

**EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA
CUENCA DEL RÍO PRADO BAJO LOS ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



NATALIA MUNÉVAR GUERRERO
DANIELA SAAVEDRA HINCAPIÉ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PASANTÍA EN LA ORGANIZACIÓN ACCIÓN CLIMÁTICA
BOGOTÁ D.C.
2020

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA CUENCA DEL RÍO PRADO BAJO LOS ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

**NATALIA MUNÉVAR GUERRERO
DANIELA SAAVEDRA HINCAPIÉ**

Trabajo de grado bajo la modalidad pasantía en la Organización Acción Climática
presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

DIRECTOR:
David Andrés Zamora Ávila
Docente facultad de ingeniería ambiental
Ingeniero Civil
Master en Hidrosistemas
Candidato a Ph.D.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PASANTÍA EN LA ORGANIZACIÓN ACCIÓN CLIMÁTICA
BOGOTÁ D.C.
2020**

Nota de aceptación

Firma director trabajo de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, agradecemos a Dios por estar siempre presente en nuestras vidas y permitirnos culminar con éxito este proyecto.

Gracias a nuestros padres por siempre darnos su apoyo incondicional, enseñanzas, amor y valores a lo largo de este camino

A nuestro director David Zamora, por brindarnos su experiencia, conocimiento, tiempo, dedicación y más que nada por toda la paciencia que siempre nos tuvo para guiarnos desde el inicio hasta el fin de este recorrido.

Finalmente, estamos muy agradecidas con todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás por proporcionarnos valiosos e indispensables conocimientos que nos ayudaron a crecer en estos años como personas y profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GENERAL	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. MARCO REFERENCIAL	17
3.1. MARCO CONTEXTUAL	17
3.2. MARCO TEÓRICO	17
3.2.1. Amenaza.....	17
3.2.2. Sequía.....	18
3.2.2.1. Sequía Meteorológica.....	18
3.2.2.2. Sequía Agrícola.....	19
3.2.2.3. Sequía Hidrológica	19
3.2.2.4. Sequía Socioeconómica.....	19
3.2.3. Clima y Cambio Climático.....	20
3.2.4. Tercera Comunicación del Cambio Climático.....	21
3.2.5. Cambio Climático en la Agricultura	21
3.2.6. Cambio Climático en la Agricultura en del Departamento del Tolima	22
3.2.7. Modelos de Circulación Global	23
3.2.8. Escenarios de Cambio Climático	24
3.2.9. Trayectorias de Concentración Representativas	25
3.2.10. Reducción de Escala ó Downscaling	25
3.2.11. Mapeo Cuantil Estándar	27
3.2.12. Modelo Hidrológico SWAT	28
3.2.13. Métricas de Desempeño	29
3.2.14. Índice de Nash – Sutcliffe.....	29
3.2.15. Calibración.....	30
3.2.16. Calibración en SWAT-CUP	30
3.2.17. Algoritmo de calibración SUFI-2.....	31
3.2.18. Índices de Sequía.....	33
3.2.19. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).....	33

3.2.20.	Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI)	33
3.2.21.	Índice Estandarizado e Humedad Del Suelo (SSWI)	33
3.2.22.	Índice De Sequía Estandarizado Multivariado (MSDI)	34
3.2.23.	R y RStudio	36
3.2.24.	Paquetes RStudio	36
3.3.1	Adaptación al Cambio Climático	37
3.3.2	Escorrentía	37
3.3.3.	Efecto invernadero	37
3.3.4.	Forzamiento radiativo o climático	37
3.3.5.	Gestión del riesgo	37
3.3.6.	Humedad del suelo	38
3.3.7.	Precipitación	38
3.3.8.	Sistema climático	38
3.3.9.	Variabilidad del clima	38
3.3.10.	Vulnerabilidad	38
3.3.11.	Unidad de Respuesta Hidrológica	38
3.4.	MARCO LEGAL	39
4.	DESARROLLO DE LA PASANTÍA - CASO DE ESTUDIO	41
4.1.	LOCALIZACIÓN	41
4.2.	MORFOMETRÍA	42
4.3.	SUELOS	44
4.4.	COBERTURAS DEL SUELO	46
4.5.	CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA	47
4.5.1.	Precipitación	48
4.5.2.	Temperatura	50
4.5.3.	Interpolación de temperatura	50
4.5.4.	Velocidad del viento	54
4.5.5.	Radiación solar	55
4.5.6.	Caudal	56
4.6.	DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO	57
4.7	ruta metodológica	58
4.7.1.	Datos climáticos de los Modelos de Circulación	58
4.7.2.	Reducción de escala de las variables	59

4.7.3.	Ensamble de los Modelos Climáticos Globales.....	59
4.7.4.	Modelación Hidrológica en SWAT	60
4.7.4.1.	Etapa I	62
4.7.4.2.	Etapa II	63
4.7.4.3.	Etapa III	65
4.7.4.4.	Etapa IV.....	67
4.8.	ESTRATEGIA DE CALIBRACIÓN Y FUNCIÓN OBJETO	67
4.9.	SIMULACIÓN ESCENARIOS CAMBIO CLIMÁTICO	68
4.10.	CÁLCULO DE ÍNDICES.....	68
5.	RESULTADOS	70
5.7.	SERIES FUTURAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	70
5.8.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT	73
5.9.	ESCORRENTÍA PARA EL PERIODO LÍNEA BASE	76
5.10.	ESCORRENTÍA SIMULADA PARA EL PERIODO 2012-2099	77
5.11.	HUMEDAD DEL SUELO PERIODO LÍNEA BASE.....	78
5.12.	ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA EN EL SECTOR AGRÍCOLA	80
5.12.1.	Línea base 1981- 2012	80
5.12.2.	Periodos Futuros 2012- 2099	82
5.13.	EVALUACIÓN MULTIVARIADA DE LA SEQUIA	85
5.13.1.	MSDI para el periodo línea base	85
5.13.2.	MSDI para el RCP 4.5.....	87
5.13.3.	MSDI para el RCP 8.5.....	89
5.14.	ANÁLISIS DE FRECUENCIA, INTENSIDAD Y DURACIÓN PARA EL MSDI 91	
5.14	CONCLUSIONES.....	95
5.15	RECOMENDACIONES	96
6.	REFERENCIAS	97
7.	ANEXOS.....	104

ABREVIATURAS

PIB	Producto Interno Bruto
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SPI	Standardized Precipitation Index / Índice de Precipitación Estandarizado
SRI	Standardized Runoff Index / Índice de Escorrentía Estandarizado
SSWI	Standardized Soil Water Index / Índice Estandarizado de Agua del Suelo
MSDI	Índice de sequía estandarizado multivariado
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
MinAmbiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia
DNP	Departamento Nacional de Planeación
USDA	United States Department of Agriculture / Departamento de Agricultura de los Estados
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MCG	Modelos de Circulación Global
RCP	Representative Concentration Pathways / Trayectorias de concentración representativas
GEI	Gases de Efecto Invernadero
SWAT	Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua para una cuenca hidrográfica
SWAT-CUP	SWAT - Calibration and Uncertainty Programs
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting- Version 2 / Adaptación de incertidumbre secuencial -Versión 2
URH	Unidades de Respuesta Hidrológica
MDE	Modelo digital de elevación
KED	Kriging with External Drift
MCMB	Macrocuenca Magdalena Cauca
RMSE	Raíz error cuadrático medio
NSE	índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe
QM	Mapeo Cuantil estándar
IDW	Inverse Distance Weighting
2W2E	Water Weather Energy Ecosystem
ISI-MIP	Proyecto de intercomparación de modelos de impacto intersectorial
FDP	Función de distribución probabilidad

UNIDADES

m.s,n,m.	metros sobre el nivel del mar
mm	milímetro
w	vatio
kw	kilovatio
°C	grados Celsius
km	kilómetro
m	metro
m^2	metro cuadrado
m^3	metro cúbico
h	hora
s	segundo

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Riesgos y causas del cambio climático en la agricultura	22
Tabla 2. Características de los MCG	23
Tabla 3. Escenarios de cambio climático del IPCC	25
Tabla 4. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe	30
Tabla 5. Clasificación de la sequía para los índices SPI, SRI y SSWI	34
Tabla 6. Clasificación de la sequía para Índice de sequía estandarizado multivariado (MSDI)	36
Tabla 7. Acuerdos internacionales	39
Tabla 8. Acuerdos Nacionales.....	40
Tabla 9. Parámetros morfométricos de la subcuenca Cunday	43
Tabla 10. Unidades cartográficas del suelo.....	45
Tabla 11. Distribución de cobertura de la tierra para subcuenca Cunday	46
Tabla 12. Variables hidroclimatológicas	48
Tabla 13. Modelos de Circulación y escenarios	59
Tabla 14. Códigos de SWAT para la clasificación de las coberturas del suelo	64
Tabla 15. Códigos SWAT – Textura del suelo.....	64
Tabla 16. Combinaciones MSDI	69
Tabla 17. Resultados Nash-Sutcliffe	74
Tabla 18. Resultados Nash-Sutcliffe	76
Tabla 19. Resultados MSDI para el periodo línea base	86
Tabla 20. Resultados MSDI 1,2 y 3 del periodo enero a diciembre de 1982.....	86
Tabla 21. Clasificación de los intervalos de sequía, para los resultados del MSDI 1,2 y 3 en términos de cantidad y porcentaje para el escenario RCP 4.5.....	88
Tabla 22. Clasificación de los intervalos de sequía, para los resultados del MSDI 1,2 y 3 en términos de cantidad y porcentaje para el escenario RCP 8.5.....	90
Tabla 23. Unidades del suelo POMCA.....	102
Tabla 24. Unidades de Clima POMCA.....	102

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de Amenaza	18
Figura 2. Tipos de sequía	20
Figura 3. Esquema del concepto de downscaling espacial	27
Figura 4. Esquema SWAT-CUP	31
Figura 5. Análisis de incertidumbre del algoritmo SUFI-2	32
Figura 6. Ejemplo numérico para describir las propiedades de MSDI.....	35
Figura 7. Localización subcuenca Cunday.....	42
Figura 8. Curva Hipsométrica.....	44
Figura 9. Ubicación unidades cartográficas de suelos	45
Figura 10. Distribución de las principales coberturas en la subcuenca Cunday ...	47
Figura 11 Ubicación de píxeles del producto de precipitación del proyecto Earth2Observe en la cuenca del río Prado	49
Figura 12. Boxplot de la precipitación media mensual multianual en la subcuenca Cunday	50
Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas del IDEAM empleadas en la interpolación espacial de la temperatura del aire.....	51
Figura 14. Boxplot de la temperatura mínima mensual multianual en la subcuenca Cunday	52
Figura 15. Boxplot de la temperatura máxima mensual multianual en la subcuenca Cunday	53
Figura 16. Boxplot de velocidad del viento media mensual multianual en la subcuenca del río Cunday	55
Figura 17. Boxplot de radiación solar media mensual multianual en subcuenca del río Cunday	56
Figura 18. Serie de caudales mensuales multianuales de la estación Pte. Cunday	57
Figura 19. Fases Metodología.....	58
Figura 20. Variables de entrada y salida modelo SWAT	61
Figura 21. Subcuencas delimitadas por ArcSWAT	62
Figura 22. Cobertura de la tierra río Prado	63
Figura 23. Texturas de suelos en cuenca del río Prado.....	65
Figura 24. Estructura de los archivos necesarios para incorporar la información meteorológica en SWAT	66
Figura 25. Distribución de estaciones y píxeles	67
Figura 26. Serie de precipitación mensual para el periodo 2012-2099 en la subcuenca Cunday	71
Figura 27. Serie de temperaturas RCP 4.5 vs 8.5.....	72
Figura 28. Serie de temperaturas RCP 4.5 vs 8.5.....	73
Figura 29. Caudal observado vs.simulado	74

Figura 30. Incertidumbres parámetros SWAT-CUP	75
Figura 31. Serie de escorrentía simulada	77
Figura 32. Serie de escorrentía RCP 4.5 vs 8.5.....	78
Figura 33. Serie de humedad del suelo Línea base.....	79
Figura 34. Serie de humedad del suelo RCP 4.5 vs 8.5	80
Figura 35. . Comparación de resultados índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c), del periodo 1981- 2012.....	81
Figura 36. Evaluación de los eventos de sequía a través de los índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c), para el escenario RCP 4.5 durante el periodo de tiempo de 2012-2099.....	83
Figura 37. Evaluación de los eventos de sequía a través de los índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c), para el escenario RCP 8.5 durante el periodo de tiempo de 2012-2099.....	84
Figura 38. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el periodo 1981-2012.....	87
Figura 39. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 del RCP 4.5 para el periodo 2012-2099.....	89
Figura 40. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 del RCP 8.5 para el periodo 2012-2099.....	91
Figura 41. Resultados de Duración y Frecuencia del MSDI histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5. MSDI 1 (a, b), MSDI 2 (c, d) y MSDI 3 (e, f).....	94

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Balance hídrico del modelo SWAT I	28
Ecuación 2. Índice de Nash-Sutcliffe	29
Ecuación 3. Índice de sequía estandarizado multivariado	35
Ecuación 4. Ensamble MCG	60

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Unidades Cartográficas del Suelo.....	104
Anexo 2. Ensamblajes de los modelos de circulación para precipitación y temperatura, en los escenarios RCP 4.5 (a) y RCP 8,5 (b).	105
Anexo 3. Resultados funciones de distribución, (a) SPI, (b) SRI y (c) SSWI	106
Anexo 4. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el periodo 1981-2012.....	108
Anexo 5. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el RCP 4.5	109
Anexo 6. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el RCP 8.5	110
Anexo 7. Años variabilidad climática fenómeno El Niño y La Niña, periodo 1982 a 2012	111
Anexo 8. Precipitación mensual multianual 2012- 2040.....	112
Anexo 9. Precipitación mensual multianual 2041 - 2069.....	113
Anexo 10. Precipitación mensual multianual 2070 - 2099.....	113
Anexo 11. Boxplot temperatura mínima mensual multianual RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b)	114
Anexo 12. Boxplot temperatura máxima mensual multianual RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b)	115

RESUMEN

El presente proyecto evaluó la amenaza por sequía en el sector agrícola en la cuenca del río Prado, específicamente en la subcuenca Cunday, la cual se localiza en la parte norte central de la cuenca del río Prado en el departamento del Tolima, a partir de las variaciones en la temperatura y precipitación a través del tiempo. De acuerdo con lo anterior fueron definidas tres situaciones, el periodo base (1981 – 2012), y las condiciones futuras (2012 – 2099), definidas por los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, que representan estabilización y alto nivel de emisión, respectivamente, según el IPCC [1].

Inicialmente se determinó la producción de escorrentía y humedad del suelo en la subcuenca, por medio del modelo hidrológico SWAT, para ejecutar este proceso fue necesario contar con la precipitación y temperatura de la línea base y de los escenarios climáticos. Estas variables se adquirieron a partir de datos observados históricos, mientras que las predicciones fueron obtenidas de los modelos de circulación global a los cuales se les realizó una corrección de sesgo y reducción de escala.

Por último, a partir de los datos de línea base y futuros se realizó el cálculo los índices de sequía seleccionados, Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), Índice de Escorrentía (SRI), e Índice Estandarizado de Agua del Suelo (SSWI). Para combinar los tres índices (precipitación, humedad del suelo y escorrentía), se calculó el Índice de sequía estandarizado multivariado (MSDI) que combina probabilísticamente cada índice y permitió hacer la caracterización general de la sequía [2]. Como resultado los MSDI evaluados en la línea base presentaron una menor frecuencia de eventos secos en comparación con los escenarios futuros. En los escenarios RCP 4,5 y 8.5 evaluados, los MSDI demostraron que las duraciones de las sequías tendrán una persistencia similar. Además, las sequías agrícolas serán más frecuentes en las condiciones futuras incrementando la intensidad en las clasificaciones de moderada, severa y extremadamente secas, respecto a la línea base donde la mayoría de los eventos se concentraban en las condiciones cerca de lo normal.

Palabras claves: amenaza, sequía hidroclimática, Cambio Climático, índices, SWAT, escenarios, agricultura.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado se desarrolló en la modalidad de pasantía en la Organización Acción Climática, la cual tuvo por objeto evaluar la amenaza por sequía del sector agrícola de la cuenca del río prado, tomando como caso de estudio la subcuenca Cunday bajo los escenarios del cambio climático. Este trabajo permitirá a las empresas consultoras que hacen parte de la organización, crear un nicho de mercado que soporte el desarrollo de una actividad agraria en los marcos de cumplimiento de los acuerdos nacionales e internacionales y considerar dentro de su portafolio de servicios las variables biofísicas e hidroclimáticas que permitan determinar e identificar los cultivos resilientes al clima futuro.

El cambio climático es en la actualidad uno de los principales problemas que aborda la sociedad posmoderna, se espera que modifique los patrones de temperatura y precipitación, ocasionando mayor frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, en la mayor parte del mundo [3]. Según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la temperatura media global del aire en la superficie terrestre y oceánica ha aumentado alrededor de 0.72 °C (0.49–0.89 °C) durante 1951–2012 [4].

Uno de los eventos más complejos y amenazantes, que afecta a diferentes componentes del ciclo hidrológico, es la sequía, peligro natural con períodos prolongados y recurrentes, generando impactos en los recursos hídricos, la agricultura y el ambiente [5]. Es probable que el cambio climático modifique las condiciones de sequía y exacerbe la frecuencia e intensidad de este fenómeno en el futuro. Por este motivo es de vital importancia predecir los comportamientos de la sequía, lo cual es posible gracias a los MCG los cuales brindan información valiosa para predecir el clima en el futuro [6].

Por consiguiente, los análisis de sequía basados en una sola variable (o indicador) pueden no ser suficientes puesto que los fenómenos de sequía están relacionados con múltiples variables como la precipitación, escorrentía y humedad del suelo. Para analizar la amenaza por sequía, el índice MSDI permite una combinación probabilística de los eventos sequia o humedad, para una caracterización y evaluación de la amenaza, apoyando una adecuada gestión del riesgo [2].

Es imprescindible conocer los impactos que conlleva el cambio climático en los diferentes sectores, más aún para el sector agrícola, por ser responsable de más de una décima parte del PIB y fuente de empleo para más de una quinta parte de su población en Colombia. [7].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la amenaza por sequía hidroclimática en el sector agrícola de la cuenca del río Prado bajo los escenarios del cambio climático.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular los escenarios de cambio climático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático a través de cambios en las variables precipitación y temperatura en el modelo hidrológico calibrado SWAT.
- Calcular los índices de sequía: Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), Índice de Escorrentía (SRI) y el Índice Estandarizado de Agua del Suelo (SSWI).
- Evaluar los cambios en la amenaza por sequía en el sector agrícola a partir de las condiciones actuales de los índices evaluados frente a sus resultados con los escenarios de cambio climático.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. MARCO CONTEXTUAL

La Asociación Red de Líderes Empresariales Contra el Cambio Climático, denominada como Red Acción Climática, es una plataforma empresarial y gremial latinoamericana apoyada por Corporate Leaders Group (Gran Bretaña), la Alianza del Pacífico y el Gobierno de Chile, que tiene como fin promover negocios y servicios orientados a la mitigación y adaptación ante el Cambio Climático y a la formación de líderes en crecimiento sostenible en la dirección empresarial [8].

Acción Climática nace en Colombia en el año 2018 con la iniciativa de innovar y ayudar a las empresas en sus estrategias de adaptación al Cambio Climático. Actualmente se encuentra presente en Chile, Perú y Colombia, con más de 75 empresas afiliadas en dos grandes campos: empresas que requieren de servicios ambientales y empresas consultoras [8]. El presente trabajo se enfoca para el segundo grupo de empresas, identificando la amenaza frente al cambio climático que enfrentará la zona de estudio, es decir, las empresas consultoras podrán crear un nicho de mercado que permita soportar el desarrollo de una actividad agraria en los marcos de cumplimiento de los acuerdos nacionales e internacionales y considerar dentro de su portafolio de servicios las variables biofísicas e hidroclimáticas que permitan determinar e identificar los cultivos resilientes al clima futuro.

3.2. MARCO TEÓRICO

3.2.1. Amenaza

Peligro latente que representa para un sitio la probabilidad de ocurrencia de un evento catastrófico, puede ser de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, en un periodo de tiempo determinado, produciendo consecuencias desfavorables en las personas, los bienes, servicios y el ambiente. En la , se presenta los peligros latentes en cada tipo de amenaza [9].

Figura 1. Tipos de Amenaza



Fuente: [10]

3.2.2. Sequía

Todos los tipos de sequía (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se originan de una deficiencia de precipitación (Wilhite and Glantz, 1985 citado por Wilhite en 2014), aunque otros factores como los fuertes vientos, las altas temperaturas y la baja humedad relativa pueden exacerbar la severidad de la sequía. Se han definido cuatro clases de sequías, las cuales son: (i) meteorológica que se relaciona con características naturales, y sequías (ii) agrícolas, (iii) hidrológicas y (iv) socioeconómicas que tienen mayor énfasis en aspectos humanos o sociales y la gestión de los recursos naturales [11].

3.2.2.1. Sequía Meteorológica

Se define como la desviación de la precipitación respecto a la media durante un período de tiempo determinado. Usualmente este tipo de sequía precede a los otros tipos de sequías. La ocurrencia de una sequía meteorológica debe ser considerada como parte de la variabilidad del clima de un sitio o una región. Este tipo de sequía se considera como un proceso totalmente natural, debido a que no hay una influencia humana directa. Diversos autores coinciden que esta sequía es resultado de persistentes cambios en los patrones de circulación atmosférica de gran escala. Es importante mencionar, sin embargo, que el cambio climático de origen antrópico

podría estar llevando a sequías meteorológicas más frecuentes e intensas en algunas regiones del mundo [12].

3.2.2.2. Sequía Agrícola

Cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento, se establece de esta forma que existe una sequía agrícola [13].

La cantidad de agua para el desarrollo de cada cultivo es diferente, y variar a lo largo del crecimiento de una misma planta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni tan siquiera para una única área geográfica. Este tipo de sequía, por depender no sólo de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo, no es equivalente a la sequía meteorológica. Por ejemplo, si los niveles de humedad en el subsuelo son suficientes para proporcionar agua a un determinado tipo de cultivo durante el período en el cual tengan lugar una sequía meteorológica, no llegará a producirse una sequía agrícola [13].

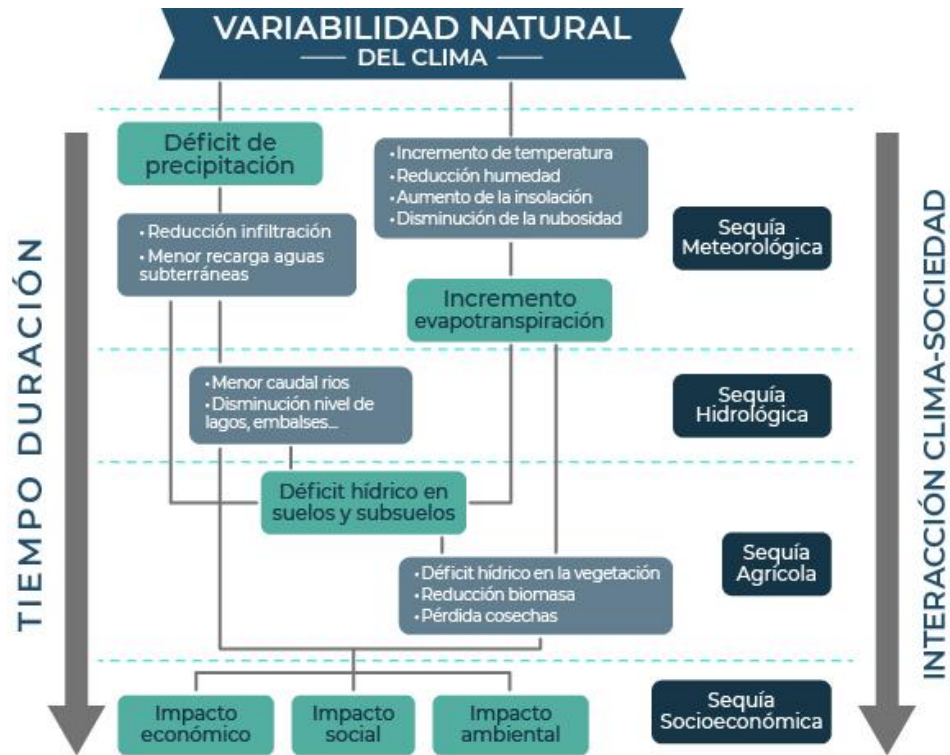
3.2.2.3. Sequía Hidrológica

Ocurre cuando las fuentes de agua en la superficie y en el subsuelo están por debajo del nivel medio o un valor umbral (crítico) definido. A nivel superficial, esta sequía se manifiesta por una disminución en escorrentía, caudal de ríos y nivel de almacenamiento de presas; mientras que, en subsuelo, se manifiesta por un descenso de nivel freático. Los efectos de este tipo de sequía no son inmediatos, ya que hay un tiempo de atraso entre la reducción de la precipitación y el momento en que se vuelve evidente en el sistema hidrológico. Aunque en general resulta como consecuencia de la sequía meteorológica, una inadecuada administración del agua (factor humano) puede llevar a que en algunas regiones se experimente una sequía hidrológica. Por lo anterior, este tipo de sequía no es totalmente natural e involucra cierto grado de influencia humana [12].

3.2.2.4. Sequía Socioeconómica

La sequía socioeconómica es causada por la influencia de la sequía meteorológica, agrícola e hidrológica y se refiere a que el suministro de agua, no puede satisfacer la demanda de los diferentes sectores que hacen uso de este recurso y como consecuencia generan impactos negativos sobre la economía, el ambiente y la sociedad [14].

Figura 2. Tipos de sequía



Fuente: [13]

3.2.3. Clima y Cambio Climático

El clima es el estado promedio del tiempo atmosférico en un periodo de mayor a 30 años, su determinación se genera a partir de los datos de precipitación, temperatura y otras variables como, viento, presión atmosférica, etc. [15].

Por otra parte, según el CMNUCC, el Cambio Climático, es una alteración del clima atribuida directa o indirectamente a las emisiones antropogénicas de los GEI como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), y gases artificiales como Clorofluorocarbonos (CFCs), Hidrofluorocarburos (HFCs), o Hexafluoruro de azufre (SF_6O) [16] que generan mayor incidencia en el efecto invernadero, los cuales absorben ondas de calor, atrapando la energía emitida por la superficie de la tierra, contribuyendo al calentamiento global [15].

En los últimos decenios, se han observado cambios en el sistema climático como: aumento en la temperatura media global con un incremento de 0.85°C en el periodo de 1880 – 2012, elevación del nivel del mar en 0,19 m entre 1901 y 2010, decrecimiento del pH de los océanos en 0.1 unidades a partir de la era industrial, crecimiento de la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera en un 40% desde el año 1750 [17].

3.2.4. Tercera Comunicación del Cambio Climático

La Tercera Comunicación Nacional de Colombia, es un mecanismo de reporte colectivo interinstitucional que lidera el IDEAM, MinAmbiente, DNP y la Cancillería de Colombia; con el apoyo permanente del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, este informe sintetiza el progreso del país en los análisis de vulnerabilidad, medidas de mitigación y adaptación, emisiones de gases de efecto invernadero y acciones en educación y formación sobre Cambio Climático. En él se prevé que para finales de siglo XXI, la temperatura media del departamento del Tolima aumente 2.3 °C y la precipitación se incremente entre un 10.54 % a un 17.24% en el periodo de 2011 a 2040. [18]

3.2.5. Cambio Climático en la Agricultura

La agricultura es uno de los sectores más vulnerables al cambio climático a nivel mundial, pues es altamente sensible a los cambios de temperatura y los regímenes de precipitación (

). Estos cambios generan efectos en el rendimiento y la distribución espacial de los cultivos, la producción, la variación de los precios y el consumo, que afectan las condiciones de bienestar y calidad de vida de las familias productoras [19].

El sector agrícola podría verse afectado o no a los aumentos en las variables de precipitación y temperatura [19]. En el caso del cultivo del maíz, las temperaturas cambiantes han tenido un impacto beneficioso en la producción agrícola, las condiciones más favorables para la obtención de rendimientos elevados en el cultivo se dan en climas con alta radiación solar y temperaturas elevadas, entre 20 y 28° C [20].

Por el contrario, en un cultivo transitorio como el tomate, cuando la temperatura es superior a la óptima, la viabilidad del polenización puede disminuir significativamente generando como resultando una pobre fructificación, abortos de fruto, muerte de tejidos (necrosis) o manchas amarillentas o café [21].

Los efectos e impactos sobre los sistemas agrícolas de cada país variarán según la interacción entre las condiciones climáticas, topográficas, edáficas, los tipos de cultivo, la disponibilidad de agua y las clases de cultivos utilizados por los productores en sus plantaciones [19].

Tabla 1. Riesgos y causas del cambio climático en la agricultura

Riesgo	Causas
Reducción de la superficie óptima para el desarrollo de los cultivos	Cambios en la distribución de las precipitaciones mensuales
Disminución de la productividad y calidad de los cultivos	Aumento de la temperatura en los periodos críticos
Incremento del riesgo de plagas y enfermedades	Aumento de la erosión del suelo
Aumento del riesgo de sequía y escasez de agua	Aumento de la temperatura en los periodos críticos
Incremento del riesgo inundaciones	Aumento de zonas encharcadas
Erosión del suelo, salinización y desertificación	Descenso de las precipitaciones anuales y estacionales

Fuente: [19]

3.2.6. Cambio Climático en la Agricultura en del Departamento del Tolima

En el departamento del Tolima el sector agropecuario ocupa un lugar importante en su economía debido a que contribuye el 15.6% del PIB total departamental en el año 2016 y que ocupa 12.9% del territorio Tolimense. Dentro de sus principales cultivos se destaca: algodón, arroz, café, cacao, aguacate, frijol, caña panelera, maíz, cítricos, mango, plátano y papa [22].

Los factores de desequilibrio ambiental que afectan la agricultura a nivel global no difieren frente a los presentados en el departamento del Tolima, como deforestación, incremento de temperatura, contaminación y desabastecimiento de las fuentes hídricas, fenómenos de ‘El Niño’ y ‘La Niña’, fuertes precipitaciones, el deshielo de los nevados, incendios forestales, entre otras problemáticas, impactan la productividad y la seguridad alimentaria de la región [22].

Como respuesta a los efectos del cambio del clima en la región, el departamento adoptó como política pública el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Tolima con proyección al año 2031 que busca establecer las directrices bajo los ejes de disminución de gases de efecto invernadero, manejo del

recurso hídrico, biodiversidad y servicios ecosistémicos, seguridad alimentaria, salud ambiental y hábitat humano e infraestructura. Estas directrices orientan las decisiones de las entidades públicas, privadas y a las comunidades en busca de acciones de mitigación y adaptación a dichos efectos, así como la resiliencia socio-ecológica para el departamento a través del desarrollo de una agricultura sostenible [22].

Este plan integral de gestión del cambio climático territorial del Tolima es una herramienta dinámica, la cual permite articular los planes de ordenamiento y manejo cuencas hidrográficas con los planes municipales y departamentales [22].

3.2.7. Modelos de Circulación Global

Los MCG son la representación de procesos físicos en la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, se utilizan como herramienta para simular el clima en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales, actualmente están disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero [6].

Los MCG se utilizan comúnmente para evaluar el cambio climático futuro y el impacto asociado en el sistema terrestre. Concretamente, esto ayuda a cuantificar las señales históricas del cambio climático y a proyectar los cambios futuros a escala regional y subregional [23]. Los MCG que aparecen en la Tabla 2. Características de los MCG se utilizaron dentro del presente estudio, estos modelos se basan en el conjunto de nuevas simulaciones de modelos globales planeadas en apoyo del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5). Estas simulaciones se conocen como la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados [4].

Tabla 2. Características de los MCG

Modelos	Expansión de Modelos	Fuente	Resolución Atmosférica (Long*Lat, Niveles)	Resolución de los Océanos (Long*Lat, Niveles)
GFDL-ESM2G	Modelo del Sistema Terrestre de Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos	Laboratorio geofísico de dinámica de fluidos de los Estados Unidos	2.5° * 2°, L24	1° * 0.6°, L63

Modelos	Expansión de Modelos	Fuente	Resolución Atmosférica (Long*Lat, Niveles)	Resolución de los Océanos (Long*Lat, Niveles)
HadGEM2-ES	Modelo Ambiental Mundial del Centro Hadley, versión 2 (Sistema Terrestre)	Met Office Hadley Centre, Reino Unido	1.875° * 1.25 °, L38	1° * (1 – 0.3) °, L40
IPSL-CM5A-LR	Modelo acoplado, versión 5ª, acoplado L'Institut Pierre-Simon Laplace	Instituto Pierre Simon Laplace, Francia	3.75° * 1.875°, L39	2° * 2°, L31
MIROC-ESM	Modelo de Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima, Modelo del Sistema Terrestre	Organismo de Ciencia y Tecnología Marino-Terrestre de Japón	2.8125° * 2.8125°, L80	1.40625°* 0.9375°, L44
NorESM1-M	Modelo del Sistema Noruego de la Tierra, versión 1 (resolución intermedia)	Centro Climático Noruego, Noruega	2.5° * 1.9°, L26	1° * 0.5°, L53

Fuente: [4]

3.2.8. Escenarios de Cambio Climático

Los escenarios son poderosas herramientas de apoyo a la gestión del riesgo, ya que permiten la toma de decisiones, bajo algunos supuestos veraces y científicamente soportados del comportamiento del clima en el futuro. De esta manera los tomadores de decisiones pueden observar cómo podrían ser las condiciones futuras, de modo que puedan anticiparse a los probables efectos sobre la naturaleza y la humanidad. Bajo este contexto, un escenario de cambio climático es la representación del clima que se observaría bajo una concentración

determinada de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera en los diferentes periodos futuros [24].

En el Quinto informe de evaluación del IPCC (AR5) del año 2013, se proponen cuatro escenarios de emisión, en función de las Trayectorias de Concentración Representativas 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 es decir, el cambio en el balance entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la tierra que se expresa en W/m^2 [15].

3.2.9. Trayectorias de Concentración Representativas

Los RCP se establecieron para representar cuatro escenarios de desarrollo futuro, de acuerdo a emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, uso del suelo y forzamiento radiativo atmosférico [25]. Las trayectorias de concentración incluyen un escenario optimista (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5 Y 6.0), y por último el escenario pesimista que corresponde al RCP 8.5, el cual representa un nivel muy alto de emisiones de GEI. En la Tabla 3, se muestran las características más relevantes de cada uno de los escenarios mencionados [26].

Tabla 3. Escenarios de cambio climático del IPCC

Escenario	Forzamiento radiativo (W/m2)	CO ² Atmosférico (ppm)	Anomalia de Temperatura	Trayectoria
RCP 8.5	8.5	>1370	4.9	2100 en aumento
RCP 6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100
RCP 4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100
RCP 2.6	2.6	490	1.5	Incrementos antes de 2100 y después declina

Fuente: [24]

3.2.10. Reducción de Escala ó Downscaling

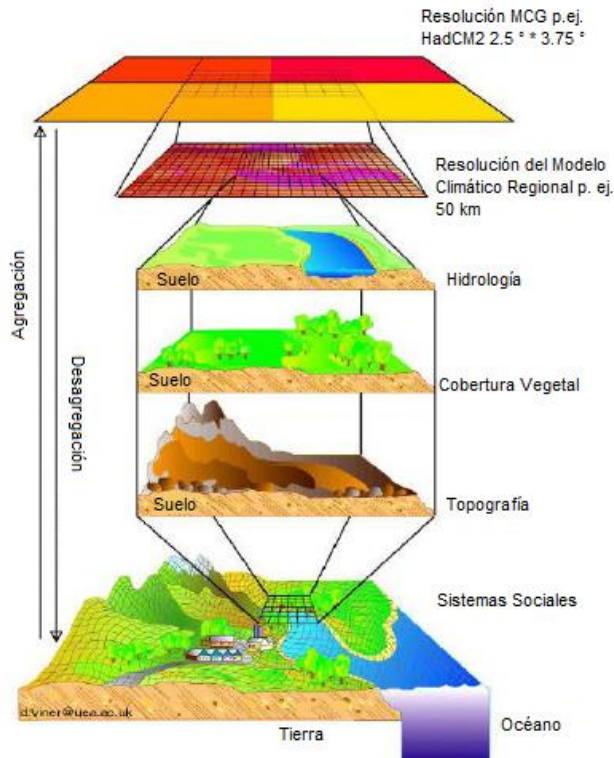
Los MCG son herramientas valiosas para predecir el clima en el futuro, sin embargo, no pueden explicar la heterogeneidad de la variabilidad climática, debido a sus resoluciones espaciales oscilan de 100 a 500 km (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) esto provoca que la información suministrada sobre el clima sea inadecuada si vamos a usar ésta como variable de entrada para un modelo de impacto. Diferentes características del paisaje, como la topografía,

cuerpos de agua, componentes del sistema climático como nubes convectivas y brisas costeras, tienen escalas más finas de 10 a 50 km que influyen el clima local, y que deben ser consideradas la toma de decisiones por diferentes actores a partir de la información sobre posibles impactos del clima futuro sobre la agricultura, la hidrología, distribución de especies, etc. [27].

La información climática a pequeña escala se basa en el supuesto de que el clima local está condicionado por interacciones entre condiciones atmosféricas a gran escala (circulación, temperatura, humedad, etc.) y características locales (cuerpos de agua, cadenas montañosas, propiedades de la superficie terrestre, etc.). Modelar esta correlación entre el clima actual y las condiciones atmosféricas a gran escala, es posible a través de la reducción de escala (downscaling) [27].

Esta técnica se puede realizar en aspectos espaciales, para derivar información climática de los MCG de una escala gruesa a fina como por ejemplo de una escala de 500 km a 20 km, o con un enfoque temporal de escala anual o mensual, en una escala diaria [27]. Las técnicas más empleadas en la reducción de escala de los resultados de los MCG son el downscaling estadístico que se caracteriza por establecer relaciones empíricas entre campos de baja resolución, denominados predictores y las variables de superficie, llamadas predictandos. Por otro lado, el downscaling dinámico consiste en obtener campos de alta resolución anidando un modelo climático regional, dentro del propio MCG. A pesar de que han sido ampliamente usados tiene limitaciones como suposiciones iniciales que requieren y no pueden ser verificadas en el contexto de cambio climático, lo cual representa a incertidumbres que se manifiestan en las simulaciones finales del clima [28].

Figura 3. Esquema del concepto de downscaling espacial



Fuente: [27]

3.2.11. Mapeo Cuantil Estándar

El método de reducción de escala empleado en el presente estudio es el mapeo Cuantil Estándar. Durante los últimos años QM se ha vuelto cada vez más popular y se utiliza ampliamente tanto para corregir sesgos sistemáticos de simulaciones de modelos climáticos como para reducir la escala de las variables de salida de los MCG. La implementación específica de QM utilizada es una variante del mapeo cuantil empírico y se origina de las obras de Rajczak [29] e Ivanov y Kotlarski [30].

Las distribuciones simuladas y observadas se corresponden aproximadamente mediante el establecimiento de una función-cuantil de corrección dependiente que traduce cuantiles simulados en sus contrapartes observadas, el mapeo cuantil se basa en que las características en el periodo histórico persistirán en el futuro. Como los datos históricos observados con los que se compara la distribución simulada reflejan una escala espacial superior a los datos de los modelos climáticos, la distribución corregida por sesgo es, en principio, válida para esa escala espacial superior [31].

3.2.12. Modelo Hidrológico SWAT

El modelo SWAT (Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua para una cuenca hidrográfica) fue creado a principios de los noventa, desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el USDA, para estimar el impacto del uso del suelo en la escorrentía, sedimentos y producción de sustancias derivadas de la actividad agrícola en diferentes tipos de suelo. Este modelo se fundamenta en el balance hídrico para determinar las entradas, salidas y almacenamiento de agua en una cuenca [32]. Adicionalmente, el modelo SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (URH) como resultado del cruce de los diferentes tipos de suelo, pendiente del terreno, uso y cobertura del suelo, relieve, datos de elevación, etc. [33], beneficiando el incremento de la exactitud del modelo y una mejor descripción física de los procesos hidrológicos que ocurren en el balance hídrico, dado que la escorrentía es calculada considerando las diferencias de los suelos y sus coberturas dentro de las URH [32].

A continuación, se presenta la ecuación de balance hídrico que usa el modelo SWAT:

Ecuación 1. Balance hídrico del modelo SWAT I

$$Wt = SW0 + \sum (R\ day - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw})$$

Fuente: [33]

Donde:

SWt: Contenido final de agua en el suelo (mm).

SW0: Contenido inicial de agua del suelo en un día *i* (mm).

R day: Cantidad de precipitación en un día *i* (mm).

Qsurf: Cantidad de escorrentía de la superficie en día *i* (mm)

Ea: Cantidad de evapotranspiración en día (mm).

Wseep: Cantidad de agua que entra en la zona que percola en el perfil del suelo en día (mm).

Qgw: Cantidad del flujo de retorno en un día (mm).

t: Tiempo en días

3.2.13. Métricas de Desempeño

Los criterios o métricas de desempeño muestran la capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad, y son usados en diferentes fases de la modelación, como calibración, validación, optimización y evaluación de incertidumbre. Sus resultados muestran el grado de la fiabilidad y la precisión de los modelos empleados [34].

Existe una gran gama de estas métricas, algunas ampliamente conocidas como el error cuadrático medio (RMSE) y el índice Nash-Sutcliffe, que por lo general son acompañadas de una evaluación gráfica de resultados como hidrogramas, curvas de duración de caudales, entre otras; donde se comparan de las series de datos observados y simulados [34].

3.2.14. Índice de Nash – Sutcliffe

El índice de Nash-Sutcliffe, es una forma de estandarizar la función objetivo de mínimos cuadrados. Este define la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos medidos, un ajuste negativo indica que un modelo es insuficiente y no se ajusta a los datos observados. Mientras más cercano a uno (1) sea este criterio estadístico mejor será la bondad de ajuste [35].

El criterio de error de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados, para medir la dispersión entre las series simulada y observada, y se define como:

Ecuación 2. Índice de Nash-Sutcliffe

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim\ i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Fuente: [35]

Donde:

$Q_{sim, i}$: Caudal simulado en el tiempo i

Q_i : Caudal observado en el tiempo i

$\bar{Q}$: Promedio de caudales observados

A continuación, en la Tabla 4, se muestra la clasificación de los valores del NSE con su respectivo ajuste, se adoptó al trabajo la propuesta de Molnar año 2011.

Tabla 4. Valores referenciales del Criterio de Nash-

E (Nash)	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfecho
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: [36]

3.2.15. Calibración

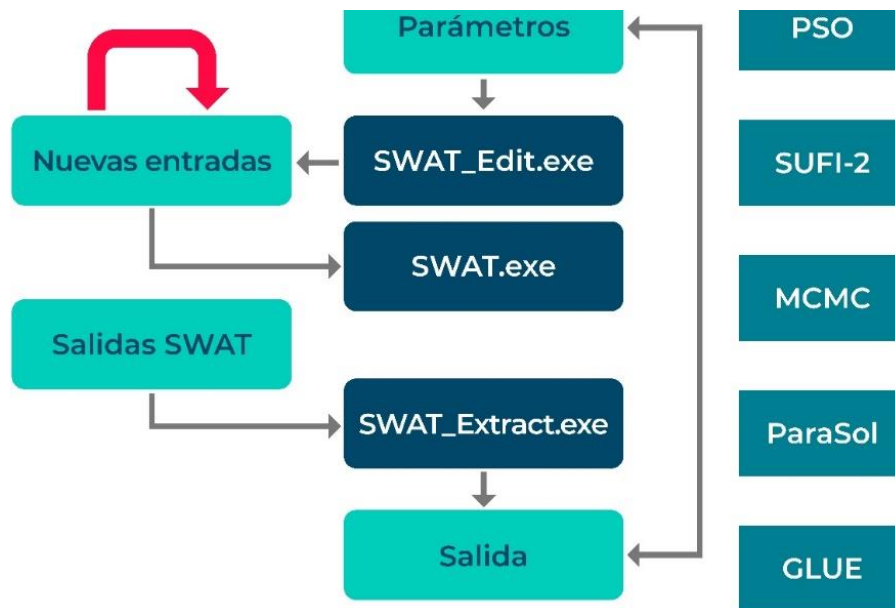
La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados se ajustan de la mejor forma a la serie de datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una función objetivo [37].

3.2.16. Calibración en SWAT-CUP

SWAT-CUP es un programa gratuito desarrollado por Abbaspour [38] que permite el uso de diferentes algoritmos (SUFI-2, GLUE, MCMC y ParaSol), como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para la optimización del modelo SWAT. De acuerdo a lo anterior es posible el análisis de sensibilidad, calibración, validación y análisis de incertidumbre de varios parámetros hidrológicos [39].

La calibración automática del modelo requiere que los parámetros del modelo se cambien sistemáticamente, se ejecute el modelo bajo esa parametrización y las salidas requeridas se comparen con los datos observados en un determinado número de iteraciones hasta encontrar el mejor conjunto de parámetros que represente la realidad evaluada (por ejemplo, caudales) [38].

Figura 4. Esquema SWAT-CUP



Fuente: [38]

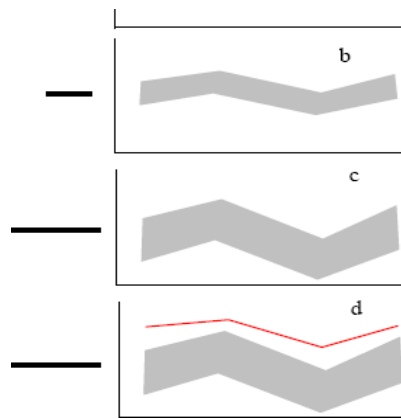
3.2.17. Algoritmo de calibración SUFI-2

SUFI-2 es un algoritmo de calibración desarrollado por Abbaspour e incluido en el software SWATCUP. En SUFI-2, la incertidumbre de los parámetros hidrológicos de entrada al modelo, se representan como distribuciones uniformes (expresada como rangos), mientras que la incertidumbre de salida del modelo es cuantificada por el 95 % de incertidumbre de predicción (95PPU) calculado en los niveles de 2.5 % y 97.5 % de la distribución acumulativa de las variables de salida obtenidas a través del muestreo por medio de la técnica *Latin Hipercube* [40].

El concepto del análisis de incertidumbre del algoritmo SUFI-2 se representa gráficamente en la Figura 5. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde un valor de parámetro único (mostrado por un punto) conduce a una respuesta de modelo único (a), mientras que la propagación de la incertidumbre en un parámetro (mostrado por una línea) conduce a la 95PPU ilustrada por la región sombreada en (b). A medida que aumenta la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre de salida también aumenta (no necesariamente linealmente) (c). Si los parámetros se encuentran en sus límites físicos máximos y el 95PPU no fija la respuesta medida, el modelo debe ser reevaluado (d) [38].

Por lo tanto, SUFI-2 comienza asumiendo una gran incertidumbre en los parámetros (dentro de un rango físicamente significativo), de modo que los datos medidos inicialmente caen dentro del 95PPU, luego disminuye esta incertidumbre en cada iteración, mientras se monitorea las medidas de incertidumbre que corresponden al factor P y el factor R. La actualización de los parámetros se realiza mediante el cálculo de la matriz de sensibilidad, seguida por el cálculo de la matriz de covarianza, la matriz de correlación y el 95% de los intervalos de confianza de los parámetros. En cada actualización de los parámetros los nuevos rangos siempre serán más pequeños que los anteriores [40].

Figura 5. Análisis de incertidumbre del algoritmo SUFI-2



Fuente: [38]

Los pasos que sigue el algoritmo son los siguientes:

1. Definir la función objetivo y los rangos iniciales de los parámetros (mínimo y máximo) [40].
2. Se aplica el método de muestreo *Latín Hipercube* a los parámetros que genera n combinaciones de parámetros, donde n es el número de iteraciones de la simulación requerida. Los conjuntos de parámetros incluidos en la muestra se utilizan como parámetros de entrada de simulaciones hidrológicas en SWAT [40].
3. Se calcula el 95PPU para cada uno de los parámetros que se simulan a partir del cálculo de la función objetivo. En este paso también se calculan las medidas de incertidumbre como el porcentaje P (datos definidos por la banda 95PPU) [40].
4. Si no se cumplen los criterios, se realizan más rondas de muestreo para actualizar intervalos de parámetros y se calcula mediante el método del Hipercubo Latino. Teóricamente, el valor del factor P oscila entre 0 y 100%, mientras que el factor R oscila entre 0 e infinito. Un factor P de 1 y un factor R de cero es una simulación que corresponde exactamente a los datos observados [40].

3.2.18. Índices de Sequía

Los índices de sequía permiten conocer cuantitativa y cualitativamente la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos. Su objetivo es analizar el estado de las sequías en un área, y en un período de tiempo determinado, permitiendo establecer el grado de severidad en diversas escalas temporales. Con estos índices, también, se pueden reconocer los períodos húmedos de corta duración dentro de las sequías de larga duración o los períodos secos de corta duración dentro de los períodos húmedos de larga duración, permitiendo proporcionar un análisis completo de la sequía, incluyendo: la gravedad, localización, el desarrollo cronológico, duración y frecuencia de los episodios [41].

3.2.19. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El SPI se basa en el registro de precipitación a largo plazo durante un período deseado 1, 3, 6, 9 meses etc., puede calcularse para una variedad de escalas de tiempo desde un mes hasta varios años, permitiendo seleccionar cualquier período de tiempo [42].

El cálculo del SPI se realiza a partir de un largo periodo de registro de la precipitación, se ajusta a una distribución de probabilidad (es decir, Gamma, Log Pearson, Lognormal, etc.), que luego se transforma en una distribución normal con una media igual a cero y una desviación estándar igual a 1. Los valores de SPI positivos indican que la precipitación es mayor que la mediana, mientras que los valores negativos indican una precipitación menor. La clasificación del SPI se presenta en la Tabla 5 [42].

3.2.20. Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI)

El SRI emplea el mismo concepto de McKee (1993). Se calcula en base a la función de distribución que mejor se ajusta a los datos, posterior, se convierte a distribución normal (media = 0 y desviación estándar = 1). Se pueden calcular diferentes duraciones, por ejemplo, cada 1, 3, 9 meses, etc) [43].

3.2.21. Índice Estandarizado e Humedad Del Suelo (SSWI)

El SSWI se calcula ajustando una función de densidad de probabilidad a series de tiempo históricas de observaciones de humedad del suelo y luego transformándola en una distribución normal con una media cero y una desviación estándar de uno. Los valores normales estándar negativos indican las condiciones del suelo

seco, mientras que los valores positivos indican las condiciones del suelo húmedo [44].

Tabla 5. Clasificación de la sequía para los índices SPI, SRI y SSWI

Valor	Clasificación
>2.0	Extremadamente Húmedo
1,5 a 1.99	Muy Húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente Húmedo
-0.99 a 0.99	Cerca de lo normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
<-2	Extremadamente seco

Fuente: [45]

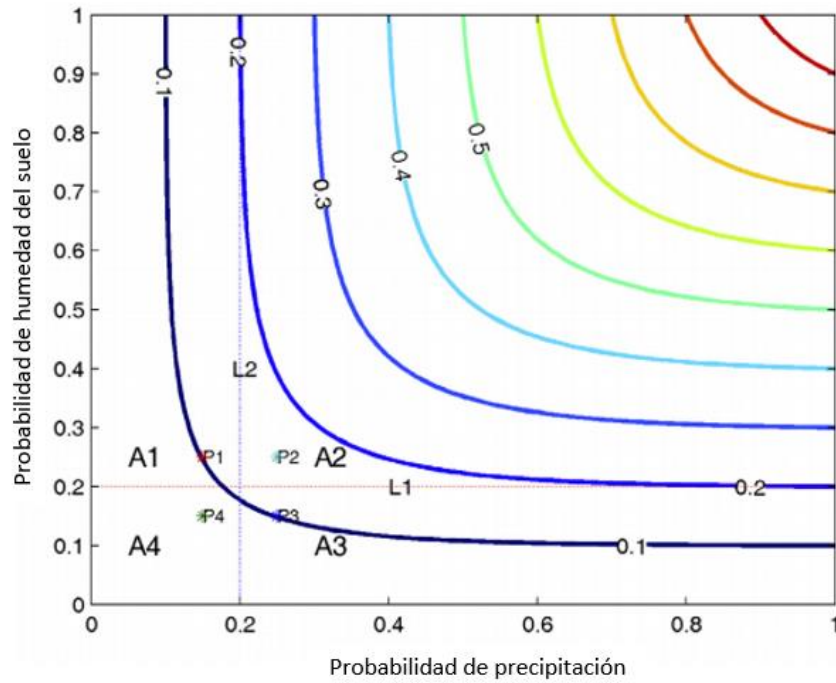
3.2.22. Índice De Sequía Estandarizado Multivariado (MSDI)

Un análisis completo de los eventos de sequía requiere análisis conjuntos de las condiciones de lluvia, escorrentía y humedad del suelo. El MSDI es un índice de sequía agrometeorológica, mediante la construcción de la función de distribución conjunta de dos o más variables (o índices) de sequía univariantes permitiendo una combinación probabilística de los eventos sequia o humedad, para una caracterización y evaluación de la amenaza [2].

El MSDI emplea cópulas, una herramienta útil para el modelado multivariado tanto estocástico como estadístico, representa una forma paramétrica conveniente para modelar la estructura de dependencia en distribuciones conjuntas de variables aleatorias, en particular para parejas de variables aleatorias [46].

En la Figura 6 , se presenta la cópula de Frank, para describir las propiedades de MSDI, en el gráfico, 0.2 (o percentil 20) de precipitación y humedad del suelo, corresponden a SPI y SSI igual a 0.8. Las líneas L1 y L2 presentan el umbral de sequía del percentil 20 y humedad del suelo. Por otra parte, se presentan cuatro áreas, A1- A4, estas son el espacio de probabilidad definidos por la intersección de las líneas L1 y L2. Las cuatro áreas (A1–A4) definen diferentes combinaciones de condiciones de sequía asociadas a la precipitación y humedad del suelo [2].

Figura 6. Ejemplo numérico para describir las propiedades de MSDI



Fuente: [2]

El índice de sequía estandarizado multivariado (MSDI) se puede definir como:

Ecuación 3. Índice de sequía estandarizado multivariado

$$MSDI = \varphi^{-1}(p)$$

Fuente: [2]

Donde φ es la función de distribución normal estándar, y p es la probabilidad conjunta. La Ecuación 3, transforma la probabilidad conjunta en el MSDI que se encuentra en el mismo espacio de probabilidad que el SPI original y permite la comparación cruzada de diferentes índices de sequía. En la Tabla 6, se clasifican las condiciones climáticas del MSDI [2].

Tabla 6. Clasificación de la sequía para Índice de sequía estandarizado multivariado (MSDI)

Valor	Clasificación
Negativo (-)	Seca
Positivo (+)	Húmeda
Cero (0)	Normal

Fuente: [2]

3.2.23. R y RStudio

R es un sistema para análisis estadísticos y gráficos creado por Ross Ihaka y Robert Gentleman, tiene una naturaleza doble de programa y lenguaje de programación orientado a objetos [47]. RStudio es una interfaz gráfica que permite un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos, este incluye una consola, editor de sintaxis que apoya la ejecución de código, así como herramientas para el trazado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo [48].

3.2.24. Paquetes RStudio

- **Musica**

Proporciona funciones que permiten (1) fácil agregación de series temporales multivariadas en escalas temporales personalizadas, (2) comparación de resúmenes estadísticos entre diferentes conjuntos de datos en escalas temporales múltiples (p. ej., datos observados y corregidos por sesgo), (3) comparación de las relaciones entre variables y/o diferentes conjuntos de datos en escalas temporales múltiples (p. ej., correlación de precipitación y temperatura en control y simulación de escenarios) y (4) transformación de series temporales en escalas personalizadas [49].

- **SPEI**

Conjunto de funciones para calcular la evapotranspiración potencial y varios índices de sequía ampliamente utilizados [50]

- **ggplot2**

Crea visualizaciones de datos utilizando la gramática de gráficos [51].

- **IDFtool**

Calcula curvas de intensidad-duración-frecuencia por duración de tiempo específica y diferentes períodos de retorno. Las curvas de intensidad-duración-frecuencia se utilizan en hidrología para expresar de forma sintética, fijar un período de retorno (T) y una duración (d) de un evento de lluvia. IDFtool incluyó un análisis de incertidumbre en PDF y curvas IDF, por método bootstrap [52].

- **plyr**

Herramienta para dividir, aplicar y combinar datos [53].

3.3. MARCO CONCEPTUAL

3.3.1 Adaptación al Cambio Climático

Comprende el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos actuales o esperados o a sus efectos, con el fin de moderar perjuicios o explotar oportunidades beneficiosas. En el caso de los eventos hidrometeorológicos la Adaptación al Cambio Climático corresponde a la gestión del riesgo de desastres en la medida en que está encaminada a la reducción de la vulnerabilidad o al mejoramiento de la resiliencia en respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad [54].

3.3.2 Escorrentía

Es la parte de la precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes de una cuenca [55].

3.3.3. Efecto invernadero

Es el efecto natural que permite al planeta mantener las condiciones necesarias para mantener vida. La atmosfera captura algunos de los rayos del sol que llegan a la corteza terrestre manteniéndolos y conseguir una temperatura media de 15°C [56].

3.3.4. Forzamiento radiativo o climático

Es la perturbación del balance radiativo de la atmósfera terrestre entre la radiación solar incidente y la radiación infrarroja saliente y es expresado en vatios por metro cuadrado (W/m^2). El forzamiento radiativo permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía provocados por los cambios producidos [57].

3.3.5. Gestión del riesgo

Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones

tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible [54].

3.3.6. Humedad del suelo

Cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno [57].

3.3.7. Precipitación

Es la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo. La cantidad de precipitación es el volumen de agua lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado [56].

3.3.8. Sistema climático

Se define como una entidad compuesta por cinco componentes interactuantes entre sí (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) que, en conjunto, funcionan complejamente como un todo [58].

3.3.9. Variabilidad del clima

Se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos del clima como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, en todas las escalas temporales y espaciales [59].

3.3.10. Vulnerabilidad

Grado de susceptibilidad de un sistema, incluida la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática al que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad, y su capacidad de adaptación [59].

3.3.11. Unidad de Respuesta Hidrológica

Son las áreas homogéneas una cuenca en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas. URH está conformada usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son: pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), elevación (pues el volumen de precipitación varía con la altura), aspecto (especialmente en cuencas con nieve), tipo de suelo, cubierta vegetal, usos de suelo, etc. [60].

3.4. MARCO LEGAL

Para la formulación del presente proyecto de investigación fue considerado el siguiente marco normativo referente al Cambio Climático tanto a nivel internacional (Tabla 7) como nivel Colombia (Tabla 8).

Tabla 7. Acuerdos internacionales

Protocolo de Kioto 1997	El objetivo del Protocolo de Kioto fue reducir en un 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo, con relación a los niveles de 1990, durante el periodo 2008-2012. En él se asignaba a los países desarrollados metas de reducción de gases de efecto invernadero específicas. Sin embargo, con la Cumbre de Doha 2012 (COP 18), se prorrogó el Protocolo de Kioto estableciendo un nuevo periodo de compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero hasta el 31 de diciembre de 2020.
Acuerdo de Paris 2015	Este acuerdo fue adoptado durante la COP 21. Su objetivo es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo, presenta una meta global de mantener el incremento de la temperatura por debajo de 2 °C y hacer el mayor esfuerzo para no sobrepasar 1.5 °C. Establece que los países deberían conservar y aumentar sumideros de gases de efecto invernadero incluyendo: la capacidad de adaptación, fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático.

Tabla 8 Acuerdos Nacionales

Ley 164 de 1994	El congreso de Colombia reconoce Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que busca fortalecer conciencia pública a nivel global, de los problemas relacionados con el cambio climático. Tiene como objetivo principal lograr la estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, por actividad antropogénica, que pueda afectar el sistema climático y permita adaptar los ecosistemas, asegurando producción de alimentos y desarrollo económico. Se plasman diferentes compromisos que deben cumplir los 194 países adheridos a la convención, como: Facilitar a la conferencia de partes inventarios nacionales de emisiones antropogénicas. Actualizar regularmente los programas nacionales con las medidas de mitigación y adaptación al Cambio Climático, limitando sus emisiones.
Ley 1523 de 2012/ 2015	Se acepta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, donde se especifica que se deben articular políticas y acciones de adaptación al Cambio Climático por parte de las Corporaciones autónomas regionales.
Ley 1931 de 2018	Establece las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las entidades públicas y privadas; País, Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, y mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.

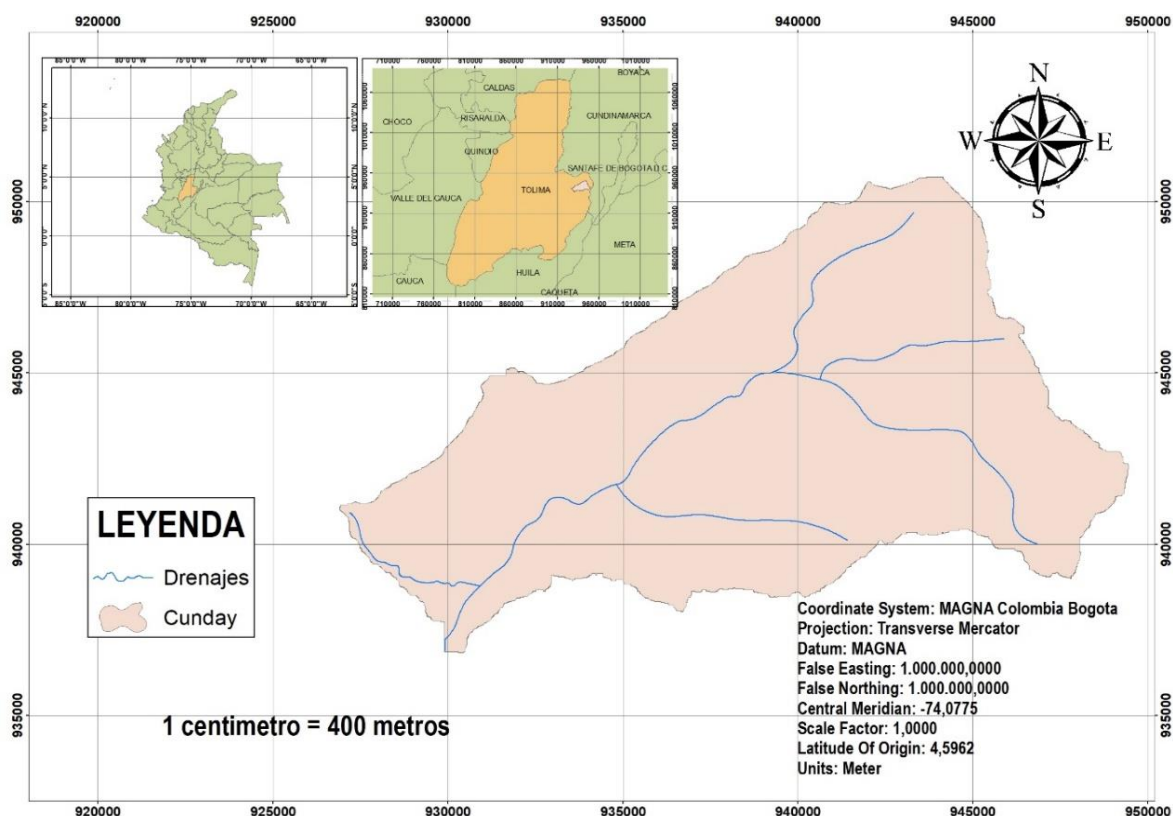
4. DESARROLLO DE LA PASANTÍA - CASO DE ESTUDIO

Como se indica en el objetivo general de este trabajo, se evaluó la amenaza por sequía en la cuenca del río Prado, tomando como caso de estudio la subcuenca Cunday, por ser uno de los municipios con mayor actividad agrícola en el Tolima, donde se encuentran cultivos semestrales de tomate, pepino cohombro, habichuela, maíz tradicional, frijol, lulo y cultivos permanentes de caña, panelera, cacao, café, plátano y banano bocadillo. Aunque existen otras áreas con grandes extensiones de tierra dedicada a la agricultura, como es el caso específico del distrito de riego AsoPrado localizado aguas abajo de la hidroeléctrica, no fue factible realizar la modelación hidrológica de esta área de la cuenca, no hay suficiente información de operación de esta estructura de regulación que afecta los caudales naturales del río Prado [61].

4.1. LOCALIZACIÓN

La subcuenca Cunday, se localiza en la parte norte central de la cuenca del río Prado en el departamento del Tolima, Colombia (ver Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), y limita con los municipios de Melgar, Carmen de Apicalá, Icononzo y Villarrica. Posee un área de 159,7 km², su elevación máxima es de 2.323 m.s.n.m. y mínima de 459 m.s.n.m. Esta diferencia altitudinal es recorrida por su cauce principal, el río Cunday, el cual tiene una longitud aproximada de 23.86 km. La temperatura media de esta subcuenca es de 25.5 °C y una precipitación promedio anual de 1.717 mm.

Figura 7. Localización subcuenca Cunday



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS – Base Cartográfica: MDE 12.5 m *12 .5 ALOS PALSAR (ALPSRP247700060, ALPSRP245220070 y ALPSRP245220060)

4.2. MORFOMETRÍA

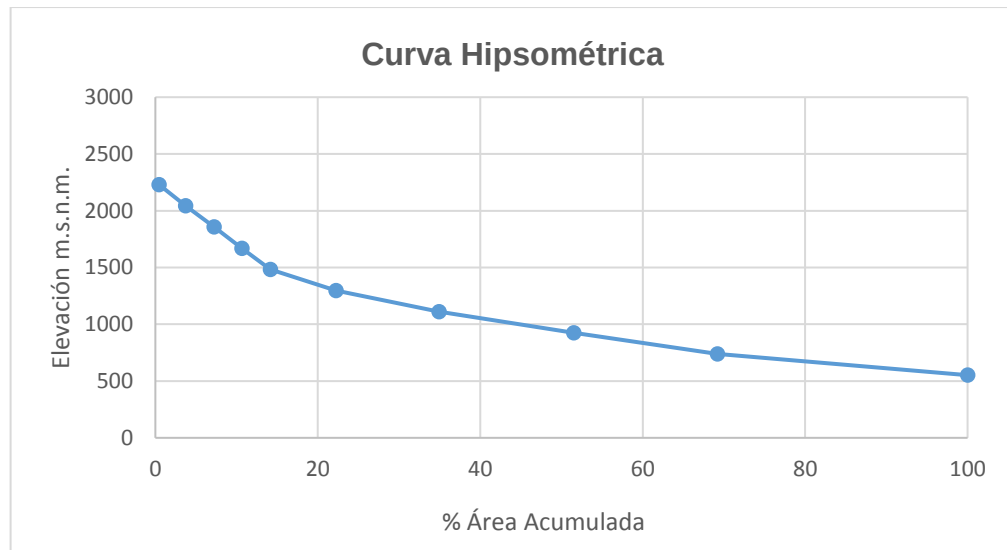
La subcuenca tiene una forma alargada lo cual indica baja susceptibilidad a la formación de crecientes. Por otro lado, el índice de compacidad la clasifica como cuenca oval oblonga a rectangular. Además, presenta una baja densidad en sus drenajes y de acuerdo con la pendiente media el tipo de relieve que predomina es fuertemente accidentado (Tabla 9). De acuerdo con la curva hipsométrica (Figura 8), indica que es un río antiguo y la dinámica de erosión es más estable.

Tabla 9. Parámetros morfométricos de la subcuenca Cunday

Parámetro Morfométrico	Unidad	Valor
Área	km ²	159.7
Perímetro	km	83.4
Longitud axial	km	18.8
Longitud cauce principal	km	23.86
Ancho promedio	km	6.69
Factor Forma	Adimensional	0.45
Índice de Compacidad	Adimensional	1.85
Número de orden	N/A	4
Longitud Drenajes	km	155.68
Densidad Drenajes	km ⁻¹	0.98
Pendiente media	%	25
Altitud máxima	m.s.n.m	459
Altitud media	m.s.n.m.	951
Altitud mínima	m.s.n.m.	2323

Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Curva Hipsométrica



Fuente: Elaboración propia

4.3. SUELOS

A partir del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Tolima, se identificaron 6 unidades cartográficas de suelo para la subcuenca (Figura 9), con suelos característicos de paisaje de montaña y texturas de suelo tipo arcilloso y limoso. La mayor parte del área la ocupa la unidad MQM con 57.70 km² equivalente al 36.13% del área total de Cunday, con un clima medio húmedo y muy húmedo. El relieve predominante es tipo lomas, pendientes de 12 – 25%, suelos bien drenados y de profundidad variable, fuertemente ácidos y de fertilidad baja [62].

En segundo lugar, se encuentra la unidad MVC con un área de 55.30 km², donde el relieve es moderadamente ondulado a escarpado, pendientes que varían desde 12 – 75%, clima cálido húmedo, suelos moderadamente profundos a profundos, bien drenados, ácidos y de baja fertilidad. El 19.69 % del área total en la zona la ocupa la UCS MVA caracterizada por presentar relieves quebrados a escarpados con pendientes ≥ 50 a 75%, su clima y suelos son iguales a la unidad anterior [62].

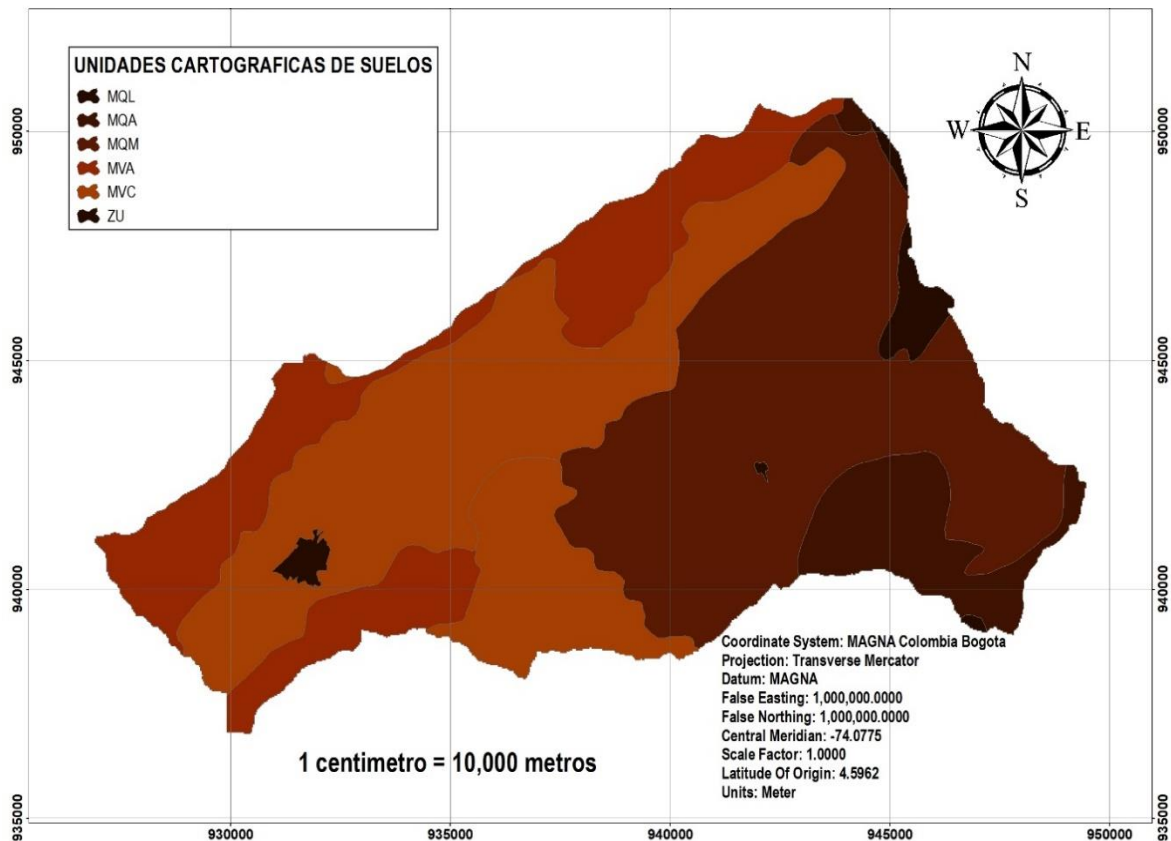
Finalmente, las tres unidades que menor área tienen son MQA, MQL y ZU, donde las dos primeras pertenecen a un clima medio húmedo y muy húmedo, con suelos poco profundos y profundos, bien drenados, y fertilidad moderada. A continuación, se presenta el área que ocupa cada unidad en km² dentro del área de estudio (**Anexo 1. Unidades Cartográficas del Suelo** Anexo 1) [62].

Tabla 10 Unidades cartográficas del suelo

Unidad Cartográfica de Suelo	Área (km²)	%Área
MQL	2.72	1.70
MQA	11.58	7.25
MQM	57.70	36.13
MVA	31.44	19.69
MVC	55.30	34.63
ZU	0.96	0.60

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Ubicación unidades cartográficas de suelos



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS – Base Cartográfica: Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Tolima

4.4. COBERTURAS DEL SUELO

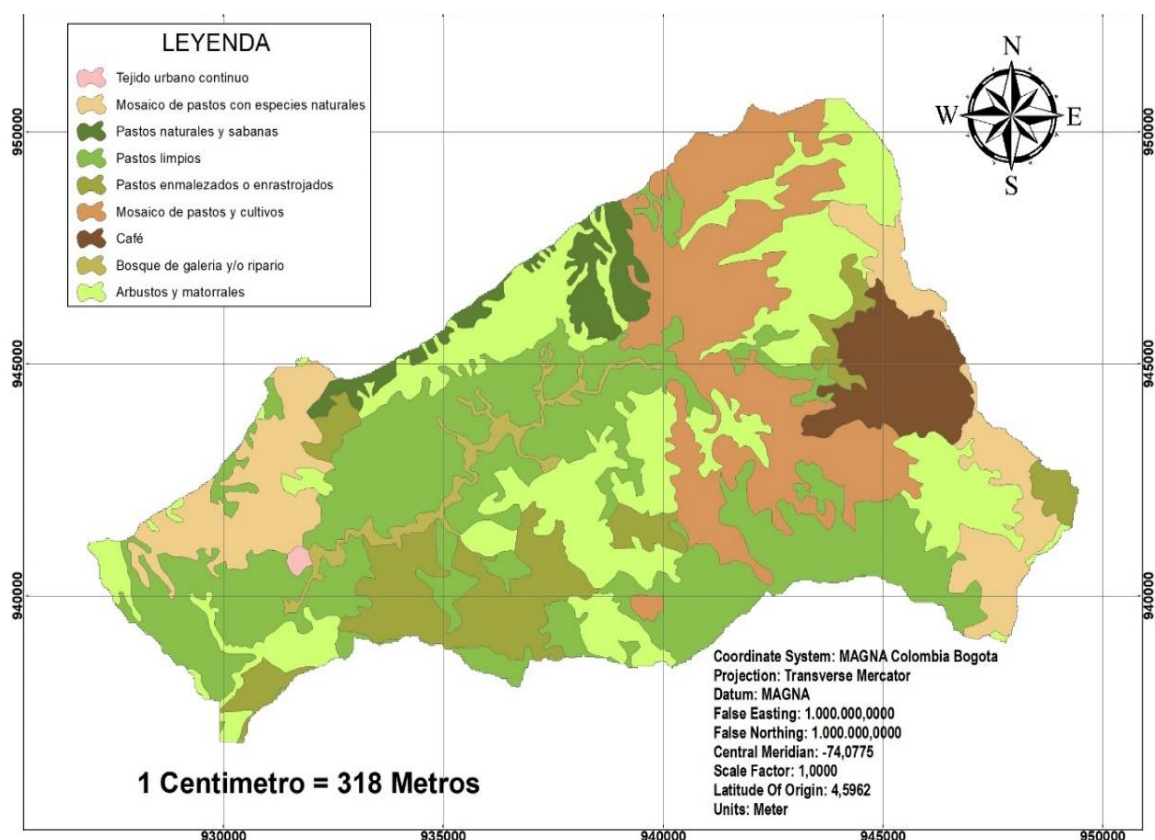
La distribución de cobertura de la tierra para la subcuenca Cunday, se observa en la Tabla , corresponde al estudio realizado para el plan de ordenación y manejo de la cuenca rio Prado [62]. Los resultados presentados están bajo la metodología Corine Land Cover en Colombia del IDEAM. En la siguiente tabla se muestra los nueve tipos de coberturas que se destacan para esta zona, el área y porcentaje ocupado dentro de la subcuenca.

Tabla 11. Distribución de cobertura de la tierra para subcuenca Cunday

Cobertura	Área (km ²)	%Área
Tejido urbano continuo	0.25	0.16
Mosaico de pastos con especies naturales	16.47	10.31
Pastos naturales y sabanas	5.02	3.14
Pastos limpios	48.30	30.24
Pastos enmalezados o enrastrojados	15.02	9.40
Mosaico de pastos y cultivos	26.62	16.67
Café	7.76	4.86
Bosque de galería y/o ripario	3.16	1.98
Arbustos y matorrales	37.10	23.23

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Distribución de las principales coberturas en la subcuenca Cunday



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS – Base Cartográfica: POMCA Río Prado [62]

4.5. CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

Las características hidroclimatológicas de la subcuenca Cunday, se analizaron teniendo en cuenta las variables: precipitación, temperatura, velocidad del viento, caudal y radiación solar, con registros históricos desde 1981 a 2012 (Tabla).

Tabla 12. Variables hidroclimatológicas

Variable	Fuente
Precipitación	Proyecto de investigación internacional earth2Observe
Temperatura	Interpolación IDW a partir de seis estaciones del IDEAM
Velocidad del viento	Repositorio Giovanni desarrollado por la NASA (datos de reanálisis)
Caudal observado	Estación Pte Cunday – 21167050 (IDEAM)
Radiación solar	Repositorio Giovanni desarrollado por la NASA (datos de reanálisis)

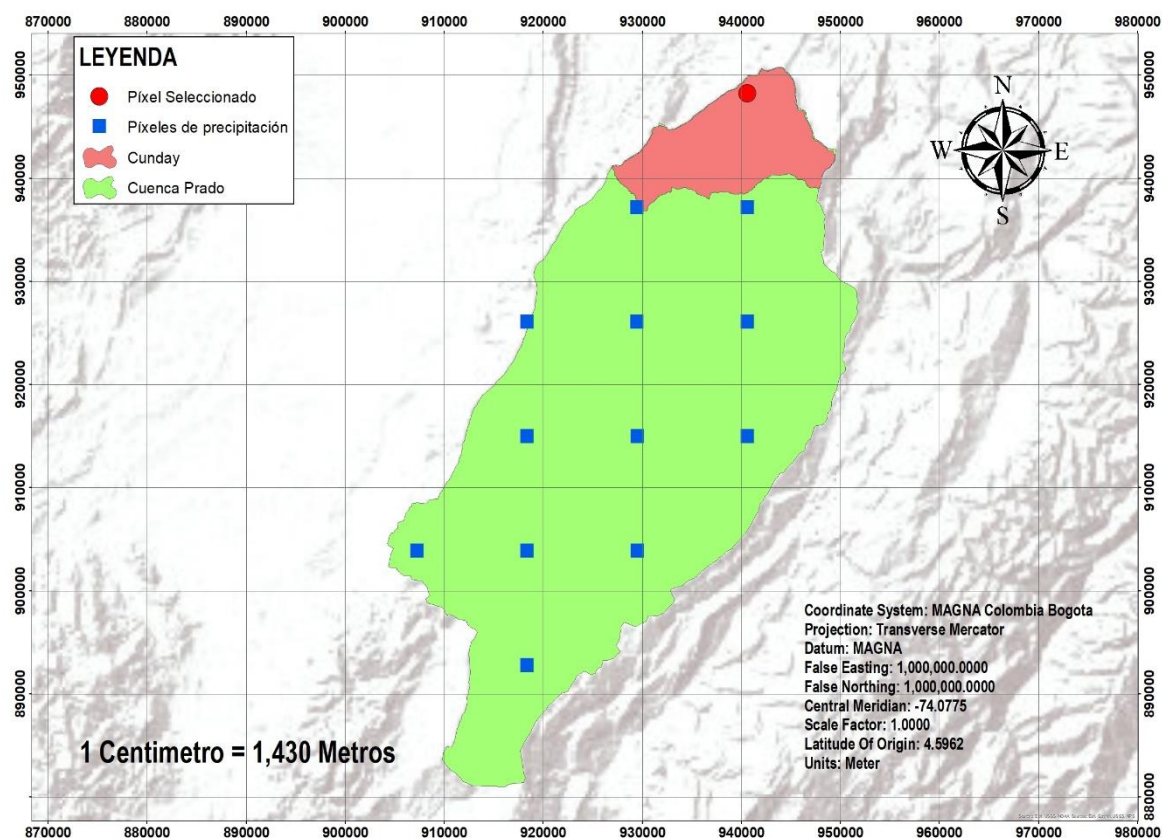
Fuente: Elaboración propia

4.5.1. Precipitación

La precipitación distribuida corresponde a un campo de precipitación diaria con una resolución espacial de 0.1° a 10 km x 10 km, obtenido del reanálisis hidrometereológico del proyecto de investigación internacional Earth2Observe, realizado en la MCMB, para interpolar la precipitación utilizaron el método KED, y MDE como una covariable. [63].

Estos datos de reanálisis son útiles en la gestión de los recursos hídricos, particularmente en las cuencas de los ríos donde la disponibilidad de datos es pobre o existe un limitada número de estaciones [63]. Los centroides de las celdas del campo de precipitación fueron usados como estaciones virtuales en la modelación hidrológica con SWAT, su distribución se puede ver en la **Figura 11**. Por otra parte, es importante señalar que el pixel de color rojo, fue seleccionado para realizar la caracterización de la precipitación durante el periodo mencionado.

Figura 11. Ubicación de píxeles del producto de precipitación del proyecto Earth2Observe en la cuenca del río Prado



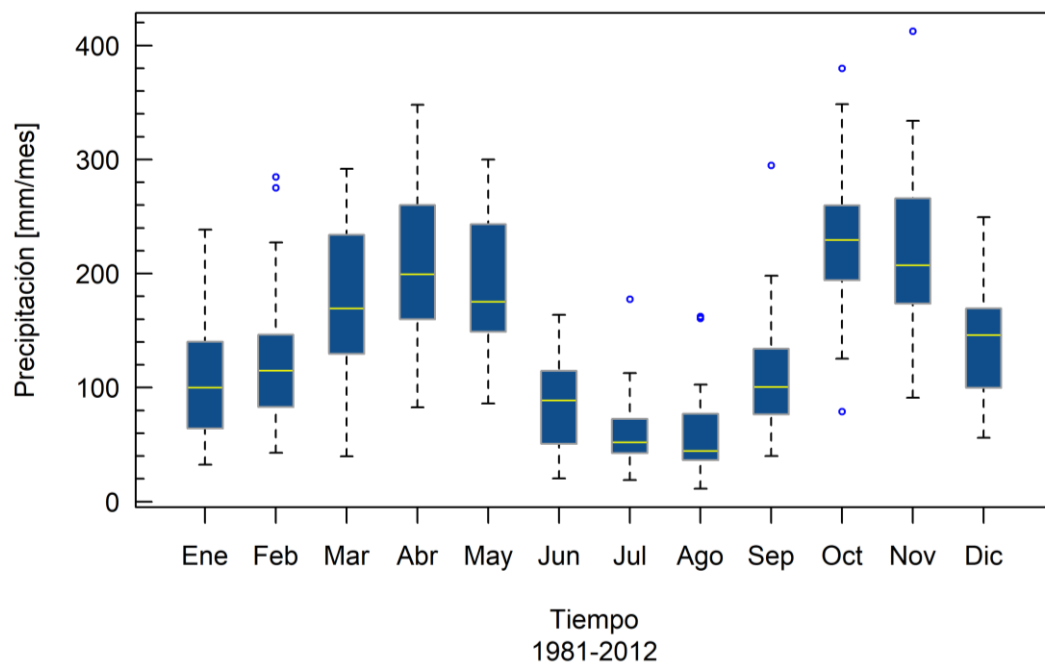
Fuente: Elaboración propia- ArcGIS - Base Cartográfica: MDE 12.5 m *12 .5 ALOS PALSAR (ALPSRP247700060, ALPSRP245220070 y ALPSRP245220060)

En el diagrama de boxplot de la Figura 12, se presentan los promedios mensuales multianuales, se observa el régimen de precipitación con dos periodos secos y húmedos y la variabilidad intraanual para el periodo 1981–2012. Los meses de diciembre a febrero y junio a agosto predomina una condición seca con valores promedios que oscilan entre 80mm y 145mm; mientras que en los meses de abril y octubre se presentan altas precipitaciones con un valor de 343 mm.

En el mes de octubre se presenta un valor atípico mayor de 379 mm, debido al fenómeno de La Niña-Oscilación del Sur (ENOS) del año 1997, 1999 y 2005 (ver anexo 6) con valores atípicos en los meses: febrero (284 mm), julio (177 mm), agosto (162 mm), septiembre (294 mm), y noviembre (454 mm), en especial entre el segundo semestre de 1998 a 2001.

Según el píxel seleccionado 1819, se observa que en los periodos húmedos hay picos de precipitación máximos entre 380 a 454 mm, por otra parte, en los meses secos los picos máximos se encuentran entre 100 a 160 mm.

Figura 12. Boxplot de la precipitación media mensual multianual en la subcuenca Cunday



Fuente: Elaboración propia- RStudio

4.5.2. Temperatura

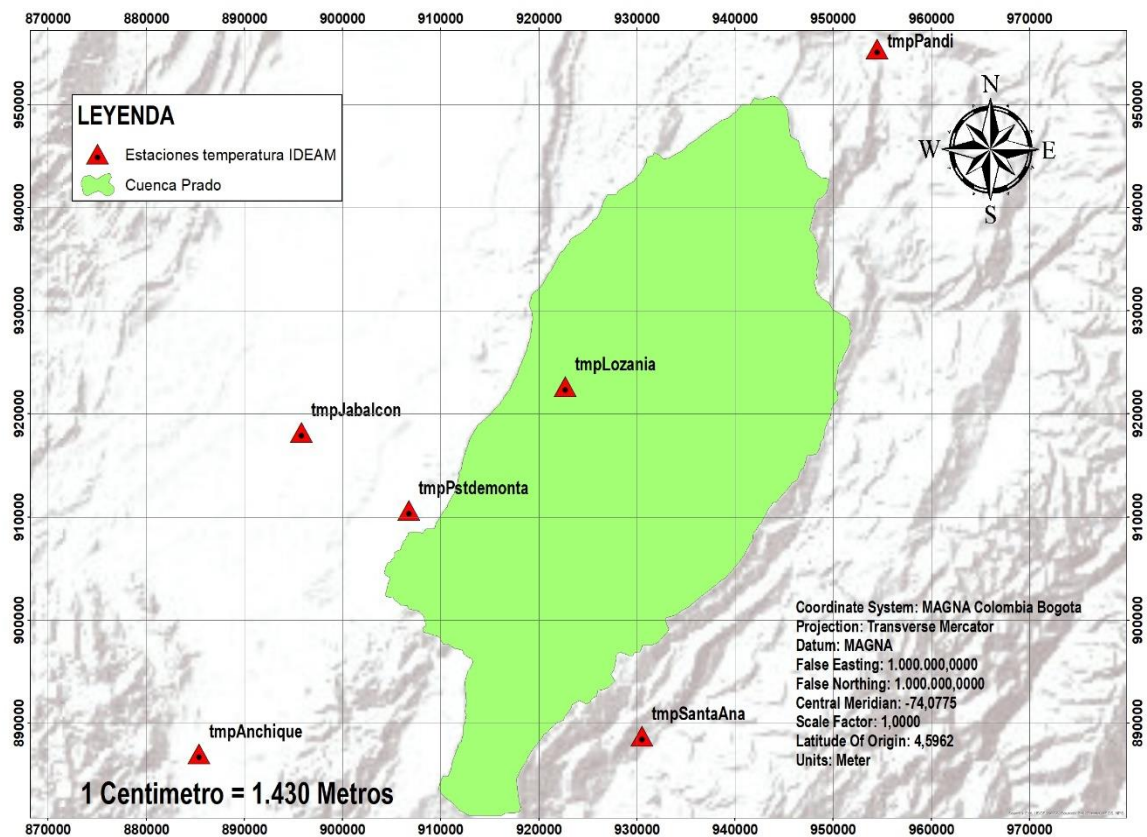
Dentro y fuera de la cuenca del río Prado existe una deficiencia en el número de estaciones meteorológicas donde se mide temperatura del aire y las existentes, en su mayoría, tienen un registro corto o con un alto porcentaje de altos faltantes de esta variable. Por esta razón fueron seleccionadas las estaciones con un porcentaje inferior al 3 % de datos faltantes para realizar una interpolación espacial que será explicada a continuación.

4.5.3. Interpolación de temperatura

Este procedimiento inició completando los registros de las seis estaciones del IDEAM (Figura 13) para la serie de tiempo de (1976-2012) a partir del estudio de Regionalización de la temperatura del aire en Colombia por Cenicafé [64], el cual plantea la distribución de las temperaturas del aire en el país a través de conceptos como macroclima, mesoclima y técnicas estadísticas de agrupación. La combinación de todo esto generó como resultado agrupar cuatro grandes regiones, para las cuales se determinó expresiones de cálculo de temperatura máxima, media

y mínima, en función de la altitud. Con base en las expresiones desarrolladas por Cenicafé se rellenaron los datos faltantes de temperatura en función de la altitud de cada una de estaciones seleccionadas. Posteriormente, con ayuda del programa RStudio se interpoló espacialmente la temperatura a través del método IDW, con un valor de potencia de dos (2). De los campos de interpolación generados a escala mensual fueron obtenidas las series de tiempo de temperatura para las localizaciones correspondientes a los centroides de los pixeles (estación virtual) del producto de precipitación del proyecto Earth2Observe.

Figura 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas del IDEAM empleadas en la interpolación espacial de la temperatura del aire

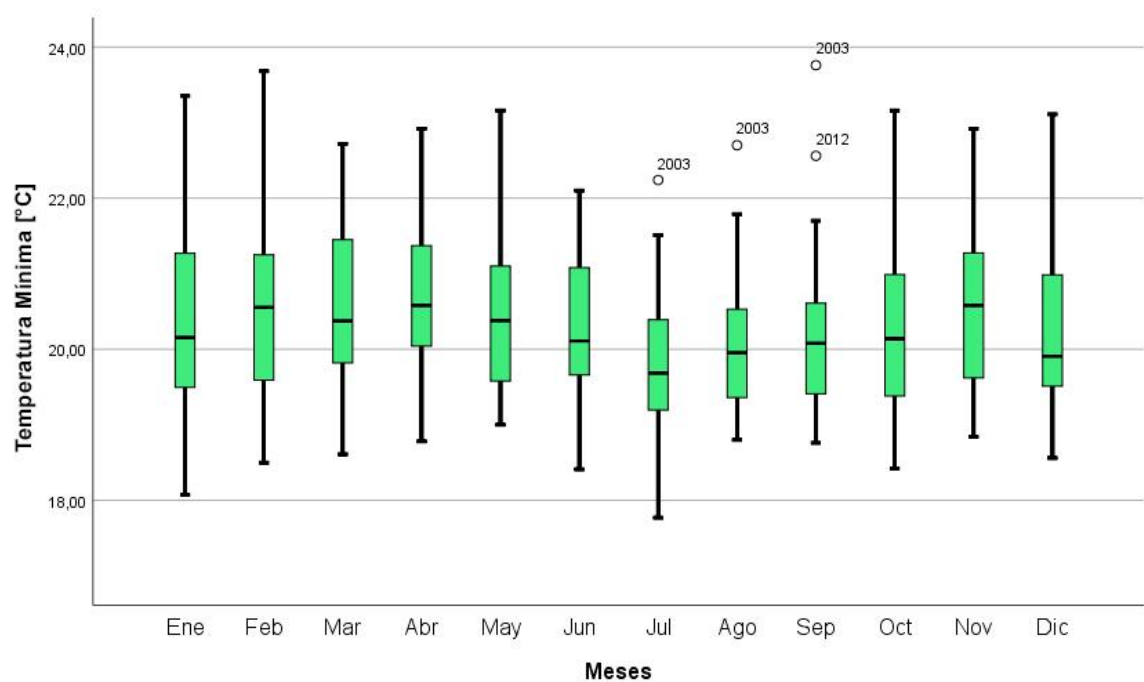


Fuente: Elaboración propia- ArcGIS - Base Cartográfica: MDE 12.5 m *12.5 ALOS PALSAR (ALPSRP247700060, ALPSRP245220070 y ALPSRP245220060)

La caracterización mensual de la temperatura del aire se realizó para el mismo píxel o estación virtual seleccionada en el caso de la precipitación. En la Figura 14, se presenta la distribución de la temperatura mínima mensual multianual de Cunday, la cual mantuvo un comportamiento variable, en los primero cinco meses del año se presentan temperaturas que oscilan entre 22.5 a 24 °C. A partir de junio se presentan temperaturas que varían entre 21.5 a 22°C una altitud de 951 m.s.n.m.

La posición de la mediana indica una distribución asimétrica en la temperatura. El valor máximo de la temperatura mínima es de 23.8 °C se presenta en el mes de febrero, por otra parte, la temperatura mínima se presenta en los meses de junio a septiembre con temperaturas que oscilan entre 17.8 a 19°C. En el año 2003 se presentaron datos atípicos mayores en los meses de julio (22.2°C), agosto (22.5°C) y septiembre (23.8°C).

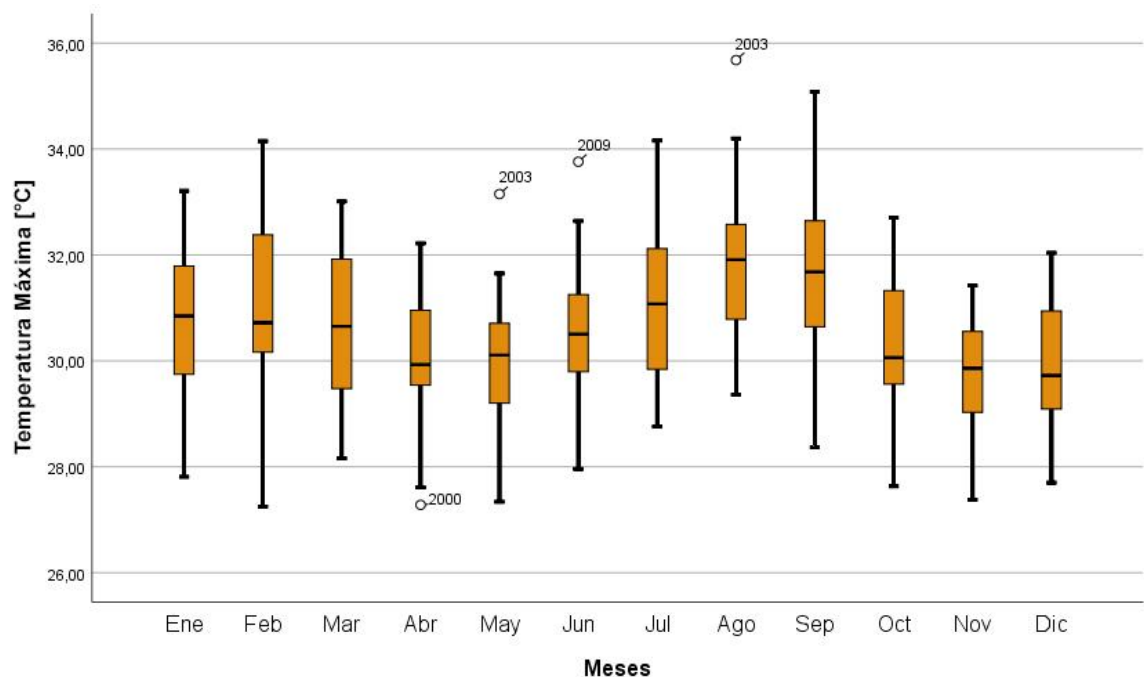
Figura 14. Boxplot de la temperatura mínima mensual multianual en la subcuenca Cunday



Fuente: Elaboración propia- SPSS

En la Figura 15, se presenta la distribución de la temperatura máxima multianual de Cunday, la cual mantuvo un comportamiento variable. La posición de la mediana indica una distribución asimétrica, el valor máximo de temperatura oscila entre 27°C a 35 °C. En los meses de febrero, junio a julio con un valor de 34°C, y septiembre con una temperatura que alcanza los 35°C. Se manifestaron 2 años con valores atípicos positivos en el año 2003 en el mes de mayo (33.2°C) y agosto (35.8°C) y en junio del año 2009 con un valor de 33.8°C. Para el año 2000 se presentó en el mes de abril un valor atípico menor de 27.5 °C.

Figura 15. Boxplot de la temperatura máxima mensual multianual en la subcuenca Cunday



Fuente: Elaboración propia- SPSS

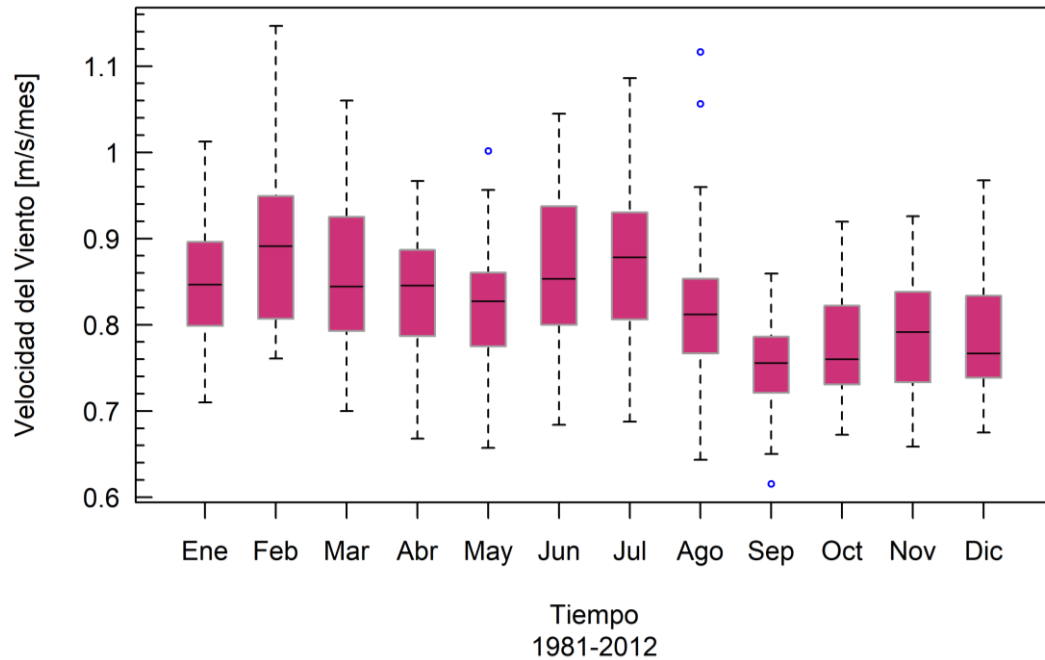
4.5.4. Velocidad del viento

De acuerdo con la Figura 16, se observan los valores medios mensuales multianuales de la velocidad del viento. Los vientos máximos se presentan en los meses de febrero con un recorrido promedio de 1.08 m/s (equivale 3.88 km/h) sobre dirección sureste (SE) y en julio a 1.14 m/s (equivale 4.10 km/h) con dirección este (E), mientras que los vientos mínimos se presentan principalmente en el segundo semestre del año de acuerdo con la mediana de los boxplot, con un recorrido promedio entre 0.62 m/s a 0.66 m/s (equivale 2.23 a 2.37 km/h), predominando sobre la dirección sureste y llegan a mantenerse en un periodo significativo durante el año. Los meses con mayor variabilidad de los vientos fueron febrero a marzo y junio a julio con velocidades de 1.04 a 1.14 m/s , (equivale 3.74 km/h a 4.10 km/h).

Por otra parte, los meses con velocidades homogéneas fueron de abril a mayo y octubre a noviembre con velocidades que varían entre 0.92 a 0.96 m/s , (equivale 3.31 km/h a 3.45 km/h). Los vientos se caracterizaron de acuerdo con la clasificación internacional de la velocidad del viento- Escala de Beaufort, la subcuenca Cunday se encuentra en el rango de brisa suave (1.5 km/h) [65].

Dado que el territorio del Tolima está ubicado entre la cordillera central y Oriental de los Andes, su clasificación climática es variada. Los valores altos de viento en los meses de febrero y junio al mes de agosto, se encuentra relacionado con los valores bajos de lluvia, para esos mismos meses, este comportamiento bimodal está asociado al doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los vientos alisios y la altitud sobre el nivel del mar [66].

Figura 16. Boxplot de velocidad del viento media mensual multianual en la subcuenca del río Cunday

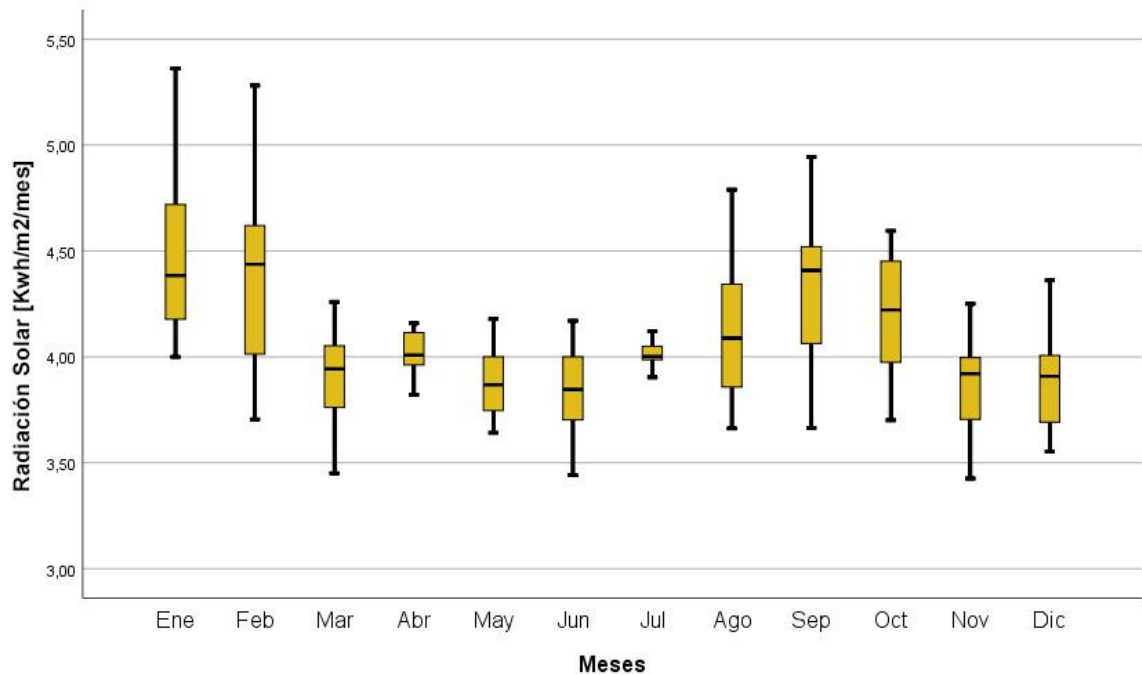


Fuente: Elaboración propia- RStudio

4.5.5. Radiación solar

En la Figura 17, se observa el boxplot de radiación solar de los valores mensuales multianuales. Los valores máximos de irradiación se presentan en los meses de enero a febrero (5.36 a 5.2 kwh/m^2) y de agosto a septiembre (4.94 a 5.22 kwh/m^2). Por otra parte, los meses con menor irradiación se presentan en marzo, junio, y noviembre con valores que oscilan entre 3.12 a 3.45 kwh/m^2 . La radiación promedio que se presenta en la subcuenca de Cunday es de 4.02 kwh/m^2 .

Figura 17. Boxplot de radiación solar media mensual multianual en subcuenca del río Cunday



Fuente: Elaboración propia-SPSS

4.5.6. Caudal

De la serie de caudales mensuales multianuales, que se presenta en la Figura 18, del periodo de estudio 1981-2012 para la estación Pte. Cunday, se obtiene un caudal promedio de $4.21 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el mes de agosto se presentan los caudales más bajos con un valor de $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, por otra parte, el mayor pico se presenta en el mes de noviembre con un valor aproximado de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 18. Serie de caudales mensuales multianuales de la estación Pte. Cunday



Fuente: Elaboración propia- SPSS

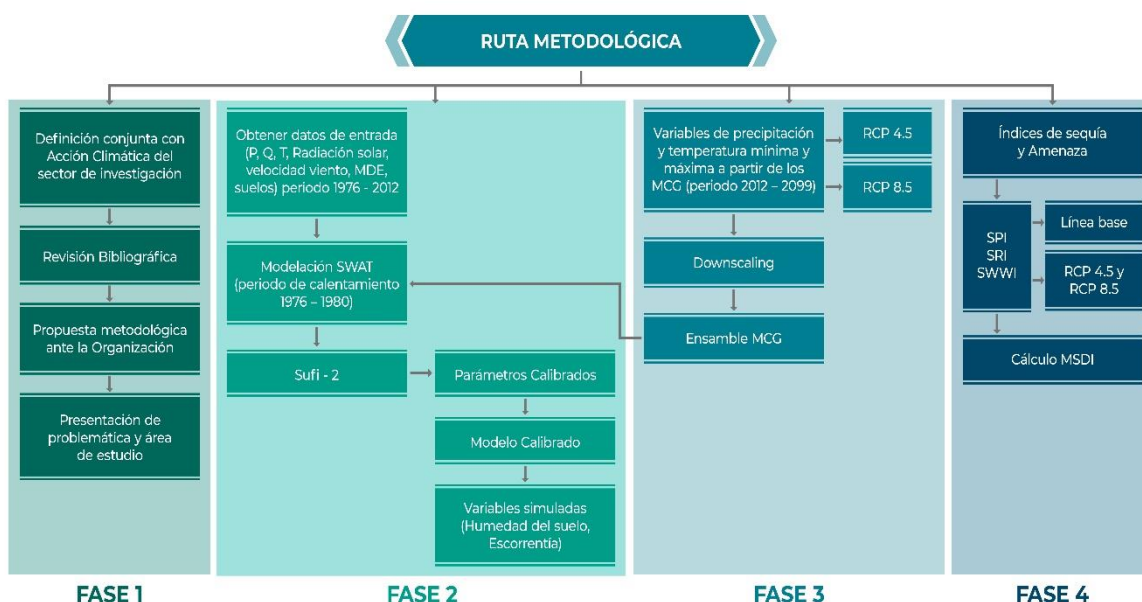
4.6. DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO

La demanda hídrica corresponde a la cantidad de agua que es utilizada por cada sector y población en la subcuenca. De acuerdo con el esquema de ordenamiento territorial de la Alcaldía Municipal Cunday, el sector con mayor demanda de agua es el sector agrícola con $0.05672 \text{ m}^3/\text{s}$ los cuales son utilizados por los cultivos de café, frutales, tomate, pepino cohombro, habichuela, entre otros. El segundo lugar lo ocupa la demanda doméstica con valores de $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.27 \text{ m}^3/\text{s}$ en zonas rurales y urbanas respectivamente, de acuerdo con proyecciones del DANE 2018, se estimó para el presente año que la población rural sea de 6.006 habitantes y para cabeceras de 2.366 habitantes. Finalmente, la demanda del sector pecuario es de $0.005143 \text{ m}^3/\text{s}$ [61].

4.7 RUTA METODOLÓGICA

El desarrollo del presente estudio se divide en cuatro fases, tienen como fin dar el cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos inicialmente. Los resultados de la calibración en el modelo SWAT se realizaron para la cuenca del río Prado Tolima, sin embargo, los resultados se aplicarán únicamente para la subcuenca Cunday. A continuación, en la Figura 19, se presenta el diagrama de flujo que resume la ruta para obtener los resultados.

Figura 19. Fases Metodología



Fuente: Elaboración propia

4.7.1. Datos climáticos de los Modelos de Circulación

Para realizar la modelación hidrológica de los escenarios de cambio climático en la subcuenca Cunday es necesario obtener predicciones de las variables precipitación y temperatura mínima y máxima resultantes de los MCG. Esta información fue obtenida por medio de una aplicación en internet del instituto 2W2E <https://www.2w2e.com/home/CIMP>, los cuales están respaldados por ISI-MIP estas bases de datos incorporan cinco MCG y cuatro trayectorias de concentración representativas (Tabla). La resolución espacial de esta información es de 0.5° y cubre período de tiempo 1950 – 2099 a escala diaria. En la plataforma web lo primero que se debe hacer es establecer las coordenadas del área de estudio, posteriormente, seleccionar el modelo o los MCG junto con los escenarios y variables deseadas. Para el presente estudio se definió el área de acuerdo con las coordenadas Latitud 3.5 a 4.3 y Longitud -75 a -74.4, y fueron seleccionados los RCP 4.5 y 8.5 para los cinco modelos que aparecen en la Tabla.

Las dos trayectorias se eligieron por ser el RCP 4.5 un escenario de estabilización de gases de efecto invernadero, donde la temperatura muy probablemente excede los 2°C y el RCP 8.5, un escenario pesimista, es decir, supuestos de alta población, crecimiento relativamente de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética, llevando a largo plazo la alta demanda de energía y a las emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas climáticas [67].

Tabla 13. Modelos de Circulación y escenarios

Modelos	Escenarios	Instituto
GFDL-ESM2M	RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM2-ES	RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	Met Office Hadley Center
IPSL-CM5A-LR	RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	L'Institute Pierre-Simon Laplace
MIROC	RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	AORI, NIES and JAMSTEC
NoerESM1-M	RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	Norwegian Climate Center
CRU	Historical	Climate Research Unit East Anglia

Fuente: [4]

4.7.2. Reducción de escala de las variables

Los datos derivados de los cinco MCG y los dos escenarios seleccionados pueden estar sujetos a sesgos sistemáticos, para corregir estos errores se utilizó el método de mapeo cuantil estándar (QM), que además incluye el componente de reducción de escala de manera implícita.

Este proceso se llevó a cabo por medio de un script en el programa RStudio, que incluye el paquete *música* (ver ítem 3.22.1). Los insumos necesarios para realizar este proceso fueron los datos históricos (1981–2012) de las variables de precipitación (Earth2Observe), temperatura interpolada y agregada, y los datos de los escenarios climáticos de los MCG, a escala diaria. Como resultado de la reducción de escala, se obtuvieron series de tiempo (años 2012-2099) de precipitación y temperatura para cada una de las estaciones virtuales que aparecen en la **Figura 25**. Este proceso se ejecutó para uno de los escenarios seleccionados y por cada MCG.

4.7.3. Ensamble de los Modelos Climáticos Globales

Los recursos humanos y computacionales suponen una restricción en el tamaño del subconjunto de MCG utilizados en una evaluación de impacto del cambio climático [68]. Además, los resultados de la reducción de escala representan un posible

estado del sistema en el futuro. Al respecto, Sa'adi [69] y Salman [70] evidenciaron que un ensamble (un conjunto) de MCG seleccionados teniendo en cuenta sus habilidades para reproducir las características climáticas observadas en el pasado puede reducir las incertidumbres asociadas a los MCG en la evaluación del impacto del cambio climático.

En ese sentido se procedió a ejecutar un ensamble de los resultados generados del proceso de reducción de escala, que básicamente se deriva de realizar una media aritmética por cada dato diario de cada variable y escenario, como se muestra en la Ecuación 4.

Ecuación 4. Ensamble MCG

$$\text{Ensamble } (PP \text{ ó } T^{\circ})(RCP \text{ 4.5 ó 8.5}) = \frac{x1 + x2 + x3 + x4 + x5}{5}$$

Fuente: Elaboración Propia

Donde, X_i representa el valor de la precipitación o temperatura (máximo o mínimo) a nivel diario de cada uno de los MCG. En el Anexo 2, se muestran cada una de las variables climáticas a escala mensual multianual comparando cada uno de los modelos de circulación global y el respectivo ensamble.

4.7.4. Modelación Hidrológica en SWAT

La modelación se realizó usando la extensión ArcSWAT para ArcGIS, una interfaz gráfica para el modelo SWAT 2012. Se configuró el modelo para la cuenca del río Prado Tolima, definiendo el periodo de análisis desde el año 1976 a 2012. De esta serie de tiempo fueron seleccionados los cinco primeros años como el periodo de calentamiento para que alcance un estado estable a partir del año 1981 donde empieza la línea base del presente estudio. Por otra parte, el modelo fue calibrado y validado (ver numeral 3.2.12), con el objetivo de obtener las series de tiempo futuras de escorrentía y humedad del suelo de la subcuenca a una escala mensual.

Figura 20. Variables de entrada y salida modelo SWAT

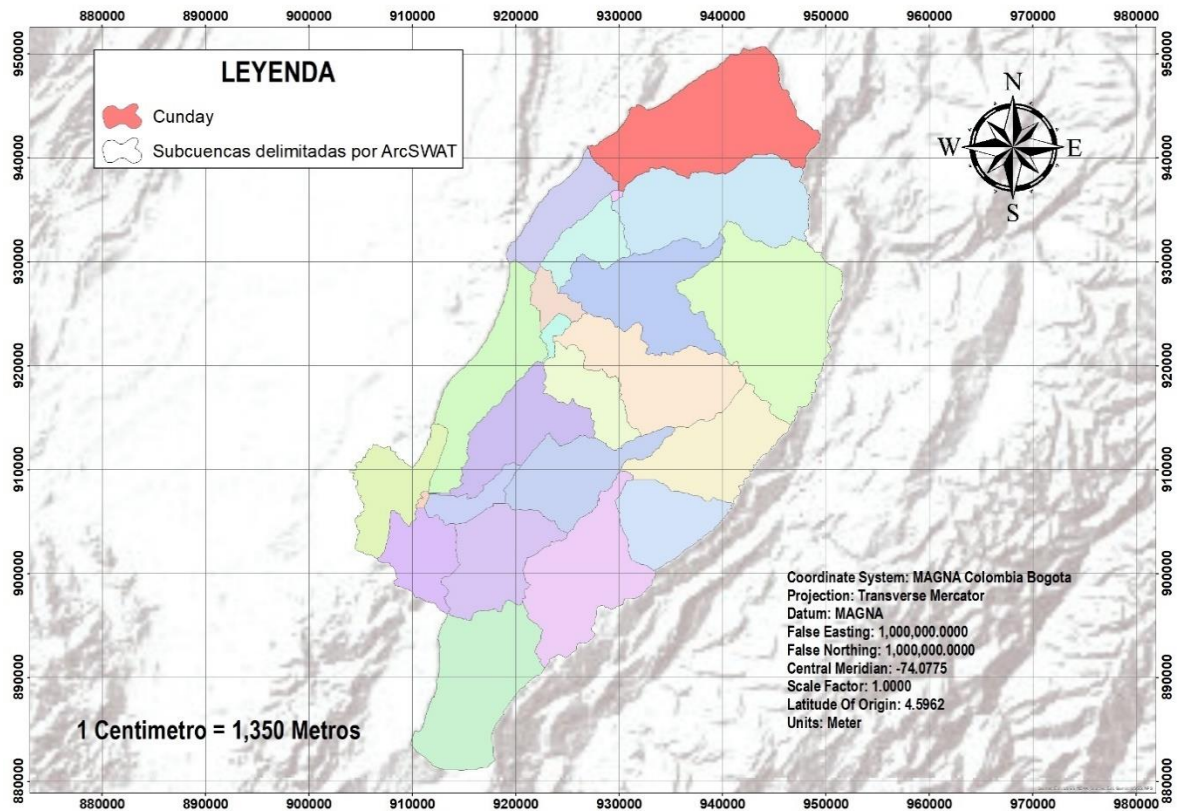


Fuente: Elaboración propia- ArcGIS - Base Cartográfica: MDE 12.5 m *12 .5
ALOS PALSAR (ALPSRP247700060, ALPSRP245220070 y
ALPSRP245220060)

Los datos que se introdujeron al modelo SWAT hacen parte de la tesis de maestría en recursos hidráulicos del Ingeniero Jeffer Cañón de la Universidad Nacional de Colombia [33], los cuales fueron: modelo digital de elevación, mapa de cobertura vegetal derivado del POMCA del río Prado, mapa de textura de suelos proporcionado a partir de la información del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Tolima del IGAC y variables climatológicas en una serie de tiempo de 1976-2012 a una escala diaria (diferentes a precipitación y temperatura máxima y mínima). Es importante resaltar que, en la tesis de maestría mencionada, se realizó un análisis profundo y amplio del modelo hidrológico de la cuenca del río Prado, donde se consideraron más puntos de control (estaciones limnimétricas) y que el énfasis de esa modelación fue aportar a la conformación ensambles hidrológicos.

A continuación, se describen las etapas que se desarrollaron para la modelación de la cuenca del río Prado en el modelo SWAT.

Figura 21. Subcuencas delimitadas por ArcSWAT



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS

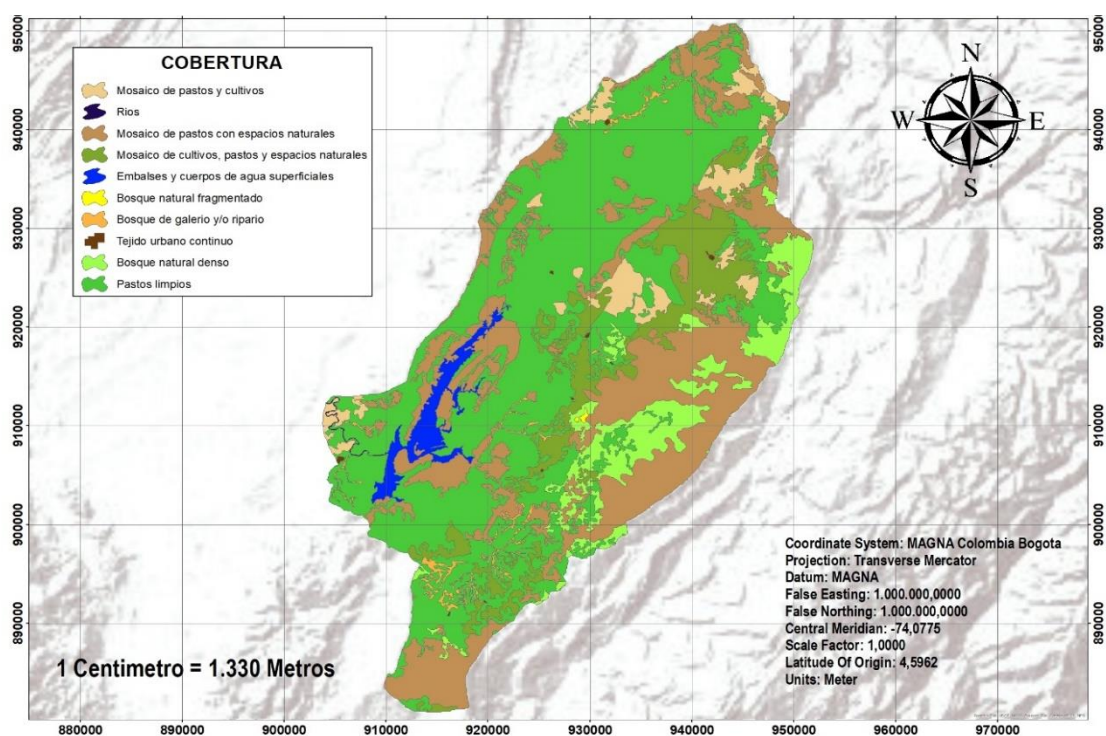
4.7.4.1. Etapa I

La primera etapa corresponde a la delimitación de la cuenca, donde se procede a cargar el MDE de la cuenca Prado, con una resolución de 12.5 m x 12.5 m de acceso abierto ALOS PALSAR (ALPSRP247700060, ALPSRP245220070 y ALPSRP245220060) captada el 18 de septiembre de 2010 [33], para generar la red de drenajes y las subcuencas. Como resultado del procesamiento del MDE se obtuvieron un total de 24 subcuencas como aparece en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y donde resalta la subcuenca Cunday.

4.7.4.2. Etapa II

Se definen las URH, para este proceso es necesario cargar los mapas de cobertura de la tierra (Figura 22) y suelos (Figura 23). Sin embargo, estos datos tienen que ser reclasificados dentro de los tipos que SWAT maneja internamente, así que es necesario crear una tabla, con los códigos correspondientes como se indica en las Tabla 14. Códigos de SWAT para la clasificación de las coberturas del suelo y Tabla

Figura 22. Cobertura de la tierra río Prado



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS – Base Cartográfica: POMCA Río Prado [62]

Tabla 14. Códigos de SWAT para la clasificación de las coberturas del suelo

Código SWAT	Descripción mapa
FRSD	Bosque Natural Fragmentado
URHD	Tejido urbano continuo
AGRL	Mosaico de pastos y cultivos
PAST	Pastos limpios
AGRR	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
FESC	Bosque natural denso
WETL	Ríos
WETF	Bosque de galería y/o ripario
RNGE	Mosaico de pastos con espacios naturales
WATR	Embalses de agua y cuerpos artificiales

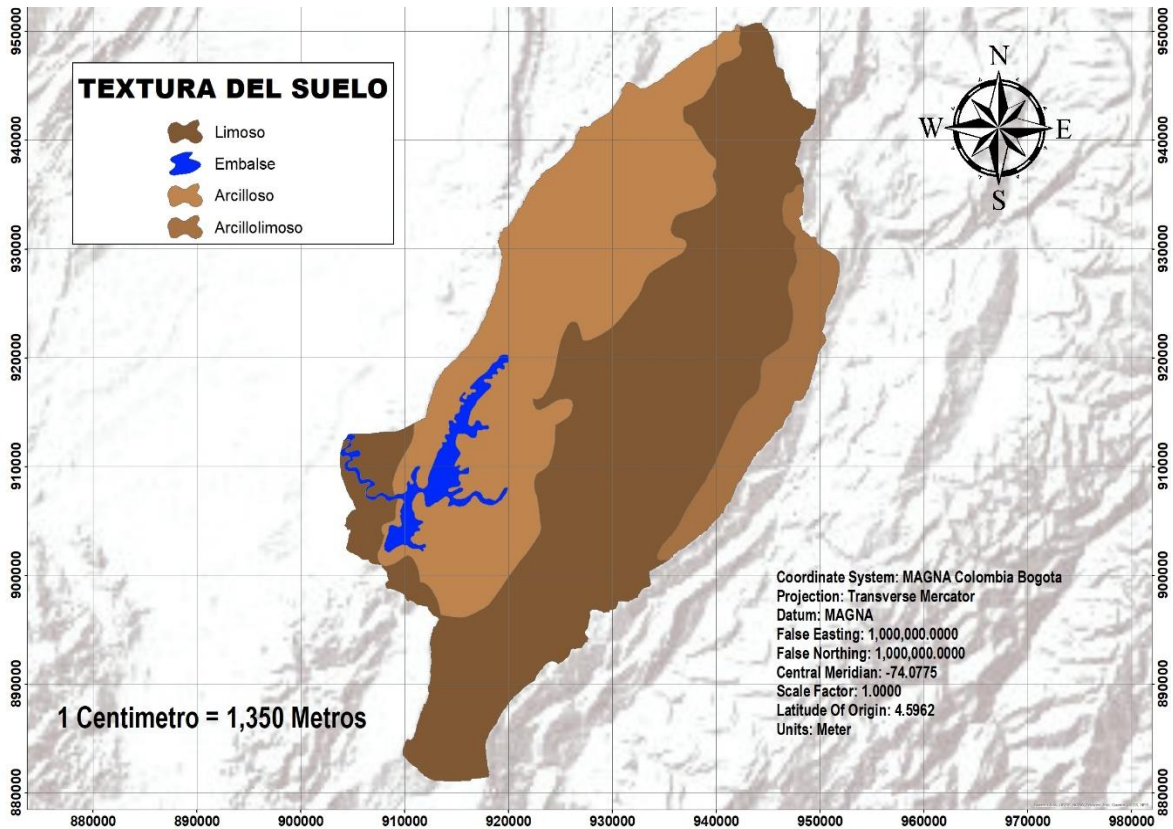
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Códigos SWAT – Textura del suelo

Código SWAT	Descripción mapa
FARMINGTON	Arcilloso
LIVINGSTON	Arcillolimoso
WATER	Embalse
QUONSET	Limoso

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Texturas de suelos en cuenca del río Prado



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS – Base Cartográfica: Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento del Tolima

Posteriormente, se debe clasificar las pendientes, de acuerdo a los rangos deseados. Para el modelo de la cuenca del río Prado, se establecieron tres categorías de pendientes: 0-10%, 10-20%, 20%- 100%, que fueron el último insumo para 493 URH con áreas desde 0,0009 a 26,62 km².

4.7.4.3. Etapa III

Las series de tiempo diarias de las siguientes variables climatológicas fueron incorporadas a SWAT: radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, predefinidas por Cañón [33], mientras que precipitación, temperatura máxima y mínima fueron definidas en este trabajo de grado. Para añadir estos datos en el modelo se debe crear dos tipos de archivos de texto, por cada una de las variables, el primero de ellos debe contener información asociada a las estaciones o puntos de medición como: nombre, coordenadas y elevación (**Figura 24**, imagen derecha). El otro tipo de archivo se crea con toda la serie de registros para cada estación

(Figura 24, imagen izquierda). La distribución de las estaciones y píxeles se puede observar en el mapa (Figura 25).

Figura 24. Estructura de los archivos necesarios para incorporar la información meteorológica en SWAT

estaciones_pcp.txt: Bloc de notas

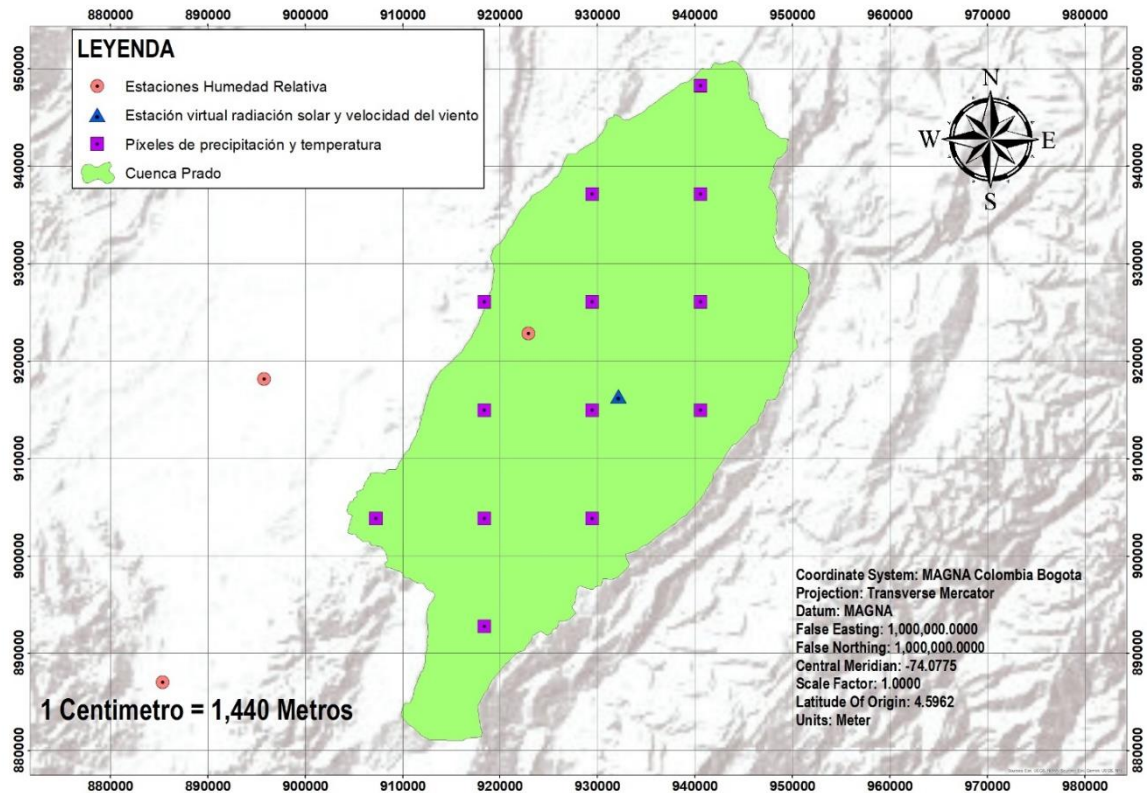
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
ID,NAME,LAT, LONG,ELEVATION				
1,1819p,4.12826,-74.6125,879				
2,1840p,4.02779,-74.7125,443				
3,1841p,4.02786,-74.6125,928				
4,1861p,3.9273,-74.8123,838				
5,1862p,3.92738,-74.7124,719				
6,1863p,3.92745,-74.6124,908				
7,1882p,3.8269,-74.8123,476				
8,1883p,3.82698,-74.7123,1197				
9,1884p,3.82705,-74.6123,2168				
10,1901p,3.72641,-74.9121,462				
11,1902p,3.7265,-74.8122,593				
12,1903p,3.72658,-74.7122,1553				
13,1922p,3.6261,-74.8121,1167				

 1819p.txt: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
19760101				
0				
0.665				
2.154				
3.463				
8.272				
2.738				
0				
13.907				
4.351				
0				
0				
0				
0.28				
0.15				
0				
4.63				
0.43				
5.617				
0				
0.475				
8.622				
17.243				

Fuente: [33]

Figura 25. Distribución de estaciones y píxeles



Fuente: Elaboración propia- ArcGIS - Base Cartográfica: MDE 12.5 m *12 .5 ALOS PALSAR (ALPSRP247700060, ALPSRP245220070 y ALPSRP245220060

4.7.4.4. Etapa IV

En esta fase se debe configurar la simulación, ingresando el periodo de tiempo, la escala de los datos de salida, el periodo de calentamiento y la versión del procesador del equipo en la que se corre el modelo. Para esta simulación, se corrió en un periodo de 37 años (1976-2012) y los datos de salida se obtuvieron a una escala mensual.

4.8. ESTRATEGIA DE CALIBRACIÓN Y FUNCIÓN OBJETO

El modelo se calibró por medio del programa SWAT-CUP, con la metodología SUFI-2. Inicialmente se definieron los parámetros influyentes para calibrar (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), con base en los resultados obtenidos por Cañón [33]. Los parámetros seleccionados están relacionados con características como el tipo de suelo y cobertura de la tierra. Para cada parámetro

SWAT-CUP asigna por defecto un valor inicial mínimo y máximo, dichos valores se modifican de acuerdo con las simulaciones realizadas.

Tabla 16. Parámetros SWAT-CUP

Parámetro Swat Cup	Nombre
CN2	Número de Curva
SOL_K	Conductividad Hidráulica saturada
ESCO	Factor de compensación de evaporación del agua en el suelo
CH_K2	Conductividad Hidráulica del canal principal
EPCO	Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación
REVAPMN	Profundidad umbral del acuífero superficial

Fuente: Elaboración propia

Para la calibración del modelo de la cuenca del río Prado se definió como función objetivo el NSE y se evaluó con los resultados de caudales a escala mensual. Por otra parte, se estableció el periodo de calibración a partir del año 1981 a 2000 y de validación del año 2001 a 2012; ambos procesos se realizaron de manera automática, a escala mensual. Con base en estas consideraciones fueron ejecutadas 2000 iteraciones en el algoritmo SUFI-2 para establecer el espacio paramétrico que permitiera representar de la mejor forma posible los caudales observados.

4.9. SIMULACIÓN ESCENARIOS CAMBIO CLIMÁTICO

A partir del modelo calibrado y validado, fueron simulados los escenarios RCP (4.5 y 8.5) con las variables de precipitación y temperatura (mínima y máxima) obtenidas del ensamble de los MCG (Anexo 2). De las simulaciones fueron obtenidas las series de tiempo calculadas por SWAT de humedad del suelo y escorrentía para el periodo de tiempo de 2012 – 2099.

4.10. CÁLCULO DE ÍNDICES

Para el desarrollo metodológico de los índices SPI, SRI y SSWI se recopiló los datos para las variables de línea base, a partir de los observados de precipitación y escorrentía, y humedad del suelo simulada por el modelo SWAT calibrado. A continuación, se presenta paso a paso los cálculos de los índices:

- i. Se elaboró un código en R para calcular los tres índices, el cual desarrolla la función de probabilidad acumulada a partir de los registros históricos o línea base (precipitación, escorrentía y humedad del suelo), por mes. Los paquetes

usados para los cálculos y posterior graficación de los resultados fueron SPEI, ggplot2, IDfTool y plyr, (ver ítem 3.22.1)

- ii. Fueron evaluadas tres funciones de distribución de probabilidad (FDP): Logística, Gamma y Pearson III, para cada variable a una escala mensual con el objetivo de determinar la que mejor representa la distribución de cada conjunto de datos.
- iii. A partir de la función KSTest de RStudio, se realizó la prueba Bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, la cual permite contrastar cuál de las funciones de distribución se ajusta mejor a los datos observados, mediante el p-valor, si este es mayor al nivel de significancia (0.05) no se rechaza hipótesis nula, es decir es probable que ocurra el del evento.

En el Anexo 3, se observa un ejemplo de comparación para la variable precipitación. Este procedimiento se realizó por cada mes en las variables consideras en este análisis

- iv. Finalmente, las mejores FDP por meses y variable son transformadas a una distribución normal estandarizada (con media 0 y varianza 1), llevando así el cálculo del SPI, SRI y SSWI.
- v. Una vez se obtienen los resultados de SPI, SRI y SSWI, se desarrolló un nuevo código en R, donde se ingresan dichos resultados para el cálculo del MSDI, utilizando como base el paquete MSDI creado por Zengchao Hao (ver numeral 3.13.4) [2]. El paquete MSDI, solo permite dos variables de entrada, por ello se realizaron 3 combinaciones, las cuales se observan en la Tabla 12. Combinaciones MSDI; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 12. Combinaciones MSDI

Índice Multivariado	Combinaciones
MSDI 1	SPI, SRI
MSDI 2	SPI, SSWI
MSDI 3	SRI, SSWI

Fuente: Elaboración propia

- vi. Para las series de los datos de escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. se realizó el mismo procedimiento desde el paso iv.

5. RESULTADOS

El presente capítulo muestra los resultados de las series futuras para las variables de precipitación y temperatura obtenidas del ensamble de los MCG, la modelación de SWAT, los índices de sequía (SPI, SRI, SSWI). Finalmente, la amenaza por sequía evaluada a través del MSDI, para cada periodo correspondiente (línea base y condiciones futuras) en la subcuenca Cunday (Anexo 8).

5.7. SERIES FUTURAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

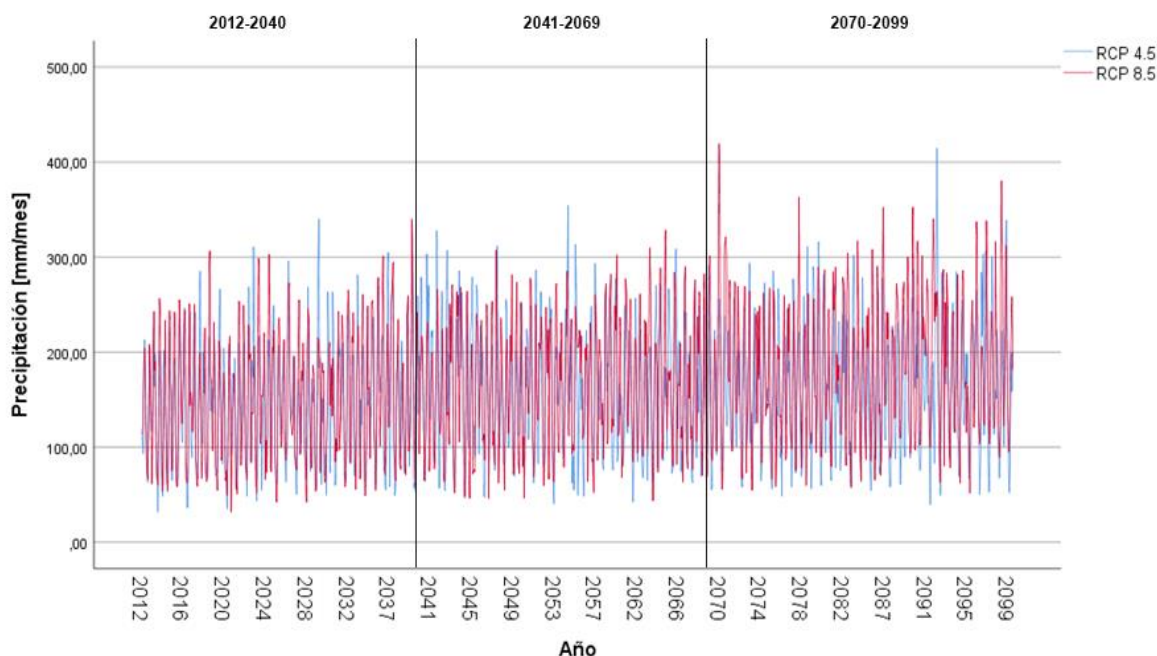
La predicción de la precipitación media mensual del ensamble de los MCG es evaluada en la serie tiempo de 2012 a 2099. Sin embargo, para efectos de entender mejor el comportamiento de los resultados, la serie de tiempo fue dividida en tres periodos, tal como aparece en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El primer periodo comienza desde el año 2012 hasta el año 2040, para este tiempo ambos RCP, presentan valores muy similares, con precipitaciones mínimas de 32 mm y máximas de 340mm aproximadamente. En el segundo periodo de tiempo 2041 – 2069, ambas trayectorias sufren aumentos respecto al primer periodo, el RCP 4.5 (8.75 %) y 8.5 (9.15%).

Finalmente, en el último periodo que abarca desde el año 2070 hasta el 2099, se presentaron precipitaciones promedio anuales de 1958 mm a 2199 mm, respectivamente para cada RCP, que en comparación con la línea base se presenta un crecimiento del 12% (RCP 4.5) al 22% (RCP 8.5).

De acuerdo a las gráficas mensuales multianuales de precipitación para los tres periodos de estudio (Anexo 10) se evidencia que las temporadas de lluvia persistirán como ocurrió en la línea base, lo que corresponde a los meses de abril a mayo y de septiembre a noviembre. Para los últimos 30 años del periodo de cambio climático, se alcanzarán valores promedio para estos meses de hasta 250 mm en el caso del RCP 8.5, y de 200 mm para en el escenario RCP 4.5.

Figura 26. Serie de precipitación mensual para el periodo 2012-2099 en la subcuenca Cunday



Fuente: Elaboración propia- SPSS

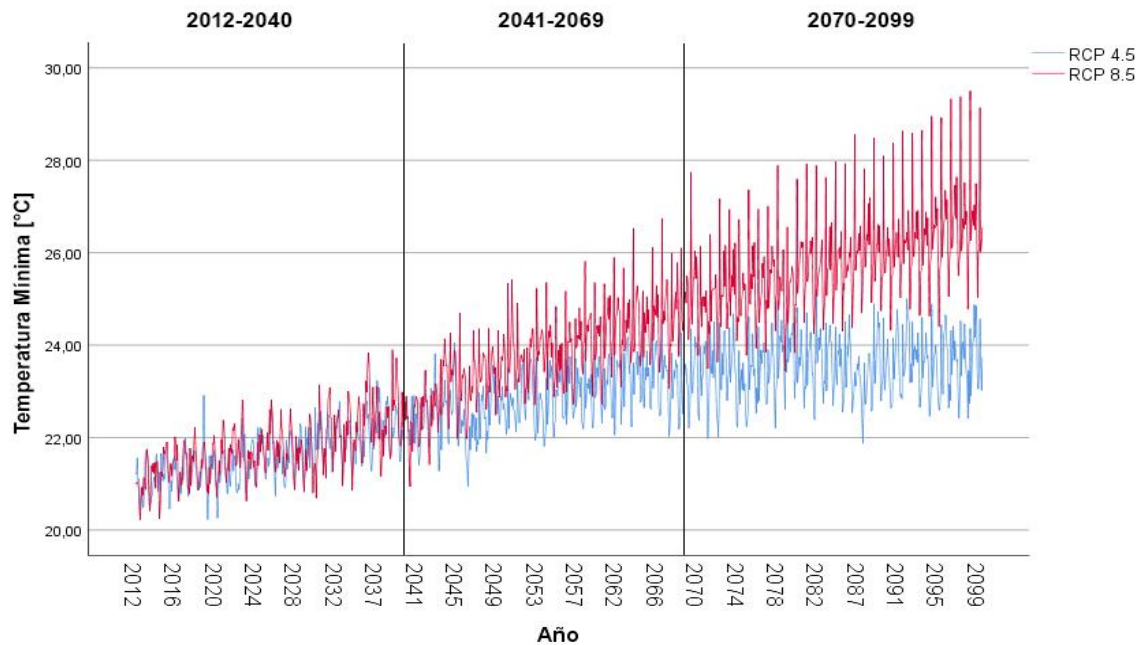
Según la Figura 27, la tendencia de la temperatura mínima es creciente para el RCP 8.5 en comparación con el RCP 4.5, en los periodos 2012-2040, 2041-2069 y 2070-2099, con un aumento del 0.6%, 4.19%, y 8.8% respectivamente. En comparación con el promedio de temperatura mínima de línea base, respecto al primer periodo de la serie futura en el RCP 4.5, el aumento será de 6.10%, por otra parte, para el RCP 8.5 será de 6.66%. Para el segundo periodo, el aumento del RCP 4.5, será de 11.15%, y el RCP 8.5 de 14.9%. Por último, para el tercer periodo, en el RCP 4.5 la temperatura mínima aumentará un 13.72% y en el RCP 8.5 incrementará un 21.31%. Al comparar el primer escenario con el último de las series futuras, para el RCP 4.5 se presentará un incremento en la temperatura de 1.91°C, mientras que para el RCP 8.5, el incremento será de 4 °C.

En el Anexo 11, se presenta el boxplot de temperatura mínima para el RCP 4.5, donde los valores mínimos se manifestarán en los meses de junio-agosto y octubre-noviembre, con temperaturas que oscilan entre 20.2°C a 21.8°C. Por el contrario, en los meses de febrero- abril y septiembre, se presentarán temperaturas mayores que varían entre 23.2°C a 25.2 °C.

Para el RCP 8.5, los valores mínimos de temperatura se presentarán entre los meses de junio- agosto y en el mes de octubre con temperaturas que varían entre

20.2°C a 23.4°C, mientras en los meses de febrero, abril y septiembre, se presentarían valores mayores que varían entre 23.9°C a 29.5°C.

Figura 27. Serie de temperaturas mínimas RCP 4.5 vs 8.5



Fuente: Elaboración propia- SPSS

En la Figura 28, se observa la tendencia de la temperatura máxima es mayor para el RCP 8.5 en comparación con el RCP 4.5, en los periodos 2012-2040, 2041-2069 y 2070-2099, con un aumento del 1%, 2.15%, y 5.95% respectivamente. En contraste con el promedio de temperatura máxima de línea base, respecto al primer periodo de la serie futura en el RCP 4.5 el aumento será de 4.4%, por otra parte, para el RCP 8.5 será de 5.3%. Para el segundo periodo, el aumento del RCP 4.5, será de 7%, y el RCP 8.5 de 9%. Por último, para el tercer periodo, en el RCP 4.5 la temperatura máxima aumentará un 9% y en el RCP 8.5 incrementará un 14.44%. Se comparó el primer escenario con el último de las series futuras, pues se evidencia una mayor divergencia entre estos dos, para el RCP 4.5 se presentará un incremento en la temperatura de 1.63°C, mientras que para el RCP 8.5, el incremento será de 3.43°C.

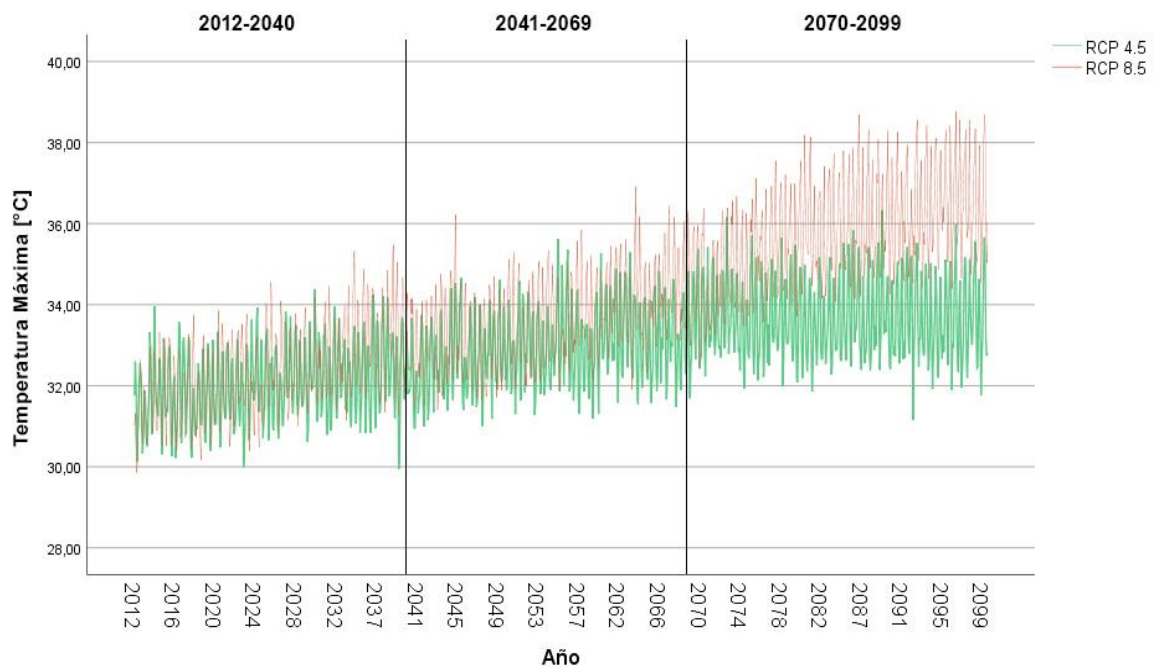
Los rangos de temperatura para el primer periodo en ambos escenarios son semejantes, oscilan entre 29.9°C a 34.3°C, para el periodo 2041 hasta 2069, en el RCP 4.5 la temperatura mínima varía entre 31°C a 35°C, mientras que para el RCP

8.5 se encuentra entre 31.4°C y 37°C. Finalmente, para el tercer periodo, en el RCP 4.5 la temperatura fluctúa entre 31°C a 36°C, y para el RCP 8.5 entre 32.4°C a 38.7°C.

En el Anexo 12, se presenta el boxplot de la temperatura máxima para el RCP 4.5, donde los valores máximos se exhibirán en los meses de enero a febrero y agosto a septiembre, con temperaturas que oscilan entre 35°C a 36.3°C. Por el contrario, en los meses de abril a junio y octubre a diciembre, se presentarán temperaturas bajas que varían entre 29.9°C a 31.15°C.

Para el RCP 8.5, los valores máximos de temperatura se presentarán entre los meses de enero a febrero y julio a septiembre con temperaturas que varían entre 35°C a 38.7°C, mientras en los meses de abril a junio y octubre a diciembre, se presentaran valores que varían entre 29.8 °C a 32.4 °C.

Figura 28. Serie de temperaturas máximas RCP 4.5 vs 8.5

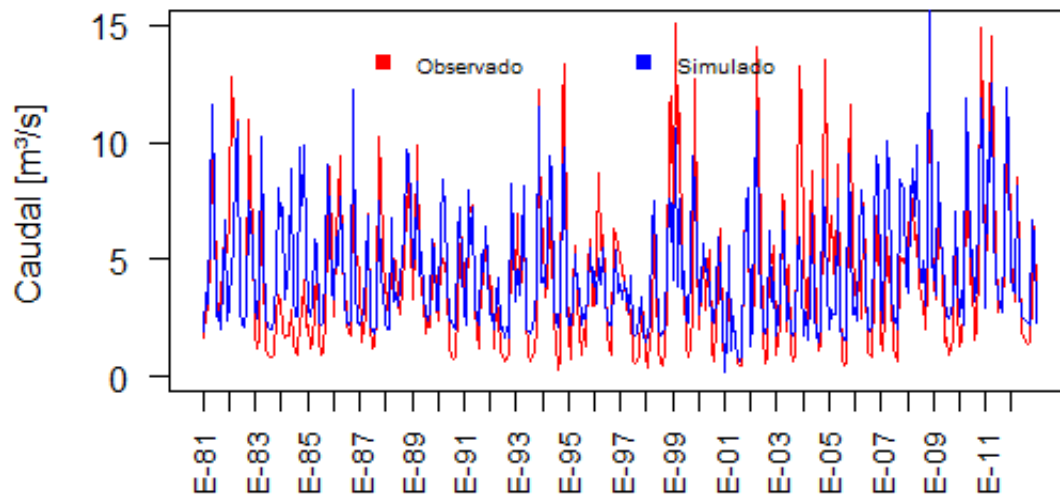


Fuente: Elaboración propia- SPSS

5.8. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT

En la Tabla 18, se muestra el resultado de NSE de la calibración (1981 – 2000) y validación (2001- 2012), efectuada para la subcuenca Cunday. A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa el comportamiento de los caudales observados y simulados a una escala mensual.

Figura 29. Caudal observado vs.simulado



Fuente: Elaboración propia- RStudio

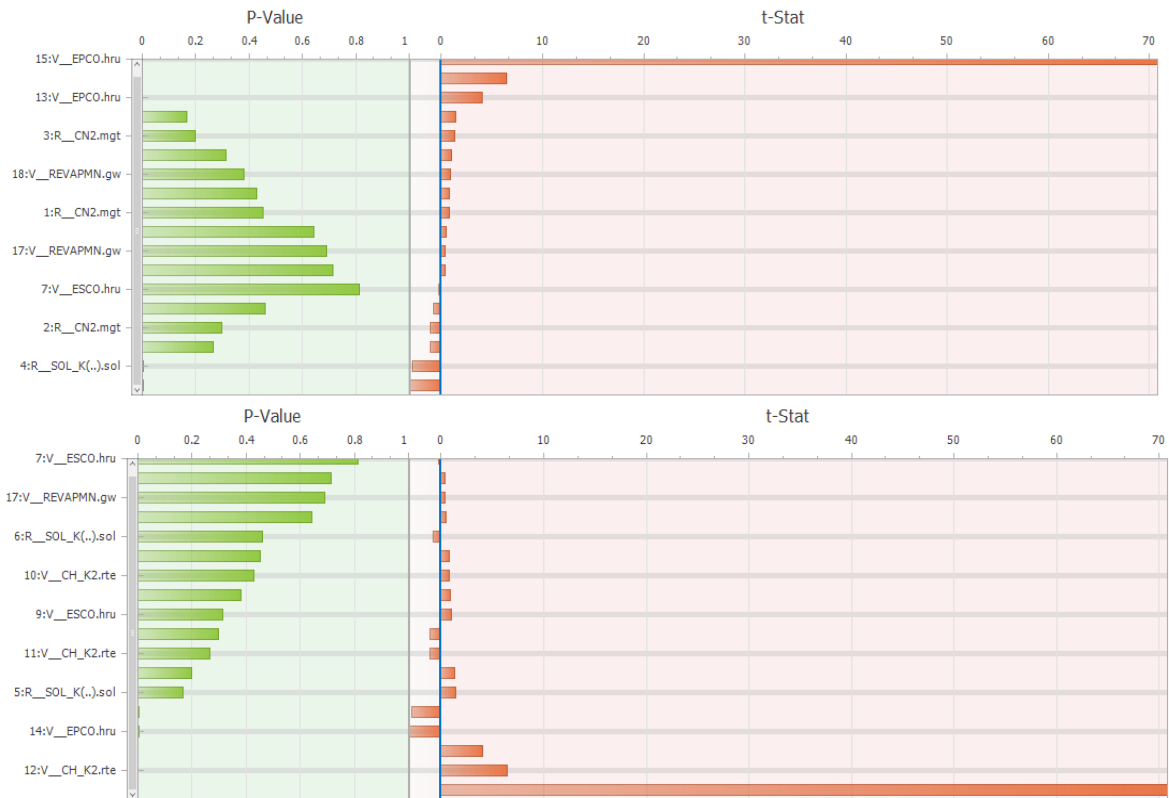
Tabla 13. Resultados Nash-Sutcliffe

Proceso	Valor de NSE
Calibración	0.51
Validación	0.60

Fuente: Elaboración propia

En Figura 30, se presentan los resultados de P- value y t – Test, los cuales evalúan la sensibilidad de cada parámetro cuando son modificados en la calibración. Los parámetros son más sensibles cuando t- Test es mayor y P- value es menor, como es el caso de EPCO y CH_K2. Estos resultados corresponden a la cuenca del río Prado, que como se mencionó anteriormente, la configuración del modelo se realizó para esta área, sin embargo, el enfoque del estudio es en la subcuenca de Cunday.

Figura 30. Incertidumbres parámetros SWAT-CUP



Fuente: SWAT-CUP

Las letras “r” y “v” antecesoras en los parámetros, se refieren a la forma en que estos son modificados en cada simulación dentro de los rangos que se definieron inicialmente. Cuando se usa “r” el valor del parámetro se modifica de forma relativa de acuerdo al porcentaje del rango, por el contrario, para “v” el parámetro se reemplaza con los valores que se encuentran definidos por los rangos. En la Tabla 14, que aparece a continuación, se observan los rangos definitivos en la calibración del modelo.

Tabla 14. Resultados Nash-Sutcliffe

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
1: <i>R__CN2.mgt</i>	-0.321813	-0.317133
4: <i>R__SOL_K(..).sol</i>	0.133836	0.252794
7: <i>V__ESCO.hru</i>	0.11042	0.115232
10: <i>V__CH_K2.rte</i>	52.085808	57.982002
13: <i>V__EPCO.hru</i>	0.459945	0.562935
16: <i>V__REVAPMN.gw</i>	579.63739	677.555847

Fuente: SWAT – CUP

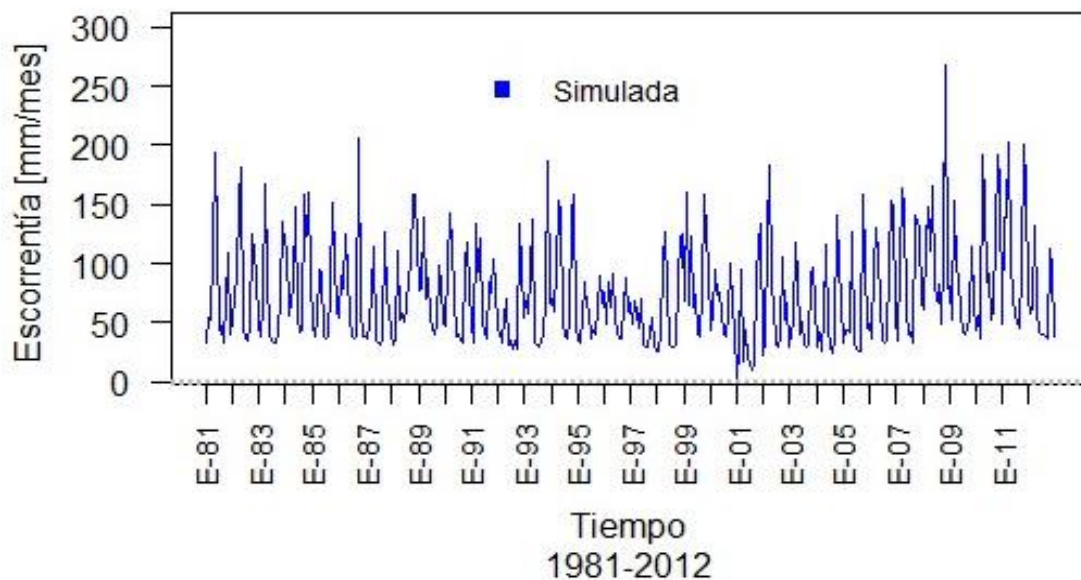
Como resultado de la simulación, a partir del modelo calibrado se generaron las series de tiempo de escorrentía y humedad del suelo para los periodos línea base y para las proyecciones futuras de cada RCP evaluado.

5.9. ESCORRENTÍA PARA EL PERIODO LÍNEA BASE

Como resultado del proceso de calibración y validación del modelo SWAT, se puede observar que en términos de la escorrentía (caudal estandarizado por el área de la cuenca), los parámetros calibrados permitieron que el modelo representara de manera satisfactoria la dinámica de esta variable, con especial habilidad para los meses húmedos. Sin embargo, es importante resaltar que el modelo sobreestima (línea azul) la escorrentía base (caudal base) con respecto al valor observado (línea roja) a lo largo del periodo evaluado, como se observa en la **Figura 31**. La escorrentía mensual de la línea base con un valor promedio de 73.75 mm. el mayor pico se presentó en el mes de noviembre del año 2008 con un valor de 267.39 mm, y el mínimo para el mes de enero del año 2001 con un valor de 3.24 mm.

A partir del año 1997 se evidencia una tendencia decreciente significativa respecto a otros periodos en la gráfica, producto del Fenómeno de El Niño que se vivía en este tiempo, y a partir del mes de junio de 1998 vuelve a incrementar como coincidencia con el Fenómeno de La Niña que se presentó hasta comienzos del año 2001. Lo mismo sucede para el año 2010 hasta principios del 2012 donde se mantienen valores por encima de los 100 mm.

Figura 31. Serie de escorrentía simulada



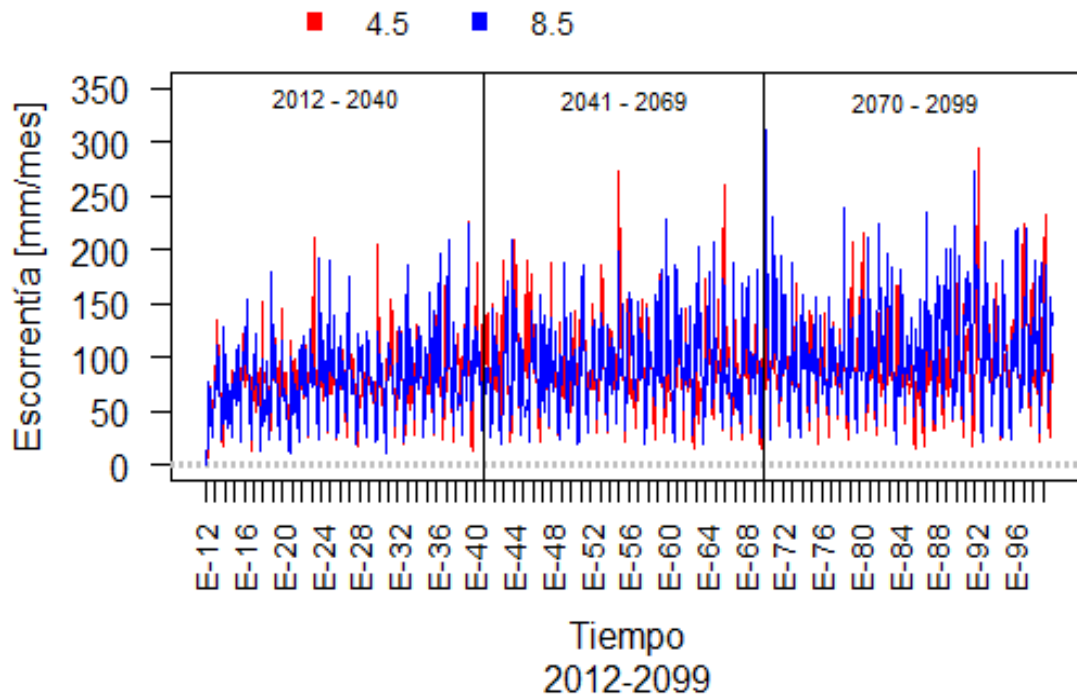
Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.10. ESCORRENTÍA SIMULADA PARA EL PERIODO 2012-2099

De acuerdo a la **Figura 32**, en los periodos de tiempo 2012 – 2040, 2041- 2069 y 2070 – 2099, para el RCP 4.5, el valor de la escorrentía para los meses de enero a junio se encuentra en promedio en rangos de 80 – 120 mm, para el mes de julio empieza a decrecer hasta el mes de septiembre, donde se presenta el menor valor medio de toda la serie de tiempo evaluada, alcanzando valores aproximados de 28 mm a 34 mm. En los siguientes meses, los valores vuelven a incrementarse, obteniendo incluso los máximos. En el escenario del RCP 8.5 los meses de abril, mayo, noviembre y diciembre registran los datos máximos, pero al igual que en RCP 4.5, en el mes de septiembre se observa el valor mínimo con valores de 28 mm, 37 mm y 43 mm, de acuerdo con cada periodo de tiempo.

Los promedios medios mensuales para RCP 4.5 en el primer, segundo y tercer periodo son 77.55 mm, 91.24 mm y 90,74 mm respectivamente, evaluando esto frente al periodo histórico, se obtiene que la escorrentía aumentará para 2012 – 2040 en un 4.9 %, para el 2041-2069 un 19.17% y en el último caso 18.72%. En el segundo RCP evaluado, el aumento será 6.91%, 19.7% y 29.21% respecto a la serie de línea base 1981 – 2012.

Figura 32. Serie de esorrentía RCP 4.5 vs 8.5

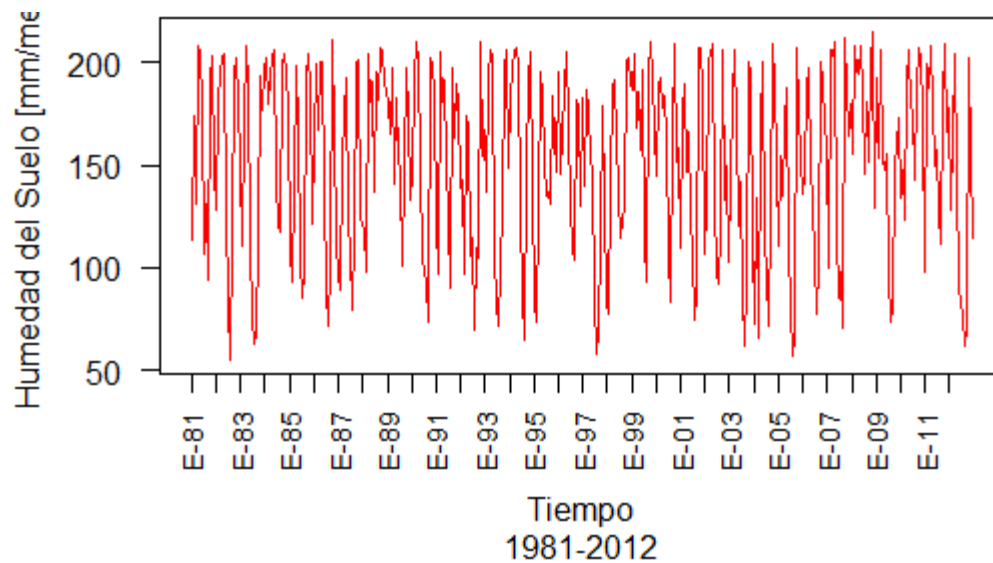


Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.11. HUMEDAD DEL SUELO PERIODO LÍNEA BASE

En la **Figura 33**, se observa la humedad del suelo a través de los años 1981 a 2012, sus rangos se encuentran entre los 50 mm a 215 mm, y un valor promedio de 152.10 mm. Las variaciones interanuales e intraanuales de la precipitación también se reflejan en la dinámica de la humedad del suelo. Los periodos de desecación son pronunciados y ocurren en los años 1982, 1983, 1992, 1994, 1997 y 2005, lo cual se ha podido ver alterado por factores como la precipitación, temperatura y fenómenos de El Niño y La Niña, a pesar de esto durante toda la serie siempre se mantuvo agua disponible en el suelo.

Figura 33. Serie de humedad del suelo Línea base

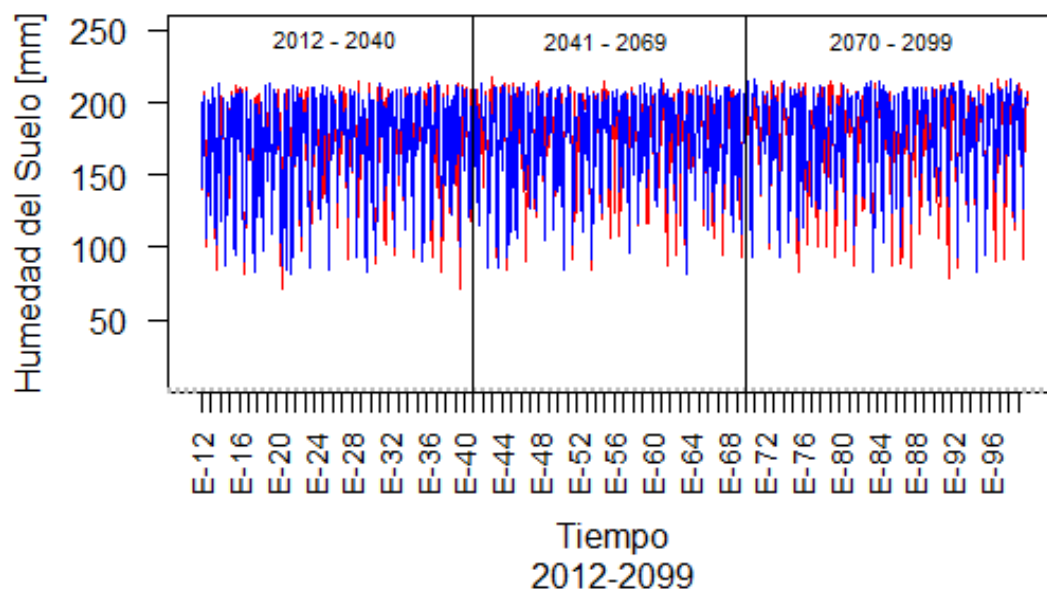


Fuente: Elaboración propia- RStudio

La humedad del suelo proyectada que se muestra en la **Figura 34**, presentó un comportamiento similar anualmente para los escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y el 8.5) con valores que oscilan entre los 157 mm a los 190 mm en los meses de enero y febrero, para los tres meses posteriores se mantiene la variable con un registro aproximado de 200 mm. A partir del mes de junio decrece hasta el mes de agosto alcanzando los valores mínimos de toda la serie anual, por debajo de los 100 mm. En los meses restantes la humedad del suelo vuelve a incrementarse entre los rangos de 150 a 200 mm.

Se espera que la humedad del suelo aumente aproximadamente en un 11%, 13% y 14% para el primer, segundo y tercer periodo respectivamente en comparación con los datos históricos.

Figura 34. Serie de humedad del suelo RCP 4.5 vs 8.5



Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.12. ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA EN EL SECTOR AGRÍCOLA

5.12.1. Línea base 1981- 2012

La FDP que mejor se ajustó a la distribución de los datos observados según la prueba Kolmogórov-Smirnov fue la función *Logística* para todos los meses en cada una de las variables analizadas para el periodo línea base (ver anexo 2). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan las gráficas para los índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c) para línea base.

El SPI (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**-a) presentó sequías con una frecuencia anual excepto, en los años 1985, 1997, 2007, 2009, y con una duración promedio de 2 a 4 meses. La primera sequía se produjo en el mes de marzo 1981 con una duración de 4 meses, y una intensidad entre moderada a severamente seca. En los meses de octubre 1993, noviembre 2001 y 2003, se evidenciaron déficits en precipitación con una duración de un mes donde el $SPI \leq -2$, que corresponde a eventos de sequía extremadamente seca. En general para el SPI, se presentaron en el 38 % del tiempo de la línea base eventos de sequía.

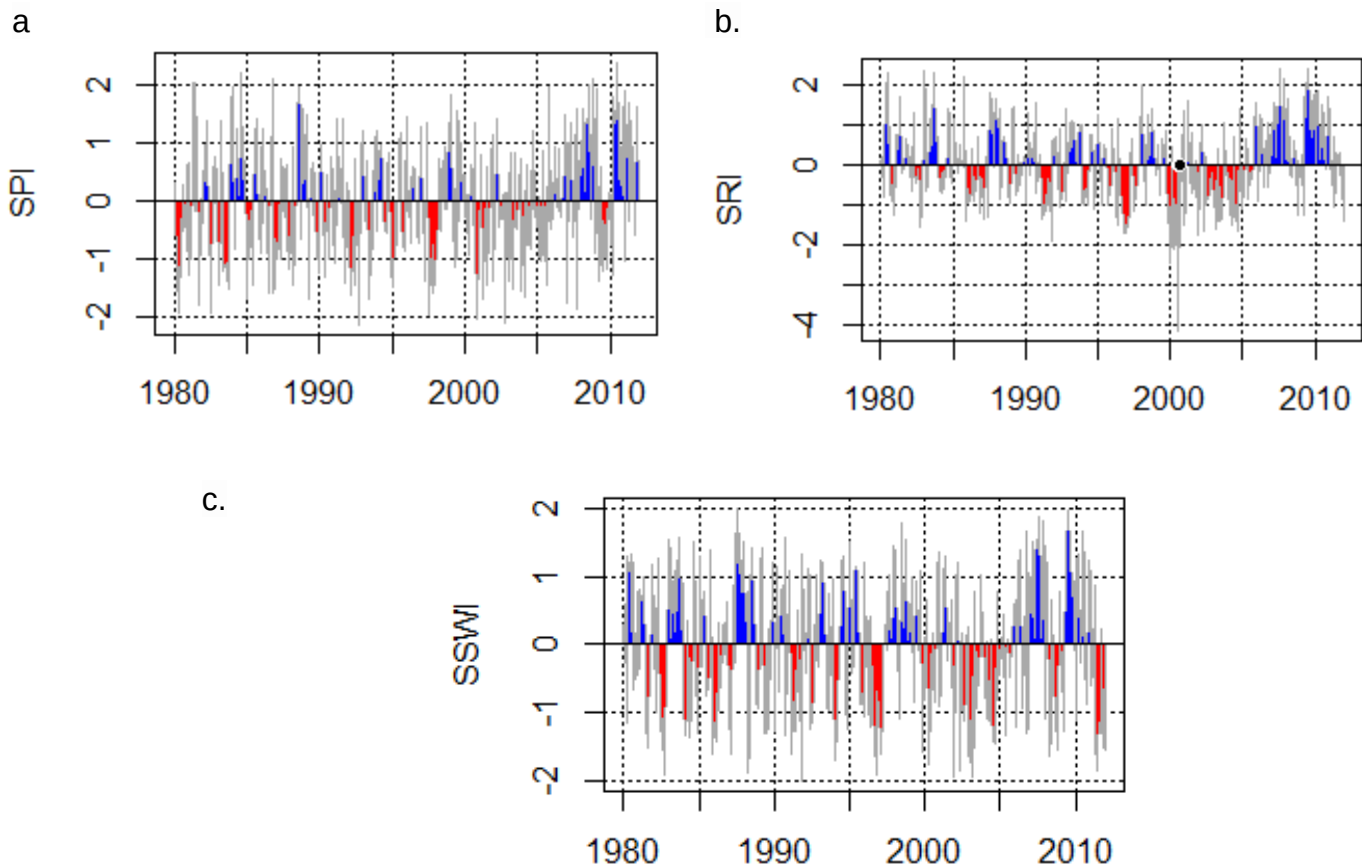
En la sección (b) de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta el comportamiento de la variable de escorrentía a través del SRI. Se

evidenció que para el periodo línea base predominó una tendencia positiva que varía de 1.0 a 2.39, lo cual indica condiciones moderada a extremadamente húmedas, en especial junio 1981, enero y septiembre de 1984, octubre 1986, febrero 1999, agosto 2008, y julio 2010. Por otra parte, se presentó en el mes de agosto del 2001, un evento de sequía extrema (SRI = -4.14).

Para el índice SRI, se presentó un 15 % de sequía en el periodo línea base, con una duración promedio en cada evento de sequía de aproximadamente 2 meses, con una intensidad entre moderada a severamente seca.

El SSWI (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**-c), no aconteció ninguna sequía extrema, su comportamiento varía entre condiciones cerca de lo normal y moderadamente seca. Los eventos de sequía tienen una duración de 2 a 3 meses, predominando condiciones moderadamente a severamente húmedas, es decir, solo el 19.8 % de los 384 meses evaluados presentan sequias.

Figura 35. Comparación de resultados índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c), del periodo 1981- 2012



Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.12.2. Periodos Futuros 2012- 2099

En las Figura 36; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 37, se observa el comportamiento de los índices de precipitación estandarizada, índice de escorrentía e índice de humedad del suelo, en los periodos 2012 a 2099 bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5, respectivamente.

En la **Figura 36** (a) el SPI del escenario 4.5 muestra que las sequías meteorológicas modeladas iniciarán en el mes de enero hasta octubre del año 2020, y para el mes de noviembre del mismo año, se presentará un evento extremo. Para el año 2028 a 2030, se presentarán valores del SPI que oscilarán entre -1.5 a -1.8, indicando sequias severamente secas, después de este último año no se volverán a presentar eventos secos hasta el año 2092 (-SPI = 1.0).

Por otra parte, para el escenario 8.5 (**Figura 36; Error! No se encuentra el origen de la referencia.-b**), antes del año 2040, se presentarán tres eventos de sequía moderada a severamente seca en los años 2027 (SPI = -1.5), 2029 (SPI = -1.3) y 2031 (SPI = -1.28). En el periodo de tiempo 2060 a 2091, predominarán condiciones moderadamente húmedas, en los años posteriores se presentarán condiciones normales, sin embargo, para el año 2095 ocurrirá un evento de sequía moderada.

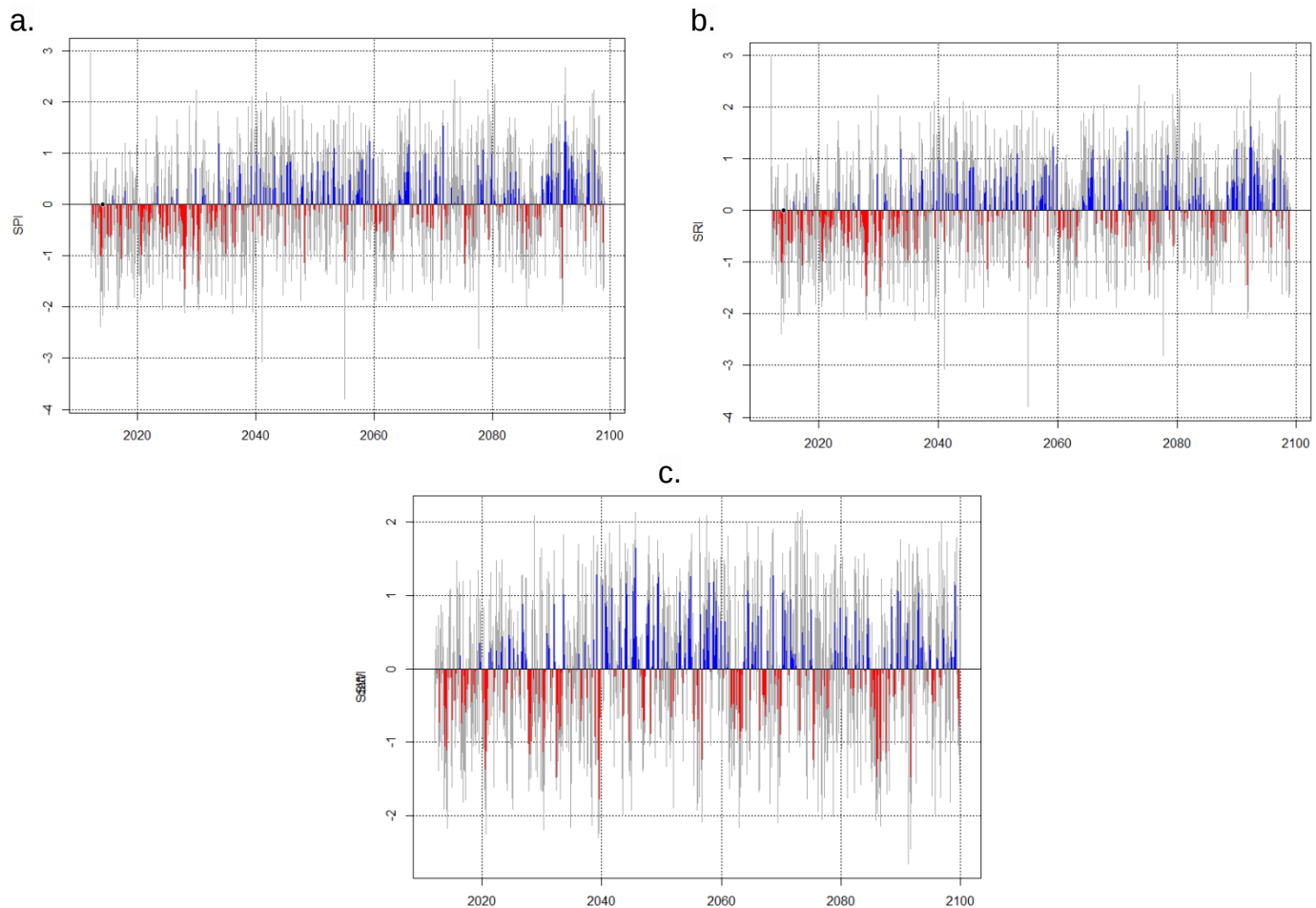
Para el periodo 2012 a 2040, el 24.13% de la serie de tiempo se presentará sequía, con una frecuencia anual excepto en el año 2040. La duración promedio de sequía será de 2 a 3 meses. Así mismo, para el periodo 2041-2069, el porcentaje de sequía disminuirá un 14.37%, también con una frecuencia anual, excepto en el año 2067. Por último, para los años 2070 a 2099, solo el 12.8% del tiempo se presentará sequias. Respecto a los datos de línea base, las sequias para el escenario RCP 4.5 en todos los periodos disminuirá.

En la **Figura 36-b**, se presenta el comportamiento de la variable de escorrentía, es decir, la sequía hidrológica bajo el escenario 4.5. El primer evento de sequía moderadamente seca, se presentará para el año 2021(-1.0). Los eventos de sequía severamente secos, se presentarán para el año 2027 (SRI= -1.65), y 2031 (SRI=-1.5), este evento de sequía se vuelve a presentar hasta el año 2092. A diferencia del RCP 4.5, las condiciones de sequía para el RCP 8.5 son más frecuentes y duraderas.

En la **Figura 37-b**, se presenta el comportamiento del SRI en el escenario 8.5, el primer evento de sequía se producirá en marzo del 2012. Para el periodo 2012 a 2040, el 28.40% de los datos presenta condiciones de sequía, con una duración de 4 a 5 meses anual. Por otra parte, a partir del año 2031 comienza a manifestarse las condiciones moderadamente húmedas, durante 11 meses consecutivos.

Para el periodo 2041 a 2069, el 13.22% presentará sequía, por el contrario, para los años 2070 a 2099 se reduce al 5.28%, es decir, la frecuencia de los eventos de sequía según los valores de escorrentía, se reducirán a futuro. Para el año 2045, se producirán sequías moderadas a extremadamente secas, durante 8 meses consecutivos (febrero a septiembre).

Figura 36. Evaluación de los eventos de sequía a través de los índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c), para el escenario RCP 4.5 durante el periodo de tiempo de 2012- 2099



Fuente: Elaboración propia- RStudio

Por último, el SSWI, es el principal índice para determinar la sequía agrícola. El escenario 4.5 (**Figura 37-c**), presenta para los años 2020-2021, una condición de sequía moderada. En agosto 2020, abril 2030, noviembre 2034, mayo 2038, junio a agosto 2039, se manifestará una condición de sequía extremadamente seca.

Durante el periodo 2012-2040, el 23% de los datos tendrán condiciones de sequía, con una duración aproximada de tres meses por año, la mayoría de los datos se concentran en una clasificación moderadamente seca.

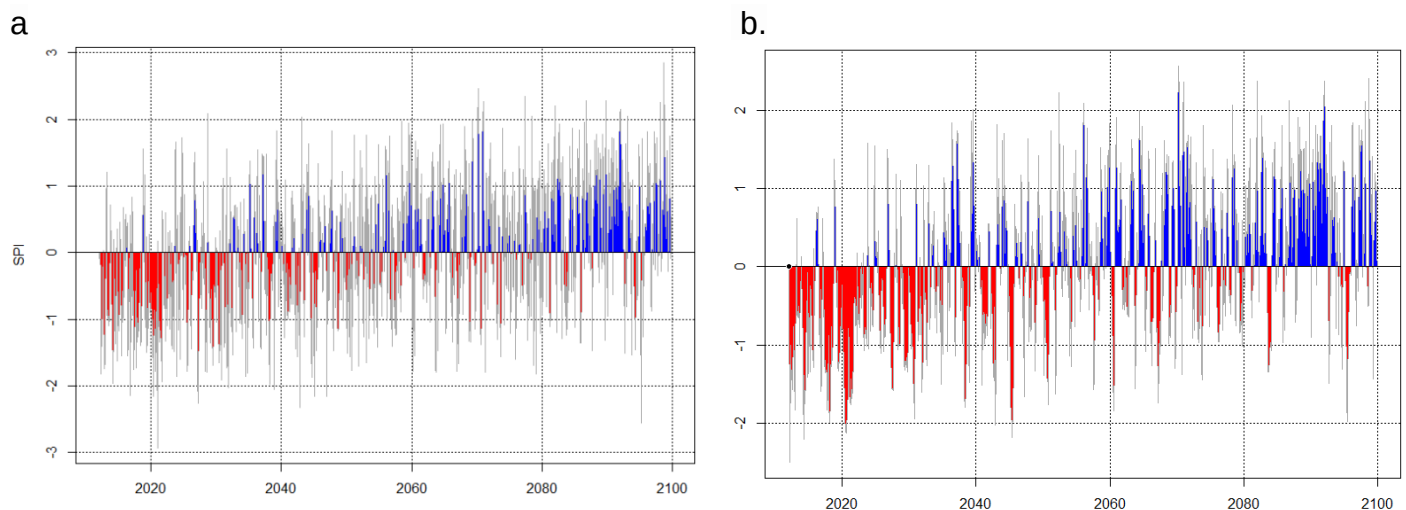
En el periodo 2041 a 2069, el 13.5% de los datos presentará eventos de sequía, mientras que para el periodo 2070 a 2099, las condiciones de sequía aumentarán a 17.5%, ambos periodos presentan una duración de 2 meses por año.

Para el escenario RCP 8.5 (**Figura 37**

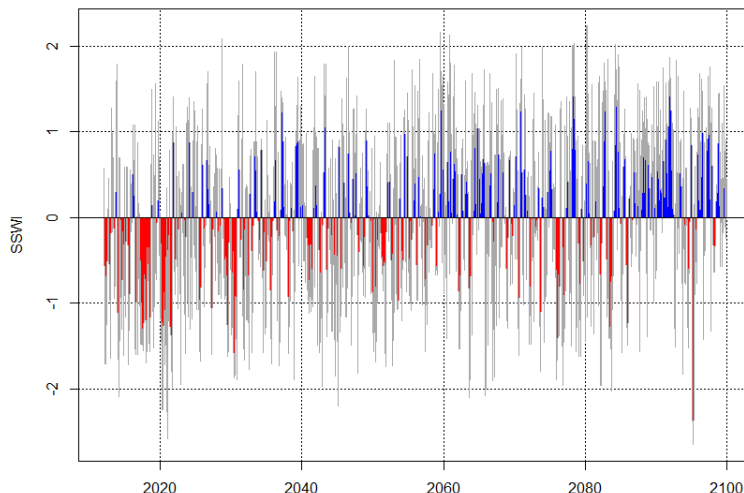
-c), en el periodo 2012-2040, el 31% de los datos, demuestran una sequía entre moderada a severamente seca, con una duración aproximada de 4 meses al año. En los meses de mayo 2020, enero 2021, abril 2027, diciembre 2031, y diciembre 2038, se evidencian condiciones extremadamente secas que oscilan entre (SSWI= -2 a 2.93). En el periodo 2041 a 2069, el 16.09% presentará sequía, con una duración de 2 meses. Por otra parte, en los meses noviembre 2042, febrero 2045, y enero 2047 presentarán condiciones extremadamente secas.

Por último, para el periodo 2070 a 2099, el 8.6% manifestará condiciones de sequía, con una duración de un mes para cada año, el único evento extremo de sequía se presentará, en abril 2095.

Figura 37. Evaluación de los eventos de sequía a través de los índices SPI (a), SRI (b) y SSWI (c), para el escenario RCP 8.5 durante el periodo de tiempo de 2012-2099



C.



Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.13. EVALUACIÓN MULTIVARIADA DE LA SEQUÍA

Frente a los diferentes resultados obtenidos con cada índice, se observó en general, diferencias y coincidencias en frecuencia, intensidad y duración de las sequías que han ocurrido (línea base) y que ocurrirán en el futuro (periodo 2012-2099). Por lo tanto, para definir con mayor certeza el nivel de amenaza por sequía en el sector agrícola, se implementó el MSDI para establecer la probabilidad conjunta de ocurrencia de los eventos de sequía y humedad, en los periodos mencionados anteriormente. Las tres combinaciones del MSDI, se presentan en la Tabla 12, en las gráficas generadas se utilizaron los siguientes colores para diferenciar: MSDI 1 (rojo), MSDI 2 (azul) y MSDI 3 (verde).

5.13.1. MSDI para el periodo línea base

En la primera combinación MSDI 1, es decir, la función de distribución conjunta de probabilidad de SPI y SRI, se observó que más de la mitad de los datos (56,51%) se encuentran en el intervalo -0.99 a 0.99, lo cual indica según la clasificación de la Tabla 5, una condición normal de sequía. Por otra parte, en un 26 % del tiempo de la línea base predominó una condición moderada de sequía, mientras que en el porcentaje restante (15,62 %) la condición de sequía fue severa (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

En la Figura 38, se observa el comportamiento del MSDI 1, 2 y 3. La combinación MSDI 1, en los años 1981 a 1987, 1994, 1999, 2004, 2009 a 2011 presentó picos negativos que oscilan (-1,5 a -1,87). El primer evento de sequía registrado inició en marzo de 1981 con valores negativos hasta abril de 1982 donde se estabilizó a condiciones cerca de lo normal (0.19). Sin embargo, para los meses de octubre y

noviembre se presentó una sequía moderada y más crítica en el mes de diciembre con una condición de sequía severa.

Tabla 15. Resultados MSDI para el periodo línea base

Línea Base 1981-2012						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	0	0%	0	0%	0	0%
1.5 a 1.99	2	0,52 %	0	0%	7	1,82 %
1.0 a 1.49	5	1,30 %	2	0,52 %	30	7,81 %
-0.99 a 0.99	217	56,51 %	198	51,56%	238	61,97 %
-1.0 a -1.49	60	15,62 %	84	21,87%	58	15,10 %
-1.5 a -1.99	100	26,04 %	100	26,04 %	51	13,28 %
-2	0	0%	0	0%	0	0%

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en las combinaciones MSDI 2 no se presentó el mismo comportamiento en los años 1981 y 1982, pues a diferencia de MSDI 1, para el segundo semestre del año 1982 se manifestaron eventos severamente secos desde el mes de agosto hasta diciembre con valores que variaron entre -1.16 a -1.87, mientras que el MSDI 3 por el contrario a las dos combinaciones anteriores, solo presento sequias moderadas en los meses de agosto y septiembre. Para ver los comportamientos de precipitación, escorrentía y humedad del suelo ver anexo 3.

El ejemplo anterior destaca una propiedad atractiva de MSDI que describe el inicio de la sequía y la persistencia en función de los estados de múltiples variables, pues para el año 1982 se observan discrepancias (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Dichas discrepancias podrían deberse a precipitaciones anormalmente altas en un período de tiempo corto, mientras que la mayor parte de los meses permanecen en condiciones cerca de lo normal.

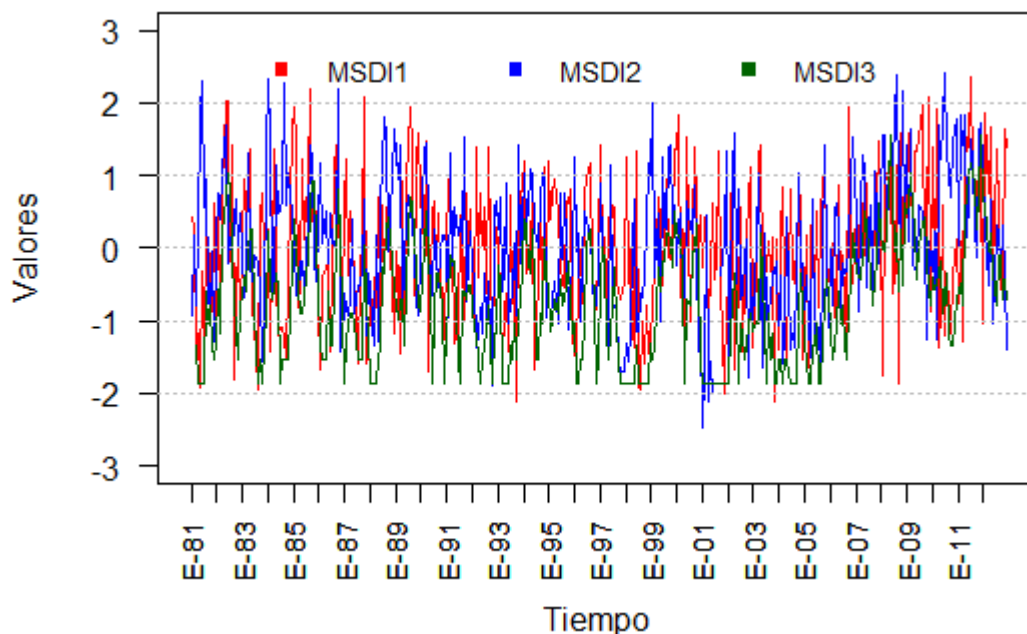
Tabla 16. Resultados MSDI 1,2 y 3 del periodo enero a diciembre de 1982

Fecha	MSDI 1	MSDI 2	MSDI 3
ene-82	-1,31	-1,15	-0,48
feb-82	-0,57	-0,57	-0,31
mar-82	-1,16	-0,90	0,26
abr-82	0,19	0,03	0,90
may-82	0,69	0,43	0,79
jun-82	1,03	0,34	0,34
jul-82	0,79	-0,26	-0,19
ago-82	-0,11	-1,16	-1,33
sep-82	-0,69	-1,5	-1,02
oct-82	-1,16	-1,87	-0,79
nov-82	-1,54	-1,87	0,11

dic-82	-0,79	-1,16	0,34
--------	-------	-------	------

Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el periodo 1981-2011



Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.13.2. MSDI para el RCP 4.5

Las combinaciones de MSDI para el escenario RCP 4.5 se observan en la Tabla 17. En todos los periodos en los que fue dividida la proyección predominará una condición normal que incrementará a medida que avanza el tiempo: 2012-2040 (47.70 %), 2041-2069 (69.82%) y 2070- 2099 (73.8%). Mientras que las condiciones de sequía moderada a severa tienden a reducirse con el tiempo, 2012-2040 (37.92 %), 2041-2069 (19.8%) y 2070- 2099 (14.35%).

A partir del periodo 2041- 2069 incrementará el porcentaje de condiciones húmedas (moderada y muy húmeda) en la subcuenca de Cunday en las tres combinaciones evaluadas, MSDI 1 (8.61%), MSDI 2 (5.44%), y MSDI 3 (9.68%). Esta misma condición se presentará en el periodo 2070-2099, MSDI 1 (7.73%), MSDI 2 (4.3%), y MSDI 3 (5.45%).

Se puede observar que en la combinación MSDI 3, es decir, la función de distribución conjunta de probabilidad de SRI y SSWI, en todos los periodos de tiempo se manifestará un incremento en las condiciones húmedas. Para observar

los comportamientos de los MSDI individualmente bajo el escenario RCP 4.5, ver Anexo 5.

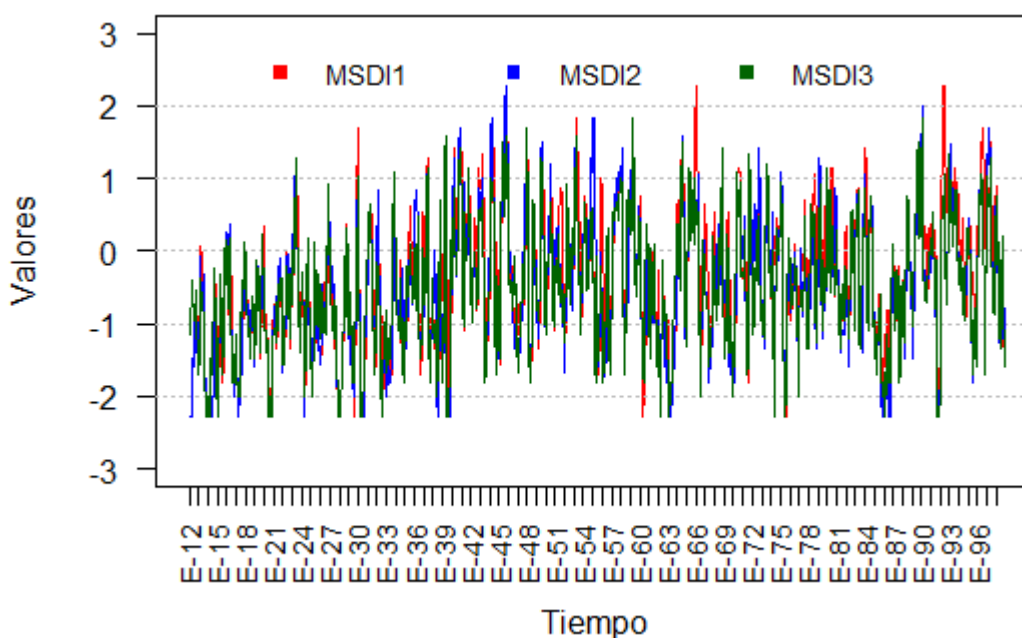
En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Figura 39**, se presenta la comparación mensual multianual de MSDI 1, 2 y 3 del RCP 4.5 para el periodo 2012-2099, donde se corrobora lo mencionado anteriormente, la combinación MSDI 3 presenta mayor variación en los diferentes periodos de tiempo, con una clasificación húmeda a futuro.

Tabla 17. Clasificación de los intervalos de sequía, para los resultados del MSDI 1,2 y 3 en términos de cantidad y porcentaje para el escenario RCP 4.5.

RCP 4.5						
2012 -2040						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	0	0%	0	0%	0	0%
1.5 a 1.99	3	0,86 %	1	0,28%	1	0,28%
1.0 a 1.49	10	2,87 %	8	2,29 %	8	2,29 %
-0.99 a 0.99	166	47,70 %	182	52,29%	179	51,43 %
-1.0 a -1.49	89	25,57 %	87	25%	75	21,55%
-1.5 a -1.99	43	12,35 %	38	10,92%	41	11,78%
-2	35	10%	32	9,19%	44	12,64%
2041 - 2069						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	1	0,28%	0	0%	3	0,86%
1.5 a 1.99	7	2,01%	4	1.14%	9	2,5%
1.0 a 1.49	23	6,6%	15	4.3%	25	7,18%
-0.99 a 0.99	243	69,82%	247	70,7%	224	64,36%
-1.0 a -1.49	55	15,80%	52	14,94%	54	15,51%
-1.5 a -1.99	14	4.0%	23	6,6%	25	7,18%
-2	5	1,43%	7	2,0%	8	2,29%
2070-2099						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	3	0,86%	0	0%	1	0,28%
1.5 a 1.99	5	1,43%	1	0,28%	1	0,28%
1.0 a 1.49	22	6,3%	14	4,02%	18	5,17%
-0.99 a 0.99	257	73,8%	254	72,98%	241	69,25%
-1.0 a -1.49	42	12,06%	49	14,08%	55	15,80%
-1.5 a -1.99	8	2,29%	18	5,17%	18	5,17%
-2	11	3,16 %	12	3,44%	14	4,02%

Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 del RCP 4.5 para el periodo 2012-2099



Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.13.3. MSDI para el RCP 8.5

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observan los resultados generados de las tres combinaciones del Índice de sequía estandarizado multivariado, para el escenario RCP 8.5, semejante al RCP 4.5, los datos se concentran en el intervalo -0.99 a 0.99, para el primer periodo de tiempo, MSDI 1 (50%), MSDI 2 (51.72%), y MSDI 3 (49.42%), para el segundo periodo, MSDI 1 (69.54%), MSDI 2 (68.39%) y MSDI 3 (69.25%), y finalmente, el tercer periodo, MSDI 1 (71.83%), MSDI 2 (71.26%) y MSDI 3 (72.12%), lo que indica que una condición de normal-húmeda predominara en el futuro.

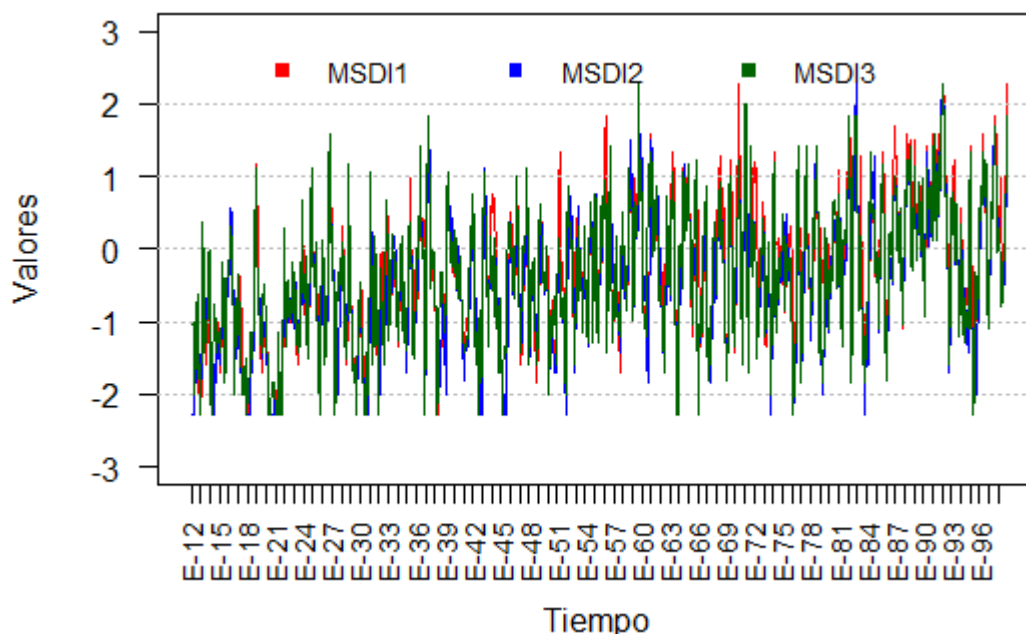
Por otra parte, en el segundo periodo se manifestarán más eventos de sequía moderada a severa en comparación con los otros dos periodos de tiempo. En la **Figura 40**, se observa el comportamiento de cada combinación, donde el MSDI 3 tiene una mayor variabilidad en comparación con el MSDI 1 y el MSDI 2, con tres picos positivos (>2) en los años 2059, 2070 y 2092, que indican condiciones extremadamente húmedas.

Tabla 18. Clasificación de los intervalos de sequía, para los resultados del MSDI 1,2 y 3 en términos de cantidad y porcentaje para el escenario RCP 8.5.

RCP 8.5						
2012 -2040						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	0	0%	0	0%	0	0%
1.5 a 1.99	2	0,57%	3	0,86%	2	0,57%
1.0 a 1.49	6	1,72%	9	2,5%	4	1,14%
-0.99 a 0.99	174	50%	180	51,72%	172	49,42%
-1.0 a -1.49	66	18,96%	80	22,9%	69	19%
-1.5 a -1.99	54	15,51%	40	11,49%	53	15,23%
-2	44	12,64%	34	9,77%	46	13,21%
2041 - 2069						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	0	0%	1	0,28%	0	0%
1.5 a 1.99	2	0,57%	1	0,28%	2	0,57%
1.0 a 1.49	23	6,6%	15	4,31%	10	2,87%
-0.99 a 0.99	242	69,54%	238	68,39%	241	69,25%
-1.0 a -1.49	46	13,21%	64	18,39%	53	15,23%
-1.5 a -1.99	24	6,89%	21	6,03%	28	8,04%
-2	11	3,16%	8	2,29%	14	4,02%
2070-2099						
Intervalo	MSDI-1		MSDI-2		MSDI-3	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
>2.0	10	2,87%	5	1,43%	7	2,01%
1.5 a 1.99	19	5,45%	11	3,16%	9	2,58%
1.0 a 1.49	33	9,48%	29	8,3%	24	6,89%
-0.99 a 0.99	250	71,83%	248	71,26%	251	72,12%
-1.0 a -1.49	25	7,18%	30	8,62%	26	7,47%
-1.5 a -1.99	10	2,8%	20	5,74%	21	6,03%
-2	1	0,28%	5	1,43%	10	2,87%

Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 del RCP 8.5 para el periodo 2012-2099



Fuente: Elaboración propia- RStudio

5.14. ANÁLISIS DE FRECUENCIA, INTENSIDAD Y DURACIÓN PARA EL MSDI

En Figura 41-a, la frecuencia histórica del año 1981 al 2012, presento en promedio 95 sequías hidrometeorológicas (Figura 41- c, 97 sequías en base a las variables de precipitación y humedad del suelo y 61 para las sequías en la combinación, escorrentía y humedad del suelo (Figura 41-e). Estas sequías tuvieron una duración aproximadamente de 3, 3 y 2 meses respectivamente. (a, c, e). En la Figura 41-b, la duración de sequía hidrometeorológica para el MSDI 1 en el periodo histórico, varía en promedio de 1 a 2 meses. En los años 1988 en los meses de marzo a junio, 1989 en los meses junio a septiembre, 1990 en julio a octubre, 1993 en junio a septiembre y noviembre del 2003 a abril de 2004, se presentaron sequías severamente secas con duraciones de 4 a 6 meses, para un total de 50 sequías severamente secas, y 44 sequías moderadas. Únicamente en el mes de julio del año 1988, se presentó una sequía extremadamente la cual duró 1 mes.

Para la combinación MSDI 2 histórico, la duración de sequías aumenta, variando en promedio de 3 a 4 meses, entre 1981 a 2006 se presentaron sequías prolongadas de 4 hasta 8 meses continuos, por mencionar algunos eventos de sequías

severamente secas entre 4 a 6 meses, se encuentra 1981 para los meses de abril a junio, 1983 y 1984 de julio a noviembre, 1993 en marzo a agosto, en el caso de sequias con duraciones de 8 meses, se encuentra, octubre de 1997 a mayo 1998, noviembre del 2003 a junio de 2004, y el año 2006 en los meses de enero a agosto. En la Figura 41-b, se observa la frecuencia de sequias, donde se presentaron 41 eventos severamente secos y 56 moderados, con duraciones de 2 y 3 meses, respectivamente.

Finalmente, para la combinación MSDI 3, en la Figura 41-d, se presento una reducción de los eventos con 23 sequias severas y 38 moderadas con duraciones aproximadas de 2 a 3 meses, al igual que el MSDI 1 y MSDI 2, se presentaron sequias prolongadas con duraciones que varían de 5 a 12 meses, algunos casos se evidenciaron en los meses de abril a agosto de 1992, con una duración de 5 meses, septiembre de 1997 a marzo de 1998 con una duración de 7 meses, y diciembre de 2000 a noviembre de 2001 con una duración de 12 meses.

Para los escenarios de cambio climático, en la Figura 41, se presenta la duración y frecuencia de los eventos de sequia, en el caso del RCP 4.5 se presentarán 165 sequías hidrometeorológicas (b), 189 sequías frente a las variables de precipitación y humedad del suelo (d) y finalmente 183 sequías agrícolas(f), con duraciones en promedio de 2 a 3 meses. En el escenario RCP 8.5 se presentarán menos eventos de sequias, 151 hidrometeorológicas, 178 sequias en las variables de precipitación y humedad del suelo, y para la última combinación 171 sequias agrícolas, los cuales tienen una duración en promedio de meses de 2 a 3 meses respectivamente. La mayor duración de sequía para el MSDI 1 en el RCP 4.5 como se observa en la Figura 41-a con un máximo de 8 sequias moderadas consecutivas que se presentarán en los meses de enero a agosto de 2077, con respecto al RCP 8.5 donde la máxima duración será de 7 meses consecutivos de sequias extremas, las cuales se presentarán febrero hasta agosto del año 2045.

Algunos eventos moderados a severamente secos con duraciones prolongadas para el RCP 4.5 entre 4 a 8 meses, se presentarán en el año 2021 en los meses de marzo a junio, 2025 en el mes de agosto hasta diciembre, y 2085 en los meses de febrero hasta mayo. La frecuencia de sequía para el del MSDI 1 también varía, en la Figura 41-b se observa que el RCP 4.5 tendrá, 101 moderadamente secas, 48 severamente secas y 16 extremadamente secas, mientras que el RCP 8.5, se presentarán 83 moderadas ,48 severas y 20 extremadamente secas.

En el índice multivariado MSDI2, que se presenta en la Figura 41-c, la duración promedio de sequía en ambos escenarios varía de 2 a 3 meses. En el RCP 4.5, algunas sequias prolongadas con duraciones de 4 a 6 meses, se presentarán en el mes de noviembre del 2020 a abril del 2021 con clasificación moderadamente secas, en el año 2030 en los meses de abril a julio se presentarán sequias extrema, para agosto de este mismo año se manifiesta una sequía severa y en los meses de septiembre a octubre una moderada, lo cual indica que en total se presentará 7

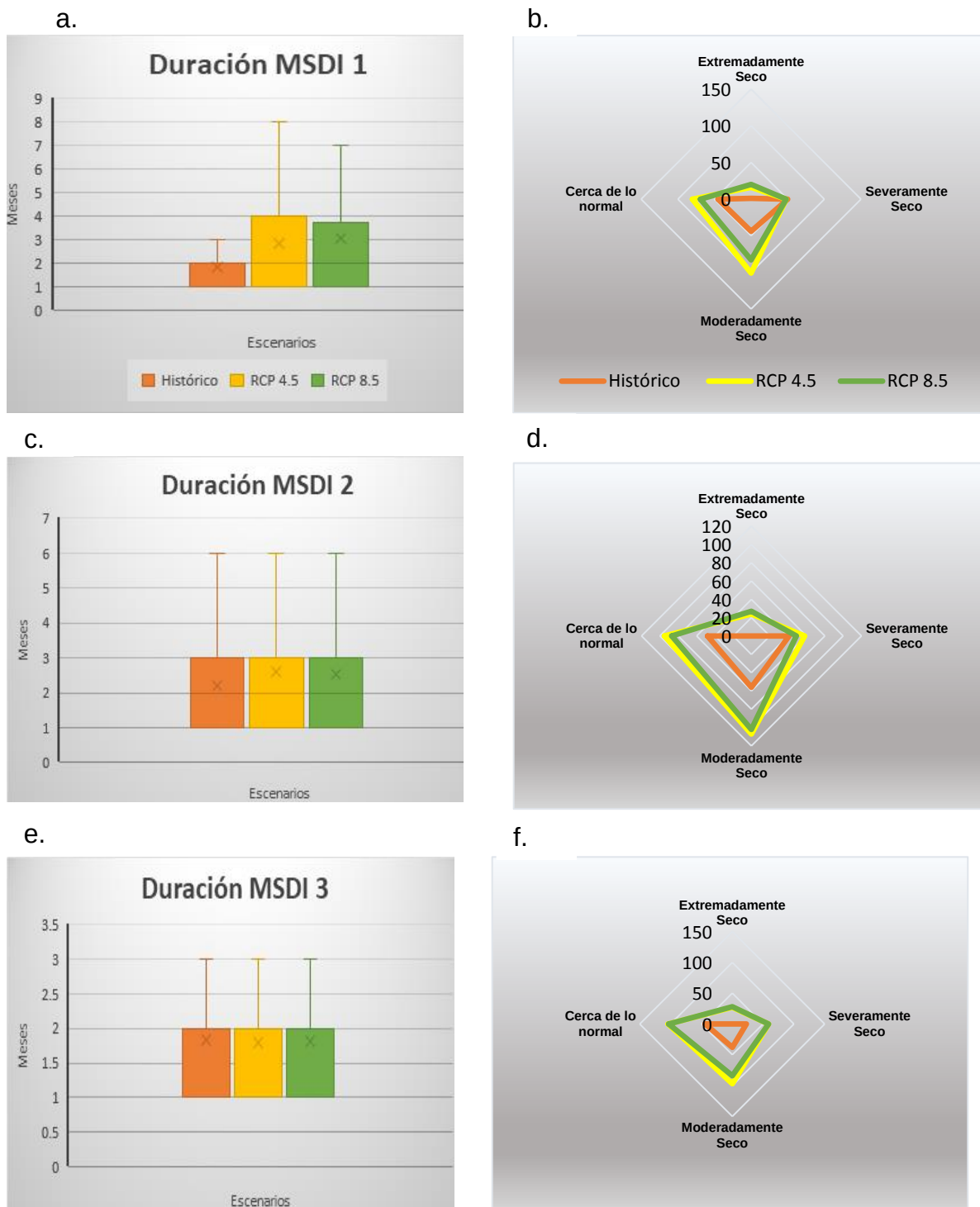
meses de sequía consecutiva, en el mes de marzo a julio del 2033 probablemente habrán sequías moderadas, entre otros (Anexo 5). En la Figura 41-d, se observa la frecuencia de los eventos de sequía, 24 sequías extremas, 58 sequías severas, 107 moderadamente secas.

Por el contrario, para el RCP 8.5, algunas sequías extremas prolongadas, se presentarán en el mes de enero a marzo del 2021, junio a agosto del 2030, octubre a noviembre de 2063, abril a junio de 2095, con duraciones de 2 a 4 meses. En la Figura 41, se observa que el RCP 8.5 tendrá, 27 extremadamente secas, 49 severamente secas y 102 moderadamente secas. Finalmente, en la combinación MSDI 3 para el escenario 4.5 se presentarán más eventos de sequía, 27 sequías extremas, 59 severas y 97 moderadas, para el escenario 8.5 se manifestaron 28 sequías extremas, 59 severas y 84 moderadas, la duración promedio de sequía de 2 a 3 meses. Algunas sequías moderadas y severas prolongadas que varían de 4 a 7 meses consecutivos, se presentarán en el año 2025 en los meses julio a diciembre, en septiembre del año 2027 hasta marzo del 2028, abril a septiembre del 2030, marzo hasta agosto del 2033, febrero a mayo de 2047, mayo a octubre de 2081. Algunos eventos extremos con duraciones que oscilan entre 4 a 6 meses, se manifestarán en meses de julio a octubre del 2039, febrero a julio del 2063, octubre a diciembre de 2091.

Para el escenario 8.5, algunas de las sequías severas y moderadas prolongadas con duraciones 4 a 7 meses, se presentarán en el mes de mayo hasta septiembre del 2023, febrero hasta agosto del 2027, abril a julio del 2041, enero hasta abril de 2047, febrero hasta agosto del 2050, febrero a mayo del 2067. En el caso de algunas sequías extremas con duraciones que oscilan entre 5 a 12 meses, se presentarán en los meses de mayo a septiembre del 2021 y 2045.

De acuerdo, a los resultados obtenidos algunos eventos futuros de sequía, se manifestarán en las temporadas de lluvia para ambos escenarios, es decir, en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre, como, por ejemplo: en el año 2030, tanto para el MSDI 1, MSDI 2 y MSDI 3, los meses de noviembre a abril se verán afectados por sequías de diferentes intensidades, otro evento similar ocurrirá, para los meses de abril a mayo del año 2062.

Figura 41. Resultados de Duración y Frecuencia del MSDI histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5. MSDI 1 (a, b), MSDI 2 (c, d) y MSDI 3 (e, f)



Fuente: Elaboración propia- Excel

5.14 CONCLUSIONES

- Al observar las series futuras de precipitación, las temporadas de lluvia persisten en los mismos meses que en el periodo histórico, entre marzo a mayo y septiembre a noviembre, y para los periodos secos en los meses de enero a febrero y junio hasta agosto.
- De acuerdo a la temperatura mínima y máxima, para el RCP 4.5 en promedio se presentará un incremento de 1.77°C, mientras que para el RCP 8.5 será de 3.7°C para finales de siglo, es decir, probablemente se vean afectado los cultivos en su crecimiento y productividad localizados en la zona de estudio.
- El modelo SWAT generó resultados satisfactorios de acuerdo con la métrica NSE, obteniendo ajustes en la calibración y validación de 0.51 y 0.61 respectivamente, representando la hidrología de la zona de estudio a través de los caudales.
- La simulación en el modelo SWAT de línea base, tuvo un mejor resultado gracias al insumo de precipitación distribuida, obtenida del proyecto earth2Observe, debido a que los datos in situ de esta zona son escasos y no se cuentan con suficientes estaciones que representen la variabilidad meteorológica en la subcuenca.
- Para los últimos 30 años del siglo XXI, los tres índices evaluados (SPI, SRI y SSWI), en ambos RCP, presentarán un comportamiento entre moderadamente húmedo y extremadamente húmedo, lo cual indica que probablemente en el sector agrícola, no se generen necesidades por la disponibilidad del recurso hídrico.
- Las proyecciones del periodo de 2012 a 2099 muestran la mayor frecuencia de sequía agrícola y meteorológica para el RCP 4.5, mientras que para el RCP 8.5 la mayor frecuencia se presentará en las sequías hidrológicas y agrícolas.
- Definir la sequía a partir de una sola variable como: precipitación, humedad del suelo o escorrentía, puede no ser suficiente para una evaluación de riesgos y una toma de decisiones confiables, por ende, un análisis completo de los eventos de sequía requiere un estudio conjunto como lo proporciona el índice multivariado de sequía, pues reduce la heterogeneidad en las probabilidades de ocurrencia de los diferentes eventos de sequía, así como los de humedad.

- El RCP 4.5 presentará mayor número de sequías, en todas las combinaciones del índice multivariado, en comparación a línea base y RCP 8.5. Las duraciones de sequía para los 3 MSDI se encuentra en promedio entre 2 a 3 meses.
- Las sequías resultantes de la precipitación y humedad del suelo, serán más frecuentes en las condiciones futuras, sin embargo, las sequías agrícolas serán más intensas.
- A partir del enfoque multivariado del MSDI, la amenaza en los periodos futuros será menor, sin embargo, se presentarán eventos de sequía severos y extremadamente secos, los cuales pueden influir directamente en la economía del sector agrícola, debido a las posibles pérdidas de siembra de cultivos y oportunidades laborales para la población de la subcuenca.

5.15 RECOMENDACIONES

- Estimar la demanda agrícola de Cunday teniendo en cuenta datos más actualizados, promoviendo la participación ciudadana como agricultores, y funcionarios públicos, para alcanzar datos más certeros.
- Crear medidas de mitigación y adaptación para enfrentar eventos climáticos extremos en la zona de estudio, como las sequías que se presentarán en los siguientes años, para obtener la menor repercusión en el sector agrícola y asegurar la demanda de alimentos en la población.
- Se deben coordinar actividades/ campañas que capaciten a los actores involucrados del sector agrícola, comunicando la problemática de cambio climático, implementando estrategias que reduzcan la probabilidad de futuras pérdidas económicas y fortalezcan los esfuerzos.
- Promover el monitoreo continuo y de alta calidad en la zona, para diferentes variables hidroclimatológicas, facilitando la información en futuros estudios y obteniendo mejores resultados.
- Ampliar la evaluación de la amenaza por aspectos económicos o sociales que tienen una influencia en doble vía, en el ambiente y sostenibilidad del sistema soci ecológico.

6. REFERENCIAS

- [1] IDEAM, PNUD, MADS, DNP,, Inventario nacional y departamental de Gases de Efecto Invernadero- Colombia, Bogotá, 2016.
- [2] Z. Hao and A. AghaKouchak, "Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model," *Advances in Water Resources*, vol. 57, pp. 12-18, 2013. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>. DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.03.009.
- [3] M. H. u. Rahman *et al*, "Multi-model projections of future climate and climate change impacts uncertainty assessment for cotton production in Pakistan," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 253-254, pp. 94-113, 2018. Available: <http://www.sciencedirect.com/craiustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0168192318300455>. DOI: <https://doi.org/craiustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.agrformet.2018.02.008>.
- [4] K. Ahmed *et al*, "Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, (11), pp. 4803-4824, 2019. Available: <https://search.proquest.com/docview/2317516428>. DOI: 10.5194/hess-23-4803-2019.
- [5] B. Kamali *et al*, "Multilevel Drought Hazard Assessment under Climate Change Scenarios in Semi-Arid Regions—A Case Study of the Karkheh River Basin in Iran," *Water*, vol. 9, (4), pp. 241, 2017. Available: <https://search.proquest.com/docview/1899789424>. DOI: 10.3390/w9040241.
- [6] IPCC-TGICA, "General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2." 66 pp, 2007.
- [7] Charlotte, Jarvis y Ramírez. "Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático", 2013.
- [8] Acción Climática. Available: <https://www.accionclimatica.net/>
- [9] D. C. Colombiana, «Glosario DC,» [En línea]. Available: <https://www.defensacivil.gov.co/index.php?idcategoria=179>. [Último acceso: Abril 2020].

- [10] Terminología et al, "Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes," 2017. Available: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf;jsessionid=CEFC8DD78036A1E956E352369E66EBA0?sequence=2>.
- [11] D. A. Wilhite, M. V. K. Sivakumar and R. Pulwarty, "Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy," *Weather and Climate Extremes*, vol. 3, (C), pp. 4-13, 2014. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094714000164>. DOI: 10.1016/j.wace.2014.01.002.
- [12] M. Mendez, "Variabilidad Espacio - Temporal de la Sequía Meteorológica en México: Aspectos Dinámicos", Universidad Autónoma de México, 2010.
- [13] Ó Marcos Valiente, "Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación," *Investigaciones Geográficas*, (26), pp. 59-80, 2001. Available: https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____935::da14dda5bf89fba7eb9059874b2c7806. DOI: 10.14198/INGEO2001.26.06.
- [14] X. Tu et al, "Multivariate design of socioeconomic drought and impact of water reservoirs," *Journal of Hydrology*, vol. 566, pp. 192-204, 2018. Available: <http://www.sciencedirect.com/craiustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S002216941830698X>. DOI: <https://doi-org.craiustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.jhydrol.2018.09.012>
- [15] IPCC, Cambio Climático, Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, Suiza, 2013.
- [16] IPCC, Climate Change synthesis report summary for policymakers, 2014.
- [17] Fundación Biodiversidad, Oficina Española de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología, Centro Nacional de Educación Ambiental "Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC grupo de trabajo I, Cambio Climático: Bases Físicas", Madrid 2013.
- [18] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. 2015. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- [19] Asociación Española Agricultura de Conservación, La Agricultura y el cambio climático, Córdoba, 2015.

[20] Eyherávide G, "Bases para el Manejo del Cultivo de Maíz", Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires. Available: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_bases_para_el_manejo_de_maiz_reglon_100-2_2.pdf

[21] Seminis, «¿Cómo afectan las altas temperaturas a nuestros cultivos?», 05 junio 2017. [En línea]. Available: <https://www.seminis.mx/blog-como-afectan-las-altas-temperaturas-nuestros-cultivos/>. [Último acceso: 15 julio 2020]. <https://www.seminis.mx/blog-como-afectan-las-altas-temperaturas-nuestros-cultivos/>

[22] Cortolima, Plan Integral De Gestión Del Cambio Climático Territorial Del Tolima "Ruta Dulima. El Tolima Enfrenta El Cambio En El Clima", Tolima. 2018.

[23] T. Yeshitila *et al*, "Chapter 32 - Climate-induced flood inundation in Fogera-Dera Floodplain, Lake Tana basin, Ethiopia," *Extreme Hydrology and Climate Variability*, pp. 407-418, 2019. Available: <http://www.sciencedirect.com/crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/B9780128159989000324>. DOI: <https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/B978-0-12-815998-9.00032-4>.

[24] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELERÍA. "Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático", 2015.

[25] J. J. Dooley and K. V. Calvin, "Temporal and spatial deployment of carbon dioxide capture and storage technologies across the representative concentration pathways," *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 5845-5852, 2011. Available: <http://www.sciencedirect.com/craiustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S1876610211008629>. DOI: <https://doi-org.craiustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.egypro.2011.02.583>

[26] IPCC, Cambio climático 2014: Informe de síntesis. "Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, " Ginebra, Suiza, 157 págs., 2014

[27] United States Agency for International Development by Tetra Tech, ARD, "A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections," 2014.

[28] Fundación para la investigación del clima, "Descripción de la metodología de downscaling estadístico FICLIMA", Available: https://www.ficlima.org/metodologia_downscaling_estadistica_FICLIMA.pdf.

- [29] Rajczak, J., Kotlarski, S., Salzmänn, N. and Schär, C., "Robust climate scenarios for sites with sparse observations: a two-step bias correction approach" *International Journal of Climatology*, 36, 1226-1243, 2016.
- [30] Kotlarski, S., Ivanov, M. and Schär, C., "Bias-corrected transient scenarios at the local scale and at daily resolution". CH2011 Extension Series No. 4, 21 pp, 2017.
- [31] Feigenwinter I, Kotlarski S, Casanueva A, Fischer AM, Schwierz C, Liniger MA, "Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland", Technical Report MeteoSwiss, 270, 44 pp, 2018.
- [32] Uribe, "Conceptos Básicos y guía rápida para el usuario SWAT", 2010
- [33] Cañon J, "Estimación de caudales a partir de ensambles hidrológicos multimodelo a diferentes escalas temporales en la cuenca del río Pradó, Bogotá", UNAL, 2019.
- [34] IDEAM, Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica, Bogotá, 2018.
- [35] Albuja E., Tenelanda Daniel, Desarrollo de un modelo conceptual de lluvias-escurrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca Altoandina del río Zhurucay, Cuenca - Ecuador, 2014.
- [36] Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- [37] J. Cabrera, Calibración de Modelos Hidrológicos, Facultad de Ingeniería Civil. UNAL.
- [38] K. C. Abbaspour, "User Manual SWAT Calibration and Uncertainty Programs, The University of Sidney", 2017.
- [39] M. P. Thavhana, M. J. Savage and M. E. Moeletsi, "SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 105, pp. 115-124, 2018.
Available: <http://www.sciencedirect.com/craiustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S1474706517300918>. DOI: <https://doi-org.craiustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.pce.2018.03.012>.
- [40] K. C. Abbaspour *et al*, "Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT," *Journal of Hydrology*, vol. 333, (2), pp. 413-430, 2007.

Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406004835>.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>.

[41] Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua, Manual de indicadores e índices de sequía, Ginebra, 2016. Available: https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016

[42] Hayes, Michael J.; Svoboda, Mark D.; and Wilhite, Donald A., "Chapter 12 Monitoring Drought Using the Standardized Precipitation Index" (2000). Drought Mitigation Center Faculty Publications

[43] Shraddhanand Shukla, Andrew W. Wood, Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2007

[44] u, Yaping & Wang, Lei & Ross, Kenton & Liu, Cuiling & Berry, Kimberly "Standardized Soil Moisture Index for Drought Monitoring Based on Soil Moisture Active Passive Observations and 36 Years of North American Land Data Assimilation System Data: A Case Study in the Southeast United States", 2018.

[45] Organización Meteorológica Mundial "Índice normalizado de precipitación". 2012 Available: https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf

[46] Novalés, A., Cópulas., Universidad Complutense. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-41459/Copulas.pdf>

[47] Ihaka and R. Gentleman, "R: A Language for Data Analysis and Graphics," Journal of Computational and Graphical Statistics, vol. 5, (3), pp. 299-314, 1996. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10618600.1996.10474713>. DOI: 10.1080/10618600.1996.10474713.

[48] RStudio. Available: <https://github.com/rstudio/rstudio/>

[49] M. Hanel, Package 'musica', 2016. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/musica/index.html>

[50] S., Beguería, Sergio M. Vicente-Serrano, Package 'SPEI', 2017. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>

[51] H. Wickham, Package 'ggplot2', 2020. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>

- [52] D. Zamora, Package 'IDFtool', 2020. Available: <https://github.com/dazamora/IDFtool>
- [53] H. Wickham, Package 'plyr', 2020. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/plyr/index.html>
- [54] Congreso de la República, Ley 1523 de 2020 Available: https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3713_documento.pdf
- [55] Capítulo 5. Escorrentía, Available: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%205.pdf
- [56] IDEAM, Concentraciones globales y tasas de crecimiento o decrecimiento Available: <http://www.meteoaeronautica.gov.co/ozono-troposferico-iii>
- [57] IDEAM, Glosario. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>
- [58] Universidad de la República Uruguay, EL SISTEMA CLIMÁTICO DE LA TIERRA. Available: http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/teorico_climatologia_2016/TEMA1_climatologia2016.pdf
- [59] IPCC., Glosario de términos Available: <https://archive.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>.
- [60] J. Cabrera, Universidad Nacional de Ingeniería., Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.) Available: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_8.pdf
- [61] Alcaldía Municipal de Cunday, esquema de ordenamiento territorial. Available: https://cundaytolima.micolombiadigital.gov.co/sites/cundaytolima/content/files/000164/8160_tomo-i-diagnostico.pdf
- [62] CORTOLIMA, POMCA Río Prado, Tolima, 2002.
- [63] E., Rodríguez, I., Sánchez, N., Duque, P., Arboleda, C., Vega, D., Zamora, P., López, A., Kaune, M., Werner, C., García, S., Burke "Uso combinado de datos hidrometeorológicos locales y globales con modelos hidrológicos para la gestión de los recursos hídricos en la Cuenca macro del Magdalena - Cauca – Colombia". Available: <https://www.springerprofessional.de/en/combined-use-of-local-and-global-hydro-meteorological-data-with-/16759862>
- [64] Chaves C., B. Jaramillo R., A. "Regionalización de la temperatura del aire en Colombia por Cenicafe" Available: <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/860>

- [65] Retallack, B. J. (1973). Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV. Publicación Organización Meteorológica Mundial OMM - 266. Vol. I. Ginebra, Suiza
- [66] Departamento del Tolima, «Clima Departamento del Tolima,» [En línea]. Available: <https://departamento-del-tolima09.webnode.com.co/clima/>. [Último acceso: 10 julio 2020].
- [67] Castillo Rodrigo & Montero Rosangélica, “Proyecciones de cambio climático del Sistema Ártico basado en el análisis de multi-modelos de los escenarios de emisiones de CO₂”. Revista de climatología, 2017.
- [68] Herger, N., Abramowitz, G., Knutti, R., Angélil, O., Lehmann, K., and Sanderson, B. M.: Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties, Earth Syst. Dynam., 9, 135–151, <https://doi.org/10.5194/esd-9-135-2018>, 2018.
- [69] Sa'adi, Z., Shahid, S., Chung, E.-S., and bin Ismail, T.: Projection of spatial and temporal changes of rainfall in Sarawak of Borneo Island using statistical downscaling of CMIP5 models, Atmos. Res., 197, 446–460, 2017.
- [70] Salman, S. A., Shahid, S., Ismail, T., Ahmed, K., and Wang, X.-J.: Selection of climate models for projection of spatiotemporal changes in temperature of Iraq with uncertainties, Atmos. Res., 213, 509–522, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.008>, 2018a.

7. ANEXOS

Anexo 1. Unidades Cartográficas del Suelo

Las unidades se componen de tres letras mayúsculas, que representan la primera el paisaje, la segunda el clima y la última se refiere al contenido pedológico de la unidad de mapeo. En la Tabla 19 y Tabla 20, **Tabla 20**. Unidades de Climase muestra la relación de los símbolos y su significado [POMCA]

Paisaje

Tabla 19. Unidades de Paisaje

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
M	Paisaje de Montaña
L	Paisaje de lomerío
P	Paisaje de piedemonte
V	Paisaje de valle

Fuente: POMCA

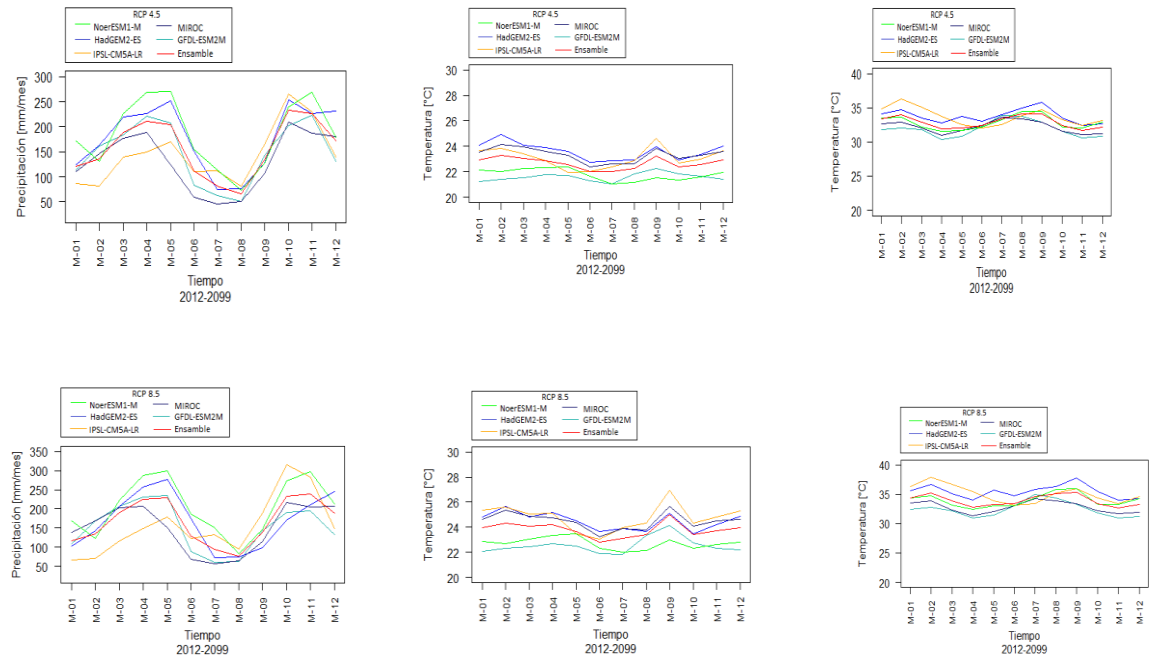
Clima

Tabla 20. Unidades de Clima

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
N	Clima Nival
A	Clima Subnival pluvial
D	Clima Extremadamente frío muy húmedo
G	Clima muy frío y muy húmedo
K	Clima frío y muy húmedo
Q	Clima medio húmedo y muy húmedo
R	Clima medio y seco
V	Clima cálido húmedo
W	Clima cálido seco

Fuente: POMCA

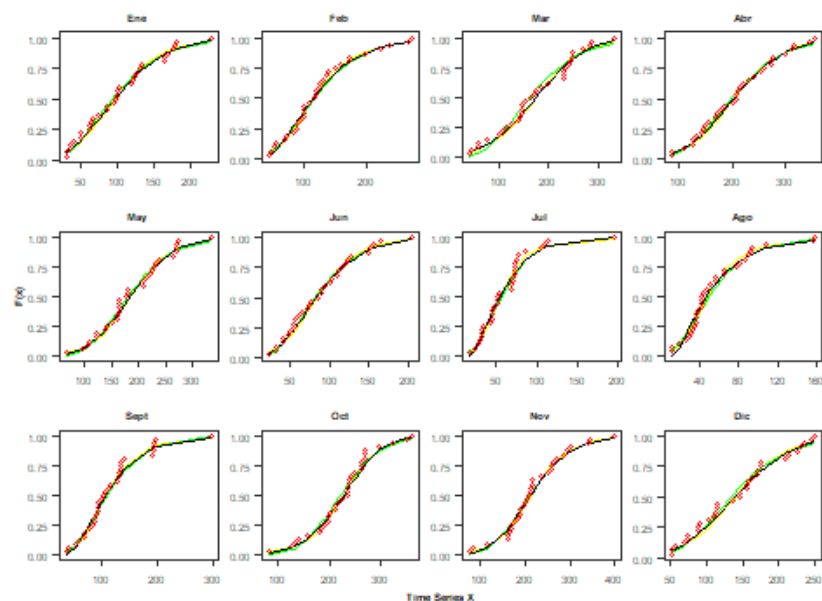
Anexo 2. Ensamblas de los modelos de circulación para precipitación y temperatura, en los escenarios RCP 4.5 (a) y RCP 8,5 (b).



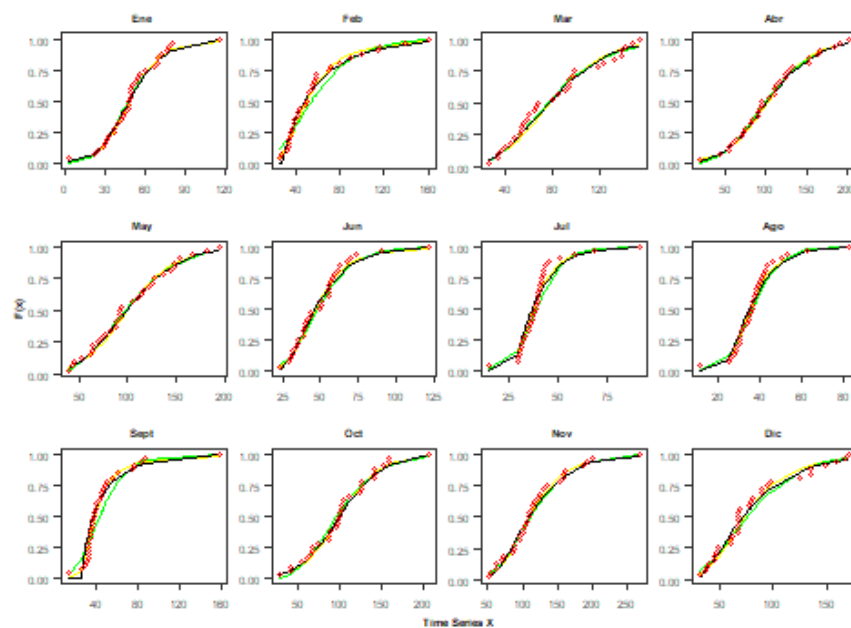
Fuente: Elaboración propia- RStudio

Anexo 3. Resultados funciones de distribución, (a) SPI, (b) SRI y (c) SSWI

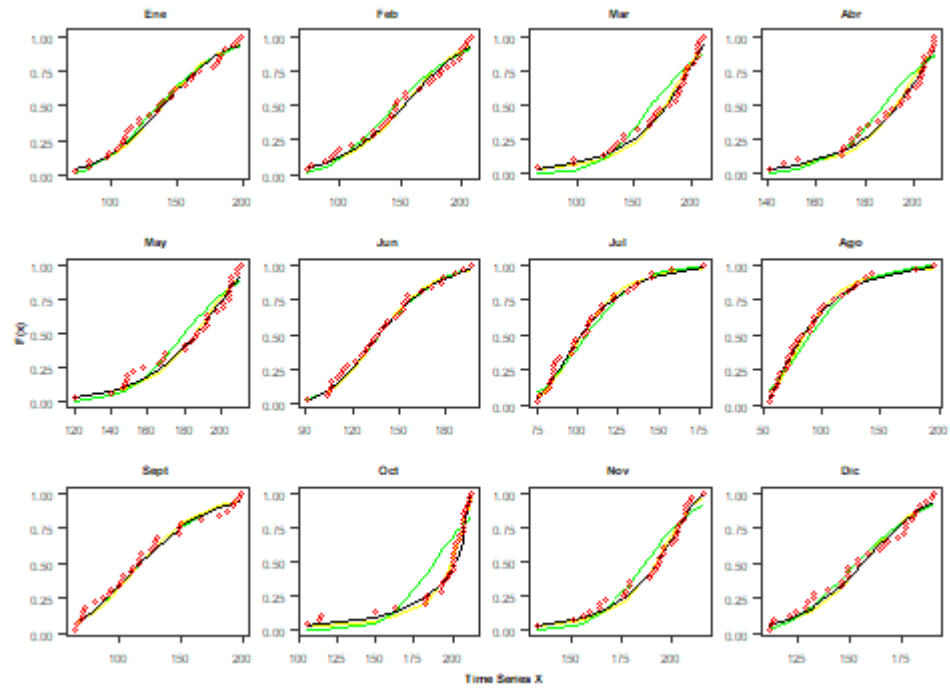
a.



b.



C.

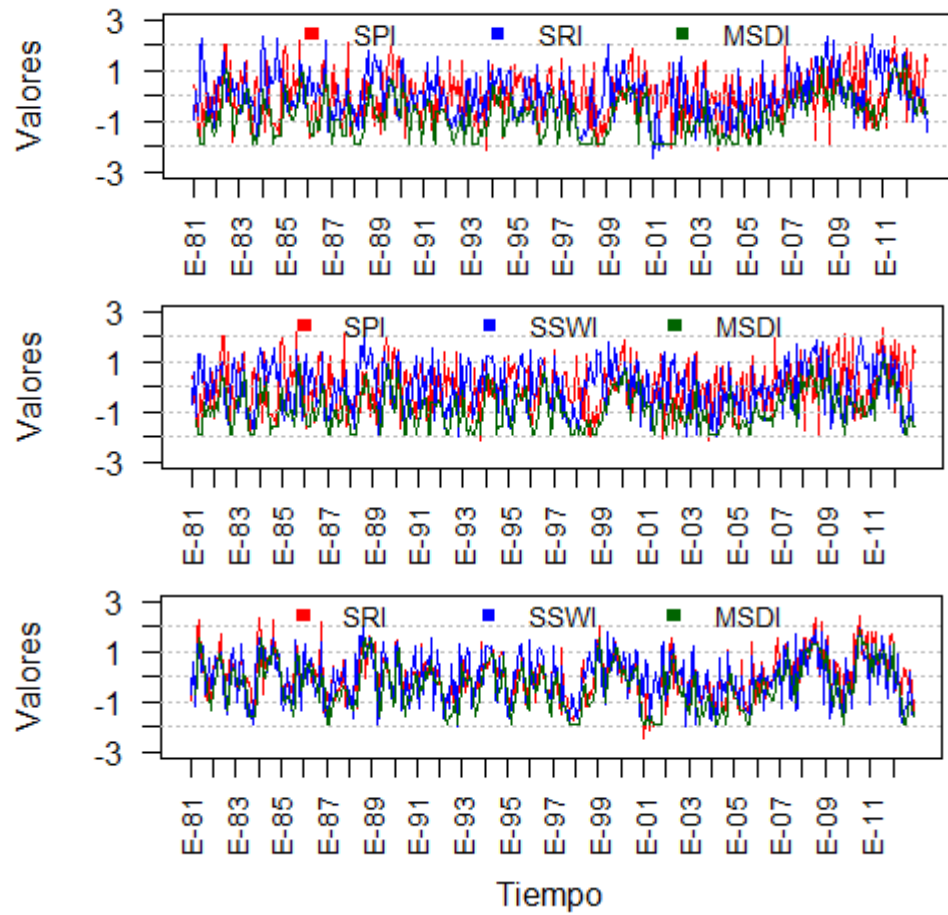


Leyenda

Funciones de distribución	
Logística	
Gamma	
Pearson III	
Empírica	

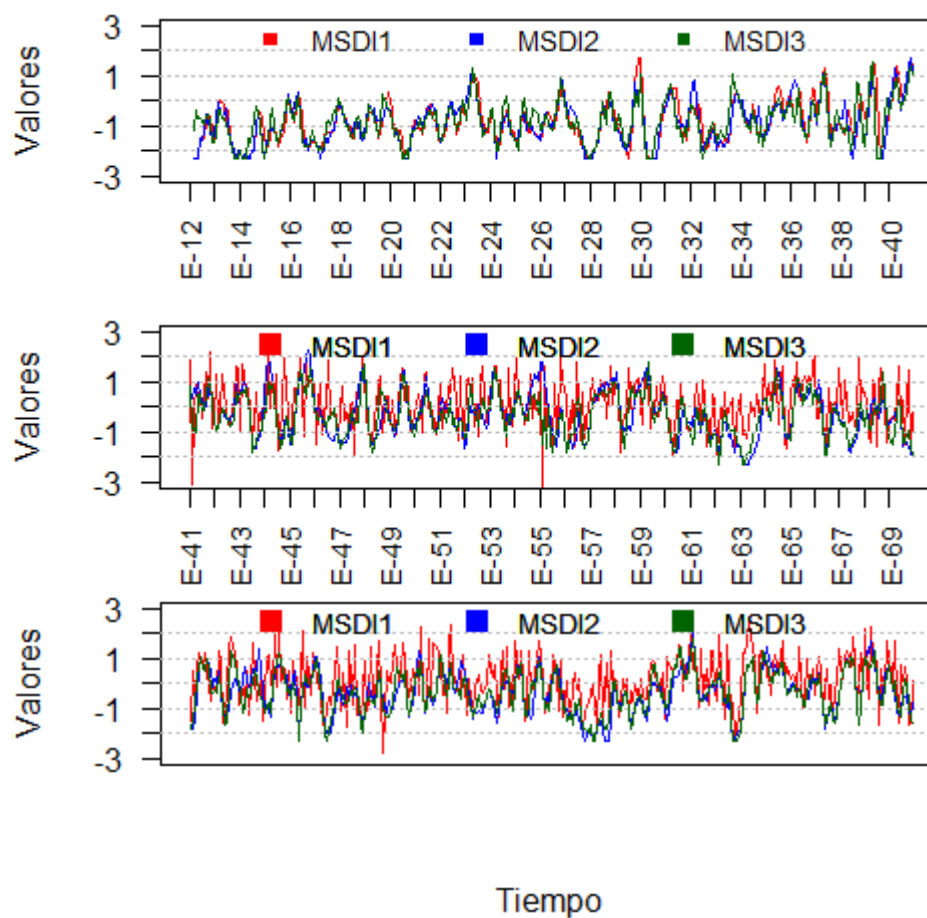
Fuente: Elaboración propia- RStudio

Anexo 4. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el periodo 1981-2012



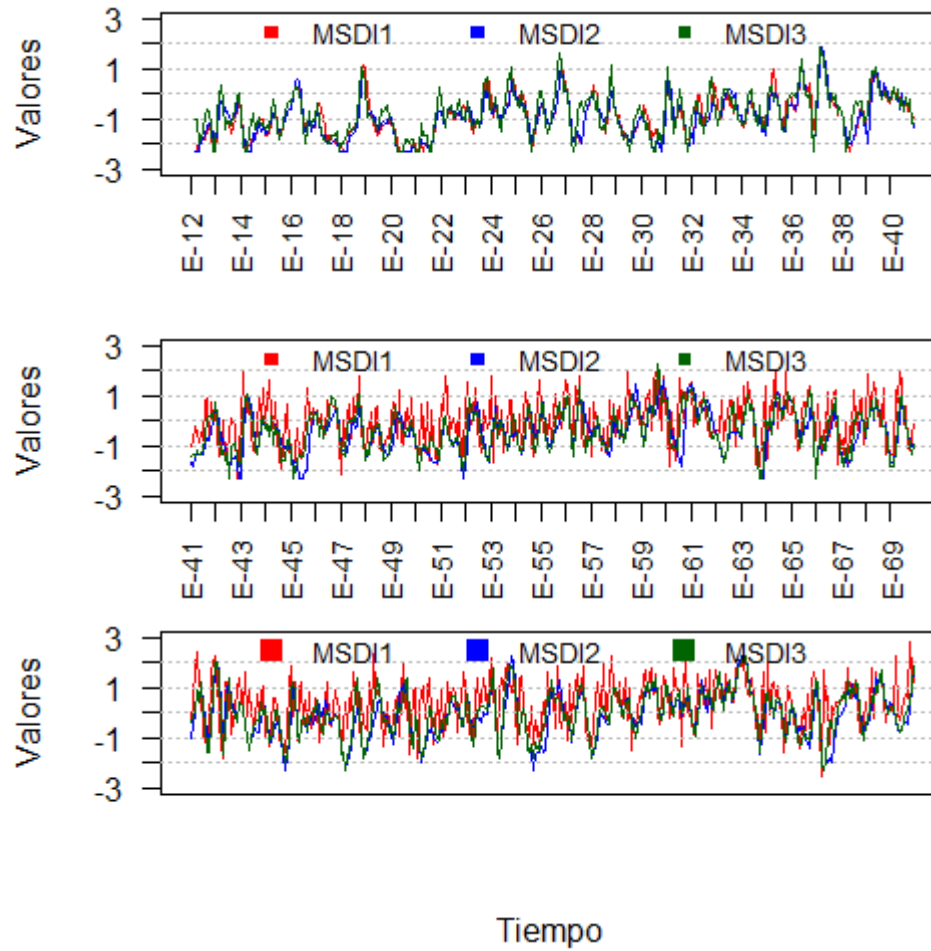
Fuente: Elaboración propia- RStudio

Anexo 5. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el RCP 4.5



Fuente: Elaboración propia- RStudio

Anexo 6. Comparación mensual multianual de MSDI 1, MSDI 2, MSDI 3 para el RCP 8.5



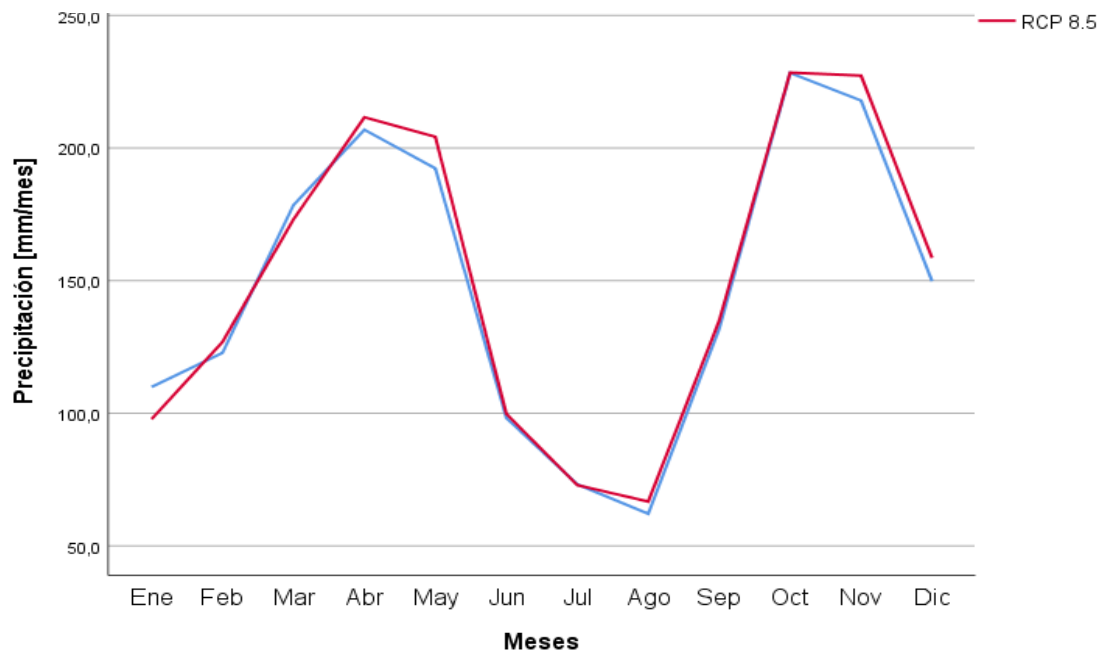
Fuente: Elaboración propia- RStudio

Anexo 7. Años variabilidad climática fenómeno El Niño y La Niña, periodo 1982 a 2012

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1982	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2.0	2.2	2.2
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
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
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	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2

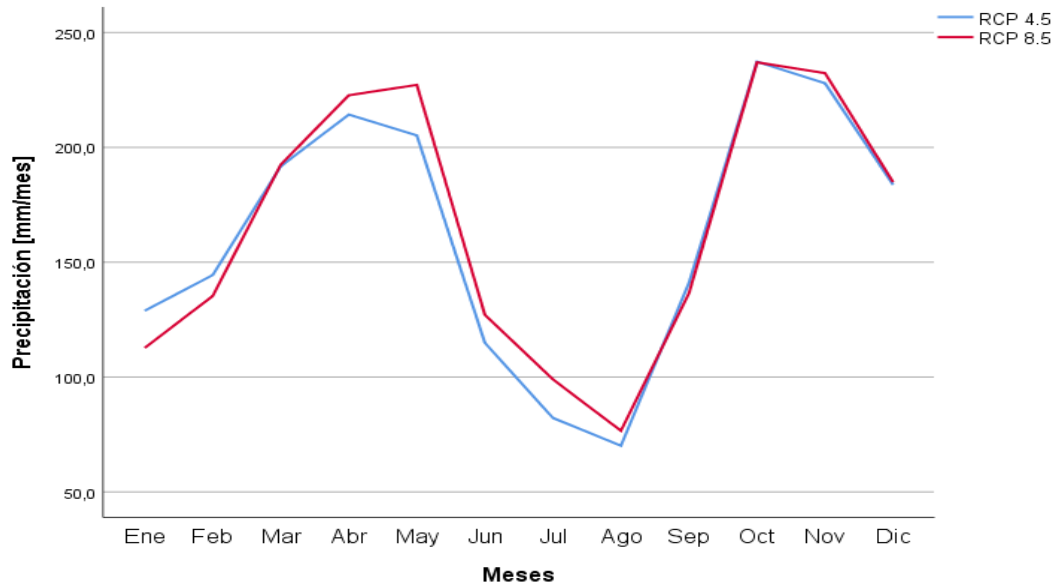
Fuente: [55]

Anexo 8. Precipitación mensual multianual 2012- 2040



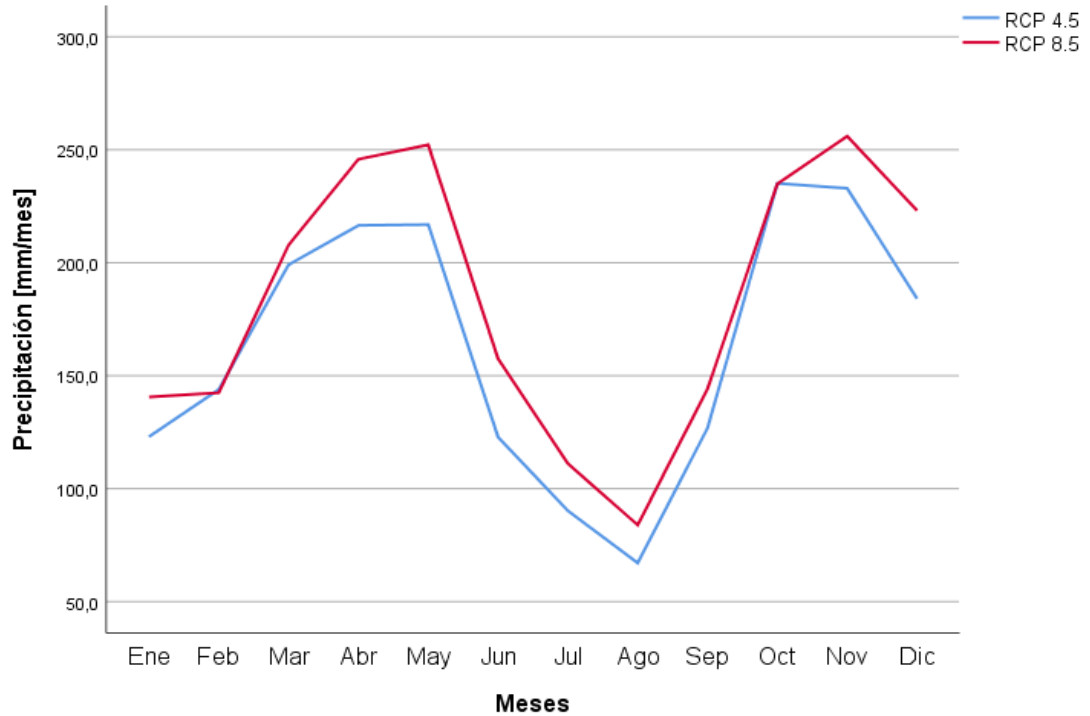
Fuente: Elaboración Propia -SPSS

Anexo 9. Precipitación mensual multianual 2041 - 2069



Fuente: Elaboración Propia –SPSS

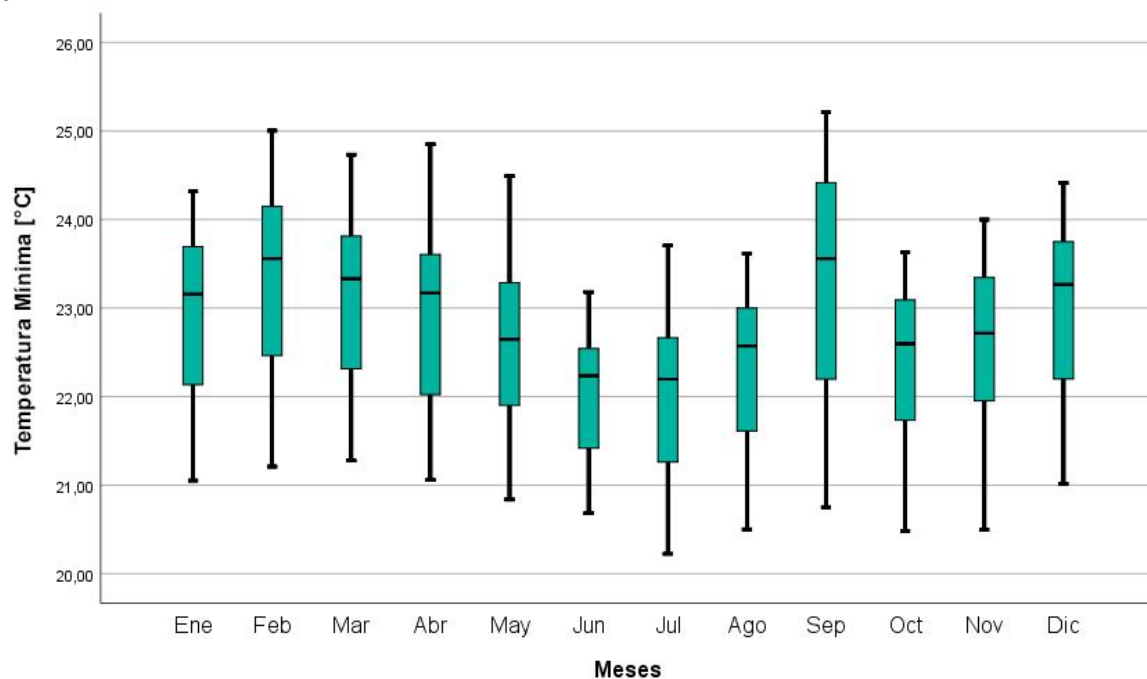
Anexo 10. Precipitación mensual multianual 2070 - 2099



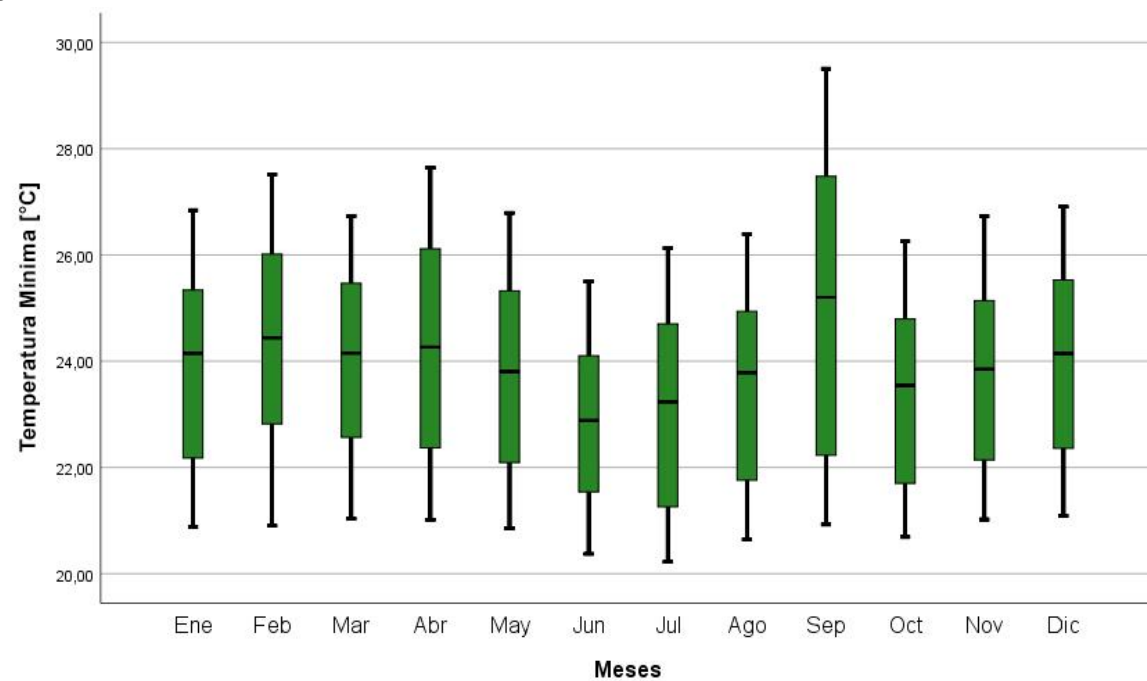
Fuente: Elaboración Propia –SPSS

Anexo 11. Boxplot temperatura mínima mensual multianual RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b)

a.

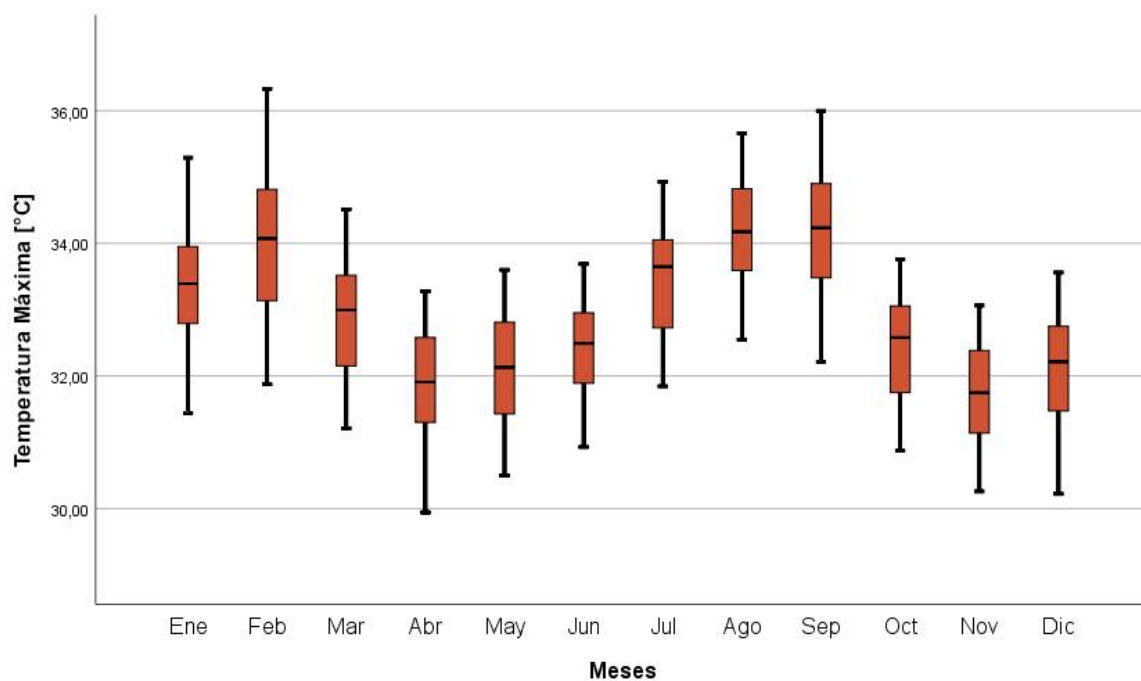


b.



Anexo 12. Boxplot temperatura máxima mensual multianual RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b)

a.



b.

