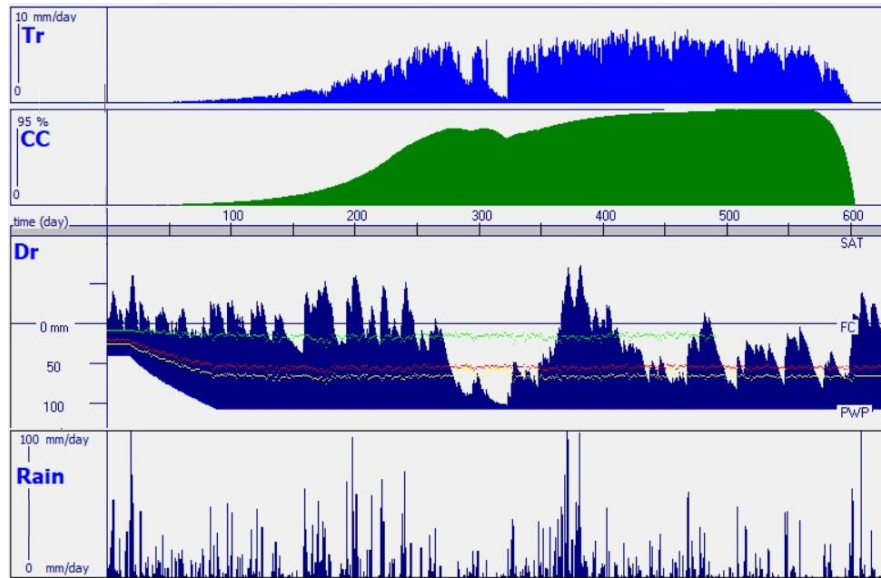
**Figura C4.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2046 – 2048 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



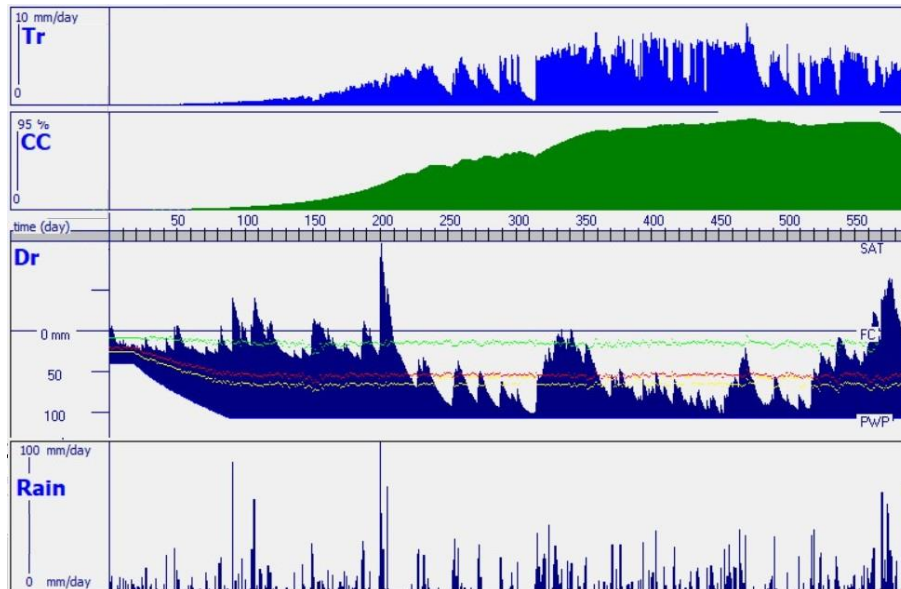
**Figura C5.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2048 – 2050 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



**Figura C6.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2070 – 2072 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

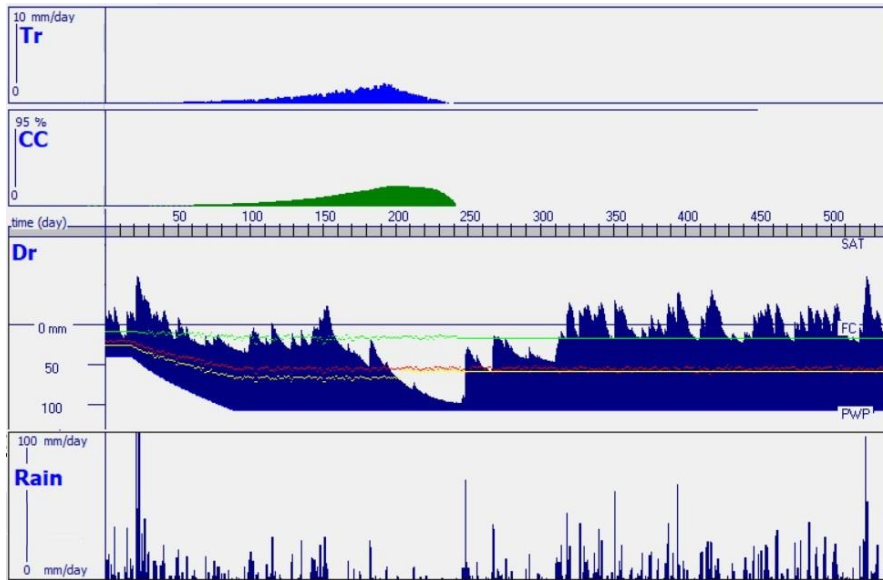


**Figura C7.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2072 – 2074 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

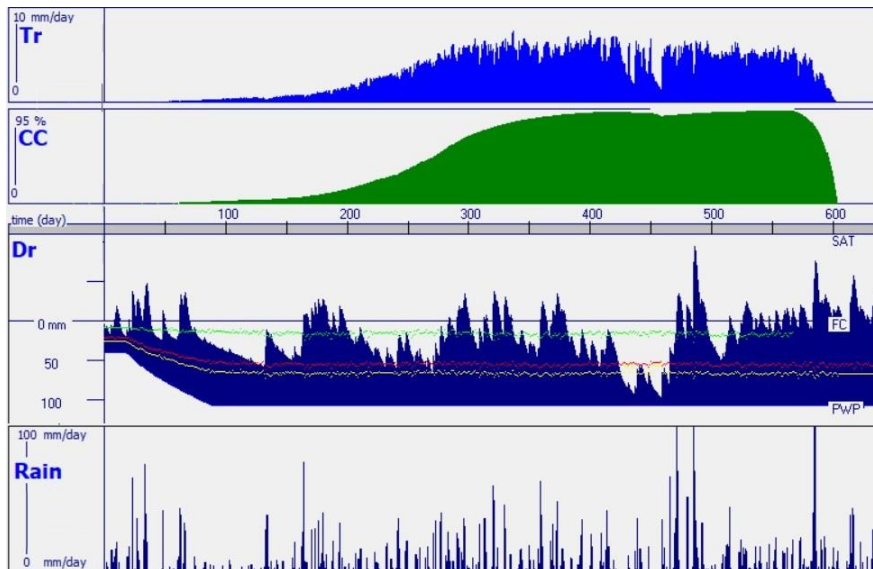


**Figura C8.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2074 – 2076 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

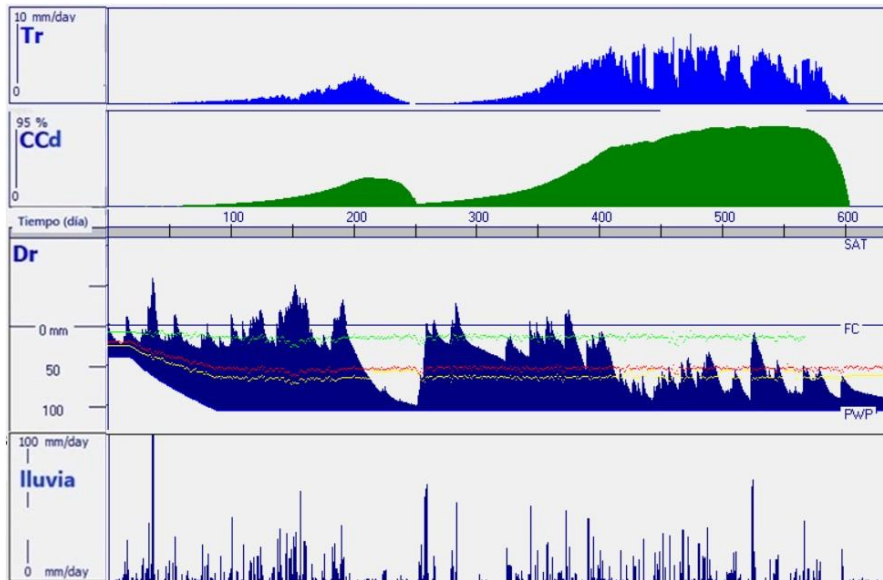




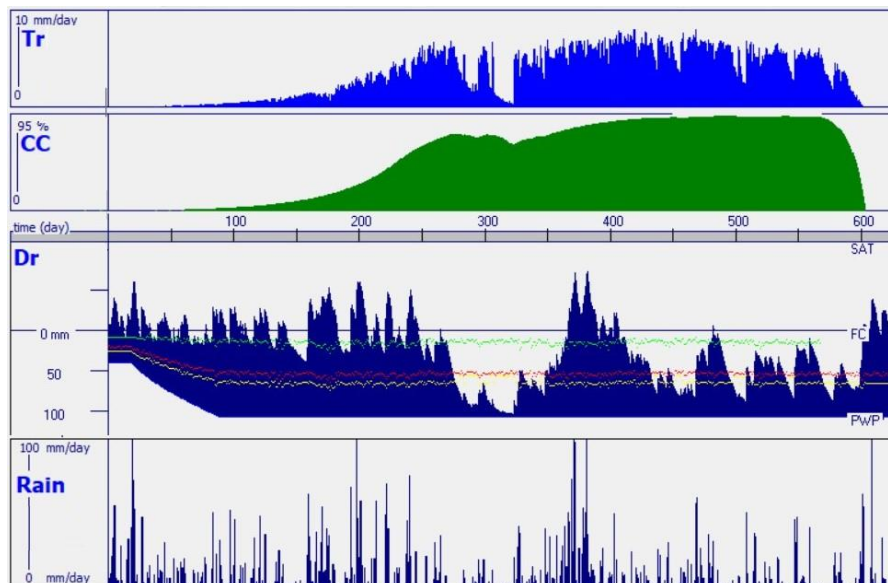
**Figura C9.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2076 – 2078 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



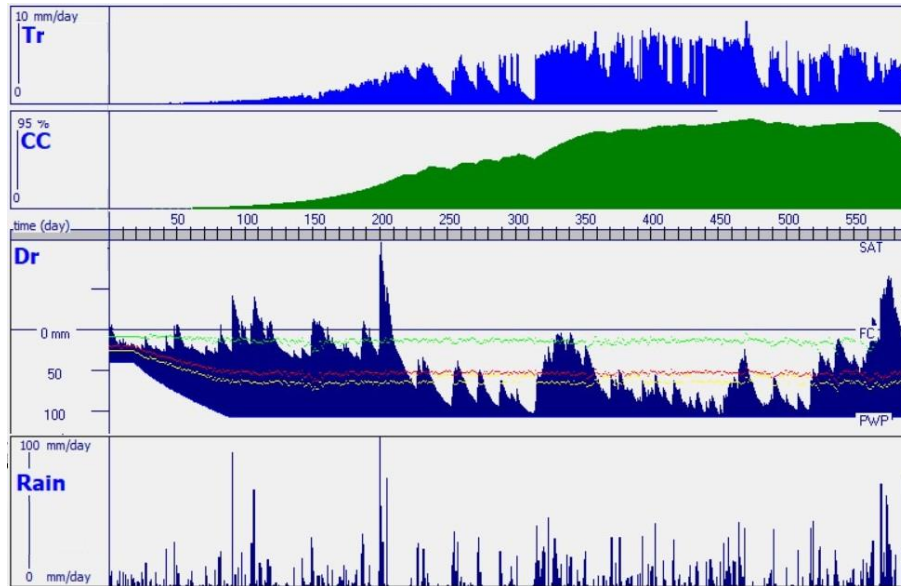
**Figura C10.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2078 – 2080 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el primer ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



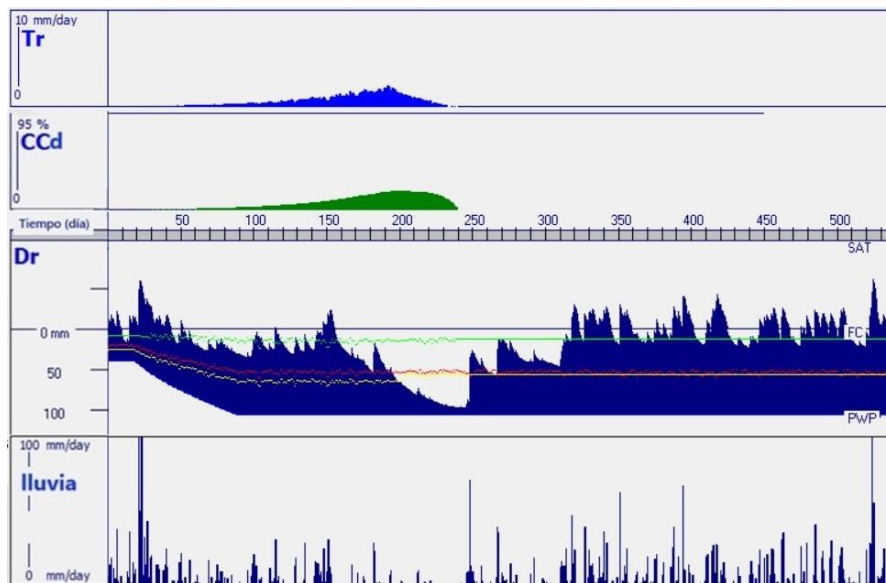
**Figura C11.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2040 – 2042 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



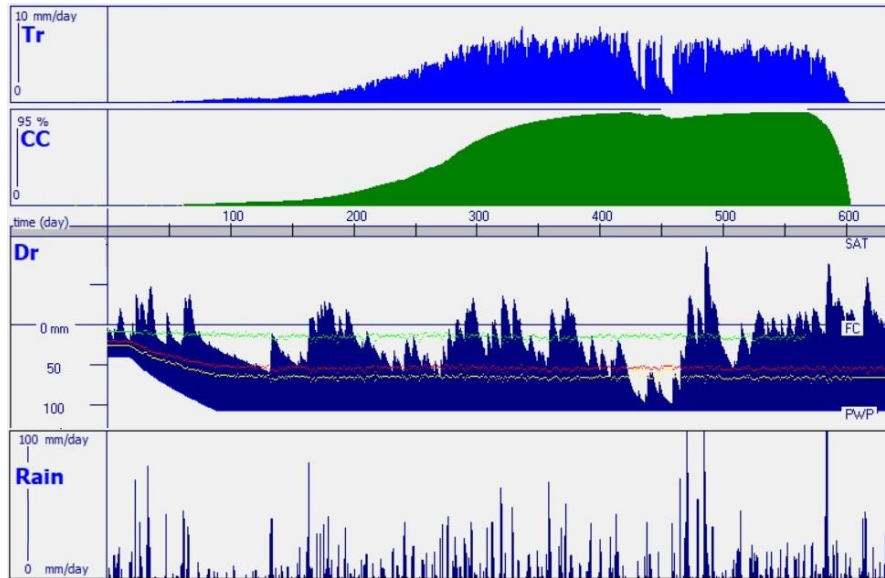
**Figura C12.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2042 – 2044 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CC), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



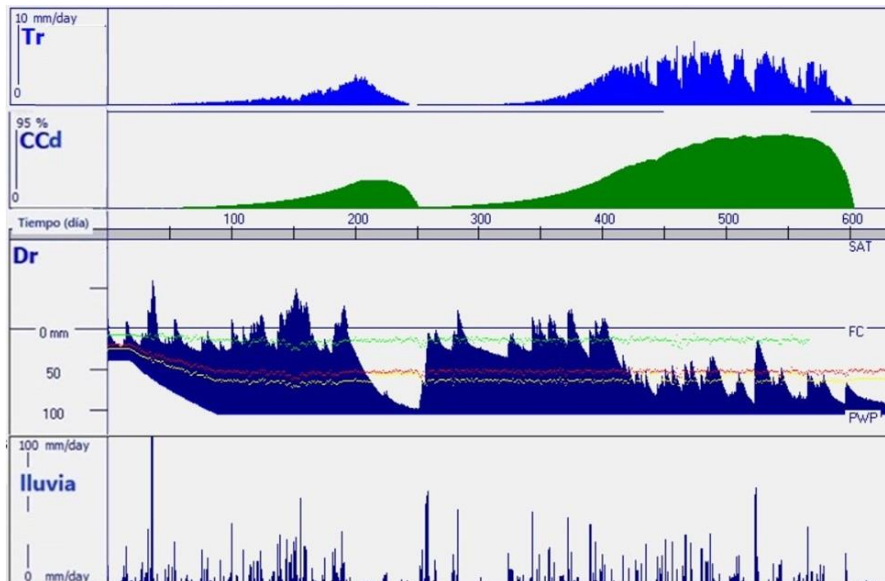
**Figura C13.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2044 – 2046 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



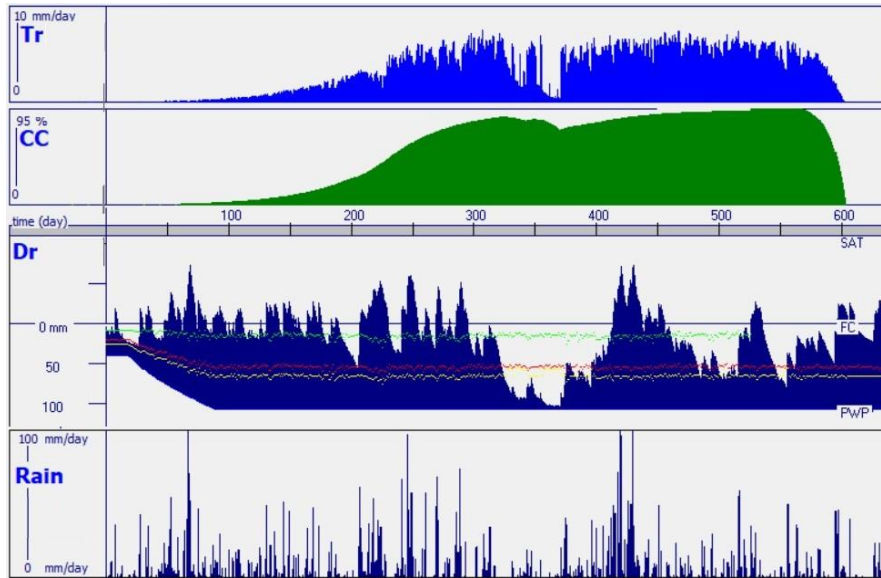
**Figura C14.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2046 – 2048 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



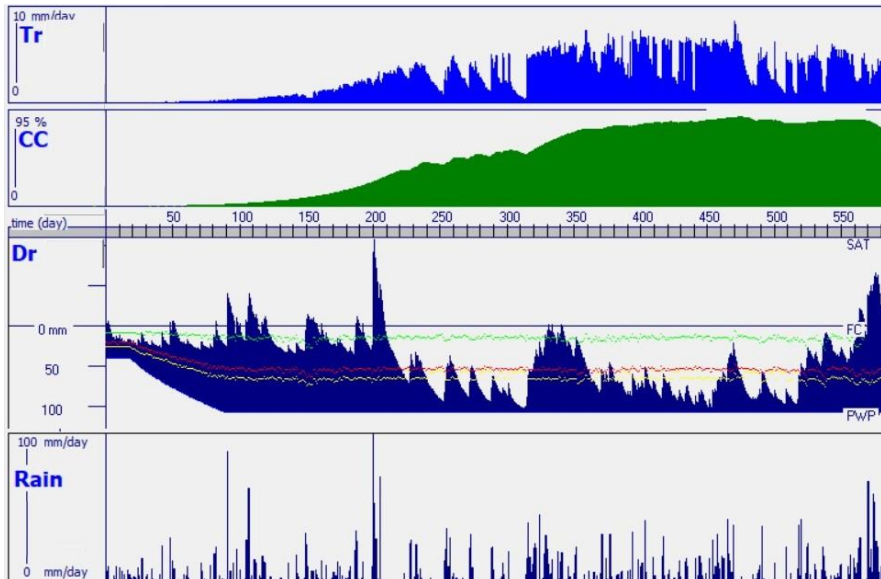
**Figura C15.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2048 – 2050 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



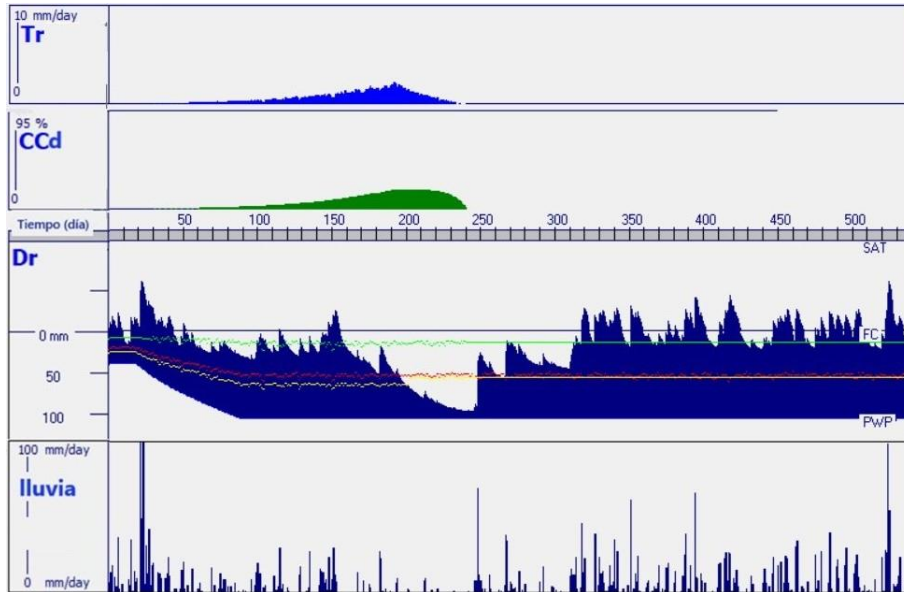
**Figura C16.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2070 – 2072 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



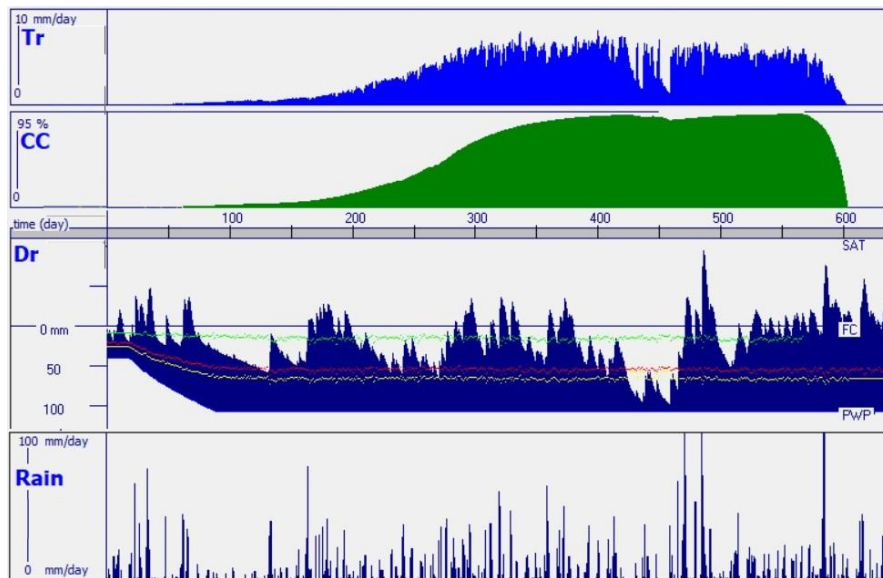
**Figura C17.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2072 – 2074 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



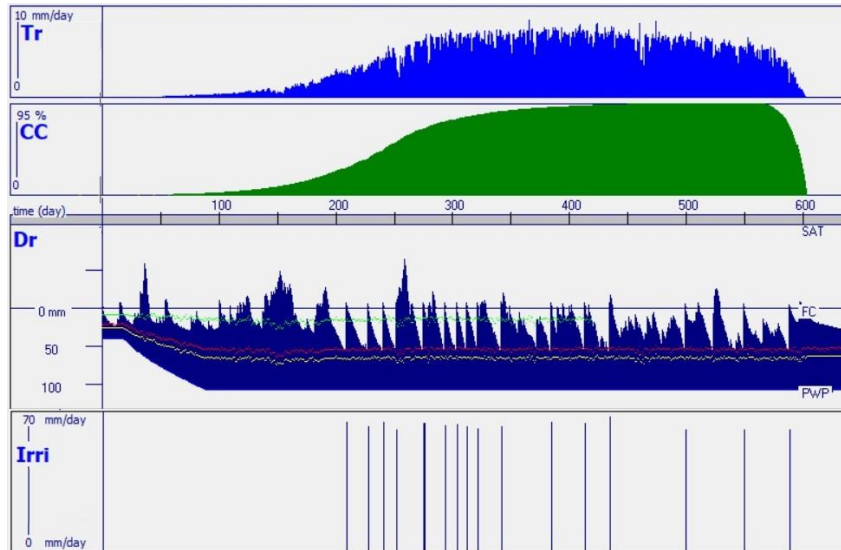
**Figura C18.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2074 – 2076 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



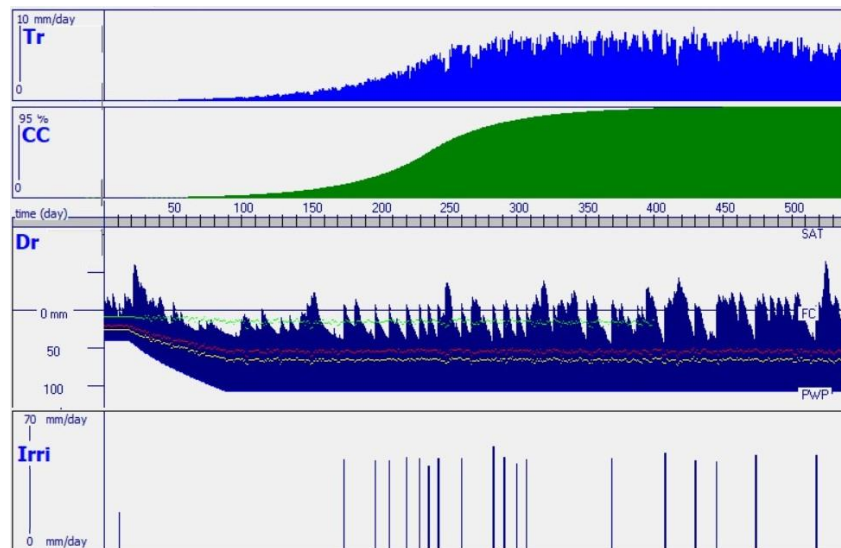
**Figura C19.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2076 – 2078 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



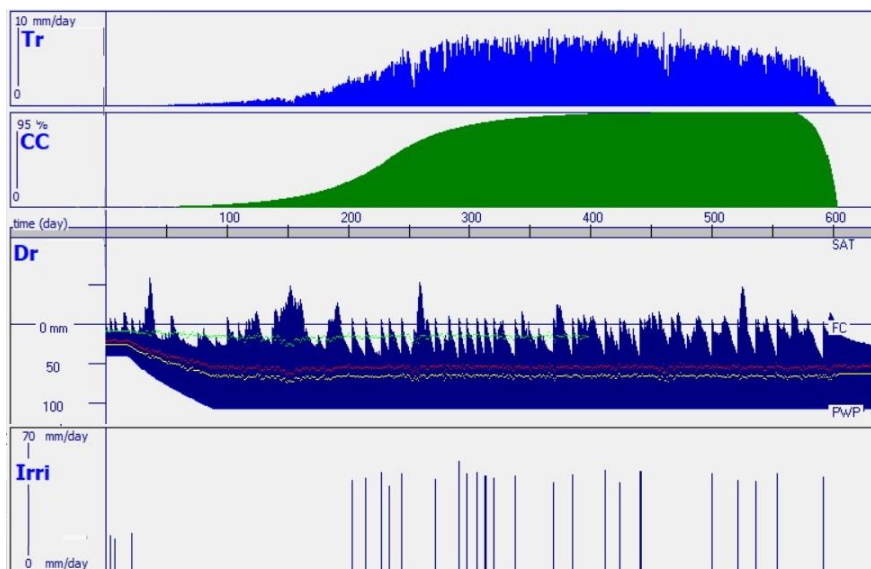
**Figura C20.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2078 – 2080 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



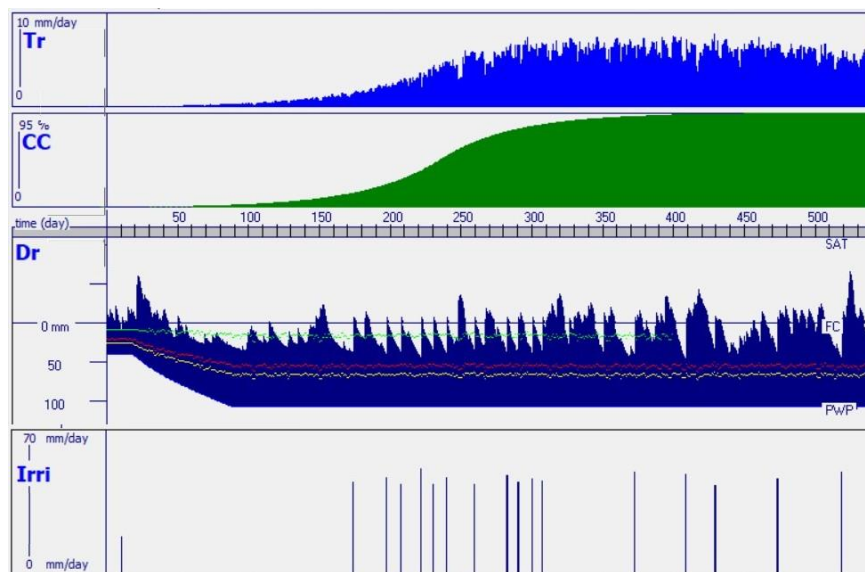
**Figura C21.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2040 – 2042 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



**Figura C22.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2046 – 2048 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

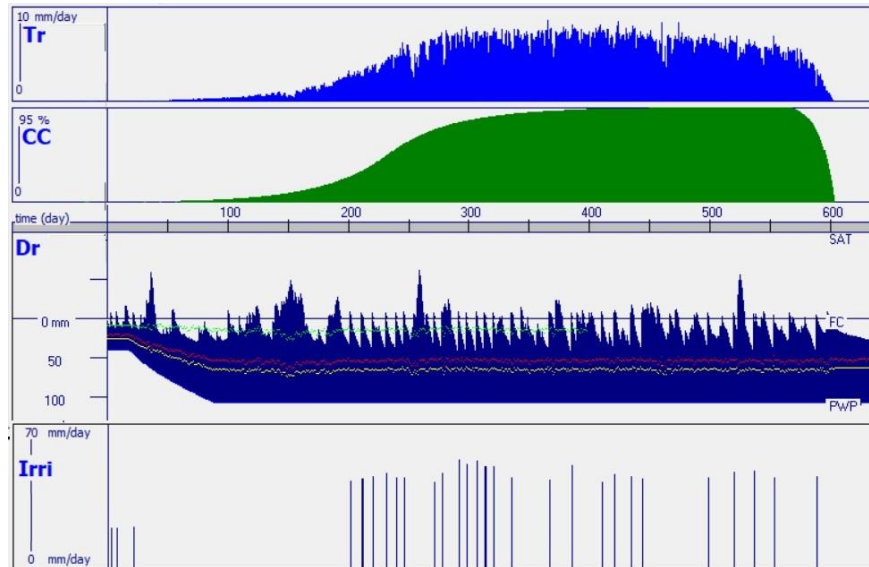


**Figura C23.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2070 – 2072 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

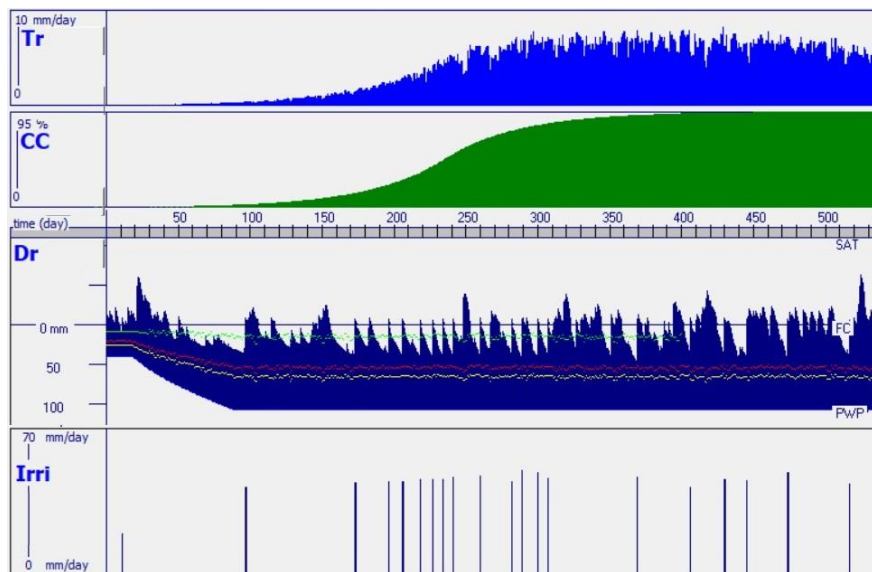


**Figura C24.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP2-4.5 durante el periodo comprendido entre los años 2076 – 2078 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

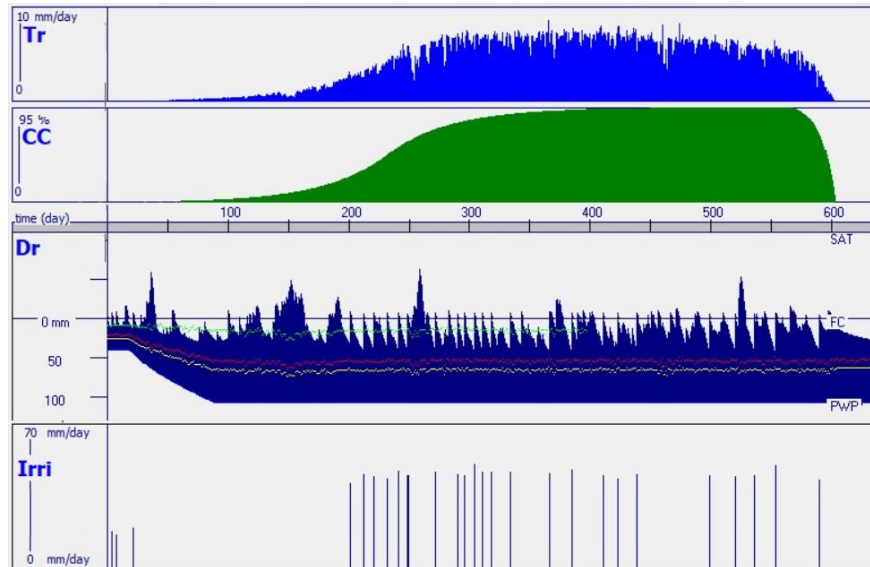




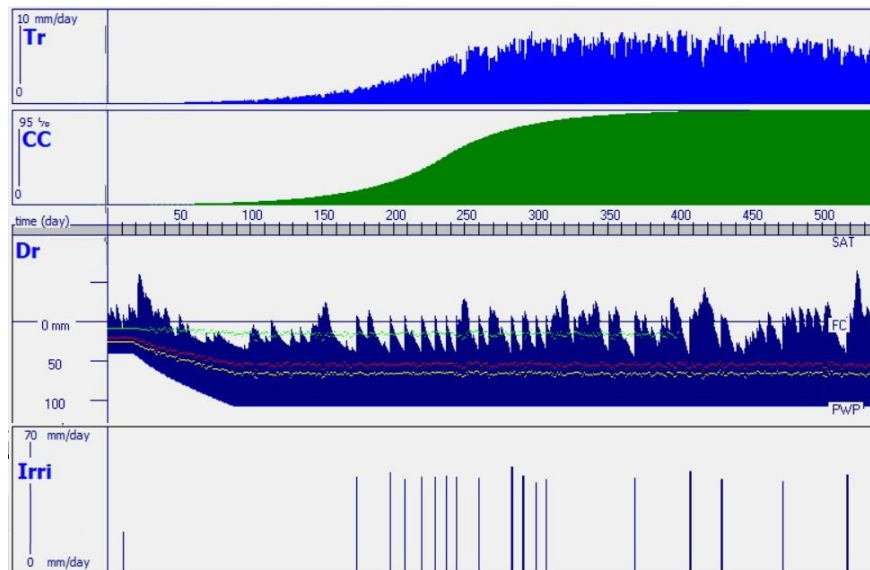
**Figura C25.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2040 – 2042 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



**Figura C26.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2046 – 2048 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



**Figura C27.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2070 – 2072 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).



**Figura C28.** Resultados del modelo AquaCrop para la predicción del requerimiento hídrico del cultivo de caña de azúcar para el escenario SSP5-8.5 durante el periodo comprendido entre los años 2076 – 2078 para la transpiración (Tr), el desarrollo del dosel (CCd), el agotamiento en la zona radicular (Dr) y la lluvia durante el cuarto ciclo productivo aplicando riego como medida de adaptación (línea verde: expansión del dosel, línea roja: cierre estomático y línea amarilla: senescencia temprana).

## 9. ANEXOS

---

### **Anexo 1. Procedimiento de laboratorio para la determinación de la textura del suelo a partir del método de Bouyoucos.**

#### Material es:

- Hexamet a fosfato de sodio.
- Beaker de vidrio de 400 – 600 mL.
- Pipeta de 10 mL.
- Varilla de vidrio.
- Agitador con un vástago que gire a una velocidad de 10.000 rpm o licuadora de suelos.
- Probetas para sedimentación de 1250 mL.
- Hidrómetro estándar ASTM N°1,152 H con escala Bouyoucos en g/L.
- Tamiz de malla de 2 mm.
- Termómetro 0 – 50 °C.
- Piseta.
- Cronómetro.

#### Procedimiento:

- Secar 100 g de muestra de suelo al horno a 105 °C por 24 horas.
- Tamizar la muestra de suelo seco a 2 mm.
- Pesar 40 g de suelo seco y tamizado.
- Se prepara la disolución de hexamet a fosfato de sodio (50 g/L), disolviendo 50 g de  $\text{Na}(\text{PO}_3)_6$  en agua y diluir a 1 L.
- Se coloca la muestra pesada en un beaker de vidrio de 400 – 600 mL.
- Se añaden 100 mL de solución dispersante y se deja reposar por 24 horas.
- Se añade agua hasta llegar a los 200 mL y se agita durante 5 minutos.
- Transferir el contenido del beaker a una probeta de 1 L, verificar que la muestra no supere los 800 mL.
- Preparar un blanco añadiendo 100 mL de la disolución dispersante y llevarlo a la marca de 1 L con agua.
- Verificar que ambas probetas se encuentren a la misma temperatura. Anotar esa temperatura.
- Se introduce el densímetro en la probeta del blanco y anotamos la lectura del densímetro LO en g/L.
- Agitamos la probeta con la muestra moviéndola de arriba abajo para mezclar bien aproximadamente 10 veces hasta agitar bien la muestra.
- En el momento en que sacamos la varilla anotamos el tiempo T0 (hora, minuto y segundo).
- A los 15 segundos se introduce el hidrómetro y a los 40 segundos después de introducido el hidrómetro se toma la primera lectura en T0.
- Posterior a tomar la primera lectura se procede a tomar la temperatura de suspensión.
- La segunda lectura se debe efectuar 2 horas después de iniciada la sedimentación y se registra también la temperatura.

**Anexo 2.** Sitio de estudio, finca LARA lote 75.



**Anexo 3.** Elaboración de los anillos de PVC para recolectar las muestras de suelo necesarias para la prueba de retención de humedad.



**Anexo 4.** Pruebas de infiltración, homogeneidad y recolección de muestras de retención de humedad.

