VARIABILIDAD DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS EN LA MOJANA, COLOMBIA

LUIS FELIPE BURGOS BARBAS
LUIS MIGUEL BERTEL RICARDO

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
INGENIERÍA AGRONÓMICA
MONTERÍA, CÓRDOBA
2022

VARIABILIDAD DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLA EN LA MOJANA, COLOMBIA

LUIS FELIPE BURGOS BARBAS
LUIS MIGUEL BERTEL RICARDO

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
INGENIERÍA AGRONÓMICA
MONTERÍA, CÓRDOBA
2022

VARIABILIDAD DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLA EN LA MOJANA, COLOMBIA

LUIS FELIPE BURGOS BARBAS
LUIS MIGUEL BERTEL RICARDO

TRABAJO DE GRADO, MODALIDAD INVESTIGACIÓN, COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO

DIRECTOR:
TEOBALDIS MERCADO FERNÁNDEZ
I.A., M.Sc., Ph.D. HIDROCIENCIAS
ALVARO JOSÉ ZABALETA ORTEGA
Ingeniero Ambiental, candidato a Maestría IPN, México.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
INGENIERÍA AGRONÓMICA
MONTERÍA, CÓRDOBA
2022

“La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores”
Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____
TEOBALDIS MERCADO FERNÁNDEZ
DIRECTOR

_____
ÁLVARO JOSÉ ZABALETA ORTEGA
CODIRECTOR

_____
LUISA MARTÍNEZ ACOSTA
JURADO

_____
AMIR DAVID VERGARA CARVAJAL
JURADO

DEDICATORIA

A Dios; porque de él, por él y para él son todas las cosas.

A mis padres; Bibian Ricardo y Jhon Bertel, por haberme brindado protección, educación y apoyo. Sin ellos no lo hubiese podido lograr.

A mi hermano Mateo Bertel por el apoyo y el acompañamiento.

Luis Miguel Bertel Ricardo.

A Dios y al universo por brindarme la oportunidad de superar nuevos logros y objetivos.

A mis padres, esposa, amigos, seres queridos que creyeron y confiaron en mi potencial.

A mí, por el esfuerzo, voluntad, capacidad y autoconfianza.

Luis Felipe Burgos Barba.

AGRADECIMIENTOS

A Dios; por el sustento, la sabiduría, la fuerza y la vitalidad para seguir adelante.

A mis padres; Bibian Ricardo y Jhon Bertel, por haber estado siempre conmigo, apoyándome y esforzándose durante todo este recorrido para que hoy pueda alcanzar este logro.

A la docente Alexandra Sánchez y al ingeniero Alejandro Vergara, por sus enseñanzas, asesorías y por haber depositado un voto de confianza en mí.

A mi tía Elena Ricardo, a mi tío Tulio Ricardo y a mi hermano Mateo Bertel, por el apoyo incondicional y a todos mis familiares y compañeros, en especial a Luis Felipe Burgos Barba; porque de alguna manera u otra influyeron en mi vida para que hoy pueda alcanzar este logro.

Luis Miguel Bertel Ricardo.

A Dios y al universo entero.

A mis padres; Rafael Burgos y Ana Barba, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi esposa Rosa González, por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento.

A toda mi familia, porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento, hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A la doctora Julia Elena, secretaria académica y a mi compañero Luis Miguel Bertel Ricardo.

Finalmente, a todos mis amigos, por apoyarme cuando más los he necesitado, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias, siempre los llevo en el corazón.

Luis Felipe Burgos Barbas.

De manera general…

Al profesor Teobaldis Mercado y al ingeniero Álvaro Zabaleta, por darnos la oportunidad de trabajar con ellos y de compartir con nosotros un poco de sus conocimientos.

Al ingeniero ambiental José Revueltas y al estudiante de ingeniería ambiental, Andrés Del Castillo, por sus indicaciones y aportes en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad de Córdoba por abrirnos sus puertas, a la Facultad de Ciencias Agrícolas, al programa de Ingeniería Agronómica y a sus docentes por la amistad y el conocimiento compartido.

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL 13
ABSTRACT GENERAL 14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL 15
1.1. INTRODUCCIÓN 15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 16
1.3. GENERALIDADES 17
1.3.1. Zona de La Mojana 17
1.3.2. Cambio climático 19
1.3.3. Variabilidad climática 20
1.3.4. Fenómeno de El Niño 21
1.3.5. Fenómeno de La Niña 21
1.3.6. Sequía. 23
1.3.7. Evapotranspiración 23
1.3.8. Conceptos de evapotranspiración. 24
1.3.10. Métodos de estimación de la evapotranspiración potencial o de referencia (ETp) 26
1.3.11. Coeficiente del cultivo 31
1.3.12. Disponibilidad de agua en el suelo 34
1.3.13. Balance hídrico. 35
1.4. OBJETIVOS 36
1.4.1. Objetivo general 36
1.4.2. Objetivos específicos 36
1.5. LITERATURA CITADA 37
CAPÍTULO II: VARIABILIDAD DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA DE LA MOJANA (SUCRE Y CÓRDOBA), COLOMBIA 43
RESUMEN 43
ABSTRACT 44
2.1. INTRODUCCIÓN 45
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS 46
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIONES 49
2.4. CONCLUSIONES 59

2.5. REFERENCIAS 60
DISCUSIÓN GENERAL 63
LITERATURA CITADA 66
CONCLUSIONES GENERALES 68
RECOMENDACIONES GENERALES 69
ANEXOS 70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Área sembrada con cultivos transitorios (ha).....18
Tabla 1.2. Área sembrada con cultivos permanentes (ha). 19
Tabla 1.3. Área sembrada en pastos (ha). 19
Tabla 1.4. Índice de Niño Oceánico (ONI), para el periodo de estudio.....22
Tabla 1.6. Coeficientes para cultivos permanentes. 33
Fuente: (Jaramillo *et al.,* 2010). 33
Tabla 1.7. Coeficientes de cultivo y ciclo de siembra para cultivos transitorios.....33
Fuente: (Jaramillo *et al.,* 2010). 33
Tabla 1.8. Coeficientes de cultivo y ciclo de siembra para pastos manejados. 34
Tabla 2.1. Estaciones meteorológicas de estudio. 49
Tabla 2.2. Variabilidad de T y ETp en el escenario 1. 52
Tabla 2.3. Variabilidad de T y ETp en el escenario 2. 52
Tabla 2.4. Variabilidad de P en el escenario 1. 52
Tabla 2.5. Variabilidad de P en el escenario 2. 53
Tabla 2.6. Participación de fenómenos cíclicos en la variabilidad de T y ETp. 54
Tabla 2.7. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de Ayapel (Córdoba) para el escenario 1. 55
Tabla 2.8. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de Ayapel (Córdoba) para el escenario 2. 55
Tabla 2.9. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de San Benito Abad (Sucre) para el escenario 1.....56
Tabla 2.10. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de San Benito Abad (Sucre) para el escenario 2.....56
Tabla 2.11. Balance hídrico multianual a partir de los valores climatológicos de la estación Ayapel (escenario 1).....57

Tabla 2.12. Balance hídrico multianual a partir de las proyecciones a futuro en la estación Ayapel (escenario 2).....57

Tabla 2.13. Balance hídrico multianual a partir de los valores climatológicos de la estación San Benito (escenario 1). 57

Tabla 2.14. Balance hídrico multianual a partir de las proyecciones a futuro en la estación San Benito (escenario 2). 58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación esquemática de un estoma. 24

Figura 1.2. Factores que afectan la evapotranspiración en referencia a conceptos relacionados.....25

Figura 1.3. Curva generalizada del coeficiente del cultivo. 32

Figura 2.1. Variabilidad climática multianual (38 años), a partir de temperatura y evapotranspiración potencial en las estaciones de Ayapel y San Benito.....50

Figura 2.2. Variabilidad climatica multianual a partir de la precipitacion en cada una de las estaciones de estudio, de acuerdo al municipio donde se ubica. 51

Figura 2.3. Comportamiento de la precipitación multianual en la zona de estudio. 54

LISTA DE MAPAS

Mapa 1.1. Ubicación geográfica de la zona de La Mojana. 18

Mapa 2.1. Área de estudio.....46

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación (1.1). Balance de agua en el suelo.....26

Ecuación (1.2). Evapotranspiración estimada con el tanque de evaporación.....27

Ecuación (1.3). Método FAO Penman-Monteith 27

Ecuación (1.4). Método de Thornthwaite 28

Ecuación (1.5). Método de Hargreaves 28

Ecuación (1.6). Método de Jensen - Haise.....29

Ecuación (1.7). Método de Christiansen.....29

Ecuación (1.8). Método de Linacre 30

Ecuación (1.8a). Estimación de (T – Td) para el método de Linacre 30
Ecuación (1.9). Método de Turc.....30
Ecuación (1.9a). Método de Turc para HR mensual mayor al 50% 30
Ecuación (1.9b). Radiación global 31
Ecuación (1.10). Coeficiente del cultivo.....31
Ecuación (2.1). Datos faltantes de precipitación y temperatura.....48

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1.1. Número máximo de horas sol (N) para diferentes latitudes del hemisferio norte, por mes. 70
Anexo 1.2. Plantilla de Excel 2016 con el método de Thornthwaite. 71
Anexo 1.3. Gráficas utilizadas en el análisis de desviación para estudiar la posible participación de El Niño y Niña en los valores máximos y mínimos de T y ETp. ...72
Anexo 1.4. Comportamiento de la temperatura mensual multianual en la estación Ayapel. 73
Anexo 1.5. Comportamiento de la temperatura mensual multianual en la estación San Benito. 74
Anexo 1.6. Comportamiento de la ETp mensual multianual en la estación Ayapel. 75
Anexo 1.7. Comportamiento de la ETp mensual multianual en la estación San Benito.....76
Anexo 1.8. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Ayapel, (Ayapel Córdoba). 77
Anexo 1.9. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Caimito, (Caimito, Sucre). 78
Anexo 1.10. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Campo Alegre, (Sucre, Sucre). 79
Anexo 1.11. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Eureka HDA, (San Marcos, Sucre). 80
Anexo 1.12. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Majagual, (Majagual, Sucre). 81
Anexo 1.13. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación San Benito, (San Benito Abad, Sucre). 82
Anexo 1.14. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Villanueva, (Guaranda, Sucre). 83

RESUMEN GENERAL

La evapotranspiración potencial es de importancia en la planeación de la agricultura; por tanto, se hace necesario conocer su comportamiento. Este proyecto tuvo como objetivo, estudiar la variabilidad temporal de la evapotranspiración potencial con la finalidad de analizar sus efectos en la demanda de agua para producción agrícola en La Mojana de Sucre y Córdoba, en Colombia. Esta zona, es de gran importancia por ser la principal reserva agrícola de la región Caribe, donde la especie más cultivada es el arroz (*Oryza sativa* L.). Igualmente, la posible combinación de prácticas agrícolas con la variabilidad climática anómala, han venido alterando la producción agropecuaria, y consecuentemente pudiendo llegar a producir efectos negativos en la seguridad alimentaria de la zona, de allí, la importancia de su estudio. Este fue realizado a partir del análisis en el comportamiento de la temperatura (T), precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETp), esta última, fue estimada de acuerdo a la disponibilidad de datos que requieren los diferentes métodos de estimación. Los resultados mostraron aumentos de las tres variables, en el periodo de tiempo analizado (1983 – 2020). Adicionalmente, se analizaron los eventos oscilatorios ENSO, evidenciando que, para este mismo periodo, el fenómeno de variabilidad climática más influyente fue el de La Niña. Seguidamente, se realizaron los cálculos pertinentes para hallar los requerimientos hídricos de los cultivos más representativos de la zona de estudio, de igual manera, se realizaron balances hídricos para conocer la disponibilidad de agua que podría ser aprovechable por los cultivos anteriormente mencionados. Se concluyó la presencia de la variabilidad climática por medio de los aumentos de las variables analizadas en los 38 años de estudio, además se identificaron las épocas secas y lluviosas en el área. Finalmente, entre las recomendaciones se encuentra la implementación de medidas tecnificadas amigables con el medio ambiente, que permitan aumentos en las producciones, de los cuales depende la seguridad alimentaria de la región; y, además, ayuden en la adaptación y mitigación de las variaciones del clima que impiden un óptimo crecimiento y desarrollo de los cultivos.

PALABRAS CLAVE

Cambio climático, variabilidad climática, evapotranspiración potencial, requerimientos hídricos, balance hídrico, La Mojana, Sucre y Córdoba, seguridad alimentaria.

ABSTRACT GENERAL

Potential evapotranspiration is of importance in agricultural planning; therefore, it is necessary to know their behavior. The objective of this project was to study the temporal variability of potential evapotranspiration in order to analyze its effects on water demand for agricultural production in La Mojana de Sucre and Córdoba, in Colombia. This area is of great importance as it is the main agricultural reserve in the Caribbean region, where the most cultivated species is rice (Oryza sativa L.). Likewise, the possible combination of agricultural practices with anomalous climatic variability, have been altering agricultural production, and consequently may have negative effects on food security in the area, hence the importance of its study. This was carried out from the analysis of the behavior of temperature (T), precipitation (P) and potential evapotranspiration (ETp), the latter was estimated according to the availability of data required by the different estimation methods. The results showed increases in the three variables, in the period of time analyzed (1983 - 2020). Additionally, the ENSO oscillatory events were analyzed, showing that, for this same period, the most influential climatic variability phenomenon was La Niña. Next, the pertinent calculations were made to find the water requirements of the most representative crops in the study area, in the same way, water balances were made to know the availability of water that could be used by the aforementioned crops. The presence of climatic variability was concluded through the increases of the variables analyzed in the 38 years of study, in addition, the dry and rainy seasons in the area were identified. Finally, among the recommendations is the implementation of environmentally friendly technical measures that allow increases in production, on which the region's food security depends; and, in addition, help in the adaptation and mitigation of climate variations that prevent optimal growth and development of crops.

KEYWORDS

Climate change, climate variability, potential evapotranspiration, water requirements, water balance, La Mojana, Sucre y Córdoba, food security.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas productivos del sector agrícola y ganadero, dependen en gran medida del clima, como por ejemplo la intervención de las variables de precipitación y temperatura; por lo que la agricultura es el sector más gravemente afectado por el cambio climático (Cai *et al.,* 2015). El sector agrícola del Caribe colombiano se ha visto afectado por las variaciones de temperaturas y precipitaciones (Gónima, 2009). La reserva agrícola más importante de la Región Caribe, conocida como La Mojana, ha presentado factores de riesgos en la producción agropecuaria atribuibles a las alteraciones de la variabilidad climática (Olivero, 2003), estas alteraciones pueden provocar necesidades hídricas de los cultivos, disponibilidad y calidad del agua para aprovisionar la demanda de los mismos; en consecuencia, la seguridad alimentaria de la zona se podría ver afectada (Cai *et al.,* 2015).

Por otra parte, el cálculo de los requerimientos hídricos de los cultivos, utiliza la evapotranspiración potencial (ETp) o de referencia (ETo); pues resulta ser un parámetro muy importante para dicho fin. La ETp constituye la columna vertebral del diseño agronómico de todo sistema de riego, a través del cual se dimensionan redes de canales, redes de tuberías y reservorios. Además, facilita la planificación de la operación de un sistema de riego (calendario y turnos de riego), y permite planificar la gestión de los recursos hídricos en una cuenca (Ortiz, 2020). Para la estimación de la ETp se han implementado diferentes metodologías empíricas por medio de experimentos en campo y con base a aproximaciones teóricas (Landon, 2004), entre las que se destacan el tanque evaporímetro y fórmulas empíricas. Dentro de estas fórmulas se tiene el modelo físico completo (Penman-Monteith); basados en la temperatura (Thornthwaite y Turc); basados en la temperatura y en la radiación solar (Hargreaves, Jensen and Haise, Makkink, Priestley and Taylor y FAO Radiación), entre otros métodos (Bhabagrahi *et al.,* 2012).

Conforme a lo anterior, mucho se afirma sobre la existencia de más de 500 estudios en la subregión de La Mojana (Aguilera, 2004). No obstante, poco se conoce acerca de los comportamientos de la evapotranspiración potencial en esta área. De manera que, con este estudio se busca la contribución al conocimiento del comportamiento de la ETp, bajo escenarios del cambio climático y como esto afecta la seguridad alimentaria de La Mojana perteneciente a los departamentos de Sucre y Córdoba.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático puede entenderse como la variación progresiva y continua en los patrones de las variables que describen los elementos del clima respecto a sus rangos de variabilidad natural (Masson-Delmotte *et al*, 2018). De estas variaciones climáticas, dependen en gran medida los sistemas de producción del sector agrícola. La precipitación y la temperatura son variables del clima esenciales en los sistemas de producción, de manera que, variaciones anómalas en dichas variables, por efectos del cambio climático, suponen alteraciones que pueden afectar directamente la productividad, cuya consecuencia más notoria se refleja en la disponibilidad y calidad del agua para aprovisionar la demanda de los procesos agrícolas productivos (Cai *et al.,* 2015), siendo la disponibilidad de agua, la principal limitante en la producción de las cosechas (Golbashy *et al.,* 2010). Naturalmente, la ocurrencia de deficiencias de agua, puede estar influenciada por la estacionalidad de la ETp en una localidad o por el fenómeno de sequía (Cruz *et al.,* 2014). Este fenómeno se debe a la ocurrencia de lluvias considerablemente menores a los valores registrados en una zona, y se presenta cuando el déficit pluviométrico produce un incremento de la temperatura, reducción de la humedad atmosférica, aumento de la insolación, disminución de la nubosidad, incremento de la evapotranspiración y recarga insuficiente de los acuíferos de agua (Keyanyash & Dracup 2002); también induce en la aparición de plagas y enfermedades en plantas, hechos que se vienen presentando a nivel mundial (Soto, 2019).

Por otro lado, los fenómenos naturales oscilatorios de “El Niño” y “La Niña”, mencionados anteriormente, se han intensificado debido al cambio climático, situación que impacta negativamente a todos los sectores productivos del país entre ellos al agropecuario, vital para la vida de los seres humanos, no sólo por ser fuente principal de alimentos, sino por tener implicaciones económicas en el país, llegando al punto de exponer a altos grados de riesgo, la seguridad alimentaria e influyendo en incrementos de los niveles de pobreza, esto debido al alza de los precios de los productos de la canasta familiar (Soto, 2019). Las variaciones climáticas relacionadas con el fenómeno de El Niño y de La Niña, han traído serios retos para la agricultura colombiana, demostrando que muchos agricultores no tienen la capacidad de manejar efectivamente el riesgo y de adaptarse a fluctuaciones climáticas y catástrofes ambientales (Lau *et al.,* 2011). De tal manera, en el Caribe colombiano el calentamiento global es un hecho, y ha sido evidenciado por variaciones de temperaturas, precipitaciones, déficit hídrico y evapotranspiración (Gónima, 2009), esta última se ve afectada en gran medida por los cambios climáticos globales como un componente esencial tanto del clima como de los ciclos hidrológicos, afectando significativamente el crecimiento de las plantas y, por ende, la producción (Wang *et al.,* 2017). Sumado a esto, las diversas actividades productivas que se realizan en esta zona, causan impactos ambientales en la funcionalidad de los ecosistemas, evidenciados en aspectos como disminución de espejos de agua, desecación de humedales, degradación de tierras, entre otros (Aguilera-Díaz, 2004).

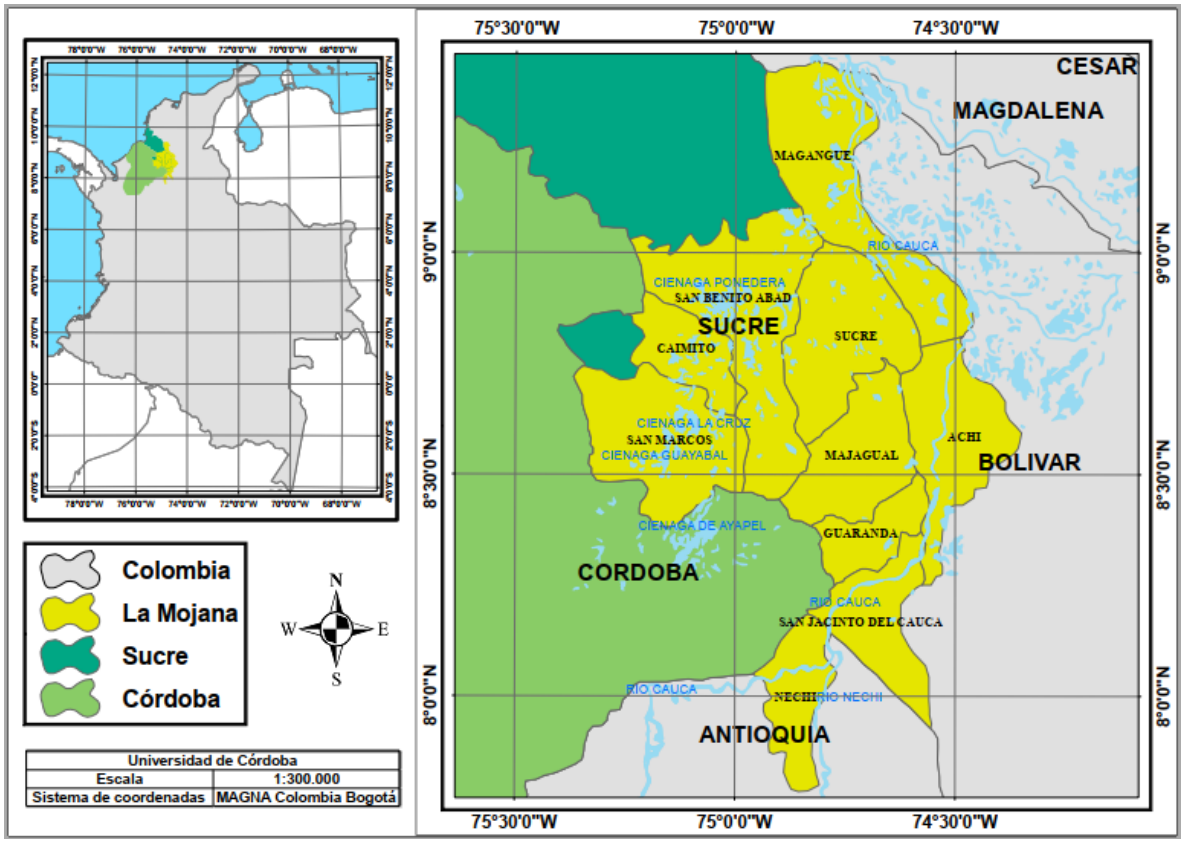
1.3. GENERALIDADES

1.3.1. Zona de La Mojana

La importancia de la región, en términos hidrológicos e hidráulicos, está dada por su papel fundamental en la regulación de los caudales de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. De igual manera al complejo sistema de humedales asociados a una gran biodiversidad de fauna y flora silvestre, al alto potencial productivo, agropecuario y forestal y a su gran riqueza cultural (Olivero, 2003). Esta zona se encuentra al norte del país (Mapa 1), delimita geográficamente al este con el río Cauca, al oeste con el río San Jorge y la ciénaga de Ayapel, al noreste con el brazo de Loba (río Magdalena) y al sur con la Serranía de Ayapel. La región está conformada por porciones territoriales de cuatro departamentos y once municipios: Nechí (Antioquia); Magangué, San Jacinto del Cauca y Achí (Bolívar); Ayapel (Córdoba); San Marcos, Guaranda, Majagual, Sucre, Caimito y San Benito Abad (Sucre) (CONPES, 2006), ocupando un área aproximada de 500.000 ha (Aguilera-Díaz, 2004).

Del mismo modo, la zona presenta una topografía plana, con una cota superior hacia el sur, cerca de 36 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una inferior hacia el norte, cercana a los 16 msnm. Referente a los suelos, La Mojana presenta arenas profundas que alternan con arcilla y limo, y afloran en la superficie (Aguilera-Díaz, 2004). El mismo autor menciona que anualmente la zona recibe sedimentos de los ríos, recogidos a su paso por los valles interandinos, y predomina una fertilidad de moderada a alta, aunque en algunas épocas del año es baja por suelos anaeróbicos, y en otras por lluvias insuficiente. La zona tiene un clima tropical cálido y húmedo con temperaturas constantes cercanas a los 28°C (Aguilera-Díaz, 2004).

Mapa 1.1. Ubicación geográfica de la zona de La Mojana.



Fuente: elaboración propia.

En lo relacionado con la agricultura, en esta zona se siembran cultivos comerciales, cultivos de subsistencia o de Pan-coger, frutales y otros que fueron importantes en la región (Aguilera-Díaz, 2004). De manera actualizada, en las Tablas 1.1 y 1.2; se muestran las principales especies cultivadas de acuerdo al tipo de cultivo. Acorde a la zona de La Mojana comprendida en los departamentos de Sucre y Córdoba, para el año 2018.

Tabla 1.1. Área sembrada con cultivos transitorios (ha).

Municipio	Arroz secano mecanizado	Arroz secano manual	Maíz tecnificado	Maíz tradicional	Ñame	Yuca
Ayapel	887,18				150	100
Caimito	106,46	250	950	350		180
Guaranda	3891,75	1080		1085		215
Majagual	5914,52	350		500		
San Benito	1869,67	238,49			15	150
San Marcos	1123,76	1000			60	500
Sucre	1212,48	700	112,11	143,3		210
Total	**15005,82**	**3618,49**	**1062,1**	**2078,3**	**225,0**	**1355**

Fuente: Agronet (2022).

Tabla 1.2. Área sembrada con cultivos permanentes (ha).

Municipio	Cacao	Mango	Palma de aceite	Piña	Plátano
Ayapel		2.356			34
Caimito					96
Guaranda	49				52
Majagual	160				
San Benito		72			26
San Marcos	27		700	16	81
Sucre					150
Total	**236**	**2.428**	**700**	**16**	**439**

Fuente: Agronet (2022).

En cuanto a la actividad ganadera, esta utiliza cerca del 90% del área total de La Mojana (Aguilera-Díaz, 2004). Los valores de área en esta zona por parte del sector ganadero, se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Área sembrada en pastos (ha).

Municipio	Pasto de corte	Pradera tradicional	Pradera mejorada	Total
Ayapel	90	44.370	103.537	147.997
San Marcos	205	36.749	11.220	48.174
Guaranda		13.100	2.300	15.400
Majagual		45.000	2.500	47.500
Sucre		23.910	590	24.500
Caimito		20.500	15.980	36.480
San Benito	15	26.900	13.090	40.005
Total	**310**	**210.529**	**149217**	

Fuente: UMATAS, 2004.

1.3.2. Cambio climático

El cambio climático de define como una alteración del clima, que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana, efectuando cambios en la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima, observado durante períodos de tiempo comparables (Díaz, 2012). De acuerdo con Miller (2007), el cambio climático global se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas.

1.3.2.1. Factores que causan el cambio climático

Los factores que afectan los cambios de temperatura media de la tierra y el cambio climático son los efectos de las nubes, la emisión de aerosoles a la atmósfera, aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano, hidratos de metano. Además, los cambios de reflexión terrestres y los cambios en el campo magnético

exterior (Miller, 2007). Dicho autor, indica que otros factores son la contaminación del aire, los cambios en el hielo polar, el contenido en vapor de agua, la cantidad de cobertura de nubes y la cantidad de energía solar que alcanza la Tierra.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) (2001, 2007, 2014, 2018, 2019) por su parte, resalta en sus informes que las causas del cambio climático son de origen natural y antropogénicas; donde se presenta una cadena de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), concentraciones atmosféricas, el forzamiento radiactivo, las respuestas climáticas y los efectos del clima.

1.3.2.2. Manifestaciones del cambio climático

De acuerdo al IPCC (2001), las manifestaciones del cambio climático son:

Aumento de temperatura: la tendencia lineal a cien años (1906-2005) es de 0.7 (entre 0.56° C y 0.92° C). En los últimos 49 años del mismo periodo de tiempo, el calentamiento lineal fue de 0.13 por decenio (entre 0.10° C y 0.16° C), lo que ha representado casi el doble en relación con los cien años transcurridos desde 1906 hasta 2005.

Otra manifestación es la disminución de la extensión de nieves y hielos: los datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que, en promedio anual, la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2.7 (entre 2.1% y 3.3%) por decenio, y en mayor medida en los veranos, en que ascendió a 7.4 (entre 5.0% y 9.8%) por decenio desde 1900. La extensión máxima de suelo estacionalmente congelado, se ha reducido en torno a un 7% en el hemisferio norte, con disminuciones de hasta un 15% durante la primavera.

Por último, el aumento de la actividad ciclónica tropical intensa en el Atlántico Norte, aproximadamente desde el año 1970; aumentos en la incidencia de valores extremos de aumento de nivel del mar (excluidos los tsunamis); episodios de precipitación intensa. También hay períodos cálidos u olas de calor. Aumento de la frecuencia en la mayoría de las extensiones terrestres y aumentos del nivel del mar.

1.3.3. Variabilidad climática.

Por otro lado, la variabilidad climática “se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.), del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados” (IPCC, 2001). Algunos de los eventos de variabilidad climática que ocurren a nivel mundial son: El Niño Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Oscilación multidecadal del atlántico (AMO), Oscilación Nor-Atlántica (NAO) y Oscilación Madden-Julián (MJO). De éstas, la más conocida es el ENSO, por su magnitud y la periodicidad con que

se presenta (Melo *et al*., 2017). De acuerdo a Bocanegra (2014), el fenómeno ENSO, consta de dos componentes: El Niño y su fase opuesta La Niña, que corresponden, en términos generales, a la aparición de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal, en el Pacífico tropical central y oriental.

1.3.4. Fenómeno de El Niño

El Niño se manifiesta principalmente, por un aumento de la temperatura superficial del mar y una disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico. Estas condiciones anómalas generan fuertes cambios notables en el clima (Maturana *et al.,* 1997). Durante este fenómeno, las corrientes de aire se ven alteradas, lo que lleva a que la nubosidad se desplace y se presentes periodos secos en gran parte del territorio nacional, lo que ocasiona un aumento de la temperatura y con ello aumentos en la probabilidad de incendios en la vegetación (IDEAM, 2015). El mismo autor señala que los periodos secos mencionados anteriormente, no implican que la temporada de lluvias se suprima por completo. No obstante, se presenta una reducción en el caudal de los ríos que produce un déficit hídrico. Además, se ha podido observar que las zonas más afectadas por El Niño son la región Caribe y la región Andina (UNGRD, 2016).

1.3.5. Fenómeno de La Niña

La Niña se caracteriza por generar aumentos de la cantidad de lluvia por encima de su nivel normal (Julio-Román, 2020), intensificando vientos alisios en el este del océano Pacífico y períodos de sequía (Maturana *et al.,* 1997), en aquellos lugares donde durante el evento de El Niño disminuye la cantidad de lluvia por debajo de lo normal (Julio-Román, 2020). La Niña en Colombia genera aumentos en la oferta de alimentos, debido al efecto positivo que la cantidad de lluvia tiene sobre los rendimientos de algunos cultivos. A su vez, La Niña a nivel social tiene un efecto negativo derivado de las inundaciones en poblaciones, deslizamientos y taponamiento de carreteras (Julio-Román, 2020).

En la Tabla 1.4, se pueden observar los fenómenos cíclicos de El Niño y La Niña que ocurrido entre el año 1983 hasta el 2020, correspondiente al periodo de análisis de este estudio. Los períodos cálidos (rojo) y fríos (azul), representados en la tabla anteriormente mencionada, se basan en un aumento o disminución de 0.5 ^{o}C, mediante el Índice de Niño Oceánico (ONI), teniendo en cuenta una media de 3 meses de anomalías (NOAA, 2021). Cuando se presenta una sucesión igual o mayor a 5 meses de anomalías, se dice que hay ocurrencia, ya sea del fenómeno de El Niño o La Niña.

Tabla 1.4. Índice de Niño Oceánico (ONI), para el periodo de estudio.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2

Fuente: NOAA (2021).

1.3.6. Sequía.

La evaluación de la intensidad de las sequías agrícolas, al igual que la planificación de proyectos de riego para dar solución al déficit hídrico imperante en las zonas áridas y semiáridas, requieren del conocimiento de la evapotranspiración o consumo de agua de los cultivos (Choquecallata *et al.,* 1992).

La sequía, por su parte, es un fenómeno natural que tiene impactos adversos en los humanos y en los ecosistemas (Rhee y Carbone, 2011), dado el alto número de variables espacio temporales que en ella intervienen; sus impactos afectan ambiental, social y económicamente (Liu *et al.*, 2016). Al mismo tiempo producen efectos devastadores en la seguridad alimentaria y en la productividad de cultivos (FAO, 2011). Este fenómeno se origina como resultado de una deficiencia de precipitación durante un periodo de tiempo extenso, en general de una estación o más (Wilhite & Glantz 1985; citados por Del Río *et al.*, 2007). Por lo que se admite de manera general, que las sequías se deben a alteraciones en los patrones de circulación atmosférica, que a su vez los ocasiona el calentamiento desigual de la corteza terrestre y de las masas de agua, manifestado en fenómenos como El Niño (Philander,1990; citado por Velasco *et al.,* 2005).

1.3.6.1. Efectos de las sequías.

La sequía produce efectos devastadores en la seguridad alimentaria y en la productividad de los cultivos (FAO, 2011). Continuamente, la sequía produce consecuencias ambientales de leves a severas, que afectan las condiciones naturales bióticas y del paisaje, y que en general se manifiestan por la disminución sensible en flora y fauna (Velasco *et al.,* 2005). Según manifiesta dicho autor, los impactos de primer orden se limitan a los biológicos, daños en plantas y animales, mientras que los de orden superior se asocian con el perjuicio socioeconómico, los grados de responsabilidad y los cambios o efectos a largo plazo. En última instancia, los efectos de la sequía tienen manifestaciones y repercusiones sociales, la gravedad del fenómeno se aprecia tanto en consecuencias mínimas fácilmente superables, como en casos extremos, grandes hambrunas y muerte masiva por desnutrición y sed (Velasco *et al.,* 2005).

1.3.7. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se define como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y, por otra parte, mediante transpiración desde la vegetación (Faramiñán *et al.,* 2021).

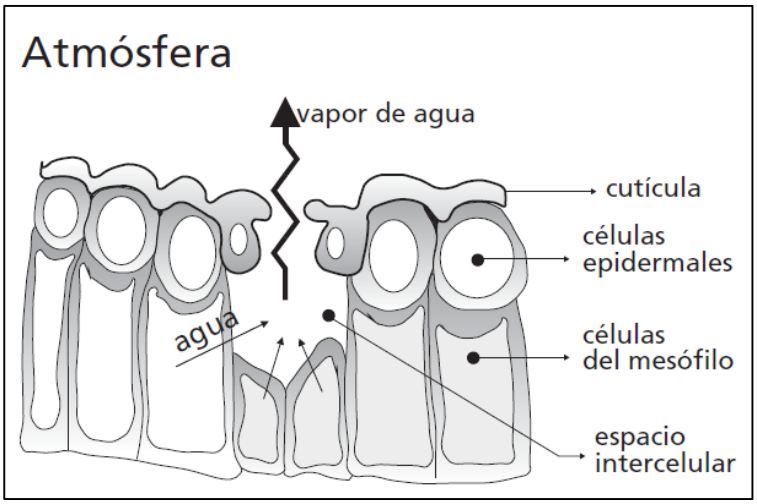
1.3.7.1. Evaporación.

Se define como la cantidad de agua que se evapora de una superficie de agua, o desde un suelo. Desde el punto de vista hidrológico, se dice que la evaporación es un proceso físico durante el cual el líquido se transforma en vapor en condiciones naturales (Sifuentes, 2018).

1.3.7.2. Transpiración.

La transpiración por su parte, se define como un proceso fisiológico natural de la planta, donde el agua es tomada del almacenamiento de la humedad en el suelo por las raíces y pasa a través de la estructura de la planta y se evapora a partir de células en la hoja llamadas estomas (Figura 1.1). Estas son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Sifuentes, 2018).

Figura 1.1. Representación esquemática de un estoma.



Fuente: Allen *et al.* (2006).

1.3.8. Conceptos de evapotranspiración.

El concepto de evapotranspiración incluye la evapotranspiración potencial (ETp), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) (Allen *et al.,* 2006). A continuación, describiremos cada una de ellas.

1.3.8.1. Evapotranspiración potencial (ETp) o de referencia (ETo)

La evapotranspiración potencial (ETp) es un parámetro muy importante en el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos; este parámetro constituye la columna

vertebral del diseño agronómico de todo sistema de riego, a través del cual se dimensionan redes de canales, redes de tuberías, reservorios; además, facilita la planificación de la operación de un sistema de riego (calendario y turnos de riego), y permite planificar la gestión de los recursos hídricos en una cuenca (Ortiz, 2020).

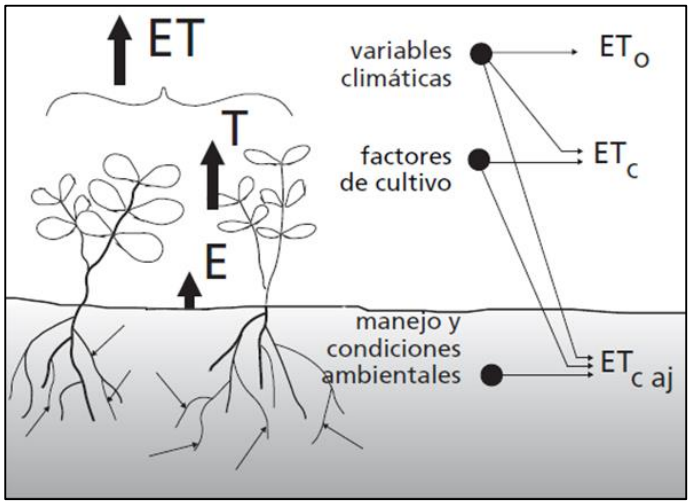
1.3.8.2. Evapotranspiración real (ETR) o del cultivo (ETc)

Por su parte la evapotranspiración real (ETR), es la cantidad de agua realmente consumida por un determinado cultivo durante el periodo de tiempo considerado y se calcula indirectamente usando la evapotranspiración potencial (ETp), que es corregida por un coeficiente de cultivo específico para cada especie agrícola (Aroni, 2019). También se puede medir directamente usando los métodos micro-meteorológicos y del balance hídrico (Ortega *et al.,* 2002).

1.3.9. Factores que afectan la evapotranspiración.

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración (Figura 1.2) (Allen *et al.,* 2006).

Figura 1.2. Factores que afectan la evapotranspiración en referencia a conceptos relacionados.



Fuente: Allen *et al*. (2006).

1.3.10. Métodos de estimación de la evapotranspiración potencial o de referencia (ETp)

La evapotranspiración se estima con modelos empíricos, semi-empíricos, fisicomatemáticos y con variables meteorológicas. La elección de un método depende de la disponibilidad de los datos meteorológicos, así como de la exactitud y la precisión del modelo para una región dada (Carvalho *et al.,* 2013).

1.3.10.1. Balance de agua en el suelo

La evapotranspiración puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Allen *et al.,* 2006). Para la medición de la ET mediante este método, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathrm{ET} = \mathrm{R} + \mathrm{P} - \mathrm{ES} - \mathrm{D} + \mathrm{C} \pm \Delta\mathrm{FS} \pm \Delta\mathrm{SW}$$ **Ecuación (1.1)**

Donde:
ET: es la evapotranspiración.
R: agua proporcionada por el riego.
P: agua proporcionada por la precipitación.
ES: agua perdida por escurrimiento superficial.
D: agua perdida por percolación profunda.
C: agua transportada hacia la superficie por capilaridad.
ΔFS: agua transportada desde la capa freática por flujo sub-superficial.
ΔSW: cambio en el contenido de agua en el suelo.

1.3.10.2. Lisímetros

Los lisímetros se han constituido en un método estándar para medir la ET (Payero e Irmak, 2008), usándose para medir la evapotranspiración real del cultivo y la evapotranspiración potencial, donde los más usados con estos propósitos son los lisímetros de pesada. (Mutillo *et al.,* 2017), los cuales son modelos precisos y fiables para determinar dichas variables (Nicolás-Cuevas *et al.,* 2018).

1.3.10.3. ET estimada con el tanque de evaporación

El tanque de evaporación ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque (Valverde, 2007). Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada (Aroni, 2019).

La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$\mathrm{ETp} = \mathrm{Kp} * \mathrm{Epan} \qquad \textbf{Ecuación (1.2)}$$

Donde:
ETp: evapotranspiración de referencia (mm/día).
K_p: coeficiente del tanque evaporímetro (-).
E_{pan}: evaporación del tanque evaporímetro (mm/día).

1.3.10.4. ET calculada con datos meteorológicos

Los métodos de estimación de la evapotranspiración se basan en la utilización de ecuaciones empíricas o semiempíricas que incluyen distintas variables meteorológicas. Estas variables se pueden obtener por medio de estaciones meteorológicas manuales o automáticas (Aroni, 2019). Entre los métodos para calcular la ETp, mediante el uso de datos meteorológicos, se tienen los siguientes:

1.3.10.4.1. Método FAO Penman-Monteith

La ecuación de Penman, desarrollada en 1948, para el cálculo de la evaporación de una superficie abierta en función de las horas de sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento (Marín-Valencia, 2010).

La ecuación de Penman-Monteith se presenta a continuación:

$$\mathrm{ET_o} = \frac{0{,}408\Delta(\mathrm{R_n} - \mathrm{G}) + \gamma\frac{900}{\mathrm{T} + 273}\mathrm{u_2}(\mathrm{e_s} - \mathrm{e_a})}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34\mathrm{u_2})} \qquad \textbf{Ecuación (1.3)}$$

Donde:
ET_o: evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día)
R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m^2 *día)
R_a: radiación extraterrestre (mm/día)
G: flujo del calor de suelo (MJ m-2 dia-1)
T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u_2: velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
e_s: presión de vapor de saturación (kPa)
e_a: presión real de vapor (kPa)
e_s – e_a: déficit de presión de vapor (kPa)
Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)
y: constante psicométrica (kPa/°C)

1.3.10.4.2. Método de Thornthwaite

Este método se recomienda para los estudios generales y de cultivo diversificado (Rubio, 2010). Para este método, se dispone de la siguiente ecuación (Thornthwaite, 1948; citado por Ortiz, 2020).

$$\mathrm{i} = \left(\frac{\mathrm{t}}{5}\right)^{1,514}$$

$$I = \sum i$$

$$\mathrm{a} = 675(10^{-9}\,\mathrm{x}\,\mathrm{I}^3) - 771(10^{-7}\,\mathrm{x}\,\mathrm{I}^2 + 1792(10^{-5}\,\mathrm{x}\,\mathrm{I}) + 0{,}49239$$

$$\mathrm{ETp\ sin\ corr.} = 16\left(\frac{10 * \mathrm{t}}{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{a}}$$

Ecuación (1.4)

$$\mathrm{ETp} = (\mathrm{ETp\ sin\ corr.})\ \mathrm{x}\ \frac{\mathrm{N}}{12}\ \mathrm{x}\ \frac{\mathrm{d}}{30}$$

Donde:
i: índice de calor mensual.
t: temperatura media mensual (°C).
I: índice de calor anual.
ETp $_{\text{sin corr}}$: evapotranspiración potencial mensual sin corregir (mm/mes).
ETp: evapotranspiración potencial corregida (mm/mes).
N: número máximo de horas sol, dependiendo del mes y de la latitud (Anexo 1.1).
d: número de días del mes.

1.3.10.4.3. Método de Hargreaves

Se utiliza la siguiente ecuación (Hargreaves & Samani, 1985; citados por Ortiz, 2020).

$$\mathrm{ETp} = 0{,}0135\ \mathrm{x\ KT\ x\ Ra}(\mathrm{T} + 17{,}8)\ \mathrm{x}\ (\mathrm{Tmáx} - \mathrm{Tmín})^{0,5}$$

Ecuación (1.5)

Donde:
ETp: evapotranspiración potencial (mm/día)
Ra: es la radiación solar entrante de onda corta (mm/día).
T: temperatura media (°C)
Tmáx: temperatura máxima (°C).
Tmín: temperatura mínima (°C).
KT: 0,162 para regiones internas y 0,19 para regiones costeras.

1.3.10.4.4. Método de Jensen – Haise

Para calcular la ETo mediante este método, se utiliza la siguiente ecuación (Landon, 2004; citado por Ortiz, 2020):

$$\mathrm{ETp} = \mathrm{Rs}(0{,}0252 \times \mathrm{T}) + 0{,}078 \qquad \textbf{Ecuación (1.6)}$$

Donde:
Rs: es la radiación solar entrante de onda corta (mm/día).
T: temperatura media (°C).

1.3.10.4.5. Método de Christiansen

Para estimar la ETo, mediante este método, se propone la siguiente ecuación (Christiansen, 1968; citado por Gómez & Cadena, 2017):

$$\begin{gathered}
\mathrm{ET_o} = 0.324 * \mathrm{Rtt} * \mathrm{Ctt} * \mathrm{Cwt} * \mathrm{Cht} * \mathrm{Cst} * \mathrm{Ce} \\
\mathrm{Ctt} = 0{,}43 + 0{,}45 * \left(\frac{\mathrm{T_c}}{\mathrm{T_{Co}}}\right) + 0{,}122 * \left(\frac{\mathrm{T_c}}{\mathrm{T_{co}}^2}\right) \\
\mathrm{Cwt} = 0{,}672 + 0{,}406\left(\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{w_0}}\right) - 0{,}078\left(\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{w_0}}\right)^2 \\
\mathrm{Cht} = 1{,}035 + 0{,}240\left(\frac{\mathrm{Hm}}{\mathrm{Hmo}}\right)^2 + 0{,}275\left(\frac{\mathrm{Hm}}{\mathrm{Hmo}}\right)^3 \\
\mathrm{Cht} = 0{,}340 + 0{,}856\left(\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{s_0}}\right) - 0{,}196\left(\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{s_0}}\right)^2
\end{gathered} \qquad \textbf{Ecuación (1.7)}$$

Donde:
ETp: es la evapotranspiración de referencia (mm/día).
Rt: es la radiación tomada en el tope de la atmósfera calculada de acuerdo con la constante solar de 2 $\mathrm{calorías/cm2/min}$; calorías/cm^2/min.
Rtt: es el producto de Rt por número de días del mes.
Tc: temperatura media (°C).
Tco: 20°C.
w: velocidad media del viento a 2 m de altura (km/hora).
w_0: 6,7 km/h.
Hm: humedad relativa, en decimales.
Hmo: 0.60.
S: porcentaje de brillo solar medio, en decimales. S=n/N.
n: brillo solar del mes i.
N: brillo solar teórico del mes i.
So: 0.80.
Ce: 0.970 + 0.030 (e / eo),
e: elevación de la estación en metros.
eo: 305 metros.

1.3.10.4.6. Método de Linacre

Se utiliza la siguiente ecuación (Gómez & Cadena, 2017):

$$ET_o = \frac{\left[\frac{500Tm}{100 - A}\right] + 15(T - Td)}{80 - T} \qquad \textbf{Ecuación (1.8)}$$

Donde:
ETo: es la evapotranspiración con un buen suministro de agua y un albedo de 0.25 (mm/día).
Tm: es igual a (T+ 0.006h) (lo que equivale al nivel del mar).
h: es la elevación sobre el nivel del mar (m).
Td: punto de rocío promedio (°C).
A: latitud del lugar (valor expresado en décimas).
T: temperatura media del aire (°C).

Cuando no se posee información sobre el punto de rocío, entonces el término (T - Td) se determina así:

$$(T - Td) = 0{,}0023h + 0{,}37t + 0{,}53R + 0{,}35R\,\text{año} - 10{,}9 \qquad \textbf{Ecuación (1.8a)}$$

Donde:
R: es el ango medio diario de temperatura.
$R_{año}$: es la diferencia entre las temperaturas medias del mes más cálido y el mes más frío.

1.3.10.4.7. Método de Turc

Para estimar la ETo por el método de Turc, se utiliza la siguiente ecuación (Turc, 1961; citado por Gómez & Cadena, 2017):

Cuando la humedad relativa media mensual es inferior al 50%:

$$ET_o = k\left(\frac{T}{T + 15}\right)(RG + 50)\left(\frac{1 + 50 - HR}{70}\right) \qquad \textbf{Ecuación (1.9)}$$

Cuando la humedad relativa media mensual es superior a 50%:

$$ET_o = k\left(\frac{T}{T + 15}\right)(RG + 50) \qquad \textbf{Ecuación (1.9a)}$$

Donde:
ETo: es la evapotranspiración potencial mensual (mm/día).
K: es igual a 0.40 para los meses de 30 y 31 días, 0.37 para el mes de febrero y 0.13 para un período de 10 días.

T: es la temperatura media mensual (%).
RG: es la radiación global, en calorías/cm^2/día.

Cuando no se dispone de la información de radiación global, ésta puede ser calculada por la fórmula de Angstrom modificada:

$$RG = RA(a + b\frac{n}{N}) \qquad \textbf{Ecuación (1.9b)}$$

Donde:
RG: es la radiación (calorías/cm^2/día).
Ra: es la radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera (radiación extraterrestre).
n: es el número real de horas de insolación, en horas y décimas.
N: es la duración de la insolación posible desde el punto de vista astronómico (horas).
a y b: son el coeficiente de regresión, utilizados así: a=0.18 y b=0.55 para zonas frías y templadas. a=0.25 y b=0.45 para zonas tropicales secas. a=0.29 y b=0.42 para zonas tropicales húmedas.

1.3.11. Coeficiente del cultivo

El coeficiente del cultivo (Kc) permite calcular el consumo de agua o evapotranspiración real de un cultivo en particular a partir de la evapotranspiración de la potencial (ETp), a partir de la siguiente ecuación (Buñay, 2017).

$$ETp = Kc * ETo \qquad \textbf{Ecuación (1.10)}$$

Donde:
ET_c: evapotranspiración del cultivo (mm/día).
K_c: coeficiente del cultivo (adimensional).
ET_o: evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).

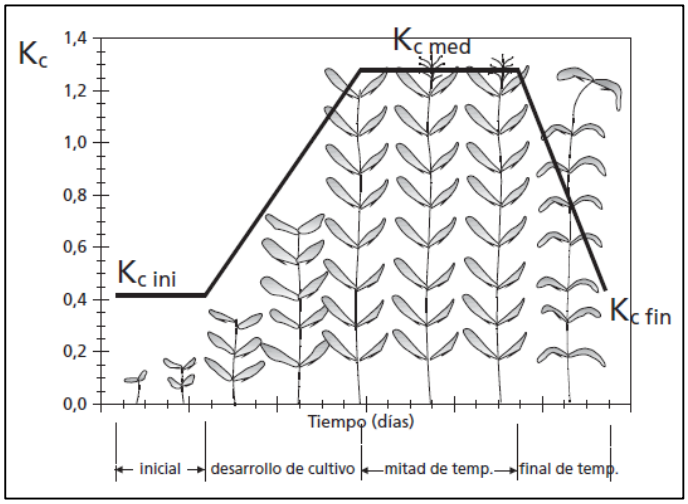
Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo Kc expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente Kc a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo (Hidalgo, 2019).

1.3.11.1. Etapas del crecimiento del cultivo

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el area foliar como el área del suelo cubierta por la vegetación, variaran progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de Kc correspondiente a un cultivo determinado, también variara a

lo largo del periodo de crecimiento del mismo. Este periodo de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas, definidas por (Allen *et al.,* 2006), y corresponden a una etapa inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada (Figura 1.3).

Figura 1.3. Curva generalizada del coeficiente del cultivo.



Fuente: Allen *et al.* (2006).

1.3.11.1.1. Etapa inicial

Esta etapa comienza con la germinación de la semilla, ocurre un rápido aumento de materia seca. Durante esta fase la planta se conoce como plántula e invierte toda su energía en desarrollar nuevos tejidos de absorción y fotosíntesis (Axayacatl, 2017).

1.3.11.1.2. Etapa de desarrollo del cultivo

El aumento de materia seca sigue ocurriendo, pero de una manera más lenta. Durante esta fase la planta requiere mayor cantidad de nutrientes para satisfacer las necesidades de las hojas y ramas en crecimiento. Cuando ocurre la floración termina esta etapa (Pérez *et al*., 2012).

1.3.11.1.3. Etapa de mediados de temporada

Comienza con la fructificación y sus características principales son que el crecimiento vegetativo se detiene (en variedades de hábito determinado), porque los frutos comienzan su desarrollo y absorben la mayoría de los nutrientes que la planta obtiene (Buñay, 2017).

1.3.11.1.4. Etapa de finales de temporada

Esta etapa se inicia con la formación completa del fruto que alcanza el punto de cosecha hasta cuando termina el ciclo de vida del mismo (Buñay, 2017). En esta etapa el crecimiento de la planta se detiene parcialmente y los frutos extraen los nutrientes necesarios para su crecimiento y maduración (Silva, 2015).

1.3.11.2. Coeficientes para algunos cultivos.

Tabla 1.6. Coeficientes para cultivos permanentes.

Cultivo	Kc inicial	Kc desarrollo	Kc medio	Kc final
Cacao	1.0	1.05	1.05	1.05
Caña de azucar	0.55	1.05	0.9	0.7
Café	1.05	1.1	1.1	1.1
Palma africana	0.95	1.0	1.0	1.0
Plátano	1.0	1.2	1.2	1.1
Banano	0.65	0.83	0.6	1.0
Mango	0.77	0.85	0.82	0.82
Naranja	0.7	0.65	0.65	0.65
Aguacate	0.8	0.78	0.78	0.78

Fuente: (Jaramillo *et al.,* 2010).

Tabla 1.7. Coeficientes de cultivo y ciclo de siembra para cultivos transitorios.

Cultivo	Kc en zona tropical				Tiempo siembra-cosecha (días)					Calendario de siembra
	Ini	Des	Med	Fin	Ini	Des	Med	Fin	**Tot**	**Fecha de siembra**
Trigo	0.3	1.1	1.15	0.3	30	140	40	30	**240**	Dic, nov, oct
Arroz manual	1.1	1.5	1.05	0.95	30	30	80	40	**180**	Dic/may
Arveja	1.05	1.05	1.0	1.1	20	30	35	15	**100**	Mar/may
Cebolla cabezona	0.95	0.95	0.95	1.05	24	36	18	18	**96**	Abr/may, oct
Maíz	0.3	0.55	1.2	0.5	20	35	40	30	**125**	Jun/oct
Papa industrial	0.5	0.75	1.15	0.75	30	35	50	30	**145**	Abr
Sorgo	0.3	0.55	1.0	0.55	20	35	40	30	**125**	May/jun
Tabaco	0.5	0.8	1.15	0.8	20	30	30	30	**110**	nd
Yuca	0.5	0.95	1.1	0.95	20	40	90	60	**210**	Periodo lluvioso
Frijol	0.4	0.9	1.15	0.9	20	30	30	10	**90**	Feb/mar
Zanahoria	0.7	0.95	1.05	0.95	30	40	60	20	**150**	Feb/mar
Tomate	0.6	0.8	1.15	0.8	30	40	45	30	**145**	Ene, abri/may, oct, nov
Algodón	1.05	0.65	1.15	0.7	30	50	60	55	**195**	Mar/may, sep
Soya	0.4	0.5	1.15	0.5	15	15	40	15	**85**	May/dic

Fuente: (Jaramillo *et al.,* 2010).

Tabla 1.8. Coeficientes de cultivo y ciclo de siembra para pastos manejados.

Especie de pasto	Kc en zona tropical					Tiempo siembra-cosecha (días)				
	Ini	Des	Med	Fin	**Pro**	Ini	Des	Med	Fin	**Tot**
Forrajeras	0.52	0.89	0.89	0.74	**0.76**	11	20	34	72	**137**
Gramíneas de corte	0.9	1.25	0.9	0.55	**0.9**	11	20	34	72	**137**
Leguminosas erectas subarbustivas	1.05	1.13	1.05	0.55	**0.95**	11	20	34	72	**137**
Leguminosas volubles	1.05	1.13	1.05	0.55	**0.95**	11	20	34	72	**137**

Fuente: (Jaramillo *et al*., 2010).

1.3.12. Disponibilidad de agua en el suelo

Por otro lado, la cantidad de agua disponible en el suelo a ser utilizada por las plantas, está comprendida entre el rango de humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Si se mantuviera la humedad del suelo a un nivel mayor que la capacidad de campo, existe el peligro de que la falta de aire en el suelo sea un factor limitante para el normal desarrollo de las plantas. Mientras que, a niveles de humedad cercanos al punto de marchitez permanente, producirá daños irreversibles en el cultivo a nivel fisiológico (Palomino, 2007).

1.3.12.1. Capacidad de campo (CC)

La capacidad de campo se define como la cantidad de agua que el suelo retiene en contra de la fuerza de gravedad cuando se le deja drenar libremente. Así mismo, la tensión de humedad de un suelo que ha alcanzado la capacidad de campo, suele estar comprendida entre 0.1 y 0.3 atmosferas (Rodríguez, 2002).

1.3.12.2. Punto de marchitez permanente (PMP)

El punto de marchitez permanente se puede definir como el límite más bajo de almacenamiento de agua del suelo para el crecimiento de las plantas, y está en función de las mismas plantas (Rodríguez, 2002). Cuando la vegetación manifiesta síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo o fructificación, debido a un flujo retardado de agua del suelo hacia la planta, se dice que ha llegado al PMP (Palomino, 2007).

1.3.13. Balance hídrico.

El balance hídrico está basado en el principio de la conservación de la masa en un sistema cerrado, el cual nos da a conocer todo cambio en el agua almacenada en un volumen de suelo, durante un determinado periodo de tiempo. Matemáticamente, es igual a la diferencia que existe entre la cantidad de agua introducida en el suelo y la cantidad que se extrae del mismo. Considerando un intervalo de tiempo que puede ser medido en meses o años (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016).

$$Pe + Ri - ETr - (Es + Px) \pm \delta H = 0$$

Donde:

Pe: precipitación efectiva.
Ri: riego.
ETr: evapotranspiración real.
Es: Escurrimiento superficial.
Px: Percolación profunda.
δH: Cantidad de agua almacenada en el suelo.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Estudiar la variabilidad temporal de la evapotranspiración potencial con la finalidad de analizar sus efectos en la demanda de agua para producción agrícola en La Mojana de Sucre y Córdoba, Colombia.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la evapotranspiración potencial en la zona de La Mojana.
- Estimar la demanda de agua en cultivos de La Mojana.
- Analizar los efectos de la evapotranspiración en los sistemas productivos de La Mojana.

1.5. LITERATURA CITADA

Agronet, 2022. Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. Disponible en: https://cutt.ly/7Oymi6k. Consultado: 14/01/2022.

Aguilera-Díaz, M. M. (2004). La Mojana: riqueza natural y potencial económico. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 48.

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Nº56 Ed. FAO. Italia, Roma. Obtenido de: https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, *298*(0).

Aroni, D. (2019). Análisis comparativo de la evapotranspiración mediante el modelo SEBAL y el método tanque evaporímetro en la cuenca Huancané-Puno. Puro: Perú.

Bhabagrahi, S., Imtisenla, W., Bidyut, D., & Bhagwati, B. (2012). Standardization of Reference Evapotranspiration Models for a Subhumid Valley Rangeland in the Eastern Himalayas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138, 880-895.

Bocanegra, J. E. M. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia. *IDEAM.* Bogotá, Colombia. 83pp.

Buñay, C. (2017). Etapas fenológicas del cultivo del pimiento (*Capsicum annuum*. L) var. verde, bajo las condiciones climáticas del cantón General Antonio Elizalde (Bucay) provincia del Guayas. Universidad Técnica de Ambato. Ambato-Ecuador. 61 p.

Cai, X., Zhang, X., Noël, P. H., & Shafiee-Jood, M. (2015). Impacts of climate change on agricultural water management: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2(5), 439-455.

Carvalho A., M. de, L. de Carvalho, R. Vianello, G. Sediyama, M. de Oliveiray and A. de Sá Junior. 2013. Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. Theor. Appl. Climatol. 113 (1-2): 155-174.

Choquecallata, J., Imaña, E. & Vacher, J. (1992). Evapotranspiración máxima del cultivo de la quinua por lisimetria y su relación con la evapotranspiración potencial

en el altiplano boliviano. VII congreso internacional sobre cultivos andinos. La Paz, Bolivia.

Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES. 2006. Estrategias para la reactivación económica y social de la región de La Mojana. pp. 15-18. Bogotá, Documento No. 3421.

Cruz, G., Baethgen, W., Picasso, V., & Terra, R. (2014). Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, *18*(1), 126-132.

Del Río, R. R., Pichardo, G. C., Ramírez, R. A., & Nolasco, A. Q. (2007). Comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, México. Terra Latinoamericana, 25(4), 383-392.

Christiansen, J. (1968). Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. J. J.Irrig. and Drain. Div.

Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*. Vol. XXXVII, N.° 2, 227-240.

FAO. (2011). Drought related food insecurity. Emergency Ministrial - Level Meeting. Rome.

Faramiñán, A. M. G., Carmona, F., Rivas, R. E., & Florencia, M. (2021). Monitoreo de la evapotranspiración real horaria por medio del balance energético y un lisímetro de pesada. *Boletín Geológico y Minero. Madrid, España*.

Golbashy, M.; S.K. Khavari; M. Ebrahimi; R. Choucan. (2010). Study of response of corn hybrids to limited irrigation. 11th Iranian Crop Science Congress, University of Shahid Beheshti, 24-26 July, Tehran, Iran. 218 p.

Gómez, J., & Cadena, M. C. (2017). *Validacion de las formulas de evapotranspiracion de referencia (ETo) para Colombia*. Obtenido de https://cutt.ly/MOymzLQ. Consultado: 19/11/2021.

Gónima, L. (2009). Evidencias del calentamiento global en el Caribe Colombiano. Meteorología Colombiana, 13, pp 1-10.

Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96-99.

Hidalgo, F. (2019). *Determinación de los requerimientos hídricos óptimos del tomate (Solanum lycopersicum L.) mediante el cálculo de la Evapotranspiración y Kc, en la zona de Mocache* (Bachelor's thesis, Quevedo-UTEQ).

IDEAM. (2015). Fenómeno El Niño en Colombia. Obtenido de: https://www.youtube.com/watch?v=-HYuc35jqx4 Consultado: 28/04/2021.

IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK y New York, NY, USA, 582 pp.

IRI. (2016). Enso Essencials. What do we mean by "El Niño". Obtenido de https://cutt.ly/AOymTbv. Consultado: 26/04/2021.

Jarramillo, O., Gonzales, M., & Saldarriaga, G. (2010). Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial. *Gestión y Ambiente*, 81-92.

Julio-Román, J. M. (2020). Hechos estilizados de la relación entre El Niño, La Niña y la inflación en Colombia. *Borradores de Economía; No. 1105*.

Keyantash, J. & Dracup, J. (2002). The quantification of drougth: an evaluation of drougth índices. Bulletin of the American Meteorological Society (83)8: 1167 – 1180.

Landon, R. (2004). *An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana.* United States: Louisiana State University.

Lau, C., Jarvis, A. & Ramírez, J. (2011). Agricultura colombiana: Adaptación al cambio climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 1. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p.

Liu, Y., Ren, L., Hong, Y., Zhu, Y., Yang, X., Yuan, F., & Jiang, S. (2016). Sensitivity analysis of standardization procedures in drought indices to varied input data selections. Journal of Hydrology, 538, 817-830.

Martínez-Reina, A. (2013). Caracterización socioeconómica de los sistemas de producción de la región de La Mojana en el Caribe de Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *14*(2), 165-185.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., ... & Waterfield, T. (2018). Global warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of, 1, 1-9.

Maturana, J., Bello, M. & Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña*, *2000*, 13-27.

Melo, S. F., Riveros, L. C., Romero, A. C., Giraldo, C., & Calderon, S. (2017). Efectos económicos de futuras sequías en Colombia: Estimación a partir del Fenómeno El Niño 2015. Archivos de Economía, 466, 1-34.

Miller, G. 2007. *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*. 8va edición. Editores Internacional. Thomson, México.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales. Bolivia. MMAG: Disponible en: https://cutt.ly/yOp7DXA. Consultado: 28/01/2022.

Murillo, C., Quintero, Q., Flórez, V. & Quintero, M. (2017). Lisímetros volumétricos. En: Flórez V. (Ed.). *Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 135-166.

Nicolás-Cuevas J., Parras-Burgos D., Ruiz-Peñalver L., Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J. (2018). Diseño del proceso de muestreo. Análisis estructural del depósito de drenaje y del recipiente de evacuación del agua drenada en un lisímetro de pesada compacto. III Symposium Nacional y I Ibérico de Ingeniería Hortícola.

NOAA. 2021. Cold & Warm Episodes by Season. Disponible en: https://cutt.ly/FOymSaU. Consultado: 17/11/2021.

Olivero, J. (2003). Programa de Desarrollo Sostenible de la región de la Mojana. *Informe Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Bogotá, Colombia. 567p.

Ortega, S., Calderon, R., Acevedo, C., & Fuentes, S. (2002). *Estimación de la Evapotranspiración Real Diaria de un Cultivo de Tomates Usando la ecuación de Penman-Monteith.* Servicio Integrado de Agroclimatología y Riego (SIAR), 2(27), pp.91-96. 91–96.

Ortiz, R. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, *7*(1), 70-79.

Palomino, K. (2007). Riego por goteo. Macro EIRL. Lima: Perú.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2001). *Tercer informe de evaluación cambio climático 2001. La base científica. Parte de la contribución del Grupo de trabajo I al Tercer Informe de Evaluación Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Dostupné online. ISBN 978-92-9169-143-2.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2018). *Calentamiento Global de 1.5°C. Un informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales y las vías de emisión de gases de efecto invernadero relacionadas, en el contexto del fortalecimiento de la respuesta global a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos para erradicar la pobreza. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.*

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2019). *Cambio climático y tierra: un informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de la tierra, la gestión sostenible de la tierra, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.*

Philander, S. G. (1990). El Niño, La Niña and the Southern Oscillation, San Diego, Academic Press.

Rhee, J. & Carbone, G. J. (2011). Estimating Drought Conditions for Regions with Limited Precipitation Data, Journal of Applied Meteorology and Climatology. Volume 50, Issue 3. pp. 548-559.

Rodríguez, H. (2002). Métodos de análisis de suelo y plantas (1ra Ed.). Editorial Trillas. México D.F. – México.

Rubio, R. H. (2010). Manual del curso de irrigación y drenaje. *Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Santa. Chimbote, Perú*.

Sifuentes, N. (2018). *Evapotranspiración del cultivo de granado por balance de energía.* (Doctoral dissertation, Instituto Tecnológico de Torreón). Coahuila, México.

Soto, A. N. (2019). Comprensión del sector agropecuario frente al Cambio climático, Fenómeno de “El Niño” y Fenómeno de “La Niña” en el Sector Agropecuario en Cuatro Municipios de Cundinamarca.

Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a Rational Classification of Climate. American Geographical Society, 38(1), 55-94.

Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle,formule climatique simplifice et mise a jour. (en francés). Ann. Agron.

UMATAS. (2004). *Informes de Coyuntura Agropecuaria*, Gobernaciones de Bolívar, Córdoba y Sucre, Archivos magnéticos, Cartagena, Montería y Sincelejo.

UNGRD. (2016). Fenómeno El Niño: Análisis comparativo 1997 - 1998 // 2014 - 2016. Obtenido de: https://cutt.ly/2OymCaB. Consultado: 23/06/2021.

Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. Región y sociedad, 17(34), 35-71.

Valverde, J. (2007). Riego y Drenaje (Editorial).

Wang, Z., Xie, P., Lai, C., Chen, X., Wu, X., Zeng, Z., & Li, J. (2017). Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961–2013. Journal of Hydrology, 544, 97-108.

Wilhite, D. A. & Glantz. M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water Int. 10: 111-120.

CAPÍTULO II: VARIABILIDAD DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA DE LA MOJANA (SUCRE Y CÓRDOBA), COLOMBIA

RESUMEN

Conocer cómo el cambio climático puede afectar las producciones de nuestros cultivos, es importante para planificar estrategias que permitan mitigar sus efectos en las producciones, de tal manera que no se vea afectada la seguridad alimentaria de una región. Teniendo esto en cuenta, el objetivo de este estudio fue analizar la variabilidad de la evapotranspiración potencial (ETp) o de referencia (ETo), bajo escenarios del cambio climático y sus efectos en la seguridad alimentaria de La Mojana perteneciente a los departamentos de Sucre y Córdoba. La importancia de esta área viene dada por ser parte del complejo de humedales de la depresión Momposina, reguladora de los cauces de los ríos Cauca, Magdalena y San Jorge; con suelos fertilizados debido a los sedimentos que transporta el flujo de agua de estos ríos desde el curso alto. Por su parte, el análisis del comportamiento de la ETp, se realizó a partir de registros históricos de las variables climáticas aportadas por la base de datos del IDEAM. Los resultados mostraron poca disponibilidad de las variables en las estaciones activas de la zona; a causa de esto, el periodo de estudio estuvo comprendido entre el año 1983 y 2020; y el método utilizado para la estimación de la ETp fue el de Thornthwaite, a partir de valores de temperaturas medias (T) y cuyo método está altamente correlacionado con el método recomendado por la FAO de Penman-Monteith. Para las variables anteriormente mencionadas, se realizó un análisis de tendencia lineal, el cual demostró un aumento tanto de la ETp como de la T, para las estaciones con disponibilidad de información. Igualmente se analizó el comportamiento de la precipitación (P), esta presentó un aumento generalizado en la zona del 6,3% en el periodo de estudio. Continuando en estudio, se analizó la posible participación de los fenómenos de variabilidad climática El Niño y La Niña, también se incluyeron los años neutros o normales; a partir de esto se comprobó como la variabilidad de T, ETp y P pueden están influenciadas por estos fenómenos, tanto en aumentos como en disminuciones. Continuamente, se hallaron los requerimientos hídricos para los cultivos más importantes en cuanto a participación en la zona, además se realizaron balances hídricos para las estaciones Ayapel y San Benito, debido a que en estas se permitió la estimación de la ETp, utilizada en los mencionados balances. En lo que a vocación agrícola respecta, la especie más cultivada en la zona es el arroz (*Oryza sativa* L.), por medio del sistema de arroz secano mecanizado, en donde los pequeños productores tienen poca participación. La seguridad alimentaria de la región depende en gran medida de estas producciones, por lo que es indispensable la aplicación de estrategias que permitan óptimos rendimientos y que a la vez permitan disminuir las contaminaciones del medio ambiente por el uso irracional de insumos químicos que puede llegarse a presentar por parte de los productores.

ABSTRACT

Knowing how climate change can affect the production of our crops is important to plan strategies to mitigate its effects on production, in such a way that the food security of a region is not affected. Bearing this in mind, the objective of this study was to analyze the variability of potential evapotranspiration (ETp) or reference evapotranspiration (ETo), under climate change scenarios, and its effects on food security in La Mojana, belonging to the departments of Sucre and Cordova. The importance of this area is due to the fact that it is part of the wetland complex of the Momposina depression, which regulates the channels of the Cauca, Magdalena and San Jorge rivers; with fertilized soils due to the sediments carried by the water flow of these rivers from the upper course. For its part, the analysis of the behavior of the ETp was carried out from historical records of the climatic variables provided by the IDEAM database. The results showed little availability of the variables in the active stations of the area; Because of this, the study period was between 1983 and 2020; and the method used to estimate the ETp was the Thornthwaite method, based on mean temperature values (T) and whose method is highly correlated with the Penman-Monteith method recommended by the FAO. For the aforementioned variables, a linear trend analysis was performed, which showed an increase in both ETp and T, for the stations with information availability. Likewise, the behavior of precipitation (P) was analyzed, it presented a generalized increase in the area of 6.3% in the study period. Continuing in the study, the possible participation of El Niño and La Niña climatic variability phenomena was analyzed, neutral or normal years were also included; From this, it was verified how the variability of T, ETp and P can be influenced by these phenomena, both in increases and decreases. Continuously, the water requirements for the most important crops in terms of participation in the area were found, in addition, water balances were made for the Ayapel and San Benito stations, because in these the estimation of the ETp was allowed, used in the aforementioned balances. As far as agricultural vocation is concerned, the most cultivated species in the area is rice (Oryza sativa L.), through the mechanized rainfed rice system, in which small producers have little participation. The food security of the region depends to a great extent on these productions, for which it is essential to apply strategies that allow optimum yields and that at the same time allow the reduction of contamination of the environment due to the irrational use of chemical inputs that can be reached. submit by producers.

2.1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático afecta la demanda hídrica de los cultivos, por ello la necesidad de hallar estrategias que permitan planificar adaptaciones en la agricultura y en la gestión del agua agrícola, especialmente en las regiones áridas y semiáridas, donde los recursos hídricos son limitados (Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz, 2021). En el caso de la subregión de La Mojana, caracterizada por ser una zona de humedales productivos que pertenecen a la Depresión Momposina, tomando gran importancia en la regulación de los ríos Magdalena, Cauca y el San Jorge, cuyos humedales son fundamentales en la amortiguación de inundaciones, al facilitar la decantación y la acumulación de sedimentos, que son funciones indispensables en la regulación ambiental y equilibrio ecológico para la Costa Caribe y el país (Aguilera-Díaz, 2004). Si bien la zona exhibe “abundantes” precipitaciones, su distribución “heterogénea”, tanto espacial como temporal puede llegar a ser insuficientes en cuanto a las cantidades disponibles para satisfacer las necesidades hídricas de los sistemas productivos, tanto agrícolas, como ganaderos; llegando a afectar la seguridad alimentaria de gran parte de la región caribe que se abastece de la producción de dicha zona.

Por su parte, el primer paso crítico para estimar la necesidad hídrica de un cultivo, surge a partir del análisis de la distribución espacial de la ETp y el pronóstico de su evolución como resultado del cambio climático (Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz, 2021). Para la estimación de la ETp, partiendo de la dificultad de obtener valores precisos en campo, tienen participación una serie de métodos indirectos, basados en diversas ecuaciones empíricas o semi-empíricas utilizando datos meteorológicos (Marini *et al.,* 2017), la selección de la ecuación a emplear depende de la disponibilidad de datos climáticos en la región (El-Nashar & Hussein, 2013).

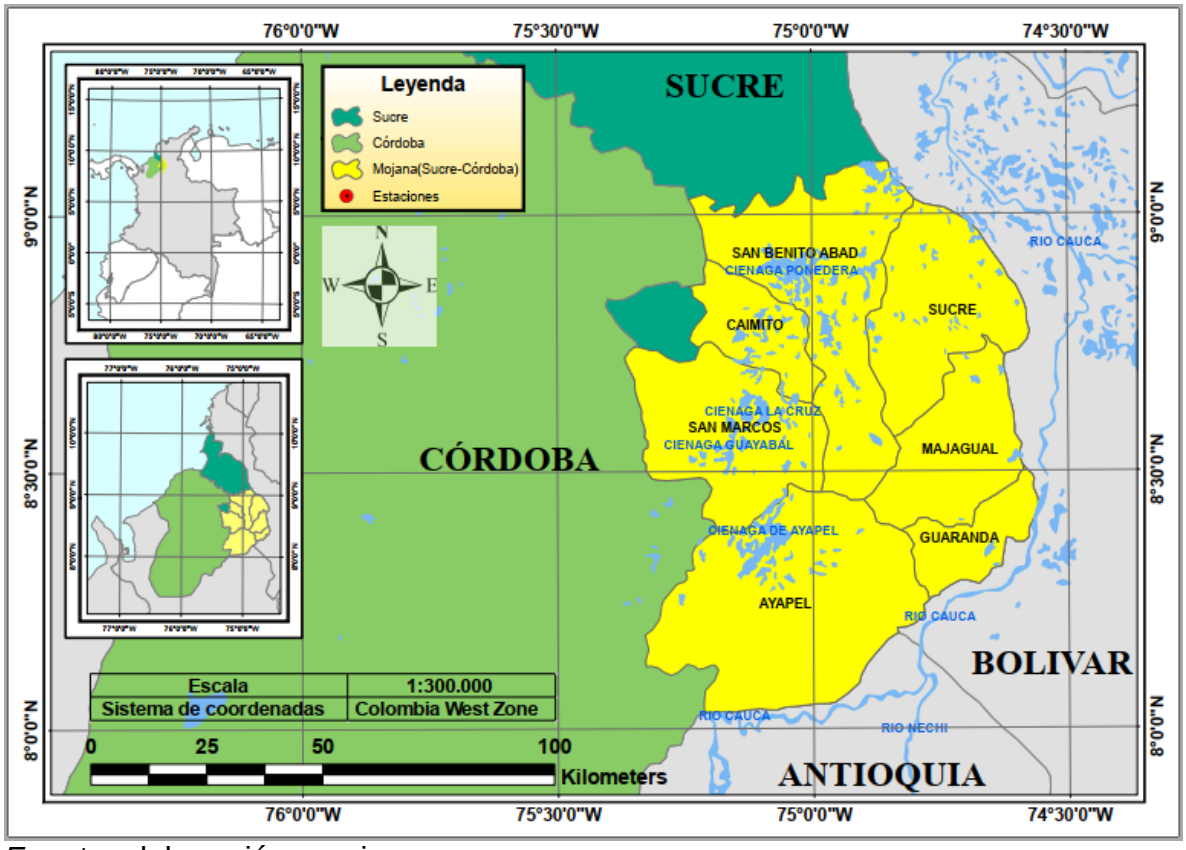
En referencia a las producciones, estas pueden estar limitadas por una serie de factores entre los que se encuentran la incidencia de plagas y enfermedades, control de la nutrición y la programación eficiente del riego (Pérez-Gutiérrez *et al.,* 2008), esta última se determina generalmente con base en la ETp (Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz, 2021), ya que permite obtener valores más reales sobre las necesidades hídricas de los cultivos (Ortiz, 2020). De esta manera se garantizaría un aumento considerable en los rendimientos de los cultivos (Bekele & Tilahun, 2007), y una sostenibilidad de la seguridad alimentaria de la región.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio.

La región de La Mojana está localizada en la parte norte de Colombia. Tiene una extensión aproximada de 513.464 ha, de las cuales un 72% pertenece a Sucre y un 10% a Córdoba (Mapa 2.1). El porcentaje restante, se divide en un 16% para el departamento de Bolívar, y un 2% para el departamento de Antioquia (Terán *at al.,* 1998).

Mapa 2.1. Área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

De manera general, La Mojana posee clima tropical, piso térmico cálido, temperatura media de 27,8 ºC y una precipitación media de 2.846,9 mm (Corpoica, 2012). Presenta una temporada seca anual que va de diciembre a abril y los meses más lluviosos van de agosto a octubre (Aguilera-Díaz, 2004).

En cuanto a la vocación agrícola de la tierra, la especie cultivada más representativa en la zona, es el arroz *(Oryza sativa* L.) (Martínez-Reina, A. (2013), que es una gramínea anual, de tallos redondos y huecos, compuestos por nudos y entrenudos.

Hojas de lámina plana, unidas al tallo por la vaina y su inflorescencia es una panícula. El tamaño de la planta varía entre 0.4m para variedades enanas, y hasta más de 7.0m en el caso de las variedades flotantes. La planta puede ser dividida en dos tipos de órganos: a) vegetativos, donde se incluyen raíces, tallos y hojas; y reproductivos, a donde pertenecen la inflorescencia y las semillas (CIAT, 2005).

La variedad más cultivada de arroz (*Oryza sativa* L.), es la criolla, esta representa la especie de mayor importancia social, para la seguridad alimentaria de los pequeños productores de la subregión de La Mojana. Por ser un sistema manejado enteramente de forma manual y con una baja entrada de insumos de origen químico (Cadena-Torres *et al.,* 2021). Según registros de Agronet (2022), para el año 2018; en un área sembrada total de 15.005,82 hectáreas, el arroz secano manual tuvo una participación del 29,6%; 1,6% para el arroz riego y un 68,7% para el arroz secano mecanizado. Con este último sistema, en el primer semestre del año 2019, se sembraron 47.276 hectáreas de arroz mecanizado, obteniendo una producción total de 111.604 ton (Fedearroz, 2019).

Estimación de la evapotranspiración potencial (ETp).

Para estimar la evapotranspiración potencial (ETp), se recomienda el método de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006), sin embargo, los registros históricos en la zona de estudio con las variables requeridas para las estimaciones requeridas, limitan la aplicación de este método (Toro-Trujillo *et al.,* 2015); lo cual unido a la idoneidad de los equipos en términos de resolución temporal, existencia o correcta operabilidad, genera faltantes de información (Monsalve, 1999). En tal sentido, la selección del método de estimación a emplear depende de la disponibilidad de datos climáticos en la zona (El-Nashar & Hussein, 2013). Entre las estaciones inicialmente seleccionadas en el área, para el análisis del comportamiento de la ETp, tenemos la estación Ayapel (25025030), Caimito (25020980), Campo Alegre (25021360), Hacienda Eureka (25020740), Majagual (25025240), San Benito (25025380) y Villanueva (25020940); de las cuales la estación Ayapel y San Benito, registraron valores de temperaturas medias, en el periodo de estudio (1983 – 2020). Debido a esto, se acudió a utilizar el método de Thornthwaite, el cual, a pesar de involucrar únicamente la temperatura, está altamente correlacionado con el método Penman-Monteith (Alkaaed *et al.*, 2006; citados por Marín-Valencia, 2010).

Los valores de temperaturas medias (T) y precipitación (P), se obtuvieron en la base de datos del IDEAM, en valores diarios. Luego, se procesaron en Excel, hasta tenerlos en valores mensuales, multianuales; teniendo en cuenta el periodo de estudio. Para el caso de las estaciones con datos faltantes de T y P, y teniendo en cuenta que en hidrología se trabaja con series continuas (Monsalve, 1999); se hizo uso de la ecuación 2.1, expuesta por el mencionado autor, para la estimación de dichos valores.

$$Px = \frac{1}{n}\left[\left(\frac{Nx}{N1}\right) P1 + \left(\frac{Nx}{N2}\right) P2 + \cdots + \left(\frac{Nx}{Nn}\right) Pn\right]$$ **Ecuación (2.1)**

Donde:
n: número de estaciones con datos de precipitaciones registradas de manera continua, cercanas a la estación "x", la cual va a ser completada en su registro.
P_x: precipitación de la estación "x" durante el periodo de tiempo por completar.
P_1 a P_n: precipitación de las estaciones 1 a la n, durante el periodo de tiempo por completar.
N_x: precipitación media anual a nivel multianual de la estación "x".
N1 a N_n: precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones de 1 a n.

Aunque esta ecuación se adecuó originalmente para hallar datos incompletos de precipitaciones, se puede utilizar de igual manera para estimar datos faltantes de temperaturas.

Una vez procesados los datos, presentados en valores mensuales y homogenizados; el siguiente paso fue calcular la evapotranspiración potencial. Para esto, se creó una plantilla de Excel con el método de Thornthwaite (Anexo 1.2), donde a partir de valores de temperaturas medias y número máximo de horas sol, dependiendo del mes y de la latitud; se obtuvo la ETp mensual, en cada año del periodo de estudio.

Seguidamente, la variabilidad de la T, ETp y P; se realizó mediante un análisis de tendencia lineal, y el estudio de la posible participación de los fenómenos de El Niño y La Niña en la variabilidad de T y ETp, se hizo mediante un análisis de desviación. Este análisis se realizó graficando el promedio de cada variable, tomando como límite superior el promedio más la desviación (Prom+Desv) y como límite inferior el promedio menos la desviación (Prom-Desv) (Anexo 1.3). Luego de esto, se identificaron los años con ocurrencia de El Niño, La Niña y de igual manera los años neutros o normales, de acuerdo a los años de estudio y sus respectivos valores de T y ETp para las estaciones Ayapel y San Benito. Finalmente, al graficar cada año clasificado de acuerdo al fenómeno de ocurrencia; sí en al menos en un mes del año analizado sobrepasaba los límites anteriormente mencionados, se aceptaba la posible participación de los fenómenos en el comportamiento de los aumentos o disminuciones de T y ETp.

Finalmente, se realizaron los cálculos para identificar las necesidades hídricas de los cultivos más representativos en la zona, a partir de los valores hallados de ETp, área sembrada y características de cada cultivo. De igual manera, se realizó el balance hídrico en los municipios donde se daban las condiciones.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Luego de obtener los valores de temperatura y precipitación en la base de datos del IDEAM y luego de haber sido procesados en el programa Excel para obtener los valores mensuales de las variables en cuestión, se procedió a estimar la evapotranspiración potencial, siguiendo el método de Thornthwaite. Los valores finalmente obtenidos, se graficaron y se analizaron mediante tendencias lineales, para el estudio de la variabilidad climática de acuerdo a las variables mencionadas. Seguidamente, se estudió la posible participación de los fenómenos cíclicos de El Niño y La Niña en el comportamiento de T y ETp.

Los resultados sobre el análisis de variabilidad en base a T, ETp y P, se presentaron de acuerdo a cada una de las estaciones meteorológicas pertenecientes al área de estudio (Tabla 2.1), para el periodo de tiempo seleccionado.

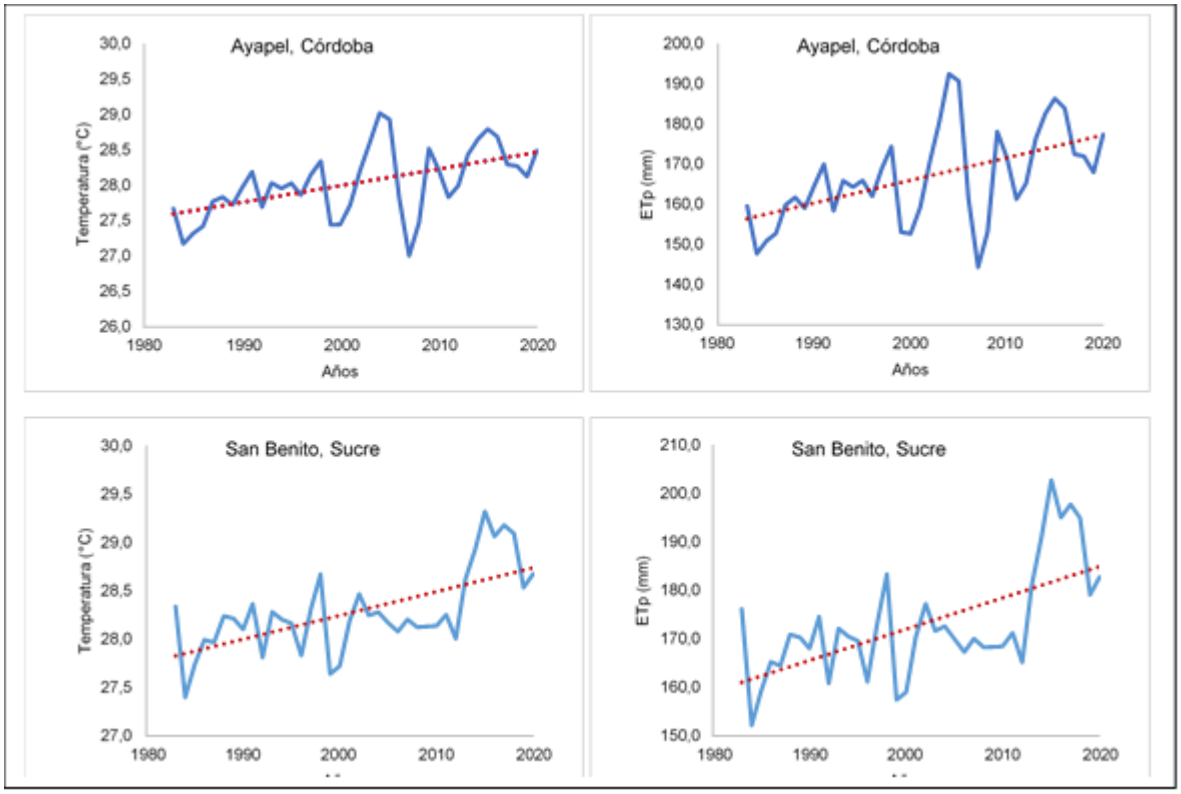
Tabla 2.1. Estaciones meteorológicas de estudio.

Ítem	Municipio	Estación	Código	Latitud	Longitud	Altura (m)
1	Ayapel	Ayapel	25025030	8.30	-75.16	20
2	Caimito	Caimito	25020980	8.79	-75.12	20
3	Guaranda	Villanueva	25020940	8.33	-74.73	45
4	Majagual	Majagual	25025240	8.54	-74.62	26
5	S. Benito Abad	San Benito	25025380	9.16	-75.04	20
6	S. Marcos	Eureka hacienda	25020740	8.63	-75.01	20
7	Sucre	Campo Alegre	25021360	8.92	-74.71	20

A partir de los registros de las estaciones meteorológicas mencionadas, las estaciones con registros de temperaturas medias (T) y precipitación (P), fueron la estación Ayapel y San Benito. En referencia al resto de estaciones, estas presentaron registros pluviométricos para el periodo de estudio.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, con cualquiera de sus métodos de estimación, debe tenerse en cuenta que los resultados que ellos ofrecen son valores orientativos, ya que las fórmulas empleadas no incluyen todos los factores de incidencia (Rubio, 2010). El comportamiento de la temperatura y la evapotranspiración potencial multianual, se muestran seguidamente, de acuerdo a cada estación con estos registros (Figura 2.1). Para estas mismas estaciones, los comportamientos mensuales multianuales para las variables T y ETp, se muestran desde el Anexo 1.4 hasta el 1.7.

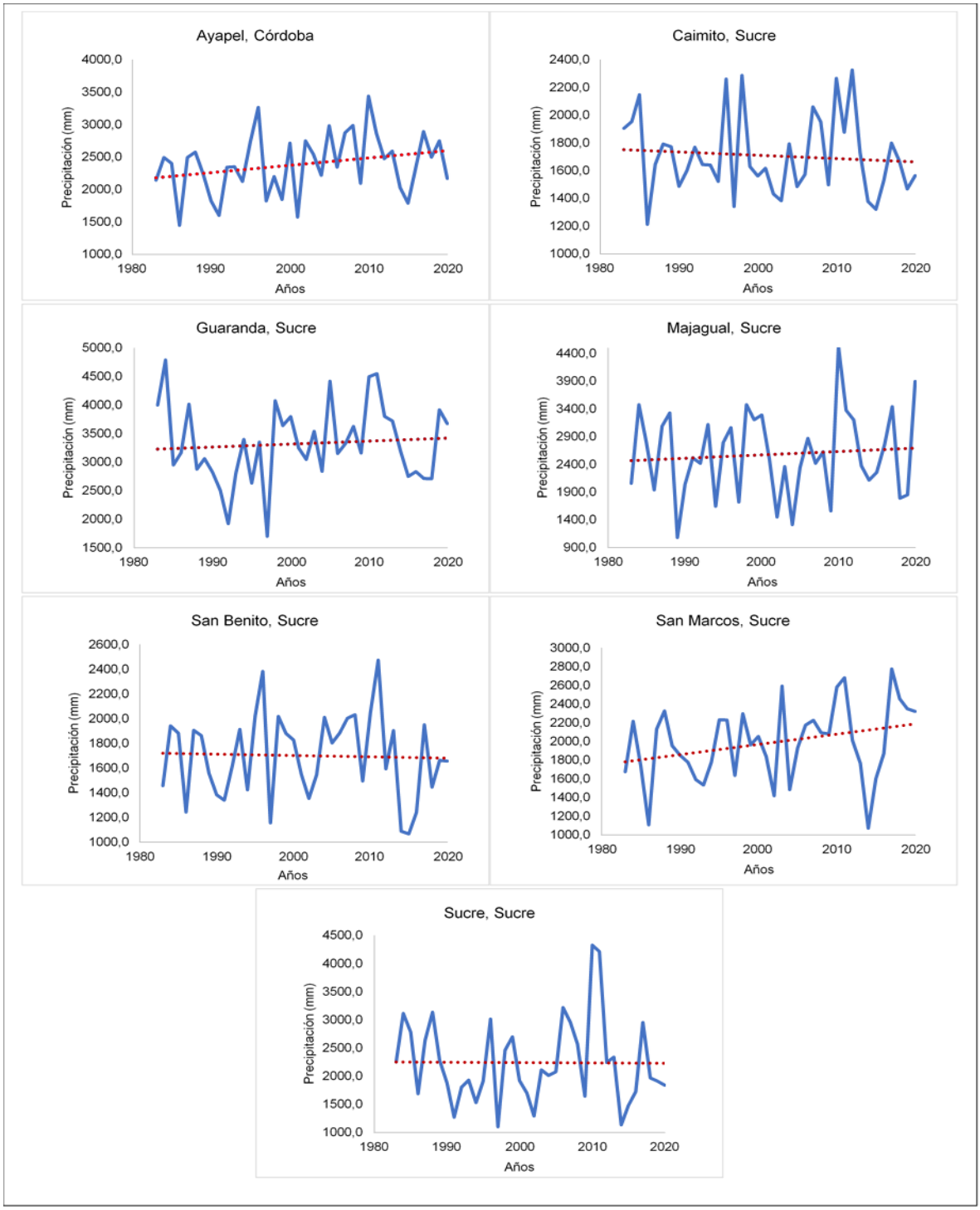
Figura 2.1. Variabilidad climática multianual (38 años), a partir de temperatura y evapotranspiración potencial en las estaciones de Ayapel y San Benito.



En la Figura 2.1, puede evidenciarse la tendencia de aumento tanto de la T, como de la ETp. Estos aumentos suelen estar originados por la incidencia directa de la radiación solar en el suelo, lo que origina directamente aumentos de la evaporación. Cuando se presentan estos aumentos de evaporación, aumenta la demanda de agua en el suelo; en el caso donde hay baja disponibilidad del recurso hídrico, las plantas sufrirán estrés hídrico por ausencia de agua.

Por su parte, el comportamiento de la precipitación multianual se presenta para cada una de las estaciones de estudio (Figura 2.2.). Así mismo, el comportamiento mensual multianual de la precipitación para cada estación de estudio, se muestra desde el Anexo 1.8 hasta el Anexo 1.14.

Figura 2.2. Variabilidad climatica multianual a partir de la precipitacion en cada una de las estaciones de estudio, de acuerdo al municipio donde se ubica.



Las variaciones de precipitación en cada una de las estaciones analizadas, evidencian una tendencia de aumento en los municipios de Ayapel, Guaranda, Majagual y San Marcos, en los 38 años de estudio. Por otra parte, en las estaciones correspondientes a los municipios de Caimito, San Benito y Sucre, evidencian una tendencia de disminución en las precipitaciones. Esto genera una afectación, influenciada por la alteración en las necesidades de agua de los cultivos, en disponibilidad y en calidad, para aprovisionar la demanda hídrica de los mismos (Cai *et al*., 2015). Consecuentemente, lo anterior amenaza la seguridad alimentaria (IPCC, 2014), a nivel regional y de igual manera a nivel nacional.

Continuando con el análisis de tendencia lineal para las variables de estudio, se analizó la variabilidad de la temperatura (ΔT), evapotranspiración potencial (ΔETp) y precipitación (ΔP) para dos escenarios diferentes. El escenario 1 representa el comportamiento de las variables antes mencionadas para el periodo de tiempo comprendido entre el año 1983 y 2020 para un total de 38 años de estudio, realizado a partir de los registros disponibles en la base de datos del IDEAM. Por su parte, el escenario 2, comprende las proyecciones a 38 años futuros, a partir del año 2021 hasta el año 2058. Como se muestra a continuación.

Tabla 2.2. Variabilidad de T y ETp en el escenario 1.

Municipio	Estación	ΔT (°C)	ΔT (%)	ΔETp (mm)	ΔETp (%)
Ayapel	Ayapel	0,9	3,1	20,8	12,5
San Benito Abad	San Benito	0,9	3,2	23,9	13,8

Tabla 2.3. Variabilidad de T y ETp en el escenario 2.

Municipio	Estación	ΔT (°C)	ΔT (%)	ΔETp (mm)	ΔETp (%)
Ayapel	Ayapel	1,8	6,3	42,1	25,3
San Benito Abad	San Benito	1,9	6,5	48,4	28,0

Por otro lado, la variabilidad de la precipitación (ΔP), para la zona de estudio, se expone en la Tabla 2.4 y 2.5 en función de los diferentes escenarios analizados.

Tabla 2.4. Variabilidad de P en el escenario 1.

Municipio	Estación	ΔP (mm)	ΔP (%)
Ayapel	Ayapel	416,8	17,4
Caimito	Caimito	-89,2	-5,2
Guaranda	Villanueva	192,4	5,8
Majagual	Majagual	221,6	8,6
San Benito Abad	San Benito	-40,0	-2,4
San Marcos	HDA Eureka	405,7	20,4
Sucre	Campo Alegre	-20,0	-0,9
Área de estudio		**155,3**	**6,3**

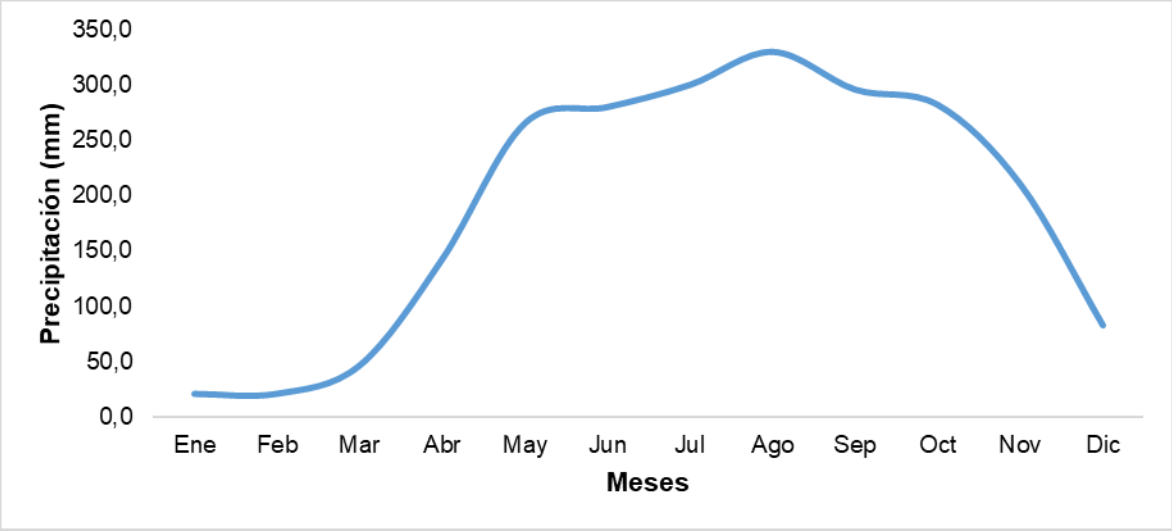
Tabla 2.5. Variabilidad de P en el escenario 2.

Municipio	Estación	ΔP (mm)	ΔP (%)
Ayapel	Ayapel	845,0	35,4
Caimito	Caimito	-180,8	-10,6
Guaranda	Villanueva	390,0	11,7
Majagual	Majagual	449,2	17,4
San Benito Abad	San Benito	-81,1	-4,8
San Marcos	HDA Eureka	822,3	41,4
Sucre	Campo Alegre	-40,6	-1,8
Área de estudio		**155,3**	**314,9**

Respecto a la T y a la ETp, estas manifestaron aumentos en los 38 años de estudio, en los municipios de Ayapel y San Benito Abad. Los aumentos de temperatura por su parte, conllevan a un aumento en los valores de evaporación, lo que ocasiona aumentos en la evapotranspiración potencial y seguidamente en la evapotranspiración real. Esto representará un aumento en las necesidades hídricas de los cultivos, siendo una limitante de gran importancia en el crecimiento y desarrollo de los mismos, como lo manifestaron Monterroso-Rivas, & Gómez-Díaz (2021), en su estudio sobre el impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento; cuyo objetivo fue analizar la distribución espacial de la ETp, el periodo de crecimiento en las condiciones climáticas actuales y en escenarios de cambio climático, para contar con elementos técnicos suficientes que permitan recomendar acciones de adaptación para la producción agrícola de México.

Por otra parte, referente a la precipitación, esta presento un aumento generalizado en el área de estudio, alcanzando un aumento del 6,3%, en relación al periodo analizado (38 años). De acuerdo a Olivero (2003), estos aumentos están relacionados con las tendencias climáticas globales a largo plazo y a la presencia de fenómenos climáticos tales como El Niño y La Niña. Como consecuencia de la tendencia en los aumentos de precipitación, gran parte de la zona permanece anegada desde el mes de abril hasta el mes de noviembre, debido a la acción de los tres ríos (Aguilera-Díaz, 2004). En la Figura 2.3, se observa el comportamiento de la precipitación, a partir de acumulados mensuales y del promedio multianual en la zona de estudio.

Figura 2.3. Comportamiento de la precipitación multianual en la zona de estudio.



Con base a la Figura 2.3, se permite identificar el periodo lluvioso general en la zona de estudio, el cual está comprendido entre los meses de abril y noviembre, como lo manifestó Aguilera-Díaz (2004), para la zona de La Mojana.

En cuanto a la variabilidad climática a partir de la temperatura, evapotranspiración potencial y así mismo de precipitación, esta debe a que la evidencia científica demuestra que, por causa de los acelerados cambios en el clima del planeta que las actividades humanas han introducido, todos los ciclos ecológicos, hídricos y atmosféricos se están modificando (IDEAM, 2021).

Por otra parte, para estudiar la posible participación de los fenómenos de variabilidad climática de El Niño y La Niña, en los aumentos de T y ETp, se realizó un análisis de dispersión, teniendo en cuenta el Índice de Niño Oceánico (NOAA, 2021). Lo hallado, se evidencia a continuación (ver Tabla 2.4).

Tabla 2.6. Participación de fenómenos cíclicos en la variabilidad de T y ETp.

Ayapel		
Fenómeno	**T**	**ETp**
Niño	70,0%	70,0%
Neutro	33,3%	40,0%
Niña	76,9%	76,9%

San Benito		
Fenómeno	**T**	**ETp**
Niño	70,0%	70,0%
Neutro	40,0%	33,3%
Niña	38,5%	30,8%

De acuerdo a lo obtenido, el fenómeno de El Niño pudo haber participado en un 70,0% de los valores máximos de T y ETp para ambas estaciones durante los 38 años analizados. Respecto a la probable participación de La Niña en los valores

mínimos de T Y ETp, son mayores las probabilidades de dicho evento en la estación Ayapel, en comparación con la estación San Benito. Finalmente, en referencia a los años neutros, se le pudieran atribuir los aumentos de T en mayor proporción en la estación San Benito; caso contrario ocurriría con la ETp, donde esta pudo haber tenido mayores aumentos en la estación Ayapel, probablemente en la ocurrencia de estos años normales.

Por otro lado, con la finalidad de estudiar el comportamiento hídrico en la zona, y los requerimientos de agua en los cultivos más representativos de la misma; se realizaron los cálculos respectivos a partir de los valores medios multianuales de evapotranspiración potencial (ETp) para los diferentes escenarios, teniendo en cuenta las características de cada cultivo, como valores de Kc máximos ($Kc_{máx}$) y ciclos vegetativos de cada cultivo en días, además se tuvo en cuenta el área sembrada (AS) en hectáreas, comprendida en un promedio de 10 años, (2009 – 2018), según registros de Agronet (2022). Lo anterior, fue estimado en los municipios de Ayapel (Córdoba) y San Benito Abad (Sucre), como se muestra a continuación.

Tabla 2.7. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de Ayapel (Córdoba) para el escenario 1.

Cultivo	$Kc_{máx}$	Ciclo cultivo (días)	ETp (mm)	AS (ha)	Vol (m^3/ha)	Vol $_{máx}$ (m^3)
Arroz	1,5	180	166,8	2.025,9	450.476,4	912.638.205,4
Maíz	1,2	125	166,8	304,0	250.264,7	76.070.452,0
Yuca	1,1	210	166,8	1.081,4	385.407,6	416.779.785,9
Plátano	1,2	365	166,8	106,3	730.772,9	77.681.155,5
Mango	0,85	365	166,8	1.061,0	517.630,8	549.206.256,7
					Total	**2.032.375.855,6**

Tabla 2.8. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de Ayapel (Córdoba) para el escenario 2.

Cultivo	$Kc_{máx}$	Ciclo cultivo (días)	ETp (mm)	AS (ha)	Vol (m^3/ha)	Vol $_{máx}$ (m^3)
Arroz	1,5	180	208,9	2.025,9	564.146,4	1.142.926.805,2
Maíz	1,2	125	208,9	304,0	313.414,7	95.265.526,0
Yuca	1,1	210	208,9	1.081,4	482.658,6	521.947.017,3
Plátano	1,2	365	208,9	106,3	915.170,9	97.282.662,9
Mango	0,85	365	208,9	1.061,0	648.246,0	687.789.037,0
					Total	**2.545.211.048,4**

Tabla 2.9. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de San Benito Abad (Sucre) para el escenario 1.

Cultivo	Kcmáx	Ciclo cultivo (días)	ETp (mm)	AS (ha)	Vol (m^3/ha)	Vol $_{máx}$ (m^3)
Arroz	1,5	180	173,0	2.587,7	467.105,4	1208705226
Maíz	1,2	125	173,0	363,3	259.503,0	94264459,9
Yuca	1,1	210	173,0	1.673,6	399.634,6	668828465,6
Plátano	1,2	365	173,0	21,2	757.748,7	16064272,89
Mango	0,9	365	173,0	37,1	536.738,7	19913004,93
					Total	**2.007.775.430**

Tabla 2.10. Requerimientos hídricos de los cultivos de mayor importancia en el municipio de San Benito Abad (Sucre) para el escenario 2.

Cultivo	Kcmáx	Ciclo cultivo (días)	ETp (mm)	AS (ha)	Vol (m^3/ha)	Vol $_{máx}$ (m^3)
Arroz	1,5	180	221,4	2.587,7	597.785,4	1.546.859.328,2
Maíz	1,2	125	221,4	363,3	332.103,0	120.636.409,9
Yuca	1,1	210	221,4	1.673,6	511.438,6	855.943.640,0
Plátano	1,2	365	221,4	21,2	969.740,7	20.558.503,3
Mango	0,9	365	221,4	37,1	686.899,7	25.483.978,0
					Total	**2.569.481.859,4**

En base a las tablas anteriores, se permiten identificar las necesidades hídricas de los cultivos más importantes en la zona de estudio para los diferentes escenarios, para los cuales se proyectaría un aumento en los requerimientos del recurso hídrico, a causa, de los aumentos de evapotranspiración potencial. Respecto a los cultivos más representativos en la región, el de mayor importancia es el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), en conformidad con lo enunciado por Martínez-Reina (2013) y con registros de Agronet (2022).

Continuamente al análisis del comportamiento hídrico en la zona de estudio, en épocas y circunstancias de alta radiación, estas conducen a una disminución de la oferta de agua en el suelo. Con esto, la producción baja, lo que produce una afectación en la seguridad alimentaria, a causa de hambrunas y desnutrición (Más, 2010), en particular para aquellas poblaciones que dependan más de estas actividades agrícolas (Sánchez, 2016). Por ello, se determina que la disponibilidad de agua en cualquier zona, se encuentra en función del volumen del recurso que recibe en forma de precipitaciones, también se debe tener en cuenta el volumen que se devuelve a la atmosfera por medio de la evapotranspiración (Morejón *et al.,* 2015). Adicionalmente, es de gran importancia considerar la disponibilidad de agua en épocas lluviosas como en épocas secas, al ser épocas contrastadas debido al escenario donde se presentan, es necesario considerar balances hídricos (Lucas *at al.,* 2021). De acuerdo a lo anterior, se evaluaron los balances hídricos multianuales para la estación Ayapel (Tabla 2.7) y San Benito (Tabla 2.8).

Tabla 2.11. Balance hídrico multianual a partir de los valores climatológicos de la estación Ayapel (escenario 1).

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	28,0	28,5	28,7	28,6	28,1	28,1	28,0	27,8	27,7	27,5	27,7	27,8
P (mm)	16,5	20,8	47,1	163,2	278,7	296,9	354,3	385,9	314,3	266,9	191,5	53,5
ETp (mm)	163,6	160,6	185,8	181,5	177,8	172,4	175,8	168,0	155,4	153,7	149,7	157,9
Almacén	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100	100	100	100	100,0	100	0,0
Δ Almc	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-100
ETR	16,5	20,8	47,1	163,2	177,8	172,4	175,8	168,0	155,4	153,7	149,7	153,5
Déficit	147,1	139,8	138,6	18,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4
Excesos	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	24,5	78,5	117,9	58,9	13,2	41,8	0,0

Tabla 2.12. Balance hídrico multianual a partir de las proyecciones a futuro en la estación Ayapel (escenario 2).

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	29,8	30,3	30,5	30,4	29,9	29,9	29,8	29,6	29,5	29,3	29,5	29,6
P (mm)	22,3	28,2	63,8	221,0	377,4	402,0	479,8	522,5	425,6	361,4	259,3	72,4
ETp (mm)	204,9	201,3	232,8	227,4	222,7	216,0	220,3	210,5	194,7	192,6	187,6	197,8
Almacén	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-25,3
Δ Almc	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
ETR	22,3	28,2	63,8	221,0	222,7	216,0	220,3	210,5	194,7	192,6	187,6	172,4
Déficit	182,6	173,1	168,9	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,3
Excesos	0,0	0,0	0,0	0,0	54,7	86,0	159,5	212,0	130,8	68,8	71,8	0,0

Tabla 2.13. Balance hídrico multianual a partir de los valores climatológicos de la estación San Benito (escenario 1).

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	28,2	28,6	28,7	28,7	28,5	28,4	28,3	28,2	28,0	27,8	28,0	28,1
P (mm)	10,2	11,4	29,8	111,4	195,0	214,6	231,2	257,7	252,1	206,9	131,9	48,5
ETp (mm)	167,3	162,4	187,6	184,5	187,8	181,9	183,8	177,6	164,2	160,9	156,2	161,9
Almacén	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	40,0	87,5	100	100	100	75,7	0,0
Δ Almc	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	32,8	47,4	12,5	0,0	0,0	-24,3	-75,7
ETR	10,2	11,4	29,8	111,4	187,8	181,9	183,8	177,6	164,2	160,9	156,2	124,2
Déficit	157,1	151,0	157,9	73,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,5
Excesos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,6	155,5	201,4	0,0	0,0

Tabla 2.14. Balance hídrico multianual a partir de las proyecciones a futuro en la estación San Benito (escenario 2).

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	30,1	30,5	30,6	30,6	30,4	30,3	30,2	30,1	29,9	29,7	29,9	30,0
P (mm)	10,2	10,9	28,3	106,0	185,7	204,3	220,1	245,3	240,0	196,9	125,6	46,1
ETp (mm)	214,1	207,9	240,2	236,1	240,3	232,8	235,3	227,3	210,1	206,0	199,9	207,3
Almacén	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	29,8	-9,1	-38,7	0,0
Δ Almc	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	47,8	38,7	0,0	0,0
ETR	10,2	10,9	28,3	106,0	185,7	204,3	220,1	227,3	210,1	206,0	164,3	46,1
Déficit	203,9	197,0	211,8	130,1	54,7	28,4	15,1	0,0	0,0	0,0	35,6	161,1
Excesos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Estos balances toman importancia en la medida de poder afrontar desafíos en la gestión del agua. Además, permite considerar los parámetros como disponibilidad de agua en el futuro a causa del cambio climático, ya que, en la actualidad, se comienzan a sentir las disminuciones del recurso hídrico (Lucas *at al.,* 2021). Los balances hídricos para la estación Ayapel y San Benito, permiten identificar las épocas secas y lluviosas, donde a partir de ellas, se puede planificar la agricultura de la zona de estudio para el aprovechamiento del agua. Los mismos permiten identificar la época con disponibilidad de agua entre los meses de mayo y noviembre, presentado la época seca entre los meses de diciembre y abril. Lo cual se aproxima a lo señalado por Aguilera-Díaz (2004), quien manifestó que el periodo lluvioso estaría comprendido entre los meses de abril y noviembre, esta variación se debe posiblemente a la variabilidad climática presente en la zona.

Por otro lado, se proyecta para el año 2058, aumentos generalizados de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y requerimientos hídricos, para el caso en la estación Ayapel, donde no existirían problemáticas con el aprovisionamiento de agua a los cultivos, a partir de sus necesidades hídricas. En referencia a las estaciones con tendencias en disminuciones de precipitación y aumentos de temperatura, se proyectaría una situación preocupante al momento de suplir las necesidades hídricas de los cultivos, ya que el periodo seco se extendería y las disponibilidades de agua disminuirían drásticamente, llegando a afectar los periodos de crecimiento de los cultivos y consecuentemente, una afectación en la seguridad alimentaria de la zona en cuanto a disponibilidad, calidad y acceso a los alimentos a través del tiempo, para los habitantes de la región.

2.4. CONCLUSIONES

En base al presente estudio se pudo concluir el hecho de la presencia del cambio climático en La Mojana de Sucre y Córdoba. Por su parte la variabilidad climática evidenció su participación mediante los fenómenos de El Niño y La Niña, con una posible repercusión en las variables temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración potencial presento aumentos en los municipios de Ayapel y San Benito Abad, durante los 38 años analizados. Por otro lado, la precipitación tuvo un comportamiento creciente en la zona de estudio para el mismo periodo.

De igual manera, se pudo concluir y evidenciar, a partir de los promedios multianuales de precipitaciones y a los balances hídricos realizados en los municipios de Ayapel (Córdoba) y San Benito Abad (Sucre), los meses más lluviosos de la zona, comprendidos entre mayo y noviembre. Por su parte, los meses secos van desde diciembre hasta abril.

Además, se concluye la certeza de que la especie cultivada de mayor importancia sigue siendo el arroz (*Oryza sativa* L.), mediante el sistema de arroz secano mecanizado. A causa de las disminuciones de la producción de este cultivo, la seguridad alimentaria de la región, se puede ver afectada negativamente, esto posiblemente al escaso manejo agronómico de los cultivos presentes y a las tecnologías aplicadas.

2.5. REFERENCIAS

Agronet, 2022. Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. Disponible en: https://cutt.ly/hOym3ft. Consultado: 14/01/2022.

Aguilera-Díaz, M. M. (2004). La Mojana: riqueza natural y potencial económico. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 48.

Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., & Tsutsumi, A. (2006). Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula Area. (K. University, Ed.) *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 66 (1).

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Nº56 Ed. FAO. Roma: Italia. 323 p.

Axayacatl, O. (2017). Fases de desarrollo o etapas fenológicas del cultivo del tomate. Obtenido de https://blogagricultura.com/etapas-fenologicas-tomate/. Consultado: 03/02/2022.

Bekele, S., & Tilahun, K. (2007). Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia. *Agric. Water Manage*. 89(1-2):148-152.

Cadena-Torres, J., Cuello.Pérez, D., Romero-Ferrer, J. & Pérez- Cantero, S. (2021). Caracterización del sistema de producción de arroz criollo en La Mojana, Colombia. *Ciencia y agricultura*, 18(2), 67-82.

Cai, X., Zhang, X., Noël, P. and Shafiee-Jood, M. (2015). Impacts of climate change on agricultural water management: A review. WIREs Water 2: 439-455. doi: https://doi.org/10.1002/wat2.1089

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2005). Morfología de la Planta de Arroz. Recuperado de: https://cutt.ly/QOyQrEQ. Consultado: 14/01/2022.

CORPOICA. (2012). Actualización de la información socioeconómica y climática de la Región de La Mojana. Informe Final de Proyecto. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, Regional 2. Cereté, Córdoba 132 p.

El-Nashar, W. Y. & Hussien, E. A. (2013). Estimating the potential evapo-transpiration and crop coefficient from climatic data in Middle Delta of Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 52(1), 35-42.

Fedearroz. (2019). Producción de Arroz Paddy Seco en Colombia. Recuperado de: https://cutt.ly/cOyQgl4. Consultado: 16/01/2022.

IDEAM. 2021. Cambio climático: conceptos básicos de cambio climático. Disponible: https://cutt.ly/bOyQxW8. Consultado: 28/11/2021.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2014). Parte A: Impactos, vulnerabilidad y adaptación observados en un mundo complejo y cambiante. pp. 4-9. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.). Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.

Lucas, M., Chavarría, J., & Duicela, L. (2021). Evaluación multianual de las variables climatológicas y su relación con el balance hídrico para el cultivo de maíz duro. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, *8*(SPE2).

Más, B. P. (2010). El cambio climático: un reto para los sistemas de salud. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, 48(3), 226-228. Recuperado de http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v48n3/hie01310.pdf.

Marín-Valencia, V. (2010). Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los Departamentos de Cundinamarca y valle del Cauca. Disponible: https://cutt.ly/EOyQm76. Consultado: 16/01/2022.

Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C. M., & Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS.

Martínez-Reina, A. (2013). Caracterización socioeconómica de los sistemas de producción de la región de La Mojana en el Caribe de Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 14(2), 165-185.

Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. *Alfaomega, Colombia*.

Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. Terra Latinoamericana, 39.

NOAA. (2021). Cold & Warm Episodes by Season. Disponible en: https://cutt.ly/MOyQUmW. Consultado: 17/11/2021.

Olivero, J. (2003). Programa de Desarrollo Sostenible de la región de la Mojana. *Informe Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Bogotá, Colombia. 567p.

Ortiz, R. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, *7*(1), 70-79.

Pérez-Gutiérrez, A., Pineda-Doporto, A., Latournerie-Moreno, L., Pam-Pech, W., & Godoy-Ávila, C. (2008). Niveles de evapotranspiración potencial en la producción de chile habanero. *Terra Latinoamericana*, *26*(1), 53-59.

Pérez, J., Hurtado, G., Aparicio, V., Argueta, Q., & Larín, M. (2012). Cultivo de tomate. CENTA. La Libertad-El Salvador. 48 p.

Rubio, R. H. (2010). Manual del curso de irrigación y drenaje. *Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Santa. Chimbote, Perú*.

Sánchez, C. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú*. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*. 33(1), 128-138. doi:10.17843/rpmesp.2016.331.2014. Recuperado de https://cutt.ly/fOyQADo. Consultado: 22/01/2022.

Silva, J. (2015). Evaluación de cuatro programas de fertilización foliar complementaria en la producción de tomate riñón (*Solanum lycopersicum* L.) Var. Sheila bajo invernadero, 2015. Universidad Central de Ecuador. Quito-Ecuador. 93 p.

Terán, C., Jimenez, C., González, C., & Villaneda, E. (1998). Metodología para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana mediante el sistema de información geográfica ARC/Info. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *2*(2), 19-34. Las estaciones del área de estudio se muestran en la tabla (2.1).

Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2015). Modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera de Urabá Antioqueño (Colombia). Agrociencia, 49(8), 821-836.

DISCUSIÓN GENERAL

El sistema climático mundial es parte integral de los procesos complejos que mantienen la vida, pero el incremento progresivo de la temperatura terrestre está produciendo una interferencia en sus ciclos (IPCC, 2014). El término cambio climático denota toda variación del clima a lo largo del tiempo, esto obedece a causas naturales, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas, o a la actividad humana, que alteran la composición de la atmósfera global y se suman a la variabilidad natural del clima (IPCC, 2007). Este fenómeno, es una creciente amenaza para la salud humana, porque aumenta la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en los determinantes sociales y medioambientales de la salud: agua potable, aire limpio y alimentos suficientes (OMS, 2016).

Por otro lado, la temperatura afecta la tasa de desarrollo de los cultivos, en sus distintas fases (Rawson & Gómez-Macpherson, 2001). Se considera que el aumento de las temperaturas conducirá a mayor demanda evaporativa (Reddy, 2015). Sin embargo, una atmósfera más cálida en conjunto con otros cambios en variables climáticas, requiere mayor esfuerzo local para comprender su magnitud e implicaciones sobre la producción agrícola (Monterroso-Rivas, & Gómez-Díaz, 2021). Con los aumentos de temperatura, todos los procesos fisiológicos de las plantas ocurren más rápidamente. Un buen manejo del cultivo puede contrarrestar los efectos negativos de las altas temperaturas (Rawson & Gómez-Macpherson, 2001). Estas altas temperaturas son favorecidas por la radiación solar absorbida por la atmosfera, y por el calor emitido por parte de la tierra (Allen *et al.,* 2006). De allí la relación que existe entre la temperatura y la radiación solar (IDEAM, 2021). Esta última, es considerada la fuente más importante de energía en el planeta (Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz, 2021), ya que por la cantidad de radiación solar que intercepta a un cultivo, puede determinar el crecimiento del mismo (Rawson & Gómez-Macpherson, 2001), y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua; determinando así, el proceso de evapotranspiración (Allen *et al.,* 2006), el cual es un componente importante del ciclo del agua, que describe el proceso físico de transferencia de agua a la atmósfera; tanto por evaporación del suelo, como por transpiración de las plantas, lo que ocasiona un aumento en la demanda de agua por parte de los cultivos. Esta misma puede ser estimada con base a la evapotranspiración potencial (ETP) (Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz, 2021), que viene dada por la máxima cantidad de agua que puede perderse desde una capa continua de vegetación que cubre todo un terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Ortíz-Solorio, 1987).

De la misma manera, los incrementos de temperatura desempeñan un papel fundamental para obtener el balance hídrico, ya que a causa de estos incrementos se genera una aceleración en el proceso de madurez de los cultivos, induciendo a la reducción del área foliar y con ello la demanda total de agua total (Ruiz *et al.,* 2011), debido a esto, al tener un cultivo con aumentos de temperaturas a largo lapso de tiempo, tiende a presentar modificaciones en su tasa de evapotranspiración (FAO, 2014). Seguidamente, es de importancia establecer que el balance hídrico se encuentra presente en el suelo en las diferentes épocas del año, el mismo nos permite tener conocimiento en qué periodo de tiempo es ideal ´para sembrar los cultivos y como se puede establecen un óptimo balance para el aprovechamiento de agua en épocas de déficit (Sánchez *et al.,* 2014).

Por su parte, el área de estudio de este proyecto, es una zona subhúmeda y semiárida, ésta se caracteriza por periodos sin lluvias, tanto dentro de las estaciones lluviosas o entre las mismas; las cuales son, además, generalmente impredecibles. Por estas razones, el rendimiento de los cultivos y las pasturas y la cantidad de agua en las corrientes, son afectados no sólo por la cantidad total de agua de lluvia en una estación específica, sino también por la frecuencia, la duración y la severidad del estrés hídrico sobre las plantas en distintas etapas de su crecimiento (Shaxsony & Barber, 2005). En la zona se siembran cultivos comerciales (arroz, maíz y palma africana), cultivos de subsistencia o de pan coger (arroz y maíz, yuca, ñame, plátano, patilla, entre otros), y frutales como cacao, mango, piña y otros (Aguilera-Díaz, 2004; Agronet, 2022). La principal especie cultivada es el arroz (*Oryza sativa* L.), sembrado principalmente de manera manual. Este sistema es practicado por el 94,2% de los agricultores (Cadena-Torres, *et al.,* 2021), donde la mayoría son pequeños productores. La importancia de esta especie cultivada en la región, viene dada porque gran parte de la producción total, un poco más de la mitad (57,5%), se destina al autoconsumo; resaltando la seguridad alimentaria para los pobladores de la subregión (Cadena-Torres, *et al.,* 2021). De acuerdo a los mismos autores, la alta variación en los rendimientos puede ser ocasionada por los distintos niveles tecnológicos aplicados por los agricultores en el cultivo de arroz, ya que la asistencia técnica para el cultivo es escasa. Una limitante de gran importancia en la alta productividad de los cultivos, es el déficit de agua en el suelo, esto debido a que la cantidad de agua y su distribución en el tiempo, en un sitio o región determinados, pueden permitir que se alcancen rendimientos óptimos en los cultivos. Esto dependerá del agua disponible para el cultivo, debido a que el agua aprovechable es la que se encuentra entre los puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Así, los factores que más limitan la productividad ocurren cuando el volumen de agua a causa de la precipitación, o por irrigación, es menor a lo requerido por el cultivo, o cuando se tiene poca disponibilidad de agua en los momentos de demanda máxima en combinación con suelos con baja capacidad para retener la humedad en forma disponible (Muñoz-Arboleda, 2009), estas demandas hídricas las podemos conocer mediante estimaciones a partir de la evapotranspiración potencial, como se mencionó anteriormente. De la misma forma, en suelos con baja capacidad para evacuar los excesos de agua se puede afectar

la productividad, incluso tan negativamente como ocurre cuando el agua disponible es deficitaria (Muñoz-Arboleda, 2009).

En lo que a las producciones respeta, estas posiblemente podrían carecer de asistencia técnica oportuna; en el caso del cultivo de arroz, las recomendaciones son hechas desde las sedes de Fedearroz y al ser aplicadas en las áreas de los cultivos, se podrían llegar a realizar sin ninguna asesoría técnica por parte de un profesional capacitado (Martínez-Reina, 2013). Dicho autor manifiesta, que la aplicación de agroquímicos se hace de forma indiscriminada en lo referente a dosis. Llegando a este punto, el sistema de producción arroz secano mecanizado, del cual depende en gran manera la seguridad alimentaria de la región, y como ya se ha recalcado en veces anteriores, tiene un manejo común por parte de los productores, en cuanto a preparación de terreno, utilización de variedades para la siembra, manejo de malezas, manejo de insectos plaga, fertilización y cosecha (Martínez-Reina, 2013). Según este mismo autor, las disminuciones en la producción regional no se atribuyen solamente a efectos del cambio climático, sino también al mercado, de allí por qué la desaparición del cultivo del sorgo en la subregión.

LITERATURA CITADA

Agronet, 2022. Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. Disponible en: https://cutt.ly/7Oymi6k. Consultado: 14/01/2022.

Aguilera-Díaz, M. M. (2004). La Mojana: riqueza natural y potencial económico. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 48.

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Nº56 Ed. FAO. Roma: Italia. 323 p.

Cadena-Torres, J., Cuello-Pérez, D. M., Romero-Ferrer, J. L., & Pérez-Cantero, S. P. (2021). Caracterización del sistema de producción de arroz criollo en La Mojana, Colombia. Ciencia y Agricultura, 18(2), 67-82.

FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2014). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Obtenido de Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Obtenido de: http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf. Consultado: 21/01/2022.

IDEAM. 2021. Cambio climático: conceptos básicos de cambio climático. Disponible: https://cutt.ly/tOymwdP. Consultado: 28/11/2021.

Martínez-Reina, A. (2013). Caracterización socioeconómica de los sistemas de producción de la región de La Mojana en el Caribe de Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 14(2), 165-185.

Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, 39.

Muñoz-Arboleda, F. 2009. Importancia del agua en la nutrición de los cultivos. *Cenicaña.* Cali: Colombia. Disponible en: https://cutt.ly/AOT8gPi. Consultado: 15/01/2022.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). Género, cambio climático y salud. Recuperado de: https://cutt.ly/DOynEqe. Consultado: 27/01/2022.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (IPCC, 2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (IPCC, 2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación (GTII IE5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Rawson, H. & Gómez-Macpherson, H. 2001. Trigo regado: manejo del cultivo. *Organización de las Naciones Unidas y Alimentación.* Roma: Italia. Disponible en: https://www.fao.org/3/x8234s/x8234s00.htm#Contents Consultado: 15/01/2022.

Reddy, P. (2015). Impacts of climate change on agriculture. pp. 43-90. In: P.P. Reddy (ed.). Climate resilient agriculture for ensuring food security. Springer. New Delhi, India. DOI: 10.1007/978-81-322-2199-9_4

Ruiz, J., Medina, G., Ramírez, J., Flores, H., Ramírez, G., Manríquez, J., ... & Mora, C. (2011). Climate change and its implications in five producing areas of maize in Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (Especial 2), 309-323.

Sánchez, I., Esquivel, G., López, A., Inzunza, M., & catalán, E. (2014). Balance hídrico como fundamento para toma de decisiones en agricultura de temporal. Agrofaz 11-1.

Shaxsony, F. & Barber, R. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. *FAO.* Roma: Italia. Disponible en: https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s00.htm#Contents Consultado: 15/01/2022.

CONCLUSIONES GENERALES

A partir de este estudio se recalca la no generalización del comportamiento de la ETp en la zona de estudio. De igual manera, la ETp presento un comportamiento creciente en las estaciones con registros necesarios por el método utilizado para su estimación. Estos aumentos, generan mayor demanda hídrica por parte de los cultivos en periodos cálidos, principalmente el de arroz (*Oryza sativa* L.), el cual tiene la mayor participación y de él depende en gran medida la seguridad alimentaria de la zona de La Mojana.

Seguidamente, se podría comprobar la posible participación de los fenómenos cíclicos en los valores máximos y mínimos de T y ETp, a partir de un análisis de desviación.

La disponibilidad de agua y los escasos recursos para acceder a ella, parecen demostrar la carencia en las producciones de la región.

De manera argumentativa, se afirma que las diversas actividades productivas que se realizan en la zona La Mojana, están causando impactos ambientales debido al uso irracional de productos químicos, lo que causa disminuciones en la generación de ingresos, llegando a afectar negativamente la seguridad alimentaria e impactando los sistemas productivos agrícolas.

RECOMENDACIONES GENERALES

De acuerdo a lo detallado en el presente estudio, se recomienda realizar un análisis sobre la aplicabilidad de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración potencial, con la finalidad de estudiar el posible comportamiento variable en la precisión de los resultados.

Darle una mayor importancia al Cambio Climático en la zona de La Mojana, en la búsqueda de estrategias que permitan mitigar sus efectos, evitando posibles consecuencias extremas a futuro en las producciones y por consiguiente, en la seguridad alimentaria de la región.

Por otra parte, se recomienda una mayor participación de las organizaciones presentes en la zona, relacionadas con el sector agrícola, en brindar capacitaciones y acompañamiento en las prácticas agrícolas realizadas por los agricultores, en lo referente al uso racional de agroquímicos en el manejo de arvenses, plagas y enfermedades, preparación del terreno y todos los factores que influyen en obtener buenos rendimientos de los cultivos presentes en la región, de los cuales depende la seguridad alimentaria de la misma.

Finalmente, se recomienda acompañamiento y apoyo por parte del gobierno al sector agrícola de la región, ya que la mayoría de los productores se dedican a la agricultura del autoconsumo, como método de subsistencia, según lo manifestó Cadena y compañía (2021).

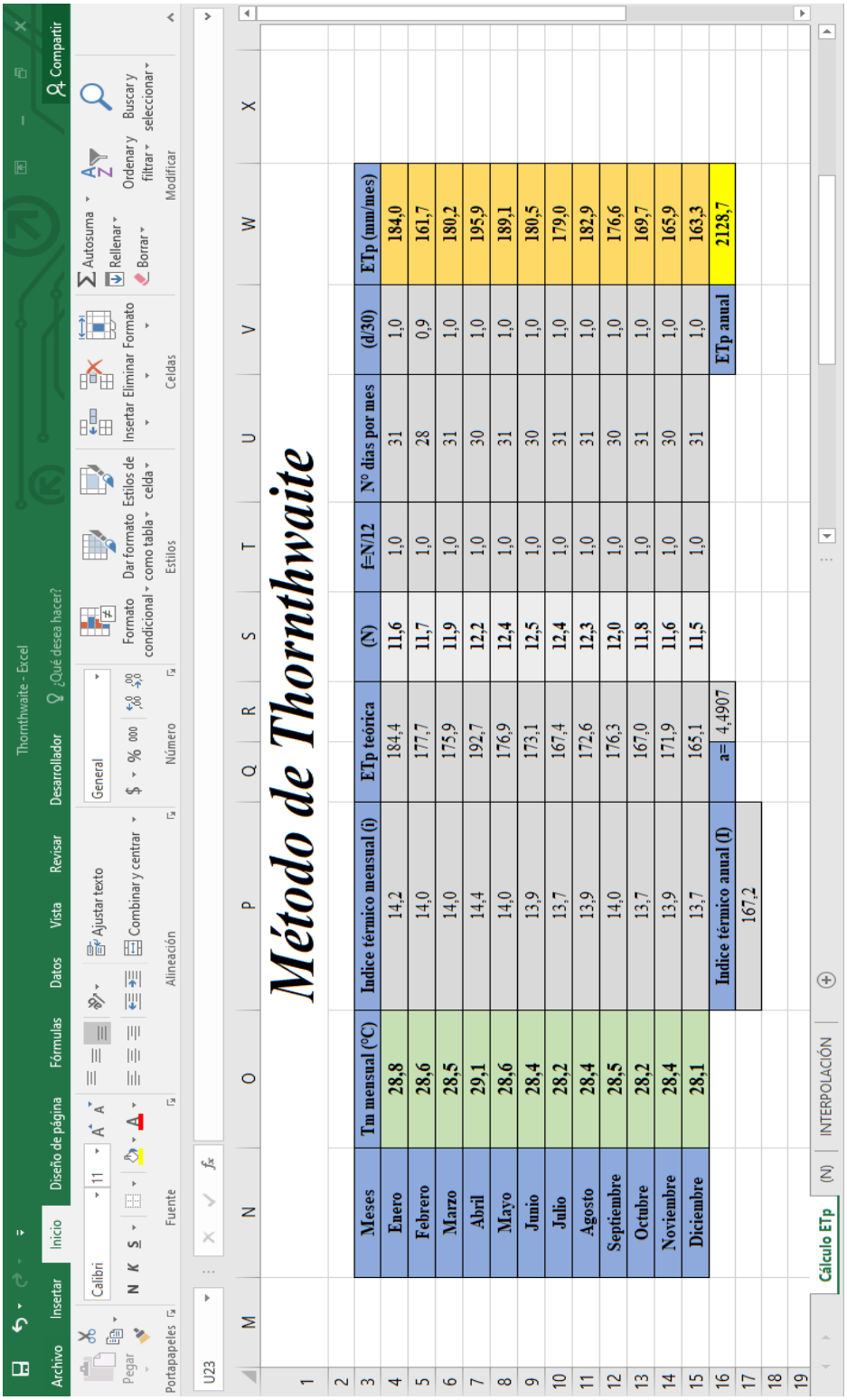
ANEXOS

Anexo 1.1. Número máximo de horas sol (N) para diferentes latitudes del hemisferio norte, por mes.

Lat.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
2	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9
4	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8
6	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7
8	11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5
10	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4
12	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3
14	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2
16	11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1
18	11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9
20	10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8
22	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.4	10.9	10.7
24	10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5
26	10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4
28	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2
30	10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1
32	10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9
34	10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7
36	9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6
38	9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4
40	9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2
42	9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0
44	9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7
46	8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5
48	8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2
50	8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9
52	8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5
54	7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1
56	7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7
58	6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2
60	6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6
62	5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8
64	5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7
66	3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.5	12.7	9.0	5.2	1.9
68	2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0
70	0.0	6.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0

Fuente: Allen *et al.* (1998).

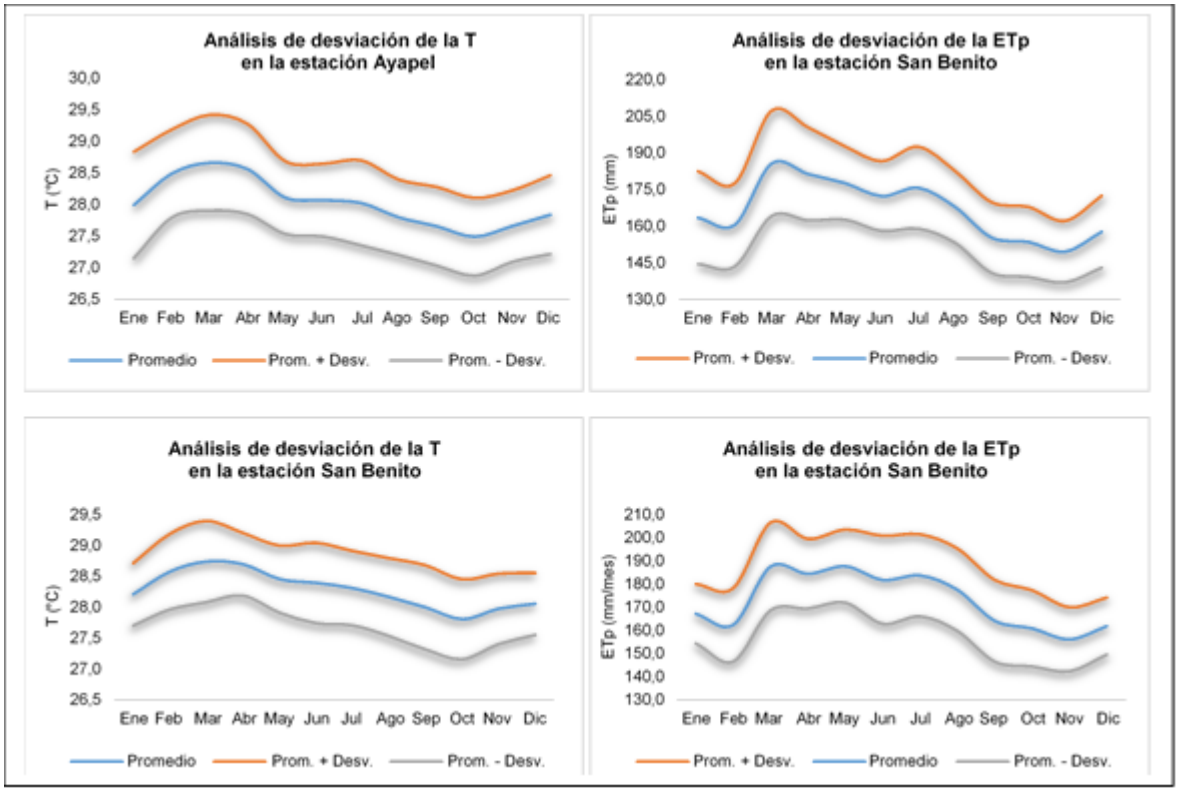
Anexo 1.2. Plantilla de Excel 2016 con el método de Thornthwaite.



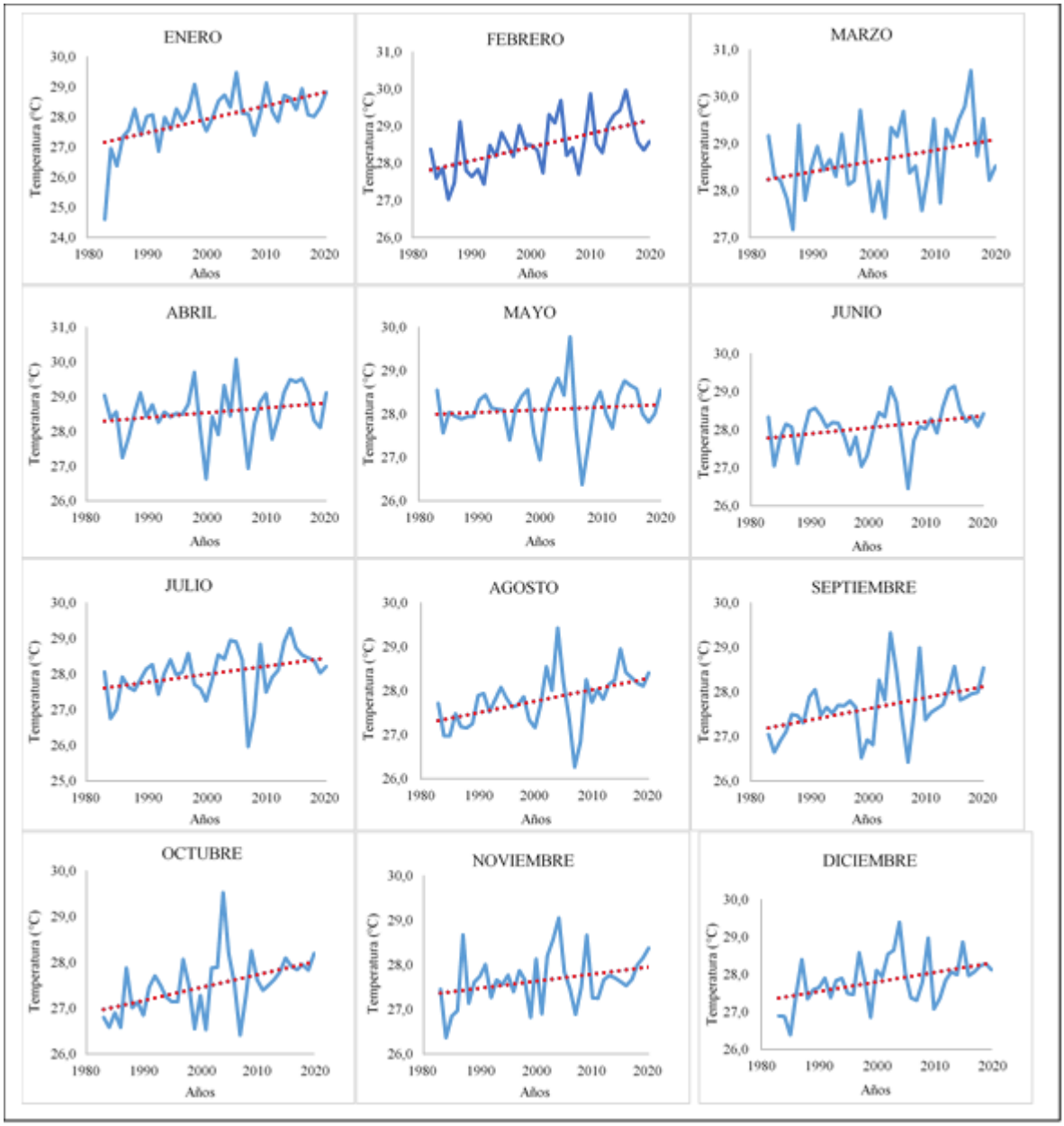
Método de Thornthwaite

Meses	Tm mensual (ºC)	Indice térmico mensual (i)	ETp teórica	(N)	f=N/12	Nº días por mes	(d/30)	ETp (mm/mes)
Enero	28,8	14,2	184,4	11,6	1,0	31	1,0	184,0
Febrero	28,6	14,0	177,7	11,7	1,0	28	0,9	161,7
Marzo	28,5	14,0	175,9	11,9	1,0	31	1,0	180,2
Abril	29,1	14,4	192,7	12,2	1,0	30	1,0	195,9
Mayo	28,6	14,0	176,9	12,4	1,0	31	1,0	189,1
Junio	28,4	13,9	173,1	12,5	1,0	30	1,0	180,5
Julio	28,2	13,7	167,4	12,4	1,0	31	1,0	179,0
Agosto	28,4	13,9	172,6	12,3	1,0	31	1,0	182,9
Septiembre	28,5	14,0	176,3	12,0	1,0	30	1,0	176,6
Octubre	28,2	13,7	167,0	11,8	1,0	31	1,0	169,7
Noviembre	28,4	13,9	171,9	11,6	1,0	30	1,0	165,9
Diciembre	28,1	13,7	165,1	11,5	1,0	31	1,0	163,3
		Indice térmico anual (I)	a=	4,4907			ETp anual	2128,7
		167,2						

Anexo 1.3. Gráficas utilizadas en el análisis de desviación para estudiar la posible participación de El Niño y Niña en los valores máximos y mínimos de T y ETp.

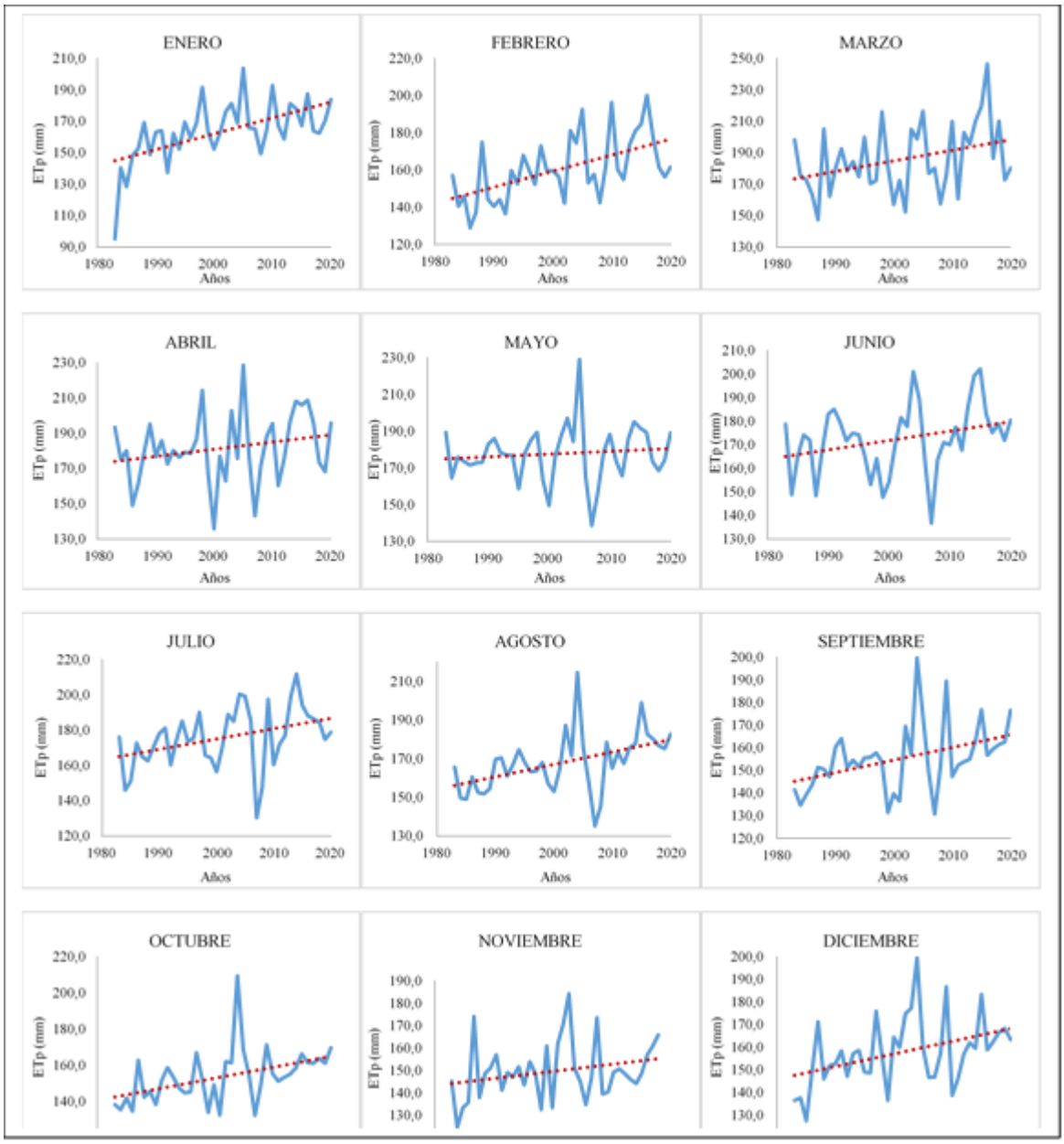


Anexo 1.4. Comportamiento de la temperatura mensual multianual en la estación Ayapel.

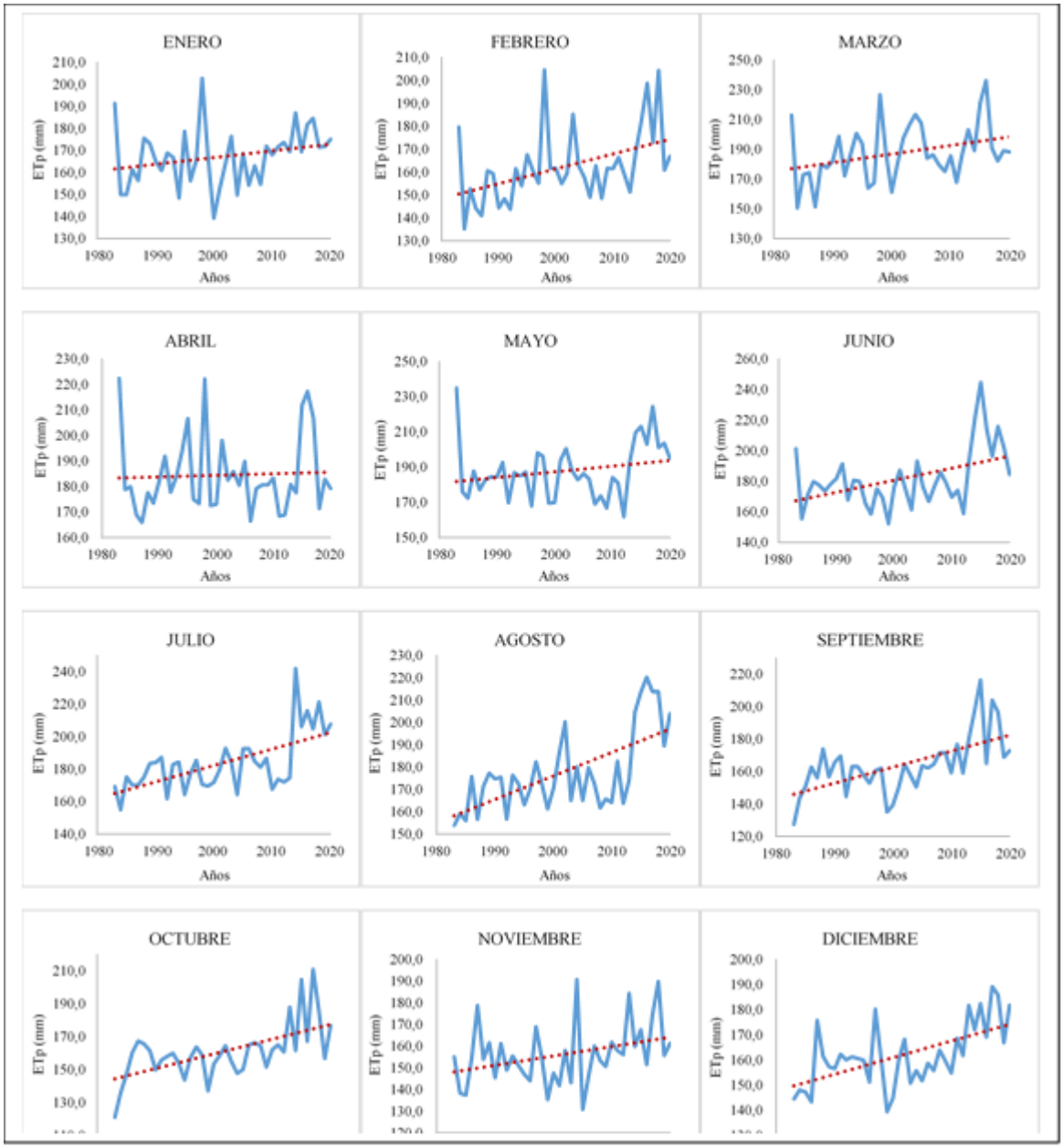


Anexo 1.5. Comportamiento de la temperatura mensual multianual en la estación San Benito.

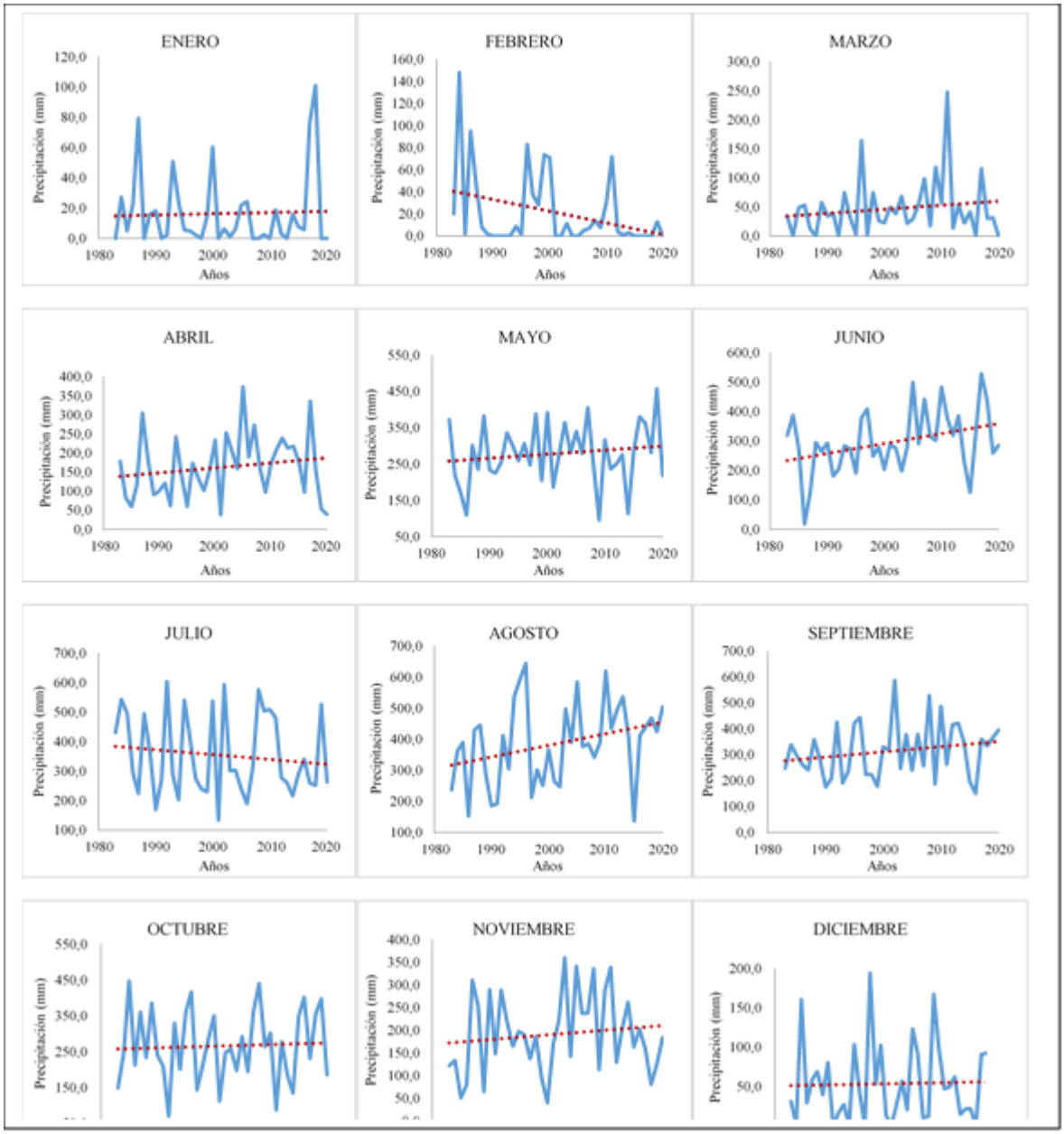
Anexo 1.6. Comportamiento de la ETp mensual multianual en la estación Ayapel.



Anexo 1.7. Comportamiento de la ETp mensual multianual en la estación San Benito.

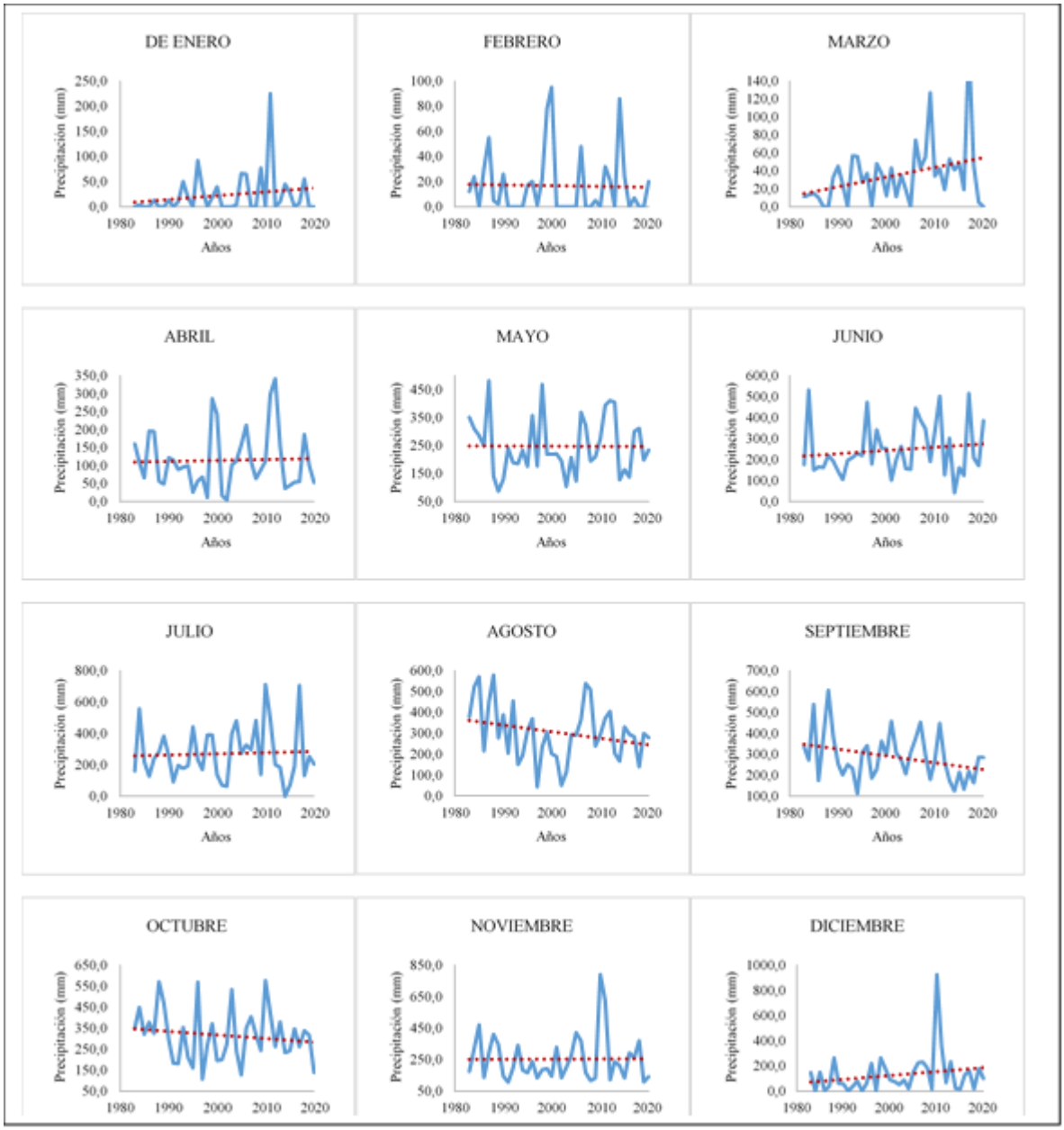


Anexo 1.8. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Ayapel, (Ayapel Córdoba).



Anexo 1.9. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Caimito, (Caimito, Sucre).

Anexo 1.10. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Campo Alegre, (Sucre, Sucre).



Anexo 1.11. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Eureka HDA, (San Marcos, Sucre).

Anexo 1.12. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Majagual, (Majagual, Sucre).

Anexo 1.13. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación San Benito, (San Benito Abad, Sucre).

Anexo 1.14. Comportamiento de la precipitación acumulada mensual multianual en la estación Villanueva, (Guaranda, Sucre).