

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN AGRONOMÍA

Caracterización agroclimática del territorio Santa Cruz-Nicoya

Trabajo de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en ingeniería en Agronomía.

Modalidad Tesis

Valeri L. Cubero Arias

Heredia, Costa Rica

Noviembre, 2025

Trabajo de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en ingeniería en Agronomía.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

MSc. Andrés Alpízar Naranjo

Decanato de Ciencias de la Tierra y el Mar

MSc. Alonso Calvo Araya

Dirección Escuela de Ciencias Agrarias

MSc. Esteban Jimenez Alfaro

Tutor de Tesis

MSc. Santos Johaner Rosales Flores

Asesor de Tesis

PhD. Mauricio Vega Araya

Asesor de Tesis

Bach. Valeri L. Cubero Arias

Postulante

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, quienes siempre han sido mi fuente de inspiración y apoyo inquebrantable a lo largo de mi vida. A mi primo Braulio, gracias a él tuve en mis manos el primer libro que impulsó esta investigación. Su recuerdo y cariño son un recordatorio de vida.

A mi director de tesis, el profesor Esteban Jiménez, por su paciencia, apoyo y orientación experta, que han sido fundamentales en la culminación de este proyecto.

A mi pareja, seres queridos y amigos, por estar a mi lado en todo momento, por motivarme y sostenerme cuando más lo necesité.

A todos aquellos que creyeron en mí y me brindaron su apoyo incondicional: esta tesis es un testimonio de gratitud hacia ustedes.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al profesor Esteban Jiménez, director de esta tesis, por su acompañamiento constante, su guía comprometida y por confiar en mí desde sus inicios.

Agradezco a FOCAES Investigación por el respaldo financiero brindado, el cual fue fundamental para el desarrollo de este trabajo, y a la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional, por la sólida formación académica y humana que me ha proporcionado a lo largo de estos años.

Asimismo, agradezco al M.Sc. Andrés Alpízar Naranjo y al equipo del Programa de Producción Sostenible de Rumiantes Menores, quienes apoyaron generosamente con horas asistente, así como con los proyectos SIA 0169-23 y SIA 0431-20, los cuales fueron fundamentales para avanzar en este proceso.

A mis asesores de tesis, el PhD. Mauricio Vega Araya y el MSc. Santos Johaner Rosales Flores, por su orientación técnica, aportes valiosos y disposición para enriquecer este trabajo con sus conocimientos.

Extiendo también mi gratitud a M.Sc. Arlette Orozco, por ser una red de apoyo constante y una fuente de saberes que fortalecieron tanto mi proceso académico como personal.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue realizar una caracterización climática y agroclimática del territorio Santa Cruz–Nicoya de Costa Rica durante el período 1970–2024, con el propósito de generar insumos técnicos útiles para la planificación agrícola y la gestión sostenible del recurso hídrico. Para ello, se integraron series climáticas históricas, datos satelitales y métodos estadísticos, aplicando análisis de tendencias, dinámica estacional y anual, elaboración de mapas de isolíneas y cálculos de balance hídrico. Asimismo, se calcularon índices agroclimáticos y se aplicó la clasificación climática de Thornthwaite. Los resultados revelaron una marcada estacionalidad climática, donde la época seca se extiende de diciembre a abril, se caracterizó por altas temperaturas, baja humedad relativa y mayor velocidad del viento, condiciones que intensifican la evapotranspiración y reducen la disponibilidad de agua en el suelo. Por su parte, la época lluviosa de mayo a octubre presenta altos niveles de precipitación y humedad relativa, con temperaturas más moderadas, lo que favorece el desarrollo agrícola, aunque también incrementa el riesgo de saturación del suelo. El balance hídrico mostró un déficit acumulado de 520 mm en la época seca y un excedente de 582 mm en la lluviosa. Según la clasificación de Thornthwaite, el clima corresponde al tipo **C₂A'sa'** es decir un clima subhúmedo-húmedo, megatérmico con una marcada deficiencia grande de agua en verano y una alta concentración estacional de eficiencia térmica. Los resultados obtenidos ofrecen insumos valiosos para adaptar la agricultura a las condiciones climáticas locales y para diseñar estrategias que refuercen la gestión sostenible del agua y la resiliencia territorial frente al cambio climático.

Palabras clave: Agroclimatología, Santa Cruz-Nicoya, Balance hídrico, Thornthwaite

ABSTRACT

The objective of this research was to carry out a climatic and agroclimatic characterization of the Santa Cruz–Nicoya region in Costa Rica during the period 1970–2024, with the purpose of generating technical inputs useful for agricultural planning and sustainable water resource management. Historical climate series, satellite data, and statistical methods were integrated, applying trend analyses, seasonal and annual dynamics assessments, the elaboration of isopleth maps, and hydrological balance calculations. Agroclimatic indices were also calculated, and the Thornthwaite climate classification system was applied. The results revealed a marked climatic seasonality: the dry season, which extends from December to April, is characterized by high temperatures, low relative humidity, and stronger wind speeds conditions that intensify evapotranspiration and reduce soil water availability. In contrast, the rainy season, from May to October, showed high levels of precipitation and relative humidity, with more moderate temperatures, which favor agricultural development but also increase the risk of soil saturation. The water balance indicated an accumulated deficit of 520 mm during the dry season and a surplus of 582 mm during the rainy season. According to the Thornthwaite classification, the climate corresponds to the C₂A' *sa*' type, that is, a subhumid-humid, megathermal climate with a marked summer water deficit and a high seasonal concentration of thermal efficiency. The results obtained provide valuable inputs for adapting agriculture to local climatic conditions and for designing strategies that strengthen sustainable water management and territorial resilience in the face of climate change.

Keywords: *Agroclimatology, Santa Cruz-Nicoya, Water Balance, Thornthwaite*

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS	18
2.1 General	18
2.2 Específicos	18
3. MARCO TEÓRICO	19
3.1 Zona de estudio	19
3.1.1 Ubicación geográfica	19
3.1.2 Riesgo climático	19
3.1.3 Caracterización climática.....	20
3.2 Variables climáticas	21
3.2.1 Evaporación, transpiración, precipitación y evapotranspiración	21
3.3 Estimación de variables climáticas	23
3.3.1 Precipitación (PP)	23
3.3.2 Evapotranspiración (ETP).....	23
3.3.3 Método de Thornthwaite (1948)	23
3.3.4 Método de Penman-Monteith FAO (1998).....	24
3.3.5 Método de Hargreaves & Samani (1985)	25
3.3.6 Método de Turc (1961).....	25

3.4 Balance de agua del suelo o balance hídrico climático (BHC)	26
3.5 Índices y clasificación agroclimática de Thornthwaite	28
3.6 Calendario técnico de siembra	29
4. METODOLOGÍA	31
4.1 Ubicación	31
4.2 Caracterización climática	31
4.2.1 Fuente de datos	31
4.2.2 Procesamiento de datos climáticos	32
4.2.3 Análisis de las series de tiempo	33
4.2.4 Validación de datos satelitales con estaciones terrenas	35
4.3 Estimación del balance hídrico climático e índices por el método de Thornthwaite	36
4.3.1 Balance hídrico climático	36
4.3.2. Índices de Thornthwaite.....	38
4.4 Clasificación agroclimática de Thornthwaite.....	39
4.4.1 Clasificación climática.....	39
4.5 Calendario técnico de siembra basado en el análisis agroclimático.....	42
5. RESULTADOS.....	45
5.1 Caracterización climática	45
5.1.1 Descriptivas de la base de datos	45
5.1.2 Validación de datos satelitales con datos terrenos.....	47

5.1.3 Estadística descriptiva.....	48
5.1.4 Detección de Tendencias y Estacionalidad.....	50
5.1.4.1 Test de Mann-Kendall y regresión de Theil-Sen.....	50
5.1.4.2 Autocorrelaciones (ACF) y autocorrelaciones parciales (PACF)	53
5.1.4.3 Análisis de Wavelet.....	56
5.1.5. Análisis de correlación.....	60
5.1.6 Análisis Gráfico	61
5.1.6.1 Evolución temporal de las variables climáticas.....	61
5.1.6.2 Análisis de variabilidad	63
5.1.6.2.1 Boxplots anuales.....	65
5.1.6.2.2 Boxplots mensual	67
5.1.6.3 Histogramas y KDE (distribución).....	71
5.1.7 Dinámica mensual y anual de las variables climáticas	73
5.1.7.1 Análisis mensual.....	73
5.1.7.2 Análisis anual	76
5.1.8 Diagrama climático de Walter y Lieth.....	79
5.1.9 Mapas de isóneas	80
5.2 Balance hídrico climático (BHC).....	84
5.3 Índices agroclimáticos y clasificación de Thornthwaite	87
5.4 Calendario técnico de siembra basado en el análisis agroclimático.....	91

6. DISCUSIÓN.....	97
6.1 Caracterización climática	97
6.1.1 Estadísticas descriptivas	97
6.1.2 Detección de tendencias y estacionalidad.....	98
6.1.3 Implicaciones de la variabilidad estacional y anual.....	101
6.2 Balance hídrico climático (BHC).....	103
6.3 Índices agroclimáticos y clasificación climática de Thornthwaite.....	104
6.4 Calendario técnico de siembra basado en el análisis agroclimático.....	106
7. CONCLUSIONES.....	108
8. RECOMENDACIONES.....	109
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
10. ANEXOS	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Claves para la clasificación climática según Thornthwaite.....	35
Tabla 2. Clasificación climática de la variación estacional de la eficiencia hídrica en climas húmedos según Thornthwaite	36
Tabla 3. Clave del clima según Thornthwaite con base al índice de eficiencia térmica.	36
Tabla 4. Índice de concentración de eficiencia térmica.....	37
Tabla 5. Resumen de las variables climáticas analizadas en la serie de tiempo de 1970-2024 del territorio Santa Cruz-Nicoya.	41
Tabla 6. Estadísticas descriptivas de variables climáticas para precipitación acumulada anual (Precipitación), temperatura mínima (Temp_mínima), temperatura máxima (Temp_máxima), temperatura media (Temp_media), humedad relativa y velocidad del viento de 1970 - 2024.	44
Tabla 7. Prueba de Mann-Kendall para tendencias en series temporales del territorio Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).....	46
Tabla 8. Estimación de tendencias mediante regresión de Theil–Sen para variables climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)	47
Tabla 9. Períodos dominantes y potencia máxima obtenidos mediante análisis Wavelet en series climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).	52
Tabla 10. Resumen estadístico de las variables climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)....	58
Tabla 11. Balance de agua en el suelo del territorio Santa Cruz-Nicoya para el período 1970-2024. Capacidad de campo 100 mm.....	80
Tabla 12. Índices agroclimáticos del territorio Santa Cruz-Nicoya período 1970-2024.....	82
Tabla 13. Condiciones agroclimáticas del territorio Santa Cruz-Nicoya período 2016-2024.....	88
Tabla 14	91
Tabla 15. Periodo óptimo de siembra los cultivos de maíz (<i>Zea mays</i>), sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) y soya (<i>Glycine max</i>) en la localidad de Santa Cruz, Guanacaste	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución espacial de los puntos de muestreo empleados para la caracterización agroclimática del territorio Santa Cruz-Nicoya, Costa Rica.....	28
Figura 2. Funciones de Autocorrelaciones (ACF) y Autocorrelaciones Parciales (PACF) de las series de tiempo de precipitación (PP mm), humedad relativa (HR %) y velocidad del viento (Velocidad m/s) del territorio Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).....	49
Figura 3. Funciones de Autocorrelaciones (ACF) y Autocorrelaciones Parciales (PACF) de las series de tiempo de temperaturas mínima (T_min), máxima (Temp_max), media (T_med), °C del territorio Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).....	50
Figura 4. Distribución espectral wavelet de las series temporales de temperatura, precipitación, humedad relativa y viento en Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).	53
Figura 5. Matriz de correlación de Pearson en forma de mapa de calor para variables climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).....	55
Figura 6. Evolución de las series temporales de precipitación acumulada anual (mm), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), temperatura media (°C), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) de 1970-2024.	57
Figura 7. Variabilidad anual de la precipitación (mm) en el territorio Santa Cruz–Nicoya representada mediante boxplot (1970–2024).....	59
Figura 8. Distribución anual de la humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) representada mediante diagramas de cajas (1970–2024).....	60
Figura 9. Diagramas de cajas de la temperatura mínima, máxima y media (°C) en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).....	61
Figura 10. Diagrama de cajas mensual de la precipitación (mm) en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).....	62
Figura 11.	64
Figura 12.	65
Figura 13. Histogramas y estimaciones de densidad Kernel de variables climáticas en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).....	66
Figura 14. Comportamiento estacional de la precipitación anual acumulada (mm) del territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024	67
Figura 15. Comparación de temperaturas media, mínima y máxima (°C) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).....	68
Figura 16. Evolución anual de la humedad relativa (%) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024): media, mínima y máxima	69
Figura 17. Evolución de la velocidad del viento (m/s) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024): media, mínima y máxima	70
Figura 18. Evolución de la precipitación acumulada (mm), temperaturas(°C), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024): media, mínima y máxima	71
Figura 19. Diagrama mensual histórico de Walter y Lieth del territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024	73
Figura 20. Isolíneas de precipitación (mm) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024	75
Figura 21. Isolíneas de temperatura (°C) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024..	76

Figura 22. Isolíneas de humedad relativa (%) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024	77
Figura 23. Isopletas de velocidad del viento (m/s) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024	78
Figura 24. Análisis del balance hídrico del suelo en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024) considerando una capacidad de campo de 100 mm	81
Figura 25. Índice hídrico del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024	83
Figura 26. Índice aridez del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024.....	84
Figura 27. Índice humedad del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024	84
Figura 28. Índice de concentración estacional de eficiencia térmica del territorio Santa Cruz-Nicoya para el período 1970-2024	85
Figura 29. Índice de eficiencia térmica del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024 ...	86

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecu. 1.	20
Ecu. 2.	20
Ecu. 3.	20
Ecu. 4.	20
Ecu. 5.	21
Ecu. 6.	21
Ecu. 7.	22
Ecu. 8.	22
Ecu. 9.	23
Ecu. 10.	23
Ecu. 11.	28
Ecu. 12.	30
Ecu. 13.	30
Ecu. 14.	31
Ecu. 15.	31
Ecu. 16.	32
Ecu. 17.	32
Ecu. 18.	32
Ecu. 19.	35
Ecu. 20.	35
Ecu. 21.	36
Ecu. 22.	36

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de temperaturas medias mensuales, territorio Santa Cruz-Nicoya	126
Anexo 2. Promedio, mínima, máxima de temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad viento (m/s) y precipitación acumulada anuales (mm) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024.....	127
Anexo 3. Validación de productos satelitales frente a registros de la estación meteorológica CATSA (2015–2022).....	132
Anexo 4. Medias y correlación entre observaciones estación terrena y estimaciones satelitales	133

1. INTRODUCCIÓN

El clima es un factor decisivo en la producción agropecuaria, pues su influencia, tanto directa como indirecta sobre los seres vivos orienta las actividades económicas de cada región, especialmente las agrícolas. Asimismo, el potencial productivo de las especies vegetales y animales depende de las condiciones agroclimáticas en las que se desarrollan, por tanto, el éxito de ciclos productivos está estrechamente vinculado al comportamiento climático durante todo el periodo de crecimiento o crianza.

El cambio climático se manifiesta como variaciones a largo plazo en los patrones meteorológicos y en las condiciones climáticas, influenciadas por el balance energético y que generan graves afectaciones en regiones específicas, especialmente en aspectos como la seguridad alimentaria, la biodiversidad, la economía y la disponibilidad de recursos hídricos (IPCC, 2023). Además, estas variaciones provocan fenómenos como sequías, inundaciones, precipitaciones irregulares y olas de calor a nivel mundial (Foden et al., 2019; Jhong et al., 2019; Malhi et al., 2021; Uprety et al., 2019).

Un claro ejemplo de esto se observa en la provincia de Guanacaste, situada en el noroeste de Costa Rica, dentro de la región conocida como el Corredor Seco Centroamericano. Dicha área se cataloga como una de las zonas más vulnerables al cambio climático del mundo, ya que presenta riesgos recurrentes debido a largos periodos de sequía y retrasos o finalizaciones tempranas de la época lluviosa (Díaz Bolaños, 2019; Quirós, 2023). Comportamiento que se magnifica por los efectos del fenómeno del Niño caracterizado por reducir hasta en 26 % la precipitación promedio anual y a su vez aumentar la temperatura hasta en 1°C (Glantz, 2022; Picón Cruz, 2020).

Por lo anterior, ha aumentado el interés por comprender el clima y su influencia en las actividades agroproductivas (Sain et al., 2019). Un ejemplo de ello es la estimación del incremento de 1,3 °C en la temperatura anual promedio para el año 2030, siendo las provincias de Alajuela, Puntarenas y Guanacaste las que mostraron los mayores aumentos (Bouroncle et al., 2015). En particular Zee et al (2012) clasificaron la severidad potencial de la sequía en la provincia de Guanacaste como alta, lo que implica periodos secos de 4 a 6 meses, con precipitaciones anuales entre 1.200 y 1.600 mm por año.

El territorio Santa Cruz-Nicoya es un área con vocación agropecuaria y representativa de la provincia de Guanacaste y es susceptible ante del cambio climático el cual representa el 25 % de la

provincia (592.642,8 ha) con un promedio por unidad productiva de 54,5 ha (INEC, 2015). En particular, Santa Cruz-Nicoya abarca 145.750 ha, distribuidas en 76.066 ha en Santa Cruz y 69.690 ha en Nicoya. En estos espacios predominan los cultivos de arroz, maíz, caña de azúcar y naranja, así como la producción de ganado vacuno (INEC, 2015). El aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones están provocando reducciones en la producción de forrajes y en la cobertura vegetal, lo que incrementa la temperatura del suelo y favorece la aparición y propagación de plagas y enfermedades (Agüero et al., 2020).

Los problemas e incertidumbres asociados a las variaciones climáticas se pueden abordar, mediante el análisis de la climatología y la comprensión de la agroclimatología. Dicha disciplina aprovecha las condiciones naturales del entorno (como el clima, el suelo, la radiación solar, la temperatura y la humedad) para impulsar la productividad agrícola y ganadera, al mismo tiempo que promueve la conservación de los recursos naturales. Proporciona información clave para identificar las condiciones óptimas de distintos cultivos y razas de ganado (Croitoru et al., 2020; Murphy & Hurtado, 2016). Asimismo, permite generar predicciones y tendencias estacionales (Brendel et al., 2020; Gbangou et al., 2020; Saha et al., 2021), así como realizar zonificaciones basadas en información climatológica (Mingalev, 2021).

La agroclimatología es una ciencia interdisciplinaria que integra la Agronomía y la Meteorología, con el objetivo principal de aumentar la producción y mejorar la calidad de los alimentos (Murphy & Hurtado, 2016). Utiliza variables atmosféricas de largo plazo (como la radiación solar, la precipitación, la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad y las concentraciones de gases en la atmósfera) para establecer su relación con la agricultura y así promover una producción más eficiente y sostenible (Wagner-Riddle, 2005). A pesar de su relevancia, la meteorología agrícola ha sido poco estudiada y aplicada en el territorio costarricense, y hasta la fecha existen pocos informes al respecto. Por ejemplo, Jiménez (1985), realizó un estudio pionero caracterizando el clima del territorio de Turrialba, y posteriormente Orozco (2007) desarrolló una zonificación climática de Costa Rica con el fin de evaluar la viabilidad en el diseño de obras viales.

En adición, Alzate et al. (2017) analizaron la gestión de la información agroclimática y su aplicación en la modelación de estructuras en sistemas agrícolas de ambientes protegidos, con el objetivo de comprender cómo la información podría emplearse para optimizar sistemas en condiciones

controladas. De manera más reciente, Delgado et al. (2020) desarrollaron una caracterización edafoclimática con el propósito de identificar los elementos que favorecen el desarrollo de los cultivos, así como sus principales limitantes. A esto se suma el trabajo de Hidalgo et al. (2021), quienes realizaron una proyección de modelos climáticos con CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project Phase 5) en el cantón de La Cruz, Guanacaste, para estimar los posibles cambios climáticos en la localidad a partir de información recopilada durante los últimos 45 años.

El recurso hídrico es esencial para la vida de las plantas, ya que constituye entre el 80 % y el 90 % de su materia y cumple funciones fundamentales como disolver y transportar nutrientes, y actuando como un regulador térmico (Flores, 2012). A pesar de su elevado contenido de agua en las plantas, una gran parte de ese pierde por transpiración. Este proceso, sin embargo, es clave para su actividad fisiológica, ya que cuanto mayor es la transpiración, más activa permanece la planta, absorbiendo más minerales y metabolitos, y fijando mayor cantidad de dióxido de carbono a través de la fotosíntesis (Fricke, 2019; Knauer et al., 2020; Parkash & Singh, 2020).

En consecuencia, el estudio y la comprensión de los procesos de evaporación, transpiración y evapotranspiración resultan fundamentales, especialmente en el manejo del recurso hídrico en los cultivos. La evapotranspiración permite conocer las características y particularidades de un territorio o de un cultivo específico, facilitando la gestión del uso del agua, la evaluación de la humedad del suelo y del cultivo, así como la predicción del tiempo (Niu & Chen, 2022). Este proceso combina dos fenómenos: por un lado, la evaporación, en la que el agua líquida se transforma en vapor mediante el intercambio de calor latente; y por otro, la transpiración, en la que el agua contenida en los tejidos vegetales se libera hacia la atmósfera (Murphy & Hurtado, 2016).

Finalmente, este estudio pretende generar la primera caracterización agroclimática del territorio Santa Cruz-Nicoya, aprovechando el potencial de los datos históricos satelitales masivos, la eficiencia del procesamiento en la nube y el método de Thornthwaite para elaborar un calendario de siembra en los cultivos delimitado por los períodos de crecimiento y humedad. Para ello, se analizarán variables meteorológicas (como la temperatura media, la humedad relativa, la precipitación y la velocidad del viento) obtenidas de la plataforma de análisis geoespacial en la nube GEE (Google Earth Engine; <https://code.earthengine.google.com>). Además, se estimaron los índices agroclimáticos y se realizará la clasificación agroclimática utilizando el método de Thornthwaite.

2. OBJETIVOS

2.1 General

Generar una caracterización climática y agroclimática del territorio Santa Cruz-Nicoya, utilizando el potencial de los datos históricos satelitales masivos, la eficacia del procesamiento en la nube y el método Thornthwaite, para la generación de un calendario de siembra delimitado por los períodos de crecimiento y humedad.

2.2 Específicos

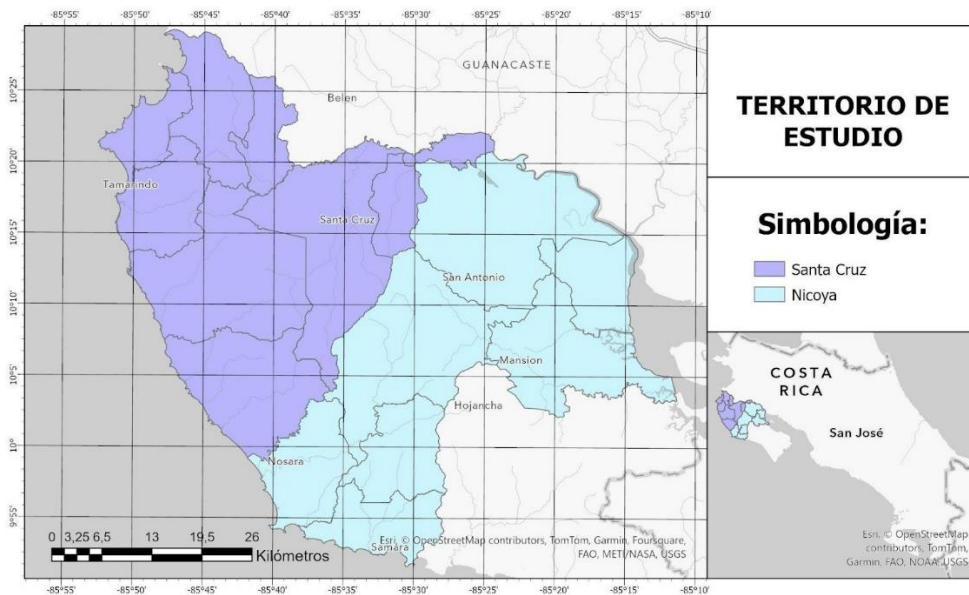
- 2.2.1 Generar variables meteorológicas (temperatura media, humedad relativa, precipitación, viento) del territorio Santa Cruz-Nicoya, a partir de la plataforma Google Earth Engine (GEE), para la generación de una caracterización climática y agroclimática.
- 2.2.2 Estimar los índices agroclimáticos por el método de Thornthwaite para el territorio Santa Cruz-Nicoya.
- 2.2.3 Generar información agroclimática a partir de las estimaciones de los índices para la toma de decisiones de la comunidad agrícola del territorio Santa Cruz-Nicoya.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Zona de estudio

3.1.1 Ubicación geográfica

El territorio de Santa Cruz–Nicoya se encuentra en la provincia de Guanacaste y abarca el 25 % de la superficie total de la Región Chorotega, con una extensión de 592.642,8 ha. Limita al Norte con los cantones de Carrillo y Bagaces, al Oeste con el océano Pacífico, al Sur con el cantón de Hojancha y al Este con el cantón de Nandayure y el golfo de Nicoya. Este territorio está conformado por los cantones de Santa Cruz y Nicoya, que se dividen en 9 y 7 distritos, respectivamente. El distrito más extenso de Santa Cruz es Veintisiete de Abril, con 30.151 ha, mientras que en Nicoya el mayor es San Antonio, con 33.410 ha (MAG, 2020).



3.1.2 Riesgo climático

El territorio de Santa Cruz–Nicoya se ubica en el denominado, Corredor del Trópico Seco Centroamericano, catalogado como una de las zonas más vulnerables al cambio climático a nivel mundial (Quirós, 2022). Según Díaz Bolaños (2019), esta área presenta un riesgo recurrente de períodos prolongados de época seca provocados por el retraso en el inicio de la estación lluviosa, la extensión de la canícula y una finalización prematura de la época lluviosa. Esta situación se agrava

con los efectos del fenómeno de El Niño, que puede reducir hasta en un 26 % la precipitación promedio anual y aumentar la temperatura en aproximadamente 1 °C (Glantz, 2022a; Picón Cruz, 2020). El corredor abarca desde la costa occidental de Chiapas (México) hasta las provincias centrales de Panamá. En Costa Rica, se extiende principalmente sobre el área del Pacífico Norte (Región Chorotega), seguido por la Región Central y el sector occidental del Valle Central (Díaz Bolaños, 2019).

3.1.3 Caracterización climática

En cuanto a las variables climatológicas, Nicoya registra una precipitación media anual de 2.153,6 mm distribuidos en 127 días, mientras que en Santa Cruz es de 1.788,0 mm en 156 días. Nicoya presenta un mayor diferencial entre la temperatura mínima (21,0 °C) y máxima (33,2 °C), con una amplitud térmica de 12,2 °C, una menor temperatura media (24,1 °C) y una mayor humedad relativa (76,0 %), en comparación con Santa Cruz, que presenta una amplitud térmica de 10,5 °C, una temperatura media de 27,9 °C y una humedad relativa de 73,3 % (Hidalgo et al., 2021; INDER, 2016; MAG, 2020).

3.2 Plataformas satelitales de acceso abierto

Las plataformas satelitales consisten en un conjunto de programas y rutinas que permiten a los computadores ejecutar tareas específicas, mediante un código extensible que proporciona aplicaciones y servicios a los usuarios (Asadullah et al., 2018; De Reuver et al., 2018). Estas plataformas están en constante innovación y buscan ofrecer a las personas la mejor experiencia y facilidad de uso. De hecho, forman parte integral de nuestras actividades cotidianas, con aplicaciones en ámbitos como el transporte, el comercio y las redes sociales (Fu et al., 2021; Koskinen et al., 2019).

Las tecnologías satelitales, accesibles a través de estas plataformas, proporcionan información que contribuye a resolver el problema del rezago tecnológico. Esto facilita el acceso a grandes bases de imágenes y datos de sensores remotos, lo que a su vez potencia el desarrollo de investigaciones científicas a escala global y en largos períodos de tiempo (Owan et al., 2021; Johnson et al., 2021; Lokers et al., 2016; Oussous et al., 2018).

Algunas de las principales plataformas de computación en la nube de acceso abierto que permiten obtener información climática son: CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data; <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>), CE (Climate; Huntington et al., 2017), POWER DAV (Prediction Of Worldwide Energy Resources – Data Access Viewer; <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/>) y GEE (Google Earth Engine; <https://earthengine.google.com/>). Esta última es una plataforma de análisis geoespacial desarrollada por Google en 2010, que permite procesar grandes volúmenes de datos satelitales para el desarrollo de estudios sobre el clima y los procesos climáticos en la nube (Yang et al., 2016).

GEE facilita el acceso y uso de datos para desarrollar investigaciones en diversos campos, destacándose en áreas como las energías renovables, la eficiencia y sostenibilidad energética, así como en aplicaciones agroclimáticas (Banerjee et al., 2024; Ganesh, 2022; Gaso et al., 2023; Gupta et al., 2023; Torsoni et al., 2023; Zhao & Wang, 2024). Un ejemplo de ello es la disponibilidad temporal de variables como la radiación fotosintéticamente activa, la velocidad del viento, la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la presión superficial (Kheyruri et al., 2023; Oloyede et al., 2023). Estas variables desempeñan un papel crucial en el desarrollo de la meteorología agrícola (Ahmed et al., 2022; Wagner-Riddle, 2005), ya que son precisas y se actualizan en tiempo real. Esto permite a investigadores y profesionales del sector agrícola realizar análisis y diseñar estrategias más eficientes para incrementar la producción agropecuaria y optimizar la calidad de los alimentos producidos (Akram et al., 2022; Araghi et al., 2022; Bebeley et al., 2022; Rizzo et al., 2022).

3.2 Variables climáticas

3.2.1 Evaporación, transpiración, precipitación y evapotranspiración

La evaporación es un proceso físico mediante el cual el agua pasa de su fase líquida a gaseosa. El calor latente necesario para evaporar un gramo de agua a 20 °C es de aproximadamente 580 calorías, y se obtiene de la radiación y del calor sensible del aire circundante a la superficie húmeda (Liu et al., 2020; Zuo et al., 2021). Por su parte, la transpiración es el proceso por el cual el agua fluye desde el suelo hasta la atmósfera a través de los tejidos de la planta (Jagadish et al., 2021; Xu et al., 2019). Al igual que la evaporación, la transpiración depende de factores atmosféricos como el aporte de energía, la diferencia en el contenido de vapor de agua entre el aire y la superficie evaporante, así

como de la advección. La transpiración alcanza su máximo durante el día, cuando los estomas están completamente abiertos, y se reduce a sólo un 10 %–15 % durante la noche (Flores, 2012).

La evapotranspiración es un proceso complejo que depende de los factores climáticos que regulan la evaporación, así como de las características morfológicas y fisiológicas de la cobertura vegetal, del suelo y de su nivel de humedad. En este contexto, la evapotranspiración potencial (ETP), según Thornthwaite (1948), representa la cantidad máxima de agua que podría evaporarse y transpirarse si el suelo mantuviera un contenido hídrico óptimo y la vegetación estuviera en condiciones ideales (Murphy & Hurtado, 2016; Niu & Chen, 2022). Sin embargo, en condiciones de déficit hídrico frecuentes la evapotranspiración real (ETR) puede ser considerablemente menor, ya que la evaporación se ve limitada por la falta de agua disponible y las plantas reducen la transpiración mediante mecanismos de regulación estomática completa (Murphy & Hurtado, 2016).

En este balance, la precipitación constituye la principal fuente de agua para el sistema suelo–planta y, por tanto, determina la magnitud de la evapotranspiración real (ETR). En regiones con marcada estacionalidad climática, las variaciones en la precipitación condicionan la disponibilidad de agua en el suelo: durante los periodos húmedos, la ETR tiende a aproximarse a la evapotranspiración potencial (ETP), mientras que en los periodos secos la ausencia de aportes hídricos reduce la evaporación y limita la transpiración a niveles mínimos (Pereira et al., 2014).

Diversos factores influyen en la evapotranspiración, entre los principales se encuentran la radiación solar, el contenido de vapor de agua en la atmósfera, suelo y el viento. La radiación solar proporciona la energía necesaria para el cambio físico del agua y promueve la evaporación de las superficies; a mayor radiación, mayor es la evapotranspiración (Sharma & Singh, 2022). El contenido de vapor de agua en la atmósfera también juega un papel importante: cuando el aire está más seco, es decir, con un mayor déficit de saturación se genera un gradiente de concentración de vapor que favorece la evaporación del agua de las superficies y, por tanto, la evapotranspiración. Se estima que el contenido de vapor de agua en la atmósfera contribuye aproximadamente con un 8 % de la evapotranspiración total (Murphy & Hurtado, 2016).

El viento también ejerce un efecto significativo sobre la evapotranspiración. Por un lado, actúa como un mecanismo de difusión de vapor, renovando continuamente el aire en contacto con las superficies y facilitando así la evaporación. Por otro lado, el viento puede aportar energía por

advección, es decir, transportar calor y aumentar la velocidad de evaporación al llevar aire más cálido hacia la superficie (Wu et al., 2021).

3.3 Estimación de variables climáticas

3.3.1 Precipitación (PP)

La precipitación constituye la principal entrada de agua al sistema suelo–planta–atmósfera y es uno de los componentes fundamentales del balance hídrico y de la dinámica climática regional. Su variabilidad temporal y espacial determina en gran medida la disponibilidad de agua en el suelo, la magnitud de la evapotranspiración real (ETR) y el desempeño hídrico de los cultivos (Pereira et al., 2014). En climatología agrícola, la precipitación se analiza en escalas diarias, mensuales y anuales, lo que permite caracterizar la estacionalidad, la frecuencia de eventos extremos y la duración de periodos secos y húmedos (Murphy & Hurtado, 2016). Estos patrones influyen directamente en la fenología de los cultivos, el diseño de estrategias de manejo del agua y la planificación agrícola en su conjunto.

3.3.2 Evapotranspiración (ETP)

En agricultura, uno de los principales factores que limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas es la humedad disponible en el suelo (Wang et al., 2019). Existen diversos reportes sobre métodos para estimar el Balance Hídrico Climático (BHC) (Doorembos & Pruitt, 1977; Babaeian et al., 2019); sin embargo, los métodos científicos más conocidos y actualmente utilizados, basados en fórmulas matemáticas, son: Penman (1948), Penman-FAO (1998), Thornthwaite (1948), Turk (1954) y Blaney & Criddle (1950). A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

3.3.3 Método de Thornthwaite (1948)

El método utiliza la relación exponencial entre la temperatura media mensual y la ETP mensual, expresada según la siguiente ecuación:

$$ETP_j = c_j * 16 \left(10 \frac{T_j}{I} \right)^a \quad \text{Ecu. 1.}$$

donde:

ETP_j : corresponde a la evapotranspiración potencial del mes j (mm).

c_j : es el coeficiente de ajuste para cada mes j , el cual se estima según el número de días del mes j

(N_j) y las horas de heliofanía astronómica promedio para el mes j (H_j), de la siguiente manera:

$$c_j = \frac{H_j N_j}{12 \cdot 30} \quad \text{Ecu. 2.}$$

T_j : es la temperatura media mensual del mes j ($^{\circ}\text{C}$).

i_j : es el índice calórico para cada mes j , con j (1, 2, ..., 12)

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1,514} \quad \text{Ecu. 3}$$

I : es el índice calórico anual.

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad \text{Ecu. 4.}$$

$$a: 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,7 \times 10^{-5} I^2 + 0,001792 I + 0,49239.$$

3.3.4 Método de Penman-Monteith FAO (1998)

Estima por medio de un modelo físico matemático la evaporación de referencia en mm/d (ET_o), mediante la combinación de dos componentes: un término radiativo que representa la energía disponible en la superficie del cultivo para el proceso de evapotranspiración, y un término aerodinámico, que describe la capacidad de la atmósfera para retirar el vapor de agua en función de la velocidad del viento y del gradiente de presión de vapor entre la superficie y el aire. Esta estimación se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$ET_o = \frac{0,48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad \text{Ecu. 5.}$$

donde:

ET_o : representa la evapotranspiración de un cultivo de referencia estándar ($mm / día$).

R_n : es la radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ / m^2 día^{-1}$).

G : es el flujo de calor en el suelo ($MJ / m^2 día^{-1}$).

T : es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$).

u_2 : es la velocidad del viento a 2 m de altura (m / s).

γ : es una constante psicrométrica ($kPa/^{\circ}\text{C}$).

Δ : es una pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($kPa/^{\circ}\text{C}$).

e_s : es la presión de vapor saturación media (kPa).

e_a : es la presión de vapor real (kPa).

3.3.5 Método de Hargreaves & Samani (1985)

Se requiere de los datos de temperaturas y radiación global estimados a partir de la radiación astronómica, mediante la siguiente fórmula:

$$ET_o = 0,0023 * RA * \quad Ecu. 6.$$

donde:

ET_o : es la evapotranspiración de referencia diaria (*mm / día*).

T : es la temperatura media del aire ($^{\circ}C$).

RA : radiación astronómica, convertida en *mm / día*.

$T_{max} - T_{min}$: diferencia entre temperatura máxima y mínima diaria del aire ($^{\circ}C$).

En caso de disponer de la radiación global, se expresaría de la siguiente manera:

$$ET_o = 0,0135 * (T + 17,78) * RG \quad Ecu. 7.$$

RG : Radiación global (*mm / día*).

T : es la temperatura media del aire ($^{\circ}C$).

3.3.6 Método de Turc (1961)

Este método consiste en la utilizando la radiación global de cada mes, la temperatura media mensual y el factor de corrección de humedad relativa media mensual.

$$ET_o = f_i * \left[\frac{T}{T+15} \right] RG + 50 * c_i \quad Ecu. 8.$$

donde:

ET_o : es la evapotranspiración de un cultivo de referencia estándar (*mm / día*).

f_i : es el factor de corrección de la duración del mes (0,37 febrero y 0,40 en los demás meses).

T : es la temperatura media mensual ($^{\circ}C$).

RG : es la radiación global la cual se estima a partir de radiación Astronómica (RA) y de Heliofanía efectiva (He) y Astronómica (HA), de la siguiente manera:

$$RG = RA * \left(0,18 + 0, \frac{62*He}{HA} \right) \quad Ecu. 9.$$

c_i : factor de corrección para zonas áridas, humedad relativa (HR). $c_i=1$ si HR > 50%; si HR < 50%,

$$c_i = 1 + \left[\frac{(50-HR)}{70} \right] \quad Ecu. 10.$$

En síntesis, aunque existen múltiples métodos empíricos y combinados para la estimación de la evapotranspiración, la literatura científica coincide en señalar al método de Penman-Monteith FAO (Allen et al., 1998) como el estándar de referencia a nivel global. Su aceptación se debe a que integra de manera física y aerodinámica los principales factores que controlan la ETo, lo que lo convierte en la base de numerosos estudios agrícolas y de balance hídrico en diferentes regiones del mundo (Allen et al., 1998; Gavilán et al., 2005; Pereira et al., 2014; Sentelhas et al., 2009; Sutapa et al., 2022).

En el contexto del trópico seco y otras regiones tropicales, este método ha sido aplicado con éxito en investigaciones agroclimáticas orientadas a la planificación hídrica y la adaptación al cambio climático (Borges & Menciondo, 2007; Delgado et al., 2023; Wable et al., 2021). No obstante, en zonas donde no se cuenta con series meteorológicas completas o con estaciones climáticas bien distribuidas, se recurre con frecuencia a aproximaciones más sencillas como los métodos de Hargreaves & Samani (1985) o Thornthwaite (1948). Estos, si bien son menos precisos, han mostrado resultados aceptables en ambientes tropicales y semiáridos, lo que explica su uso extendido en estudios regionales y de carácter exploratorio (Calvo, 1986; José et al., 2020; Pérez et al., 2013).

De este modo, la elección del método para estimar la evapotranspiración depende no solo de la disponibilidad de información climática, sino también del objetivo del estudio y de las particularidades agroecológicas de cada territorio, siendo Penman-Monteith la opción preferida cuando se busca mayor exactitud, y Hargreaves o Thornthwaite alternativas válidas en condiciones de limitación de datos.

3.4 Balance de agua del suelo o balance hídrico climático (BHC)

El Balance Hídrico Climático (BHC) hace referencia al equilibrio entre el agua que ingresa al suelo por precipitación y la que se pierde a través de procesos como la evapotranspiración, la recarga de acuíferos y el escurrimiento superficial. En hidrología, el método más ampliamente utilizado para

calcular el BHC en regiones húmedas es el de Thornthwaite & Mather (1955), que emplea datos de precipitación y temperatura del aire como variables de entrada, proporcionando una estimación confiable de la disponibilidad de agua en estas regiones (Mammoliti et al., 2021). No obstante, en áreas con condiciones climáticas y geográficas distintas, pueden ser necesarios enfoques alternativos para obtener estimaciones más precisas del BHC (Hendrayana et al., 2021).

La precipitación constituye la fuente primaria de ingreso de agua al sistema suelo-planta-atmósfera y es el componente que determina, en primera instancia, la dinámica del Balance Hídrico Climático (Flores, 2012). Su variabilidad temporal expresada en la distribución estacional, la intensidad de los eventos y la frecuencia de días lluviosos condiciona la capacidad del suelo para almacenar humedad y regula el inicio, duración y magnitud de los periodos de recarga y de déficit hídrico (Pereira et al., 2014). En climatología agrícola, la precipitación se analiza tanto por sus acumulados como por su comportamiento intraestacional, ya que fluctuaciones en la oferta de lluvia pueden generar desbalances entre la demanda atmosférica de agua y la disponibilidad real en el suelo, influyendo directamente en el crecimiento vegetal y en la ocurrencia de estrés hídrico (Murphy & Hurtado, 2016).

El suelo se encuentra en una interacción constante con el agua, donde puede decrecer su saturación o aumentar favoreciendo las fuerzas capilares y de adsorción, pero a medida que el suelo pierde contenido de humedad provoca que ésta quede retenida en los poros más pequeños. Por lo que, la cantidad de agua contenida en el suelo y la energía de retención permite determinar los parámetros hidrológicos (Zhang & Lu, 2018).

Existen diversos factores que modifican el contenido de agua almacenada en el suelo. La capacidad de campo (FC) corresponde al contenido de agua que el suelo retiene después de que ha drenado libremente el exceso gravitacional, condición que en laboratorio se aproxima a una tensión matricial cercana a -33 kPa ($\approx 0,33$ atm). Este valor puede variar según la textura, de modo que en suelos arenosos la succión equivalente puede situarse entre -10 y -20 kPa debido a su menor proporción de poros finos (Chandler et al., 2017). La humedad equivalente representa la cantidad de agua retenida por una muestra de suelo sometida a una fuerza centrífuga equivalente a $0,3$ atm (Murphy & Hurtado, 2016).

Por su parte, el punto de marchitez permanente (PWP) corresponde al contenido mínimo de agua disponible para la planta, condición en la cual el potencial matricial se aproxima a -1500 kPa (≈ 15 atm). A esta tensión, la fuerza de retención del suelo supera la capacidad de extracción radicular, por lo que la planta ya no puede recuperar su turgencia, incluso durante la noche (Hohenegger & Stevens, 2018; Santra et al., 2018). Por otro lado, la capacidad máxima o humedad de saturación ocurre cuando los poros del suelo están completamente llenos de agua, en este estado, el suelo alcanza su capacidad máxima de retención de agua (Achieng, 2019).

3.5 Índices y clasificación agroclimática de Thornthwaite

La clasificación agroclimática permite determinar y categorizar las regiones agrícolas en distintas zonas, dependiendo de las características del clima y suelo (Alwan et al., 2019). Estas clasificaciones se dividen en cuatro categorías: clasificación con elementos climáticos simples, clasificación con índices agroclimáticos, clasificación por cultivos particulares y la clasificación agrobotánica (Megh et al., 2015; Wagner-Riddle, 2005).

Selyaninov en Rusia fue uno de los primeros en utilizar índices agroclimáticos para comparar regiones y determinar su aptitud climática (Selyaninov, 1928, 1930). Estos índices se basaron en varios parámetros agrometeorológicos prácticos, con el objeto de caracterizar una región o área específica y así determinar los cultivos más adecuados. Los índices utilizados incluyeron la fecha media de la primavera y última helada, la duración del período libre de heladas, la duración del período con temperaturas adecuadas para el crecimiento de los cultivos, la duración de las sequías utilizando el índice hidrotérmico, así como las temperaturas medias y absolutas (Murphy & Hurtado, 2016). Al considerar estos parámetros, Selyaninov pudo evaluar las condiciones climáticas de diferentes regiones y determinar su idoneidad para el desarrollo de ciertos cultivos. Este tipo de clasificaciones proporcionan información para que los agricultores planifiquen y tomen decisiones con respecto a sus cultivos, así como identificar las zonas donde el cultivo mejor se desarrolla (Araya et al., 2010; Haftom et al., 2019).

Los índices agroclimáticos permiten describir las condiciones climáticas de una localidad, además de comprender la relación entre el clima y la producción agropecuaria. Para ello, se utilizan variables meteorológicas tales como, la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y la

radiación solar (Chipanshi et al., 2022; Mathieu & Aires, 2018). La utilización de estos índices permite identificar patrones y tendencias climáticas funcionales para la mejora de la gestión del manejo de los cultivos. Algunos de los principales índices son el índice de temperatura y humedad, el índice de evapotranspiración, el índice de aridez, el índice de vegetación, el índice de heliotérmico de Huglin (Murphy y Hurtado, 2016; Yeşilirmak, 2022).

Existen en la literatura diferentes métodos de estimación de índices agroclimáticos. Hargreaves es un método que utiliza las temperaturas y la radiación solar con el propósito de estimar los índices de evapotranspiración potencial, el coeficiente de cultivo y la demanda de agua del cultivo (Hwang et al., 2020; Luo et al., 2014; Ogunrinde et al., 2022; Pandi et al., 2022; Yan & Mohammadian, 2020). Turk emplea datos de temperatura, humedad relativa y radiación global, lo que permite estimar varios índices como, por ejemplo: el índice de evapotranspiración potencial, el índice de balance hídrico y el índice de sequía (Benahmed et al., 2022; Birara et al., 2021; Kaya et al., 2021; Lu et al., 2022; Shaik et al., 2020). Finalmente, Thornthwaite se basa en la temperatura y la precipitación para calcular el índice de sequía, el índice de balance hídrico, el índice de humedad, el índice de evapotranspiración y el índice de temperatura. Este método ha sido ampliamente utilizado en investigaciones sobre agricultura y medio ambiente (Burak et al., 2022; Castro & Gironás, 2021; Reichardt & Timm, 2020; Zuzulová et al., 2020).

3.6 Calendario técnico de siembra

La programación de las actividades agrícolas es fundamental para optimizar el uso de los recursos productivos y mitigar los riesgos derivados de la variabilidad climática, con el fin de maximizar la eficiencia de los sistemas de producción. En este contexto, el calendario técnico de siembra se constituye como una herramienta de planificación operativa que organiza, de forma sistemática y secuencial, las labores agrícolas desde la preparación del terreno hasta la cosecha, considerando las condiciones agroclimáticas específicas de cada territorio (Wakai et al., 2025; Apriyana et al., 2021).

La construcción de estos calendarios no se limita a la disponibilidad de datos térmicos e hídricos; también puede integrar información meteorológica de alta resolución, pronósticos climáticos estacionales, datos fenológicos y el conocimiento empírico acumulado por los agricultores. Este saber

local, documentado en regiones como África Occidental y el Sudeste Asiático, se basa en indicadores tradicionales como la floración de especies vegetales, la migración de aves o patrones astronómicos que permiten anticipar variaciones en el inicio de la temporada de lluvias y ajustar oportunamente las prácticas productivas (Séhouéto, 2006; Agbodan et al., 2020). En la actualidad, los avances tecnológicos han permitido la digitalización de calendarios agrícolas, como en el caso de Japón, donde se han desarrollado sistemas de información centralizados que amplían su accesibilidad y facilitan su aplicación en modelizaciones agroclimáticas (Wakai et al., 2025).

En regiones con elevada variabilidad climática, como el territorio Santa Cruz–Nicoya, la elaboración de un calendario técnico resulta especialmente relevante debido a la marcada estacionalidad de las precipitaciones y la recurrencia de eventos extremos asociados al fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENOS) (Alfaro, 2004). Retrasos en el establecimiento de la estación lluviosa, intensificación y prolongación de la canícula, así como el acortamiento del período húmedo, generan limitaciones hídricas en fases críticas del ciclo fenológico, lo que exige una programación que sincronice con precisión la disponibilidad de agua y las condiciones térmicas con las etapas de crecimiento y desarrollo de los cultivos (Quirós, 2023; Glantz et al., 2022b).

La elaboración de calendarios técnicos en contextos productivos complejos implica integrar series climáticas históricas y recientes, calcular variables agroclimáticas como la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el balance hídrico climático (BHC), así como determinar índices térmicos e hídricos que delimiten ventanas óptimas de siembra. Herramientas como *Google Earth Engine*, el *Integrated Cropping Calendar Information System* (ICCIS) en Indonesia, y modelos de simulación como el *Community Land Model* (CLM) o *CropSow*, han demostrado su eficacia para mejorar la predicción de fechas óptimas y optimizar el uso del agua y otros insumos en escenarios de variabilidad climática (Rabin et al., 2023; Apriyana et al., 2021; Liu et al., 2023).

En definitiva, los calendarios técnicos de siembra representan la traducción operativa de análisis climáticos, edáficos y fenológicos en estrategias concretas de manejo, contribuyendo a fortalecer la resiliencia, la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas frente a un contexto de creciente variabilidad climática.

4. METODOLOGÍA

4.1 Ubicación

La investigación se llevó a cabo en el territorio de Santa Cruz–Nicoya, ubicado en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. Representa el 25 % de la superficie total de la provincia, con una extensión de 592.642,8 ha. Limita al Norte con los cantones de Carrillo y Bagaces, al Oeste con el océano Pacífico, al Sur con el cantón de Hojancha y al Este con el cantón de Nandayure y el golfo de Nicoya. Se conforma por los cantones de Santa Cruz y Nicoya, divididos en 9 y 7 distritos, respectivamente. El distrito más extenso de Santa Cruz es Veintisiete de Abril, con 30.151 ha, mientras que en Nicoya el mayor es San Antonio, con 33.410 ha (MAG, 2020).

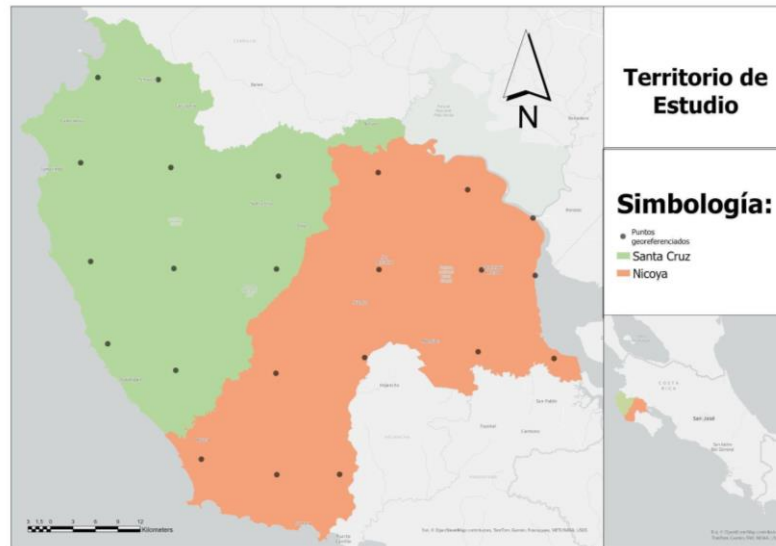
4.2 Caracterización climática

4.2.1 Fuente de datos

Se utilizó puntos georreferenciados distribuidos en polígonos de 13,7 km² sobre el territorio en estudio (1970-2024) (Figura 1). Mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), se descargó la serie climática de las variables temperatura media, humedad relativa, precipitación y viento, utilizando el producto ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR. Los datos fueron exportados en formato CSV para cada punto de la malla. La información obtenida conformó una matriz de datos en la que las filas correspondían a los puntos históricos de la malla y las columnas a las variables analizadas. Posteriormente, los conjuntos de datos fueron editados y preparados para su análisis utilizando el lenguaje R.

Figura 1.

Distribución espacial de los puntos de muestreo empleados para la caracterización agroclimática del territorio Santa Cruz-Nicoya, Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Procesamiento de datos climáticos

Los datos descargados de GEE, se organizaron y procesaron en el entorno estadístico RStudio, utilizando los paquetes tidyverse (Wickham et al., 2019), lubridate (Grolemund & Wickham, 2011) y zoo (Zeileis & Grothendieck, 2005). Los archivos CSV contenían los atributos: *Fecha*, *file_name*, *HR*, *PP*, *Temp_med*, *Temp_max*, *Temp_min* y los componentes del viento *u* y *v* a 10 metros de altura. La columna *file_name* identificaba cada punto de muestreo mediante un código único, generado a partir de las coordenadas geográficas de cada punto. Dicho código corresponde al Open Location Code (OLC), un sistema desarrollado por Google (2015) que convierte los valores de latitud y longitud en una secuencia alfanumérica denominada Plus Code. Este sistema permite representar cualquier ubicación de la superficie terrestre con un identificador universal, preciso y reproducible.

Para este estudio, los códigos OLC se generaron en RStudio mediante el paquete olctools, utilizando una resolución de diez caracteres, equivalente a una precisión espacial aproximada de $13,5 \times 13,5$ metros. Cada punto georreferenciado obtuvo así un identificador único e invariable, lo que permitió organizar, rastrear y consolidar los datos de los 23 puntos de muestreo en una única base de datos homogénea.

La velocidad del viento se calculó a partir de sus componentes ortogonales u y v utilizando la siguiente expresión:

$$\mathbf{Velocidad} = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad \text{Ecu. 11.}$$

donde:

u^2 : es la velocidad del viento Este a Oeste

v^2 : es la velocidad del viento de Norte a Sur

Está estimación permitió obtener una única variable continua de velocidad del viento en m/s, representativa de cada observación diaria.

Se realizó una inspección preliminar de los datos para identificar posibles valores faltantes y atípicos en las variables climáticas: *temperatura*, *humedad relativa*, *precipitación* y *viento*. Posteriormente, la columna *Fecha* (en formato año-mes-día) se descompuso en dos columnas separadas: *mes* y *año*. Con los datos estructurados, se calcularon los valores mensuales y anuales de las variables climáticas, utilizando el promedio para *temperatura*, *humedad relativa* y *viento*, y la suma para la *precipitación*.

4.2.3 Análisis de las series de tiempo

El análisis de las series de tiempo se orientó a examinar la variabilidad temporal y las tendencias de las principales variables climáticas (temperatura media, máxima y mínima, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento) en el territorio Santa Cruz–Nicoya, para el período comprendido entre 1970 y 2024.

Inicialmente, se efectuó un análisis estadístico descriptivo con el propósito de caracterizar la distribución y dispersión de los datos. Para cada variable se calcularon los parámetros básicos: media, mediana, mínimo, máximo, rango, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos indicadores permitieron identificar la magnitud promedio, la variabilidad interanual e intermensual y posibles valores extremos asociados a condiciones anómalas.

Posteriormente, se aplicaron diferentes técnicas de análisis de series temporales con el fin de identificar tendencias, estacionalidad y patrones cíclicos. La prueba de Mann–Kendall (Cabral &

Lucena, 2020; Yue & Wang, 2004) se utilizó para determinar la presencia de tendencias monótonas en las series sin asumir una distribución específica de los datos. La pendiente o magnitud del cambio fue estimada mediante el estadístico de Sen, expresado en unidades por año, lo que permitió cuantificar la dirección e intensidad de las tendencias a largo plazo.

Para evaluar la dependencia temporal entre observaciones, se calcularon las funciones de autocorrelación (ACF, por sus siglas en inglés) y autocorrelación parcial (PACF, por sus siglas en inglés), que permitieron identificar la periodicidad de los ciclos y la posible presencia de persistencia o memoria temporal en las variables climáticas. Complementariamente, se aplicó un análisis de Wavelet continuo (CWT, por sus siglas en inglés), a través del paquete *biwavelet*, con el fin de detectar oscilaciones no estacionarias y variaciones de energía en distintas escalas temporales, asociadas a fenómenos climáticos recurrentes en el trópico seco.

Asimismo, se realizó un análisis de correlación entre variables climáticas, aplicando los coeficientes de Pearson (r) y Spearman (ρ) para identificar relaciones lineales y monotónicas entre temperatura, humedad relativa, precipitación y viento. Este procedimiento permitió explorar la interdependencia entre los distintos componentes del sistema climático local.

En la fase de representación gráfica, se generaron gráficos de líneas para visualizar la evolución temporal de las variables, diagramas de caja (*boxplots*) para describir la variabilidad intra e interanual, e histogramas con funciones de densidad kernel (KDE) para analizar la forma y distribución de las observaciones. Además, se elaboraron diagramas climáticos de Walter y Lieth para representar los períodos secos y húmedos, y mapas de isolíneas mediante el paquete *climatol* en R, con el objetivo de visualizar espacialmente la distribución de las variables climáticas en el territorio de estudio. Todas las operaciones estadísticas y gráficas se desarrollaron en el entorno RStudio, empleando las librerías *tidyverse*, *trend*, *biwavelet*, *forecast*, *ggplot2* y *climatol* (R Core Team, 2022).

También se generó el diagrama Walter y Lieth (1960) a partir de los promedios mensuales de temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación total mensual (mm) derivados del producto ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR procesado previamente en Google Earth Engine (GEE). Los valores fueron organizados en formato tabular con columnas correspondientes al mes, temperatura media y precipitación mensual.

Posteriormente, el diagrama se elaboró utilizando el software RStudio mediante el paquete *climatol* (Guijarro et al., 2023), el cual implementa la función *diagwl()*, diseñada específicamente para construir los diagramas de Walter y Lieth. En este procedimiento, el eje izquierdo representa la temperatura (°C) y el derecho la precipitación (mm), aplicando la relación climática estándar $P = 2T$. El resultado muestra en línea roja la evolución de la temperatura, en línea azul la precipitación, mientras que las áreas sombreadas en azul y los punteados en rojo indican los periodos húmedos y secos, respectivamente.

4.2.4 Validación de datos satelitales con estaciones terrenas

Para evaluar la precisión de los productos satelitales utilizados en este estudio, se realizó una validación comparativa frente a observaciones meteorológicas. La validación se efectuó empleando los registros de la estación meteorológica de la Central Azucarera Tempisque (CATSA), ubicada en Santa Cruz, Guanacaste (10°30' N, 85°34' O; 25 m s.n.m.), durante el período 2015–2022.

El procedimiento consistió en una comparación estadística entre las series temporales de datos satelitales y los registros observados por la estación terrena, previamente homogeneizados en la misma escala temporal (mensual). Para cada variable climática *temperatura máxima*, *mínima* y *media*, *humedad relativa*, *precipitación acumulada* y *velocidad del viento* se aplicó un modelo de regresión lineal simple, donde los datos observados (CATSA) se consideraron como valores de referencia y las estimaciones satelitales como variables predictoras.

Con el fin de cuantificar el grado de ajuste entre ambas fuentes de información, se calcularon las siguientes métricas estadísticas:

- Coeficiente de correlación de Pearson (r) y coeficiente de determinación (R^2), para evaluar la fuerza y dirección de la relación lineal.
- Sesgo medio (Bias), para identificar posibles sobreestimaciones o subestimaciones sistemáticas.
- Error absoluto medio (MAE) y raíz del error cuadrático medio (RMSE), que describen la magnitud promedio de los errores.
- Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), para estimar la capacidad de los datos satelitales de reproducir la variabilidad observada.

Todos los análisis se realizaron en el entorno RStudio, empleando los paquetes tidyverse para el manejo de datos y para el cálculo de los indicadores de desempeño estadístico. La información completa del procedimiento y las métricas obtenidas se presenta en los Anexos 3 y 4.

4.3 Estimación del balance hídrico climático e índices por el método de Thornthwaite

4.3.1 Balance hídrico climático

La ETP mensual se estimó siguiendo el método de Thornthwaite, por medio de las Ecu. 1, 2, 3 y 4. Consiste en calcular un coeficiente de ajuste para cada mes (j), que depende del número de días del mes (N_j) y de las horas de heliofanía astronómica correspondientes a cada mes (H_j , número máximo teórico de horas de luz solar posibles en un día; Allen et al., 1998). Se consideró el índice calórico mensual (ij), obtenido como el cociente entre la temperatura media mensual (T_j) y el factor de conversión 5, elevado a 1,514, con el objetivo de ajustar la sensibilidad del índice calórico a los cambios de temperatura. Finalmente, el índice calórico anual (I) se determinó sumando los índices calóricos mensuales (ij).

El BHC se estimó considerando la precipitación (P), representada por las lluvias medias mensuales de la serie de tiempo a partir del producto ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR procesado en Google Earth Engine (GEE). Cuando P fue menor que la ETP y los valores resultaron negativos, los meses se clasificaron como secos; por el contrario, cuando las magnitudes fueron positivas, los meses se catalogaron como húmedos. El almacenamiento en los meses secos (Alm_t) se calculó utilizando la Ecu. 12, la cual tomó en cuenta el almacenamiento del mes anterior, el déficit potencial y la capacidad de campo, según la siguiente ecuación:

$$Alm_t = Alm_{t-1} * e^{\frac{DP}{CC}} \quad Ecu. 12.$$

donde:

Alm_t : almacenaje en el mes.

Alm_{t-1} : almacenaje del mes anterior.

DP : déficit potencial ($P-ETP$).

CC : capacidad de campo.

Por su parte, el almacenamiento en los meses húmedos se calculó mediante la Ecu. 13, la que consideró la recarga del suelo, el déficit potencial acumulado durante el período húmedo y la capacidad de campo, según la siguiente ecuación:

$$Alm_H = \frac{R}{1 - \frac{DP}{CC}} \quad Ecu. 13.$$

donde:

Alm_H : almacenaje al final del periodo húmedo.

R : recarga del suelo (suma de los $P-ETP$ positivos).

DP : déficit potencial acumulado durante el periodo seco (suma de los $P-ETP$ negativos).

CC : capacidad de campo.

La variación del agua almacenada en el suelo (ΔAlm) se calculó como la diferencia entre el almacenamiento del mes actual y el del mes anterior. Cuando los valores de ΔAlm fueron negativos, indicaron que el suelo cedía agua durante los meses en que las precipitaciones no eran suficientes para cubrir la demanda atmosférica ($P < ETP$). Por el contrario, valores positivos indicaban que el suelo se recargaba de agua hasta alcanzar su capacidad de campo, y el excedente se transformaba en exceso.

A continuación, se estimó la evapotranspiración real (ETR). En los meses húmedos, la ETR fue igual a la ETP, mientras que, en los meses secos, la ETR correspondió a la suma de la precipitación (P) y valor absoluto de la variación del almacenamiento de agua en el suelo (ΔAlm), según se muestra en la siguiente ecuación:

$$ETR = P + |\Delta Alm| \quad Ecu. 14.$$

Cuando ΔAlm alcanza la capacidad de campo (CC), cualquier exceso de P superior a la ETP se consideraba como exceso. Por su parte, la deficiencia de humedad (Def) se estimó siguiendo el método de Thornthwaite & Mather (1955), definido como la diferencia entre la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración real (ETR). En este modelo, la deficiencia representa la porción de demanda atmosférica de agua que no puede satisfacerse debido a la disponibilidad limitada de humedad en el suelo, lo cual es consistente con la interpretación hidrológica de que la deficiencia ocurre cuando no existe suficiente agua para sostener la ETR.

Finalmente, los datos del BHC se organizaron en una plantilla, en la que las filas correspondían a los parámetros del BHC y las columnas a los períodos de análisis, tanto mensual como anual.

4.3.2. Índices de Thornthwaite

Para estimar la variación estacional se utilizaron los índices de aridez y de humedad, así como el índice hídrico, el índice de eficiencia térmica (*IET*) y el índice de concentración de la eficiencia térmica (*Cet*). A continuación, se describe el procedimiento de cálculo para cada uno de estos índices.

El índice hídrico (IH) expresa el grado de humedad, calculado como el cociente entre la *ETP* anual y la diferencia entre los excesos y las deficiencias anuales, determinado mediante la siguiente ecuación:

$$IH = \frac{100 * E - 60 * D}{ETP} \quad \text{Ecu. 15.}$$

donde:

E: excesos anuales.

D: deficiencias anuales.

ETP: evapotranspiración potencial anual.

La variación estacional de la eficiencia hídrica se determinó utilizando el índice de aridez, en caso de que el tipo de clima fuera húmedo.

El índice de aridez y el índice de humedad se utilizaron como parámetros para evaluar la variación estacional de la eficiencia hídrica, de acuerdo con la clasificación climática. Las ecuaciones correspondientes a estos índices se presentan a continuación:

$$\text{índice de aridez} = \frac{\text{Deficiencias anuales} * 100}{\text{Necesidad de agua (ETP anual)}} \quad \text{Ecu. 16.}$$

$$\text{índice de humedad} = \frac{\text{Exceso anuales} * 100}{\text{Necesidad de agua (ETP anual)}} \quad \text{Ecu. 17.}$$

El índice de eficiencia térmica (IET) se calculó mediante la sumatoria de la ETP mensual a lo largo de los 12 meses del año, obteniendo así la ETP anual, que representa la cantidad total de energía térmica disponible para los procesos de evapotranspiración durante el ciclo anual.

Por último, el índice de concentración de eficiencia térmica (*Cet*) se definió como el cociente entre la *ETP* anual y la *ETP* de los meses secos. Para su cálculo se empleó la Ecu. 18, que considera la *ETP* anual y la correspondiente a los meses de verano.

$$Cet = \frac{ETP \text{ meses de verano}}{ETP \text{ anual}} * 100 \quad \text{Ecu. 18.}$$

4.4 Clasificación agroclimática de Thornthwaite

4.4.1 Clasificación climática

La clasificación agroclimática de Thornthwaite (1948) constituye un sistema integral que permite caracterizar las condiciones climáticas de un territorio a partir del balance hídrico. Este enfoque combina información sobre la disponibilidad de agua, la eficiencia calórica y la distribución estacional, con el fin de definir el tipo de clima. En este estudio, la metodología de Thornthwaite se aplicó para establecer la clasificación climática del área de análisis, utilizando los índices derivados del balance hídrico (índice hídrico, índice de aridez, índice de humedad, índice de eficiencia térmica e índice de concentración estival de la eficiencia térmica).

El valor del *IH*, se obtuvo a partir de la Ecu. 15, y permitió determinar el tipo de clima según los parámetros establecidos en la Tabla 1. Dicho índice expresa la relación entre los excesos y las deficiencias de agua en el balance hídrico anual. Las letras principales (A, B, C, D y E) indican el grado general de humedad del clima, mientras que los subíndices numéricos (por ejemplo, *B*₁, *B*₂, *B*₃, *B*₄ o *C*₁, *C*₂) representan variaciones dentro de la misma categoría, proporcionando una mayor precisión en la clasificación climática.

Tabla 1.*Claves para la clasificación climática según Thornthwaite*

Símbolo	Tipo de clima	Índice Hídrico
A	Perhúmedo	>100
B ₄	Húmedo	100 a 80
B ₃	Húmedo	80 a 60
B ₂	Húmedo	60 a 40
B ₁	Húmedo	40 a 20
C ₂	Subhúmedo-Húmedo	20 a 0
C ₁	Subhúmedo-Seco	0 a -20
D	Semiárido	-20 a -40
E	Árido	-40 a -60

Fuente: Murphy & Hurtado (2016).

La variación estacional de la eficiencia hídrica se calculó a partir de los índices de aridez y de humedad (Ecu. 16 y Ecu.17), lo que permitió caracterizar la cantidad y distribución de los períodos húmedos, de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2.*Clasificación climática de la variación estacional de la eficiencia hídrica en climas húmedos según Thornthwaite*

Letra	Climas Húmedos (A, B y C ₂)	Índice de aridez
r	Poca o ninguna deficiencia de agua	0 a 16,7
s	Moderada deficiencia de agua en verano	16,7 a 33,3
w	Moderada deficiencia de agua en invierno	16,7 a 33,3
s ₂	Deficiencia grande de agua en verano	Más de 33,3
w ₁	Deficiencia grande de agua en invierno	Más de 33,3
Letra	Climas Secos (C ₁ , D y E)	Índice de humedad
d	Poco o ningún excedente de agua	0 a 10
s	Moderada excedente de agua en invierno	10 a 20
w	Moderada excedente de agua en verano	10 a 20
s ₂	Excedente grande de agua en invierno	Más de 20
w ₁	Excedente grande de agua en verano	Más de 20

Fuente: Murphy & Hurtado (2016).

El régimen térmico se determinó a partir del índice de eficiencia térmica (*ETP* anual), el cual estima la disponibilidad calórica del clima, entendida como la cantidad de energía térmica o calor disponible en la atmósfera para sostener los procesos de evaporación, transpiración y crecimiento

vegetal (Murphy & Hurtado, 2016). Este índice se categorizó según el tipo climático, como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3.

Clave del clima según Thornthwaite con base al índice de eficiencia térmica.

Índice (mm)	Símbolo	Tipo climático
>1,140	A'	Megatermal o cálida
>1,140 a 997	B'4	Mesotérmica semicálida
997 a 855	B'3	Mesotérmica templada cálida
855 a 712	B'2	Mesotérmica templada fría
712 a 570	B'1	Mesotérmica semifrías
570 a 427	C'2	Mesotérmica fría moderada
427 a 285	C'1	Mesotérmica fría acentuada
285 a 142	D'	Tundra
<142	E'	Helado o Glacial

Fuente: Murphy & Hurtado (2016).

Finalmente, la concentración estival de la eficiencia térmica se determinó mediante el índice de concentración de eficiencia térmica (Ecu 18). Este índice proporciona información sobre el comportamiento del régimen térmico durante la época de verano. En la Tabla 4 se presenta la clasificación del tipo de clima según la magnitud del índice de concentración de eficiencia térmica.

Tabla 4.

Índice de concentración de eficiencia térmica

Porcentaje de concentración estival	Tipo
<48.0	a'
48,0 a 51,9	b'4
51,9 a 56,3	b'3
56,3 a 61,6	b'2
61,6 a 68	b'1
68 a 76,3	c'2
76,3 a 88	c'1
>88	d'

Fuente: Murphy & Hurtado (2016).

Una vez determinados los valores de cada índice, se integraron en una forma climática compuesta por cuatro componentes, siguiendo la metodología de Thornthwaite (1948). Esta codificación sintetiza las condiciones hídricas y térmicas del territorio mediante la combinación de los siguientes elementos:

1. Primer componente (régimen de humedad): derivado del Índice Hídrico (*IH*), representa el tipo de clima general (**Tabla 1**).
2. Segundo componente (régimen térmico): corresponde al índice de eficiencia térmica (ETP anual), que expresa la disponibilidad de calor (**Tabla 3**).
3. Tercer componente (variación estacional de la eficiencia hídrica): indica la distribución estacional del agua, calculada mediante los índices de aridez y humedad (**Tabla 2**).
4. Cuarto componente (concentración estival de la eficiencia térmica): refleja el grado de concentración del calor en los meses secos o cálidos, calculado mediante el índice de concentración de eficiencia térmica (*Cet*) (**Tabla 4**).

El resultado final se expresa mediante un código climático de cuatro dígitos, que permite describir integralmente el comportamiento hídrico y térmico del territorio. Por ejemplo, el código $C_2A's_2b'_3$ se interpreta como:

- C_2 : clima subhúmedo-húmedo,
- A' : régimen térmico megatérmico,
- s_2 : gran deficiencia de agua en verano,
- b'_3 : alta concentración estival de la eficiencia térmica.

Esta clasificación sintetiza de forma cuantitativa y cualitativa la interacción entre la temperatura, la disponibilidad de agua y su distribución estacional, facilitando la caracterización agroclimática del territorio.

4.5 Calendario técnico de siembra basado en el análisis agroclimático

Con base en la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) y el balance hídrico climático descritos en la sección 4.3.1, se integraron diversos indicadores agroclimáticos y espectrales (índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI) con el propósito de delimitar los periodos de aptitud para la siembra. Esta delimitación se obtuvo mediante la combinación de la información proveniente

del balance hídrico, la ETP y los índices agroclimáticos y espectrales, lo que permitió identificar las fases más favorables para el desarrollo de los cultivos. Por otra parte, la información hidrotérmica derivada del análisis mensual se complementó con cálculos en intervalos de 16 días, con el fin de construir un calendario técnico que refleje de forma precisa las condiciones agroclimáticas de la zona de estudio.

Con el fin de validar la aplicabilidad del calendario técnico a escala local, se seleccionó la Finca Berraca, ubicada en el cantón de Santa Cruz. Esta finca representa un sistema agrícola típico de la región en términos de manejo, uso del suelo y exposición a la variabilidad climática, por lo que se empleó como estudio de caso para evaluar la utilidad práctica del calendario y su pertinencia en contextos productivos reales.

El periodo de análisis comprendió los años 2016 a 2024, garantizando coherencia temporal con una resolución de 16 días. Para ello, se recopiló series históricas de precipitación acumulada (PP), temperatura media (Temp_med), humedad relativa (HR) y velocidad del viento, las cuales fueron procesadas mediante sumatoria en el caso de la PP y promediado para Temp_med, HR y viento, obtenidas del producto ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR mediante procesamiento previo en Google Earth Engine (GEE). El control de calidad de las series incluyó la detección de valores atípicos bajo el criterio del rango intercuartílico (IQR), el cual consiste en identificar observaciones que se encuentran fuera del rango definido por el primer y el tercer cuartil (Q1–Q3), considerando como valores atípicos aquellos menores a $Q1 - 1.5 \times IQR$ o mayores a $Q3 + 1.5 \times IQR$ (Páez & Boisjoly, 2022).

Durante el periodo de análisis no se identificaron datos ausentes en las series de precipitación, temperatura media, humedad relativa y velocidad del viento, por lo que no fue necesario aplicar procedimientos de interpolación temporal. La continuidad completa de los registros permitió realizar el análisis sin ajustes adicionales y garantizó la consistencia temporal de las variables climáticas evaluadas. Si bien la interpolación temporal es un procedimiento común para corregir valores faltantes en series climáticas (Hijmans et al., 2005; Chen et al., 2024), en este estudio no fue requerida debido a la ausencia de datos incompletos.

La caracterización de la dinámica hídrica y térmica se calculó con diferentes indicadores. El balance hídrico (BH) se definió como la diferencia entre la precipitación y la ETP (Ecu. 19),

permitiendo identificar periodos de déficit ($BH < 0$) y superávit ($BH > 0$) hídrico en el suelo (Thornthwaite, 1948):

$$BH = PP - ETP \quad \text{Ecu. 19.}$$

De manera complementaria, se estimó el índice de disponibilidad hídrica (IDH) (Ecu. 20) (Thornthwaite, 1948), que expresa la suficiencia relativa de agua, si los valores $IDH < 1$, esto refleja un déficit y valores $IDH > 1$ un superávit:

$$IDH = \frac{PP}{ETP} \quad \text{Ecu. 20.}$$

En adición, se calculó los grados día de desarrollo (GDD), siguiendo lo propuesto por McMaster & Wilhelm (1997). Dichos autores consideran la temperatura máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) y una temperatura base de referencia (T_{base}) de 10 °C (Akyuz et al., 2017; Angel et al., 2016; Craufurd & Qi, 2001), para caracterizar la acumulación térmica (cantidad total de energía térmica disponible a lo largo del tiempo para el desarrollo de las plantas) para los cultivos (Ecu. 21):

$$GDD = \sum \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \right) \quad \text{Ecu. 21.}$$

Donde $T_{base} = 10$ °C el cual es un valor de referencia para cultivos de ciclo corto como maíz y sorgo, de acuerdo con la literatura técnica (Akyuz et al., 2017; Angel et al., 2016; Craufurd & Qi, 2001). Este índice permite estimar el progreso fenológico de un cultivo hasta la madurez fisiológica. El IDH se calculó a partir de la diferencia entre PP y ETP identificando periodos con humedad suficiente la emergencia y el establecimiento del cultivo.

Finalmente, se incorporó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), derivado de las colecciones Landsat 8/9 (OLI/OLI-2) Collection 2 Nivel 2 (30 m) en la plataforma Google Earth Engine (GEE), para el periodo 2016–2024. El NDVI se calculó a partir de la reflectancia de las bandas del rojo (Red) y del infrarrojo cercano (NIR), mediante la siguiente expresión (Zhang et al., 2024), (Ecu. 22).

Finalmente, se incorporó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), derivado de las colecciones Landsat 8/9 (OLI/OLI-2) Collection 2 Nivel 2 (30 m) en la plataforma Google Earth Engine (GEE) para el periodo 2016–2024. El NDVI se calculó a partir de la reflectancia de las bandas

del rojo (Red) y del infrarrojo cercano (NIR), mediante la expresión estándar (Ecu. 22; Zhang et al., 2024).

Dado que Landsat proporciona una imagen cada 16 días y que durante la estación lluviosa la presencia de nubosidad reduce la disponibilidad de observaciones válidas, se aplicó un procedimiento de enmascaramiento de nubes utilizando la banda QA_PIXEL. En los casos en que, posterior al enmascaramiento, no existían observaciones válidas para un periodo determinado, los valores faltantes de NDVI fueron interpolados temporalmente utilizando los valores disponibles más cercanos en fechas adyacentes, garantizando continuidad de la serie.

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad Ecu. 22.$$

5. RESULTADOS

5.1 Caracterización climática

5.1.1 Descriptivas de la base de datos

Se utilizaron 453.606 registros climáticos diarios comprendidos entre el periodo de 1970 a 2024 para el territorio Santa Cruz-Nicoya. Dichos registros provienen de la malla de 23 punteros con 19.722 observaciones por cada uno. Los datos fueron obtenidos del ERA-5 a través de la plataforma GEE y procesados con herramientas de análisis espacio-temporal.

Cada observación corresponde a un registro diario por variable (Tabla 5) para un total de 7.257.696 datos individuales procesados. Esta base de datos permitió caracterizar la variabilidad temporal del clima en el territorio mediante el examen de patrones estacionales, tendencias de largo plazo y relaciones entre variables.

Tabla 5.

Resumen de las variables climáticas analizadas en la serie de tiempo de 1970-2024 del territorio Santa Cruz-Nicoya

Variable	Unidad	Tipo de dato	Fuente
Temp_min ¹	°C	Numérica	ERA5 - GEE
Temp_max ²	°C	Numérica	ERA5 - GEE
Temp_med ³	°C	Numérica	ERA5 - GEE
PP ⁴	mm	Numérica	ERA5 - GEE
HR ⁵	%	Numérica	ERA5 - GEE
Sunshine_hours ⁶	horas	Numérica	ERA5 - GEE
V_N_S ⁷	m/s	Numérica	ERA5 - GEE
V_O_E ⁸	m/s	Numérica	ERA5 - GEE
Velocidad ⁹	m/s	Numérica	V_N_S y V_O_E
Día ¹⁰	DD	Entero	Procesado
Mes ¹¹	MM	Entero	Procesado
Año ¹²	YYYY	Entero	Procesado
Fecha ¹³	YYYY-MM-DD	Fecha	Procesado
Lat ¹⁴	Grados decimales	Numérica	Coordenadas
Long ¹⁵	Grados decimales	Numérica	Coordenadas
file_name ¹⁶	Cód alfanumérico	Texto	Asignado

¹ Temp_min: temperatura mínima diaria. ² Temp_max: temperatura máxima diaria. ³ Temp_med: temperatura media diaria. ⁴PP : precipitación diaria acumulada. ⁵ HR: humedad relativa promedio diaria. ⁶Sunshine_hours: horas de sol diarias. ⁷ V_N_S: velocidad del viento norte-sur. ⁸V_O_E: velocidad del viento oeste-este. ⁹Velocidad: velocidad total (calculada). ¹⁰ Día:día del mes. ¹¹Mes: mes del año. ¹²Año: año calendario. ¹³Fecha: fecha completa. ¹⁴Lat: latitud del punto. ¹⁴Long: longitud del punto. ¹⁵file_name: identificador punto de muestreo

5.1.2 Validación de datos satelitales con datos terrenos

El proceso de validación entre los productos satelitales y los registros de la estación meteorológica CATSA (2015–2022) evidenció un desempeño satisfactorio de las estimaciones satelitales para la mayoría de las variables analizadas (Tabla A3.1). En términos generales, las temperaturas media y máxima mostraron los niveles más altos de ajuste, con coeficientes de determinación de $R^2 = 0,7888$ y $0,7496$, respectivamente, así como correlaciones de Pearson superiores a 0,8, lo que confirma una alta coherencia temporal entre las observaciones in situ y los datos del ERA5. Estas variables también presentaron bajos valores de error (RMSE y MAE inferiores a 3 °C) y sesgos mínimos, lo que refuerza su confiabilidad para el análisis agroclimático.

En el caso de la humedad relativa (HR), se obtuvo una correlación igualmente sólida ($r = 0,81$; $R^2 = 0,7309$), con una eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,64, lo que indica una adecuada capacidad del producto satelital para reproducir la variabilidad observada, aunque con ligera subestimación (Bias = - 1,73).

La precipitación acumulada mensual (PP) mostró una correlación aceptable ($r = 0,78$; $R^2 = 0,62$), acompañada de un RMSE de 124,49 mm, lo cual es esperable dada la naturaleza intermitente y espacialmente heterogénea de la lluvia en regiones tropicales. A pesar de estas limitaciones, los valores de NSE (0,48) y Bias cercano a cero (1,29) sugieren un comportamiento representativo del régimen pluviométrico local.

Por otro lado, la velocidad del viento presentó el ajuste más moderado ($R^2 = 0,4241$; $r = 0,67$), con errores más dispersos (RMSE = 3,14 m/s). Este comportamiento puede atribuirse a la alta variabilidad espacial del viento y a la resolución limitada de los productos satelitales, por lo que se recomienda aplicar calibraciones locales o modelos de corrección dinámica en futuros estudios.

De forma complementaria, el análisis de medias (Anexo 4) evidenció que las estimaciones satelitales tienden a subestimar ligeramente la temperatura máxima y la velocidad del viento, mientras que sobreestiman la temperatura mínima y la precipitación, manteniendo sin embargo una consistencia general con los valores observados.

En conjunto, los resultados confirman la validez y coherencia de los productos satelitales utilizados, especialmente para las variables térmicas y de humedad, lo que respalda su integración en el análisis agroclimático y en la construcción del calendario técnico de siembra. Los valores detallados de las métricas y su análisis estadístico completo pueden consultarse en los Anexos 3 y 4, que incluyen la descripción de las metodologías aplicadas y las series de comparación.

5.1.3 Estadística descriptiva

Como parte del proceso de caracterización climática del territorio Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024, se realizó un análisis estadístico descriptivo de seis variables fundamentales: precipitación acumulada anual (*PP*), temperatura mínima (*Temp_mín*), temperatura máxima (*Temp_máx*), temperatura media (*Temp_med*), humedad relativa (*HR*) y velocidad del viento (*Velocidad*). Los resultados, presentados en la Tabla 6, incluyen medidas de tendencia central (media y mediana), de dispersión (desviación estándar) y de rango (valores mínimos y máximos). Además, se analizó la asimetría de cada variable como indicador de la forma de la distribución de los datos, un aspecto esencial para interpretar la influencia de eventos extremos y la estacionalidad climática.

La precipitación acumulada anual registró una media de 2.178 mm y una mediana de 2.064 mm, con una desviación estándar de 401 mm y un rango que oscila entre 1.450 mm y 3.317 mm. El hecho de que la media sea superior a la mediana revela una asimetría positiva, lo que indica que la distribución se inclina hacia la izquierda, donde predominan valores moderados y se presentan algunos eventos extremos de lluvia muy altos que elevan el promedio general. Esta característica es típica de climas estacionalmente secos, en los cuales las lluvias se concentran en cortos períodos del año, coincidiendo con la naturaleza del régimen hídrico del Corredor Seco Centroamericano.

En cuanto a las temperaturas, se observa una asimetría muy baja o nula, lo que sugiere una distribución aproximadamente simétrica. La temperatura mínima registró una media de 23,36 °C, una mediana de 23,33 °C y una desviación estándar de apenas 0,88 °C, reflejando una alta estabilidad térmica, con valores comprendidos entre 19,98 °C y 27,75 °C. La temperatura máxima, presentó una media de 30,14 °C, una mediana de 29,68 °C y una desviación estándar de 2,28 °C, mostrando una ligera asimetría positiva, lo que sugiere la ocurrencia ocasional de temperaturas elevadas que desplazan la media hacia la derecha. Este comportamiento es consistente con la presencia de olas de calor durante los meses secos. Por su parte, la temperatura media mostró 26,13 °C de medida de

medida de tendencia central, con un desvío estándar de 1,28 °C y 25,9 °C de mediana mostrando un patrón simétrico y homogéneo, característico de los climas tropicales con baja amplitud térmica anual.

La humedad relativa (*HR*) mostró una media de 77,42 %, con mediana de 81,58 %, una desviación estándar de 11,88 % y valores extremos entre 41,83 % y 96,15 %. En este caso, la mediana fue superior a la media lo que indica una asimetría negativa, es decir, una distribución inclinada hacia valores más altos, con una mayor frecuencia de registros húmedos y la presencia ocasional de valores muy bajos durante los meses secos. Esta condición es relevante desde el punto de vista agroclimático, ya que los bajos niveles de humedad en la estación seca intensifican el estrés hídrico en los cultivos, mientras que los valores elevados durante la estación lluviosa pueden favorecer la aparición y propagación de enfermedades fúngicas y bacterianas. (Pereira et al., 2014; Murphy & Hurtado., 2016)

En cuanto a la velocidad del viento, se registró una media de 1,96 m/s, desviación estándar de 1,40 m/s, una mediana de 1,49 m/s con un rango entre 0,12 m/s y 8,66 m/s. La diferencia significativa entre la media y la mediana evidencia una asimetría positiva, es decir, una distribución con predominio de valores bajos y la presencia ocasional de vientos intensos que elevan el promedio. Esta característica tiene implicaciones directas en procesos como la evapotranspiración, la dispersión de plagas y la eficacia de las aplicaciones foliares (Desmarteau et al., 2019).

En conjunto, el análisis de las distribuciones muestra que el territorio presenta una notable estabilidad térmica y una alta variabilidad en las variables relacionadas con el agua y el viento. Las distribuciones asimétricas observadas, especialmente en la precipitación, la humedad relativa y la velocidad del viento, son coherentes con un clima tropical estacional (*Aw*) según el sistema de Köppen–Geiger, fuertemente influenciado por factores como la topografía local y la variabilidad interanual asociada a fenómenos como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO). (Magaña et al., 1999; Moron et al., 2015; Poveda & Mesa., 1997). Estos resultados constituyen una base técnica valiosa para el diseño de estrategias de adaptación agrícola, la selección de cultivos y la planificación del uso eficiente del recurso hídrico en el territorio de Santa Cruz–Nicoya.

Tabla 6.

Estadísticas descriptivas de variables climáticas para precipitación acumulada anual (Precipitación), temperatura mínima (Temp_mínima), temperatura máxima (Temp_máxima), temperatura media (Temp_media), humedad relativa y velocidad del viento de 1970 - 2024.

Variable	Media	Desviación Estándar	Mediana	Mínima	Máxima
Precipitación	2178	401	2064	1450	3317
Temp_mínima	23,357	0,875	23,330	19,979	27,751
Temp_máxima	30,139	2,284	29,677	22,952	36,446
Temp_media	26,127	1,280	25,933	21,841	30,510
Humedad Relativa	77,421	11,883	81,575	41,839	96,145
Velocidad del Viento	1,963	1,398	1,492	0,123	8,661

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Detección de Tendencias y Estacionalidad

5.1.4.1 Test de Mann-Kendall y regresión de Theil-Sen

Con el objetivo de analizar las tendencias a largo plazo de las principales variables climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya, se aplicó el test de Mann-Kendall (Gadedjisso et al., 2021) a las series anuales de datos del período 1970–2024. Este test no paramétrico, ampliamente utilizado en estudios climáticos y ambientales, permite identificar la presencia de tendencias monótonas (crecientes o decrecientes) sin que los datos deban ajustarse a una distribución normal. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

En cuanto a la precipitación acumulada anual, se identificó una tendencia negativa estadísticamente significativa ($\tau = -0,0166$; $p = 0,0004$), lo que indica una disminución sostenida en los volúmenes de lluvia a lo largo del período de estudio. Si bien la pendiente estimada es de magnitud reducida, el patrón sugiere una reducción progresiva en los acumulados anuales, cuya interpretación debe considerar la elevada variabilidad interanual característica de la región.

Las tres variables de temperatura (mínima, máxima y media) muestran tendencias positivas altamente significativas, con valores de τ de 0,2250, 0,0724 y 0,1380, respectivamente (todos con $p < 0,001$). La temperatura mínima presenta la tendencia más marcada, lo que sugiere un aumento sostenido de las temperaturas nocturnas. Este comportamiento podría estar asociado a un incremento de la nubosidad, a cambios en el uso del suelo o a efectos regionales de calentamiento. En conjunto, estos resultados evidencian un proceso de calentamiento regional, coherente con la señal del cambio climático global (Alfaro-Córdoba et al., 2024; Hidalgo et al., 2013; Schaub & Gil-Alana, 2024).

En relación con la humedad relativa, se identificó una tendencia decreciente ($\tau = -0,0188$; $p = 0,0000629$), lo que indica que el ambiente se ha vuelto progresivamente más seco en las últimas décadas. Esta situación probablemente resulta de la combinación del aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación, y puede tener efectos adversos sobre el desarrollo de los cultivos, la salud animal y el equilibrio de los sistemas productivos (Kim & Johnson, 2025; Pierce et al., 2013; Simpson et al., 2023).

Por último, la velocidad del viento presentó una tendencia creciente significativa ($\tau = 0,0210$; $p = 0,00000822$), lo que indica un aumento gradual en su intensidad. Aunque esta tendencia es menos marcada que las observadas en las temperaturas, sus efectos pueden ser relevantes en procesos como la evapotranspiración, la polinización, la erosión del suelo y la dispersión de plagas y enfermedades (Fan et al., 2020; Lima et al., 2024)

En síntesis, los resultados del test de Mann-Kendall confirman la presencia de cambios significativos en el régimen climático del territorio Santa Cruz–Nicoya durante las últimas cinco décadas. Se observa una combinación de disminución en la precipitación y la humedad relativa, junto con un aumento en las temperaturas y la velocidad del viento, configurando un escenario de mayor estrés ambiental para los sistemas productivos locales.

Tabla 7.
Prueba de Mann-Kendall para tendencias en series temporales del territorio Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).

VARIABLES	τ	p -value
Precipitación	- 0,0166	4,02e ⁻⁰⁴
Temp_mínima ¹	0,2250	2,22e ⁻¹⁶
Temp_máxima ²	0,0724	2,22e ⁻¹⁶
Temp_media ³	0,1380	2,22e ⁻¹⁶
Humedad Relativa	- 0,0188	6,29e ⁻⁰⁵
Velocidad del Viento	0,0210	8,22e ⁻⁰⁶

Nota: ¹ Temp_mínima: temperatura mínima. ² Temp_máxima: temperatura máxima. ³ Temp_media: temperatura media.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de tendencias mediante la regresión de Theil-Sen (Tabla 8) revela cambios significativos en las variables climáticas. Se observa un aumento sostenido en las temperaturas, con tasas de incremento de + 0,018 °C/año para la temperatura mínima, + 0,015 °C/año para la temperatura máxima y + 0,016 °C/año para la temperatura media, lo que evidencia un proceso de calentamiento en el territorio. La precipitación, por su parte, muestra una tendencia ligeramente decreciente, con una reducción de – 0,001 mm/año, aunque la alta variabilidad interanual sugiere que estos cambios pueden estar influenciados por eventos extremos.

La humedad relativa presenta una disminución de – 0,016 %/año, lo que sugiere una tendencia hacia condiciones más secas, probablemente asociada al incremento de la temperatura. Por otra parte, la velocidad del viento muestra una ligera tendencia creciente, de + 0,002 m/s/año, posiblemente relacionada con modificaciones en los patrones atmosféricos y las condiciones climáticas del territorio.

Tabla 8.

Estimación de tendencias mediante regresión de Theil–Sen para variables climáticas del territorio

Variable	Pendiente	Dirección
Precipitación	- 0,001 mm/año	Decreciente
Temp_mínima ¹	+ 0,018 °C/año	Creciente
Temp_máxima ²	+ 0,015 °C/año	Creciente
Temp_media ³	+ 0,016 °C/año	Creciente
Humedad Relativa	- 0,016 %/año	Decreciente
Velocidad del Viento	+ 0,002 m/s/año	Creciente

Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)

Nota:Temp_mínima: temperatura mínima. ² Temp_máxima: temperatura máxima. ³ Temp_media: temperatura media.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2 Autocorrelaciones (ACF) y autocorrelaciones parciales (PACF)

La Figura 2 presenta las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) de las series anuales de precipitación acumulada (*PP*), humedad relativa (*HR*) y velocidad del viento para el territorio de Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024. Estas funciones permiten analizar la dependencia temporal dentro de cada serie de tiempo, identificar la presencia de estacionariedad y orientar la selección de modelos adecuados para proyección y análisis, como los modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA).

En el caso de la precipitación, la ACF muestra un descenso pronunciado después del primer rezago, lo que indica una baja persistencia temporal, mientras que la PACF presenta un pico notable en el primer rezago, seguido de una rápida caída. En este contexto, el término *rezago* (o *lag*) se refiere al desfase temporal entre los valores actuales de una variable y sus propios valores en períodos anteriores, permitiendo evaluar el grado de dependencia o memoria de la serie a lo largo del tiempo (Wilson, 2016). Este patrón sugiere una estructura autorregresiva de primer orden (AR(1)) con un componente estocástico moderado, consistente con la alta variabilidad de las precipitaciones en regiones con marcada estacionalidad climática, como el Corredor Seco Centroamericano. En términos de modelado, esto indica que la serie podría alcanzar la estacionariedad con una primera diferenciación y que un modelo ARIMA(1,1,0) sería adecuado para describir su comportamiento.

La humedad relativa, en contraste, presenta una ACF que disminuye lentamente a lo largo de varios rezagos, lo que indica una alta persistencia temporal. La PACF, por su parte, muestra un valor elevado en el primer rezago y una disminución posterior, lo que sugiere un comportamiento autorregresivo de primer orden. Este patrón indica que la humedad relativa depende fuertemente de los valores del año anterior, una característica común en regiones donde la humedad ambiental está influenciada por condiciones macroclimáticas relativamente estables y procesos acumulativos. Esta propiedad permite el desarrollo de modelos predictivos capaces de capturar dicha “memoria” climática (Di Cecco & Gouhier, 2018; Li & Sun, 2020; Tuel & Martius, 2023).

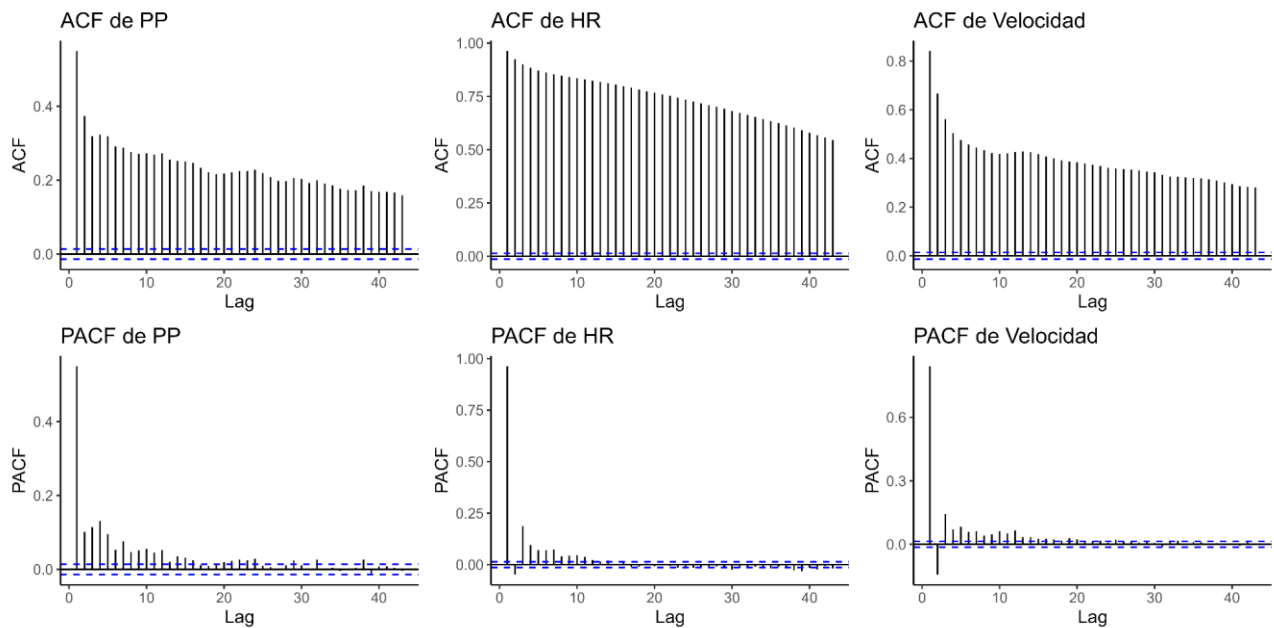
En cuanto a la velocidad del viento, se observa un patrón similar, aunque con menor persistencia que la humedad relativa. La ACF muestra una caída más moderada, mientras que la PACF mantiene un pico en el primer rezago y un descenso sostenido. Este comportamiento indica una estructura autorregresiva simple, pero con cierta dispersión, posiblemente afectada por la variabilidad

anual asociada a eventos regionales como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) o los vientos alisios. Aunque con menor fuerza que en las temperaturas o la humedad, la velocidad del viento también podría modelarse mediante un esquema ARIMA, evaluando la necesidad de diferenciación para alcanzar la estacionariedad.

La interpretación conjunta de las funciones ACF y PACF revela que ninguna de las tres series presenta independencia entre las observaciones anuales; por el contrario, existe una estructura temporal significativa que permite prever el comportamiento futuro de las variables a partir de sus valores pasados. Desde el punto de vista aplicado, esto habilita el uso de modelos de series temporales para generar predicciones útiles en la planificación agroclimática, la programación de actividades agrícolas sensibles a la variabilidad meteorológica y la estimación de escenarios de cambio climático local. Además, estos resultados refuerzan la validez de los hallazgos obtenidos en el análisis de tendencias mediante el test de Mann-Kendall, confirmando que las variaciones observadas en las variables no son producto del azar, sino de procesos sistemáticos y estructurados en el tiempo.

Figura 2.

Funciones de Autocorrelaciones (ACF) y Autocorrelaciones Parciales (PACF) de las series de tiempo de precipitación (PP mm), humedad relativa (HR %) y velocidad del viento (Velocidad m/s) del territorio Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).



Fuente: Elaboración propia.

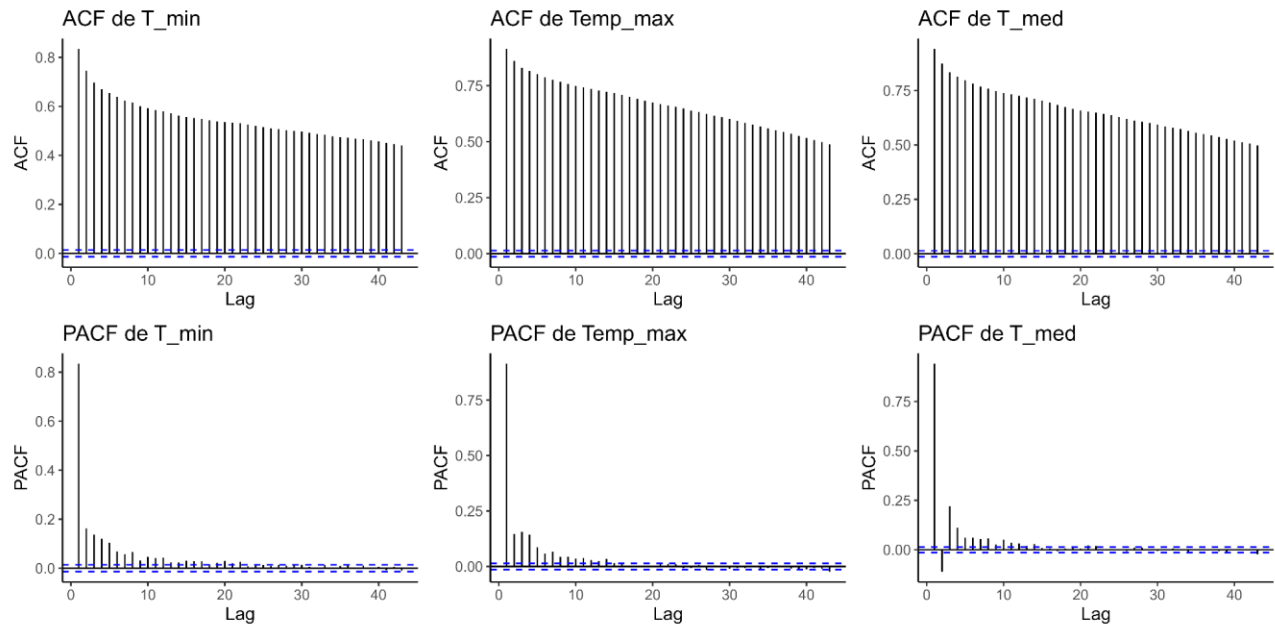
La Figura 3 presenta las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para las series de temperatura mínima, máxima y media, que permiten examinar la estructura interna de dependencia temporal de los datos. En las tres series se observa que la ACF decrece lentamente a medida que aumentan los rezagos, lo que sugiere una alta persistencia temporal y, por ende, una estructura no estacionaria, en la que los valores actuales están fuertemente correlacionados con los de años anteriores. Esta dependencia prolongada es característica de variables climáticas influenciadas por procesos acumulativos o por la inercia térmica, comunes en las zonas tropicales.

Por otro lado, las PACF correspondientes muestran un pico pronunciado en el primer rezago (Lag 1), seguido de una rápida disminución hacia valores cercanos a cero en los rezagos posteriores. Este patrón es característico de un modelo autorregresivo de primer orden (AR(1)), lo que indica que el valor de la temperatura en un año está influenciado principalmente por el del año anterior. Esta estructura autorregresiva sugiere que las series pueden modelarse de manera eficiente utilizando un enfoque ARIMA con un componente autorregresivo, especialmente si se aplica una primera diferenciación para inducir la estacionariedad.

La presencia de autocorrelación significativa en estas series tiene importantes implicaciones prácticas, ya que permite desarrollar modelos de predicción climática útiles para la planificación agrícola, la gestión del riesgo climático y la evaluación de escenarios futuros en condiciones de cambio climático. Además, estos resultados refuerzan la validez de las tendencias detectadas mediante el análisis de Mann-Kendall, al demostrar que el comportamiento de las series térmicas no es aleatorio, sino que está determinado por una dinámica interna persistente a lo largo del tiempo.

Figura 3.

Funciones de Autocorrelaciones (ACF) y Autocorrelaciones Parciales (PACF) de las series de tiempo de temperaturas mínima (T_{min}), máxima ($Temp_{max}$), media (T_{med}), °C del territorio Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).



Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.3 Análisis de Wavelet

La Tabla 9 presenta los resultados del análisis de *Wavelet* aplicado a las series de tiempo de precipitación, temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa y velocidad del viento en el territorio de Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024. En todas las variables se identificó un período dominante cercano a los 362 días, lo que confirma una marcada estacionalidad anual, coherente con el patrón climático del Pacífico costarricense, caracterizado por la alternancia entre las época seca y lluviosa (Hidalgo et al., 2013; Magaña et al. 1999). No obstante, la intensidad de esta estacionalidad varía entre variables, como lo refleja la potencia máxima estimada para cada una.

La humedad relativa (HR) presentó la mayor potencia (1,255), lo que indica una señal estacional fuerte y estable a lo largo del tiempo. Le siguieron la temperatura máxima ($Temp_{max}$),

con 1,007, y la temperatura media (*Temp_med*), con 0,870, ambas con una clara estructura cíclica anual. En contraste, la temperatura mínima (*Temp_min*) y la velocidad del viento mostraron potencias moderadas (0,446 y 0,607, respectivamente), lo que sugiere una estacionalidad presente pero menos pronunciada. Por su parte, la precipitación acumulada anual (*PP*) registró la menor potencia (0,368), reflejando su alta variabilidad interanual y una señal estacional más débil, posiblemente influenciada por fenómenos como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO).

Estos resultados son consistentes con investigaciones previas. Por ejemplo, un estudio sobre análisis de *Wavelet* de variables climáticas en Costa Rica evidenció una fuerte señal estacional en la temperatura y la humedad relativa, asociada a procesos de transmisión del dengue, lo que confirma su estabilidad en escalas anuales (Barrantes et al., 2021). De igual manera, investigaciones en el Caribe han demostrado que la precipitación presenta múltiples frecuencias dominantes, especialmente alrededor de 60 y 120 días, asociadas a variaciones intraestacionales propias de la estación lluviosa, entre ellas la canícula o sequía de medio verano. Estos eventos descritos por Magaña et al. (1999) como un descenso transitorio de la precipitación a mitad de la temporada lluviosa contribuyen a debilitar la señal anual de este parámetro y explican parte de la variabilidad observada en el régimen de lluvias. Además, estudios en regiones tropicales han documentado estacionalidades significativas en la temperatura y el viento, influenciadas por patrones de circulación atmosférica, radiación solar y cobertura nubosa, lo que refuerza la validez de los resultados obtenidos en el presente análisis (Pérez et al., 2010).

En conjunto, el análisis confirma la estacionalidad anual de las variables climáticas en el territorio de Santa Cruz–Nicoya, con intensidades variables que reflejan tanto la naturaleza propia de cada variable como su sensibilidad a fuerzas climáticas externas.

Tabla 9.

Variable	Periodo Dominante	Potencia Máxima
Precipitación	362,0387	0,3677
Temp_mínima ¹	362,0387	0,4458

Temp_máxima ²	362,0387	1,0071
Temp_media ³	362,0387	0,8701
Humedad Relativa	362,0387	1,2553
Velocidad del Viento	362,0387	0,6074

Períodos dominantes y potencia máxima obtenidos mediante análisis Wavelet en series climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)

Nota: ¹ Temp_mínima: temperatura mínima. ² Temp_máxima: temperatura máxima. ³ Temp_media: temperatura media.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra el espectro de potencia de Wavelet, una representación visual de cómo varían los ciclos en una serie temporal. En el eje horizontal se encuentra el índice temporal, que representa la secuencia cronológica de los datos desde 1970 hasta 2024; aquí, el punto 0 corresponde al inicio del período (1970) y el punto final, o aproximadamente 20.000, al año 2024. El eje vertical, marcado como *period*, indica los diferentes periodos de oscilación en días: por ejemplo, un valor de 365 representa un ciclo anual; valores más altos, como 1.024 o 2.048, corresponden a ciclos largos de 3, 5 o más años; mientras que valores más bajos, como 2, 4 u 8, reflejan variaciones de corto plazo.

Los colores representan la intensidad de la potencia en cada ciclo: los tonos cálidos (rojo, naranja o amarillo) indican alta potencia, es decir, ciclos dominantes o persistentes; los tonos fríos (azul y verde) reflejan baja potencia o ausencia de una señal cíclica marcada. Los bordes blancos corresponden al *cono de influencia*, zonas donde la precisión disminuye debido a la cercanía con los extremos de la serie temporal.

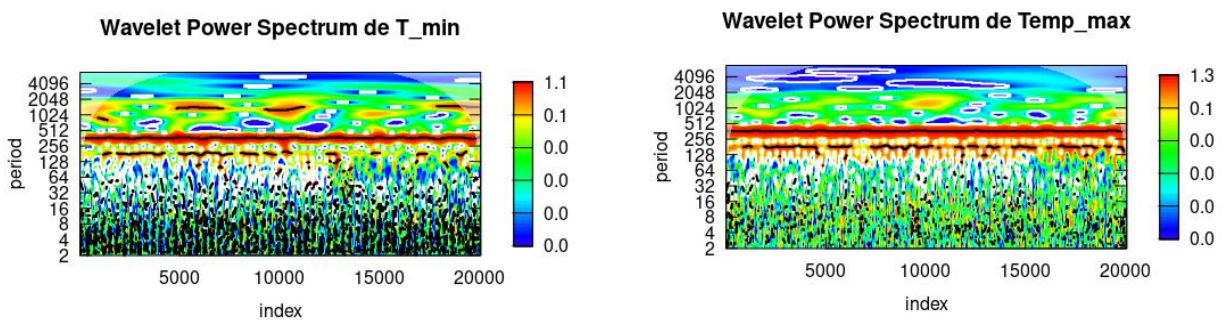
En el Wavelet Power Spectrum de la temperatura mínima (T_min) se observa una franja rojiza continua entre los 256 y 512 días, lo que indica un ciclo anual bien definido, aunque con ligeras fluctuaciones en su intensidad a lo largo del tiempo. En el caso de la temperatura máxima (Temp_max), el patrón es aún más consistente y de mayor potencia, evidenciando una estacionalidad muy marcada y estable durante todo el período de análisis. La temperatura media (T_med) muestra una dinámica intermedia entre ambas, manteniendo la señal anual con alta coherencia, aunque con leves variaciones de amplitud hacia los extremos del registro.

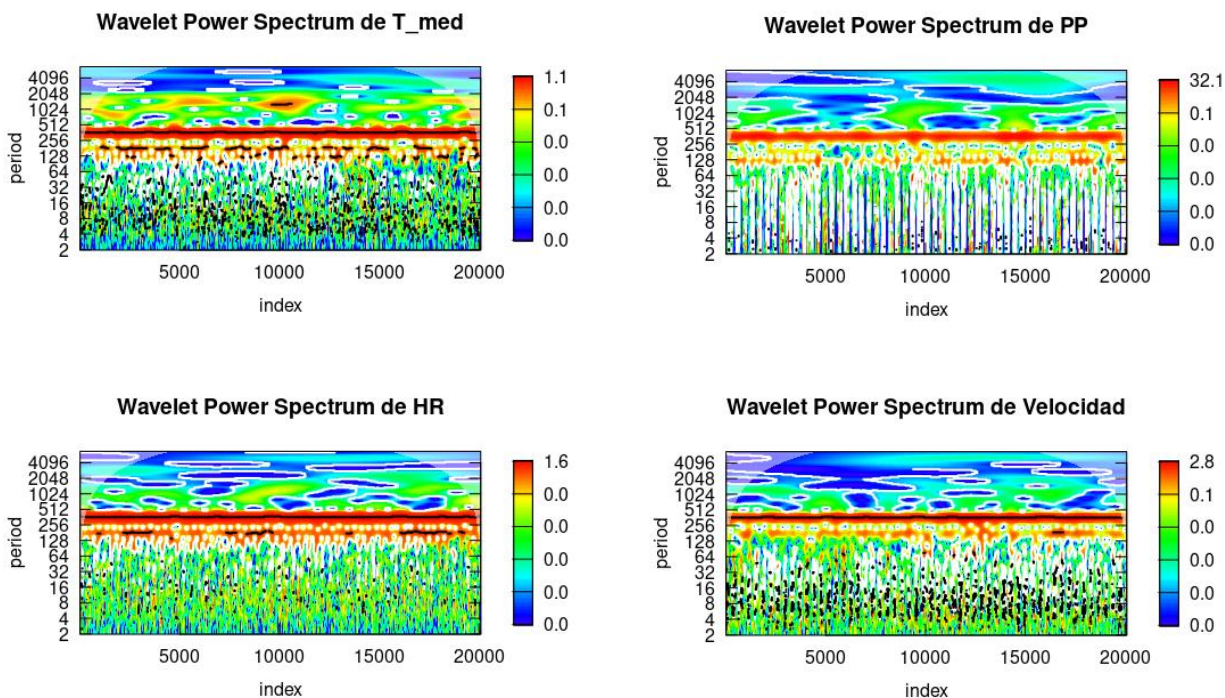
El espectro correspondiente a la precipitación (PP) presenta una estructura más irregular, con áreas de potencia concentradas de manera discontinua en periodos de entre 256 y 1024 días. Esto sugiere la influencia de ciclos anuales modulados por oscilaciones multianuales, posiblemente asociadas a la variabilidad interanual del ENSO (El Niño–La Niña). Por su parte, la humedad relativa (HR) refleja una estacionalidad bien definida, con alta coherencia en torno al ciclo anual y un comportamiento inversamente relacionado con las temperaturas, mostrando intensificación de la señal en los meses lluviosos. Finalmente, la velocidad del viento exhibe una menor potencia global, con ciclos anuales menos persistentes y picos localizados en periodos largos (1024–2048 días), lo que podría relacionarse con variaciones de gran escala o modulaciones climáticas regionales.

De manera conjunta, todas las variables confirman la existencia de un ciclo anual dominante en la región de Santa Cruz–Nicoya, reflejado por las franjas de alta potencia entre los 256 y 512 días. Sin embargo, la intensidad y estabilidad de este ciclo difieren según la variable: las temperaturas (mínima, máxima y media) y la humedad relativa presentan patrones estacionales consistentes, mientras que la precipitación y el viento muestran mayor variabilidad interanual, posiblemente influida por fenómenos oceánicos–atmosféricos. Este comportamiento sugiere una marcada estacionalidad térmica y pluviométrica típica del clima tropical de la zona, modulada por eventos de gran escala que afectan la dinámica regional.

Figura 4.

Distribución espectral wavelet de las series temporales de temperatura, precipitación, humedad relativa y viento en Santa Cruz-Nicoya (1970-2024).





Nota: T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura media (°C). PP: precipitaciones (mm). HR: humedad relativa (%). Velocidad: velocidad del viento (m/s)

Fuente: Elaboración propia.

5.1.5. Análisis de correlación

Para evaluar la relación entre las distintas variables climáticas, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson a partir de las series temporales del período 1970–2024. La Figura 5 presenta la matriz de correlación en la que se observa tanto la magnitud como la dirección (positiva o negativa) de las asociaciones entre las variables climáticas del territorio de Santa Cruz–Nicoya.

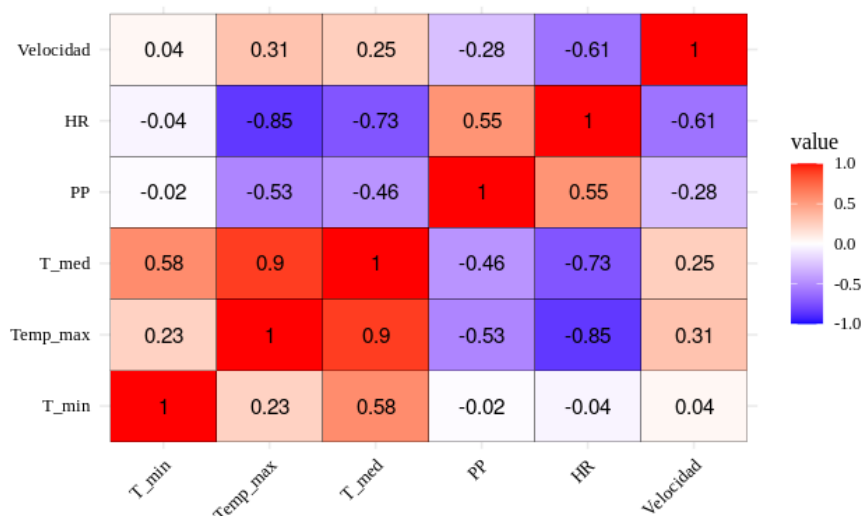
Los resultados muestran una alta correlación positiva entre la temperatura máxima y la temperatura media, así como entre la temperatura mínima y la media, lo cual es coherente con la dependencia matemática de la media respecto a los valores extremos diarios. También se observa una fuerte correlación negativa entre la temperatura máxima y la humedad relativa, lo que evidencia que, a medida que aumentan las temperaturas la atmósfera tiende a volverse más seca. De forma similar,

la precipitación y la humedad relativa presentan una correlación positiva moderada, como es de esperarse ya que los eventos de precipitación suelen ocurrir bajo condiciones de alta humedad.

Por otro lado, la velocidad del viento muestra una correlación negativa con la humedad relativa, lo que sugiere que los vientos más intensos están asociados a condiciones más secas. Finalmente, la correlación negativa entre la temperatura máxima y la precipitación indica que los días más cálidos tienden a coincidir con menores niveles de precipitación.

Figura 5.

Matriz de correlación de Pearson en forma de mapa de calor para variables climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



Nota: T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura media (°C). PP: precipitaciones (mm). HR: humedad relativa (%). Velocidad: velocidad del viento (m/s)

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6 Análisis Gráfico

5.1.6.1 Evolución temporal de las variables climáticas

La Figura 6 muestra la evolución temporal de las variables climáticas en el territorio Santa Cruz–Nicoya para el período 1970–2024. En general, se observa una marcada estacionalidad anual, acompañada de tendencias diferenciadas según la variable analizada.

En las series de temperatura mínima (T_min), máxima (Temp_max) y media (T_med) se aprecia un incremento progresivo a lo largo del período, evidenciado por la pendiente positiva de las

líneas de tendencia (en rojo). Este comportamiento es consistente con los resultados del análisis de Theil–Sen, donde se estimaron tasas de aumento de $+ 0,018$ °C/año para T_{min} , $+ 0,015$ °C/año para T_{max} y $+ 0,016$ °C/año para T_{med} . Las temperaturas mínimas presentan una mayor variabilidad intraanual y un ascenso más pronunciado, lo que sugiere un aumento de las temperaturas nocturnas y una reducción de la amplitud térmica diaria. Las temperaturas máximas, aunque más estables, también evidencian un incremento sostenido, confirmando la tendencia general de calentamiento gradual del territorio.

La precipitación acumulada (PP) muestra una alta variabilidad interanual, con picos significativos e irregularidad en los eventos de lluvia. Si bien se observan años con acumulados elevados, la línea de tendencia evidencia una ligera disminución ($- 0,001$ mm/año según Theil–Sen), lo que sugiere una posible reducción de la precipitación media anual en las últimas décadas. Estos resultados reflejan la naturaleza irregular del régimen pluviométrico en la región, influenciado por eventos extremos y oscilaciones asociadas a fenómenos como El Niño y La Niña.

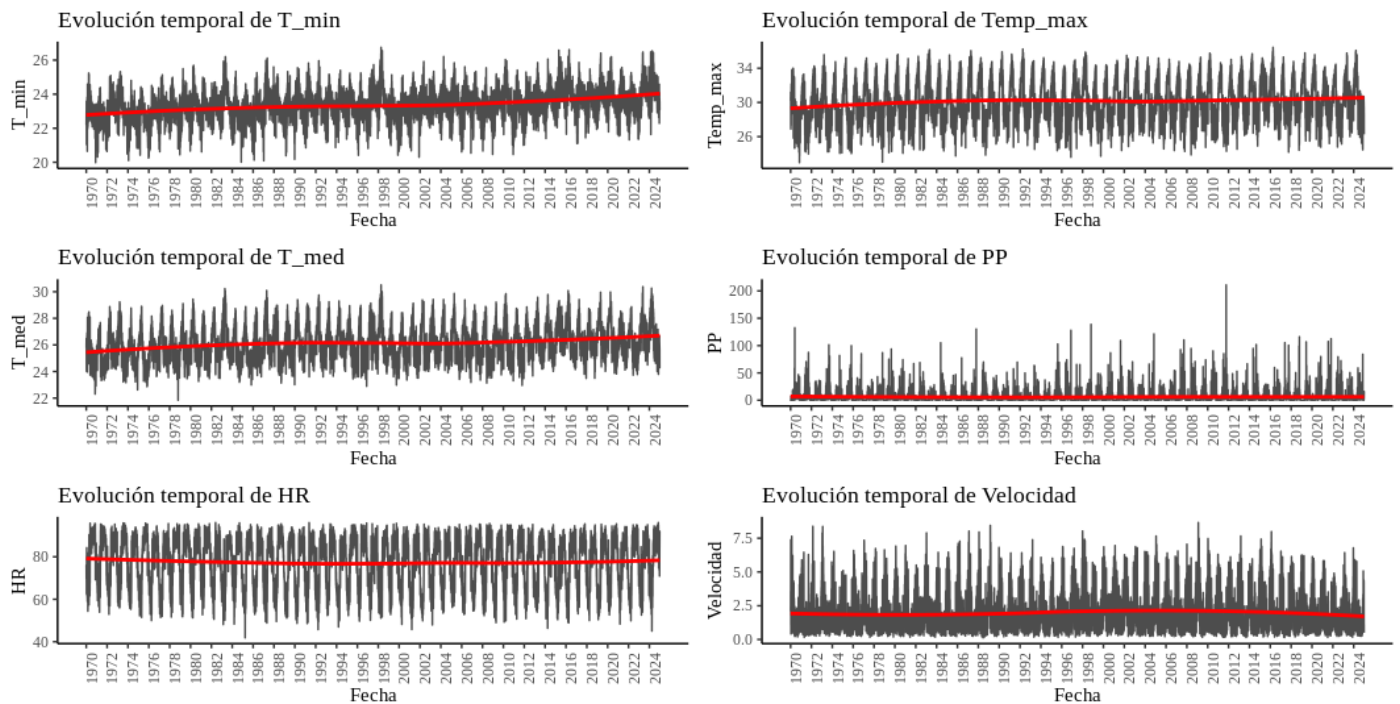
En la humedad relativa (HR) se distinguen ciclos estacionales bien definidos, con valores más altos durante la estación lluviosa y menores en la seca. Sin embargo, la tendencia general es ligeramente decreciente ($- 0,016$ %/año), coherente con el incremento térmico observado, lo que podría estar indicando una tendencia hacia condiciones más secas a lo largo del período analizado.

Por último, la velocidad del viento muestra oscilaciones anuales regulares con valores que oscilan entre 0 m/s y 8 m/s. Su línea de tendencia presenta una pendiente positiva ($+ 0,002$ m/s/año), indicando una leve intensificación en las velocidades medias del viento. No obstante, la dispersión de los valores y la desviación estándar relativamente alta ($DS = 1,40$ m/s) reflejan una variabilidad considerable, posiblemente asociada a la dinámica atmosférica regional y a factores locales como la topografía y la estacionalidad de los alisios.

En conjunto, las series temporales permiten identificar un patrón climático caracterizado por un calentamiento sostenido, ligera reducción de la humedad y de la precipitación, y una leve intensificación del viento, lo cual sugiere un proceso de variación climática gradual en el territorio Santa Cruz–Nicoya durante las últimas cinco décadas.

Figura 6.

Evolución de las series temporales de precipitación acumulada anual (mm), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), temperatura media (°C), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) de 1970-2024.



Nota: T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura media (°C). PP: precipitaciones (mm). HR: humedad relativa (%). Velocidad: velocidad del viento (m/s)

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.2 Análisis de variabilidad

La Tabla 10 presenta el resumen estadístico de las variables climáticas registradas en el territorio Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024. En general, los valores reflejan la marcada estacionalidad del clima de la región y la amplitud de variación de cada parámetro a lo largo del registro histórico.

La precipitación acumulada anual muestra una amplia variabilidad, con valores que oscilan entre 0 mm y un máximo de 2178,53 mm, y un promedio de 1087,66 mm. El rango intercuartílico (Q1 = 580,16 mm; Q3 = 1626,88 mm) indica una alta dispersión entre años secos y lluviosos, lo que evidencia contrastes marcados entre la estación seca y la lluviosa.

En cuanto a la temperatura mínima, los valores se mantienen relativamente estables, con un promedio de 23,36 °C y una desviación estándar de 0,87 °C. El rango intercuartílico (Q1 = 22,81 °C; Q3 = 23,89 °C) muestra una baja dispersión, lo que refleja una estabilidad térmica nocturna en la región, con valores extremos entre 19,98 °C y 26,75 °C. La temperatura máxima presenta un promedio de 30,14 °C y una desviación estándar de 2,28 °C, con valores que varían entre 22,95 °C y 36,45 °C. El rango intercuartílico (Q1 = 28,53 °C; Q3 = 31,99 °C) indica una mayor amplitud térmica diurna, lo que sugiere un incremento de las temperaturas extremas durante la estación seca.

Por su parte, la temperatura media se sitúa en 26,13 °C, con una desviación estándar de 1,28 °C y un rango intercuartílico comprendido entre 25,19 °C (Q1) y 26,99 °C (Q3). Esto confirma la constancia térmica general del territorio a lo largo del período de estudio, con fluctuaciones leves que responden al ciclo estacional.

La humedad relativa presenta una media de 77,42 %, con valores que van desde 41,84 % hasta 96,14 %. Los cuartiles (Q1 = 65,95 %; Q3 = 87,68 %) reflejan un predominio de condiciones húmedas durante la mayor parte del año, coherentes con la influencia de la estación lluviosa. Finalmente, la velocidad del viento muestra un promedio de 1,96 m/s y una desviación estándar de 1,40 m/s, con valores mínimos de 0,12 m/s y máximos de 8,66 m/s. El rango intercuartílico (Q1 = 0,92 m/s; Q3 = 2,70 m/s) evidencia que la mayoría de los registros corresponden a condiciones de viento leve a moderado, con algunos episodios de intensificación.

En conjunto, los valores estadísticos resumen las características climáticas típicas del sector Santa Cruz–Nicoya, marcado por una elevada variabilidad pluviométrica, estabilidad térmica y condiciones de humedad y viento que responden al patrón estacional tropical de la región.

Tabla 10.

Resumen estadístico de las variables climáticas del territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024).

Variable	Min	Q1	Mediana	Promedio	Q3	Max	DS
PP acumulada	0,00	580,16	1076,45	1087,66	1626,88	2178,53	614,99
Temp. mín.	19,98	22,81	23,33	23,36	23,89	26,75	0,87

Temp. máx.	22,95	28,53	29,68	30,14	31,99	36,45	2,28
Temp. media	21,84	25,19	25,93	26,13	26,99	30,51	1,28
HR	41,84	65,95	81,57	77,42	87,68	96,14	11,88
Velocidad	0,12	0,92	1,49	1,96	2,70	8,66	1,40

Nota: PP acumulada: precipitación acumulada (mm). T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura media (°C). HR: humedad relativa (%). Velocidad: velocidad del viento (m/s)

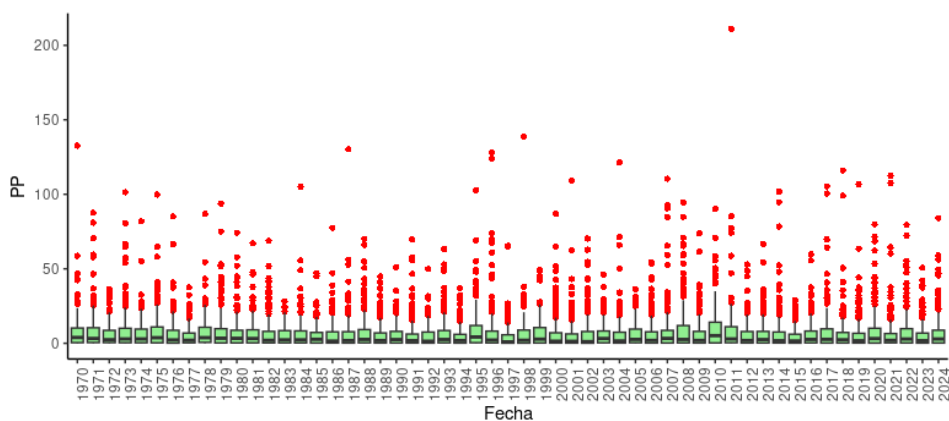
Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.2.1 Boxplots anuales

Para evaluar la variabilidad y la presencia de valores atípicos (*outliers*), se generaron diagramas de cajas y bigotes (*boxplots*) agrupados por año. En el caso de la precipitación, se observa una distribución altamente asimétrica hacia la izquierda, con la mayoría de los valores concentrados en rangos bajos, pero con eventos extremos claramente identificables como *outliers* en todos los años.

Figura 7.

Variabilidad anual de la precipitación (mm) en el territorio Santa Cruz–Nicoya representada mediante boxplot (1970–2024)



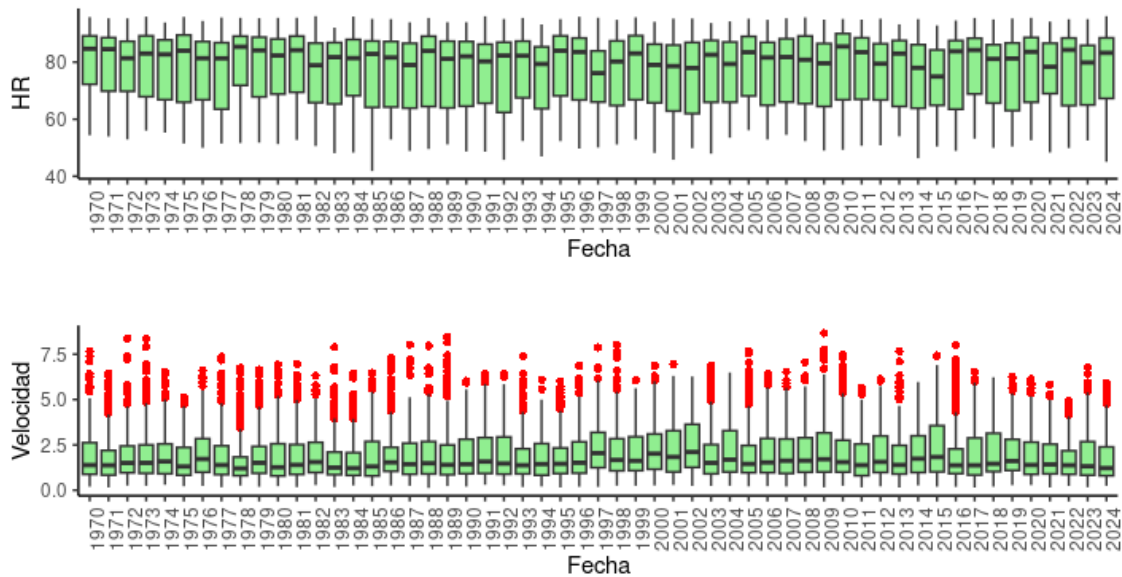
Nota: PP: precipitación (mm).

Fuente: Elaboración propia.

Para la *HR*, se observa una distribución estable a lo largo del tiempo, con una ligera variabilidad interanual y sin cambios significativos en la mediana. Por su parte, la *Velocidad* presenta valores generalmente bajos, pero con una alta frecuencia de *outliers* (Figura 8) en los distintos años, lo que indica la presencia ocasional de eventos de vientos fuertes.

Figura 8.

Distribución anual de la humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) representada mediante diagramas de cajas (1970–2024)



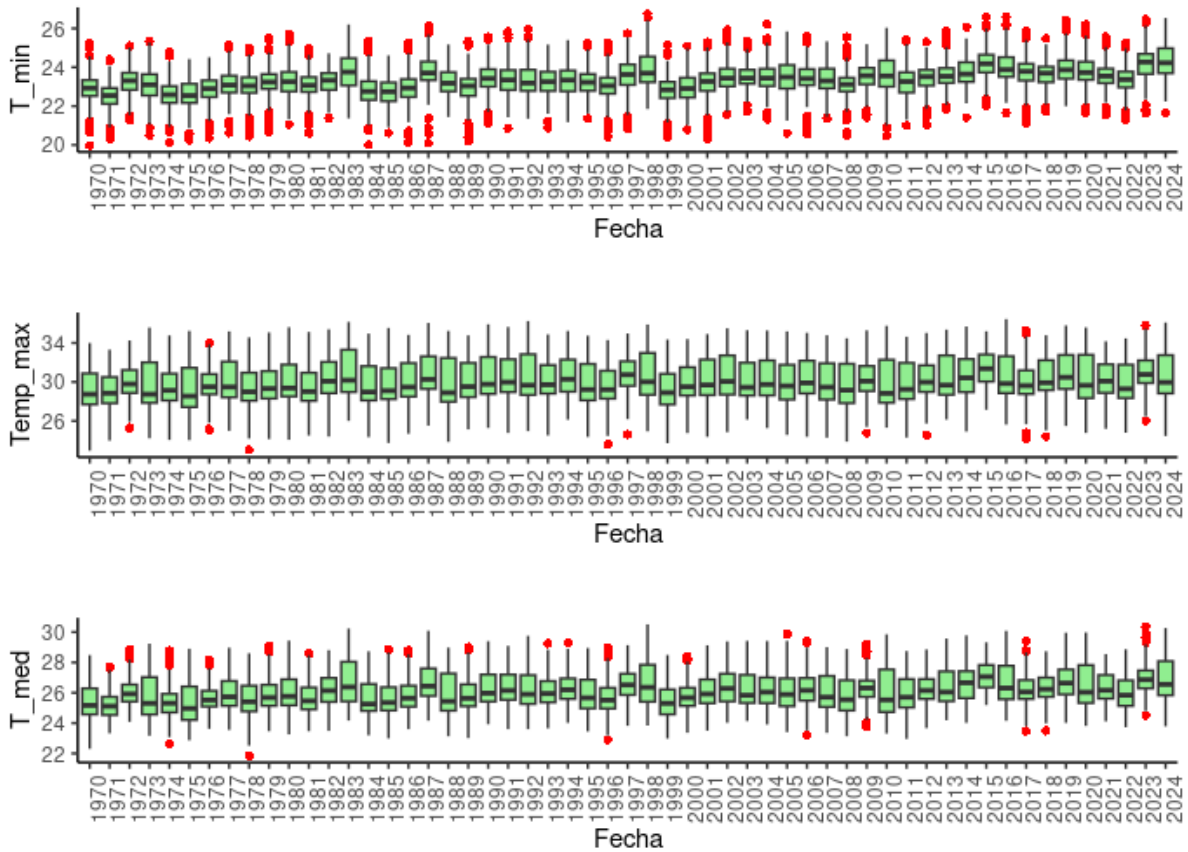
Nota: HR: humedad relativa (%).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas, tanto la mínima (*Temp_min*), como la máxima (*Temp_max*) y la media (*Temp_med*) (Figura 9) presentaron distribuciones homogéneas. Sin embargo, se identificaron *outliers* en los extremos superiores de la temperatura máxima y en los extremos inferiores de la mínima, lo que sugiere la presencia de eventos térmicos extremos, como olas de calor y frío, asociados a los fenómenos de El Niño y La Niña.

Figura 9.

Diagramas de cajas de la temperatura mínima, máxima y media (°C) en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



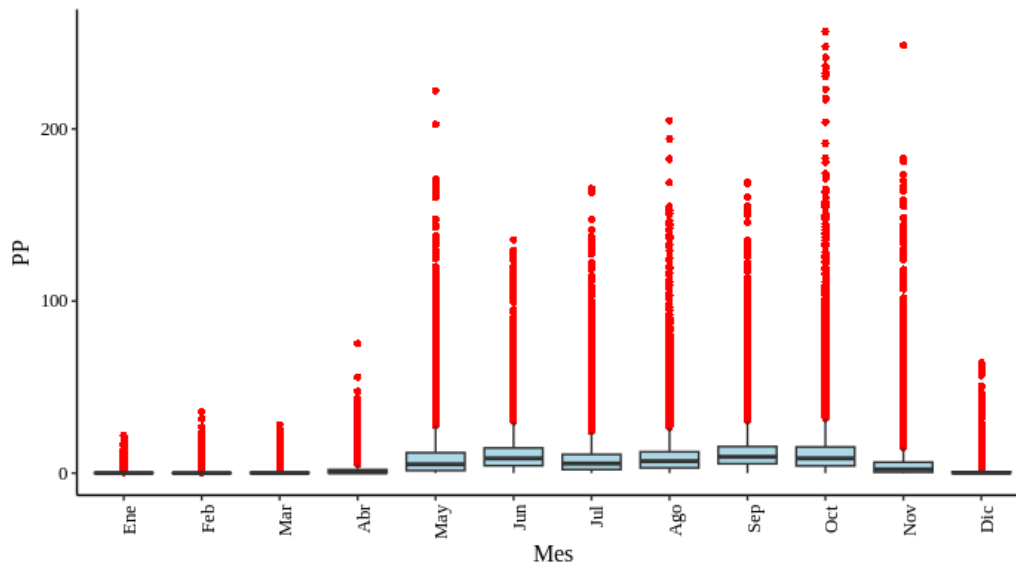
Nota: T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura
Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.2.2 Boxplots mensual

La precipitación (*PP*) muestra (Figura 10) una distribución asimétrica a lo largo del año. Durante los meses de diciembre a abril, las precipitaciones son bajas, con valores concentrados cerca de cero, lo que corresponde a la época seca. Sin embargo, a partir de mayo se observa un aumento significativo en la *PP*, alcanzando su máximo entre septiembre y octubre; además, en estos meses se registran los *outliers* más extremos.

Figura 10.

Diagrama de cajas mensual de la precipitación (mm) en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



Nota: PP: precipitación (mm)

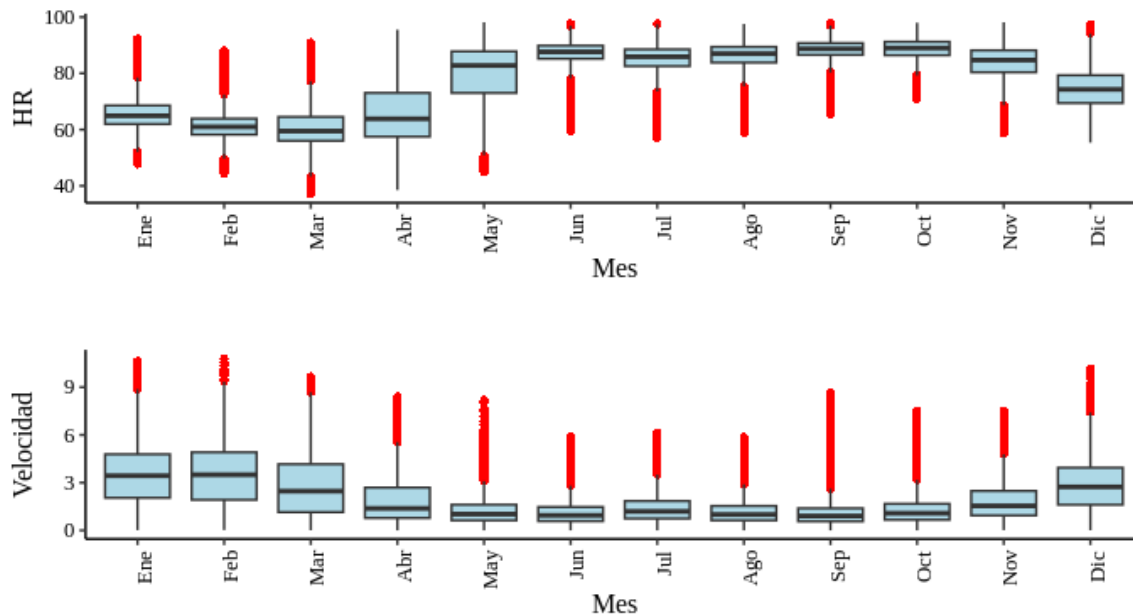
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la humedad relativa (*HR*), se observa (Figura 11) una variabilidad estacional marcada durante la época seca, entre enero y abril, con valores más bajos, mayor dispersión y presencia de valores atípicos. Por el contrario, en la época lluviosa, entre mayo y noviembre, la *HR* aumenta y la dispersión disminuye, reflejando condiciones de mayor estabilidad.

La velocidad del viento (*Velocidad*) muestra una tendencia al aumento en los primeros meses del año, con medias más elevadas en enero, febrero y marzo, seguida de una disminución gradual hasta alcanzar valores mínimos entre mayo y octubre. Se identifican *outliers* en todos los meses, lo que indica la ocurrencia ocasional de vientos fuertes, especialmente durante la estación seca.

Figura 11.

Diagramas de cajas mensuales de la humedad relativa (%) y la velocidad del viento (m/s) en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



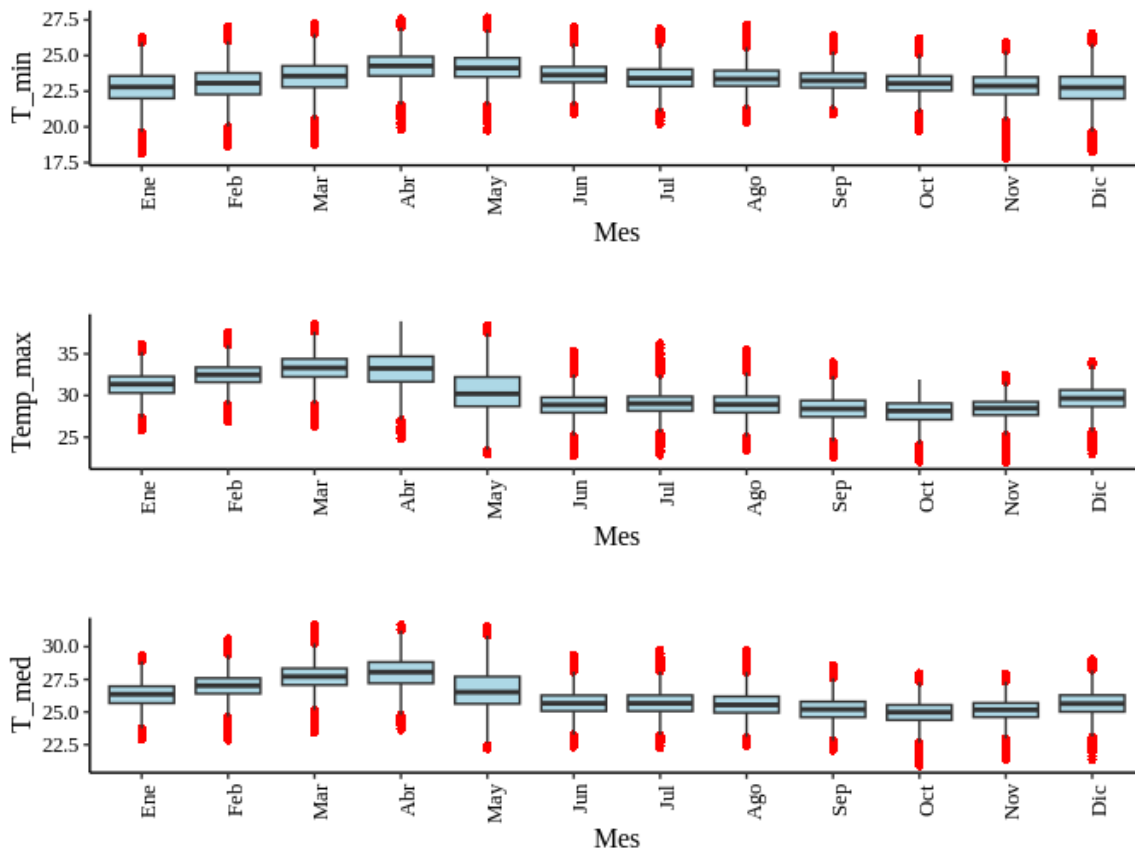
Nota: HR: humedad relativa (%). Velocidad: velocidad del viento (m/s)

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas, la distribución de la temperatura mínima (*Temp_min*), máxima (*Temp_max*) y media (*Temp_med*) muestra (Figura 12) un patrón estacional definido. La temperatura mínima alcanza sus valores más elevados en los meses de abril y mayo, disminuyendo en los meses posteriores. Por su parte, la temperatura máxima presenta un comportamiento similar, con un incremento en marzo y abril, seguido de una disminución durante los meses lluviosos.

Figura 12.

Diagramas de cajas mensuales de la temperatura mínima, máxima y media (°C) en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



Nota: T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura media (°C).

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, el análisis de la variabilidad anual y mensual de las variables climáticas confirma el marcado carácter estacional del territorio Santa Cruz–Nicoya, donde se alternan períodos secos prolongados con una estación lluviosa concentrada entre mayo y octubre. La precipitación muestra una alta irregularidad interanual, con años muy húmedos y otros marcadamente deficitarios, reflejando la influencia de fenómenos de variabilidad climática como El Niño y La Niña. Las temperaturas mínima, máxima y media mantienen (figura 12) un comportamiento estable, aunque con una ligera tendencia ascendente, particularmente en las temperaturas nocturnas, lo que sugiere un proceso gradual de calentamiento y reducción de la amplitud térmica diaria.

La humedad relativa exhibe una clara respuesta estacional al régimen pluviométrico, con valores más bajos y mayor dispersión en la estación seca, mientras que la velocidad del viento alcanza sus máximos en los primeros meses del año, coincidiendo con la época de menor humedad. En conjunto, los resultados ponen de manifiesto un sistema climático tropical con alta variabilidad temporal, dominado por la alternancia de una estación seca cálida y ventosa, y una estación lluviosa húmeda y más estable. Estos patrones, observados tanto en las escalas anuales como mensuales, confirman la coherencia del comportamiento climático regional y su sensibilidad ante las oscilaciones interanuales que modulan la dinámica térmica e hídrica del territorio.

5.1.6.3 Histogramas y KDE (distribución)

El análisis de la distribución de las variables climáticas del territorio de Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024, se generó mediante histogramas acompañados de curvas de densidad (*Kernel Density Estimation, KDE*) (Figura 13). Estas herramientas permitieron identificar la forma de la distribución y la frecuencia relativa de los valores observados en las series temporales.

Las variables de temperatura mínima y media mostraron una distribución aproximadamente normal, con valores concentrados en rangos estrechos, lo que se confirma por sus bajas desviaciones estándar (0,87 °C y 1,28 °C, respectivamente). En contraste, la temperatura máxima presentó una ligera asimetría hacia la derecha, con eventos ocasionales de valores elevados de hasta 36,45 °C, reflejando una mayor variabilidad (DE = 2,28 °C).

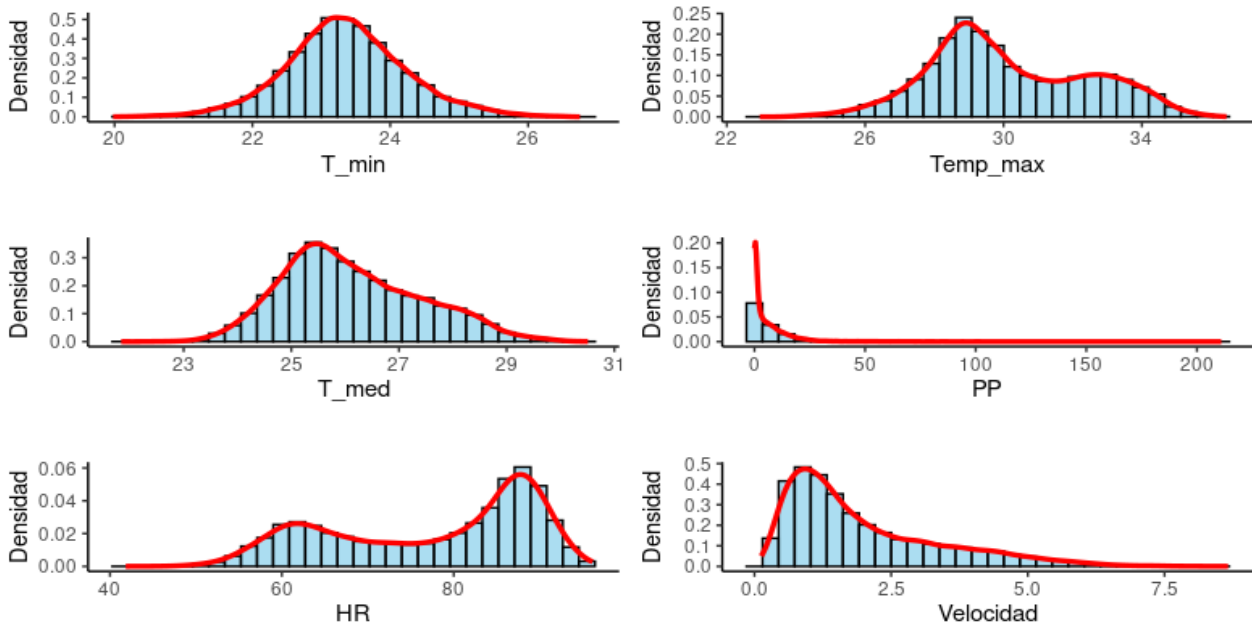
La precipitación acumulada mensual presenta una distribución sesgada hacia la derecha, con una concentración de valores bajos y algunos eventos extremos que alcanzan máximos de 2.178,53 mm. Esta asimetría se refleja también en su alta desviación estándar (DE = 614,99 mm), lo que indica una elevada variabilidad intermensual, característica de regiones con marcada estacionalidad.

En el caso de la humedad relativa, se observa una distribución bimodal, asociada a la alternancia entre la época seca y la lluviosa. A pesar de presentar un valor medio elevado (77,42 %), su amplia dispersión (DE = 11,88 %) refleja las fluctuaciones estacionales propias de esta variable.

Por último, la velocidad del viento presenta una distribución asimétrica hacia la derecha, con predominio de valores bajos (mediana = 1,49 m/s) y algunos eventos de vientos fuertes que alcanzan hasta 8,66 m/s. La desviación estándar de 1,40 m/s indica una variabilidad moderada en esta variable.

Figura 13.

Histogramas y estimaciones de densidad Kernel de variables climáticas en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



Nota: PP acumulada: precipitación acumulada (mm). T_min: temperatura mínima (°C). Temp_max: temperatura máxima (°C). T_med: temperatura media (°C). HR: humedad relativa (%). Velocidad: velocidad del viento (m/s)

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los histogramas y las curvas de densidad de las variables climáticas reflejan la marcada dualidad estacional del clima del territorio de Santa Cruz–Nicoya. Las temperaturas muestran una distribución estable y concentrada, lo que evidencia un régimen térmico homogéneo con baja amplitud interanual, típico de zonas tropicales costeras. En contraste, la precipitación y la humedad relativa presentan distribuciones más dispersas y asimétricas, con sesgos hacia valores extremos que reflejan la alternancia entre las estaciones seca y lluviosa. La precipitación, en particular, muestra la mayor variabilidad del sistema climático local, lo que coincide con la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO). Por su parte, la velocidad del viento muestra una distribución

concentrada en valores bajos, aunque con eventos puntuales de alta intensidad durante la estación seca, asociados al fortalecimiento de los vientos alisios.

En términos generales, las distribuciones evidencian un clima altamente estacional, con temperaturas estables, humedad y precipitación contrastantes y vientos modulados por el ciclo anual de estabilidad atmosférica, lo que configura el patrón característico del clima tropical seco del Pacífico norte costarricense.

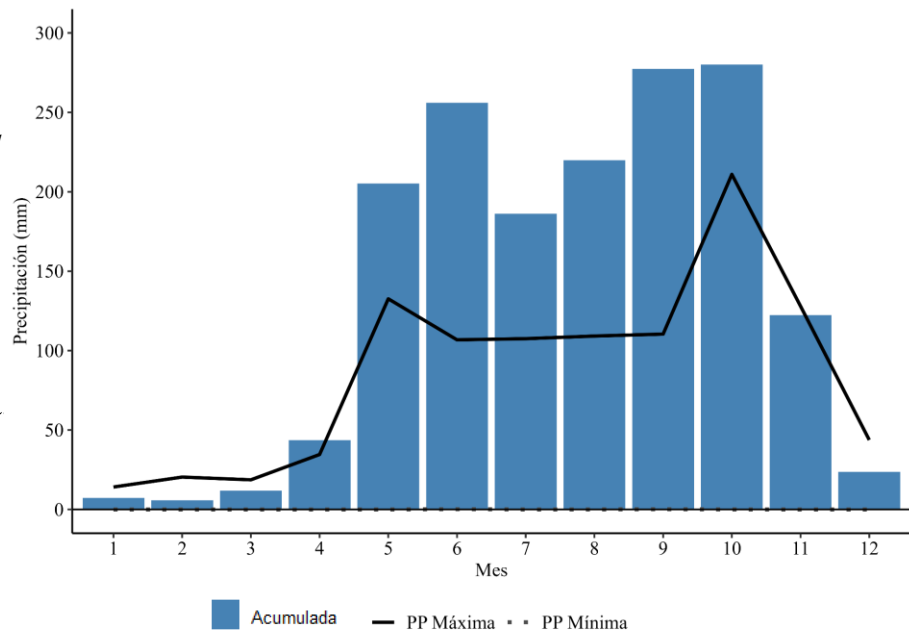
5.1.7 Dinámica mensual y anual de las variables climáticas

5.1.7.1 Análisis mensual

El comportamiento mensual de las variables climáticas (Anexo 1) muestra con claridad la marcada estacionalidad que caracteriza al territorio Santa Cruz–Nicoya. La Figura 14 evidencia la existencia de una estación seca definida de diciembre a abril, durante la cual las precipitaciones mensuales se mantienen por debajo de 50 mm e incluso descienden hasta valores cercanos a cero entre enero y marzo. Por el contrario, la estación lluviosa se extiende de mayo a octubre, alcanzando su máximo en octubre con una precipitación promedio mensual de 249 mm y registros extremos de hasta 280 mm. Los meses de junio a octubre concentran más del 70 % del total anual de lluvias.

Figura 14.
*Comportamiento estacional
Nicoya, 1970-2024*

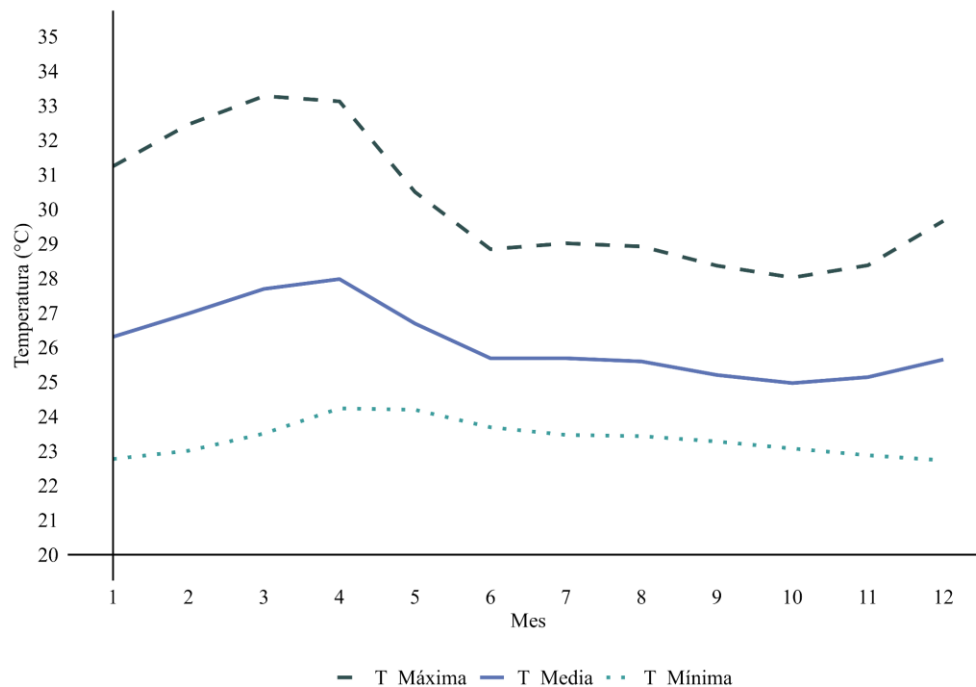
Nota: PP: precipitaciones
Fuente: Elaboración propia



En cuanto a la temperatura, el comportamiento térmico muestra estabilidad a lo largo del año, con variaciones que responden principalmente a la nubosidad y a la incidencia solar estacional (Figura 15). El mes más cálido es abril, con una temperatura media de 27,9 °C y máximas que superan los 33 °C, mientras que los valores más bajos se registran en octubre (24,9 °C) y septiembre (25,2 °C), coincidiendo con el periodo más lluvioso. Las temperaturas mínimas oscilan entre 22,7 °C en diciembre y 24,5 °C en abril y mayo, lo que muestra una reducida amplitud térmica anual.

Figura 15.

Comparación de temperaturas media, mínima y máxima (°C) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024)



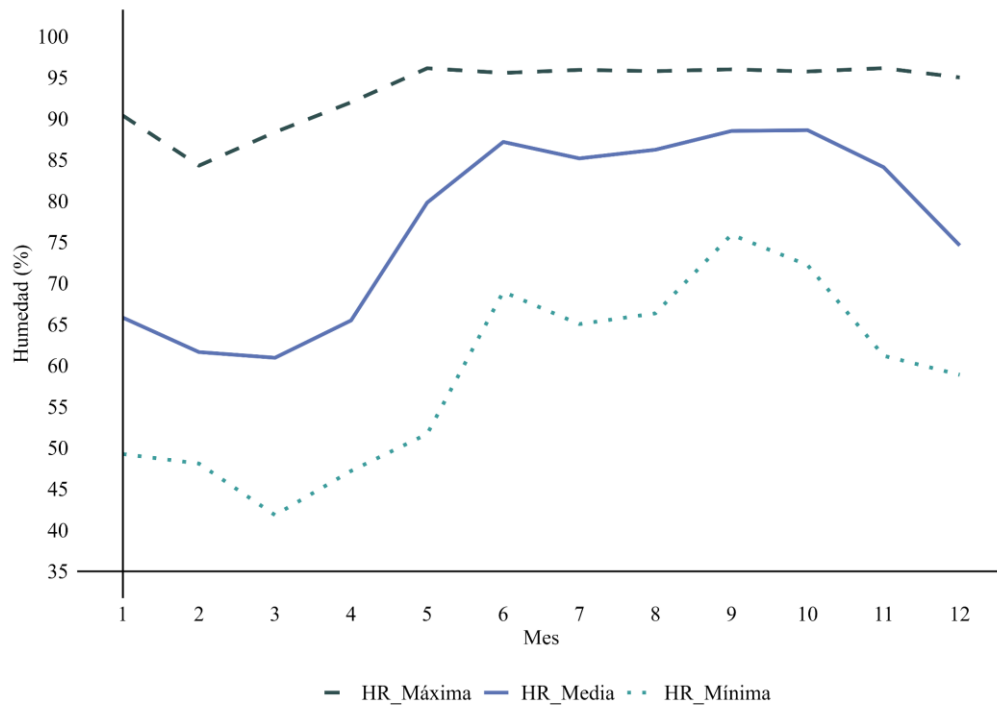
Nota: T_Máxima: temperatura máxima (°C). T_Media: temperatura media(°C). T_Mínima: temperatura mínima (°C).

Fuente: Elaboración propia.

La humedad relativa (Figura 16) mantiene un patrón inverso al de la temperatura y la precipitación. Los meses de enero a abril presentan los valores más bajos, con promedios entre 61 % y 66 %, alcanzando el mínimo de 41,8 % en marzo. Durante la estación lluviosa, la humedad se eleva progresivamente hasta alcanzar máximos superiores al 88 % en septiembre y octubre, reflejando un ambiente más saturado y estable.

Figura 16.

Evolución anual de la humedad relativa (%) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024): media, mínima y máxima



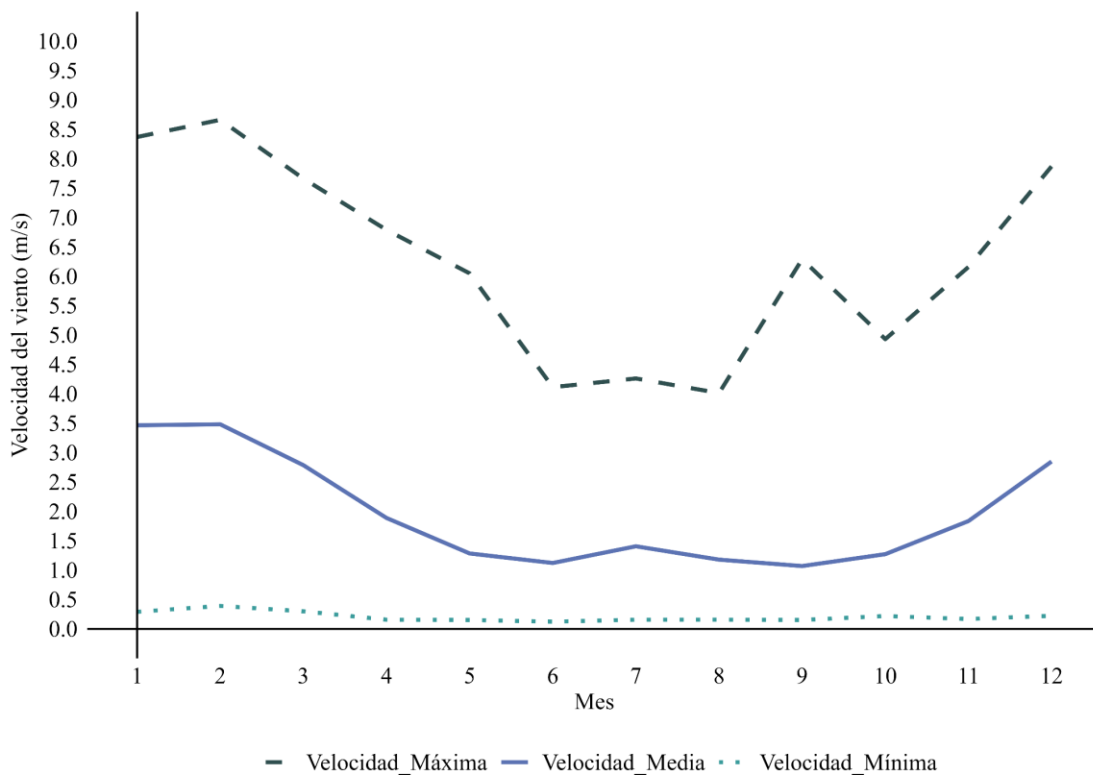
Nota: HR_Máxima: humedad relativa máxima (%). HR_Media: humedad relativa media (%). HR_Mínima: humedad relativa mínima (%).

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad del viento (Figura 17) presenta su mayor intensidad durante la estación seca, con promedios mensuales de 3,4 m/s en enero y febrero, y ráfagas máximas que superan los 8,6 m/s. A partir de mayo, la velocidad disminuye, manteniéndose entre 1,0 m/s y 1,4 m/s durante la estación lluviosa, cuando predominan condiciones atmosféricas más estables.

Figura 17.

Evolución de la velocidad del viento (m/s) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024): media, mínima y máxima



Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, el ciclo mensual muestra una alternancia bien definida entre una estación seca, cálida, ventosa y de baja humedad, y una estación lluviosa, fresca y húmeda. Este patrón climático está estrechamente ligado a la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y a los vientos alisios del Pacífico Norte.

5.1.7.2 Análisis anual

En el Anexo 2 se presenta la tabla con los valores promedio, mínimos y máximos anuales de temperatura (°C), humedad relativa, velocidad del viento y precipitación acumulada para el territorio de Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024. La precipitación acumulada anual registró una media de 2.238,1 mm, con un mínimo de 1.450,0 mm en 1994 (año caracterizado por condiciones secas) y un máximo de 3.317,2 mm en 2010. Aunque se observan picos de lluvias elevadas en años

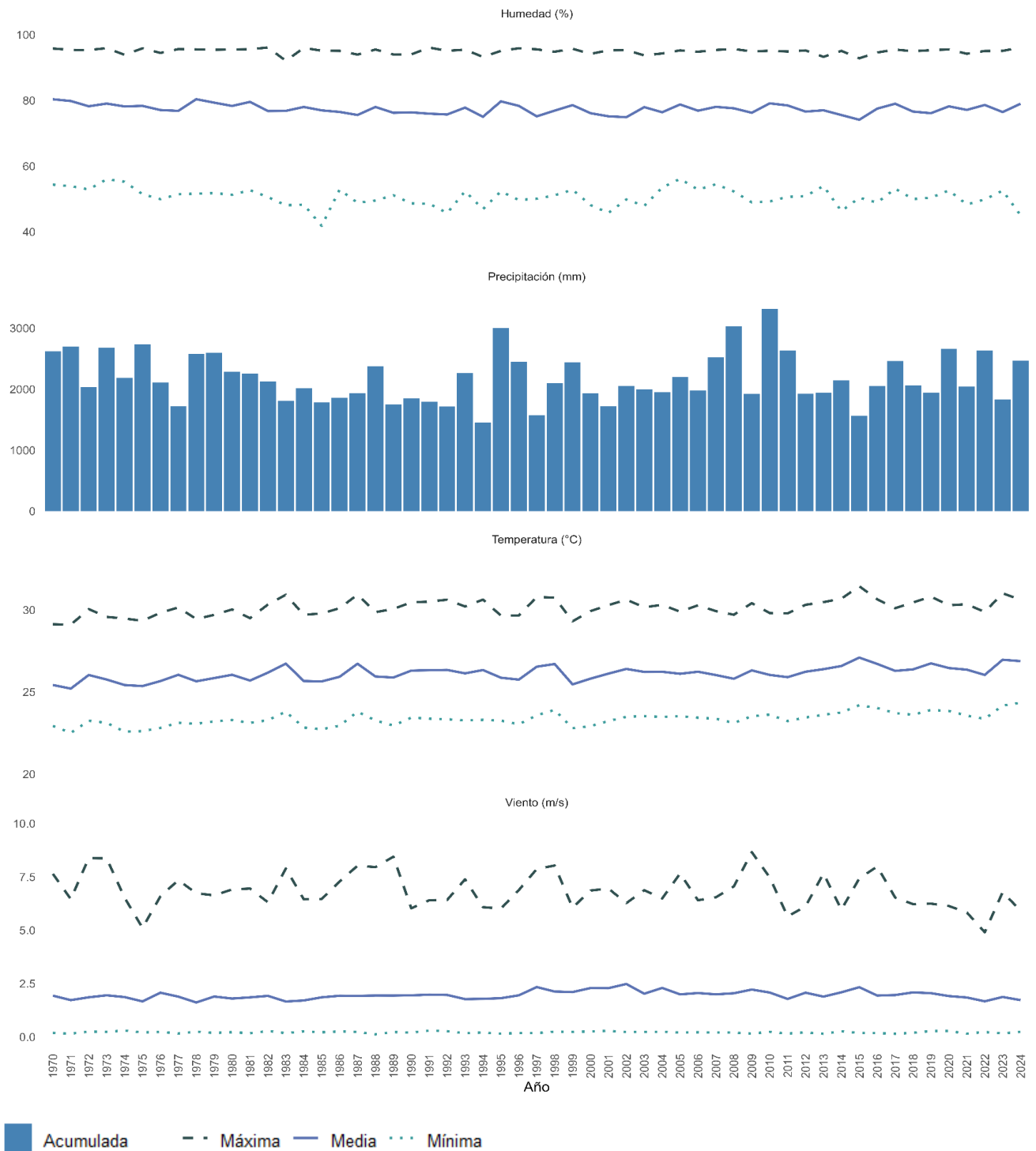
puntuales, se destaca una mayor frecuencia de años con precipitaciones por debajo de la media a partir de la década de 1990.

En cuanto a la temperatura media anual, se registró un promedio general de 26,0 °C, con un mínimo de 25,2 °C en 1971 y un máximo de 27,1 °C en los años 2015 y 2024. Se observa una ligera tendencia al aumento de la temperatura, ya que entre 1970 y mediados de los años 90 las temperaturas promedio se mantenían alrededor de 25,5 °C a 26,0 °C, mientras que a partir de la década de 2000 se evidencian años más cálidos, destacando 2015 y 2024.

La humedad relativa mostró una ligera disminución en su media a lo largo de la serie temporal. A inicios de la década de 1970 se registraron valores medios de 80,4 %, mientras que en años recientes, como 2015 y 2023, las medias se situaron entre 74 % y 76 %. Estas disminuciones podrían estar relacionadas con el aumento de las temperaturas y la disminución de la precipitación. Por su parte, la velocidad del viento presentó una media de 1,96 m/s, con un mínimo anual de 1,62 m/s en 2022 y un máximo de 2,45 m/s en 2002.

Figura 18.

Evolución de la precipitación acumulada (mm), temperaturas(°C), humedad relativa (%) velocidad del viento (m/s) en Santa Cruz–Nicoya (1970–2024): media, mínima y máxima



Fuente: Elaboración propia.

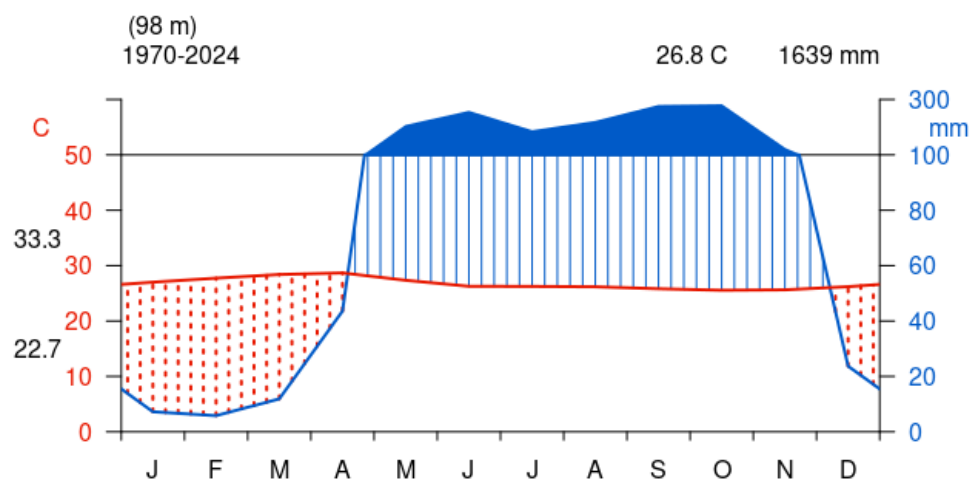
5.1.8 Diagrama climático de Walter y Lieth

El diagrama climático de Walter y Lieth permite representar simultáneamente la distribución mensual de la temperatura media y la precipitación acumulada, facilitando la identificación de los períodos húmedos y secos del año (Walter & Lieth, 1960).

En la figura 19, la línea roja continua corresponde a la temperatura media mensual (°C), mientras que la línea azul representa la precipitación mensual (mm). Las áreas con sombreado azul vertical indican los meses húmedos, en los cuales la precipitación supera el doble de la temperatura ($P > 2T$), reflejando un excedente hídrico. En cambio, las áreas con puntos rojos muestran los meses secos, cuando la precipitación es inferior al doble de la temperatura ($P < 2T$), lo que sugiere condiciones de déficit hídrico. La zona azul más oscura que aparece en la parte superior del gráfico representa los meses con precipitaciones altas, superiores a 100 mm, evidenciando picos pluviométricos significativos.

En conjunto, el diagrama evidencia una marcada alternancia entre un periodo seco (enero–abril) y un periodo lluvioso (mayo–octubre), coherente con el régimen climático del Pacífico norte costarricense. Este patrón, caracterizado por una temperatura media anual de 26,8 °C, una precipitación total de 1639 mm y una altitud media de 98 m.s.n.m corresponde a un clima tropical seco con marcada estacionalidad.

Figura 19.
Diagrama mensual histórico de Walter y Lieth del territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024



Nota: J: Ene, F: Feb, M: Mar, A: Abril, M: May, J: Jun, J: Jul, A: Ago, S: Set, O: Oct, N: Nov, D: Dic. C: °C, m: metros sobre el nivel del mar.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9 Mapas de isolíneas

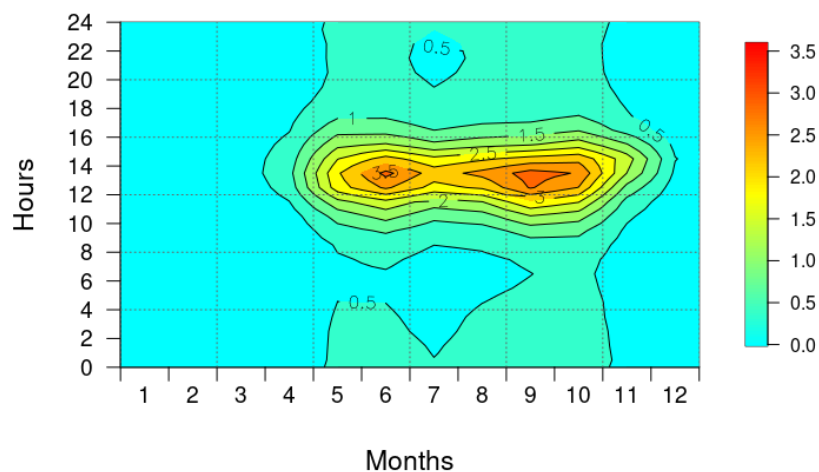
Las isolíneas permiten visualizar la variabilidad espaciotemporal de las variables meteorológicas en dos dimensiones: los meses del año (eje vertical) y las horas del día (eje horizontal). Esta representación gráfica revela patrones diarios y estacionales, lo que facilita la identificación de fenómenos climáticos dominantes (Matuschek & Matzarakis, 2010). En cada mapa, los colores indica la magnitud de la variable analizada donde las tonalidades cálidas (amarillo-rojo) representan valores más altos, mientras que los tonos fríos (azul-verde) corresponden a valores bajos.

Se observó una estacionalidad marcada en la distribución de la precipitación (Figura 20). Durante los meses secos, de enero a abril, predominan tonalidades azules, que indican valores inferiores a 0,5 mm/hora. En contraste, en los meses lluviosos, de mayo a octubre, aparecen áreas en tonos amarillos y naranjas, con máximos superiores a 3,5 mm/hora. Las horas de mayor precipitación se concentran entre las 12:00 y las 15:00, lo que sugiere lluvias convectivas (precipitaciones originadas por el ascenso de aire cálido y húmedo que se condensa al enfriarse) típicas del trópico.

En adición, se observa que la temporada lluviosa no es homogénea, sino que presenta dos pulsos definidos: el primero ocurre entre mayo y junio, seguido de una disminución relativa en julio, y luego un segundo aumento de la precipitación entre agosto y octubre (Figura 20). Esta dinámica sugiere la presencia del fenómeno conocido como veranillo de San Juan o canícula, una pausa corta y menos lluviosa dentro de la estación lluviosa, característico del clima del Pacífico costarricense.

Figura 20.

Isolíneas de precipitación (mm) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024

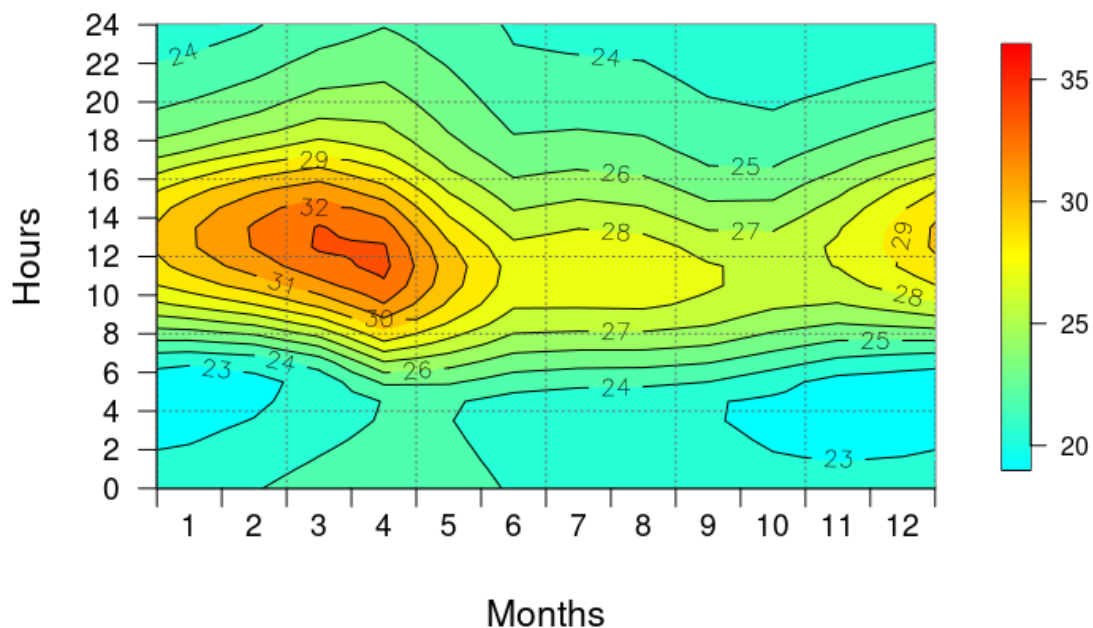


La distribución temporal de la temperatura refleja el patrón característico del clima tropical seco (Figura 21). Se observa que las temperaturas más elevadas se registran en los meses de febrero y abril, alcanzando valores superiores a 33 °C durante el medio día. Estos valores se representan en tonalidades rojo-amarillo, predominantes entre las 10:00 y las 16:00, coincidiendo con las horas de mayor radiación solar.

Las temperaturas mínimas se concentran en las horas de la madrugada y primeras horas de la mañana, entre las 00:00 y las 6:00 a lo largo del año, con valores entre 22 °C y 26 °C, visibles en tonos azulados. Está marcada amplitud térmica diaria resalta el contraste entre el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno, especialmente durante la época seca, lo que tiene repercusiones en procesos como la evapotranspiración, el estrés térmico y el manejo hídrico.

Figura 21.

Isolíneas de temperatura (°C) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024



Fuente: Elaboración propia.

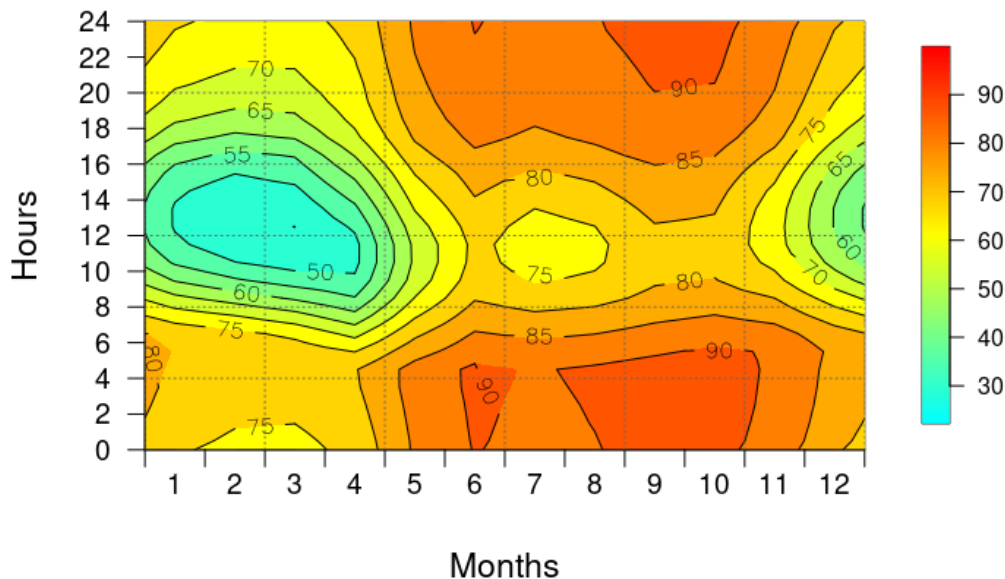
La variación de la humedad relativa a lo largo del año y del día, muestra una distribución bimodal inversa a la de la temperatura (Figura 22). Durante las horas de mayor temperatura, entre las 10:00 y las 16:00, en los meses más cálidos (febrero a abril), se registran los valores más bajos de humedad relativa, descendiendo hasta un 50 %, visibles en tonalidades azules y verdes. Esta

disminución está asociada al calentamiento diurno, que reduce la capacidad del aire para retener la humedad (Figura 22).

Por otro lado, durante la madrugada, entre las 22:00 y las 6:00 horas, en la época lluviosa (mayo a octubre), la humedad relativa se incrementa, superando el 80 % representada en tonos anaranjados y amarillos. Esta dinámica favorece la condensación nocturna, así como la formación de rocío y neblinas, y se ve influida además por la entrada de humedad desde el océano Pacífico durante la estación lluviosa.

Figura 22.

Isolíneas de humedad relativa (%) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024



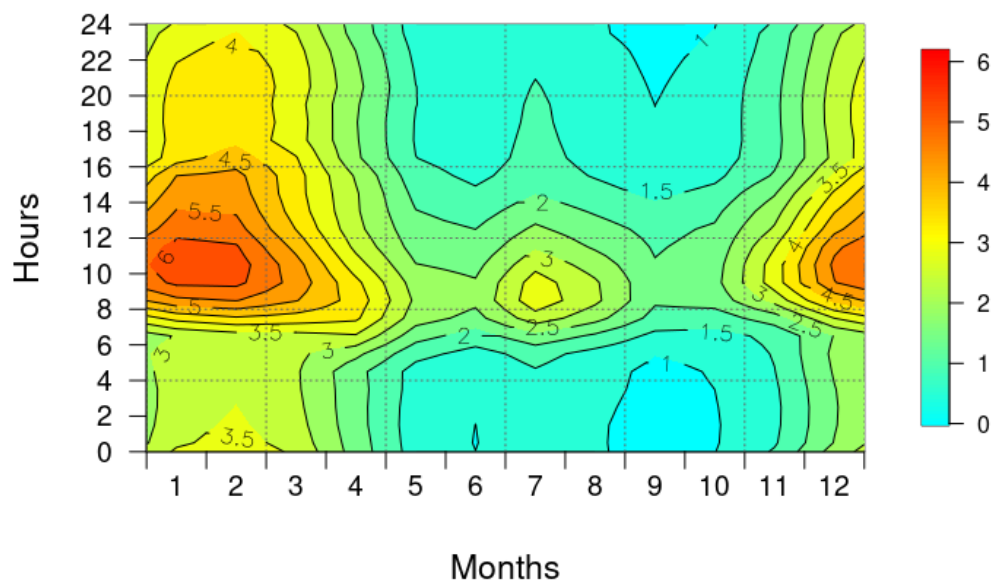
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad de la velocidad del viento muestra un incremento durante los meses secos (diciembre a abril), con valores máximos de hasta 6 m/s entre las 12:00 y las 18:00 horas, representados en tonos rojizos (Figura 23). Este patrón se asocia a la influencia de los vientos alisios del noreste, comunes en la región costera del Pacífico de Costa Rica, los cuales se intensifican bajo condiciones atmosféricas secas y estables.

Durante los meses de la época lluviosa, la velocidad del viento tiende a disminuir, con valores entre 2 y 4 m/s, como resultado de una atmósfera más húmeda y estable que atenúa la intensidad del flujo de aire. Estos patrones de viento tienen implicaciones en el microclima, la dispersión de semillas, la evapotranspiración y el riesgo de incendios forestales, entre otros aspectos.

Figura 23.

Isopletas de velocidad del viento (m/s) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las isolíneas de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento permite identificar patrones climáticos bien definidos en el territorio de Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024, destacando una marcada estacionalidad con diferencias claras entre la época seca (diciembre a abril) y la época lluviosa (mayo a octubre).

Durante la época seca se registran temperaturas elevadas, baja humedad relativa y mayor intensidad de los vientos, condiciones que incrementan la evapotranspiración potencial y generan estrés hídrico, con repercusiones en la productividad agropecuaria. Estas condiciones son críticas para

cultivos sensibles al déficit hídrico, como el frijol y el maíz, los cuales requieren medidas de adaptación como riego tecnificado, uso de variedades resistentes a la sequía, coberturas vegetales y almacenamiento de agua para asegurar la producción durante este período.

Por su parte, la época lluviosa se caracteriza por lluvias frecuentes, altos niveles de humedad relativa y temperaturas moderadas, lo que aumenta la disponibilidad hídrica pero también incrementa el riesgo de saturación del suelo, formación de cárcavas y pérdida de material edáfico. Además, la información horaria y mensual derivada de las isopletas permite planificar acciones concretas para optimizar el riego en las horas de menor evaporación y ajustar las jornadas agrícolas para evitar las horas de mayor temperatura o de mayor riesgo de lluvias.

El análisis conjunto de las isolíneas de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento evidencia una marcada sincronía estacional entre las variables. Los meses secos (diciembre–abril) se caracterizan por altas temperaturas, baja humedad y mayor velocidad del viento, mientras que el período lluvioso (mayo–octubre) presenta condiciones opuestas, con mayor humedad y precipitación. Este contraste refuerza la existencia de una dinámica térmica e hídrica típica del clima tropical seco (Hidalgo et al., 2013), observable tanto a escala mensual como horaria.

5.2 Balance hídrico climático (BHC)

El análisis del balance hídrico climático del territorio de Santa Cruz–Nicoya para el período 1970–2024 evidencia una marcada estacionalidad en la disponibilidad de agua en el suelo, característica de un clima tropical seco (A_w , Köppen). A partir de la comparación mensual entre la precipitación (PP), la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración real (ETR), se identificaron los períodos de déficit y exceso hídrico.

La presentación de los valores mensuales del balance hídrico, calculado considerando una capacidad de campo de 100 mm, e incluyendo variables como: precipitación (P), evapotranspiración potencial (EP), evapotranspiración real (ER), almacenamiento de agua en el suelo (Alm), cambio en el almacenaje (ΔAlm), deficiencia de humedad (Def) y exceso de humedad (Exc) (Tabla 11).

Durante la época seca (enero–abril), las precipitaciones resultan insuficientes para cubrir las demandas atmosféricas de evaporación y transpiración, generando un balance negativo y una

progresiva disminución del almacenamiento hídrico, que alcanza sus valores más bajos entre marzo (0,7 mm) y abril (0,2 mm). El déficit acumulado en este período asciende a 520 mm, lo que limita la *ETR* y genera condiciones de estrés hídrico que afectan el desarrollo de los cultivos no irrigados.

A partir de mayo, el incremento de la precipitación permite superar la *ETP* recargando el almacenamiento del suelo hasta alcanzar su capacidad máxima de 100 mm y generando excedentes hídricos desde junio hasta noviembre, con un exceso acumulado de 582 mm, garantizando la disponibilidad de agua para el desarrollo de los cultivos sin restricciones hídricas.

En noviembre y diciembre, la precipitación vuelve a descender por debajo de la *ETP*, iniciando un nuevo período de transición hacia el déficit hídrico. Se observa entonces una disminución en el almacenamiento, y las condiciones se tornan menos favorables para la agricultura de secano, haciendo necesario recurrir a riego complementario o al uso de cultivos adaptados a condiciones de bajo requerimiento hídrico.

Tabla 11.

Balace de agua en el suelo del territorio Santa Cruz-Nicoya para el período 1970-2024. Capacidad de campo 100 mm.

	Mes												Acum
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
PP	7	6	12	44	205	256	186	220	277	280	122	24	1639
ETP	130	132	163	167	149	127	130	127	113	111	108	118	1575
PP-ETP	- 123	- 127	- 151	- 124	56	129	56	93	164	169	15	- 95	-
Alm	11	3	0,7	0,2	56.2	100	100	100	100	100	100	39	-
Δ Alm	- 27	- 8	- 2,5	0,5	56	43,8	0	0	0	0	0	- 61	-
ETR	35	14	14	44	149	127	130	127	113	111	108	85	1057
Def	96	118	149	124	0	0	0	0	0	0	0	33	520
Exc	0	0	0	0	0	85,2	56	93	164	169	15	0	582

Nota: PP: Precipitación, ETP: Evapotranspiración, Alm: Almacenaje, Δ Alm: Cambio del almacenaje, ETR: Evapotranspiración Real, Def.: Deficiencia de Humedad, Exc.: Exceso de Humedad.

Fuente: Elaboración propia.

Para ilustrar la dinámica mensual del balance hídrico climático, mostrando gráficamente la evolución de la precipitación total (*PP*), la evapotranspiración potencial (*ETP*) y la evapotranspiración

real (*ETR*), donde se identifican claramente los períodos de déficit y exceso hídrico a lo largo del año (Figura 24).

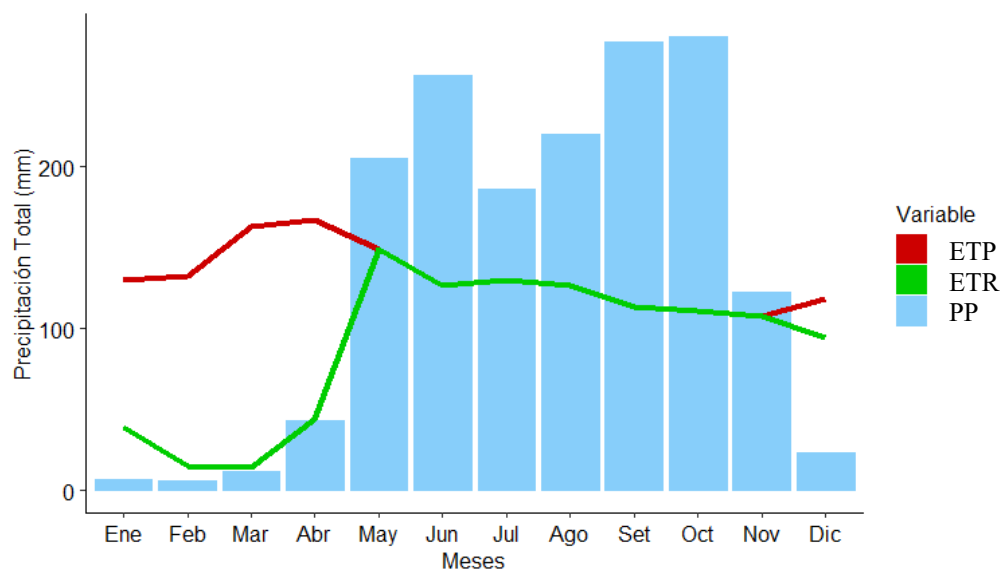
Durante los primeros cuatro meses del año (enero a abril), se observa una marcada discrepancia entre la *ETP* y la *PP*, con la línea de *ETR* posicionada por encima de la *PP*. Esto refleja un ambiente con alta demanda evaporativa frente a una escasa disponibilidad hídrica, lo que provoca un almacenamiento que disminuye progresivamente y una *ETP* limitada, ya que el suelo no logra satisfacer las necesidades atmosféricas de agua. Como resultado, se generan condiciones críticas de estrés hídrico, especialmente para los cultivos de secano.

A partir de mayo, la línea del *PP* cruza por encima de la de *ETP*, indicando una transición hacia una fase de aumento en la disponibilidad hídrica. Este cambio se traduce en un incremento rápido del almacenamiento de agua en el suelo, que alcanza su capacidad máxima de 100 mm, lo que permite que la *ETR* también se eleve hasta igualar a la *ETP*. Esta condición se mantiene durante el período lluvioso (junio a octubre), creando un ambiente hídrico óptimo para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, sin restricciones de agua.

Cabe destacar que en septiembre y octubre se registran los valores más altos de precipitación (164 mm y 169 mm, respectivamente), lo que indica la posibilidad de saturación del suelo y pérdidas por escorrentía, aspectos relevantes a considerar en la planificación del uso del agua y el manejo del suelo.

Finalmente, en noviembre y diciembre comienza una nueva fase de transición hacia condiciones de déficit hídrico. Aunque la *ETR* se mantiene elevada, empieza a disminuir paulatinamente junto con la *PP*, marcando así el inicio de un nuevo ciclo seco.

Figura 24.
Análisis del balance hídrico del suelo en el territorio Santa Cruz–Nicoya (1970–2024) considerando una capacidad de campo de 100 mm



5.3 Índices agroclimáticos y clasificación de Thornthwaite

El análisis de los índices agroclimáticos permitió caracterizar integralmente el territorio en estudio desde una perspectiva climática con enfoque en su potencial agrícola. Estos índices permiten evaluar las condiciones hídricas, térmicas y la distribución estacional de la humedad. En la Tabla 12 se presentan los índices agroclimáticos calculados mediante el método de Thornthwaite (1948), según los cuales el territorio se clasifica como **C₂A'sa'**, lo que corresponde a un clima Subhúmedo-Húmedo (C₂), Megatérmico (A'), con una moderada deficiencia de agua en verano (s) y un alto porcentaje de concentración estival de la eficiencia térmica (a'). Esta clasificación indica un clima cálido, con un marcado exceso hídrico entre mayo y octubre, y un déficit durante los meses secos.

Tabla 12
Índices agroclimáticos del territorio Santa Cruz-Nicoya período 1970-2024.

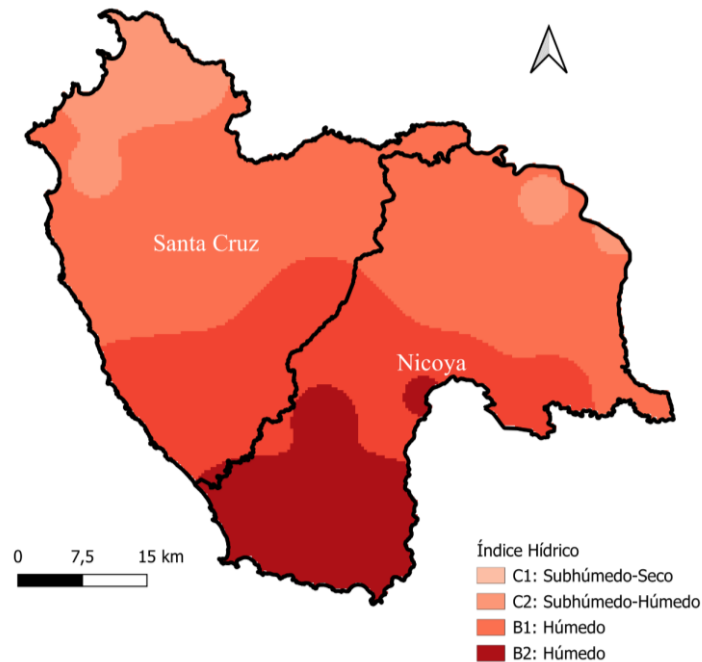
Índice	Valor	Rango de referencia	Interpretación
IH	17,15	20 a 0	C ₂ - Subhúmedo-Húmedo
I aridez	33,45	16,7 a 33,3	Moderada deficiencia de agua en verano
IET	1.575	>1,140	A' - Megatermal
Cet	45,07	<48.0	a' - Concentración térmica alta

Nota: IH: índice hídrico, I aridez: Índice de aridez, IET: Índice eficiencia térmica, Cet: Índice de concentración de eficiencia térmica.

El índice hídrico evidenció una transición desde condiciones subhúmedas secas (C1) en el norte hacia condiciones subhúmedas húmedas (C2) y húmedas (B1 y B2) en el sur del territorio (Figura 25). Este patrón refleja la influencia de los gradientes de precipitación, con una mayor acumulación de agua en la zona sur. Como resultado, la región suroeste presenta condiciones más húmedas y un menor déficit hídrico, mientras que el norte enfrenta mayores limitaciones para el desarrollo de cultivos de secano.

Figura 25.

Índice hídrico del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024

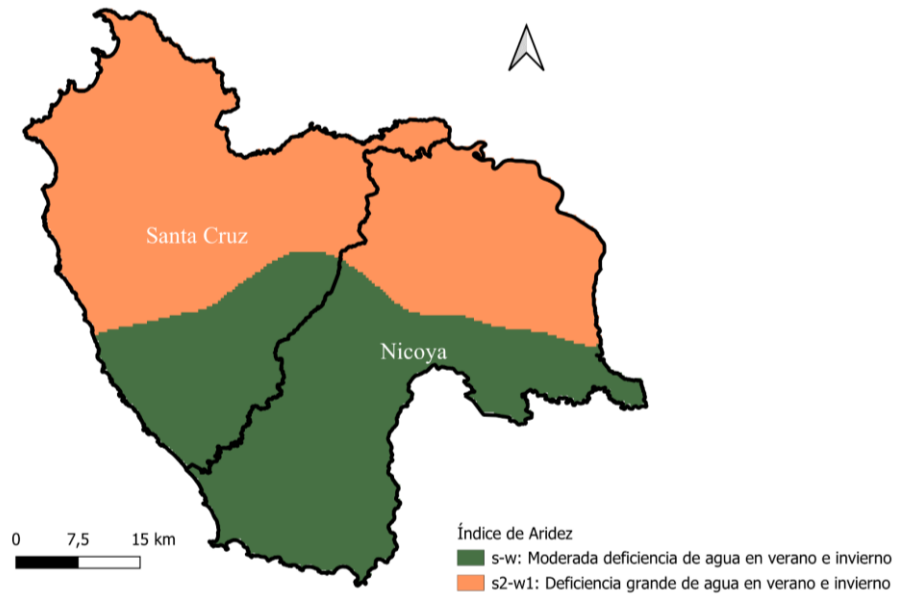


Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el índice de aridez se dividió en dos clases: $s-w$, correspondiente a condiciones seco-húmedo, y s_2-w_1 , que indica sequía estival moderada con humedad invernal leve (Figura 26). Estas clases se distribuyen de manera relativamente equitativa en el territorio, aunque se observa una mayor concentración de condiciones más áridas en la zona centro-sur, lo que implica un mayor estrés hídrico en esas áreas. En el norte del territorio las condiciones son ligeramente más favorables para el desarrollo de cultivos de secano; sin embargo, sigue siendo necesario considerar prácticas adaptativas para enfrentar el déficit hídrico.

Figura 26.

Índice aridez del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024

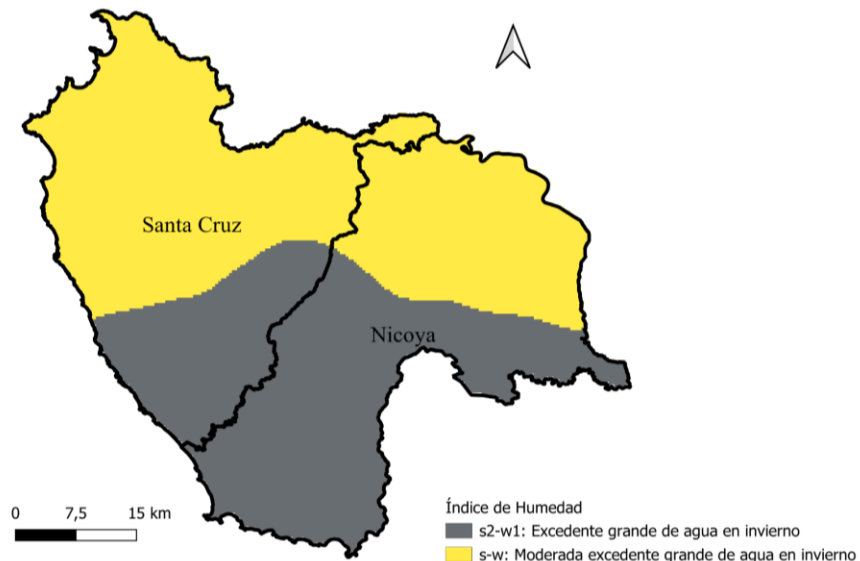


Fuente: Elaboración propia.

El índice de humedad también se agrupa en dos clases principales: $s-w$ y s_2-w_1 . Esta distribución muestra una mayor escasez de agua en el norte en comparación con el sur (Figura 27). La parte norte del territorio presenta condiciones con un déficit hídrico estival moderado, lo que puede afectar el rendimiento agrícola si no se implementan prácticas adecuadas de manejo del agua.

Figura 27.

Índice humedad del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024

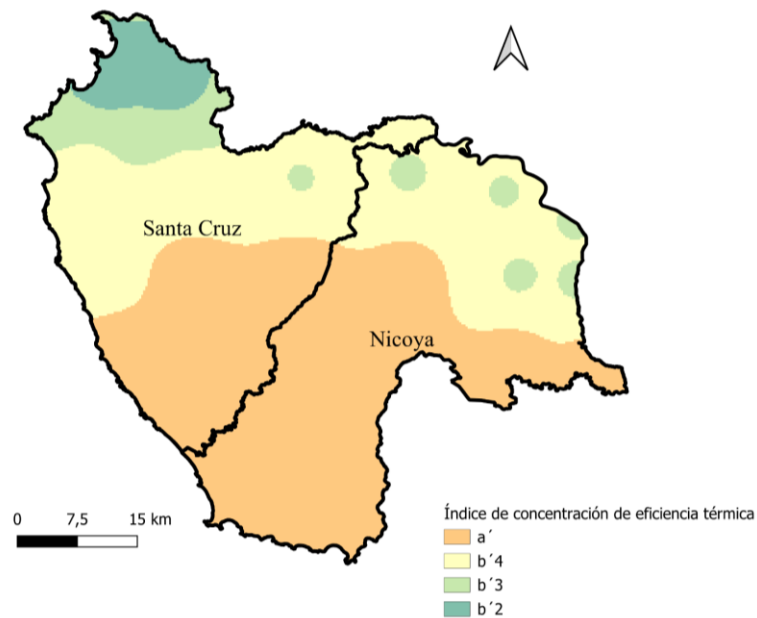


Fuente: Elaboración propia.

El índice de concentración estacional de eficiencia térmica muestra la proporción de la eficiencia térmica total acumulada durante la época lluviosa (mayo a octubre) (Figura 28). En el territorio de Santa Cruz–Nicoya se observan distintas clases de concentración estacional: en el extremo norte se identifican zonas con la clase *b'2* (56,3–61,6 %), lo que indica una marcada concentración de eficiencia térmica durante la estación húmeda. Hacia el centro y sureste del territorio predominan las clases *b'3* (51,9–56,3 %) y *b'4* (48,0–51,9 %), que representan niveles intermedios de acumulación térmica. En la región sur y suroeste del cantón de Nicoya predomina la clase *a'* (valores <48 %), reflejando una menor estacionalidad térmica, con una distribución más uniforme de la eficiencia térmica a lo largo del año.

Figura 28.

Índice de concentración estacional de eficiencia térmica del territorio Santa Cruz-Nicoya para el período 1970-2024

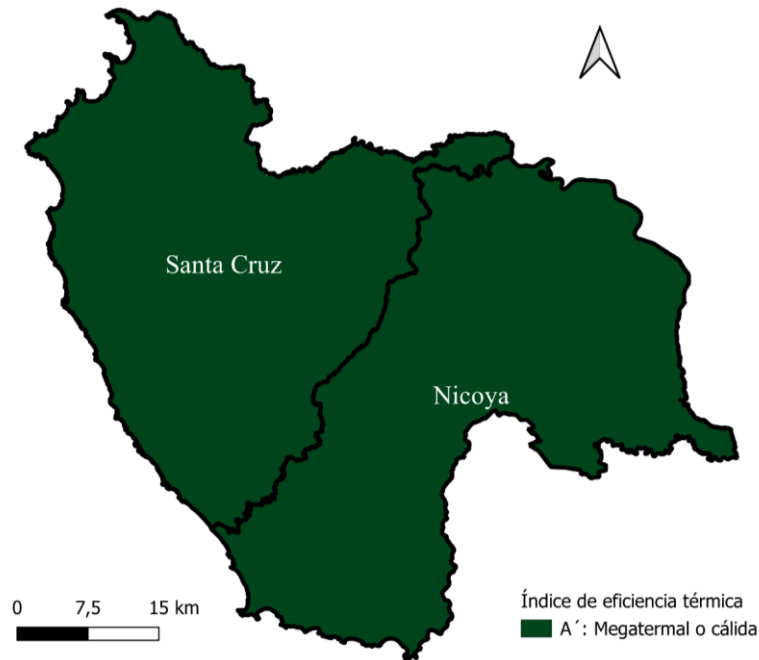


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29 se presenta el mapa de eficiencia térmica del territorio en estudio. Este índice muestra una distribución homogénea en toda el área, con valores que superan las 1.500 unidades térmicas. Estos valores corresponden a condiciones climáticas megatérmicas, propias de un clima cálido. La elevada eficiencia térmica favorece el desarrollo de cultivos de especies tropicales, especialmente aquellos de ciclo corto.

Figura 29

Índice de eficiencia térmica del territorio Santa Cruz y Nicoya para el período 1970-2024



Fuente: Elaboración propia.

5.4 Calendario técnico de siembra basado en el análisis agroclimático

Como un ejercicio de aplicación se generó un calendario de siembra para identificar las ventanas óptimas de siembra de forrajes de grano en la Finca Berraca en Barrio Limón de Santa Cruz, Guanacaste. Se elaboró un calendario técnico fundamentado en un conjunto de indicadores agroclimáticos para apoyar la toma de decisiones agrícolas. En su elaboración se integraron variables meteorológicas y espectrales correspondientes al período 2016–2024, con una resolución temporal de 16 días.

El análisis de la evolución temporal evidenció una marcada estacionalidad climática durante los primeros cuatro meses del año (enero–abril), cuando predomina el déficit hídrico y los balances negativos ($PP < ETP$), con bajos valores de $NDVI (< 0,22)$ y acumulación de GDD superior a $280\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aunque las temperaturas en este período se mantienen elevadas ($26,5\text{--}28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y acumulan suficiente

energía térmica para el desarrollo vegetativo, la limitada disponibilidad de agua en el suelo y la alta demanda evaporativa dificultan el establecimiento de los cultivos.

A partir de mediados de mayo, se registran condiciones más favorables, con un incremento de la precipitación (> 176 mm), balance hídrico positivo (+ 104,25 mm), humedad relativa superior al 88 % y un aumento del *NDVI* hasta valores por encima de 0,28, lo que sugiere el inicio de condiciones óptimas para la emergencia de los cultivos. Este período también coincide con una acumulación de *GDD* (> 265 °C), temperaturas óptimas (26–27 °C) y bajos niveles de estrés térmico.

Durante los meses de junio a septiembre, el sistema climático se mantiene en condiciones de humedad estables, con balances hídricos positivos o neutros y *NDVI* sostenido entre 0,25 y 0,28 estos valores corresponden principalmente a coberturas dominadas por pastizales, matorrales y áreas agrícolas en fase vegetativa temprana. Estas condiciones reflejan una mayor cobertura vegetal y la capacidad del sistema para sostener la demanda hídrica de los cultivos. Además, se alcanza una acumulación suficiente de *GDD* (> 260 °C por período), lo que garantiza un entorno térmico favorable para cultivos de ciclo intermedio.

Este enfoque integrado permite definir con mayor precisión las ventanas de siembra, priorizando los períodos con temperaturas adecuadas, acumulación térmica suficiente, cobertura vegetal emergente y balance hídrico favorable. Asimismo, los umbrales de *NDVI* (> 0,25) y *GDD* (> 260 °C) corresponden a referencias generales para cultivos anuales en sistemas de secano, cuya aplicación específica requiere ajustes en función de la variedad cultivada y las características edáficas locales.

Tabla 13

Condiciones agroclimáticas del territorio Santa Cruz-Nicoya período 2016-2024.

Periodo 16 días	PP (mm)	ETP (mm)	Balance	NDVI	T_med (°C)	HR (%)	GDD °C	IDH
01 ene	1,99	71,38	- 69,39	0,2319	26,75	67,4	280,1	0,028
17 ene	6,96	73,86	- 66,89	0,2215	26,97	65,5	286,7	0,094
02 feb	0,59	76,39	- 75,80	0,2117	27,15	60,0	293,7	0,008
18 feb	0,43	80,69	- 80,26	0,1922	27,49	59,7	298,2	0,005
05 mar	5,14	89,85	- 84,71	0,1886	28,25	60,2	307,1	0,057

21 mar	3,38	92,15	- 88,77	0,1898	28,36	61,3	310,0	0,037
06 abr	21,45	93,24	- 71,79	0,194	28,35	64,0	312,7	0,230
22 abr	26,43	91,09	- 64,66	0,2322	28,07	70,8	303,3	0,290
08 may	69,27	81,50	- 12,23	0,2095	27,12	80,4	285,2	0,850
24 may	176,12	71,87	104,25	0,2832	26,11	88,2	268,7	2,451
09 jun	107,39	72,74	34,65	0,2661	26,18	87,4	265,7	1,476
25 jun	57,53	70,96	- 13,43	0,2618	25,99	85,9	268,2	0,811
11 jul	62,16	73,01	- 10,85	0,2184	26,24	85,1	270,3	0,851
27 jul	82,41	71,91	10,50	0,2765	26,18	85,3	268,8	1,146
12 ago	70,66	68,87	1,79	0,2463	25,93	85,5	266,3	1,026
28 ago	98,66	66,05	32,62	0,2548	25,71	88,0	265,7	1,494
13 sep	126,74	63,86	62,88	0,2377	25,55	89,5	259,9	1,985
29 sep	203,18	61,22	141,96	0,2245	25,33	89,1	257,5	3,319
15 oct	74,31	62,50	11,81	0,267	25,57	88,5	255,4	1,189
31 oct	49,52	60,66	- 11,14	0,2108	25,43	86,9	254,9	0,816
16 nov	25,97	61,49	- 35,53	0,2747	25,60	83,2	259,6	0,422
02 dic	3,13	64,74	- 61,61	0,2335	26,02	77,3	265,6	0,048
18 dic	3,32	66,7	- 63,38	0,2234	26,26	71,3	272,0	0,050

Fuente: Elaboración propia.

La presentación la comparación entre los parámetros agroclimáticos de la Finca Berraca en Santa Cruz y los requerimientos de maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum bicolor*) y soya (*Glycine max*) (Tabla 14). La altitud del área de estudio (0–959 m.s.n.m.) se encuentra dentro de los rangos óptimos reportados para los tres cultivos, que varían entre 0 y 3000 m.s.n.m. El pH del suelo (5,03–6,80) es compatible con los intervalos recomendados, que oscilan entre 5,0 y 8,5 según la especie, lo que indica condiciones favorables para su desarrollo, salvo por eventuales ajustes localizados de acidez.

En cuanto a la precipitación anual, Santa Cruz presenta un rango amplio (181,85–2.033,76 mm), que cubre adecuadamente las necesidades hídricas de los cultivos, cuyos requerimientos varían entre 250 y 840 mm dependiendo de la especie. No obstante, se destaca que el maíz es más sensible al estrés por sequía, mientras que el sorgo y la soya muestran mayor tolerancia a los déficits hídricos, lo que implica diferencias en el riesgo climático durante los períodos secos.

Por su parte, la temperatura registrada en el territorio del periodo 2016-2024 (24,24–31,57 °C) es acorde con los rangos óptimos para la germinación y desarrollo de las tres especies, aunque en el caso de la soya se recomienda especial atención a la temperatura de siembra, que es preferiblemente más baja.

En síntesis, los resultados muestran que las condiciones agroclimáticas del territorio de Santa Cruz son mayoritariamente aptas para el establecimiento de maíz, sorgo y soya, con la salvedad de la susceptibilidad del maíz a la sequía y la necesidad de un manejo agronómico específico para optimizar el establecimiento de la soya.

Tabla 14

Datos agroclimáticos del territorio Santa Cruz, y requerimientos agroecológicos de cultivos de maíz (Zea mays), sorgo (Sorghum bicolor (L.) Moench) y soya (Glycine max).

Parámetro	Territorio			
	Santa Cruz	Maíz	Sorgo	Soya
Altitud (m.s.n.m):	0 – 959	5– 2900 (Ruiz et al., 2009)	0 – 1700 (Ruiz, 1996)	0 – 3000 (Aceves et al., 2008)
Precipitación (mm):	181,85 – 2.033,76	400 – 500 (Santacruz y Santacruz, 2007)	450 – 650 (Baradas, 1994)	250 – 840 (Aceves et al., 2008)
pH:	5,03 – 6,80	5.5 – 7.5 (Ignatieff, citado por Moreno, 1992)	5.0 – 8.5 (Purseglove, 1985; FAO, 1994)	6.8 – 7 (Whitney, 1997)
Drenaje:	Bueno/Moderadamente bueno	Buen drenaje (Baradas, 1994)	Buen drenaje (FAO, 1994)	Buen drenaje (Doorenbos y Kassam, 1979; Schapaugh, 1997)
Temperatura (°C): (min-max)	24,24– 31,57	25 – 30 (Santacruz y Santacruz, 2007)	24 – 30 (Acuña et al., 2002)	siembra 15 a 18°C floración 25°C Desarrollo 20-30°C (Aceves et al., 2008)
Tolerancia sequía (mm)	–	sensible al estrés por sequía (Traore et al., 2000)	500– 800 (Cook et al., 2005)	Es resistente a sequía (Thuzar et al., 2010)

Fuente: Elaboración propia.

Se presentaron los períodos óptimos de siembra para maíz, sorgo y soya en la localidad de Santa Cruz, definidos a partir de indicadores climáticos y fenológicos (Tabla 15).

Para el maíz, se identificaron dos ventanas de siembra. La primera, se ubica entre el 24 de mayo y el 9 de junio, cuando la precipitación supera los 100 mm, el balance hídrico es positivo y el NDVI se sitúa por encima de 0,26, reflejando una adecuada humedad del suelo. Además, en este intervalo se registran temperaturas y acumulación de GDD acordes con los requerimientos térmicos para la germinación y el desarrollo inicial del cultivo. La segunda ventana, correspondiente a la siembra postrera, se extiende entre el 27 de agosto y el 15 de septiembre, aprovechando la reactivación de las lluvias tras la canícula y la persistencia de condiciones térmicas favorables (temperaturas entre 25 °C y 26 °C, NDVI > 0,24 y balances hídricos positivos o neutros). Esta etapa permite establecer una segunda cosecha de maíz en sistemas de temporal, especialmente en suelos con buena retención de humedad.

En el caso del sorgo, se identificaron también dos ventanas de siembra: una principal, coincidente con la del maíz de primera (24 de mayo–9 de junio), y una secundaria entre el 27 de julio y el 13 de septiembre, aprovechando la tolerancia del cultivo al déficit hídrico y su amplio rango térmico.

Para la soya, el período recomendado de siembra de primera abarca del 8 de mayo al 9 de junio, caracterizado por temperaturas superiores a 25 °C, balances hídricos positivos o cercanos a cero, y valores de NDVI que indican condiciones favorables para el establecimiento y la emergencia del cultivo. Asimismo, se identificó una ventana postrera entre el 25 de agosto y el 10 de septiembre, que puede aprovecharse bajo sistemas de secano o siembra directa, aprovechando la humedad residual posterior a la canícula y temperaturas promedio de 25–26 °C.

Tabla 15

Periodo óptimo de siembra los cultivos de maíz (Zea mays), sorgo (Sorghum bicolor (L.) Moench) y soya (Glycine max) en la localidad de Santa Cruz, Guanacaste

Cultivo	Periodos recomendados	Justificación agroclimática
Maíz	24 de mayo – 9 de junio (1°) 27 de agosto – 15 de septiembre (2°)	Precipitación >100 mm, balance hídrico positivo, NDVI >0.26, temperatura y GDD ideales.
Sorgo	24 de mayo – 9 de junio (1°) 27 de julio – 13 de septiembre (2°)	Amplio rango térmico, tolerancia a déficit hídrico, NDVI y GDD compatibles.

Soya	8 de mayo – 9 de junio (1°) 25 de agosto – 10 de septiembre (2°)	Temperatura >25 °C (adaptada al trópico), balance cercano a cero o positivo, buen NDVI.
------	---	---

Nota: (1°) = primera siembra, (2°) = segunda siembra

Fuente: Elaboración propia

6. DISCUSIÓN

6.1 Caracterización climática

6.1.1 Estadísticas descriptivas

Los resultados muestran una alta variabilidad interanual de la precipitación, con eventos extremos que elevan la media a 2.179 mm. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Hidalgo et al. (2021) y Imbach et al. (2018), quienes señalan que el Corredor Seco Centroamericano presenta fuertes contrastes pluviométricos asociados a la influencia del ENSO (El Niño–Oscilación del Sur). En particular, los años Niño tienden a provocar sequías severas en el Pacífico Norte costarricense, mientras que los años Niña intensifican las lluvias torrenciales. Asimismo, Cabral & Lucena (2020) y Gbangou et al. (2020) destacan que esta alta variabilidad de la precipitación es una tendencia observada en regiones tropicales semiáridas, indicando una mayor frecuencia de eventos extremos bajo escenarios de cambio climático.

Las temperaturas, por otro lado, mostraron mayor estabilidad, especialmente en los valores mínimos. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Zee et al. (2012) y Alfaro-Córdoba et al. (2024), quienes subrayan que las zonas tropicales presentan oscilaciones térmicas limitadas debido a la constancia radiativa anual. Sin embargo, los picos de temperatura máxima (hasta 36,4 °C) son consistentes con los valores proyectados por Imbach et al. (2018) y CEPAL (2023), que advierten un incremento progresivo de las temperaturas extremas en la región, lo que aumenta la evapotranspiración y el estrés térmico en cultivos sensibles como el maíz o el frijol (Jagadish et al., 2021; Doorenbos & Kassam, 1979).

En cuanto a la humedad relativa, la amplitud observada (41–96 %) refleja la marcada estacionalidad de la zona, similar a lo encontrado por Jiménez (1985) y INDER (2016) para Guanacaste. Durante la estación seca, los bajos valores de humedad combinados con temperaturas elevadas generan un déficit hídrico crítico, reduciendo la disponibilidad de agua en el suelo (Haftom et al., 2019; Hargreaves & Samani, 1985). En la estación lluviosa, en cambio, los niveles altos de humedad relativa favorecen la aparición de enfermedades fúngicas, una relación también documentada por Lopian (2018) y Bouroncle et al. (2015) en contextos agrícolas costarricenses.

Por último, la velocidad del viento mostró gran variabilidad (0,12–8,66 m/s), lo cual es característico de la región Pacífico Norte debido a la influencia de los vientos alisios del noreste, según Álvarez (2018). Esta dinámica eólica tiene implicaciones agroclimáticas relevantes: puede aumentar la evapotranspiración (Fan et al., 2020; Kim & Johnson, 2025) y favorecer la dispersión de plagas y patógenos (Desmarteau et al., 2019; Li et al., 2025). En cultivos de polinización anemófila como el sorgo, vientos intensos pueden mejorar el cuajado floral, pero en frutales pueden causar daños físicos y pérdidas de rendimiento.

En conjunto, la combinación de alta variabilidad pluviométrica, temperaturas elevadas, baja humedad estacional y vientos fuertes define un entorno agroclimático altamente vulnerable, donde las estrategias de adaptación como la gestión del agua, la selección de cultivares tolerantes y el ajuste del calendario agrícola son fundamentales (Bouroncle et al., 2015; Apriyana et al., 2021; Banerjee et al., 2024).

6.1.2 Detección de tendencias y estacionalidad

El análisis de tendencias mediante el test de Mann-Kendall permitió evaluar la evolución temporal de las variables climáticas en el territorio de Santa Cruz–Nicoya durante el período 1970–2024. Los resultados revelaron una tendencia decreciente en la precipitación acumulada ($\tau = -0,0166$; $p = 0,0004$), lo que sugiere una disminución moderada en las lluvias en la región. Este resultado concuerda con los patrones documentados para el Corredor Seco Centroamericano, donde diversos estudios han documentado una disminución de la precipitación y un acortamiento del período lluvioso particularmente en años asociados a condiciones ENOS (El Niño), que tienden a intensificar la sequedad atmosférica en la región (Díaz Bolaños, 2019; Hidalgo et al., 2021; Quirós, 2023; Zee et al., 2012).

Tales tendencias se asocian principalmente a la intensificación del fenómeno ENSO (El Niño–Oscilación del Sur) y al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, que modifican la dinámica de lluvias en la vertiente del Pacífico costarricense (Steinhoff et al., 2014; Sun et al., 2015). Esta reducción pluviométrica evidenciada en la tendencia descendente de la precipitación anual mostrada en la tabla 8 incrementa la vulnerabilidad hídrica de los sistemas agrícolas de secano y subraya la necesidad de estrategias de adaptación en la gestión del agua, tales como la captación de

lluvias, el riego tecnificado o el uso de variedades más tolerantes al estrés hídrico (Bouroncle et al., 2015; CEPAL, 2023).

Por su parte, las temperaturas mínima, máxima y media presentaron tendencias positivas significativas ($p < 0,001$), confirmando un proceso de calentamiento sostenido del territorio. Este incremento térmico es coherente con las proyecciones nacionales de cambio climático, que estiman un aumento promedio de 1,3 °C hacia 2030, especialmente en la zona del Pacífico (Bouroncle et al., 2015). El aumento de las temperaturas máximas puede acelerar los ciclos fenológicos de los cultivos, incrementar la evapotranspiración potencial y elevar el riesgo de estrés térmico y déficit hídrico, afectando la productividad de especies como maíz, frijol o arroz (Moore et al., 2021; Jagadish et al., 2021; Zhu et al., 2021). De forma paralela, las temperaturas mínimas también mostraron una tendencia ascendente, lo que puede alterar los balances energéticos y afectar los procesos de floración y fructificación, especialmente en cultivos perennes (Apriyana et al., 2021).

La humedad relativa exhibió una tendencia decreciente ($\tau = -0,018$; $p = 6,29e-05$), reflejando un ambiente progresivamente más seco, en coherencia con el aumento térmico y la disminución de la precipitación. Este descenso amplifica los déficits hídricos estacionales, particularmente durante la época seca, afectando la recarga hídrica del suelo y aumentando la evapotranspiración (Hargreaves & Samani, 1985; Haftom et al., 2019). Por el contrario, la velocidad del viento mostró una ligera tendencia ascendente ($\tau = 0,0210$; $p = 8,22e-06$), probablemente asociada al fortalecimiento de los vientos alisios del noreste, que caracterizan la dinámica atmosférica del Pacífico Norte (Álvarez, 2018). Este incremento puede intensificar la pérdida de agua por evaporación y favorecer la dispersión de plagas, esporas y enfermedades, un fenómeno también documentado en otros ambientes tropicales (Desmarteau et al., 2019; Li et al., 2025).

El análisis de correlación de Pearson evidenció relaciones lineales coherentes entre las variables. Se observó una alta correlación positiva entre la temperatura máxima y la media ($r = 0,937$), así como entre la mínima y la media ($r = 0,597$), lo cual confirma que los valores medios están fuertemente determinados por los extremos térmicos, como han reportado Ahmed et al. (2022) para climas tropicales. Las correlaciones negativas entre la temperatura máxima y la humedad relativa ($r = -0,875$) y entre la temperatura máxima y la precipitación ($r = -0,578$) indican que los días más cálidos suelen coincidir con condiciones más secas, incrementando el estrés hídrico (Díaz Bolaños, 2019;

Moore et al., 2021). A su vez, la correlación positiva entre la precipitación y la humedad relativa ($r = 0,585$) confirma la dependencia de los eventos de lluvia respecto a altos niveles de humedad atmosférica, como también describe CEPAL (2023). Finalmente, la correlación negativa entre la velocidad del viento y la humedad relativa ($r = -0,647$) se explica por el efecto desecante del viento sobre la capa superficial del aire y del suelo (Fan et al., 2020; Kim & Johnson, 2025).

Los resultados del análisis de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) revelaron patrones de dependencia temporal característicos de las series meteorológicas. En la precipitación, la ACF mostró un descenso lento, lo que indica persistencia de las condiciones lluviosas o secas en el tiempo, probablemente influenciadas por ciclos interanuales asociados a El Niño y La Niña (Steinhoff et al., 2014; Sun et al., 2015). La humedad relativa y la velocidad del viento mostraron comportamientos similares, evidenciando una memoria climática donde las condiciones actuales dependen de los períodos previos. En las series de temperatura, tanto la ACF como la PACF mostraron un descenso gradual, con picos marcados en los primeros rezagos, lo que sugiere una persistencia térmica asociada a la inercia atmosférica y a la influencia de fenómenos prolongados como olas de calor o frentes fríos (Marx et al., 2021).

Finalmente, el análisis Wavelet permitió explorar la variabilidad estacional y la periodicidad de las series temporales. Todas las variables presentaron un período dominante cercano a los 362 días, reflejando una estacionalidad anual bien definida, típica de las regiones tropicales con una marcada alternancia entre época lluviosa y seca (Hidalgo et al., 2019). Las temperaturas y la humedad relativa mostraron altas potencias espectrales, lo que evidencia una fuerte respuesta a la estacionalidad, mientras que la precipitación presentó una potencia más débil, sugiriendo la influencia adicional de fenómenos climáticos de gran escala que pueden alterar la distribución de las lluvias intraanual (Sun et al., 2015; Imbach et al., 2018).

En conjunto, los resultados confirman que el territorio de Santa Cruz–Nicoya experimenta una tendencia hacia condiciones más cálidas, secas y ventosas, con una estacionalidad pronunciada modulada por la variabilidad climática global. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de fortalecer la resiliencia agroclimática local mediante estrategias de adaptación basadas en evidencia, como la planificación de calendarios agrícolas, la diversificación productiva, y el uso de información climática para la gestión anticipada de riesgos (Bouroncle et al., 2015; Banerjee et al., 2024).

6.1.3 Implicaciones de la variabilidad estacional y anual

El análisis de la variabilidad estacional y anual de las variables climáticas en el territorio de Santa Cruz–Nicoya revela un régimen climático altamente contrastante, definido por una marcada alternancia entre una estación lluviosa concentrada entre mayo y octubre y una estación seca prolongada de diciembre a abril. Este patrón bimodal de precipitación y humedad relativa es característico del Pacífico Norte costarricense, donde la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y los vientos alisios determinan los ciclos estacionales (Hidalgo et al., 2021; Imbach et al., 2018). La concentración de las lluvias en pocos meses genera una disponibilidad hídrica irregular, que afecta tanto la recarga de acuíferos como la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de secano.

La evidencia de los diagramas de cajas y las curvas KDE muestra una alta asimetría en la precipitación, con valores extremos y alta dispersión durante la estación lluviosa, mientras que los meses secos registran precipitaciones menores a 50 mm. Está marcada desigualdad refleja la dependencia del régimen pluvial respecto a forzantes climáticos de gran escala, especialmente El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), cuya fase cálida suele inducir sequías regionales, y su fase fría, precipitaciones intensas (Steinhoff et al., 2014; Sun et al., 2015). Este comportamiento coincide con la tendencia a la aridificación progresiva del Pacífico Norte reportada en estudios recientes (Díaz Bolaños, 2019; CEPAL, 2023). La concentración de eventos extremos en periodos cortos tiene implicaciones directas para el manejo del agua: aumenta la escorrentía superficial, reduce la infiltración y, por ende, limita la recarga hídrica, agravando los déficits de agua en la estación seca (Gbangou et al., 2020; Chipanshi et al., 2022).

Desde el punto de vista agroclimático, esta alta irregularidad temporal en la precipitación constituye uno de los mayores retos para la seguridad alimentaria y la planificación productiva. En sistemas agrícolas dependientes de la lluvia, como los predominantes en Santa Cruz–Nicoya, la variabilidad del inicio y duración de la estación lluviosa condiciona las fechas óptimas de siembra y cosecha (Bouroncle et al., 2015). Años con lluvias tardías o interrumpidas pueden reducir significativamente los rendimientos de maíz, sorgo o frijol, cultivos clave del Corredor Seco Centroamericano (Hidalgo et al., 2019; Quirós, 2023). Por ello, comprender las tendencias intraanual

es esencial para diseñar calendarios agrícolas adaptativos y sistemas de alerta temprana frente a sequías.

En contraste con la precipitación, las temperaturas máxima, media y mínima mostraron una estacionalidad menos marcada, aunque con incrementos notorios en los meses de marzo y abril, cuando se registran las condiciones más cálidas. Este aumento térmico se asocia a la mayor radiación solar y aumento de temperatura media lo que pueden comprometer el rendimiento agrícola (Jagadish et al., 2021). Las curvas KDE muestran un desplazamiento hacia valores más altos, evidencia de la intensificación térmica en años recientes, en coherencia con las proyecciones de Bouroncle et al. (2015) y CEPAL (2023), que estiman un incremento promedio superior a 1,3 °C hacia 2030 en la región Pacífica. Este calentamiento tiene efectos sinérgicos con la disminución de la humedad relativa: aumenta la evapotranspiración potencial, reduce la humedad del suelo y acelera los procesos de estrés hídrico y térmico (Haftom et al., 2019; Fan et al., 2020).

La humedad relativa refuerza este patrón de vulnerabilidad: sus valores mínimos coinciden con el periodo seco y con las temperaturas más altas, potenciando la demanda evaporativa de la atmósfera. La correlación negativa entre temperatura y humedad, ya evidenciada en los análisis previos, refleja un acoplamiento climático que exacerba los impactos de los veranos prolongados. Esta condición limita el desarrollo de cultivos de ciclo corto y aumenta la necesidad de estrategias de manejo de suelo y cobertura vegetal para conservar la humedad (Banerjee et al., 2024). A nivel productivo, estas condiciones fomentan la disminución de la productividad y la pérdida de biomasa en sistemas de pastoreo y cultivos anuales (Malhi et al., 2021).

Por su parte, la velocidad del viento mostró máximos entre enero y marzo, coincidiendo con la época de menor humedad. Este fenómeno está ligado al reforzamiento de los alisios del noreste y contribuye tanto a la dispersión de humedad atmosférica como al incremento de la evapotranspiración, agravando el déficit hídrico (Desmarteau et al., 2019; Li et al., 2025). Además, vientos intensos pueden ocasionar daños mecánicos en cultivos de porte alto o frutales y dificultar la aplicación de insumos agrícolas, lo que añade un componente operativo al riesgo climático.

En síntesis, la combinación de alta estacionalidad, concentración de lluvias en pocos meses, incremento térmico y reducción de la humedad relativa evidencia un proceso de aridificación y estrés climático progresivo en el territorio de Santa Cruz–Nicoya. Esta situación subraya la necesidad de

políticas públicas adaptativas que articulen la información climática con la planificación territorial y la seguridad alimentaria, fortaleciendo las capacidades locales frente a la variabilidad climática que caracteriza al Corredor Seco Centroamericano.

6.2 Balance hídrico climático (BHC)

El análisis de las condiciones atmosféricas en la región de Santa Cruz–Nicoya evidencia una marcada estacionalidad climática, coherente con su ubicación dentro del Corredor Seco Centroamericano (Díaz Bolaños, 2019). La alternancia entre una estación seca (diciembre–abril), caracterizada por altas temperaturas y vientos intensos, y una estación lluviosa (mayo–noviembre) con precipitaciones abundantes, confirma el patrón bimodal que impone un ciclo recurrente de escasez y abundancia hídrica.

Los resultados muestran que la combinación de elevadas temperaturas y baja humedad relativa durante la estación seca intensifica la demanda evaporativa, validando a escala local los principios del balance hídrico descritos por Burak et al. (2022) y Hendrayana et al. (2021). Este comportamiento cíclico, como señalan Bouroncle et al. (2015), representa el principal desafío para la sostenibilidad agrícola regional, al someter los sistemas productivos a varios meses consecutivos de estrés hídrico severo.

Más allá de la simple alternancia entre una época seca y una lluviosa, el análisis cuantitativo del balance hídrico climático (BHC) permitió dimensionar la magnitud de esta dualidad. Se estimó un déficit hídrico acumulado de 520 mm durante la estación seca, un valor que supera ampliamente la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (100 mm). Este déficit no es únicamente un indicador climático, sino una limitante fisiológica directa para la agricultura de secano, al generar condiciones de estrés hídrico que, como documentan Moore et al. (2021), pueden inhibir la fotosíntesis y reducir significativamente el rendimiento de los cultivos. La magnitud de este déficit resalta la fuerte dependencia de la producción agrícola respecto al riego o al uso de cultivos altamente adaptados a la sequía durante casi la mitad del año.

En contraparte, el excedente hídrico de hasta 585 mm registrado durante la estación lluviosa resulta igualmente relevante. Este volumen no solo permite que la evapotranspiración real (ETR) satisfaga plenamente la demanda atmosférica, sino que constituye el principal motor para la recarga

de acuíferos y la reposición de humedad edáfica, procesos esenciales para la resiliencia ecosistémica (Reichardt & Timm, 2020). Además, dicho excedente representa una oportunidad estratégica para el desarrollo de sistemas de cosecha y almacenamiento de agua, orientados a su aprovechamiento durante los meses de déficit, una medida de adaptación prioritaria ante escenarios de cambio climático (Malhi et al., 2021).

El análisis de los patrones horarios de precipitación aporta un nivel de detalle relevante para la planificación agronómica. La concentración de lluvias en las horas vespertinas (10:00–16:00) responde al patrón típico de convección tropical asociado al calentamiento diurno de la superficie (Hohenegger & Stevens, 2018). Este conocimiento resulta particularmente útil para la programación de labores agrícolas, como la aplicación de productos fitosanitarios, evitando las horas de mayor probabilidad de lluvia que podrían reducir su efectividad.

Asimismo, la identificación de los meses de transición (noviembre y diciembre) como el inicio del agotamiento progresivo del agua almacenada en el suelo constituye uno de los hallazgos más relevantes desde el punto de vista aplicado. Este período representa una ventana crítica para la toma de decisiones agrícolas, donde la oportunidad de implementar riegos suplementarios o seleccionar variedades de ciclo corto depende directamente de una interpretación precisa de las condiciones hídricas. En este sentido, el monitoreo continuo del balance hídrico durante los meses de transición, tal como sugieren Lu et al. (2022) para la optimización de la estimación de la evapotranspiración real, se convierte en una herramienta estratégica para la planificación y adaptación agrícola en el territorio Santa Cruz–Nicoya.

6.3 Índices agroclimáticos y clasificación climática de Thornthwaite

La clasificación climática del territorio Santa Cruz–Nicoya como $C_2A's_2b'_3$ según Thornthwaite revela una complejidad que las categorías más generales como la de Köppen (A_w , clima tropical seco) no logran capturar plenamente. Si bien la designación A_w caracteriza acertadamente la marcada estacionalidad de las lluvias (Castro & Gironás, 2021), el sistema de Thornthwaite aporta una dimensión adicional al cuantificar la magnitud del desequilibrio hídrico. El subíndice s_2 , que indica una “deficiencia grande de agua en verano”, no constituye sólo una descripción climática, sino una advertencia agroclimática. Este hallazgo transforma una característica general del clima en un

factor de riesgo medible para la producción agrícola, exigiendo una planificación que incorpore medidas explícitas de adaptación, como las propuestas por Malhi et al. (2021) y Chipanshi et al. (2022), particularmente para los vulnerables cultivos de secano.

El análisis espacial de los índices agroclimáticos confirma la presencia de un gradiente hídrico bien definido, con condiciones más húmedas hacia el sur y más secas al norte del territorio. Esta variabilidad intrarregional, probablemente modulada por la orografía local y su interacción con los patrones de viento y precipitación, coincide con lo descrito por Alwan et al. (2019) y Murphy y Hurtado (2016), quienes destacan que los factores topográficos y microclimáticos pueden generar diferencias significativas dentro de una misma zona climática general.

Las implicaciones de este hallazgo ocasionan que pensar en una política agrícola uniforme para el territorio Santa Cruz–Nicoya sería ineficaz ante la diversidad de condiciones agroclimáticas locales. La zonificación derivada de los índices de aridez y humedad demanda estrategias de manejo diferenciadas. Mientras las áreas del sur deberían priorizar la gestión de excedentes hídricos y la diversificación productiva, las del norte requieren una optimización del uso del agua, mediante técnicas de riego eficiente, manejo de cobertura vegetal y selección de variedades tolerantes a la sequía, tal como recomiendan Ahmed et al. (2022) y Burak et al. (2022). En este sentido, el presente estudio constituye una base técnica para avanzar desde recomendaciones generales hacia una planificación agrícola de precisión, adaptada a la realidad territorial.

Entre los resultados más relevantes para la optimización de los ciclos de cultivo, destaca la marcada estacionalidad de la eficiencia térmica (b'_3), que evidencia una alta concentración de energía útil para el crecimiento vegetal precisamente durante la estación lluviosa. Esta sincronía entre la disponibilidad de agua y la energía térmica define una ventana agroclimática óptima para el desarrollo de cultivos de ciclo corto o con altos requerimientos térmicos, un principio central en la agrometeorología aplicada (Mathieu & Aires, 2018; Megh et al., 2015).

Asimismo, la condición megatérmica (A') con eficiencias térmicas superiores a 1500 unidades confirma el alto potencial productivo del territorio para especies tropicales, promoviendo la realización de múltiples ciclos agrícolas anuales (Araya et al., 2010). No obstante, este potencial se ve limitado por el severo déficit hídrico de la estación seca, lo que genera que éxito agrícola en Santa

Cruz–Nicoya depende no sólo de aprovechar la época lluviosa, sino, sobre todo, de gestionar eficientemente la escasez hídrica del verano.

En síntesis, los índices agroclimáticos obtenidos no solo clasifican el clima, sino que interpreta el ritmo productivo del territorio, ofreciendo una base científica para el diseño de calendarios agrícolas adaptativos y políticas de gestión hídrica sostenible, orientadas a maximizar el potencial productivo del territorio sin comprometer sus recursos naturales (Orozco, 2007; Thornthwaite & Mather, 1955).

6.4 Calendario técnico de siembra basado en el análisis agroclimático

La elaboración del calendario de siembra para la Finca Berraca en Santa Cruz no constituyó un simple ejercicio de aplicación técnica, sino una validación a escala local de cómo la integración de datos meteorológicos y espectrales puede transformar la planificación agrícola, superando los métodos tradicionales basados únicamente en el inicio de las lluvias. Este enfoque marca la transición de una agricultura reactiva a una gestión proactiva y basada en evidencia.

El análisis del período 2016–2024 confirma de manera cuantitativa una realidad conocida en Guanacaste donde la primera parte del año es agrónomicamente inviable para cultivos de secano. Los balances hídricos negativos ($PP < ETP$) y los bajos valores de NDVI ($< 0,22$) reflejan la firma de una estación seca severa, impulsada por la dinámica regional de los vientos alisios y la ausencia de la Zona de Convergencia Intertropical (Álvarez, 2018). Aunque la acumulación térmica supera los 280 GDD, teóricamente suficiente para iniciar cultivos, la falta de agua anula este potencial. Este resultado muestra que la temperatura no puede considerarse un indicador de siembra aislado en climas tropicales secos, y que el agua es el factor limitante dominante, como lo evidenciaron Aceves et al. (2008). En consecuencia, cualquier siembra temprana sin riego garantizado está destinada al fracaso.

La transición climática de mediados de mayo marcada por el aumento de la precipitación (>176 mm), la recuperación del balance hídrico (+ 104 mm) y el ascenso sostenido del NDVI ($>0,28$) señala el inicio de la ventana agroclimática favorable para el establecimiento de cultivos de secano. Más allá de la cuantificación de lluvia, el NDVI se utiliza como un indicador integrador que refleja la respuesta del ecosistema a la humedad disponible en el suelo. Un incremento sostenido del índice

indica que el verdor del paisaje responde de forma estable, validando que las condiciones son propicias para la germinación y el desarrollo inicial de los cultivos. Este hallazgo se alinea con investigaciones recientes en América Latina (Cortez et al., 2024; Garzón-López et al., 2024; Megia-Vera et al., 2025), que destacan la utilidad del NDVI como herramienta de monitoreo agrícola en tiempo real.

Entre junio y septiembre se presentan las condiciones más favorables para el desarrollo de maíz, sorgo y soya, caracterizadas por balances hídricos positivos o cercanos al equilibrio, temperaturas medias entre 25 y 26 °C, humedad relativa superior al 88 % y acumulaciones sostenidas de GDD (> 260 cada 16 días). Durante este periodo, los valores de NDVI (> 0,25) reflejan un incremento en la cobertura y actividad fotosintética, lo que indica el máximo rendimiento potencial del sistema agroclimático.

La definición de umbrales técnicos de NDVI y GDD como criterios operativos para establecer ventanas óptimas de siembra representa un avance significativo hacia una planificación agrícola basada en datos. Este enfoque coincide con las metodologías propuestas por Cintas (2024), que promueven el uso del desarrollo térmico acumulado como referencia fenológica para normalizar series temporales y mejorar la detección de fases críticas de los cultivos a partir de imágenes satelitales. No obstante, su aplicación debe adaptarse a las condiciones edáficas y genéticas locales, así como a las prácticas de manejo específicas de cada finca.

En cuanto a la aptitud de cultivos, los resultados confirman que las condiciones agroclimáticas de la finca son adecuadas para maíz, sorgo y soya. Sin embargo, cada especie presenta riesgos particulares. En el caso del maíz, su alta sensibilidad a la sequía (Baradas, 1994) lo hace vulnerable a las pausas en la precipitación durante la canícula, un fenómeno recurrente en la región. Para la soya, el principal riesgo no es solo hídrico, sino térmico las altas temperaturas al inicio de la ventana de siembra pueden generar estrés durante la fase de establecimiento, lo que destaca la necesidad de evitar siembras demasiado tempranas, incluso cuando las primeras lluvias ya han iniciado.

En conjunto, el calendario agroclimático desarrollado para la Finca Berraca no debe interpretarse únicamente como una fecha de “luz verde” para sembrar, sino como una herramienta de decisión dinámica que permite equilibrar riesgos y oportunidades según las condiciones del año. Al integrar información meteorológica, espectral y térmica, este modelo ofrece un marco técnico

replicable para otras fincas del Pacífico Norte, contribuyendo a reducir la vulnerabilidad climática y mejorar la productividad sostenible en sistemas agrícolas de secano.

7. CONCLUSIONES

El presente estudio logró cumplir con los objetivos propuestos, consolidando una caracterización climática y agroclimática del territorio Santa Cruz–Nicoya a partir del uso de datos satelitales históricos, herramientas de procesamiento en la nube y el método de Thornthwaite.

La utilización de Google Earth Engine (GEE) permitió integrar, procesar y analizar eficientemente grandes volúmenes de información meteorológica y espectral del período 1970–2024, demostrando la eficacia de las plataformas digitales para la generación de productos climáticos de alta resolución temporal y espacial. Este enfoque evidenció la viabilidad técnica y científica del uso de datos masivos en la caracterización agroclimática de territorios rurales, fortaleciendo la capacidad de monitoreo y planificación agrícola basada en evidencia.

El análisis de las series climáticas reveló tendencias de cambio significativas, reflejadas en un incremento progresivo de las temperaturas mínimas, medias y máximas, así como en una reducción general de la precipitación y la humedad relativa. Estos resultados confirman el proceso de calentamiento regional asociado al Corredor Seco Centroamericano, con implicaciones directas sobre la disponibilidad hídrica y la productividad agrícola.

La marcada estacionalidad del régimen climático se manifestó con una estación seca intensa de diciembre a abril y una estación lluviosa de mayo a octubre. Esta dinámica, corroborada mediante análisis estadísticos, diagramas climáticos y balance hídrico, evidencia que los cultivos de secano sólo pueden establecerse con éxito dentro de la ventana húmeda. Los resultados resaltan la necesidad de ajustar los calendarios agrícolas y las prácticas de manejo a las condiciones reales del ciclo climático.

El balance hídrico climático, estimado mediante el método de Thornthwaite, mostró una deficiencia promedio de 520 mm durante la estación seca y un excedente de 582 mm durante la lluviosa, reflejando una alta variabilidad estacional en la disponibilidad de agua. Esta información

resulta clave para planificar estrategias de conservación de agua, captación de lluvia y tecnificación del riego, con el fin de mitigar el impacto de los períodos secos.

La clasificación agroclimática de Thornthwaite ($C_2A's_2b'_3$) ubicó al territorio dentro de un clima subhúmedo-húmedo, caracterizado por una fuerte concentración de la eficiencia térmica y disponibilidad hídrica en pocos meses del año. Además, los mapas espaciales de los índices agroclimáticos revelaron contrastes internos importantes: el norte del territorio presenta mayor aridez y vulnerabilidad climática, mientras que el sur y suroeste muestran mejor balance hídrico y potencial productivo, información fundamental para la zonificación agrícola.

Finalmente, la integración de datos climáticos, espectrales y agroclimáticos permitió delimitar ventanas óptimas de siembra y establecer un calendario agrícola adaptado a las condiciones locales. Este producto constituye una herramienta de apoyo para la toma de decisiones de productores, cooperativas y entidades del sector agropecuario, permitiendo optimizar la planificación de cultivos, reducir riesgos climáticos y mejorar la resiliencia agrícola del territorio Santa Cruz–Nicoya frente a escenarios de variabilidad y cambio climático.

8. RECOMENDACIONES

Aprovechando la metodología validada con Google Earth Engine, se recomienda escalar este estudio hacia un sistema de monitoreo climático dinámico. En lugar de un análisis estático, la metodología podría automatizarse para generar boletines agroclimáticos periódicos (mensuales o estacionales), ofreciendo a los agricultores información casi en tiempo real sobre el estado del balance hídrico, pronósticos de inicio de la época lluviosa y alertas sobre posibles sequías. Esto permitiría ajustes más ágiles y precisos en el calendario de siembra, favoreciendo la adaptación a condiciones climáticas cambiantes.

Se sugiere el uso de herramientas de análisis satelital y procesamiento en la nube, como las utilizadas en esta investigación, dentro de los programas de monitoreo climático y agrícola del país. La integración de estos sistemas en las estrategias del MAG, IMN, INTA y los gobiernos locales

permitiría generar información actualizada y de libre acceso para la toma de decisiones, planificación de siembras y evaluación de riesgos agroclimáticos.

Para asegurar que la información generada se traduzca en acciones concretas, es fundamental crear y fortalecer programas de capacitación dirigidos a los agricultores de Santa Cruz y Nicoya. Se recomienda que las agencias de extensión agrícola utilicen los mapas, gráficos y el calendario de siembra propuesto como material didáctico, explicando los efectos del cambio climático y enseñando a interpretar la información agroclimática para mejorar la toma de decisiones a nivel de finca.

Si bien los datos satelitales proporcionan una visión espacial completa y robusta, se recomienda implementar un programa de validación en campo para aumentar la precisión del modelo a escala local. Esto incluiría la instalación de una red de estaciones meteorológicas de bajo costo en puntos estratégicos de Santa Cruz y Nicoya, permitiendo comparar los datos satelitales con mediciones in situ y calibrar los algoritmos.

Asimismo, para mejorar la estimación del balance hídrico climático, se sugiere explorar métodos alternativos para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), como Penman-Monteith, Hargreaves-Samani o métodos basados en radiación solar, según la disponibilidad de datos. La combinación de distintos enfoques podría mejorar la precisión de los modelos y ofrecer más recomendaciones para la planificación agrícola.

Finalmente, se recomienda integrar variables edáficas (tipo de suelo y capacidad de retención de agua), avanzando desde una zonificación agroclimática hacia una agroecológica, lo que permitiría ofrecer recomendaciones de manejo más específicas y efectivas para los agricultores.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aceves N., L.A., J.F. Juárez L., D.J. Palma L., R. López L., B. Rivera H., J.A. Rincón R., A.R. Morales C., R. Hernández A., y A. Martínez S. (2008). Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del

cultivo de la soya (*Glycine max* (L.) Merrill) en el estado de Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco. SAGARPA. INIFAP-CP. Tomo XVII. pp. 7-9.

Achieng, K. O. (2019). Modelling of soil moisture retention curve using machine learning techniques: Artificial and deep neural networks vs support vector regression models. *Computers & Geosciences*, 133, 104320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104320>

Acuña J., F., O.M. Archila, O.E. Bustos B., L. Contreras G., E.O. Díaz G., H. Espinosa G., G.E. Fajardo M., A.E. Forero B., G.I. Forero B., J.E. Ospina M., C. Ramírez C., M.V. Riveros P., J. M. Sánchez S., G. Tellez I., y C.X. Torres S. (2002). Manual agropecuario. Tecnologías orgánicas de la granja integral autosuficiente. Fundación Hogares Juveniles Campesinos. Bogotá, Colombia. 1071 p.

Agbodan, K. M. L., Akpavi, S., Amegnaglo, K. B., Akodewou, A., Diwediga, B., Koda, D. K., Batawila, K., & Akpagana, K. (2020). Savoirs locaux sur les marqueurs temporels en zone guinéenne au Togo. *BASE*, 248-261. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.18799>

Agüero, N., Arias, D., Ávila, G., Urieta, M., & Zapata, P. (2020). Cambio climático y finanzas públicas. *Una Aproximación Del Impacto de Los Efectos Del Fenómeno Climático En La Economía Costarricense y El Cantón de Liberia Como Estudio de Caso*, 1–194. <http://hdl.handle.net/11056/21390>

Ahmed, M., Hoque, A., & Islam, M. (2022). A Trend Analysis of Climatic Variables in the Karimganj District of Assam. *India. Indian Journal of Science and Technology*, 15(10). <https://doi.org/10.17485/IJST/v15i10.109>

Akram, H., Levia, D. F., Herrick, J. E., Lydiasari, H., & Schütze, N. (2022). Water requirements for oil palm grown on marginal lands: A simulation approach. *Agricultural Water Management*, 260, 107292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107292>

Akyuz, F. A., Kandel, H., & Morlock, D. (2017). Developing a growing degree day model for North Dakota and Northern Minnesota soybean. *Agricultural And Forest Meteorology*, 239, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.027>

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Alfaro, E. J. (2002). Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationships with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(2), 88–103
- Alfaro-Córdoba, M., Mora-Sandí, N. P., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2024). Central American climate extreme trends: A statistical analysis of CLIMDEX indices. *International Journal Of Climatology*, 44(11), 4115-4126. <https://doi.org/10.1002/joc.8571>
- Álvarez, Mauricio. (2018). Ensayo: Influencia de los Vientos Alisios en las precipitaciones de la Región Pacífico Norte de Costa Rica. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32914.09927>
- Alwan, I. A., Karim, H. H., & Aziz, N. A. (2019). Agro-Climatic Zones (ACZ) Using Climate Satellite Data in Iraq Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/2/022034>
- Alzate, D., Jaramillo, J., Ramirez, R., León, R., Villagrán, E., Ayarza, M., & Mañunga, A. (2017). *Uso de información agroclimática y su aplicación en el diseño y optimización de estructuras para sistemas de agricultura protegida*.
- Angel, J. R., Widhalm, M., Todey, D., Massey, R., & Biehl, L. (2016). The U2U Corn Growing Degree Day tool: Tracking corn growth across the US Corn Belt. *Climate Risk Management*, 15, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2016.10.002>
- Apriyana, Y., Surmaini, E., Estiningtyas, W., Pramudia, A., Ramadhani, F., Suciantini, S., Susanti, E., Purnamayani, R., & Syahbuddin, H. (2021). The Integrated Cropping Calendar Information System: A Coping Mechanism to Climate Variability for Sustainable Agriculture in Indonesia. *Sustainability*, 13(11), 6495. <https://doi.org/10.3390/su13116495>

- Araghi, A., Martinez, C. J., & Olesen, J. E. (2022). Evaluation of multiple gridded solar radiation data for crop modeling. *European Journal of Agronomy*, *133*, 126419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126419>
- Araya, A., Keesstra, S. D., & Stroosnijder, L. (2010). A new agro-climatic classification for crop suitability zoning in northern semi-arid Ethiopia. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(7), 1057–1064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.003>
- Asadullah, A., Faik, I., & Kankanhalli, A. (2018). Digital Platforms: A Review and Future Directions Knowledge Flow and Innovation View project Artificial Intelligence in Governments View project. *Digital Platforms: A Review and Future Directions*, 1–15. <https://www.researchgate.net/publication/327971665>
- Banerjee, A., Ariz, D., Turyasingura, B., Pathak, S., Sajjad, W., Yadav, N., & Kirsten, K. L. (2024). Long-term climate change and anthropogenic activities together with regional water resources and agricultural productivity in Uganda using Google Earth Engine. *Physics And Chemistry Of The Earth Parts A/B/C*, *134*, 103545. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103545>
- Baradas, M. W. (1994). Crop requirements of tropical crops. In: Handbook of agricultural meteorology. J.F. Griffiths Editor. Oxford Univ. Press. New York. pp. 189-202.
- Bebeley, J. F., Kamara, A. Y., Jibrin, J. M., Akinseye, F. M., Tofa, A. I., Adam, A. M., Kamai, N., & Solomon, R. (2022). Evaluation and application of the CROPGRO-soybean model for determining optimum sowing windows of soybean in the Nigeria savannas. *Scientific Reports*, *12*(1), 6747. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10505-4>
- Benahmed, L., Houichi, L., & Berreksi, A. (2022). Contribution to the modelling of the reference evapotranspiration at humid locations. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(19). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10829-5>
- Birara, H., Mishra, S. K., & Pandey, R. P. (2021). Comparison of Methods for Evapotranspiration Computation in the Tana Basin, Ethiopia. In A. Pandey, S. Mishra, M. Kansal, R. Singh, & V. Singh (Eds.), *In Water science and technology library* (Springer Cham, pp. 405–422). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59148-9_28

- Borges, A. C., & Mendiondo, E. M. (2007). Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 11(3), 293-300. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662007000300008>
- Bouroncle, C., Imbach, P., Laderach, P., Rodríguez, B., Medellín, C., Fung, E., Martínez, M., & Donatti, C. (2015). La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? *CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)*, 1. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8098>
- Brendel, A. S., del Barrio, R. A., Mora, F., León, E. A. O., Flores, J. R., & Campoy, J. A. (2020). Current agro-climatic potential of Patagonia shaped by thermal and hydric patterns. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3–4), 855–868. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03350-w>
- Burak, S., Bilge, A. H., & Ülker, D. (2022). Thornthwaite’s Method for the Computation of the Water Balance. *Environmental Earth Sciences*, 339–347. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04375-8_38
- Cabral, J. B., & Lucena, R. L. (2020). Análises das precipitações pelos testes não paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. *Mercator (Fortaleza)*, 19, e19001. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19001>
- Calvo, J. C. (1986). An evaluation of Thornthwaite’s water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 51-60. <https://doi.org/10.1080/02626668609491027>
- Castro, L., & Gironás, J. (2021). Precipitation, Temperature and Evaporation. In B. Fernandez & J. Gironas (Eds.), *Water Resources of Chile. World Water Resources* (Vol. 8, pp. 31–60). https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_3
- CEPAL. (2023). En Estudio económico de América latina y el Caribe/Estudio económico de América Latina y el Caribe. <https://doi.org/10.18356/9789210022385>
- Chandler, D. G., Seyfried, M. S., McNamara, J. P., & Hwang, K. (2017). Inference of soil hydrologic parameters from electronic soil moisture records. *Frontiers in Earth Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00025>

- Chen, X., Ye, X., Xiong, X., Zhang, Y., & Li, Y. (2024). Improving the accuracy of wind speed spatial interpolation: A pre-processing algorithm for wind speed dynamic time warping interpolation. *Energy*, 295, 130876. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130876>
- Chipanshi, A., Berry, M., Zhang, Y., Qian, B., & Steier, G. (2022). Agroclimatic indices across the Canadian Prairies under a changing climate and their implications for agriculture. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2351–2367. <https://doi.org/10.1002/joc.7369>
- Cintas Rodríguez, J. M. (2024). Global wheat normalization. A robust approach based on Growing Degree Days accumulation.[Tesis Doctoral] Obtenido de: <https://hdl.handle.net/10550/106472>.
- Craufurd, P., & Qi, A. (2001). Photothermal adaptation of sorghum (*Sorghum bicolor*) in Nigeria. *Agricultural And Forest Meteorology*, 108(3), 199-211. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(01\)00241-6](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(01)00241-6)
- Croitoru, A. E., Man, T. C., Vâțca, S. D., Kobulniczky, B., & Stoian, V. (2020). Refining the spatial scale for maize crop agro-climatological suitability conditions in a region with complex topography towards a smart and sustainable agriculture. case study: Central Romania (Cluj county). *Sustainability (Switzerland)*, 12(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su12072783>
- Cook, B.G., B.C. Pengelly, S.D. Brown, J.L. Donnelly, D.A. Eagles, M.A. Franco, J. Hanson, B.F. Mullen, I.J. Partridge, M. Peters and R. Schultze-Kraft. (2005). Tropical Forages: an interactive selection tool. CSIRO, CIAT and ILRI. Brisbane, Australia
- Cortez, D., Soto, J., Román-Figueroa, C., & Paneque, M. (2024). Monitoring loss and degradation of forests and shrubs in the North of Chile using Landsat time series data sets from 1998 to 2018. *Remote Sensing Applications Society And Environment*, 35, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101244>
- De Reuver, M., Sørensen, C., & Basole, R. C. (2018). The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*, 33, 124–135. <https://doi.org/10.1057/s41265>
- Desmarteau, D. A., Ritter, A. M., Hendley, P., & Guevara, M. W. (2019). Impact of Wind Speed and Direction and Key Meteorological Parameters on Potential Pesticide Drift Mass Loadings from

- Sequential Aerial Applications. *Integrated Environmental Assessment And Management*, 16(2), 197-210. <https://doi.org/10.1002/ieam.4221>
- Delgado Fernández, J. F., Zavala Jiménez, D., & Castillo Alpizar, A. G. (2020). *Caracterización edafo-climática de la Estación Experimental LIFE-RID*.
- Delgado-Ramírez, G., Bolaños-González, M. A., Quevedo-Nolasco, A., López-Pérez, A., & Estrada-Ávalos, J. (2023). Estimation of Reference Evapotranspiration in a Semi-Arid Region of Mexico. *Sensors*, 23(15), 7007. <https://doi.org/10.3390/s23157007>
- Di Cecco, G. J., & Gouhier, T. C. (2018). Increased spatial and temporal autocorrelation of temperature under climate change. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33217-0>
- Díaz Bolaños, R. E. (2019). El Corredor Seco Centroamericano en perspectiva histórica. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 45, 297–322. <https://doi.org/10.15517/aeca.v45i0.40697>
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. (1979). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No. 33. FAO. Roma. 212 p.
- Fan, W., Liu, Y., Chappell, A., Dong, L., Xu, R., Ekström, M., Fu, T., & Zeng, Z. (2020). Evaluation of Global Reanalysis Land Surface Wind Speed Trends to Support Wind Energy Development Using In Situ Observations. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 60(1), 33-50. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-20-0037.1>
- FAO. (1994). ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0. AGLS. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO). Rome, Italy.
- Flores, E. (2012). *La planta estructura y función* (4th ed., Vol. 1). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Foden, W. B., Young, B. E., Akçakaya, H. R., Garcia, R. A., Hoffmann, A. A., Stein, B. A., Thomas, C. D., Wheatley, C. J., Bickford, D., Carr, J. A., Hole, D. G., Martin, T. G., Pacifici, M., Pearce-Higgins, J. W., Platts, P. J., Visconti, P., Watson, J. E. M., & Huntley, B. (2019). Climate change vulnerability assessment of species. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(1). <https://doi.org/10.1002/wcc.551>

- Fricke, W. (2019). Night-Time Transpiration – Favouring Growth? *Trends in Plant Science*, 24(4), 311–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.007>
- Fu, X., Avenyo, E., & Ghauri, P. (2021). Digital platforms and development: a survey of the literature. *Innovation and Development*, 11(2–3), 303–321. <https://doi.org/10.1080/2157930X.2021.1975361>
- Gadedjisso-Tossou, A., Adjegan, K. I., & Kablan, A. K. M. (2021). Rainfall and Temperature Trend Analysis by Mann–Kendall Test and Significance for Rainfed Cereal Yields in Northern Togo. *Sci*, 3(1), 17. <https://doi.org/10.3390/sci3010017>
- Ganesh, K. E. (2022). Studies on the influence of particulate load in the atmosphere in attenuating the incoming solar radiation for two Indian mega cities. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11134-x>
- Garzon-Lopez, C. X., Miranda, A., Moya, D., & Andreo, V. (2024). Remote sensing biodiversity monitoring in Latin America: Emerging need for sustained local research and regional collaboration to achieve global goals. *Global Ecology And Biogeography*, 33(4). <https://doi.org/10.1111/geb.13804>
- Gaso, D. V., de Wit, A., de Bruin, S., Puntel, L. A., Berger, A. G., & Kooistra, L. (2023). Efficiency of assimilating leaf area index into a soybean model to assess within-field yield variability. *European Journal of Agronomy*, 143, 126718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126718>
- Gavilán, P., Lorite, I., Tornero, S., & Berengena, J. (2005). Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 81(3), 257–281. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.001>
- Gbangou, T., Ludwig, F., van Slobbe, E., Greuell, W., & Kranjac-Berisavljevic, G. (2020). Rainfall and dry spell occurrence in Ghana: trends and seasonal predictions with a dynamical and a statistical model. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1–2), 371–387. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03212-5>
- Glantz, M. H. (2022a). Introduction. In M. H. Glantz (Ed.), *El Niño Ready Nations and Disaster Risk Reduction: 19 Countries in Perspective* (pp. 1–26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86503-0_1

- Glantz, M. H., Naranjo-Diaz, L., Ye, Q., & Pierce, G. E. (2022b). Mainstreaming the Full ENSO: Linking Present Weather and Future Climate. *International Journal Of Disaster Risk Science*, 13(6), 829-841. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00459-6>
- Google. (2015). *Open Location Code: An Open Source Address System*. Recuperado de <https://github.com/google/open-location-code>
- Grolemund, G., & Wickham, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal Of Statistical Software*, 40(3). <https://doi.org/10.18637/jss.v040.i03>
- Guijarro, J. A., López, J. A., Aguilar, E., Domonkos, P., Venema, V. K. C., Sigró, J., & Brunet, M. (2023). Homogenization of monthly series of temperature and precipitation: Benchmarking results of the MULTITEST project. *International Journal Of Climatology*, 43(9), 3994-4012. <https://doi.org/10.1002/joc.8069>
- Gupta, A., Gupta, M., Srivastava, P. K., Petropoulos, G. P., & Singh, R. K. (2023). Potassium Simulation Using HYDRUS-1D with Satellite-Derived Meteorological Data under Boro Rice Cultivation. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032147>
- Haftom, Haftu, Goitom, & Meseret. (2019). Agroclimatic zonation of Tigray region of Ethiopia based on aridity index and traditional agro-climatic zones. *Journal of Agrometeorology*, 21(2), 176–181. <https://doi.org/10.54386/jam.v21i2.229>
- Hargreaves, & Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- Hendrayana, H., Widyastuti, M., Riyanto, I. A., Nuha, A., Widasmara, M. Y., Ismayuni, N., & Rachmi, I. N. (2021). Thornthwaite and Mather water balance method in Indonesian Tropical Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 851(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/851/1/012011>
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Pérez-Briceño, P. M. (2021). Projected Climate Changes of CMIP5 models in La Cruz, Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69, S60–S73. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69iSuppl.2.48307>

- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J., & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal Of Hydrology*, 495, 94-112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.004>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal Of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hohenegger, C., & Stevens, B. (2018). The role of the permanent wilting point in controlling the spatial distribution of precipitation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(22), 5692–5697. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718842115>
- Hwang, J. H., Azam, M., Jin, M. S., Kang, Y. H., Lee, J. E., Latif, M., Ahmed, R., Umar, M., & Hashmi, M. Z. (2020). Spatiotemporal trends in reference evapotranspiration over South Korea. *Paddy and Water Environment*, 18(1), 235–259. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00777-4>
- Imbach, P., Chou, S. C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., Siqueira, G., Silva, A., Garofolo, L., & Georgiou, S. (2018). Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLoS ONE*, 13(4), e0193570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193570>
- Imbach, P., Zamora, J., Fung, E., Locatelli, B., Cialis, P., & Molina, L., (2015) Impacts of climate change on ecosystem hydrological services of Central America: water provisioning. Repositorio CATIE. p. 65-90. ISBN 978-0-415-72080-9.
- INDER. (2016). *Caracterizacion-territorio-SantaCruz-Carrillo*.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica). (2015). *VI censo nacional agropecuario. Resultados generales*.
- IPCC, (2023) *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001*

- Jagadish, S. V. K., Way, D. A., & Sharkey, T. D. (2021). Plant heat stress: Concepts directing future research. In *Plant Cell and Environment* (Vol. 44, Issue 7, pp. 1992–2005). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/pce.14050>
- Jhong, B. C., Huang, J., & Tung, C. P. (2019). Spatial Assessment of Climate Risk for Investigating Climate Adaptation Strategies by Evaluating Spatial-Temporal Variability of Extreme Precipitation. *Water Resources Management*, 33(10), 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02306-8>
- Jimenez, F. (1985). Caracterización climática de Turribal, Costa Rica. *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza*, 1–47.
- Johnson, N., Druckenmiller, M. L., Danielsen, F., & Pulsifer, P. L. (2021). The Use of Digital Platforms for Community-Based Monitoring. *BioScience*, 71(5), 452–466. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa162>
- José, J. V., Pereira, L. B., Leite, H. M. F., Da Costa Santos, L., Da Silva Barros, T. H., & Leite, K. N. (2020). Métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração em clima tropical equatorial. *Research Society And Development*, 9(10), e4099108563. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8563>
- Kaya, Y. Z., Zelenakova, M., Üneş, F., Demirci, M., Hlavata, H., & Mesaros, P. (2021). Estimation of daily evapotranspiration in Košice City (Slovakia) using several soft computing techniques. *Theor Appl Climatol*, 144, 287–298. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03525-z>/Published
- Kheyruri, Y., Nikaein, E., & Sharafati, A. (2023). Spatial monitoring of meteorological drought characteristics based on the NASA POWER precipitation product over various regions of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43619–43640. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25283-3>
- Kim, Y., & Johnson, M. S. (2025). Deciphering the role of evapotranspiration in declining relative humidity trends over land. *Communications Earth & Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02076-9>

- Knauer, J., Zaehle, S., De Kauwe, M. G., Haverd, V., Reichstein, M., & Sun, Y. (2020). Mesophyll conductance in land surface models: effects on photosynthesis and transpiration. In *Plant Journal* (Vol. 101, Issue 4, pp. 858–873). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/tpj.14587>
- Koskinen, K., Bonina, C., & Eaton, B. (2019). Digital Platforms in the Global South: Foundations and Research Agenda. In P. Nielsen & H. C. Kimaro (Eds.), *Information and Communication Technologies for Development. Strengthening Southern-Driven Cooperation as a Catalyst for ICT4D* (pp. 319–330). Springer International Publishing.
- Li, J., & Sun, Z. (2020). Climate persistence and memory. *Tellus A Dynamic Meteorology And Oceanography*, 72(1), 1803663. <https://doi.org/10.1080/16000870.2020.1803663>
- Li, L., Yang, H., Li, H., Sun, J., & Shang, F. (2025). Soil respiration and its temperature sensitivity in *Pinus koraiensis* plantations are mediated by temperature, humidity, and wind speed. *Trees Forests And People*, 100784. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100784>
- Lima, G. C., Rodrigues, D. T., Silva, C. M. S. E., & De Sousa Costa, P. C. (2024). Evolution of wind speed observed in Brazil between 1961 and 2020. *International Journal Of Climatology*, 44(6), 1932-1954. <https://doi.org/10.1002/joc.8433>
- Liu, M., Riahi, S., Jacob, R., Belusko, M., & Bruno, F. (2020). Design of sensible and latent heat thermal energy storage systems for concentrated solar power plants: Thermal performance analysis. *Renewable Energy*, 151, 1286–1297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.115>
- Liu, Y., Diao, C., & Yang, Z. (2023). CropSow: An integrative remotely sensed crop modeling framework for field-level crop planting date estimation. *ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing*, 202, 334-355. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.06.012>
- Lokers, R., Knapen, R., Janssen, S., van Randen, Y., & Jansen, J. (2016). Analysis of Big Data technologies for use in agro-environmental science. *Environmental Modelling & Software*, 84, 494–504. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.017>

- Lopian, R. (2018). *Climate change, sanitary and phytosanitary measures and agricultural trade. The State of Agricultural Commodity Markets (SOCO) 2018: Background paper*. Rome, FAO. 48 pp. Licence: CC BYNC-SA 3.0 IGO.
- Lu, X., Zhang, H., Han, Y., Bai, H., & Li, E. (2022). Applicability and improvement of different evapotranspiration methods of reference crops in Jiangxi Province. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1–2), 73–86. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03806-7>
- Luo, Y., Chang, X., Peng, S., Khan, S., Wang, W., Zheng, Q., & Cai, X. (2014). Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves–Samani model and temperature forecasts. *Agricultural Water Management*, 136, 42–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.006>
- MAG. (2020). *Programación Región de Desarrollo Chorotega 2020*.
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577–1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 3, pp. 1–21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Mammoliti, E., Fronzi, D., Mancini, A., Valigi, D., & Tazioli, A. (2021). Waterbalance, a webapp for thornthwaite–mather water balance computation: Comparison of applications in two European watersheds. *Hydrology*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010034>
- Matuschek, O., & Matzarakis, A. (2010). A mapping tool for climatological applications. *Meteorological Applications*, 18(2), 230-237. <https://doi.org/10.1002/met.233>
- Marx, W., Haunschild, R., & Bornmann, L. (2021). Heat waves: a hot topic in climate change research. *Theoretical And Applied Climatology*, 146(1-2), 781-800. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03758-y>

- McMaster, G & Wilhelm, W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural And Forest Meteorology*, 87(4), 291-300. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(97)00027-0)
- Mathieu, J. A., & Aires, F. (2018). Assessment of the agro-climatic indices to improve crop yield forecasting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253–254, 15–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.031>
- Megh, P., Goyal, R., Victor, Y., & Ramirez Builes, H. (2015). *ELEMENTOS DE AGROCLIMATOLOGÍA* (UNISARC). UNIVERSIDAD DE SANTA ROSA DE CABAL. <http://www.unisarc.edu.co/index.html>
- Megia-Vera, H. J., Peralta-Carreta, C., Medrano-Pérez, O. R., La Cruz, M. Á. P., Ramos-Reyes, R., & Alcántara, A. G. (2025). Análisis de la cobertura y uso de suelo de la cuenca baja del Río Usumacinta mediante técnicas de teledetección. *Terra Latinoamericana*, 43. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2075>
- Mingalev, D. E. (2021). Agroclimatic Zoning of Russia and Kazakhstan under Current Climate Change. *Geography and Natural Resources*, 42(2), 115–121. <https://doi.org/10.1134/S1875372821020086>
- Moore, C. E., Meacham-Hensold, K., Lemonnier, P., Slattery, R. A., Benjamin, C., Bernacchi, C. J., Lawson, T., & Cavanagh, A. P. (2021). The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. *Journal Of Experimental Botany*, 72(8), 2822-2844. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab090>
- Moreno D., R. (1992). Criterio para la interpretación de resultados de análisis de suelos. Documento de circulación interna. INIFAP-CIRCE. Campo Experimental Toluca. Toluca, Edo. de México. 25 p.
- Moron, V., Gouirand, I., & Taylor, M. (2015). Weather types across the Caribbean basin and their relationship with rainfall and sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 47(1-2), 601-621. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2858-9>
- Murphy, G., & Hurtado, R. (2016). *Agroclimatología* (Facultad de Agronomía, Ed.; 3rd ed., Vol. 1).
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal Of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

- Niu, H., & Chen, Y. (2022). Introduction. In *Towards Tree-level Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture* (pp. 1–34). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14937-5_1
- Ogunrinde, A. T., Emmanuel, I., Enaboifo, M. A., Ajayi, T. A., & Pham, Q. B. (2022). Spatio-temporal calibration of Hargreaves–Samani model in the Northern Region of Nigeria. *Theoretical and Applied Climatology*, *147*(3–4), 1213–1228. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03897-2>
- Oloyede, A., Ozuomba, S., Asuquo, P., Olatomiwa, L., & Longe, O. M. (2023). Data-driven techniques for temperature data prediction: big data analytics approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(2), 343. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10961-z>
- Orozco, E. (2007). *ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DE COSTA RICA PARA LA GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL*. UCR. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/449>
- Oussous, A., Benjelloun, F.-Z., Ait Lahcen, A., & Belfkih, S. (2018). Big Data technologies: A survey. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, *30*(4), 431–448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.06.001>
- Owan, Asuquo, Makuku, Etudor, & Ekpenyong. (2021). The Extent of Online Platforms Utilization for Scholarly Research Dissemination: A Survey of Academic Staff in African Universities. *Library Philosophy and Practice*, *5585*, 1–24.
- Páez, A., & Boisjoly, G. (2022). Exploratory data analysis. En *Use R!* (pp. 25-64). https://doi.org/10.1007/978-3-031-20719-8_2
- Pandi, D., Saravanan, K., Kuppusamy, M., & Birasnav, M. (2022). Performance evaluation of geospatially assisted reference evapotranspiration models. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(8). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10019-3>
- Parkash, V., & Singh, S. (2020). A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/SU12103945>

- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2014). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Pérez, M., Amador, J., & Alfaro, E., (2013). *Clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense*. Repositorio Kérwá. <https://hdl.handle.net/10669/11114>
- Picón Cruz. (2020). *Producción sostenible: Aportes desde la acción académica CEMEDE-HIDROCEC Sede Regional* (Universidad Nacional de Costa Rica, Ed.; 1st ed.). ISBN 978-9968-526-12-8
- Pierce, D. W., Westerling, A. L., & Oyler, J. (2013). Future humidity trends over the western United States in the CMIP5 global climate models and variable infiltration capacity hydrological modeling system. *Hydrology And Earth System Sciences*, 17(5), 1833-1850. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1833-2013>
- Polanco, J. (2022) Análisis espectral de Wavelet: una concisa revisión. (2021). *Revista de Climatología*, 22, 51-95.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). *Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena*. *Journal of Climate*, 10(10), 2690–2702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)
- Purseglove, J.W. (1985). *Tropical crops: Monocotyledons*. Longman Scientific and Technical. N.Y., U.S.A. 607 p.
- Quirós. (2023, January 23). Unas 3.000 familias de agricultores del Corredor Seco Centroamericano se beneficiarán con proyecto de la Unión Europea y el IICA. *IICA*.
- Rabin, S. S., Sacks, W. J., Lombardozzi, D. L., Xia, L., & Robock, A. (2023). Observation-based sowing dates and cultivars significantly affect yield and irrigation for some crops in the Community Land Model (CLM5). *Geoscientific Model Development*, 16(24), 7253-7273. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7253-2023>
- R Core Team. (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>

- Reichardt, K., & Timm, L. C. (2020). The Water Balance in Agricultural and Natural Systems. In *Soil, Plant and Atmosphere* (pp. 289–312). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19322-5_15
- Rizzo, G., Mazzilli, S. R., Ernst, O., Baethgen, W. E., & Berger, A. G. (2022). Season-specific management strategies for rainfed soybean in the South American Pampas based on a seasonal precipitation forecast. *Agricultural Systems*, *196*, 103331. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103331>
- Ruiz C., J.A. (1996). Informe de inspección a parcelas de sorgo por daño aparente de frío. Documento inédito. CARGILL Co. Guadalajara, Jalisco, México
- Ruiz C., J.A., N. Durán P., J. de J. Sánchez G., G. Medina G., P. Zarazúa V., D. R. González E., J. Ron P., J. L. Ramírez D., L. de la Cruz L. y H. E. Flores L. (2009). Actual and potential geographical distribution of maize (*Zea mays* L.) landraces in México. *Res. Adv. In Crop Science*, (2):1-23.
- Saha, S., Chakraborty, D., Hazarika, S., Shakuntala, I., Das, B., Chhabra, A., Chakraborty, D., Mukherjee, J., & Mishra, V. K. (2021). Spatiotemporal Variability of Weather Extremes Over Eastern India: Evidences of Ascertained Long Term Trend Persistence and Effective Global Climate Controls. *Research Square*, 1–27. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-934391/v1>
- Sain, Gustavo; Thomas, Timothy S.; and Cenacchi, Nicola. 2019. Climate change, agriculture, and adaptation options for Costa Rica. IFPRI Discussion Paper 1825. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI). <https://hdl.handle.net/10568/146592>
- Santacruz V., V. y C. Santacruz V. (2007). Cultivos poblanos y sus opciones de industrialización. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Editorial Universitaria. El Vedado, Ciudad de la Habana, Cuba. 148 p.
- Santra, P., Kumar, M., Kumawat, R. N., Painuli, D. K., Hati, K. M., Heuvelink, G. B. M., & Batjes, N. H. (2018). Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot Arid Western India. *Journal of Earth System Science*, *127*(3), 35. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-0937-0>

- Schapaugh, W.T. (1997). Selection of soybean varieties. In: Soybean Production Handbook. Kansas State University. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Kansas State, U.S.A. pp. 4-8.
- Schaub, L. R. A., & Gil-Alana, L. A. (2024). Trends in Temperatures in Latin America: A Time-Series Perspective Based on Fractional Integration. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 63(10), 1075-1096. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-23-0141.1>
- Séhouéto, L. (2006). Localised agricultural knowledge and food production in sub-Saharan Africa. *International Social Science Journal*, 58(187), 121-128. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2451.2006.00597.x>
- Selyaninov. (1928). Variación del clima agrícola'(original en ruso). *Anales Meteorología Agrícola*, 20, 165–177.
- Selyaninov. (1930). Method of Determination of Agricultural Climate Characteristic,” in Trans. *Agricultural Meteorology*, XXI.
- Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., & Santos, E. A. (2009). Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97(5), 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>
- Shaik, R., Monish, N. T., & Sireesha Naidu, G. (2020). Estimation of annual regional drought index considering the joint effects of climate and water budget for Krishna River basin, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08379-y>
- Sharma, R., & Singh, N. (2022). *Introduction to UV-B Radiation* (Kataria & Singh, Eds.; Springer, pp. 1–11). https://doi.org/10.1007/978-981-19-3620-3_1
- Simpson, I. R., McKinnon, K. A., Kennedy, D., Lawrence, D. M., Lehner, F., & Seager, R. (2023). Observed humidity trends in dry regions contradict climate models. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 121(1). <https://doi.org/10.1073/pnas.2302480120>

- Steinhoff, D. F., Monaghan, A. J., & Clark, M. P. (2014). Projected impact of twenty-first century ENSO changes on rainfall over Central America and northwest South America from CMIP5 AOGCMs. *Climate Dynamics*, 44(5-6), 1329-1349. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2196-3>
- Sutapa, I. W., Saparuddin, S., Arafat, Y., Lipu, S., Rustiati, N. B., & Pratama, I. P. H. A. (2022). The Performance of Thirty-Eight Evapotraspiation Methods against the Penman Montieth Method. *Journal Of Engineering Research*. <https://doi.org/10.36909/jer.13251>
- Sun, X., Renard, B., Thyer, M., Westra, S., & Lang, M. (2015). A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. *Journal Of Hydrology*, 530, 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.016>
- Thornthwaite. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38, 55–94.
- Thornthwaite, C., & Mather, J. (1955). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol*, 8.
- Thuzar, M., A. B. Puteh, N.A.P. Abdullah, M.N. Mohd L., K. Jussoff. (2010). The effects of temperature stress on the quality and yield of soya bean *Glycine max* (L.) Merrill. *Journal of Agricultural Science*, 2(1): 172-179.
- Torsoni, G. B., de Oliveira Aparecido, L. E., dos Santos, G. M., Chiquitto, A. G., da Silva Cabral Moraes, J. R., & de Souza Rolim, G. (2023). Soybean yield prediction by machine learning and climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(3), 1709–1725. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04341-9>
- Traore, S. B., R.E. Carlson, C.D. Pilcher, and M.E. Rice. (2000). Bt and Non-Bt Maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agron. J.*, 92(5): 1027-1035.
- Li, J., & Sun, Z. (2020). Climate persistence and memory. *Tellus A Dynamic Meteorology And Oceanography*, 72(1), 1803663. <https://doi.org/10.1080/16000870.2020.1803663>

- Tuel, A., & Martius, O. (2023). Weather persistence on sub-seasonal to seasonal timescales: a methodological review. *Earth System Dynamics*, 14(5), 955-987. <https://doi.org/10.5194/esd-14-955-2023>
- Turc. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals Of Agronomy*, 12, 13–49.
- Uprety, D. C., Reddy, V. R., & Mura, J. D. (2019). Introduction. In *Climate Change and Agriculture* (pp. 1–5). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2014-9_1
- Wable, N. P., Jha, N. M., & Gorantiwar, N. S. (2021). Assessing suitability of temperature-based reference evapotranspiration methods for semi-arid basin of Maharashtra. *Journal Of Agrometeorology*, 21(3), 351-356. <https://doi.org/10.54386/jam.v21i3.259>
- Wagner-Riddle, C. (2005). Agroclimatology. In J. E. Oliver (Ed.), *Encyclopedia of World Climatology* (pp. 14–16). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_5
- Walter, H., & Lieth, H. (1960). *Klimadiagramm Weltatlas*. Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Wang, C., Fu, B., Zhang, L., & Xu, Z. (2019). Soil moisture–plant interactions: an ecohydrological review. *Journal of Soils and Sediments*, 19(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2167-0>
- Wakai, A., Tanaka, E., & Sakurai, G. (2025). Construction of digital databases of crop-growing calendars for Japanese crops. *Ecological Research*. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12553>
- Whitney, D.A. (1997). Fertilization. In: Soybean Production Handbook. Kansas State University. Agricultural Experiment Station and Cooperastive Extension Service. Kansas State, U.S.A. pp. 11-12.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., . . . Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *The Journal Of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wilson, G. T. (2016). Time Series Analysis: Forecasting and Control, 5th Edition, by George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel and Greta M. Ljung, 2015. Published by John Wiley and

- Sons Inc., Hoboken, New Jersey, pp. 712. ISBN: 978-1-118-67502-1. *Journal Of Time Series Analysis*, 37(5), 709-711. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12194>
- Wu, C., Wang, J., Ciais, P., Peñuelas, J., Zhang, X., Sonnentag, O., Tian, F., Wang, X., Wang, H., Liu, R., Fu, Y. H., & Ge, Q. (2021). Widespread decline in winds delayed autumn foliar senescence over high latitudes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(16), e2015821118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2015821118>
- Xu, H., Lin, W. Y., Dal Magro, F., Li, T., Py, X., & Romagnoli, A. (2019). Towards higher energy efficiency in future waste-to-energy plants with novel latent heat storage-based thermal buffer system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 324–337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.009>
- Yan, X., & Mohammadian, A. (2020). Estimating future daily pan evaporation for Qatar using the Hargreaves model and statistically downscaled global climate model projections under RCP climate change scenarios. *Arabian Journal of Geosciences* , 13, 938. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05944-0/Published>
- Yang, W., John, V. O., Zhao, X., Lu, H., & Knapp, K. R. (2016). Satellite climate data records: Development, applications, and societal benefits. In *Remote Sensing* (Vol. 8, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs8040331>
- Yeşilırmak, E. (2022). Climatology and trends in temperature-based agroclimatic indices over western Anatolia, Türkiye. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(3–4), 1233–1252. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04229-8>
- Yue, S., Wang, C. (2004). The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. *Water Resources Management* 18, 201–218. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>
- Zea, P., Pascual, C., García-Montero, L. G., & Cedillo, H. (2025). NDVI Performance for Monitoring Agricultural Energy Inputs Using Landsat Imagery: A Study in the Ecuadorian Andes (2012–2023). *Sustainability*, 17(8), 3480. <https://doi.org/10.3390/su17083480>

- Zee, A., Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C., & Picado, L. (2012). *Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano* (A. Van der Zee, J. Van der Zee, A. Meyrat, C. Poveda, & L. Picado, Eds.; FAO, Vol. 1). FAO.
- Zhu, T., De Lima, C. F. F., & De Smet, I. (2021). The heat is on: how crop growth, development, and yield respond to high temperature. *Journal Of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab308>
- Zeileis, A., & Grothendieck, G. (2005). zoo : S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. *Journal Of Statistical Software*, 14(6). <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i06>
- Zhang, C., & Lu, N. (2018). What Is the Range of Soil Water Density? Critical Reviews With a Unified Model. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 56, Issue 3, pp. 532–562). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/2018RG000597>
- Zhang, Q., Wang, D., Fu, D., Gong, F., He, X., & Wang, Y. (2024). Characterization of Landsat-8 and Landsat-9 reflectivity and NDVI continuity based on Google Earth Engine. *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 18, 621-641. <https://doi.org/10.1109/jstars.2024.3492025>
- Zhao, B., & Wang, L. (2024). Surface water monitoring from 1984 to 2021 based on Landsat time-series images and Google Earth Engine. *Heliyon*, 10(17), e36660. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36660>
- Zhu, T., De Lima, C. F. F., & De Smet, I. (2021). The heat is on: how crop growth, development, and yield respond to high temperature. *Journal Of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab308>
- Zuo, H., Zhou, Y., Wu, M., Zeng, K., Chang, Z., Chen, S., Lu, W., & Flamant, G. (2021). Development and numerical investigation of parallel combined sensible-latent heat storage unit with intermittent flow for concentrated solar power plants. *Renewable Energy*, 175, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.092>
- Zuzulová, V., Vido, J., & Šiška, B. (2020). Material and Methods. In: Agricultural Drought in Slovakia: An Impact Assessment. In *Agricultural Drought in Slovakia: An Impact Assessment* (pp. 33–42). https://doi.org/10.1007/978-3-030-42061-1_3

10. ANEXOS

Mes	Temperatura °C			Humedad Relativa %			Velocidad Viento m/s			Precipitación mm			
	min	max	prom	min	max	prom	min	max	prom	sum	min	max	prom
1	22.743	31.221	26.282	49.253	90.386	65.801	0.116	8.421	3.44	6.432	0.000	12.49	0.28
2	22.994	32.448	26.971	48.097	84.3	61.617	0.14	8.649	3.426	5.142	0.000	18.029	0.224
3	23.478	33.252	27.666	41.839	88.37	60.945	0.042	7.678	2.715	10.534	0.000	16.504	0.458
4	24.219	33.101	27.96	47.204	91.998	65.516	0.016	6.904	1.788	38.569	0.000	30.6	1.677
5	24.17	30.482	26.67	51.693	96.133	79.799	0.051	6.11	1.239	181.905	0.001	117.32	7.909
6	23.675	28.847	25.68	68.967	95.568	87.133	0.045	4.099	1.09	224.257	0.105	94.472	9.75
7	23.45	29.008	25.675	65.045	95.935	85.137	0.026	4.247	1.378	164.315	0.005	95.108	7.144
8	23.418	28.913	25.582	66.353	95.784	86.22	0.016	3.983	1.145	195.212	0.016	96.578	8.487
9	23.259	28.36	25.187	75.919	96.003	88.501	0.038	6.429	1.048	246.357	0.083	97.668	10.711
10	23.059	28.008	24.953	72.211	95.742	88.622	0.05	5.075	1.264	249.137	0.014	186.622	10.832
11	22.869	28.401	25.146	61.193	95.897	84.007	0.032	6.216	1.833	104.314	0.000	113.2	4.535
12	22.718	29.671	25.647	58.883	95.017	74.503	0.106	7.914	2.837	20.389	0.000	38.707	0.886

Anexo 1. *Parámetros de temperaturas medias mensuales, territorio Santa Cruz-Nicoya*

Anexo 2. *Promedio, mínima, máxima de temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad viento (m/s) y precipitación acumulada anuales (mm) correspondiente al territorio Santa Cruz-Nicoya, 1970-2024*

Año	Temperatura °C			Humedad Relativa %			Velocidad Viento m/s			Precipitación mm			
	min	max	prom	min	max	prom	min	max	prom	sum	prom	max	min
1970	22.934	29.125	25.427	54.363	95.817	80.369	0.08	7.659	1.903	2621.132	7.181	132.623	0.001
1971	22.51	29.095	25.206	53.918	95.399	79.836	0.057	6.479	1.686	2700.514	7.399	87.528	0.000
1972	23.249	30.047	26.036	52.919	95.347	78.234	0.042	8.4	1.823	2035.027	5.56	36.311	0.002
1973	23.121	29.574	25.759	56.007	95.935	79.052	0.141	8.421	1.915	2677.921	7.337	101.419	0.000
1974	22.583	29.474	25.424	55.285	93.905	78.184	0.042	6.545	1.828	2185.733	5.988	81.916	0.002
1975	22.616	29.335	25.361	51.461	95.875	78.354	0.079	5.122	1.613	2732.297	7.486	99.792	0.001
1976	22.813	29.822	25.665	49.967	94.476	77.087	0.119	6.622	2.040	2112.62	5.772	85.142	0.000
1977	23.129	30.148	26.048	51.451	95.636	76.841	0.034	7.374	1.835	1720.453	4.714	37.645	0.000
1978	23.065	29.443	25.651	51.626	95.558	80.388	0.125	6.754	1.565	2579.353	7.067	86.974	0.000
1979	23.21	29.697	25.848	51.802	95.425	79.339	0.032	6.653	1.870	2599.867	7.123	93.687	0.000

19 80	23.29 6	30.02 7	26.04 8	51.27 2	95.535	78.3 33	0.054	6.95 9	1.753	2287.29	6.249	74.226	0.001
19 81	23.11 7	29.49 6	25.69 7	52.70 6	95.592	79.5 73	0.049	6.99 6	1.821	2255.536	6.18	67.056	0.000
19 82	23.28 3	30.32 6	26.18	50.58 4	96.133	76.7 83	0.139	6.35 9	1.885	2123.517	5.818	68.894	0.001
19 83	23.80 3	30.92 2	26.72 7	48.09 7	92.075	76.8 38	0.061	7.92 6	1.615	1808.368	4.954	28.304	0.001
19 84	22.83 3	29.7	25.66 7	48.30 8	96.003	78.0 24	0.069	6.50 4	1.673	2016.249	5.509	105.111	0.000
19 85	22.73	29.78 1	25.64 4	41.83 9	95.16	76.9 88	0.094	6.49 8	1.808	1782.362	4.883	46.943	0.000
19 86	22.94 6	30.10 3	25.92 7	52.87 1	95.103	76.5 09	0.038	7.32 6	1.880	1860.685	5.098	77.575	0.001
19 87	23.80 1	30.92 9	26.72 1	48.83 4	93.968	75.5 83	0.076	8.05 6	1.881	1937.612	5.309	130.322	0.000
19 88	23.26 6	29.86	25.94 3	49.54 8	95.518	78.0 23	0.018	7.99	1.899	2371.986	6.481	69.994	0.000
19 89	22.95 8	30.05 8	25.88 2	51.14 8	94.01	76.2 46	0.061	8.47 5	1.888	1752.162	4.8	44.976	0.000
19 90	23.43 8	30.45 9	26.30 3	48.66	94.027	76.3 78	0.05	6.00 2	1.908	1848.028	5.063	51.044	0.000
19 91	23.37 6	30.50 3	26.32 8	48.58 5	96.112	75.9 81	0.112	6.41 9	1.933	1791.972	4.91	69.619	0.000

19 92	23.34	30.62	26.34 4	45.73	95.113	75.7 35	0.152	6.43 3	1.925	1716.267	4.689	49.877	0.000
19 93	23.27 8	30.20 6	26.13 5	52.35 9	95.486	77.8 24	0.046	7.41 7	1.732	2268.526	6.215	63.526	0.000
19 94	23.29 9	30.62 6	26.33 8	46.94 8	93.248	75.0 3	0.091	6.16 2	1.725	1450.004	3.973	37.007	0.000
19 95	23.25 9	29.65 1	25.87	52.31 5	95.099	79.7 31	0.086	6.04 7	1.787	3004.448	8.231	102.811	0.000
19 96	23.03 6	29.66 2	25.75 3	49.69 6	95.897	78.3 62	0.075	6.96 5	1.909	2452.632	6.701	127.966	0.000
19 97	23.57 8	30.78	26.54 1	50.09 3	95.568	75.1 67	0.129	7.91 4	2.311	1569.816	4.301	65.387	0.001
19 98	23.91 4	30.74 9	26.70 5	51.13 5	94.84	76.9 13	0.118	8.08	2.100	2098.869	5.75	138.797	0.000
19 99	22.79 7	29.30 5	25.46 3	52.81 7	95.742	78.5 82	0.09	6.14 1	2.083	2437.33	6.678	49.129	0.000
20 00	22.92 5	29.92 6	25.81 3	48.17 2	94.18	76.1 25	0.181	6.91 4	2.266	1935.46	5.288	86.804	0.001
20 01	23.22 9	30.28 8	26.11 9	45.76 3	95.281	75.1 85	0.147	6.96 2	2.245	1718.933	4.709	109.175	0.000
20 02	23.48 9	30.62 2	26.40 4	49.86 5	95.33	74.9 09	0.097	6.33 6	2.452	2053.131	5.625	70.306	0.000

2003	23.533	30.159	26.223	47.918	93.727	77.975	0.055	6.921	2.002	1999.982	5.479	46.315	0.000
2004	23.485	30.308	26.232	53.489	94.313	76.414	0.063	6.529	2.264	1953.017	5.336	121.272	0.001
2005	23.526	29.89	26.11	56.142	95.255	78.783	0.073	7.701	1.966	2200.249	6.028	36.43	0.000
2006	23.437	30.28	26.235	52.857	94.831	76.884	0.106	6.428	2.023	1977.634	5.418	54.542	0.001
2007	23.374	29.924	26.031	54.498	95.383	78.064	0.028	6.641	1.963	2524.477	6.916	110.407	0.000
2008	23.114	29.704	25.806	52.299	95.683	77.611	0.128	7.128	2.020	3034.6	8.291	94.674	0.000
2009	23.525	30.409	26.317	48.992	94.916	76.256	0.085	8.649	2.189	1923.506	5.27	73.876	0.000
2010	23.62	29.807	26.04	49.253	95.135	79.121	0.016	7.544	2.059	3317.182	9.088	90.158	0.000
2011	23.23	29.786	25.903	50.675	94.908	78.49	0.067	5.672	1.745	2636.384	7.223	210.964	0.001
2012	23.45	30.309	26.234	50.879	95.235	76.616	0.04	6.108	2.047	1927.349	5.266	52.96	0.000
2013	23.614	30.472	26.39	53.969	93.282	77.017	0.026	7.678	1.842	1942.892	5.323	66.627	0.000
2014	23.749	30.681	26.582	46.326	95.096	75.567	0.131	6.021	2.054	2147.723	5.884	101.828	0.000

20 15	24.19 9	31.43 9	27.09 5	50.40 4	92.85	74.1 31	0.1	7.45 5	2.301	1562.007	4.279	29.101	0.001
20 16	24.02 6	30.64 3	26.71	48.90 3	94.595	77.5 18	0.061	8.01 7	1.901	2048.902	5.598	59.854	0.000
20 17	23.71 5	30.10 2	26.28 7	53.15 7	95.513	79.0 07	0.05	6.63 9	1.942	2463.568	6.75	105.331	0.001
20 18	23.61 5	30.45 3	26.37 8	49.98 1	94.99	76.6 16	0.016	6.27 7	2.060	2064.473	5.656	116.109	0.000
20 19	23.90 6	30.80 6	26.74 3	50.40 9	95.32	76.1 31	0.051	6.26 9	2.013	1945.518	5.33	106.795	0.000
20 20	23.84 5	30.27 8	26.45 9	52.62 2	95.531	78.2 19	0.041	6.11 7	1.874	2661.686	7.272	79.928	0.000
20 21	23.56 2	30.34 3	26.36	48.32 9	94.222	77.1 32	0.042	5.86	1.806	2045.443	5.604	112.537	0.000
20 22	23.36 2	29.87 4	26.04	49.88 1	95.068	78.6 31	0.078	4.95 1	1.624	2635.183	7.22	79.502	0.000
20 23	24.17 4	31.01 1	26.96 4	52.54 7	95.104	76.4 73	0.099	6.84 4	1.839	1832.852	5.035	50.673	0.000
20 24	24.34 4	30.61 4	26.88 0	39.13 5	98.156	79.0 10	0.011	7.53 3	1.728	2468.377	6.763	84.04	0.000

Anexo 3. *Validación de productos satelitales frente a registros de la estación meteorológica CATSA (2015–2022)*

Se realizó un análisis comparativo entre datos satelitales y registros meteorológicos con el objetivo de evaluar la precisión y representatividad de los productos satelitales para la caracterización de variables climáticas en la zona de estudio. La estación meteorológica de la Central Azucarera Tempisque (CATSA) se ubica en Latitud 10° 30' N, Longitud 85° 34' O, a una elevación de 25 m s.n.m. El análisis abarcó el periodo 2015–2022.

Para cuantificar la concordancia entre las series satelitales y los registros observados se emplearon las siguientes métricas estadísticas, ampliamente utilizadas en estudios de validación de datos meteorológicos:

- Coeficiente de correlación de Pearson (r): mide la fuerza y dirección de la relación lineal entre los valores observados y estimados. Su rango varía entre -1 y 1; valores cercanos a 1 indican correlaciones positivas fuertes.
- Sesgo (Bias): indica la tendencia sistemática de sobreestimación o subestimación de los productos satelitales respecto a los datos observados. Un valor de 0 implica ausencia de sesgo.
- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): cuantifica la magnitud promedio de los errores, penalizando más los errores de mayor magnitud.
- Error Absoluto Medio (MAE): representa la desviación promedio absoluta entre los valores estimados y observados.
- Coeficiente de determinación (R^2): expresa la proporción de variabilidad de la variable observada explicada por los datos satelitales. Valores cercanos a 1 indican alto grado de ajuste.
- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): evalúa la capacidad de los datos estimados para reproducir la variabilidad de los valores observados. Su valor oscila entre $-\infty$ y 1, siendo 1 indicativo de

ajuste perfecto (Nash & Sutcliffe, 1970).

Las métricas permitieron identificar desviaciones sistemáticas, evaluar la precisión y determinar el nivel de ajuste de los datos satelitales frente a las observaciones in situ. Todos los análisis se realizaron utilizando el software R (R Core Team, 2022).

Los resultados (Tabla A3.1.) muestran que las temperaturas media y máxima presentan la mayor concordancia entre datos satelitales y observaciones, con R^2 de 0,7888 y 0,7496, respectivamente. La humedad relativa (HR) y la precipitación acumulada mensual (PP) presentan correlaciones aceptables ($R^2 = 0,7309$ y $0,6210$), aunque con mayor dispersión en los errores. La velocidad del viento mostró un ajuste moderado ($R^2 = 0,4241$), lo que indica que para esta variable sería recomendable aplicar calibraciones específicas en estudios futuros.

Tabla A3.1.

Métricas de validación de datos satelitales frente a la estación meteorológica CATSA (2015–2022)

Variable	r	RMSE	MAE	R^2	NS	Bias
Temp_Max	0,86	2,74	2,35	0.7496	-0,73	-2,19
Temp_Min	0,60	1,79	1,54	0.3715	-0,28	1,16
Temp_Med	0,88	0,97	0,77	0.7888	0,61	-0,19
HR	0,85	8,64	6,95	0.7309	0,64	-1,73
Viento	0,65	3,14	2,07	0.4241	-0,02	-2,01
PP acumulada mensual	0,78	124,49	64,25	0,6200	0,48	1,29

Nota: r = coeficiente de correlación de Pearson; RMSE = raíz del error cuadrático medio; MAE = error absoluto medio; R^2 = coeficiente de determinación; NSE = eficiencia de Nash-Sutcliffe; Bias = sesgo medio.

Anexo 4. Medias y correlación entre observaciones estación terrena y estimaciones satelitales

Para complementar el análisis, se calcularon las medias de las variables observadas y estimadas, así como el coeficiente de correlación, permitiendo evaluar la concordancia general de los productos satelitales.

Tabla A4.1.

Comparación de medias y correlación entre datos observados y satelitales (2015–2022)

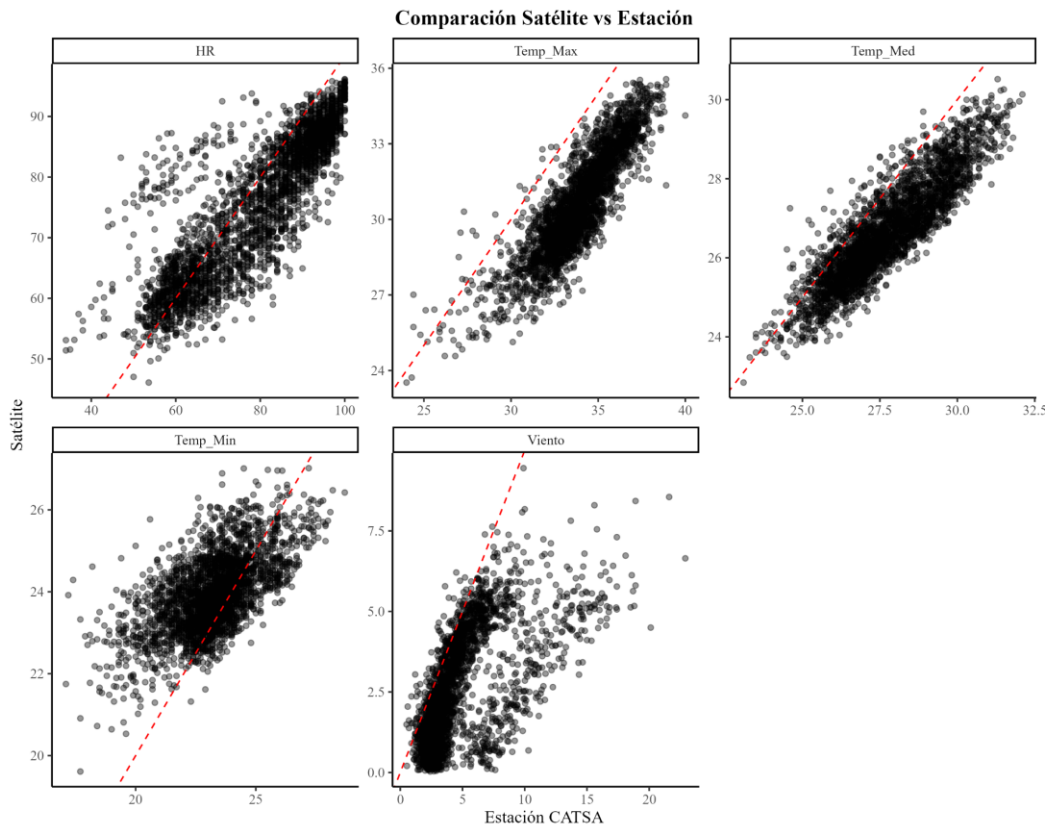
Variable	CATSA mean	Satélite mean	Correlación
Temp_Max ¹	33,82	30,58	0,86
Temp_Min ²	23,21	23,91	0,60
Temp_Med ³	27,73	26,66	0,88
HR ⁴	78,56	75,26	0,85
Viento ⁵	4,67	2,45	0,65
PP acumulada ⁶	162,28	163,57	0,78

¹Temp_Max: temperatura máxima. ²Temp_Min: temperatura Mínima. ³Temp_Med: temperatura media. ⁴HR : humedad relativa. ⁵Viento; velocidad del viento. ⁶PP: precipitación acumulada por mes.

Los gráficos de dispersión incluyen todas las observaciones mensuales de temperatura máxima, mínima y media, humedad relativa y velocidad del viento para el período 2015–2022 (Figura A4.1). Cada punto representa un valor mensual registrado en CATSA y su correspondiente estimación satelital. Las temperaturas media y máxima muestran una fuerte concordancia con la línea de identidad, indicando buena capacidad de los satélites para reproducir la variabilidad térmica ($R^2 = 0,7888$ y $0,7496$, respectivamente). La temperatura mínima presenta mayor dispersión, reflejando subestimaciones y sobreestimaciones en ciertos meses ($R^2 = 0,3715$). La humedad relativa muestra correlación positiva aceptable ($R^2 = 0,7309$), aunque los valores extremos tienden a ser subestimados. Finalmente, la velocidad del viento presenta mayor dispersión y un ajuste moderado ($R^2 = 0,4241$), indicando que la estimación satelital es menos confiable para esta variable y podría beneficiarse de calibraciones adicionales.

Figura A4.1.

Gráfico de dispersión de variables climáticas entre datos satelitales y observaciones de la estación CATSA (2015–2022)



Este gráfico de dispersión presenta la precipitación acumulada mensual, comparando las medias mensuales observadas en CATSA con las estimaciones satelitales (figura A4.2). La tendencia general positiva indica que los satélites captaron de manera consistente la variabilidad intermensual de la precipitación ($R^2 = 0,6200$), aunque se observa dispersión en meses con lluvias extremas, lo que refleja la dificultad de los productos satelitales para reproducir eventos intensos y localizados. Este análisis confirma que, si bien los productos satelitales son útiles para identificar patrones generales de precipitación, es recomendable complementarlos con mediciones in situ para estudios de alta precisión o gestión de recursos hídricos.

Figura A4.2.

Comparación de precipitación mensual observada y satelital (2015–2022)

