



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
Julio Garavito**

Tesis

Maestría en Ingeniería Civil

Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

**Análisis espacio-temporal de eventos de sequía en la cuenca del Río Magdalena – Cauca,
Colombia.**

Juan Manuel Cotrino Palma

Fabio Aguilar Carrillo

Bogotá D.C., Agosto de 2021

Análisis espacio-temporal de eventos de sequía en la cuenca del Río Magdalena – Cauca,
Colombia.

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos
y Medio Ambiente

Ing. Germán Ricardo Santos Granados, MSc., PhD.

Director

Ing. Gerald Augusto Corzo Pérez, MSc., PhD.

Codirector

Bogotá D.C., Agosto de 2021



La tesis de maestría titulada “Análisis espacio-temporal de eventos de sequía en la cuenca del Río Magdalena – Cauca, Colombia.”, presentada por Juan Manuel Cotrino Palma y Fabio Aguilar Carrillo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la Tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Codirector

Gerald Augusto Corzo Pérez

Jurado

Germán Eduardo Acero Riveros

Bogotá D.C., 06 de Septiembre de 2021 (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Juan Manuel Cotrino Palma
Fabio Aguilar Carrillo

Tabla de Contenido

	Pág.
Capítulo 1. Generalidades	10
1.1. Resumen ejecutivo	10
1.2. Introducción.....	11
1.3. Justificación.....	13
1.4. Objetivos	17
1.4.1. Objetivo general.....	17
1.4.2. Objetivos específicos.	17
Capítulo 2. Marco conceptual	19
2.1. Área de estudio.....	19
2.2. Regímenes de Precipitación en la región	26
2.3. Modelo hidrológico.	28
2.3.1. Descripción general y funcionamiento.	28
2.3.2. Datos de entrada.....	31
2.3.3. Calibración del modelo.	32
2.4. Tipos de sequía.....	34
2.5. Índices de sequía	36
2.5.1. Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI).	37
2.5.2. Índice Estandarizado de Humedad de los Suelos (SSI).	38
2.5.3. Índice Estandarizado de Déficit de Evapotranspiración (SEDI).....	39
2.6. Metodología para caracterización de las sequías.	40
2.7. Análisis Espacio-Temporal.	43
2.7.1. Análisis de áreas no contiguas de sequía (NCDA).	43
2.7.2. Análisis de áreas contiguas de sequía (CDA).	44
Capítulo 3. Metodología para la caracterización hidrológica	45
3.1. Datos y ajuste de la información recopilada	45
3.2. Estructuración del modelo hidrológico	46
3.3. Cálculo de los DI.....	48
3.4. Análisis NCDA y CDA	50
Capítulo 4. Resultados	53
4.1. Modelo hidrológico	53
4.2. Índices de sequía	58
4.2.1. Índice estandarizado de escorrentía - SRI.....	59
4.2.2. Índice estandarizado de humedad del suelo - SSI.....	61
4.2.3. Índice estandarizado de déficit de evapotranspiración - SEDI	64
4.2.4. Comparación entre los índices SRI, SSI y SEDI	66
4.2.4.1. Correlación de estadísticas entre índices.....	66
4.2.4.2. Comparación de índices de sequía en una celda dada.....	71
4.2.4.3. Clasificación de la sequía de acuerdo a su intensidad.....	74
4.2.4.4. Porcentaje de área en sequía de acuerdo a los índices	77
4.3. Análisis NCDA y CDA	82
4.3.1. Análisis departamental.....	93
4.3.2. Análisis por pisos térmicos	101
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	107

Capítulo 6. Discusiones.....	111
Capítulo 7. Bibliografía.....	113

Tabla de Figuras

	Pág.
Figura 1. Épocas de ocurrencia de fenómenos El Niño clasificados por intensidad y duración, de acuerdo a la magnitud de las anomalías positivas de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) registrada en el océano Pacífico central (Región Niño3). Fuente: Adaptado de Montealegre (2014) y NOAA's Climate Prediction Center Internet Team, (2019)	12
Figura 2. Localización de la macro cuenca Magdalena-Cauca. Fuente: Autores.	20
Figura 3. Precipitación vs Caudal en subcuencas Magdalena-Cauca periodo 2000-2015. Fuente: Autores.	22
Figura 4. Caudales medios mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015. Fuente: Autores.	23
Figura 5. Caudales mínimos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015. Fuente: Autores.	24
Figura 6. Caudales máximos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015. Fuente: Autores.	25
Figura 7. Precipitación media anual cuenca Magdalena-Cauca (mm). Plano sin escala. Recuperado del Estudio ambiental de la cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. CORPOMAGDALENA, 2001, pág. 63.....	27
Figura 8. Representación gráfica del modelo hidrológico HBV y sus procesos. Fuente: adaptado de Abdo et al. (2009)	29
Figura 9. Proceso de transformación del modelo HBV entre celdas. Fuente: adaptado de (Farrag, 2018b).	31
Figura 10. Puntos de calibración del modelo y sus gráficas de caudal medio mensual multianual. Nombre [ID] (fila, columna). Fuente: Autores.	34
Figura 11. Condición de sequía para una variable de interés. Fuente: Adaptada de Yevjevich (1967).	41
Figura 12. Diagrama de flujo proceso de calibración del modelo HBV. Fuente: Autores.	46
Figura 13. Diagrama de flujo para el montaje del modelo hidrológico. Fuente: Autores.	48
Figura 14. Esquema del cálculo de índices de sequía y su análisis temporal. Fuente: Autores. ..	50
Figura 15. Esquema del cálculo de percentiles en una celda dada, para análisis NCDA y CDA para una variable y un mes en particular (enero) para todo el periodo de análisis. Fuente: Autores. ..	51
Figura 16. Determinación del threshold por medio de análisis de percentiles. Fuente: Autores..	51
Figura 17. Threshold suavizado para la determinación de eventos de sequía. Fuente: Autores...	51
Figura 18. Comportamiento de la escorrentía en las celdas que corresponden a las estaciones de caudal para los periodos de calibración y validación. (a) CALAMAR, (b) PENONCITO, (c) LAS	

FLORES, (d) PUERTO BERRÍO, (e) PURIFICACIÓN, (f) RÍO ANGOSTURA. Fuente: Autores.	56
Figura 19. Coeficientes de rendimiento del proceso de calibración para las estaciones escogidas. (a) RMSE; (b) NSE; (c) MAE; (d) Correlation. Fuente: Autores.	58
Figura 20. Índice de sequía SRI para celdas r108c88 y r121c91. Fuente: Autores.	61
Figura 21. Índice de sequía SSI para celdas r108c88 y r121c91. Fuente: Autores.	63
Figura 22. Índice de sequía SEDI para celdas r108c88 y r121c91. Fuente: Autores.	66
Figura 23. Matrices de correlación de diferentes estadísticas entre los índices de sequía. Fuente: Autores.	68
Figura 24. Estadísticas de índices de sequía espacialmente distribuidas. Fuente: Autores.	71
Figura 25. Índices de sequía a través del tiempo en celdas específicas. Fuente: Autores.	73
Figura 26. Ubicación esquemática de las celdas: (a) r121c91 y (b) r108c88. Fuente: Autores.	74
Figura 27. Desarrollo de la sequía en un periodo específico de acuerdo con los índices de sequía. (a) SRI, (b) SSI, (c) SEDI. Fuente: Autores.	76
Figura 28. Porcentaje de área en sequía (PDA) para: (a) SRI, (b) SSI, (c) SEDI. Fuente: Autores.	79
Figura 29. PDA para índices de sequía: (a) SRI, (b) SSI, (c) SEDI. Fuente: Autores.	82
Figura 30. Comportamiento de la escorrentía en la celda r108c88 en el año 2010. Percentiles 60 (a), 80 (b) y 95 (c). Fuente: Autores.	84
Figura 31. Comportamiento de la humedad del suelo en la celda r108c88 en el año 2010. Percentiles 60 (a), 80 (b) y 95 (c). Fuente: Autores.	84
Figura 32. Porcentaje de área en sequía (PDA) de acuerdo con el análisis NCDA y diferentes percentiles, calculado a partir de: (a) escorrentía y (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	86
Figura 33. PDA para diferentes percentiles: (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	87
Figura 34. Correlación entre los DI y percentiles del análisis NCDA para: (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	90
Figura 35. Análisis NCDA y CDA en una fecha particular para: (a) escorrentía – percentil 85, (b) humedad del suelo – percentil 80. Fuente: Autores.	91
Figura 36. Número de clusters de sequía (análisis CDA) para: (a) escorrentía y (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	93
Figura . Mapa de sectorización de la Cuenca Magdalena – Cauca por departamentos. Fuente: Autores.	93

Figura . PDA sectorizado por departamentos teniendo como referencia el área total de la cuenca. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	96
Figura . PDA sectorizado por departamentos teniendo como referencia su propia área. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.....	99
Figura . Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por departamentos.	101
Figura . Mapa de sectorización de la cuenca Magdalena – Cauca por pisos térmicos. Fuente: Autores.....	102
Figura . PDA sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia el área total de la cuenca. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	103
Figura . PDA sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia su propia área. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.....	104
Figura . PDA agrupado sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia el área total de la cuenca. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores	105
Figura . PDA agrupado sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia su propia área. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.	105
Figura . Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por pisos térmicos.....	106

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Oferta hídrica cuenca Magdalena-Cauca según IDEAM	21
Tabla 2. Caudales medios mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015	22
Tabla 3. Caudales mínimos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015.....	23
Tabla 4. Caudales máximos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015	24
Tabla 5. Pisos térmicos y regímenes de temperatura para escalas generales.....	26
Tabla 6. Parámetros usados por el modelo HBV	33
Tabla 7. Clasificación y su respectiva probabilidad de ocurrencia acumulada para los índices de sequía	49
Tabla 8. Parámetros calibrados del modelo HBV.....	53
Tabla 9. Coeficientes de rendimiento del proceso de calibración para las estaciones escogidas. Fuente: Autores.....	57
Tabla 10. Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por departamentos.....	100
Tabla 11. Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por pisos térmicos.....	106

Capítulo 1. Generalidades

1.1. Resumen ejecutivo

Este trabajo de investigación pretende analizar el comportamiento de eventos de sequía en una de las cuencas hidrográficas más importante de Colombia: la macro-cuenca Magdalena-Cauca, conformada por la confluencia de los ríos con el mismo nombre. Inicialmente se exponen diferentes impactos ocasionados por eventos de sequías a nivel mundial, y cómo estos pueden llegar a tener consecuencias devastadoras tanto para los ecosistemas, en términos de flora y fauna, como para el ser humano en diferentes aspectos de su desarrollo. Se mencionan también algunas metodologías implementadas por diferentes autores en diferentes locaciones de la tierra para el análisis de este tipo de eventos extremos, concluyendo con investigaciones similares en la cuenca de estudio escogida. Con lo anterior se definen los objetivos del trabajo de investigación, encaminados a determinar eventos de sequía y sus características para terminar en una discusión propuesta.

Para abordar los objetivos establecidos, se describe inicialmente el área de estudio en cuanto a sus características económicas, geográficas, físicas, e hidroclimatológicas. Se definen también conceptos y metodologías a ser utilizados para el desarrollo de la investigación. Esto es, la definición teórica del modelo hidrológico implementado, así como su montaje conceptual para la obtención de resultados espacial y temporalmente distribuidos en la cuenca mediante información hidrometeorológica a manera de raster; diferentes tipos de sequía; definición de índices de sequía escogidos; características de las sequías y finalmente metodologías adicionales para el análisis espacio-temporal del desarrollo y caracterización de las sequías.

Por último, se plasman los resultados más relevantes de los análisis realizados con las diferentes metodologías. Cabe aclarar que, dado el gran tamaño de la cuenca y el número de celdas analizadas

mediante una grilla (análisis espacial), así como la serie temporal escogida (análisis temporal), no todos los resultados son mostrados, puesto que se encuentran almacenados en grandes bases de datos. Se analizan estos resultados, se realizan las conclusiones del estudio y se finaliza proponiendo una discusión para futuros estudios.

1.2. Introducción

El concepto de cambio climático se atribuye a un fenómeno global alusivo al inusual y errático comportamiento que ha venido presentando el clima en la Tierra a través de las últimas décadas, distando bastante de las variaciones cíclicas históricas observadas (González et al., 2003). Estos cambios generan diferentes fenómenos a nivel meteorológico, atmosférico, hidrológico, entre otros. Uno de ellos son las sequías, consideradas como un desastre ambiental, debido, entre otros factores, a la reducción de la precipitación en una zona y en un periodo de tiempo determinado (Mishra & Singh, 2010), por lo que resulta evidente el impacto que éstas generan en una sociedad.

Aun así, las consecuencias derivadas de las sequías, no sólo se traducen en desastres ambientales que ponen en riesgo la integridad de los seres vivos, sino que también generan pérdidas económicas en las poblaciones en las que se presentan. Tan solo en la Unión Europea el costo por sequías en los últimos 30 años ha generado pérdidas superiores a los 100 billones de euros (Strosser et al., 2012); entre el 2010 y 2011 fuertes sequías provocaron la muerte de más de 250 000 personas en África Oriental (Carty, 2017); en la región de Centro América, para el año 2018, se reportaron pérdidas de alrededor de 281 000 hectáreas de cultivo de frijol y maíz en Guatemala, El Salvador y Honduras debido a fuertes sequías, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de más de dos millones de personas (United Nations, 2018).

En Colombia, el déficit de precipitaciones se ve fuertemente influenciado por la variación climática más prominente en la Tierra, denominada El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la cual

se produce en la cuenca del Océano Pacífico y afecta el noroccidente de Suramérica (Aristizábal, 2011) con una recurrencia entre 4 y 6 años (Montealegre, 2014). Dicho fenómeno, produjo en el año 1991 la sequía más fuerte en los últimos 40 años, desencadenando una crisis energética que dio lugar a un racionamiento de trece meses, desde marzo de 1991 hasta abril de 1992 (J. González et al., 2008), traslapado en gran medida con el evento que inicio en mayo de 1991 y finalizó en julio de 1992. Los eventos El Niño desde el año 1951 se muestran en la Figura 1, tanto para su frecuencia como su duración e intensidad, los cuales fueron consultados en la NOAA's Climate Prediction Center Internet Team (2019).

Año del evento	Año 1												Año 2												Intensidad
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1951																								Moderado	
1957-1958																									Fuerte
1965-1966																									Fuerte
1969																									Débil
1972-1973																									Fuerte
1976-1977																									Débil
1982-1983																									Fuerte
1986-1987																									Moderado
1991-1992																									Fuerte
1997-1998																									Fuerte
2006																									Débil
2009-2010																									Moderado
2015-2016																									Fuerte
2018-2019																									Débil

Figura 1. Épocas de ocurrencia de fenómenos El Niño clasificados por intensidad y duración, de acuerdo a la magnitud de las anomalías positivas de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) registrada en el océano Pacífico central (Región Niño3). Fuente: Adaptado de Montealegre (2014) y NOAA's Climate Prediction Center Internet Team, (2019)

De acuerdo con lo anterior, el estudio de sequías se hace fundamental para la prevención y adaptación de los riesgos asociados a este fenómeno, especialmente al buscar los mecanismos que permitan garantizar la seguridad alimentaria y energética de millones de personas alrededor del

mundo. No obstante, el fenómeno es cambiante en el espacio y en el tiempo, dificultando la cuantificación objetiva de sus características en términos de intensidad, magnitud, duración y extensión espacial (Vicente-Serrano et al., 2010). Adicionalmente, el análisis de sequías involucra una gran cantidad de series de datos y parámetros hidrológicos para su entendimiento, por lo cual, su modelación y predicción requiere el uso de herramientas computacionales que aproximen matemáticamente la realidad.

Es preciso enfatizar que diversos investigadores han realizado el modelamiento de sequías hidrológicas, mediante un análisis espacio – temporal con el uso de simulaciones de escorrentía. Mucho se ha hecho respecto a la caracterización de este fenómeno, con lo cual se han desarrollado metodologías para cuantificar su extensión espacial, magnitud y duración; sin embargo, los estudios encontrados suelen ser de modelos no distribuidos, generando una menor precisión al momento de realizar un análisis espacial de la sequía en cualquier punto de la cuenca.

Dado lo anterior, la presente tesis pretende aplicar diferentes metodologías para el análisis de sequías en la cuenca Magdalena – Cauca, teniendo en cuenta su división política y pisos térmicos, mediante la implementación de un modelo hidrológico distribuido y de esta manera, obtener información relevante en cualquier punto de la cuenca que sirva de base a los entes territoriales para la planificación integral del uso del suelo y los recursos frente a una eventual sequía.

1.3. Justificación

De acuerdo con el estado del arte para el análisis del desarrollo espacio-temporal de sequías hidrológicas, se encuentran estudios que en su mayoría son desarrollados en el continente asiático y que abordan la temática; sin embargo, muchos de estos sólo se enfocan en las metodologías tradicionales para el análisis, las cuales se basan en los diferentes índices de sequía existentes.

En China se han llevado a cabo estudios muy similares al trabajo de investigación propuesto en cuanto al análisis espacio-temporal de las sequías hidrológicas; sin embargo, según Xu et al. (2015), numerosos estudios anteriores al suyo no daban gran importancia al análisis del desarrollo de las sequías en el espacio y en el tiempo como un conjunto, sino que, analizaban estas dos dimensiones por separado. De igual manera ocurría con los diferentes índices de sequía, en donde muchos de los trabajos anteriores no hacían una comparación entre ellos para entender sus relaciones o sus diferencias.

Recientemente, Zhu, Xu, Li, Li, y Zhou (2018) condujeron un estudio de sequía en una cuenca interior típica como la del río Aksu. Según Zhu et al. (2018) los índices estandarizados de escorrentía y el índice del abastecimiento de las aguas superficiales, Standardized Runoff Index – SRI y Surface Water Supply Index – SWS por sus siglas en inglés, sirven para analizar el desarrollo de las sequías hidrológicas en términos de tiempo y espacio respectivamente, por lo cual se puede inferir que algunos de los índices existentes de sequías analizan el comportamiento temporal de las mismas, mientras que otros analizan su comportamiento espacial. La utilización de uno sobre otro dependerá del contexto, disponibilidad y consistencia de la información. Por su parte, la World Meteorological Organization y Global Water Partnership (2016) describe los diferentes índices de sequía de acuerdo con su facilidad de uso, parámetros de entrada e información adicional para cada uno de ellos (aplicaciones, fortalezas, debilidades). De igual manera, Zhu et al. (2018) hacen uso del modelo de retraso de distribución autorregresiva o ARDL por sus siglas en inglés, para mostrar la autocorrelación de las sequías hidrológicas y su relación con la precipitación, evapotranspiración potencial y humedad del suelo.

De forma similar, Yao, Zhao, Chen, Yu, y Zhang (2018), condujeron un estudio de sequía en la región de Xinjian, China, en donde usaron los índices estandarizados de precipitación, y

precipitación y evapotranspiración (SPI y SPEI respectivamente por sus siglas en inglés). Encontraron que estos índices son claros indicadores de cambios en el caudal de los ríos y que permitirían evaluar los recursos hídricos en la región mencionada.

Al sur de China, en Malasia, Tan, Chua, Li, y Brindha (2018) desarrollaron una investigación de sequías meteorológicas e hidrológicas en la cuenca del río Johor, usando los índices estandarizados de precipitación y caudales fluviales (Standardized Precipitation Index – SPI y Standardized Streamflow Index – SSFI por sus siglas en inglés) respectivamente, y dividiendo el área de estudio en cuenca alta y baja. Para la depuración de la información, Tan et al. (2018) aplicaron cuatro pruebas de homogeneidad para luego excluir la información de las estaciones dudosas de acuerdo con estas pruebas.

Por su parte, Afzali et al. (2016) abordan de manera similar el desarrollo de sequía en la cuenca del río Zayandehroud en Irán mediante índices estandarizados. Afzali et al. utilizan diferentes métodos de interpolación para determinar el desarrollo espacial de las sequías y posteriormente asocian algunos de ellos con los índices escogidos para el análisis.

Por otro lado, Corzo Pérez, Van Huijgevoort, Voß, y Van Lanen (2011), proponen que el estudio de sequías contemple la implementación de un análisis espacial basado en percentiles de excedencia para las variables hidrológicas analizadas, clasificadas como análisis de áreas contiguas y no contiguas de sequía, CDA y NCDA por sus siglas en inglés, aplicados a nivel global de acuerdo con datos del modelo WaterGAP¹ y una resolución espacial de 0.5°. Como resultado, Corzo Pérez et al., encuentran que el análisis NCDA es útil para evaluar espacialmente la

¹ WaterGAP (Water Global Assessment and Prognosis) es un modelo hidrológico global que calcula los contenidos de agua en todos los continentes, a excepción de la Antártica, teniendo en cuenta la dinámica humana respecto al recurso hídrico (agua dulce) y los impactos que generan las tomas de agua y la construcción de presas (WaterGAP, n.d.).

información general de sequías a una escala global y regional, mientras que el análisis CDA mostró áreas específicas de extremos que no están delimitadas por regiones predefinidas.

Posterior a la investigación anterior, Díaz Mercado, Corzo Pérez, Solomatine, y Van Lanen (2016) condujeron un estudio de sequías en la cuenca del río La Sierra en el sureste de México en donde usaron el índice estandarizado de precipitación (SPI), índice estandarizado de precipitación y evaporación (SPEI), índice de déficit de evapotranspiración (EDTI), índice estandarizado de déficit de evapotranspiración (SEDI) y el índice estandarizado de escorrentía (SRI). Adicionalmente, Díaz Mercado et al. aplicaron el análisis NCDA para comparar la habilidad de los indicadores mencionados en la identificación de las sequías.

A nivel de Suramérica, en Argentina, Lovino, García, y Baethgen (2014) estudiaron el desarrollo espacio-temporal de eventos extremos de precipitación (temporadas seca y húmeda) al noroeste del país en la cuenca del río La Plata. La metodología usada es muy similar al estudio de sequías debido a la inherente relación entre el tema del estudio y los fenómenos de sequía.

En la región de Cundinamarca – Bogotá, Colombia, en el año 2014 se desarrolló un modelo piloto impulsado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) que busca fortalecer a los gobiernos para la construcción de territorios resilientes a los retos del cambio climático. El estudio, llamado Plan Regional Integral de Cambio Climático (PRICC), usó el modelo europeo SATARDEX² (PNUD & IDEAM, 2014), el cual permite la comparación y evaluación, rigurosa y sistemática de métodos estadísticos, dinámicos y estadísticos – dinámicos de reducción de escala de escenarios extremos (European Commission, 2005); sin embargo, la

² Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions

aplicación de este modelo podría no ser adecuada en una región climática tropical, como es Colombia.

De acuerdo con lo anterior, y a la consulta del estado del arte para el tema particular del presente trabajo de investigación, no se encontraron estudios con análisis distribuidos de sequía adelantados en la cuenca Magdalena – Cauca teniendo en cuenta su división política y pisos térmicos.

Las metodologías usadas para el cálculo de índices de sequía en los diferentes trabajos mencionados son muy similares en la mayoría de ellos. Allí se identifica el área de estudio, los índices de sequía seleccionados para el análisis, la fuente de la información hidrometeorológica usada, análisis de los resultados, discusiones propuestas y conclusiones puntuales respecto al estudio en la región analizada.

Por otro lado, las metodologías descritas por Corzo Pérez et al. (2011) y Mercado, Corzo Pérez, Solomatine, y Van Lanen (2016) en referencia a los análisis de áreas no contiguas de sequía (NCDA) y áreas contiguas de sequía (CDA) se han desarrollado a escala global y con un enfoque similar a los estudios de índices de sequía; sin embargo, estos no han sido implementados particularmente en Colombia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general.

Analizar eventos de sequía en la región de la cuenca del río Magdalena-Cauca, Colombia.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Determinar la combinación óptima de parámetros del modelo HBV96 que permitan caracterizar el comportamiento hidrológico de la zona de estudio correspondiente a la cuenca del Río Magdalena - Cauca.

- Implementar los índices estandarizados de escorrentía, humedad de los suelos y déficit de evapotranspiración para la estimación de sequías en la zona de estudio. (SRI, SSI, SEDI respectivamente por sus siglas en inglés).
- Analizar el comportamiento espacio-temporal de las sequías por medio de las metodologías de: análisis de áreas contiguas y no contiguas de sequía (CDA y NCDA respectivamente por sus siglas en inglés).
- Caracterizar las sequías de acuerdo a la división política y los pisos térmicos de la cuenca Magdalena – Cauca.
- Analizar las características de sequía encontradas y proponer una discusión de los resultados de las metodologías.

Capítulo 2. Marco conceptual

2.1. Área de estudio

La confluencia de los ríos Magdalena y Cauca conforman la macro cuenca objeto del presente estudio (ver Figura 2), la cual cuenta con un área total de 273.459 km², correspondientes al 24% del territorio colombiano y sobre la cual se encuentra aproximadamente el 77% de la población del país; la división administrativa de la cuenca está configurada por 19 departamentos, 728 municipios, la jurisdicción de 23 corporaciones autónomas regionales y 4 autoridades ambientales. El río Magdalena tiene una longitud de 1.528 km, de los cuales 886 km se estiman como navegables; nace en el macizo colombiano a los 3.685 m.s.n.m. y el área propia de la cuenca del río es de 199.294 km². Desemboca en Bocas de Ceniza en el Caribe colombiano siendo el principal río eje de la economía del país (Ministerio de vivienda y desarrollo territorial, 2015).

Por su parte, el río Cauca tiene una longitud de 1.180 km, de los cuales la navegación solo es posible en algunos tramos; nace en el páramo de Sotará en el macizo central a los 4.000 m.s.n.m. y el área propia de la cuenca del río es de 74.165 km². Desemboca en el río Magdalena, cerca de la población de Pinillos en el departamento de Bolívar (Ministerio de vivienda y desarrollo territorial, 2015).

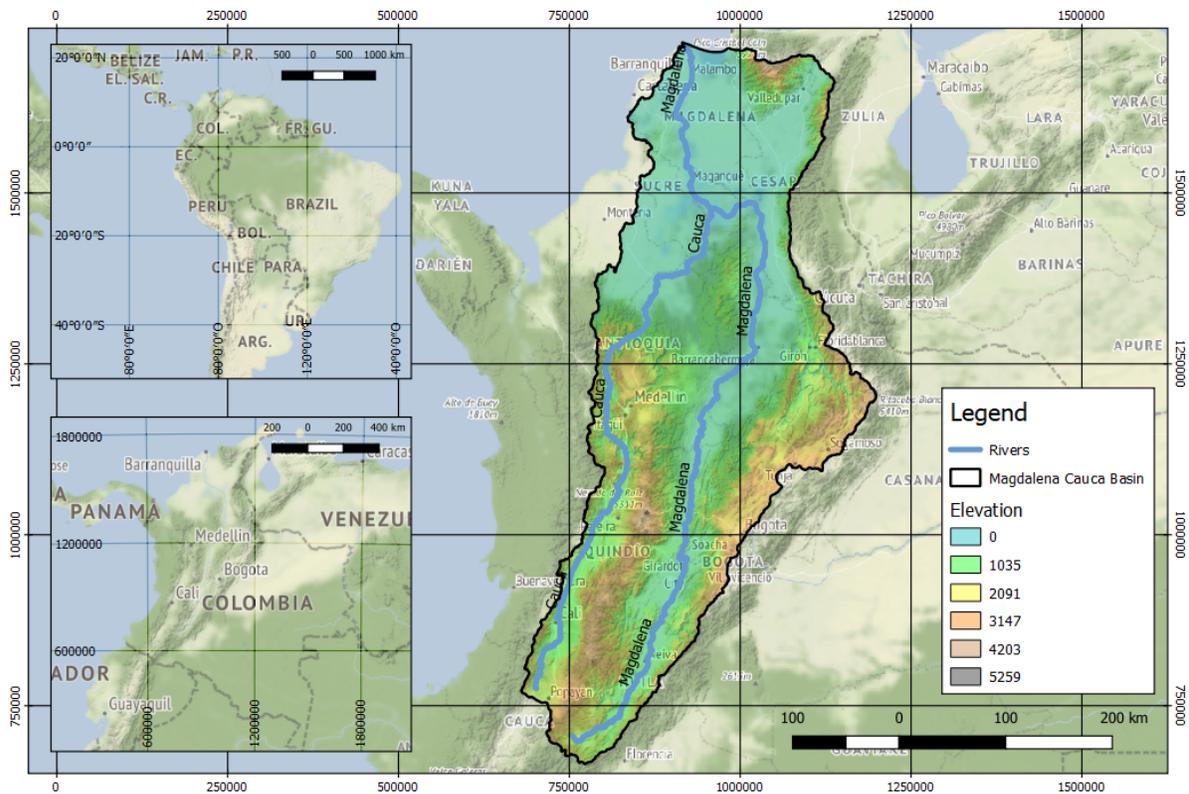


Figura 2. Localización de la macro cuenca Magdalena-Cauca. Fuente: Autores.

La cuenca Magdalena-Cauca posee el 95% del sistema interconectado nacional, en ella se produce el 70% de la energía hidroeléctrica y el 95% de la termoeléctrica del país. También se desarrolla el 75% de la producción agropecuaria y el 90% del transporte fluvial de carga y pasajeros, con 2.3 millones de ton/año y 600.000 pasajeros/año respectivamente (Ministerio de vivienda y desarrollo territorial, 2015). El rendimiento promedio de la cuenca corresponde a 35 L/s-km², valor que duplica el rendimiento promedio de Latinoamérica, y una escorrentía considerada moderada para el promedio nacional, con valores entre 1.500 mm y 2.500 mm. La diferencia en volúmenes de escorrentía entre un año medio y un año seco muestra una reducción del 55% en la cuenca Magdalena-Cauca, siendo una de las más sensibles a las temporadas secas en el país, tal como se puede observar en la Tabla 1 (IDEAM, 2010).

Tabla 1.

Oferta hídrica cuenca Magdalena-Cauca según IDEAM

Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Caudal año medio (m ³ /s)	Caudal año seco (m ³ /s)	Oferta anual año medio (Mm ³)	Oferta anual año seco (Mm ³)
Magdalena Cauca	Alto Magdalena	860	384	27.132	12.121
	Saldaña	318	163	10.019	5.129
	Medio Magdalena	3.199	1.532	100.886	48.316
	Sogamoso	748	313	23.582	9.864
	Bajo Magdalena/Cauca/San Jorge	1.272	598	40.119	18.862
	Cauca	1.581	664	49.862	20.938
	Nechí	826	422	26.065	13.300
	Cesar	396	129	12.481	4.082
	Bajo Magdalena	396	214	12.484	6.739
	Total Magdalena Cauca		9.596	4.419	302.630

Nota: Mm³: Millones de metros cúbicos. Recuperado del Estudio Nacional del Agua. IDEAM, 2010, pág. 71.

Para el periodo comprendido entre el año 2000 y 2015 se extrajo información correspondiente a precipitación y caudales en las subcuencas pertenecientes a la zona de estudio, las cuales corresponden al Magdalena Alto, Magdalena Medio, Cauca y Magdalena-Cauca Bajo (ver Figura 3). Para esto, se contó con información diaria en una grilla de la cuenca mostrada en la Figura 2. Los datos medios de precipitación se obtuvieron sumando los valores diarios para cada mes en el periodo mencionado, dividido en el número de años seleccionados, lo cual corresponde al valor medio mensual interanual; posteriormente se realizó la suma de dichos valores en todas las celdas aferentes al punto de descarga señalado en la Figura 3, dividido en el número de celdas aferentes para finalmente hallar el valor medio mensual interanual de cada subcuenca. Por otro lado, para el caudal, el tratamiento de la información diaria es diferente, puesto que el valor de esta variable es puntual a la salida de cada subcuenca ya que acumulación es implícita en cada cauce; en este caso,

sólo fue necesaria su ponderación mensual multianual. Estos valores se pueden observar en la Tabla 2 y la Figura 4.

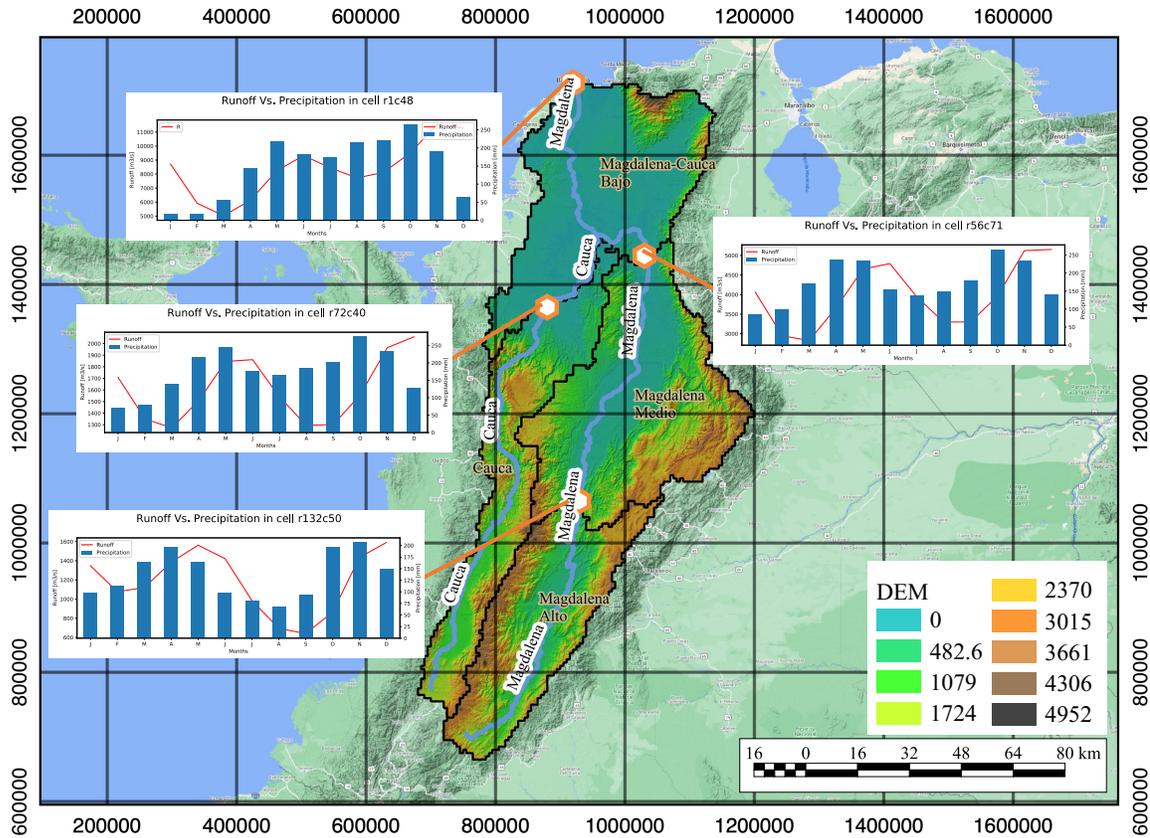


Figura 3. Precipitación vs Caudal en subcuencas Magdalena-Cauca periodo 2000-2015. Fuente: Autores.

Tabla 2.

Caudales medios mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015

Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1347.72	1077.60	1120.06	1385.01	1562.38	1422.63	984.81	695.08	640.14	864.90	1435.42	1591.18
2	1708.42	1351.11	1271.98	1509.54	1846.05	1861.48	1538.29	1294.67	1301.95	1558.33	1964.27	2058.50
3	4060.60	2948.42	2825.16	3663.60	4651.63	4792.05	3941.27	3297.52	3301.73	3962.51	5124.24	5153.58
4	8715.45	5922.12	5028.66	6139.07	8252.44	9321.84	8445.67	7723.75	8125.75	9504.18	11536.93	11276.11

(1) Magdalena Alto, (2) Cauca, (3) Magdalena Medio, (4) Magdalena-Cauca Bajo

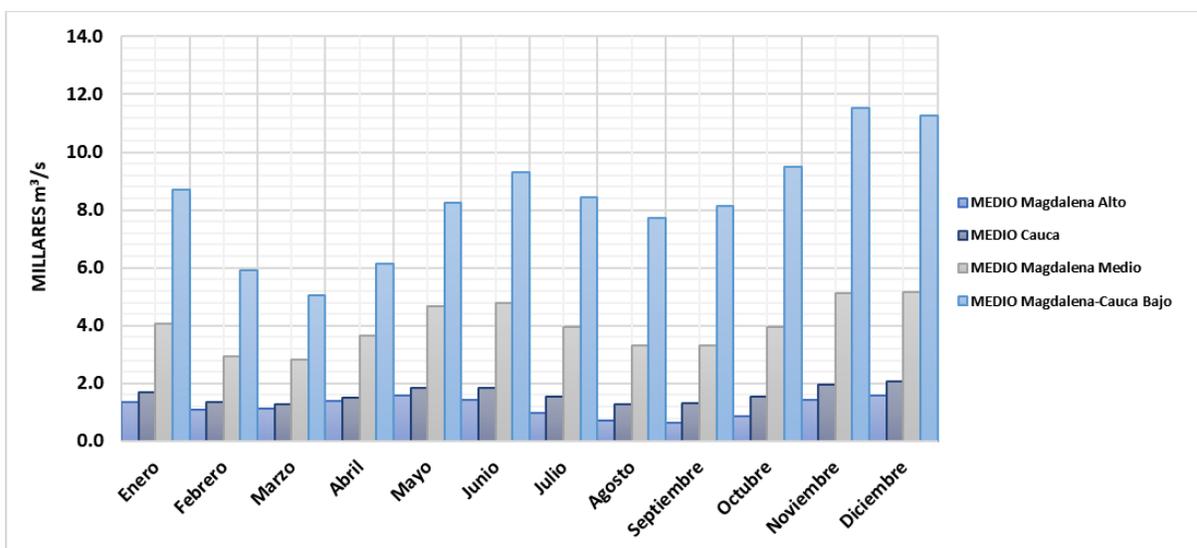


Figura 4. Caudales medios mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015. Fuente: Autores.

Los caudales mínimos fueron obtenidos mediante una función de valor mínimo entre los valores medios mensuales en el periodo comprendido entre el año 2000 y 2015, como se puede observar en la Tabla 3 y Figura 5.

Tabla 3.

Caudales mínimos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015

Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	505.30	428.00	518.78	885.70	912.00	571.68	348.14	209.25	182.40	266.06	452.34	533.59
2	959.25	737.70	735.92	1077.91	1306.73	1105.95	839.02	753.21	721.90	911.30	1343.28	1363.31
3	1964.17	1256.65	1590.18	2491.01	3310.57	2850.07	1869.74	1618.73	1846.84	2358.03	3351.00	3106.82
4	4534.89	2819.07	2895.36	4330.05	5563.28	5420.20	4094.66	3851.41	4331.55	5385.45	7329.58	7070.50

(1) Magdalena Alto, (2) Cauca, (3) Magdalena Medio, (4) Magdalena-Cauca Bajo

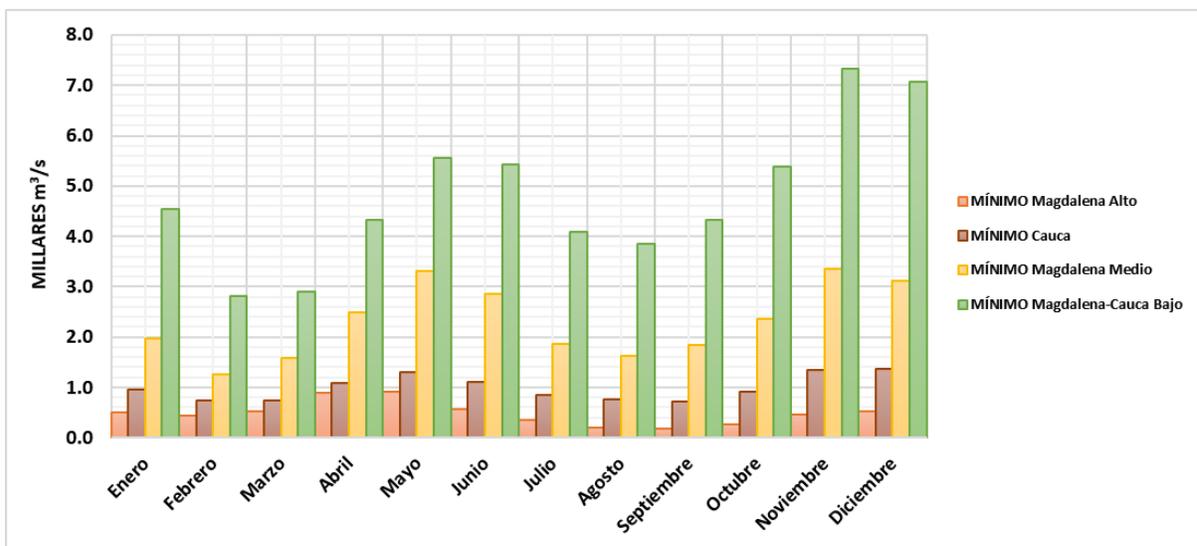


Figura 5. Caudales mínimos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015. Fuente: Autores.

Los caudales máximos fueron obtenidos mediante una función de valor máximo entre los valores medios mensuales en el periodo comprendido entre el año 2000 y 2015, como se puede observar en la Tabla 4 y Figura 6.

Tabla 4.

Caudales máximos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015

Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	2339.22	1890.67	1865.50	2262.81	2686.38	2415.26	1629.90	1342.84	1313.75	1416.18	2046.09	2679.51
2	2556.59	2000.80	2043.84	2190.88	2528.82	2386.23	2293.88	2055.26	2077.27	2156.83	2569.50	2954.48
3	6276.25	4742.13	4688.27	5779.62	7340.83	7023.20	5681.44	5076.11	5271.24	5666.62	6723.66	7494.28
4	14063.48	9760.08	8883.02	9976.95	12857.21	13575.55	12045.04	11836.73	12520.24	14109.21	15802.74	17093.62

(1) Magdalena Alto, (2) Cauca, (3) Magdalena Medio, (4) Magdalena-Cauca Bajo

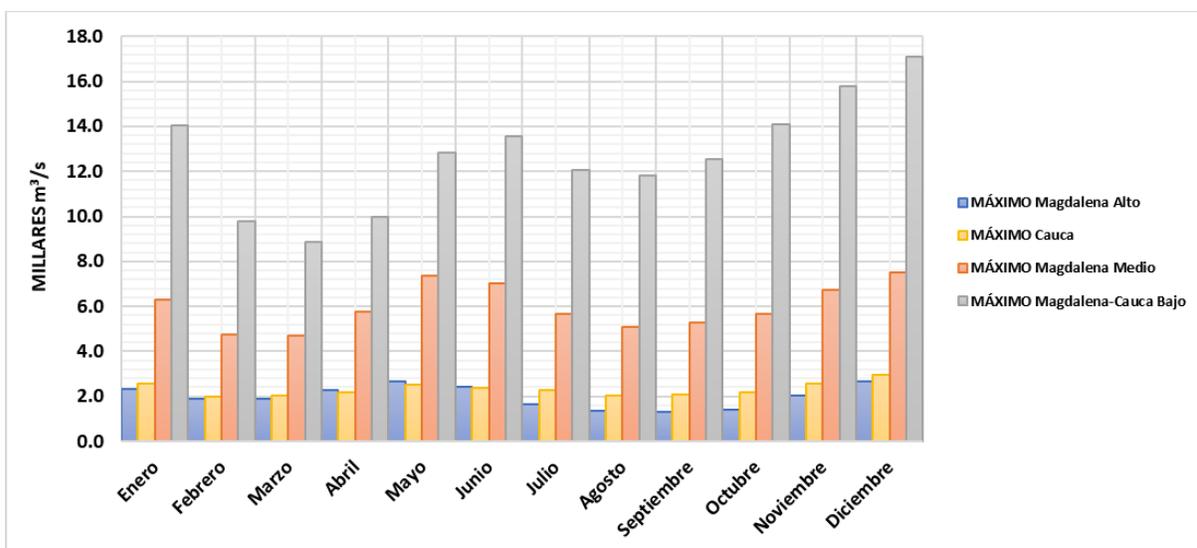


Figura 6. Caudales máximos mensuales interanuales por subcuencas periodo 2000-2015. Fuente: Autores.

De todo lo anterior se determina que en el Magdalena Alto se presentan temporadas de caudales mínimos en el periodo septiembre-octubre, y dos temporadas de caudales máximos en el periodo diciembre-enero y mayo-junio. En el Cauca se presentan dos temporadas de caudales mínimos en el periodo febrero-marzo y agosto-septiembre, y dos temporadas de caudales máximos en el periodo noviembre-enero y mayo-junio. En el Magdalena medio se presentan dos temporadas de caudales mínimos en el periodo febrero-marzo y agosto-septiembre, y dos temporadas de caudales máximos en el periodo noviembre-enero y mayo-junio. En el Magdalena-Cauca bajo se tiene una temporada de caudales mínimos en el periodo febrero-marzo, y una temporada de caudales máximos en el periodo noviembre-diciembre.

Los valores de temperatura media del aire en la cuenca varían de acuerdo a los diferentes pisos térmicos presentes en la misma. De esta forma, en las zonas bajas al norte de la cuenca se pueden presentar temperaturas entre los 28 y 32°C; en las zonas altas, principalmente al sur de la cuenca, se pueden observar temperaturas entre los 12 y 16°C. En el caso de los nevados y en las regiones de páramo, las temperaturas mínimas llegan a estar por debajo de los 4°C

(CORPOMAGDALENA., 2001). La clasificación de los diferentes pisos térmicos de acuerdo con Méndez et al. (2016), se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5.

Pisos térmicos y regímenes de temperatura para escalas generales.

Piso térmico	Altitud (m)	Régimen de temperatura del suelo	Temperatura del aire (°C)	Temperatura del suelo (°C)
Nival	4.700 a 5.775	Gélico	menor a 1,5	menor a 0
Subnival	4.200 a 4.700	Cryico	1,5 a 4	-
Extremadamente frío	3.600 a 4.200	Cryico	4 a 1.5	0 a 8
Muy frío	3.000 a 3.600	Isofrígido	8 a 4	-
Frío	2.000 a 3.000	Isomésico	12 a 8	8 a 15
Templado	1.000 a 2.000	Isotérmico	18 a 12	15 a 22
Cálido	menor a 1.000	Isohipertérmico	mayor a 24	mayor a 22

Nota: Adaptado de Méndez et al. (2016).

La evapotranspiración potencial (PET por sus siglas en inglés) presenta valores entre 1.600 y 1.800 mm/año al noroccidente de la cuenca. En la región montañosa de la parte central y sur de la cuenca los valores bordean los 1600 mm/año, mientras que en el alto Magdalena y estribaciones de las cordilleras dicho valor oscila entre 1.200 y 1.600 mm/año. Los valores más bajos en la cuenca se presentan en los sectores de Antioquia, Eje Cafetero, altiplano Cundiboyacense y extremo sur en Huila y Cauca con registros menores a 1.000 mm/año (CORPOMAGDALENA., 2001).

2.2. Regímenes de Precipitación en la región

La distribución espacial de la precipitación muestra que, al norte de la cuenca se tienen valores entre 1.000 y 1.500 mm/año, exceptuando la Sierra Nevada de Santa Marta en donde se tienen registros de 2.000 mm/año. De esta forma, la precipitación presenta cambios paulatinos a lo largo de la cuenca, con áreas menos lluviosas en el alto Magdalena y alto Cauca (entre 1.000 y

1.500 mm/año), y áreas más lluviosas en Caldas (entre 4.000 y 7.000 mm/año). La distribución de la lluvia puede observarse en la Figura 7 (CORPOMAGDALENA., 2001).

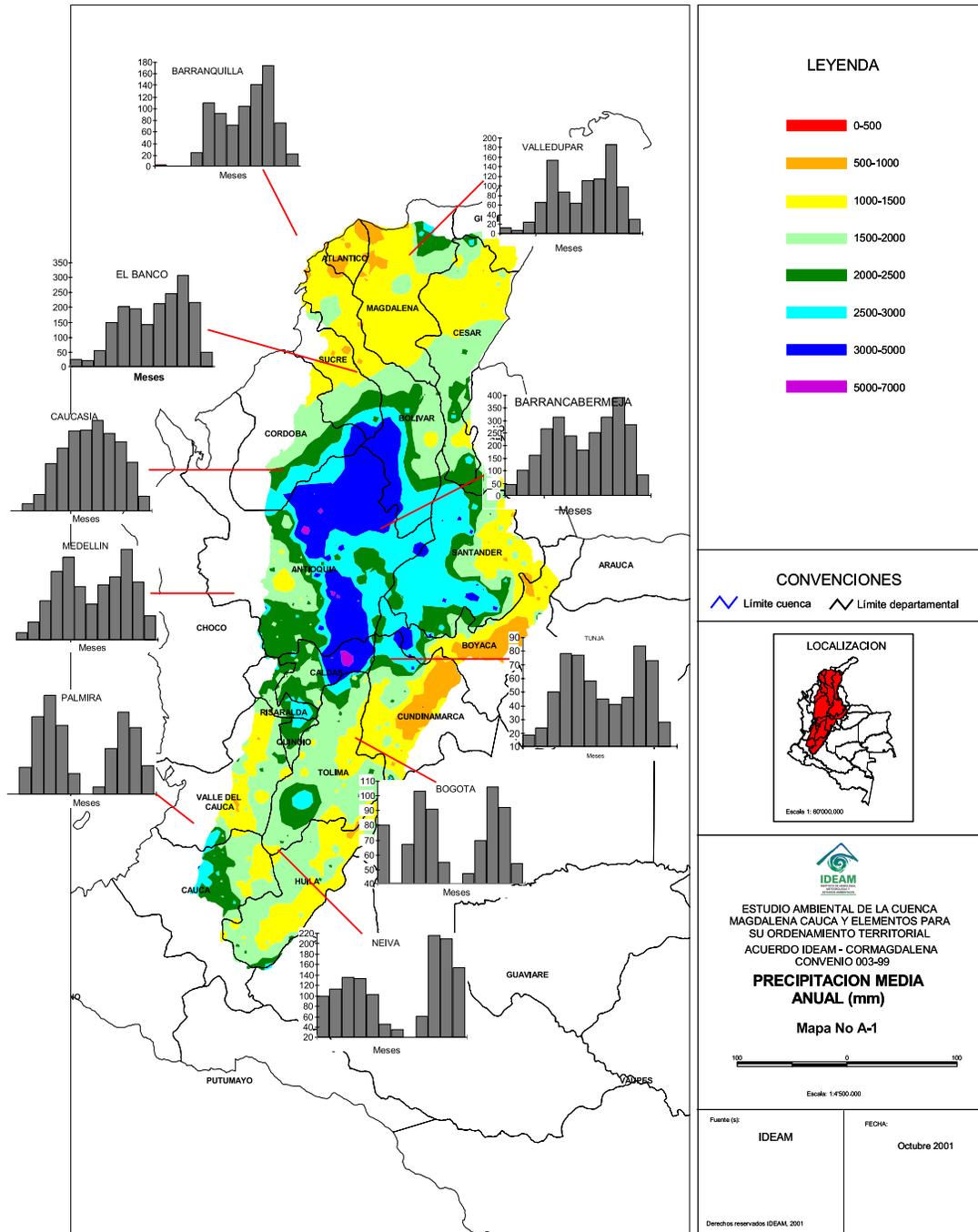


Figura 7. Precipitación media anual cuenca Magdalena-Cauca (mm). Plano sin escala. Recuperado del Estudio ambiental de la cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. CORPOMAGDALENA, 2001, pág. 63.

2.3. Modelo hidrológico.

2.3.1. Descripción general y funcionamiento.

Antes de hablar del modelo hidrológico a ser implementado, es necesario definir qué es un *sistema hidrológico*. Según Dooge (1968), un *sistema* es “cualquier estructura, mecanismo, esquema, o procedimiento, real o abstracto, que interrelaciona en una referencia de tiempo dada, una entrada, causa, o estímulo, de materia, energía, o información, y una salida, efecto, o respuesta, de información, energía, o materia.” (p.58), por lo que un *sistema hidrológico* hace referencia a cualquier *mecanismo* relacionado con la presencia de agua en su estado natural.

Ahora bien, un *modelo*, según Clarke (1973), es una representación simplificada de un *sistema* complejo, que puede ser: (a) físico, correspondiente a un prototipo de la realidad a una escala menor; (b) análogo, correspondiente a una representación material; o (c) matemático, en donde el comportamiento del sistema se representa por medio de un conjunto de ecuaciones expresando relaciones entre variables y parámetros.

El modelo hidrológico, es entonces, una representación de todos los elementos y eventos hidroclimatológicos que, mediante una transformación, permiten describir el comportamiento de las diferentes variables hidrológicas en una zona determinada.

Para este estudio, se utilizará la herramienta HAPI³, la cual tiene como base el modelo conceptual distribuido HBV96 (ver Figura 8) desarrollado en el instituto sueco de meteorología e hidrología (SMHI por sus siglas en inglés) a principios de los años setenta; sin embargo, en 1993, este instituto, junto con la asociación sueca de empresas de regulación de ríos (VASO), realizaron

³ HAPI es un paquete de Python que permite crear modelos hidrológicos de manera rápida y flexible con diferentes representaciones espaciales (agrupados, semi distribuidos y conceptuales distribuidos) usando HBV96 (Farrag, 2018a).

una revisión del modelo HBV inicialmente planteado para hacerlo más razonable físicamente y actualizado con conocimientos meteorológicos e hidrológicos, dando como resultado el modelo HBV96 (Abdo et al., 2009).

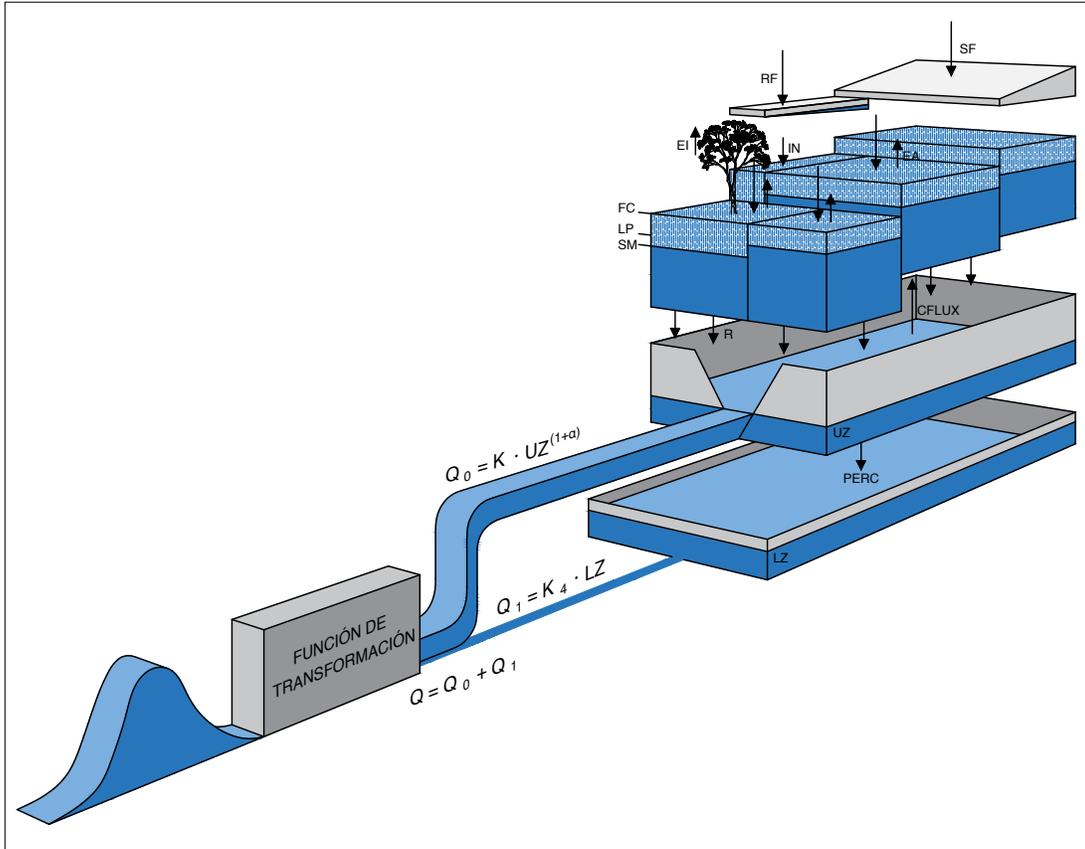


Figura 8. Representación gráfica del modelo hidrológico HBV y sus procesos. Fuente: adaptado de Abdo et al. (2009)

La herramienta HAPI, permite implementar la conceptualización del modelo HBV-96 a manera de grilla, basando su estructura en el principio de conservación de la masa manteniendo los procesos hidrológicos como las variables principales de acuerdo con la Ecuación (1) (Farrag et al., 2021).

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + L) \quad (1)$$

En donde P es la precipitación, E es la evapotranspiración actual, Q la descarga, y las variables SP , SM , UZ , LZ , L , son, respectivamente, manto de nieve, humedad del suelo, zona superior, zona inferior y variables de estado de lagos, todas ellas en *unidad de longitud/unidad de tiempo*. Para poder modelar computacionalmente los procesos hidrológicos es necesario entonces reescribir la Ecuación (1) de forma discreta, representada en la Ecuación (2).

$$P_{i,t+1} - E_{i,t+1} - Q_{i,t+1} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta t}(SP_{i,t} + SM_{i,t} + UZ_{i,t} + LZ_{i,t} + L_{i,t})\right) \quad (2)$$

En donde la primera posición de los subíndices hacen referencia a la celda analizada, y la segunda posición al tiempo, mientras que f es la función transformación (Farrag et al., 2021), que para la configuración del modelo aplicado se escogió el método de Muskingum.

Con el modelo digital de terreno ajustado a una resolución espacial de 5km x 5km, los rasters de dirección de flujo y acumulación de flujo, la herramienta HAPI realiza el cálculo hidrológico pixel por pixel en el orden correcto, gracias a los rasters mencionados, por medio de la metodología de transformación (routing) de Muskingum, como se puede observar de forma simplificada en la Figura 9.

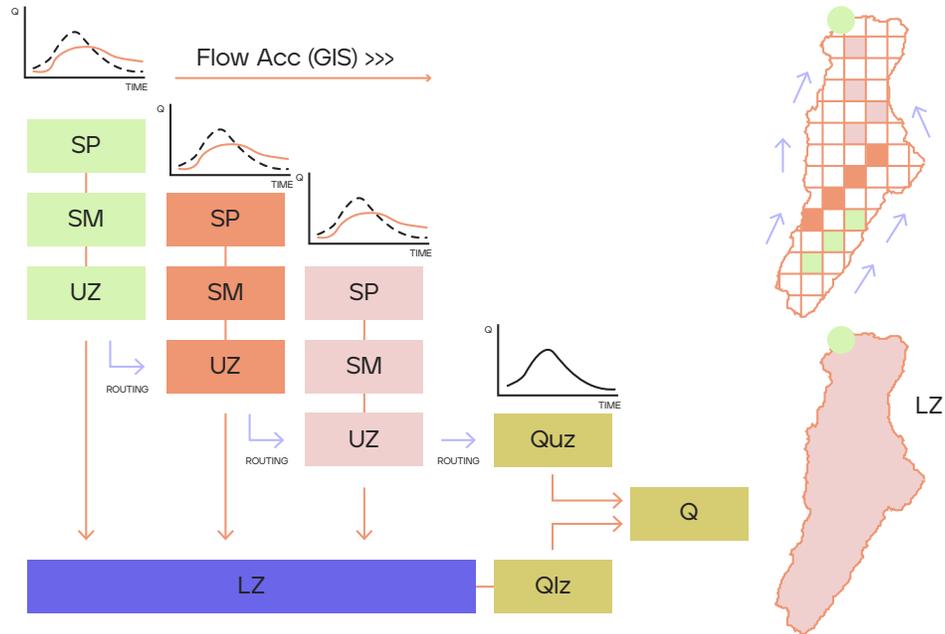


Figura 9. Proceso de transformación del modelo HBV entre celdas. Fuente: adaptado de (Farrag, 2018b).

El modelo HBV consiste en cinco “tanques” representados por humedad del suelo, respuesta superior, respuesta inferior, manto de nieve y lagos; sin embargo, en este estudio no se consideró representativa la información de capa de nieve y lagos debido al bajo porcentaje de área que representan sobre el total de la cuenca. Adicionalmente, en cada celda se calcula la infiltración, humedad del suelo, percolación y escorrentía (Farrag et al., 2021). Información más detallada acerca del modelo HBV se puede encontrar en Lindström et al. (1997).

2.3.2. Datos de entrada.

Los datos necesarios para el procesamiento del modelo HAPI corresponden a: modelo digital de terreno, o DEM en formato raster; raster de delimitación de la cuenca; rasters de Acumulación de Flujo y Dirección de Flujo; datos espacialmente distribuidos de precipitación, evapotranspiración actual, evapotranspiración potencial y temperatura; información de caudal

medido sobre el cauce, la cual se usará para la calibración del modelo. Los anteriores datos serán explicados a detalle en el numeral 3.1 para el presente estudio.

De acuerdo con la conceptualización del modelo HBV, existen ciertas variables de estado (ver Ecuación (1)) a las que se debe dar un valor inicial, puesto que representan los “tanques” del modelo, y estos siempre tendrán un valor diferente a cero. Es necesario indicar también el área de la cuenca en km^2 y la resolución temporal (en horas) con la cual se presenta la información de temperatura, precipitación y evapotranspiración actual, que, para este estudio es diaria, es decir 24 horas.

Se requiere la localización a nivel de filas y columnas de las estaciones seleccionadas en la grilla delimitada, además de un parámetro de ponderación para cada una de ellas dependiendo del área aferente de estas respecto al área total de la cuenca. Adicionalmente, para la calibración del modelo, es necesaria la información observada de caudal en las estaciones seleccionadas, las cuales deben contar con los datos suficientes en el periodo de análisis escogido para que los resultados se aproximen a los valores históricos observados.

2.3.3. Calibración del modelo.

Es necesario hacer una calibración de los parámetros del modelo antes de ejecutarlo. Estos se describen en la Tabla 6, de los cuales cabe aclarar, que los últimos dos, corresponden a los parámetros usados por la función de transformación de Muskingum. La calibración es llevada a cabo por una función objetivo que puede ser definida por el usuario en la herramienta HAPI; sin embargo, en este caso, se usa la que está definida allí por defecto, la cual busca minimizar el error cuadrático medio entre las series de datos de esorrentía calculadas por el modelo, y lo observado de series históricas en los puntos de calibración dados, los cuales se ven en la Figura 10.

Tabla 6.

Parámetros usados por el modelo HBV.

Nombre del Parámetro	Descripción
RFCF	Factor de corrección de la precipitación
FC	Almacenamiento máximo de humedad del suelo
Beta	Parámetro no lineal de escorrentía
ETF	Factor de corrección de la evaporación
LP	Límite de la evaporación potencial
CFLUX	Tasa máxima de capilaridad
K	Coefficiente de almacenamiento superior
K1	Coefficiente de almacenamiento inferior
A	Parámetro de respuesta no lineal
Perc	Tasa de percolación
CLake	Factor de corrección de lago
K	Tiempo de viaje
X	Coefficiente de ponderación

Nota: adaptado de Farrag (2018b)

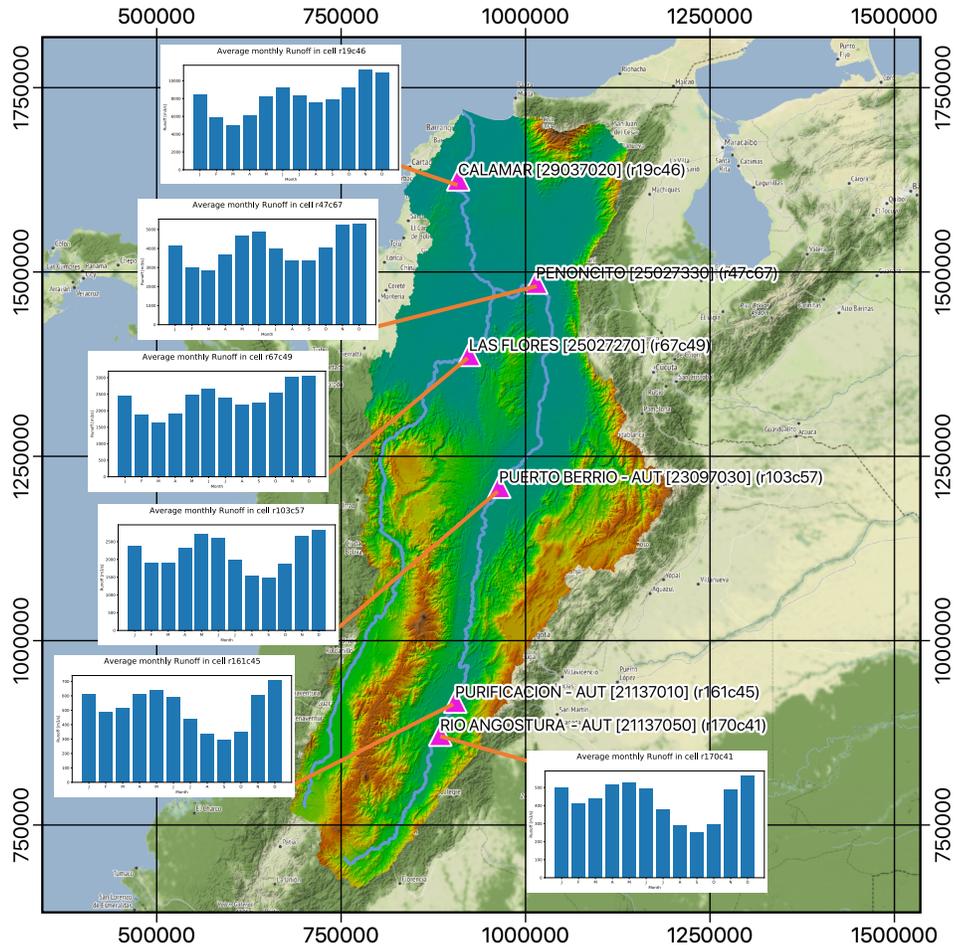


Figura 10. Puntos de calibración del modelo y sus gráficas de caudal medio mensual multianual. Nombre [ID] (fila, columna). Fuente: Autores.

2.4. Tipos de sequía

Las sequías son fenómenos naturales que tienden a extenderse de manera irregular sin importar el régimen climático de la zona afectada, por lo cual, pueden observarse desde desiertos hasta bosques lluviosos, distando un poco del pensamiento común que las asocia con la aridez; aun así, dicho fenómeno representa un riesgo que año a año afecta a diversos sectores económicos y poblaciones alrededor del mundo. En forma simplificada, las sequías pueden denominarse como fenómenos que generan alteraciones en los ciclos hidrológicos generando cambios en la

precipitación, temperatura, reservas de agua superficial y subterránea en una región determinada (Organización Meteorológica Mundial (OMM) & Asociación Mundial para el Agua, 2016).

Las sequías pueden caracterizarse por su gravedad en un espacio y tiempo determinados, y suelen ser ocasionadas por varios procesos hidrometeorológicos que limitan la disponibilidad de agua superficial o subterránea hasta puntos potencialmente perjudiciales para la supervivencia de plantas, animales y humanos debido a temperaturas más altas, vientos de fuerte intensidad, humedad relativa baja, incremento de la evapotranspiración, menor cobertura de nubes y mayor insolación (Tierras, s.f.). Algunos tipos de sequía son:

- **Sequía hidrológica:** este tipo de sequía puede tardar en aparecer meses desde el inicio de la escasez pluviométrica y está relacionada con niveles de caudal por debajo de los valores medios en causes y embalses, limitando la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas en un tiempo determinado, así como la posibilidad de garantizar demandas mínimas en un sistema de gestión de agua⁴.
- **Sequía meteorológica:** Se presenta en periodos de tiempo en los cuales se presenta escasez de lluvia (IDEAM, 2012).
- **Sequía agrícola o hidroedáfica:** se presenta debido al déficit de humedad en la zona radicular de un cultivo en un espacio y tiempo determinado. La presencia de sequías agrícolas puede estar ligada tanto a las sequías meteorológicas como a las hidrológicas; sin embargo, no es posible generalizar umbrales que determinen la aparición o

⁴ En Colombia, en el año 2010 se expidió la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la cual se establece los objetivos para la oferta, demanda, calidad, riesgo, fortalecimiento institucional y gobernabilidad (Ministerio de vivienda y desarrollo territorial, s.f.-b).

finalización de este evento, dado que los requerimientos de agua varían en la etapa de crecimiento de cada planta y cultivo, incluso en una misma zona geográfica.

- **Sequía socioeconómica:** es la afectación de algún sector económico debido a la escasez de agua, sin que esto signifique la total ausencia del suministro de la misma. Dado que las crecientes actividades humanas generan un mayor estrés sobre el recurso hídrico, este tipo de sequía es más frecuente cada día.

2.5. Índices de sequía

Las condiciones de sequía pueden ser descritas por diferentes indicadores, los cuales son medibles por medio de instrumentos adecuados para tal fin y proporcionan información de variables físicas como la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales, los niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, la humedad del suelo y el manto de nieve. El análisis cualitativo y cuantitativo de las sequías determina la magnitud y duración por medio del cálculo de representaciones numéricas denominadas índices de sequía (DI por sus siglas en inglés), cuya estimación se realiza por medio de datos climáticos e hidrometeorológicos. Los índices permiten facilitar el seguimiento de distintos aspectos del ciclo hidrológico y las anomalías que tiene el agua en el mismo; sin embargo, para dicho seguimiento puede ser necesario el uso de varios índices. El análisis de DI ofrece varias opciones para determinar la gravedad, localización, duración, aparición y cese de las condiciones de sequía (Organización Meteorológica Mundial (OMM) & Asociación Mundial para el Agua, 2016).

La estimación de los DI debe estar acompañada de un análisis espacial, el cual debe ser estimado por medio de modelos espacio – temporales. La extensión espacial y la duración de las sequias han sido definidas por diferentes investigadores de este fenómeno, estableciendo umbrales (threshold) que permiten clasificar si un evento es extremo o no, para un espacio de tiempo determinado; esto

ha permitido encontrar que se pueden presentar sequías a pesar de que las mismas no alteren grandes superficies terrestres (Díaz et al., 2019).

Existe un gran número de índices que permiten determinar la gravedad, localización, duración, aparición o cese de las condiciones de sequía. Los efectos producidos por estos fenómenos pueden ser tan diversos como sus causas, por lo cual, la selección de los índices es fundamental para la gestión del riesgo que permita a las personas, comunidades, entidades gubernamentales o a los diferentes sectores económicos, tener mecanismos de resiliencia para afrontar las consecuencias derivadas de las sequías. En el Cuadro 1 del Manual de indicadores e índices de sequía (Organización Meteorológica Mundial (OMM) & Asociación Mundial para el Agua, 2016, pág. 7) se muestran los indicadores e índices clasificados por la OMM en las siguientes categorías: meteorología; humedad del suelo; hidrología; teledetección; mixto o modelado.

2.5.1. Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI).

El SRI es ampliamente usado en la caracterización de sequías hidrológicas dado que los cálculos para su estimación presentan relativa simplicidad. Adicionalmente, los datos de entrada requeridos tienen varias fuentes de información para su obtención.

El proceso de estandarización del presente índice es definido a partir del ajuste de las series de datos de la variable de escorrentía a una distribución gamma, que posteriormente se ajustará a una distribución normal estándar de acuerdo a lo descrito por McKee et al., (1993), la cual es asociada con el percentil hidrológico de la escorrentía acumulada para un espacio de tiempo específico. La estimación del SRI depende de la resolución espacial de los datos y puede ser calculada para diferentes periodos de tiempo de acuerdo con la disponibilidad de datos de entrada.

Según lo descrito por Shukla & Wood, (2008), es importante recalcar que la aplicación de diferentes modelos de distribución estadística, diferentes a la distribución gamma, puede generar

mejores ajustes para el valor acumulado de la variable hidrológica (en este caso de escorrentía), la cual cambia de acuerdo con su localización geográfica y la serie temporal analizada. Por ejemplo, en regiones áridas donde la variable de escorrentía suele ser intermitente se pueden presentar dificultades para ajustarse satisfactoriamente a una distribución de probabilidad, por lo cual se propone como metodología complementaria que cualquier valor de la variable pueda ser expresado mediante la estimación empírica de sus percentiles, tratando de minimizar los errores en el cálculo de la probabilidad de la variable hidrológica analizada.

2.5.2. Índice Estandarizado de Humedad de los Suelos (SSI).

Las sequías generan un alto impacto afectando directamente la producción agrícola y ganadera debido a la deficiencia de agua, produciendo deterioro en el crecimiento vegetal y en la aparición de incendios forestales, por lo cual la estimación del índice estandarizado de humedad de los suelos (SSI) es recomendada en dichos sectores productivos (Y. Xu et al., 2018).

Múltiples índices pueden ser usados en la estimación de sequías; sin embargo, la mayoría de ellos no considera la humedad del suelo como un dato de entrada para los modelos de cálculo, la cual si es implementada en el SSI. Este índice se basa en el concepto de porcentaje de precipitación normal e índice Z de Palmer, así como en los métodos estadísticos del SPI; adicionalmente, la puntuación Z (o puntuación estándar) es utilizada para explicar cuántas desviaciones estándar la humedad del suelo se desvía de la humedad media histórica del suelo y así identificar las sequías como valores estadísticos atípicos en una serie temporal (Y. Xu et al., 2018).

Inocêncio et al., (2020) describen de forma simplificada que la metodología para la estimación del índice pasa inicialmente por la obtención de las series históricas de datos para un periodo de tiempo determinado, seguida del tratamiento estadístico de los mismos y la acumulación de los periodos de acuerdo a las necesidades determinadas por el investigador para la zona de estudio

(e.g., 3, 6 o 12 meses). Finalmente, se obtiene la probabilidad acumulada de las series históricas y se aplica una función gamma para ajustar los datos y posteriormente, una función inversa para obtener los valores estandarizados de la distribución normal, de acuerdo a lo descrito por McKee et al., (1993).

2.5.3. Índice Estandarizado de Déficit de Evapotranspiración (SEDI).

La evaluación de las sequías y su impacto en los ecosistemas ha hecho necesaria la definición de índices que puedan destacar los cambios biológicos que surgen de la dinámica de la sequía y su intensidad (Zhang et al., 2019). Para esto, la evaluación de la evapotranspiración potencial (PET) puede describir el potencial atmosférico para recibir agua y es crucial en la regulación del estrés hídrico, siendo un importante indicador de la sequía en términos de las condiciones atmosféricas (McEvoy et al., 2016).

Diferentes investigaciones resaltan la eficiencia del uso del SEDI en el monitoreo global de sequías y su evolución con las respuestas ecológicas de los ecosistemas terrestres, entre los cuales destacan los aportes realizados por Kim & Rhee, (2016) y Vicente-Serrano et al., (2018). Su estimación comprende la diferencia entre la evapotranspiración actual (AET) y la evapotranspiración potencial (PET), lo cual logra resaltar las condiciones secas y húmedas para la detección de los cambios en el almacenamiento de agua comparado con la evapotranspiración directa. Esto permite detectar la reducción de humedad del suelo la cual puede disminuir hasta alcanzar el punto de marchitez y provocar la muerte debido al daño vascular en las plantas (Zhang et al., 2019), y por ende detectar eventos de sequía agrícola.

Se considera que el SEDI es conceptualmente similar al SPI, por lo cual su estimación puede seguir el proceso de cálculo descrito McKee et al., (1993), ajustando los valores de

evapotranspiración a una función de distribución gamma que posteriormente son transformados usando una distribución normal inversa para estandarizar los resultados (Martinez, 2018).

2.6. Metodología para caracterización de las sequías.

En sus primeros acercamientos a la definición objetiva de las sequías hidrológicas, Yevjevich (1967) asocia a este fenómeno factores como la duración, extensión espacial, severidad (intensidad), probabilidad de recurrencia e inicio (o terminación). Es así como establece las variables sobre las que basaría su metodología de caracterización, siendo estas la precipitación a nivel del suelo, evaporación y evapotranspiración, precipitación efectiva (precipitación menos evaporación), escorrentía, almacenamiento de agua.

Para definir matemáticamente la ocurrencia de un evento de sequía en un tiempo y área determinada, Yevjevich (1967) ilustra de manera gráfica el comportamiento de la variable de interés durante el periodo de tiempo de análisis tal como se muestra en la Figura 11 en donde se define un valor X_0 como límite entre estado de sequía y de no sequía; con lo que, si la variable llegase a estar por debajo de este límite implicaría una condición de sequía, y de manera similar, si se encuentra por encima del valor de referencia se diría que el área analizada no se encuentra en sequía.

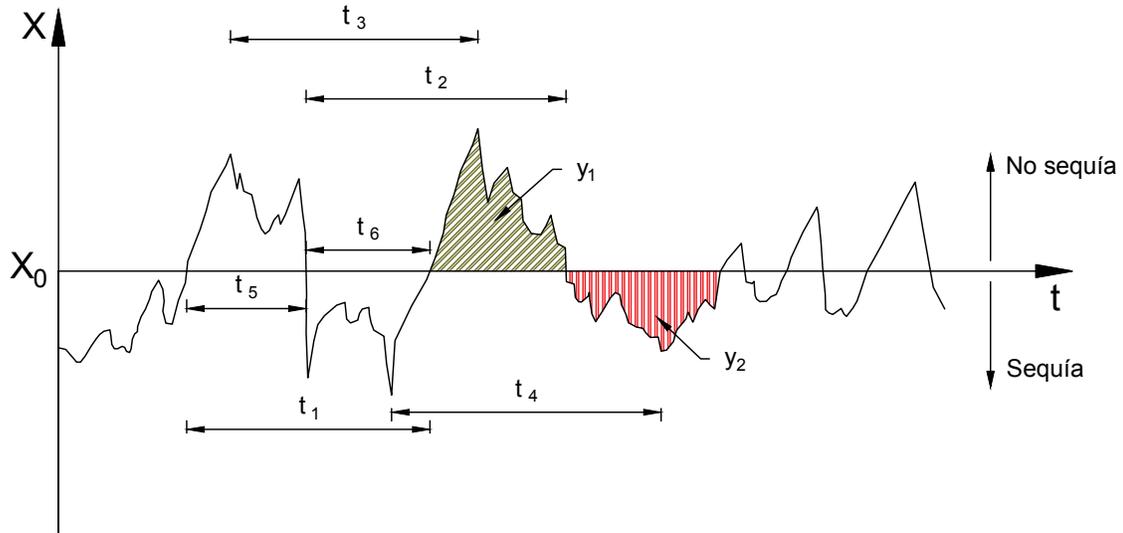


Figura 11. Condición de sequía para una variable de interés. Fuente: Adaptada de Yevjevich (1967).

Yevjevich (1967) señala que t_1 corresponde a la distancia entre cruces ascendentes; t_2 es la distancia entre cruces descendentes; t_3 es la distancia entre picos sucesivos; t_4 es la distancia entre depresiones sucesivas; t_5 es la distancia entre los sucesivos cruces ascendentes y descendentes; t_6 es la distancia entre el cruce sucesivo hacia abajo y hacia arriba; y_1 es la suma de las desviaciones positivas entre los sucesivos cruces ascendentes y descendentes; y_2 es la suma de las desviaciones negativas entre los sucesivos cruces descendentes y ascendentes; sin embargo, en términos de definición de la sequía, t_5 , t_6 , y_1 e y_2 parecen adaptarse mejor a las necesidades prácticas en la medición de los déficits hídricos y su duración.

De igual manera, en la Figura 11 se puede apreciar que el límite o valor de referencia propuesto es constante a lo largo del periodo de análisis; sin embargo, Yevjevich (1967) advierte que éste puede no ser constante y que podría ser considerado como una función determinística, una variable estocástica, o una combinación de ambas. Lo anterior como lo muestran Corzo Perez et al. (2011) al usar curvas de duración de frecuencia de datos diarios y hacer un análisis de percentiles en función de características asociadas a los cuerpos de agua y la variable analizada, con lo que se

puede ver la flexibilidad en la definición del valor límite de acuerdo con el análisis del investigador.

Diferentes autores definen las siguientes características de sequía (Corzo Perez et al., 2011; Tsakiris et al., 2007; Yevjevich, 1967; Y. Zhu et al., 2019):

1. Duración: en forma general, y como lo describe Tsakiris et al., (2007), la duración es el número consecutivo de intervalos en los cuales la variable hidrológica analizada se encuentra por debajo del límite definido (X_0) o threshold, por lo que la duración estará definida entre el instante de tiempo en el que la variable cae por debajo del threshold y el instante en el que la variable sobrepasa éste límite de nuevo (Corzo Perez et al., 2011).
2. Área de sequía: dependiendo del interés del investigador puede extenderse desde pequeñas cuencas hasta extensiones a nivel continental. La elección del investigador puede estar dada como un parámetro de interés en una región determinada, o cómo una variable estocástica la cual puede cambiar de acuerdo a la magnitud del evento de sequía. En cualquier caso, el área de sequía corresponderá a la cobertura que produzca el evento sobre un extensión de tierra (Yevjevich, 1967).
3. Intensidad de la sequía: teóricamente se puede considerar que corresponde al valor promedio de un parámetro de sequía por debajo del nivel de umbral (e.g., la distancia en el eje negativo mostrado en la Figura 11, medido desde el valor X_0 , en el cual se define el límite entre estado de sequía y de no sequía), el cual es medido como la relación entre la severidad de la sequía y su duración (Bae et al., 2018)
4. Probabilidad de ocurrencia: puede definirse como la proporción de veces que ocurriría un evento (k), en este caso de sequía, para un determinado número de observaciones (N), es decir, $P(A) = k/N$. Esto se mide como un valor binario en el cual ocurre o no el

evento, por lo cual suele estar asociado como una fracción o porcentaje desde un punto de vista de análisis de frecuencias (Pértega & Pita, 2004).

5. Inicio o terminación del evento: corresponde al instante en el cual la variable cambia a una condición inferior al threshold (inicio de la sequía) o viceversa (fin de la sequía).

2.7. Análisis Espacio-Temporal.

Corzo Perez et al. (2011) presentan dos metodologías que describen el desarrollo espacio temporal de las sequías hidrológicas a escala global, éstas corresponden a enfoques no contiguo y contiguo y se presentan a continuación. De igual manera, este análisis se puede realizar con los resultados del cálculo de los DI. Cabe aclarar que los análisis NCDA y CDA se harán únicamente para las variables de escorrentía y humedad del suelo calculadas por el modelo hidrológico.

2.7.1. Análisis de áreas no contiguas de sequía (NCDA).

El análisis de áreas no contiguas de sequía (NCDA por sus siglas en inglés) presenta series de tiempo de porcentaje de áreas de sequía en la zona de estudio para determinar principalmente información como cantidad promedio de sequías, duración y severidad. Este análisis consiste en definir un *threshold* T_t mencionado anteriormente de acuerdo con la Ecuación (3), de percentiles invertidos de 60 a 95 de escorrentía y humedad del suelo para cada celda en el área de análisis, agrupando las series de datos de cada mes del año para poder obtener un threshold único para cada uno de los meses como se ve en la Figura 30. Este threshold, como se explicó anteriormente, será después suavizado.

$$D_s(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } X_t < T_t \\ 0 & \text{si } X_t \geq T_t \end{cases} \quad (3)$$

Donde D_s es el estado de sequía en cada celda en el tiempo t , el cual es definido por la variable hidrológica X simulada en cada instante de tiempo t (Corzo Perez et al., 2011).

Adicionalmente, es de interés conocer el porcentaje de área que se encuentra en estado de sequía en un instante t de tiempo. Para ello se define el porcentaje de área en sequía de acuerdo con la Ecuación (4).

$$PDA(t) = \frac{100}{A_{tot}} \sum_{c=1}^N (D_s(t) \cdot A), \quad (4)$$

Donde PDA es el porcentaje de área en sequía en el tiempo t , relativo al área total considerada A_{tot} . Por otro lado, A representa el área de cada celda y N el número de celdas del área de estudio.

En este estudio, se analiza la cuenca Magdalena-Cauca, dividida en regiones por pisos termales, de acuerdo con la clasificación del IDEAM, y de la misma manera de acuerdo con la división política de Colombia en Departamentos. Adicionalmente a esto, se realizó un proceso de limpieza conectando celdas con sus vecinas en estados de *sequía* o *no sequía* usando un filtro con un algoritmo de reconocimiento de imagen, en donde celdas que hubiesen podido ser detectadas en estado de *sequía* o *no sequía* son cambiadas a su opuesto, pero debido a su aislamiento, es más probable que el estado real de dicha celda sea el mismo que sus celdas vecinas.

2.7.2. Análisis de áreas contiguas de sequía (CDA).

El análisis de áreas contiguas de sequía (CDA por sus siglas en inglés) usa los resultados del método NCDA y los lleva un paso más allá como método complementario determinando la coherencia de eventos de sequía, resultando en información como el número de áreas de sequía conectadas espacialmente, localización en el área de estudio y magnitud del evento máximo.

Capítulo 3. Metodología para la caracterización hidrológica

3.1. Datos y ajuste de la información recopilada

Para poder ejecutar el modelo hidrológico escogido, es necesario disponer en primer lugar del modelo digital de terreno, o DEM por sus siglas en inglés, del área de estudio en formato raster y a una resolución adecuada para que los tiempos de computación no sean tan prolongados y por otro lado para evitar perder el detalle deseado para el área estudiada. Este DEM fue descargado del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA, que produce imágenes con una resolución de 90m x 90m. Sin embargo, debido a la gran magnitud del área de estudio, se determinó que una resolución de 5km x 5km sería adecuada, por lo que fue necesario ajustar la resolución de estas imágenes. Posteriormente, se obtuvo el archivo shape de la cuenca Magdalena-Cauca desde el portal web del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), y con él se extrajo el DEM únicamente del área a estudiar.

Con el DEM del área de estudio, ajustado y proyectado a coordenadas planas correspondientes a la zona geográfica, se produjo mediante herramientas GIS, los rasters de Acumulación de Flujo y Dirección de Flujo, también necesarios como datos de entrada para ejecutar el modelo hidrológico.

En cuanto a la información meteorológica necesaria como datos de entrada del modelo y para analizar los índices de sequía escogidos, se descargaron datos diarios y espacialmente distribuidos de precipitación, evapotranspiración actual, evapotranspiración potencial y temperatura de diferentes fuentes de medición remota como ERA-INTERIM, ERA5, CHIRPS y GLEAM. Estos datos se obtuvieron para el periodo de estudio desde el año 2000 a 2015, y además fue necesario realizar el ajuste de resolución, proyección, y extracción de la información específica del área de

estudio de estas imágenes de la misma manera que el DEM para tener consistencia en la información espacialmente distribuida.

Por último, y para poder calibrar el modelo, se obtuvo información de caudal en 6 estaciones de caudal sobre los ríos Magdalena y Cauca, con la misma extensión y resolución temporal que la demás información meteorológica (esto es, escala diaria y desde el año 2000 al año 2015). Estos fueron descargados desde el portal web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Un diagrama de flujo ilustrando el proceso de calibración se puede observar en la Figura 12.

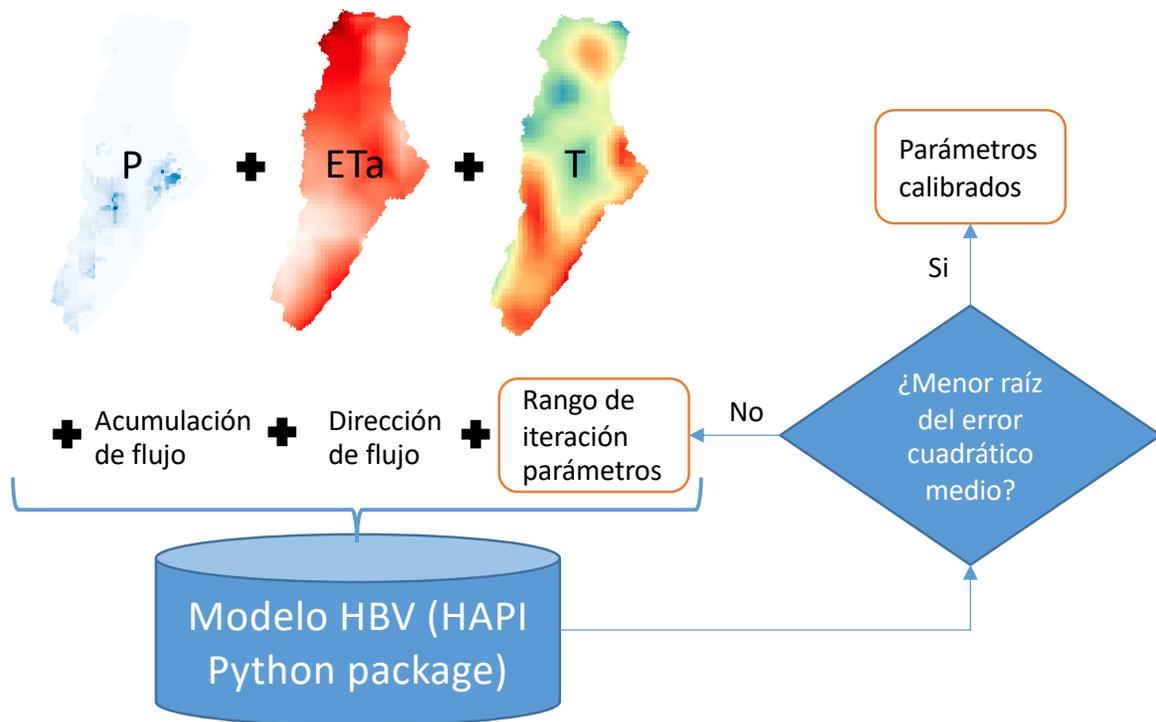


Figura 12. Diagrama de flujo proceso de calibración del modelo HBV. Fuente: Autores.

3.2. Estructuración del modelo hidrológico

La estructuración del modelo hidrológico empieza con la descarga de la información necesaria, esto es, modelo digital de terreno (DEM) e información hidrometeorológica. A continuación, es

necesario delimitar la cuenca de estudio con ayuda del DEM y el uso de herramientas GIS y adicionalmente generar los rasters de dirección de flujo y acumulación de flujo. Se reproyecta la información obtenida a un sistema de coordenadas planas y coherente con la zona de estudio y se define el tamaño del píxel a usar, que para este caso es de 5km x 5km. Después de que toda la información descargada es ajustada mediante el procedimiento explicado, está lista para que la herramienta HAPI la pueda leer.

Inicialmente es necesario hacer la calibración de los parámetros que requiere el HBV, de acuerdo con la información diaria de caudal de las seis estaciones escogidas en el periodo del 01/01/2000 hasta el 31/12/2011, esto con el fin de comprobar el desempeño del modelo después de su calibración tomando como periodo de validación desde el 01/01/2012 hasta el 31/12/2015. El resultado de la calibración da como resultado un valor para cada parámetro, y estos a su vez son distribuidos espacialmente como raster para que, en cada celda, el valor del parámetro sea el mismo. Posterior a esto, se ejecuta el modelo con la herramienta HAPI, y se seleccionan las variables que se requieren para los análisis de sequía posteriores, en este caso, se escoge la escorrentía y la humedad del suelo.

Después de correr el modelo, el código guarda automáticamente los resultados a resolución diaria y en forma de raster en las carpetas especificadas para cada variable. El procedimiento anterior se puede ver de manera gráfica según la Figura 13.

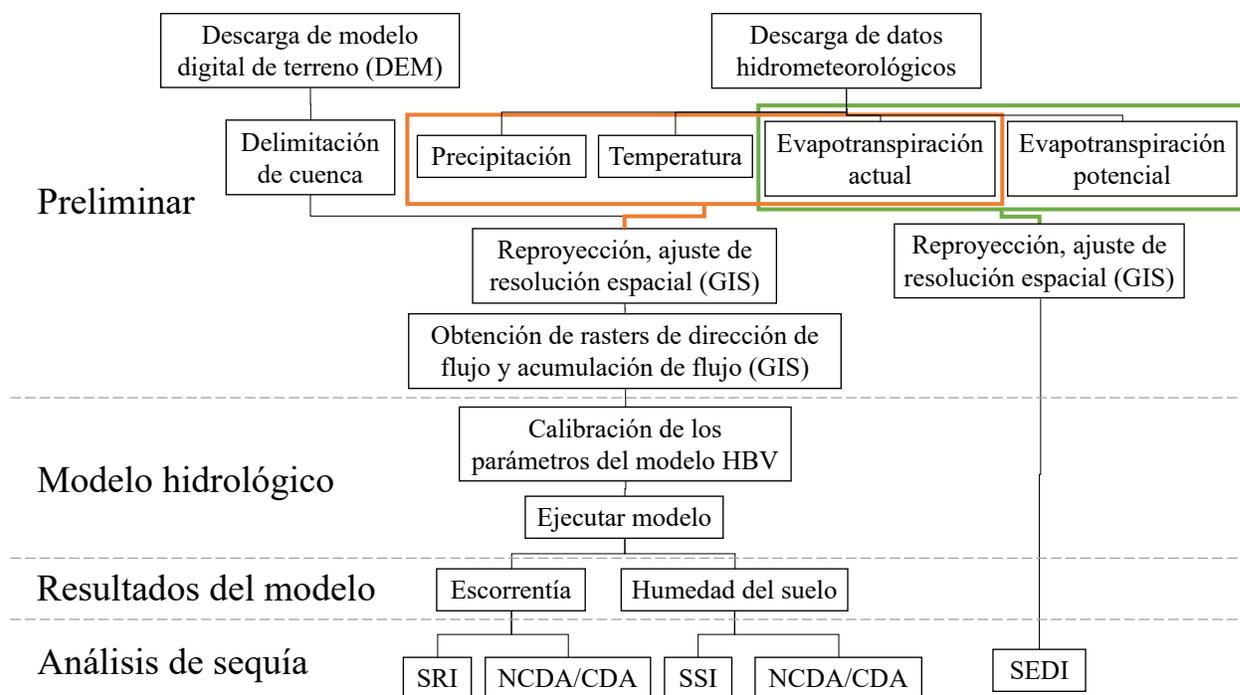


Figura 13. Diagrama de flujo para el montaje del modelo hidrológico. Fuente: Autores.

Con estos resultados ahora se procede a realizar los análisis de índices de sequía, NCDA y CDA.

3.3. Cálculo de los DI

Desde el enfoque de análisis de sequías con los DI, es necesario agregar la información diaria para trabajar la media mensual de la variable hidrológica a resolución mensual, puesto que estos normalmente son calculados con periodos de agregación de 1, 3, 6 o hasta 9 y 12 meses.

Para calcular los índices de sequía (SRI, SSI y SEDI), se debe realizar un tratamiento estadístico a las series de datos de cada una de las variables a analizar, de acuerdo con los índices, esto es, escorrentía, humedad del suelo y déficit de evapotranspiración. Para ello, se debe analizar los valores mensuales de cada variable celda por celda en el área analizada. En la Figura 14 se puede observar gráficamente lo descrito anteriormente, en donde cada capa representa un raster y cada celda contiene, en dicha área, un valor mensual agregado de la variable analizada. Cabe aclarar

que los análisis de sequía siguientes fueron desarrollados por los autores y se encuentran disponibles para su descarga, su análisis y uso libre en GitHub⁵.

En los numerales 2.1, 2.5.2 y 2.5.3 se describieron los índices de sequía a ser empleados en el presente trabajo de investigación, los cuales se ajustan a una distribución gamma con el método descrito por THOM (1958) y recomendado por Mckee et al. (1993), para posteriormente ser normalizados con media $\mu = 0$ y una desviación estándar $\sigma = 1$. En la Tabla 7 se puede observar la clasificación de las sequías de acuerdo con la estimación del DI y su respectiva probabilidad de ocurrencia acumulada, con lo cual se puede determinar la intensidad de un evento específico.

Tabla 7.

Clasificación y su respectiva probabilidad de ocurrencia acumulada para los índices de sequía.

Categoría	DI Valor (SRI, SSI & SEDI)	Probabilidad acumulada (%)
Extremadamente húmedo	$DI \geq 2$	2.28
Moderadamente húmedo	$1.5 \leq DI < 2$	6.68
Ligeramente húmedo	$1 \leq DI < 1.5$	15.87
Normal	$-1 < DI < 1$	50.00
Sequía leve	$-1.5 < DI \leq -1$	84.13
Sequía moderada	$-2 < DI \leq -1.5$	93.32
Sequía extrema	$DI \leq -2$	97.72

Nota. Adaptado de A Comprehensive Approach to Assess the Hydrological Drought of Inland River Basin in Northwest China. N. Zhu et al., 2018, pg. 6.

⁵ <https://github.com/juancotrino/Drought-analysis-functions/>

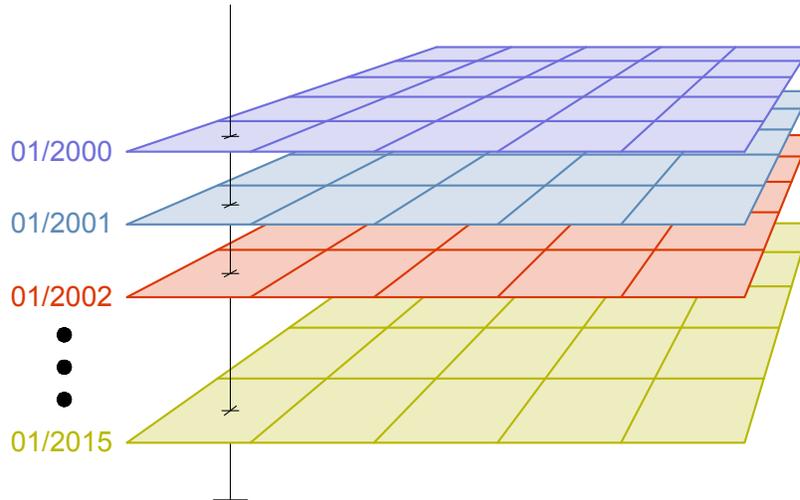


Figura 14. Esquema del cálculo de índices de sequía y su análisis temporal. Fuente: Autores.

3.4. Análisis NCDA y CDA

Por otro lado, para los análisis espacio temporales NCDA y CDA, para este estudio, el threshold se determinará para cada mes de cada año durante el periodo de análisis, por ejemplo, los datos diarios de lluvia de todos los meses de enero desde 2000 hasta 2015, y de la misma manera con los diferentes meses del año. Posterior a esto, se analizan los datos diarios de la variable hidrológica para un mes en particular de todos los años del periodo de estudio (esto se puede ver de manera gráfica en la Figura 15) y se encuentran diferentes percentiles desde el 60 al 95 para esta serie de datos, los cuales indican que los valores de esta variable son excedidos, por ejemplo, el 60% de las veces, de manera similar y como sugiere Corzo Perez et al. (2011) es posible hacerlo; esto determinará para este mes el valor del threshold. Así mismo se usará un método de suavizado desarrollado por Savitzky & Golay (1964) de los percentiles anteriormente hallados (Corzo Perez et al., 2011; Van Loon et al., 2010) lo que definirá finalmente un threshold que variará a través del tiempo para esta variable hidrológica analizada, y esto permitirá definir valores binarios de *sequía* y *no sequía* representados por unos y ceros respectivamente.

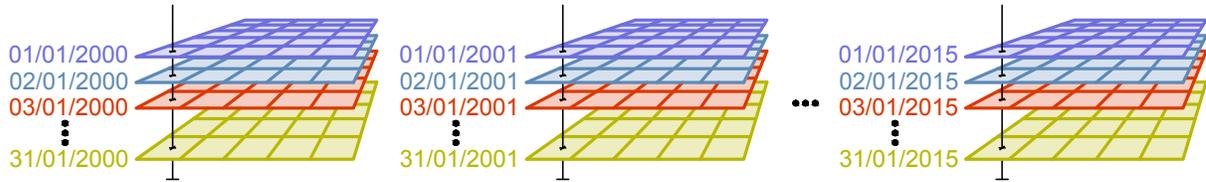


Figura 15. Esquema del cálculo de percentiles en una celda dada, para análisis NCDA y CDA para una variable y un mes en particular (enero) para todo el periodo de análisis. Fuente: Autores.

El resultado de aplicar el análisis de percentiles de acuerdo con lo explicado, debería resultar en una “escalera” que representa el valor de la variable hidrológica correspondiente a un percentil en particular para cada uno de los meses del año como se aprecia en la Figura 16 para un año particular. Allí se puede ver cómo en algunos periodos de tiempo para el año analizado, la variable se encuentra por encima o por debajo de la “escalera”, lo que determinará, después de aplicar un proceso de suavizado a la serie del threshold (ver Figura 17), los eventos de sequía o no sequía de acuerdo con cada percentil y cada celda.

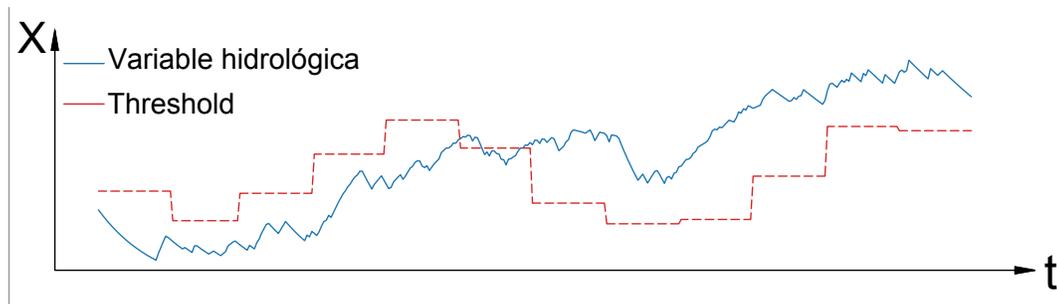


Figura 16. Determinación del threshold por medio de análisis de percentiles. Fuente: Autores.

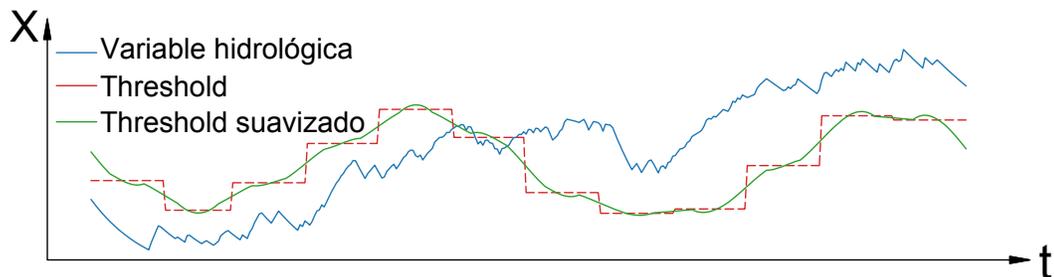


Figura 17. Threshold suavizado para la determinación de eventos de sequía. Fuente: Autores.

El procedimiento anterior corresponde al análisis temporal de las series de datos en una sola celda de la cuenca, ahora, para el análisis espacial, es necesario replicar el proceso al resto de las celdas que conforman el raster de la cuenca. Como resultado se obtendrá una nube de puntos sobre las celdas del raster que identificarán las regiones en donde se presentó sequía y las regiones que no sufrieron este fenómeno.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Modelo hidrológico

El proceso de calibración dio como resultado los parámetros que se muestran en la Tabla 8. Cabe recordar que el valor de cada parámetro es constante en toda la extensión del área de estudio, y estos resultan en rasters que, al finalizar el proceso de calibración, la herramienta HAPI genera automáticamente para ser usados en el modelo hidrológico.

Tabla 8.

Parámetros calibrados del modelo HBV

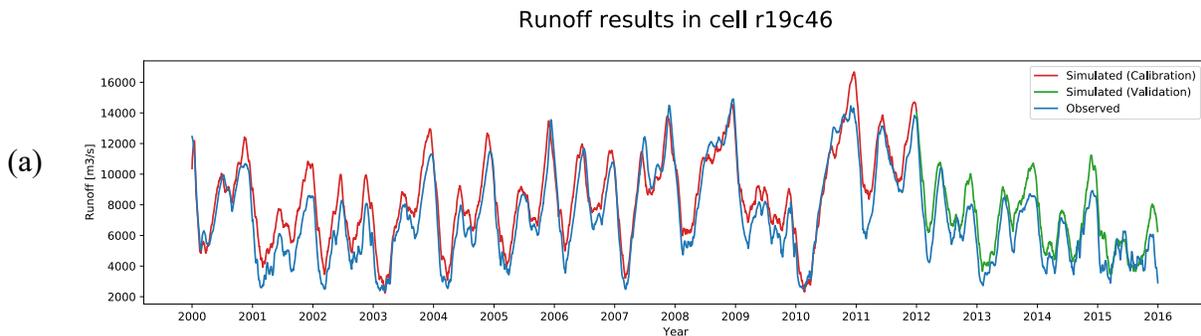
Parámetro	Valor
RFCF	0.752485
FC	373.466
Beta	1.93999
ETF	0.226895
LP	0.261787
CFLUX	0.000484998
K	0.01
K1	0.0392952
A	0.0105974
Perc	4.37982
K	2.90017
X	0.00848261

Después del proceso de calibración únicamente con datos del periodo 01/01/2000 – 31/12/2011, los resultados de escorrentía y humedad del suelo fueron generados después de ejecutar el modelo con los parámetros calibrados, en este caso para todo el periodo de estudio 01/01/2000 – 31/12/2015. En la Figura 18 se puede ver un desempeño del modelo bastante aceptable tanto en la calibración como en la validación. Esto corresponde a las celdas en donde se localizan las estaciones de caudal.

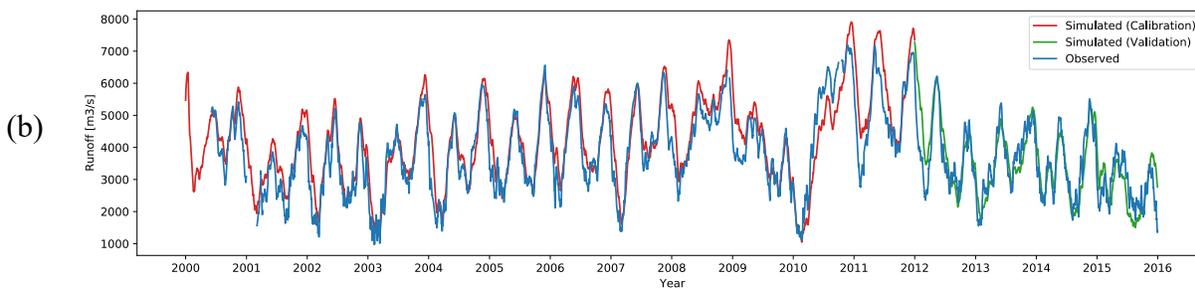
Se ve un desempeño del modelo mucho mejor en las estaciones más aguas abajo (Figura 18, (a), (b)). Esto se esperaba puesto que uno de los datos de entrada para correr el modelo es un peso porcentual que debe ser asignado a cada estación de caudal, para que en el proceso de calibración los parámetros se ajusten proporcionalmente a los datos observados en las estaciones. En este sentido, las estaciones más aguas abajo se les asignó un peso porcentual mayor puesto que tienen mayor área aportante.

De manera similar, en la Figura 18 (c), (d), (e), (f), la simulación del modelo demuestra un comportamiento similar a los datos observados en cuanto a picos y valles en las series de datos. Sin embargo, los parámetros calibrados no fueron lo suficientemente aceptables para describir el comportamiento de la escorrentía en estas celdas. Esto nuevamente, es debido a que a ellas se le asignó un peso porcentual menor, puesto que están más aguas arriba y su área aportante es menor.

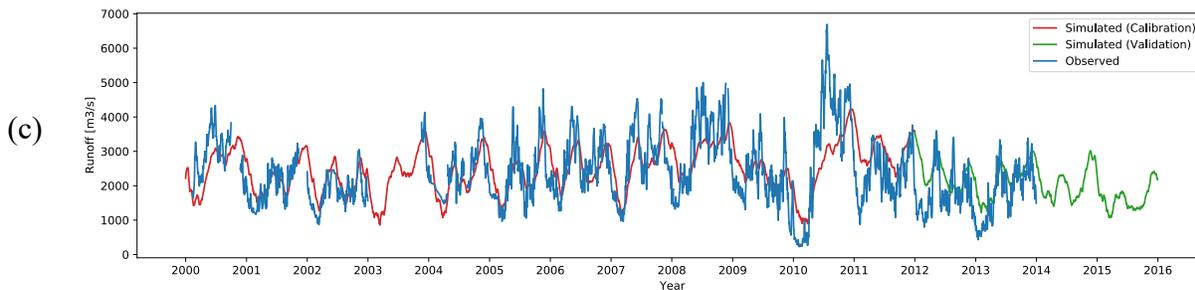
Se puede ver también en la Figura 18 (c), vacíos en la serie de datos observada. Esto se debe a que las series de datos obtenidas del IDEAM tenían información faltante.



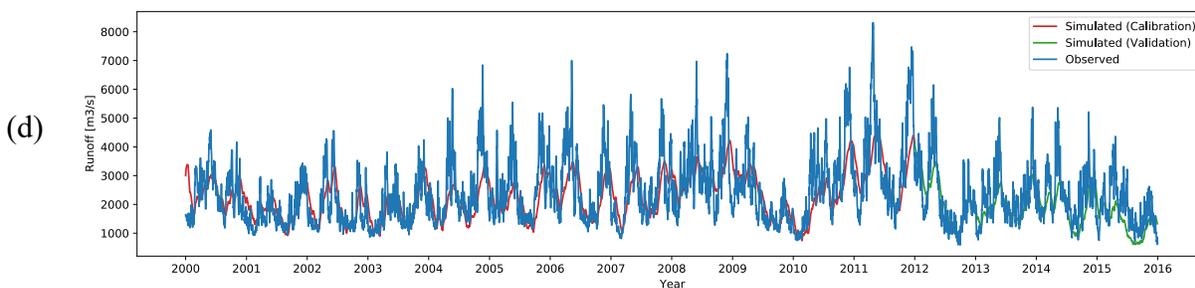
Runoff results in cell r47c67



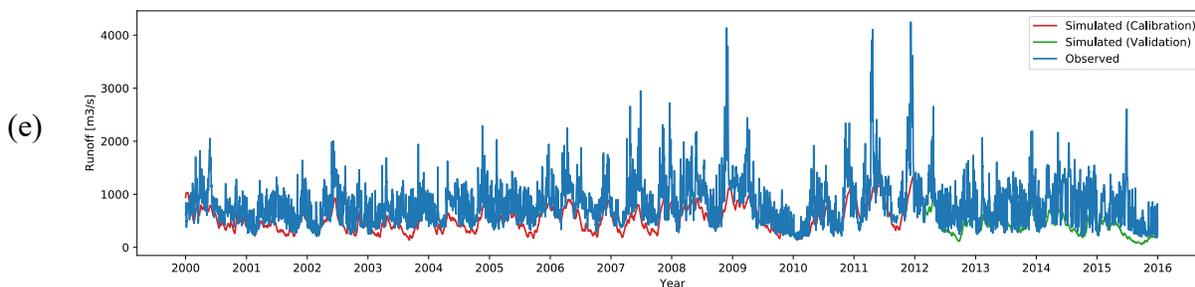
Runoff results in cell r67c49



Runoff results in cell r103c57



Runoff results in cell r161c45



Runoff results in cell r170c41

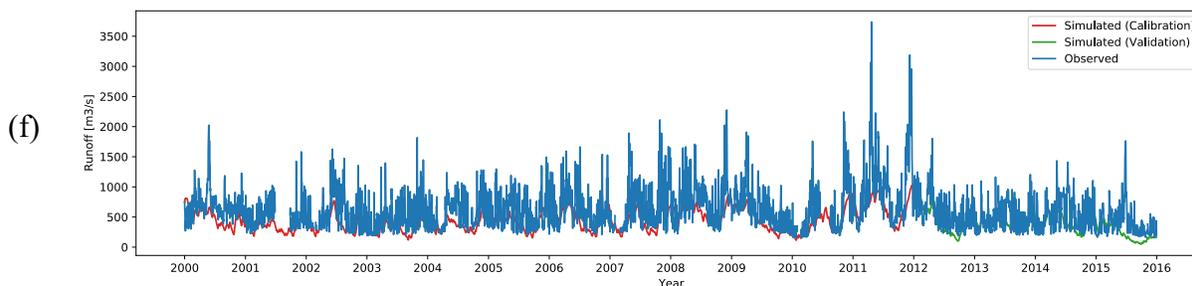


Figura 18. Comportamiento de la escorrentía en las celdas que corresponden a las estaciones de caudal para los periodos de calibración y validación. (a) CALAMAR, (b) PENONCITO, (c) LAS FLORES, (d) PUERTO BERRÍO, (e) PURIFICACIÓN, (f) RÍO ANGOSTURA. Fuente: Autores.

Cabe aclarar que los resultados del modelo, para series de escorrentía simulada, similares a las mostradas en la Figura 18, pueden ser generadas en cualquier celda del área estudiada; sin embargo, es recomendable generar análisis en aquellas celdas que cuentan con estaciones de medición de caudales con el fin de generar una comparación entre el caudal observado y el simulado, por esto, se seleccionaron las 6 celdas mostradas anteriormente, correspondientes a los puntos de calibración en el presente estudio.

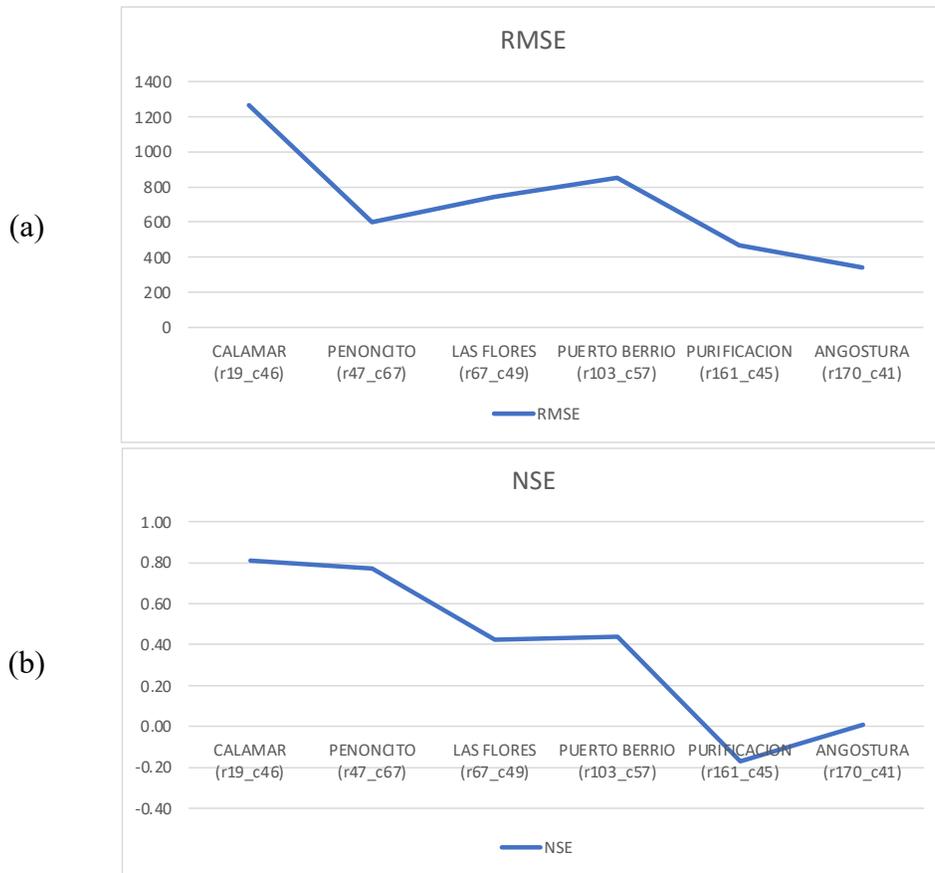
Se calcularon adicionalmente algunos coeficientes de rendimiento para los datos simulados de escorrentía en cada punto de las estaciones de calibración, respecto a los datos observados como se muestra en la Tabla 9. Estos coeficientes son raíz del *error cuadrático medio* (root-mean-square error – RMSE por sus siglas en inglés), *eficiencia Nash–Sutcliffe* (Nash–Sutcliffe Efficiency – NSE por sus siglas en inglés), *error medio absoluto* (mean absolute error– MAE por sus siglas en inglés) y *coeficiente de correlación de Pearson* (Cor). Adicionalmente, se pueden ver estos resultados en la Figura 19, la cual permite apreciar gráficamente cómo cada coeficiente descende en su rendimiento a medida que la estación se aleja del punto de salida de toda la cuenca. Esto se debe a la importancia porcentual que fue asignada a cada una de las estaciones al momento de introducir su información espacial.

Tabla 9.

Coefficientes de rendimiento del proceso de calibración para las estaciones escogidas.

Fuente: Autores.

Estación	Calamar (r19_c46)	Penoncito (r47_c67)	Las Flores (r67_c49)	Puerto Berrio (r103_c57)	Purificacion (r161_c45)	Angostura (r170_c41)
RMSE	1265.3700	600.9568	742.8501	853.6226	469.2320	339.2069
NSE	0.8087	0.7714	0.4217	0.4391	-0.1704	0.0107
MAE	1086.0467	467.1385	584.7336	622.6521	342.1059	241.5103
Cor	0.9513	0.9090	0.6562	0.6882	0.5654	0.5452



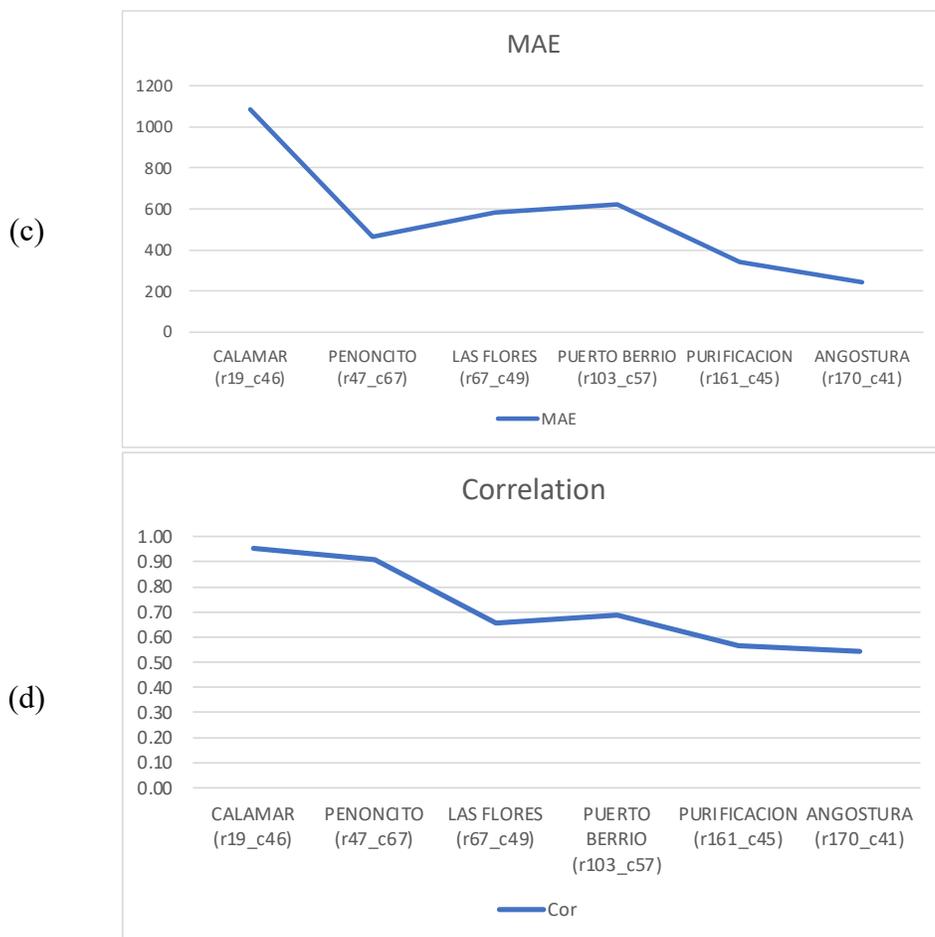


Figura 19. Coeficientes de rendimiento del proceso de calibración para las estaciones escogidas. (a) RMSE; (b) NSE; (c) MAE; (d) Correlation. Fuente: Autores.

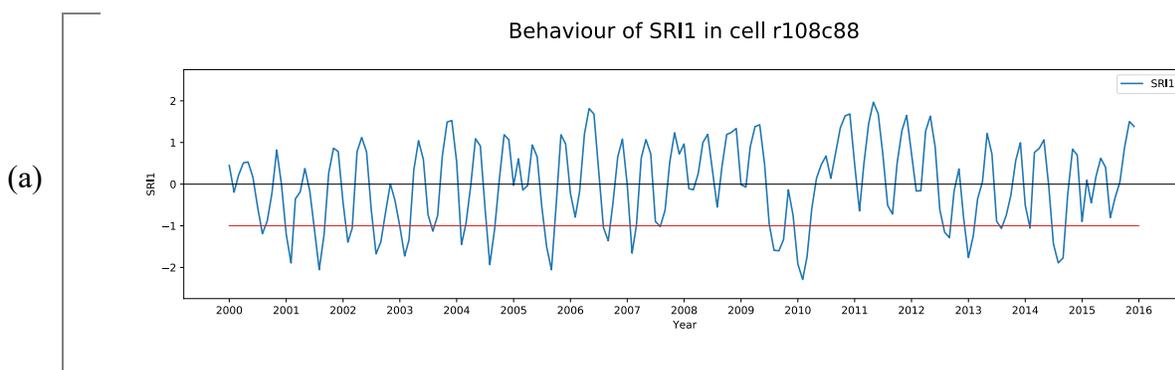
4.2. Índices de sequía

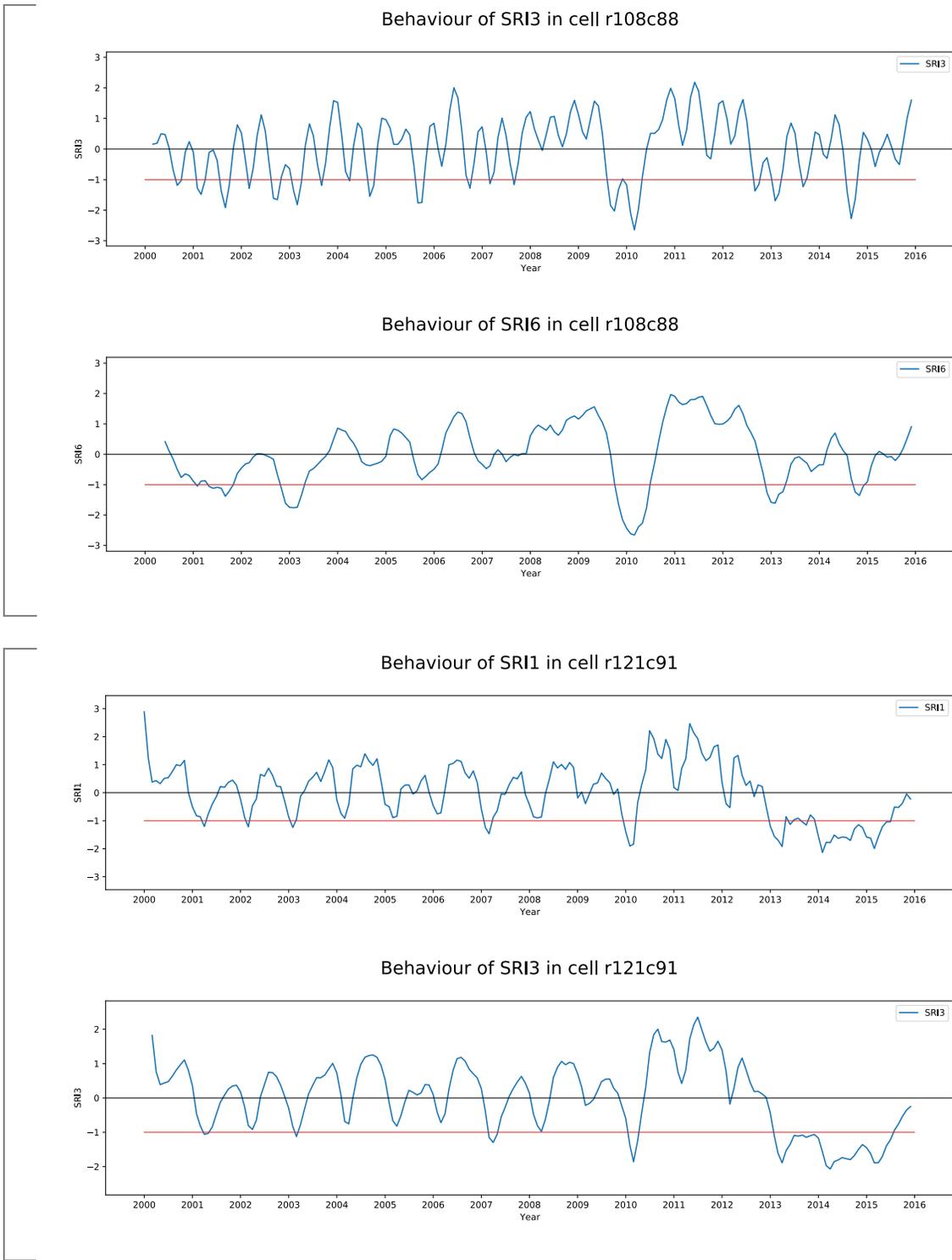
Se realizó el análisis de sequía hidrológica y sequía agrícola mediante la estimación de los índices SRI, SSI y SEDI para el periodo comprendido entre el año 2000 y 2015, con periodos de agregación de 1, 3 y 6 meses. El estudio permitió caracterizar los eventos de sequía en cuanto a su duración, área de sequía, intensidad de la sequía, probabilidad de ocurrencia e inicio o terminación del evento, tal como se describió en el numeral 2.6. Todos los análisis se realizaron de manera espacialmente distribuida en toda el área de estudio para cada celda, índice y periodo de agregación, como se muestra a continuación.

4.2.1. Índice estandarizado de escorrentía - SRI

Este índice es usado para la determinación de sequías de tipo hidrológico y permite calcular la disponibilidad de escorrentía mediante un análisis estadístico, que en este caso implementó los valores de la variable para cada celda del área de estudio de los resultados del modelo HBV. El índice fue calculado para todas las celdas de la cuenca; sin embargo, dado el gran tamaño de la misma, a continuación, se muestran los resultados de dos celdas seleccionadas, las cuales se consideraron representativas al encontrarse en regiones que mostraban áreas (agregación de múltiples celdas, véase PDA en el numeral 4.2.4.4) con eventos de alta intensidad y frecuencia en el periodo seleccionado. La localización geográfica de las celdas seleccionadas puede observarse en la Figura 26.

El periodo de agregación para los resultados mostrados en la Figura 20 corresponde a 1, 3 y 6 meses. Diferentes investigadores suelen incluir periodos de agregación mayores, lo cual se recomienda para estudios posteriores.





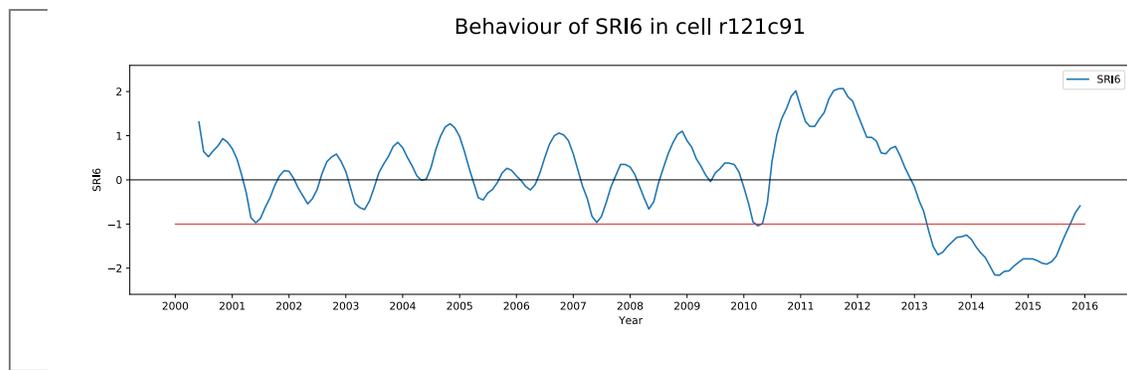


Figura 20. Índice de sequía SRI para celdas r108c88 y r121c91. Fuente: Autores.

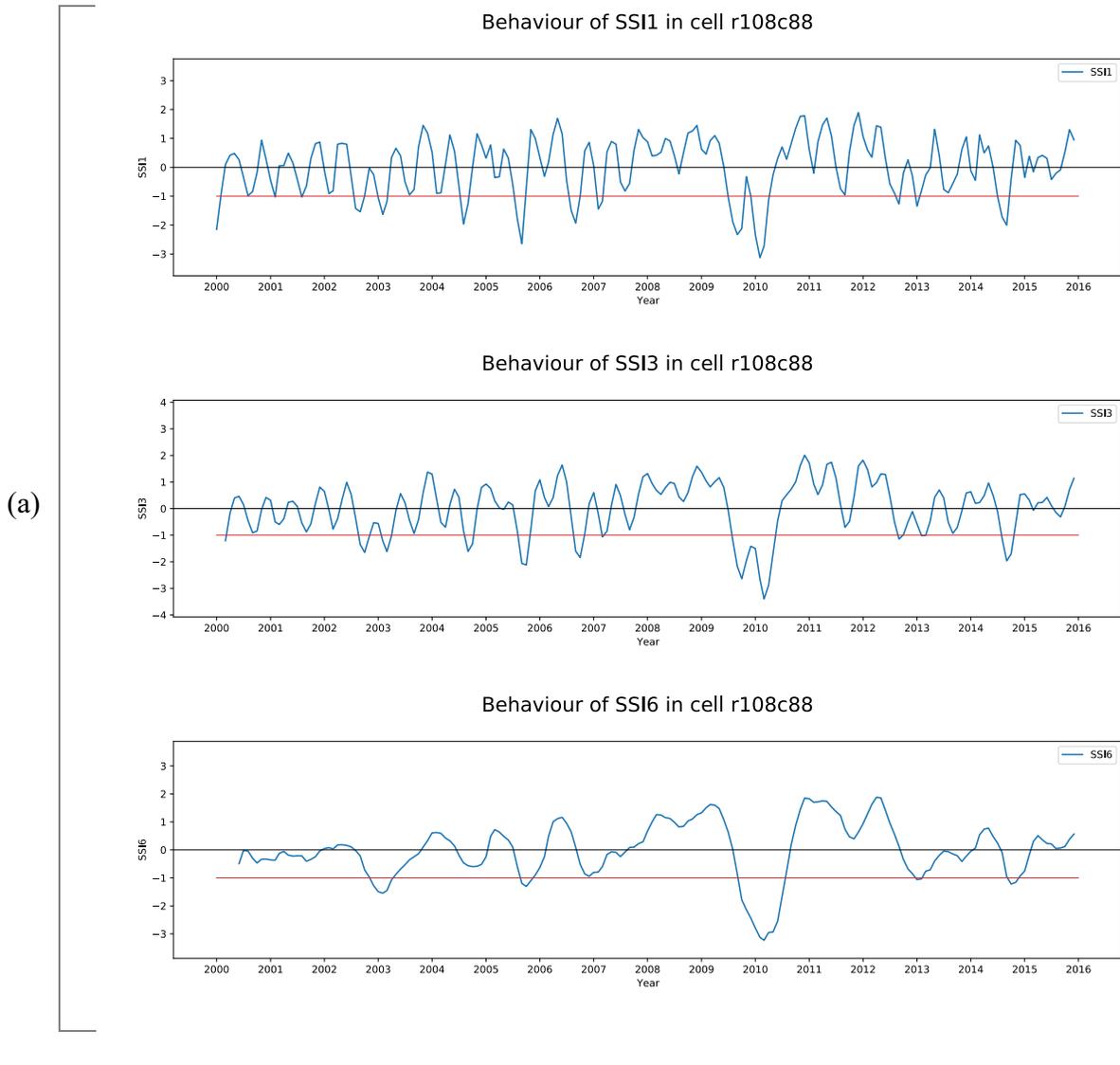
En la Figura 20, se puede observar que el cálculo del SRI1 y SRI3 muestra eventos de sequía de alta intensidad y corta duración, en los cuales se supera el threshold definido numerosas veces y, del mismo modo, las celdas mostradas tiene una recuperación rápida. Se considera que estos periodos de agregación no detectan eventos de sequía de alta duración e impacto en la cuenca. Por el contrario, el SRI6 muestra aquellos eventos de alta duración e intensidad que superan el threshold definido en el periodo crítico entre el año 2013 y 2015, lo cual se considera en esta investigación, describe aquellos eventos de alto impacto en la cuenca y contrasta con el evento ENOS mostrado en la Figura 1.

El análisis general de la cuenca se realiza por medio de la comparación entre los diferentes índices implementados, lo cual se muestra en el numeral 4.2.4.

4.2.2. Índice estandarizado de humedad del suelo - SSI

Este índice es usado para la determinación de sequías de tipo hidrológico y permite calcular la humedad del suelo mediante un análisis estadístico, que en este caso implementó los valores de la variable para cada celda del área de estudio de los resultados del modelo HBV. El índice fue calculado para todas las celdas de la cuenca; sin embargo, dado el gran tamaño de la misma, a continuación, se muestran los resultados de dos celdas seleccionadas, las cuales se consideraron representativas al encontrarse en regiones que mostraban áreas (agregación de múltiples celdas,

véase PDA en el numeral 4.2.4.4) con eventos de alta intensidad y frecuencia en el periodo seleccionado. La localización geográfica de las celdas seleccionadas puede observarse en la Figura 26. El periodo de agregación para los resultados mostrados en la Figura 21 corresponde a 1, 3 y 6 meses.



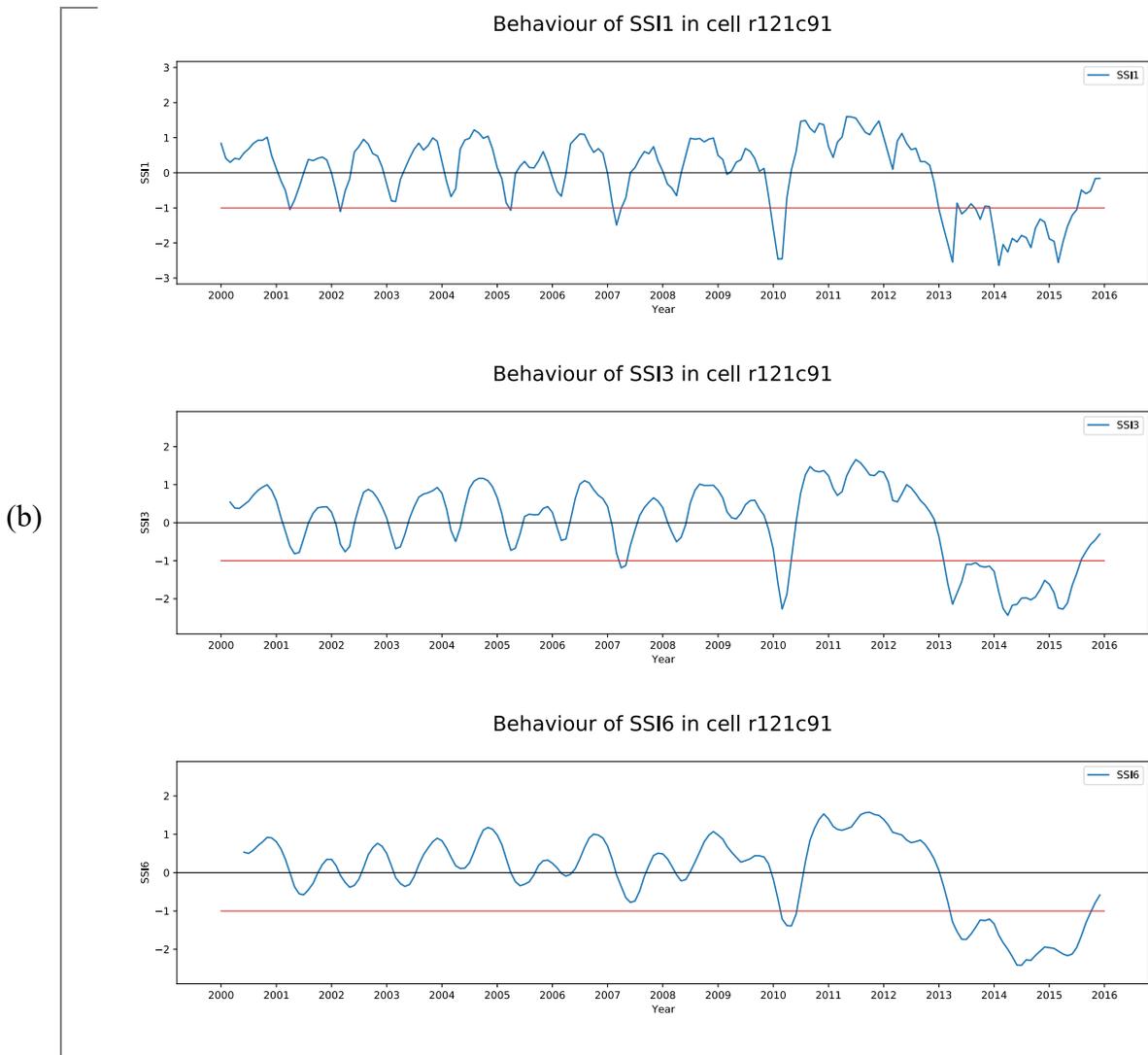


Figura 21. Índice de sequía SSI para celdas r108c88 y r121c91. Fuente: Autores.

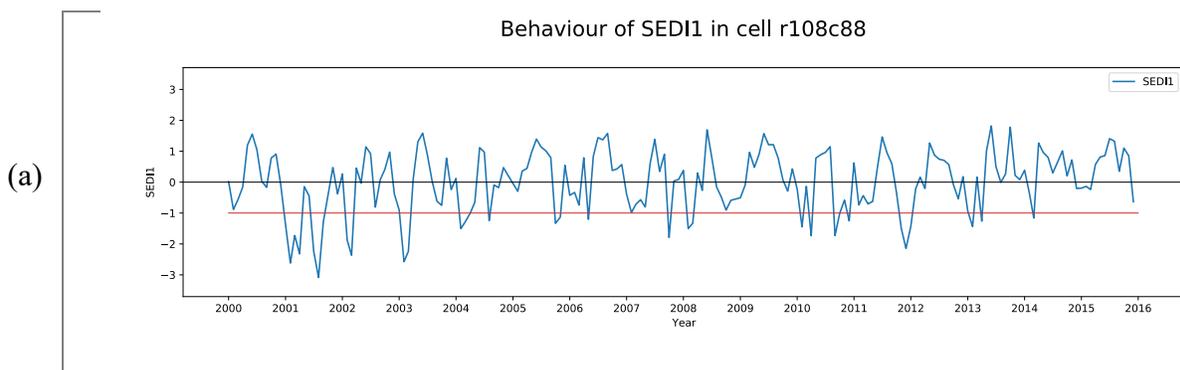
En la Figura 21, se puede observar que el cálculo del SSI1 y SSI3 muestra eventos de sequía de alta intensidad y corta duración (al igual que en el cálculo de SRI para los mismos periodos de agregación), en los cuales se supera el threshold definido numerosas veces y, del mismo modo, las celdas mostradas tiene una recuperación rápida. Por el contrario, el SSI6 muestra aquellos eventos de alta duración e intensidad que superan el threshold definido sólo para el año 2010 y el periodo crítico entre el año 2013 y 2015, lo cual se considera en esta investigación, describe aquellos eventos de alto impacto en la cuenca y contrasta con el evento ENOS mostrado en la Figura 1.

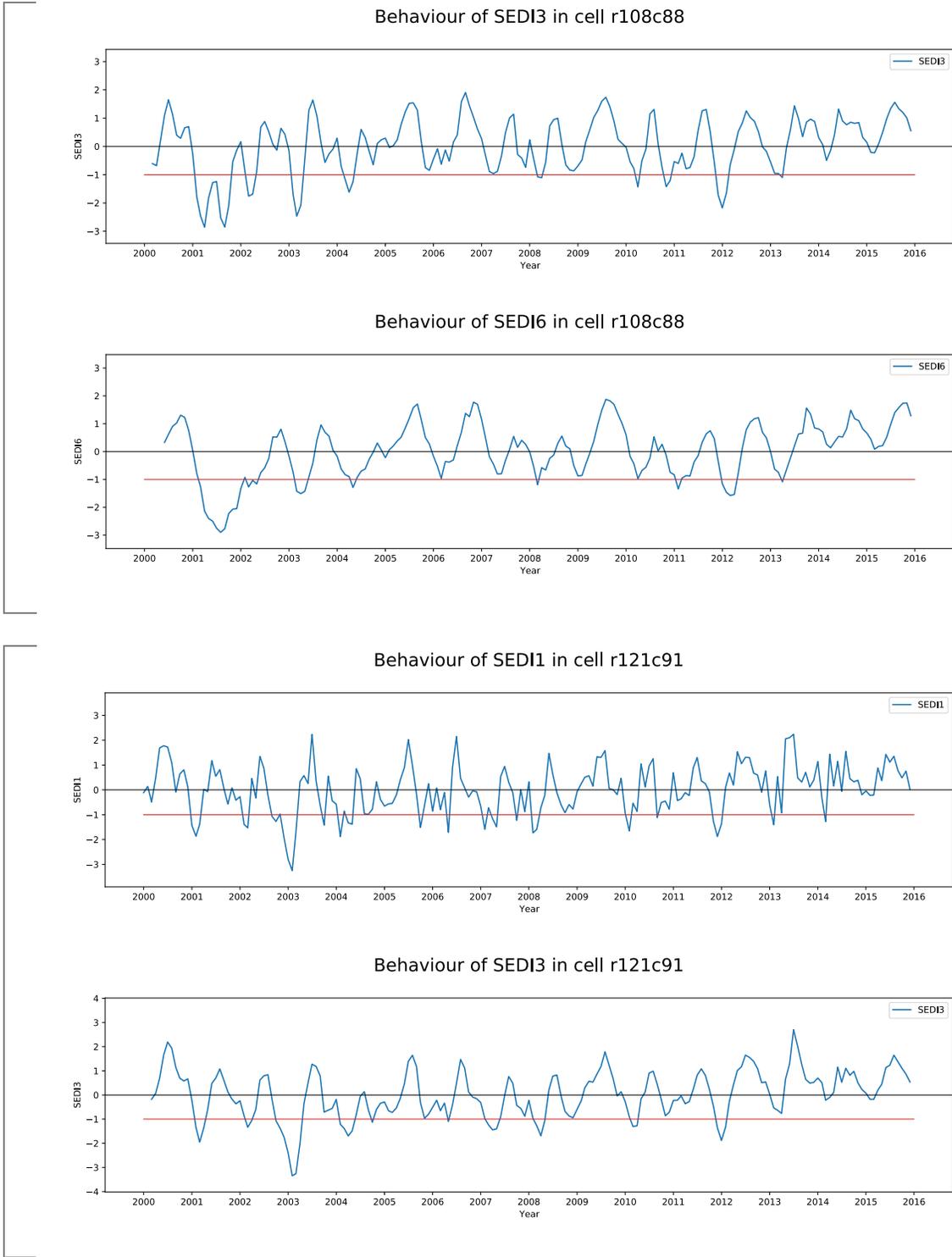
El comportamiento de la sequía entre el SRI y el SSI se considera similar dado que ambos son usados en sequías de tipo hidrológico. El análisis general de la cuenca se realiza por medio de la comparación entre los diferentes índices implementados, lo cual se muestra en el numeral 4.2.4.

4.2.3. Índice estandarizado de déficit de evapotranspiración - SEDI

Este índice es usado para la determinación de sequías de tipo agrícola y permite calcular el déficit de evapotranspiración mediante un análisis estadístico, que en este caso implementó los valores de la variable para cada celda del área de estudio de los resultados del modelo HBV. El índice fue calculado para todas las celdas de la cuenca; sin embargo, como se realiza para el SRI y SSI, se muestran los resultados de dos celdas seleccionadas. La localización geográfica de las celdas seleccionadas puede observarse en la Figura 26.

El periodo de agregación para los resultados mostrados en la Figura 22 corresponde a 1, 3 y 6 meses. Diferentes investigadores suelen incluir periodos de agregación mayores, lo cual se recomienda para estudios posteriores.





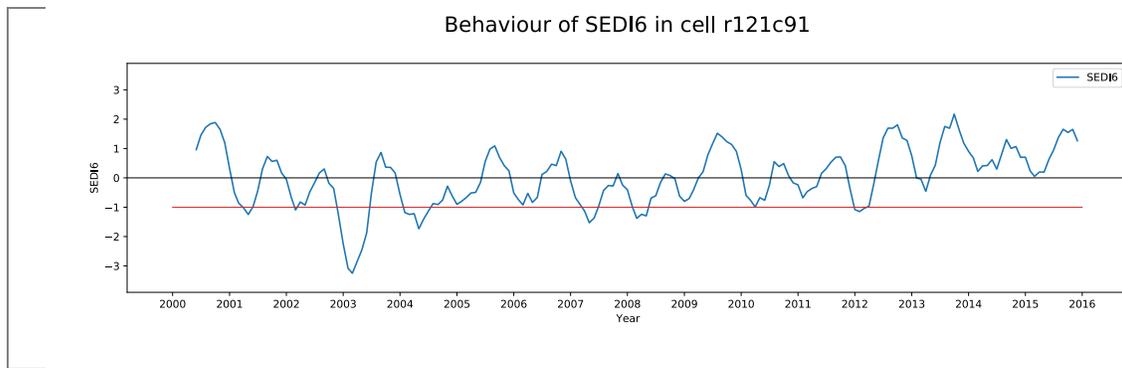


Figura 22. Índice de sequía SEDI para celdas r108c88 y r121c91. Fuente: Autores.

En la Figura 22, se puede observar que el cálculo del SSI1 y SSI3 muestra eventos de sequía de alta intensidad y corta duración, en los cuales se supera el threshold definido numerosas veces con una recuperación rápida de la celda. Por el contrario, el SSI6 muestra aquellos eventos de alta duración e intensidad que superan el threshold definido especialmente en el periodo crítico entre el año 2001 y 2003, difiriendo de los resultados calculados para el SRI y SSI dado que el SEDI es utilizado para el cálculo de las sequías agrícolas.

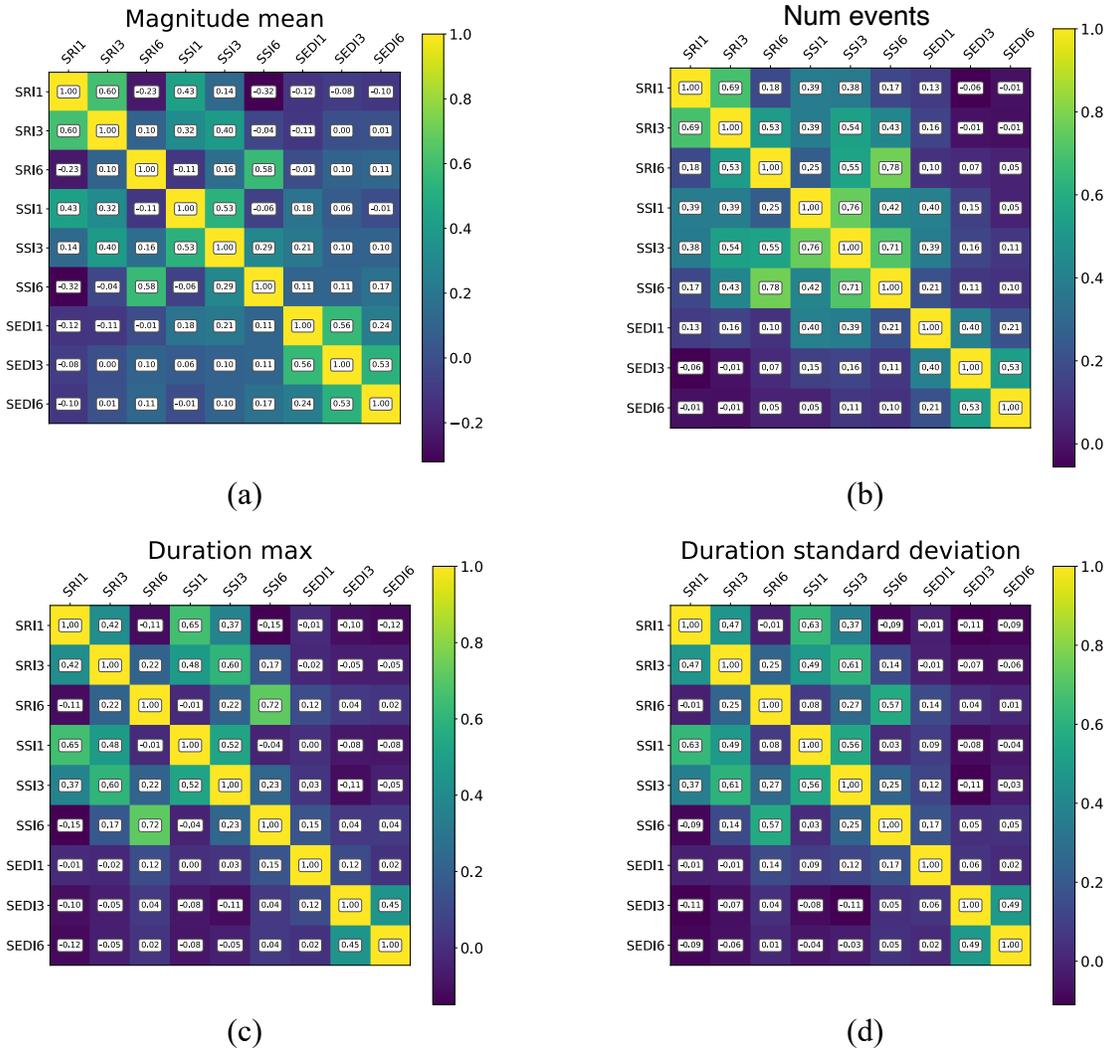
El análisis general de la cuenca se realiza por medio de la comparación entre los diferentes índices implementados, lo cual se muestra en el numeral 4.2.4.

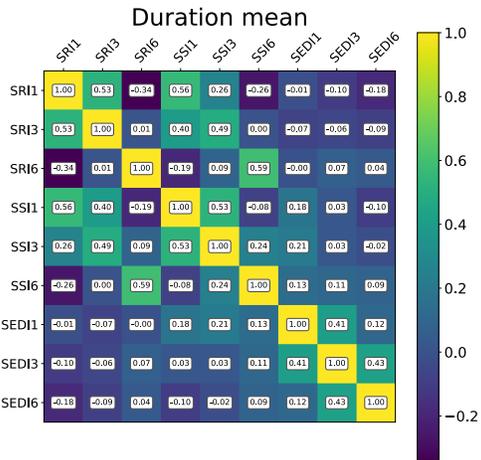
4.2.4. Comparación entre los índices SRI, SSI y SEDI

4.2.4.1. Correlación de estadísticas entre índices

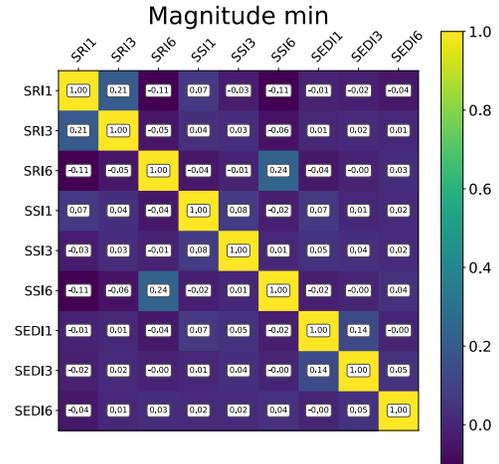
De forma complementaria se realizó la comparación entre los índices mostrados anteriormente con el fin de validar la correlación que existe entre los mismos y sus diferentes periodos de agregación. Para esto, se realizó el análisis estadístico de cada evento con los diferentes índices y se generó una matriz de correlación en la cual se comparó la magnitud media, número de eventos, duración máxima, desviación estándar de la duración, duración media, magnitud mínima, magnitud máxima, desviación estándar de la magnitud como se ve en la Figura 23.

Adicionalmente, se aplicó el análisis espacialmente distribuido en toda el área de estudio como se muestra en la Figura 24.

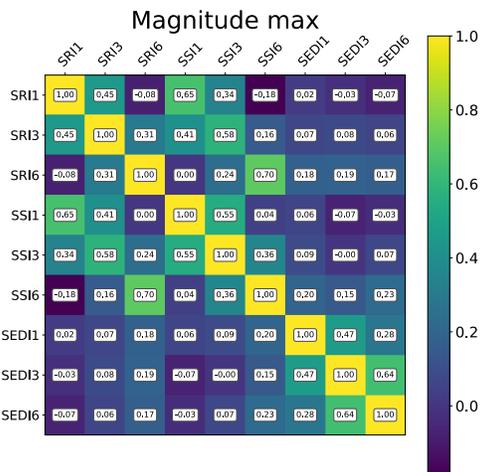




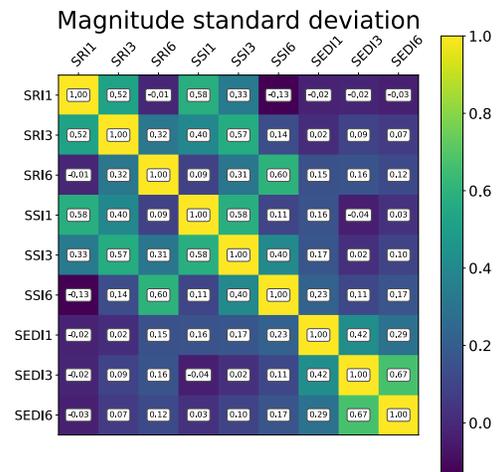
(e)



(f)



(g)

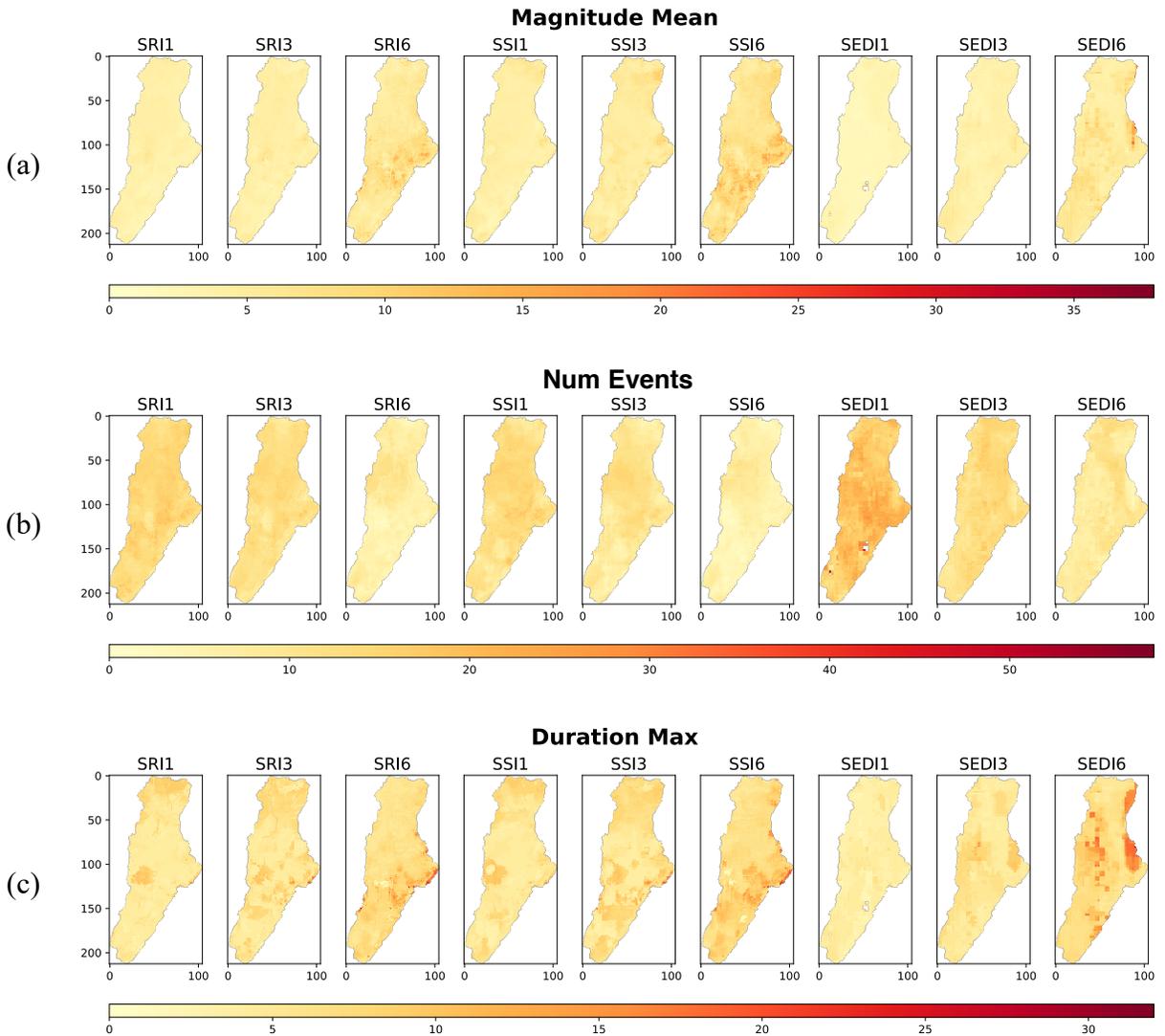


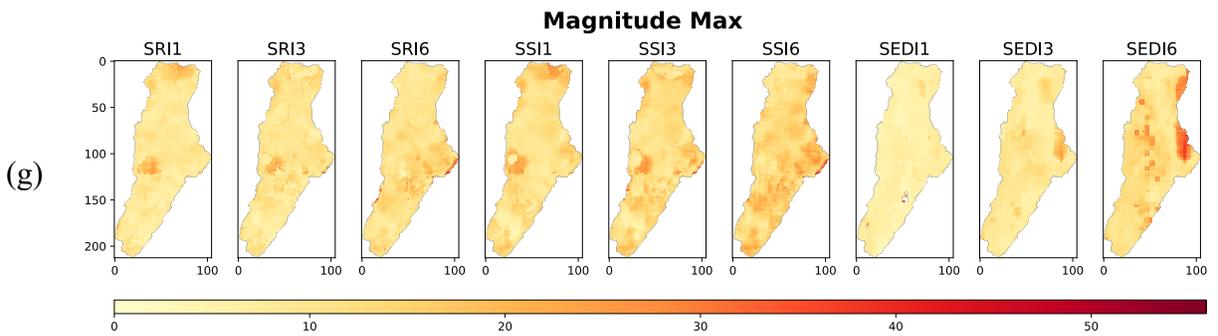
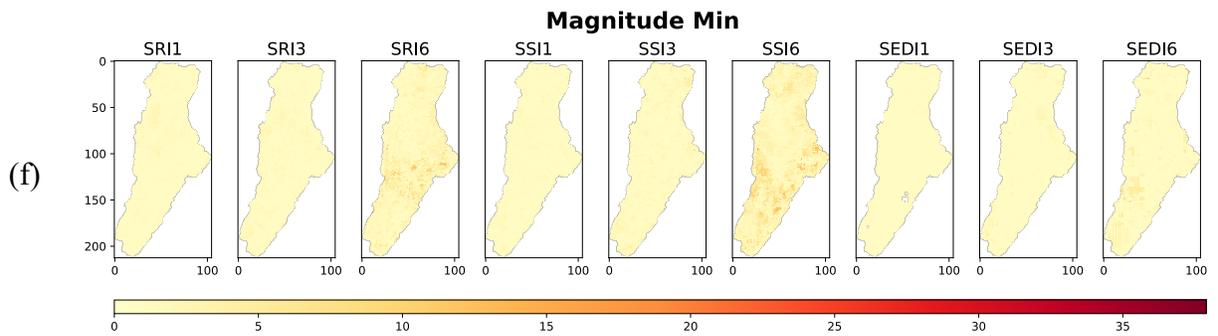
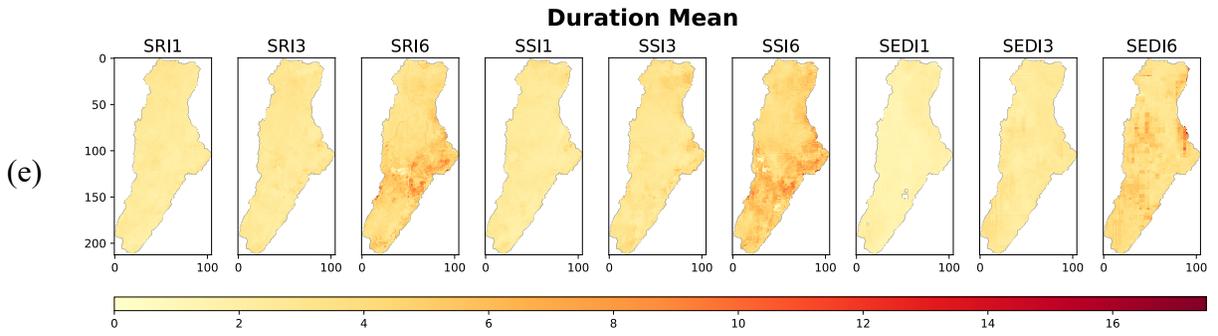
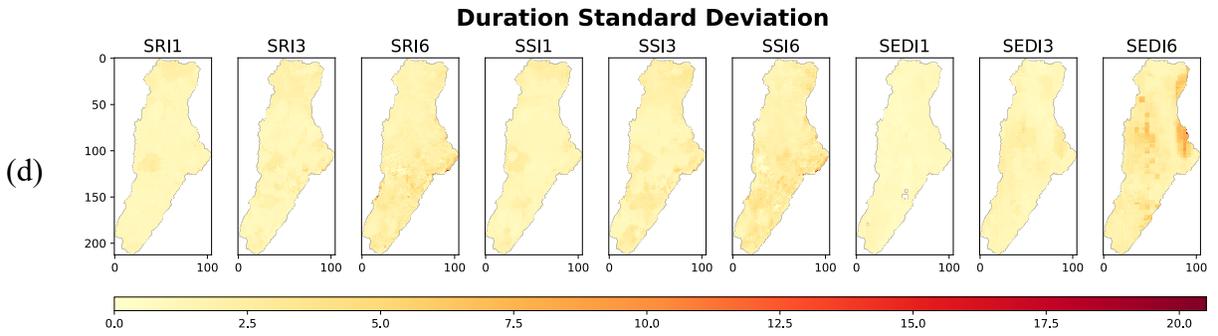
(h)

Figura 23. Matrices de correlación de diferentes estadísticas entre los índices de sequía. Fuente: Autores.

Una de las estadísticas más importantes que nos permite visualizar las áreas más afectadas por sequías es la que corresponde al número de eventos (Figura 24 (b)). Se puede observar una alta correlación entre los índices SRI y SSI. En este sentido, se ve cómo ambos, el SRI1 y SSI1, muestran unos puntos de sequía importantes aproximadamente entre las filas 50 y 100 de los rasters, que representan eventos de corta duración (1 mes). Por otro lado, en el caso del SRI6 y SSI6, la zona más crítica de sequía ocurrió aproximadamente entre las filas 50 y 100 de los rasters, representando eventos de larga duración. Otra estadística interesante para analizar es la duración

máxima de los eventos (Figura 24 (c)), en la que se puede ver cómo entre las filas 100 y 150, en la zona derecha de la cuenca en un área muy pequeña presenta las mayores duraciones según el SRI6 y el SSI6, de la misma manera las magnitudes máximas (Figura 24 (g)) en una zona similar de extensión.





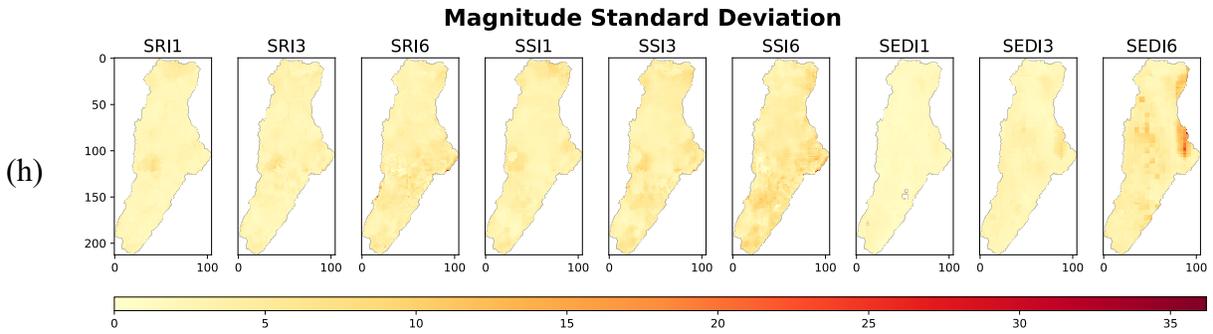
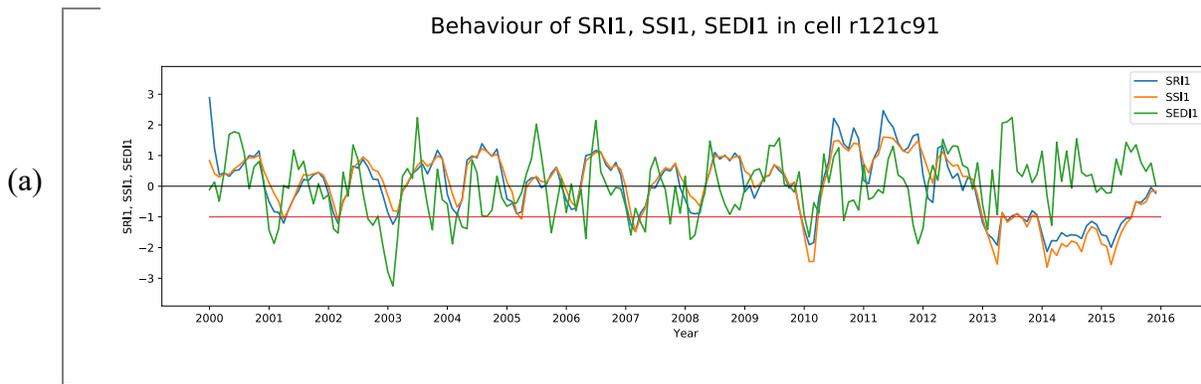
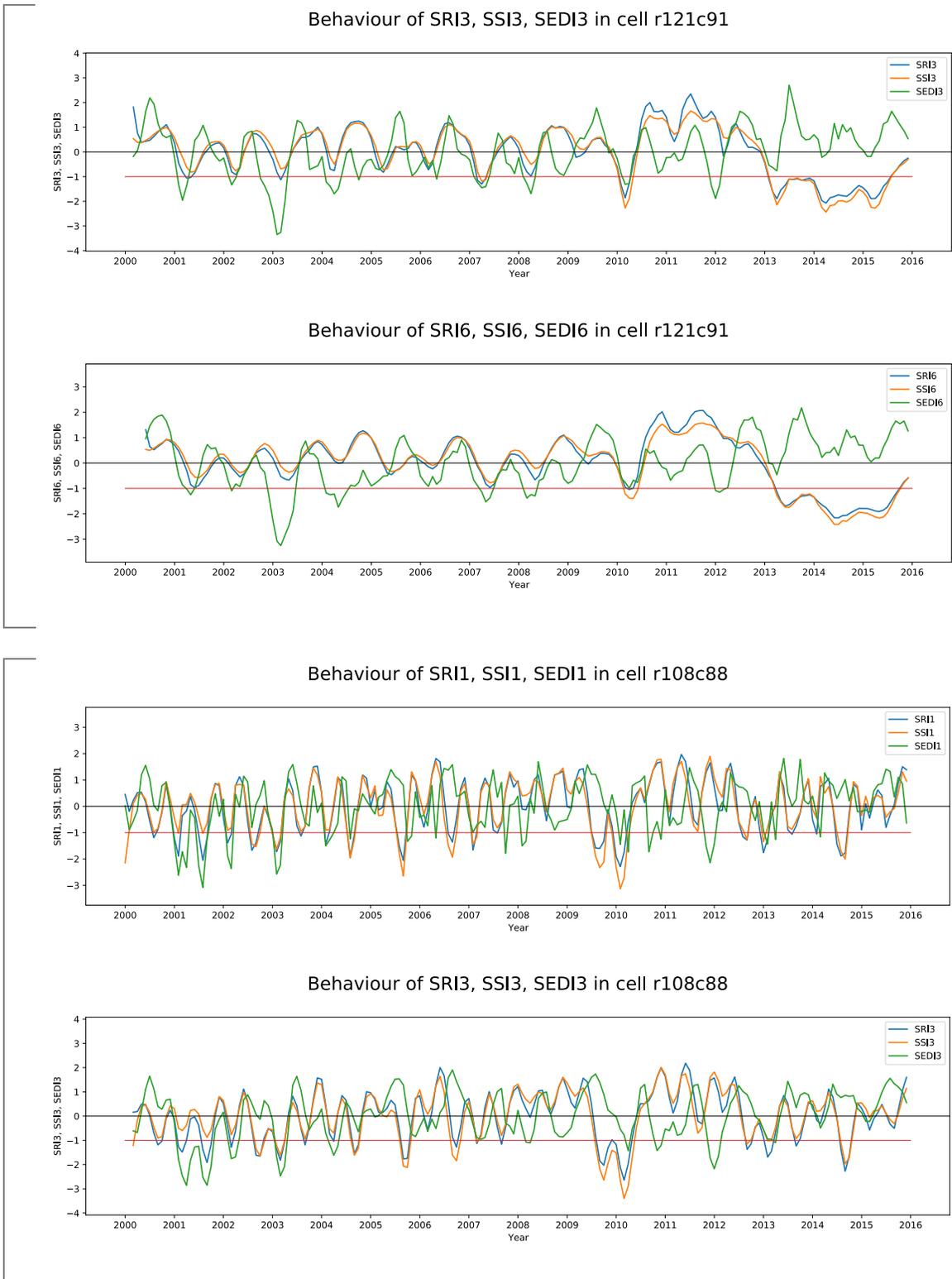


Figura 24. Estadísticas de índices de sequía espacialmente distribuidas. Fuente: Autores.

4.2.4.2. Comparación de índices de sequía en una celda dada

El análisis de índices de sequía nos permite ver su comportamiento en el tiempo en cada celda del área de estudio como lo muestra la Figura 25 en celdas específicas. Se mostrarán estas gráficas para celdas que han tenido comportamientos desfavorables en cuanto a duración máxima de sequías (Figura 25, (a)), duración media (Figura 25, (a)), número de eventos (Figura 25, (b)), magnitud máxima (Figura 25, (a)), magnitud media (Figura 25, (a)); según lo que la Figura 24 permite apreciar visualmente.





(b)

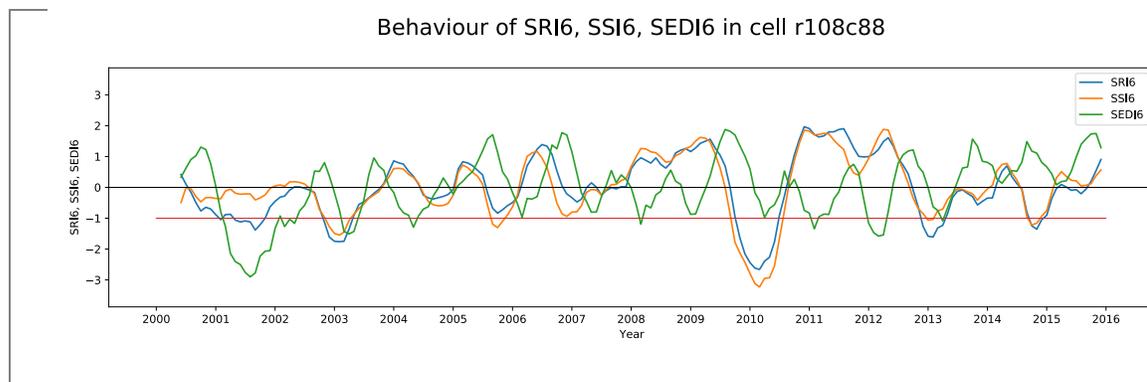


Figura 25. Índices de sequía a través del tiempo en celdas específicas. Fuente: Autores.

En la Figura 25 (a), para la celda r121c91 (su ubicación se puede observar en la Figura 26 (a)) se evidencia un periodo de sequía con una duración importante al final de la serie entre los años 2013 y 2015 aproximadamente, y además con una magnitud igualmente significativa, en los índices SRI y SSI con periodos de agregación 1, 3 y 6, mientras que en general el SEDI mostró un comportamiento totalmente diferente la mayoría del tiempo en el periodo analizado.

Por otro lado, en la Figura 25 (b), mostrada para observar el número de eventos detectados por los índices, se puede evidenciar cómo en la celda r108c88 (su ubicación se puede observar en la Figura 26 (b)), los índices SRI1, SRI3, SSI1 y SSI3, presentan gran cantidad de eventos de sequía que superan el threshold establecido de -1. Es de notar que estos tienen un comportamiento bastante similar para cada periodo de agregación.

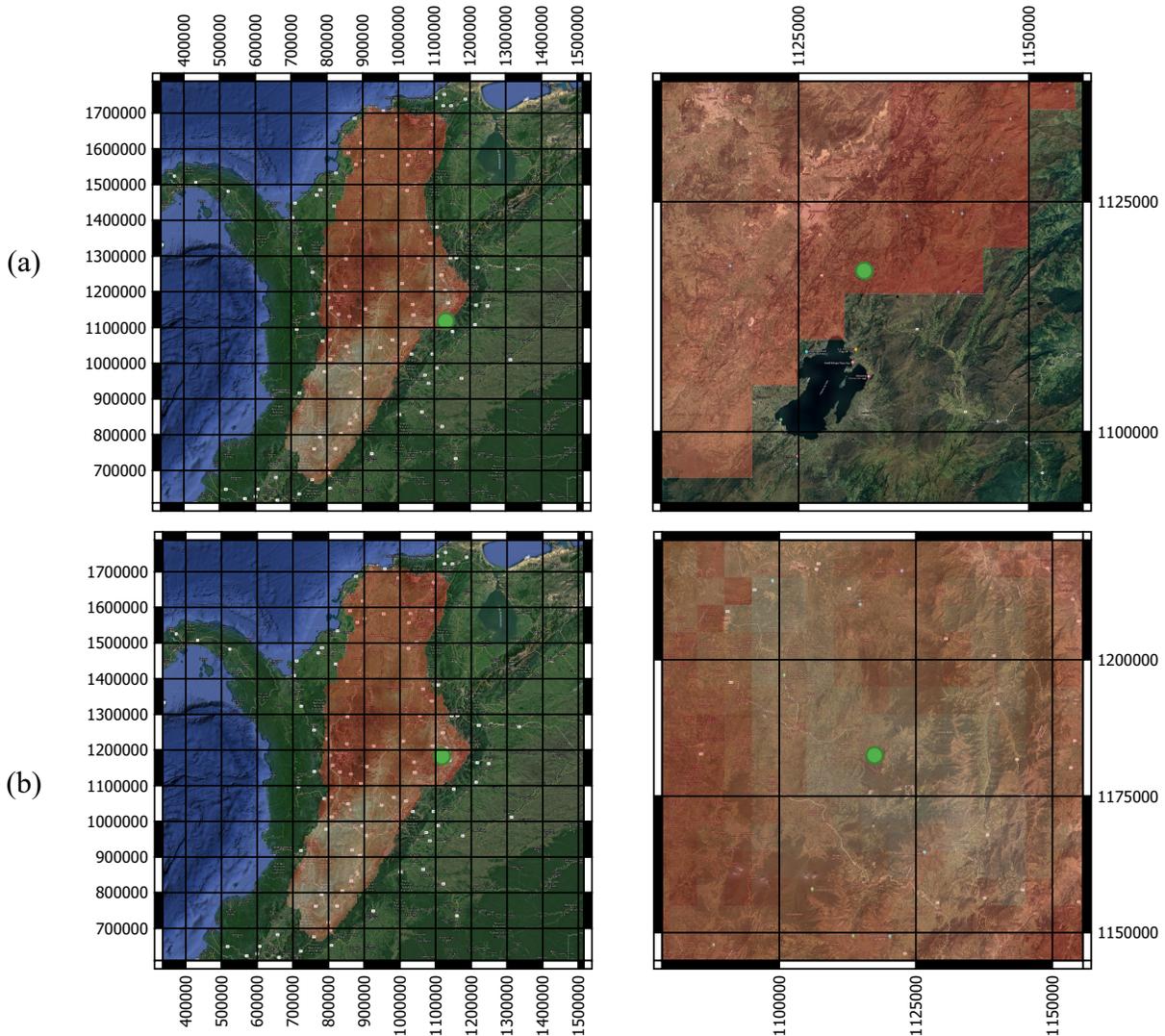
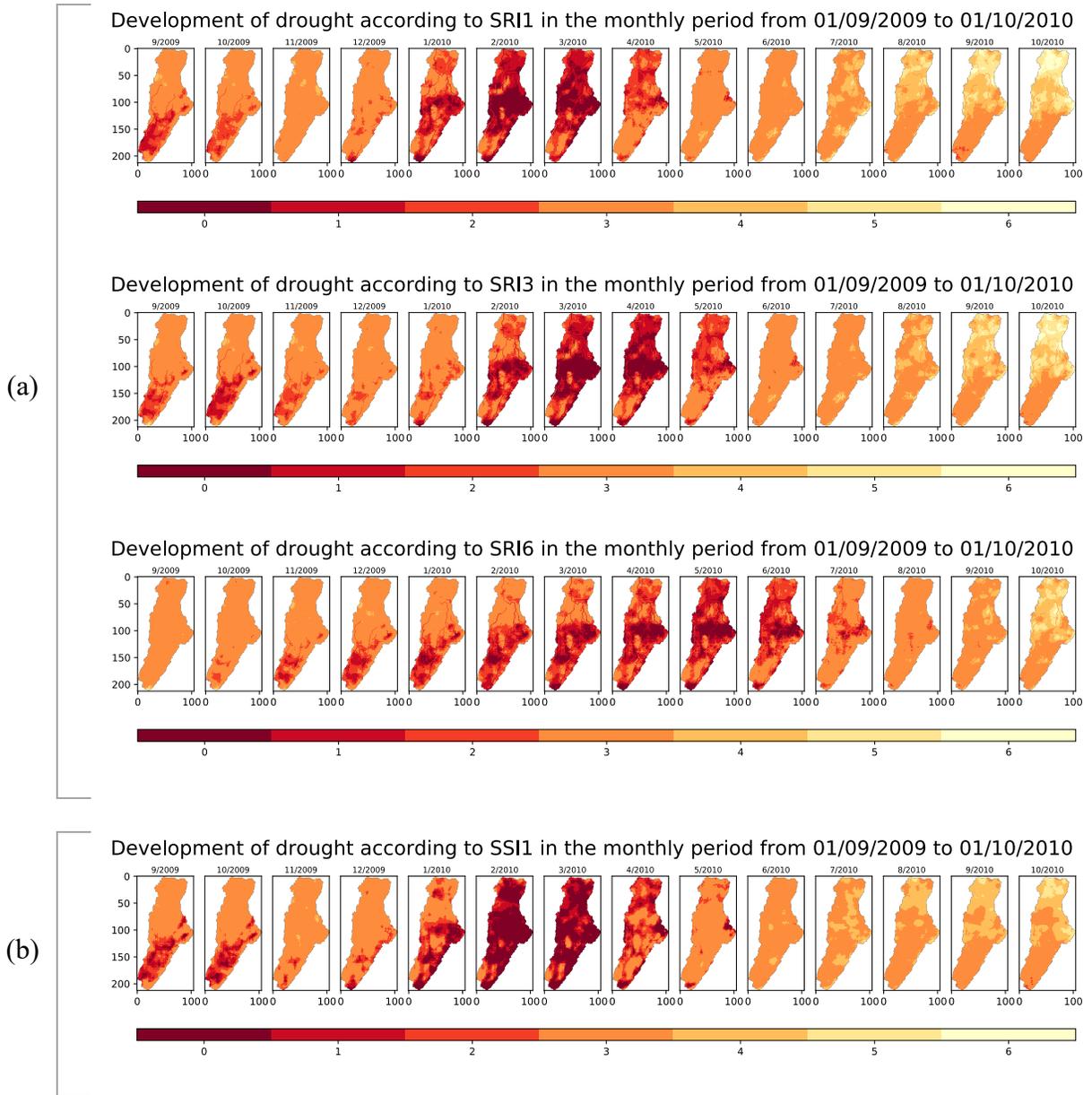


Figura 26. Ubicación esquemática de las celdas: (a) r121c91 y (b) r108c88. Fuente: Autores.

4.2.4.3. Clasificación de la sequía de acuerdo a su intensidad

Es posible también generar mapas de acuerdo con la clasificación mostrada en la Tabla 7, para cada índice, periodo de agregación y mes escogido. Para ello se escogerá el primer semestre del 2010 que muestra en la Figura 25 un gran valle en el comportamiento del SRI y el SSI. Se puede ver el avance de ese evento específico de sequía en la Figura 27 para los diferentes índices de sequía. En este caso, la rampa de colores clasifica la intensidad de la sequía de acuerdo con la

Tabla 7, donde 0 es *sequía extrema* y 6 es *extremadamente húmedo*. Se puede apreciar cómo a medida que aumenta el periodo de acumulación, se desfasa un poco el punto más alto de la sequía.



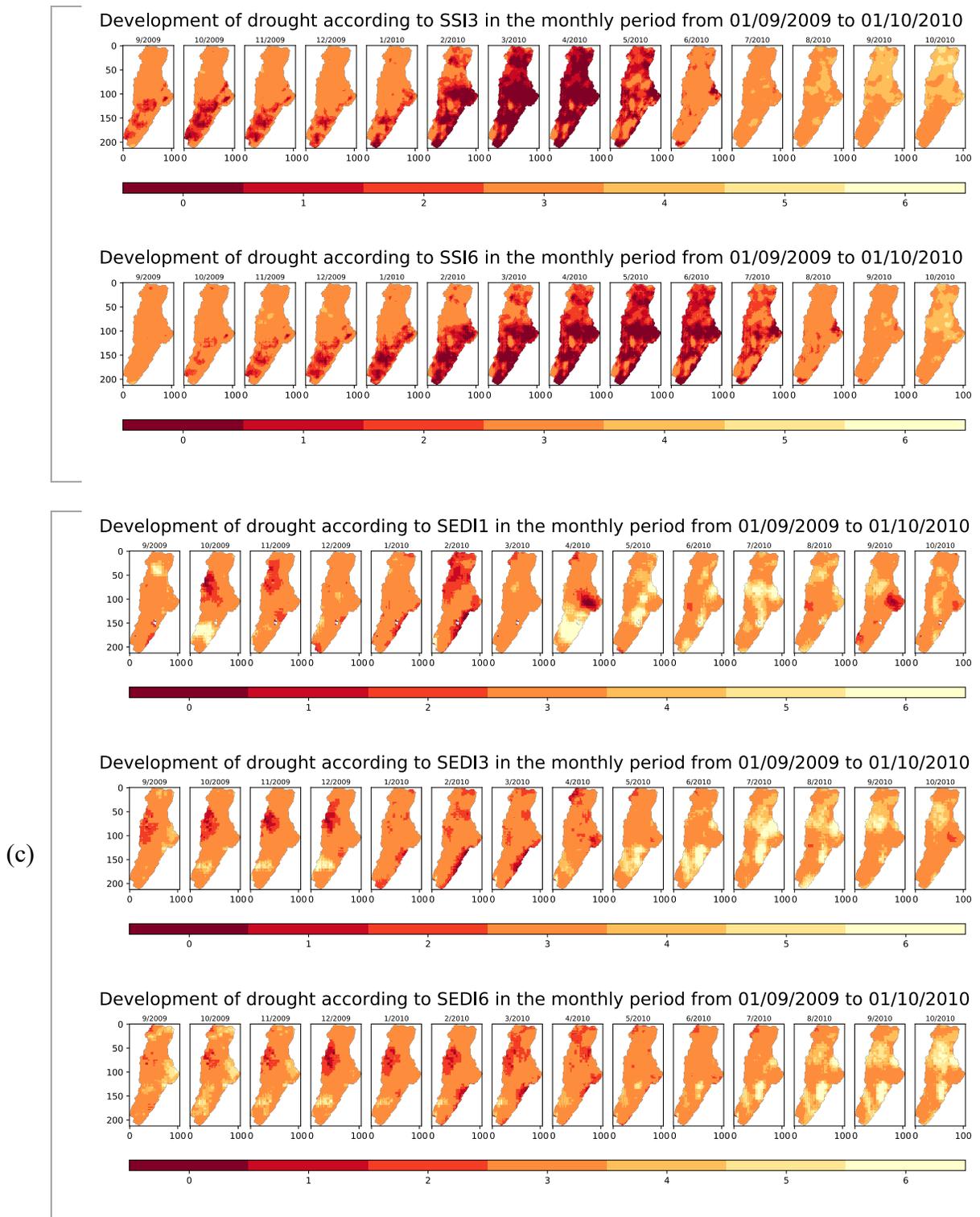
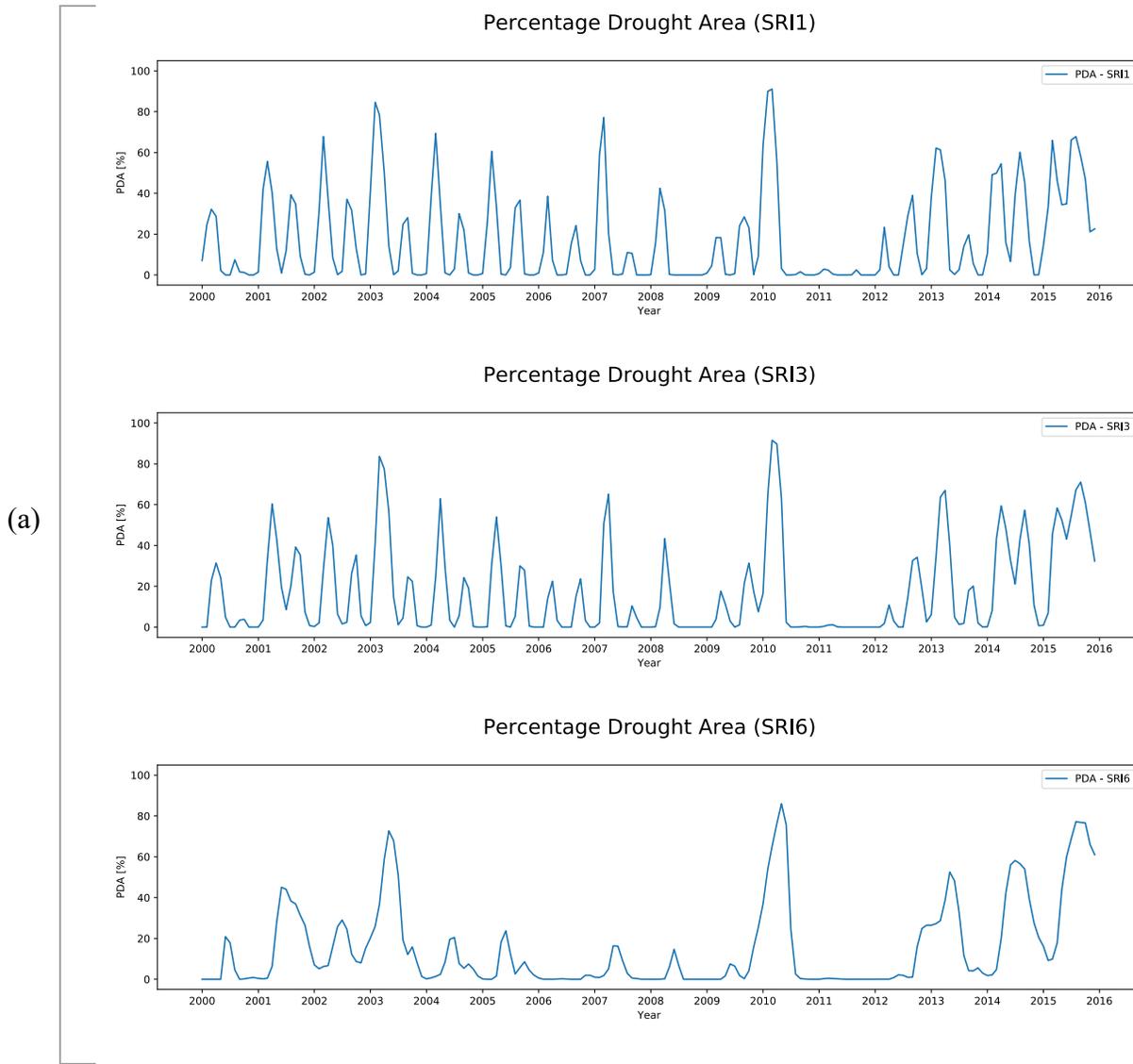
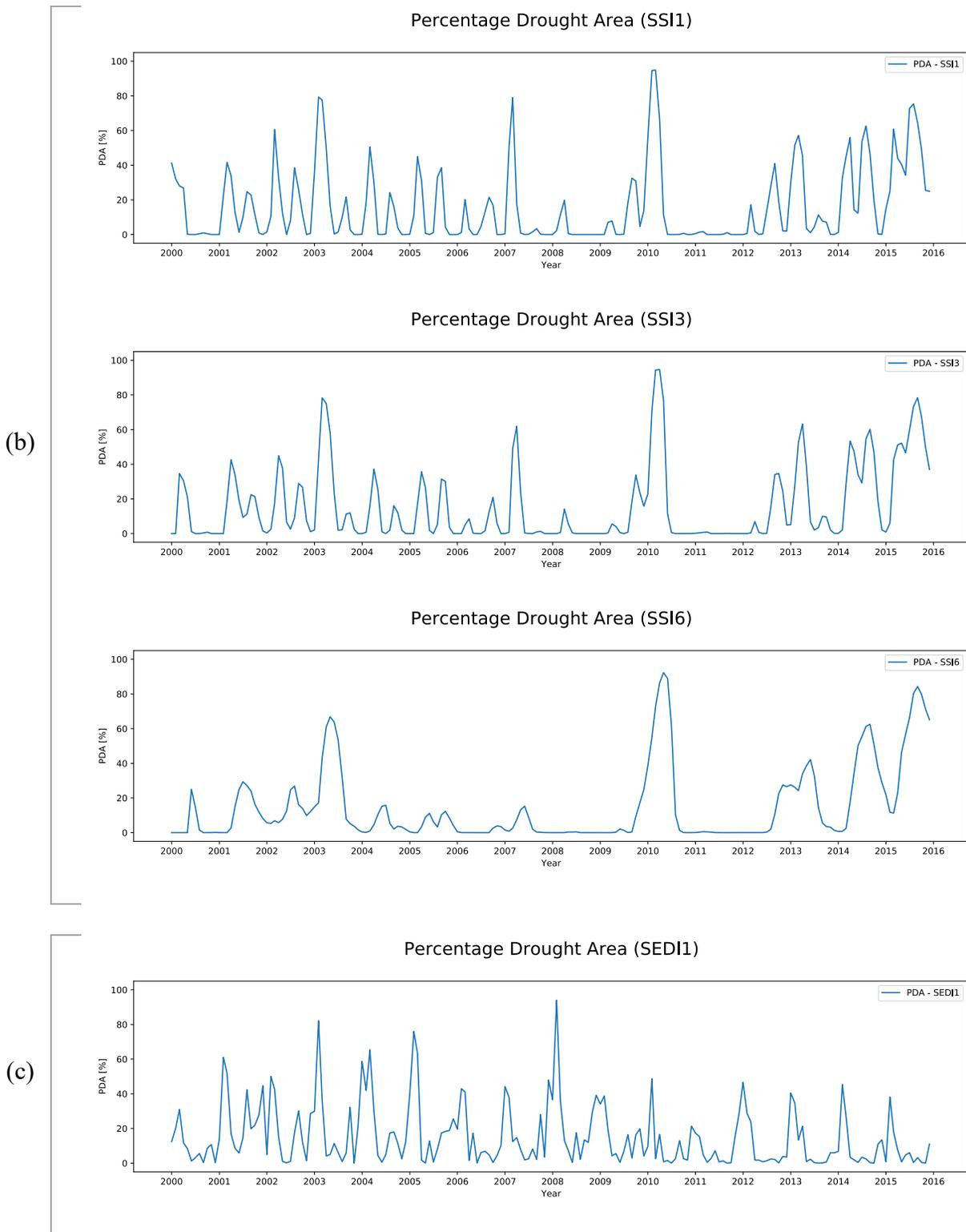


Figura 27. Desarrollo de la sequía en un periodo específico de acuerdo con los índices de sequía. (a) SRI, (b) SSI, (c) SEDI. Fuente: Autores.

4.2.4.4. Porcentaje de área en sequía de acuerdo a los índices

Gracias al análisis de índices de sequía, también es posible determinar porcentajes de área en sequía (PDA ver Ecuación (4)) de toda la cuenca para cada periodo de agregación considerado según se muestra la Figura 28.





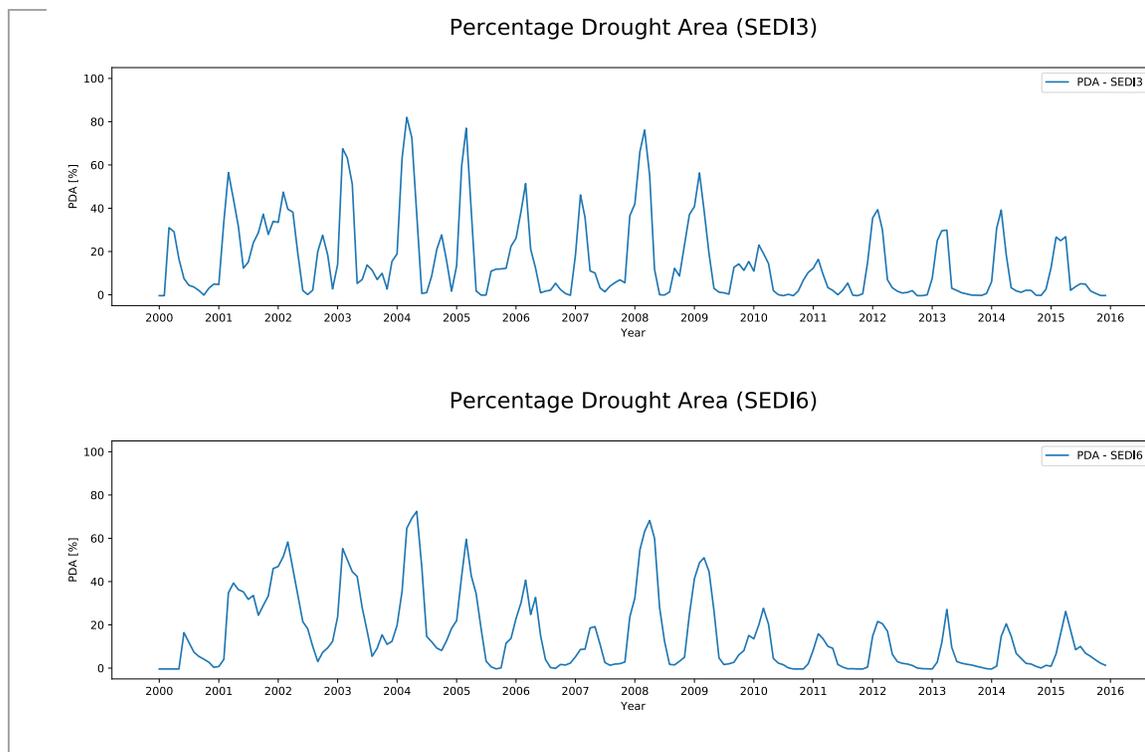


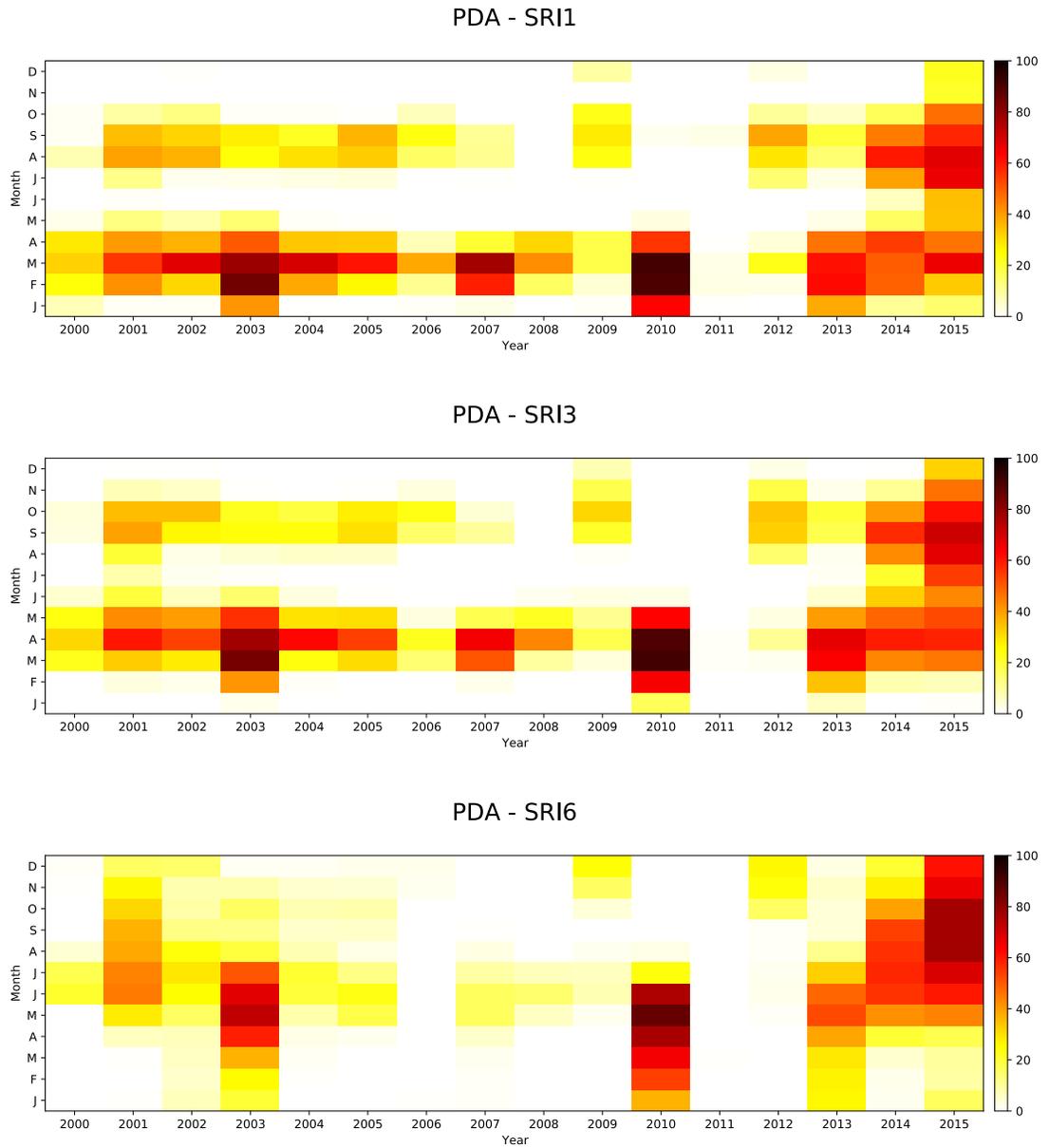
Figura 28. Porcentaje de área en sequía (PDA) para: (a) SRI, (b) SSI, (c) SEDI. Fuente: Autores.

En la Figura 28 (a) y (b) se puede ver cómo los índices SRI y SSI también tienen una gran correlación detectando el PDA para los periodos de agregación correspondientes. Adicionalmente, se aprecia cómo el SRI6 y SSI6 tienden a ocultar sequías menores que si detectan sus homólogos de menor periodo de agregación, sin embargo, para el evento específico de gran PDA en el año 2010, estos dos no subestiman y se encuentran casi al mismo porcentaje que sus homólogos.

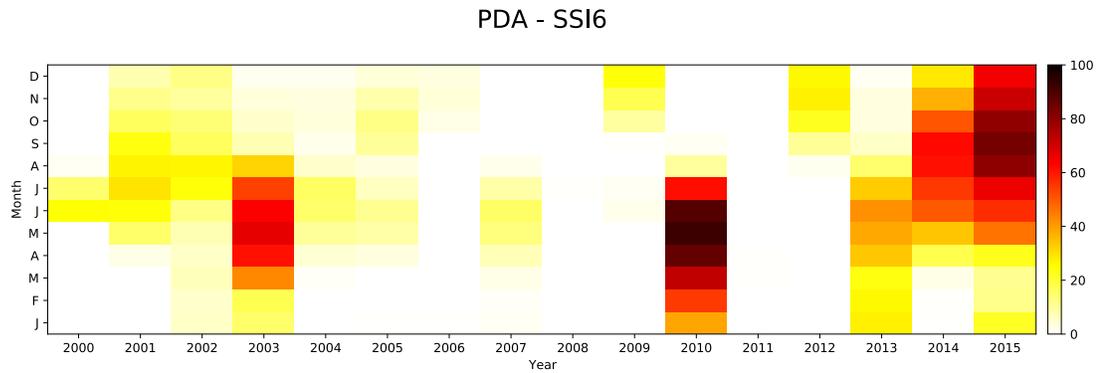
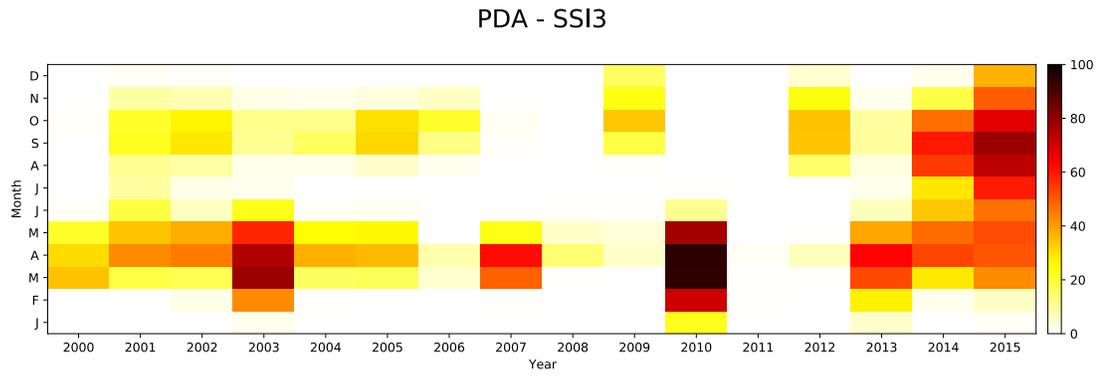
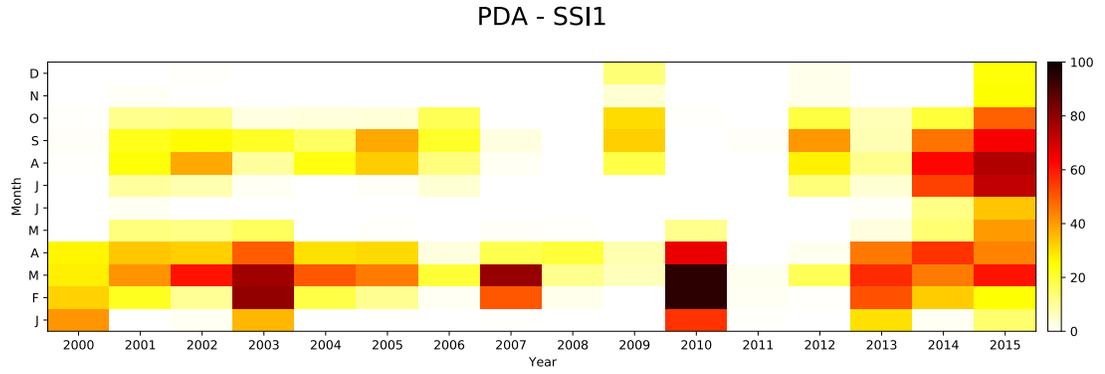
Por otro lado, el índice SEDI, muestra un comportamiento diferente, aunque con ciclos anuales marcados.

Adicionalmente, el PDA se puede representar como se muestra en la Figura 29, donde gracias a la rampa de color, los periodos de sequía se identifican en el tiempo para cada índice de sequía analizado y periodo de agregación.

(a)



(b)



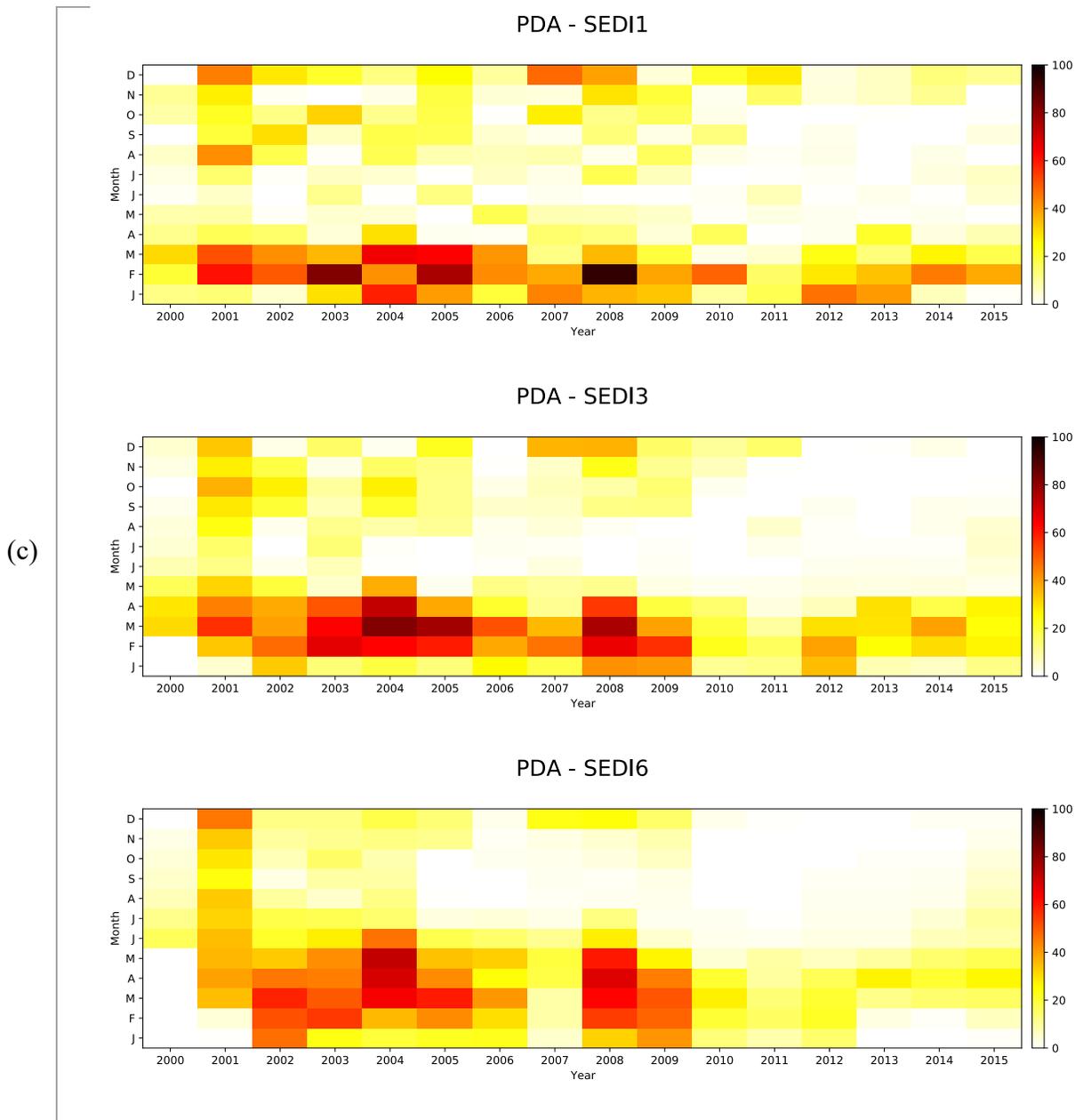
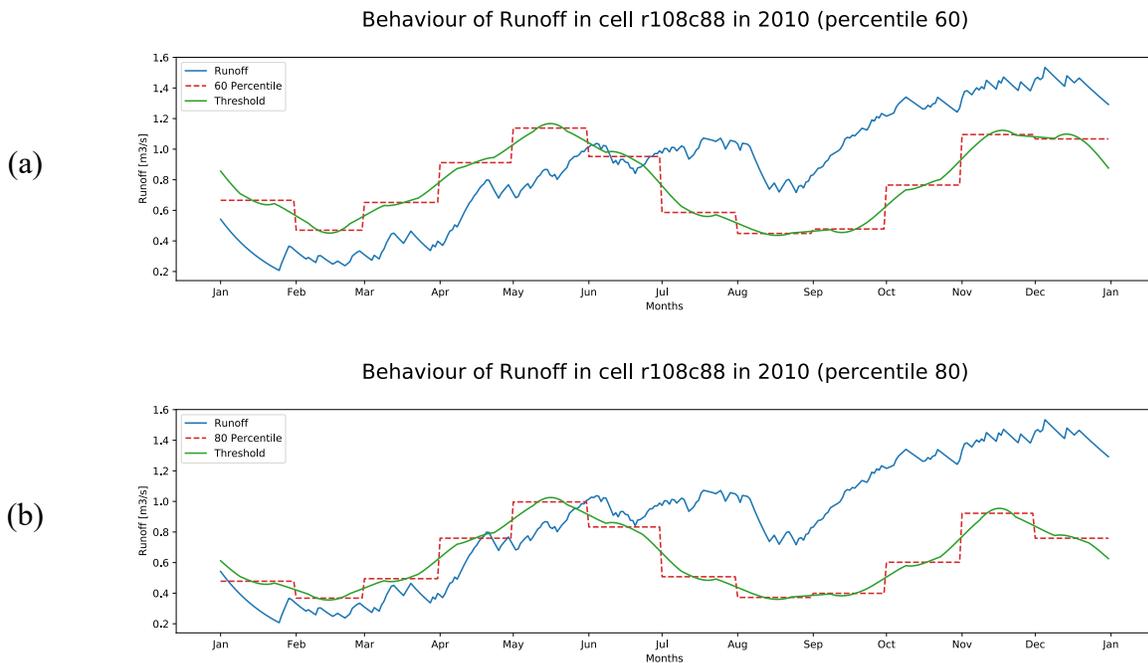


Figura 29. PDA para índices de sequía: (a) SRI, (b) SSI, (c) SEDI. Fuente: Autores.

4.3. Análisis NCDA y CDA

Como se explicó antes, el análisis NCDA y CDA se hará para diferentes percentiles (60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95), y únicamente para las variables de escorrentía y humedad del suelo. Se tomó el año 2010 con un PDA alto y la celda r108c88 ya que presentaba valores desfavorables de DI en ese mismo año versus otras celdas, indicando una magnitud alta de sequía, para generar la

Figura 30 y la Figura 31, donde se puede observar cómo los valores de la escorrentía y la humedad del suelo, respectivamente, para diferentes percentiles son inferiores al umbral definido en casi todo el primer semestre de ese año. Estas figuras también muestran visualmente cómo se definió el *threshold*, estableciendo un valor único derivado tras agrupar en una única serie temporal los datos diarios de todos los meses por separado del periodo de análisis (2000 a 2015), y calculando después un percentil determinado para esa serie temporal. A continuación, este umbral mensual se suavizó mediante un filtro de Savitzky-Golay. Cabe mencionar que se generó un gráfico como el de las figuras anteriormente mencionadas para cada año del periodo de análisis, cada percentil que definía un umbral mensual y cada celda de la zona de estudio.



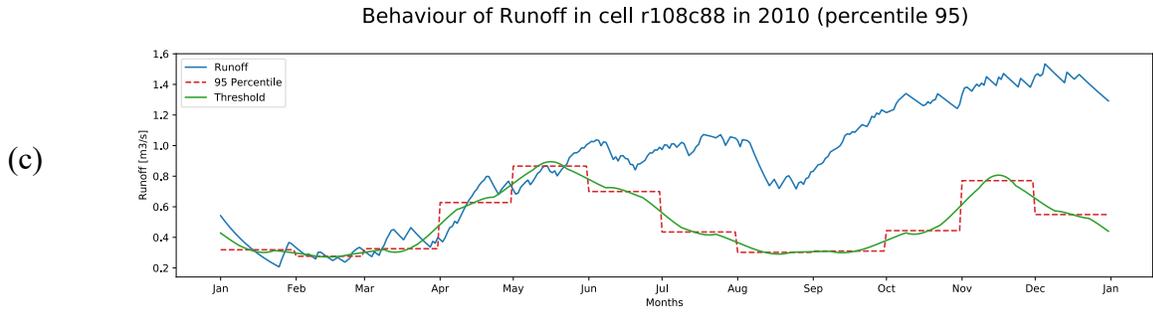


Figura 30. Comportamiento de la escorrentía en la celda r108c88 en el año 2010. Percentiles 60 (a), 80 (b) y 95 (c). Fuente: Autores.

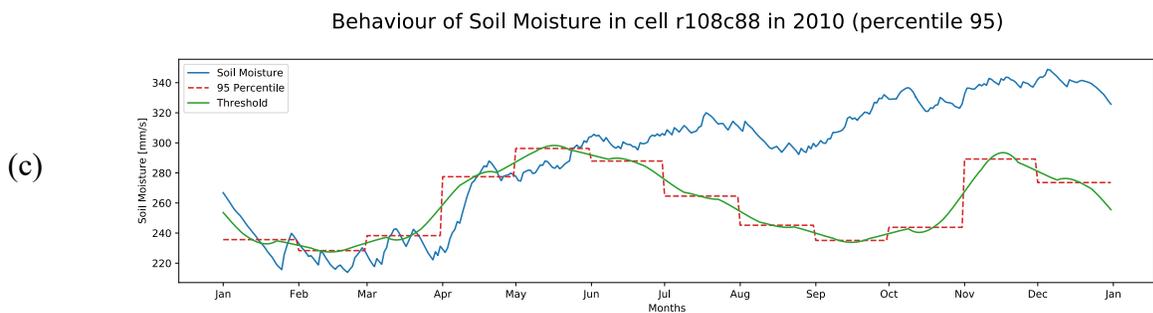
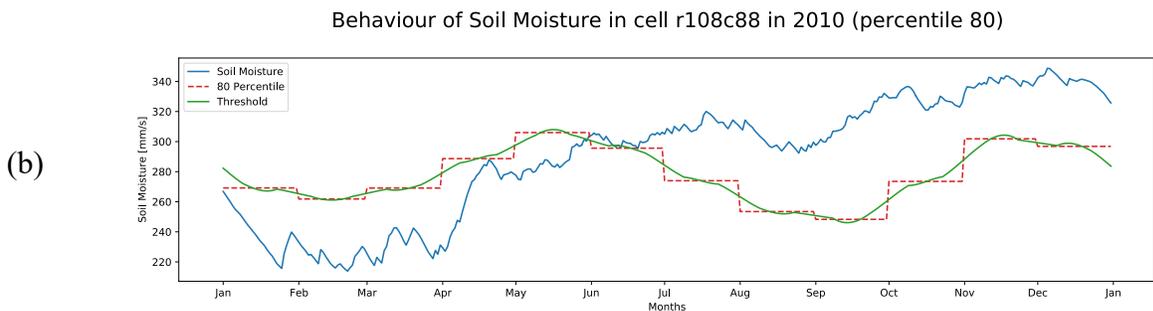
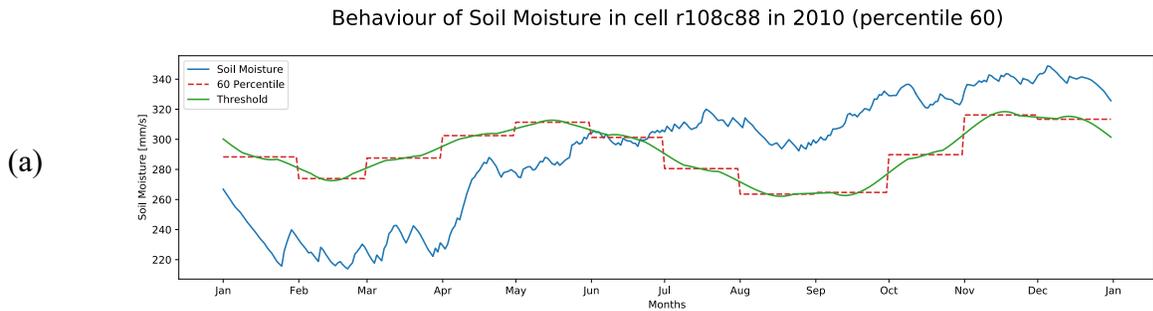
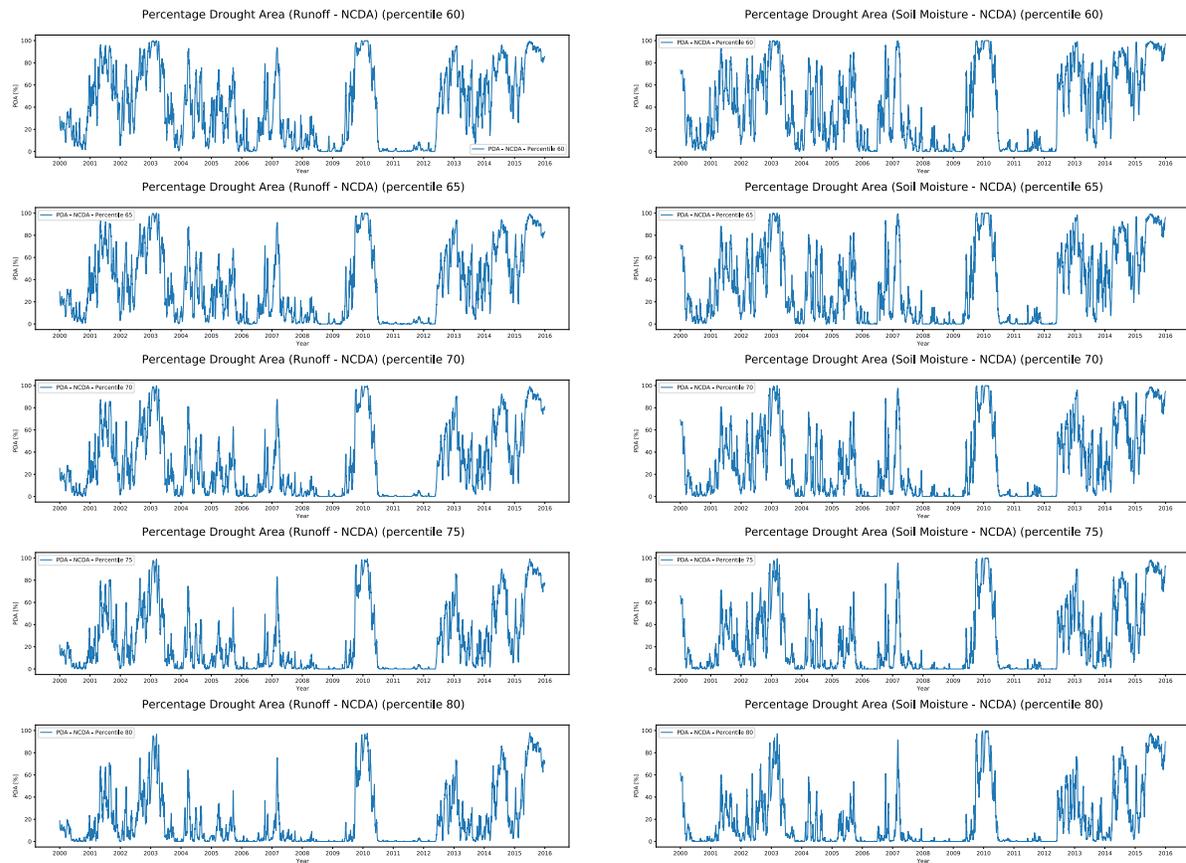


Figura 31. Comportamiento de la humedad del suelo en la celda r108c88 en el año 2010. Percentiles 60 (a), 80 (b) y 95 (c). Fuente: Autores.

Similar al análisis de índices de sequía (DI), el análisis NCDA permite graficar una serie temporal para el porcentaje de área en sequía (PDA) en toda la cuenca como se muestra en la Figura 32. Inicialmente se observa una fuerte correlación entre el PDA calculado a partir de la escorrentía y el calculado a partir de la humedad del suelo para cada percentil. Se evidencia el comportamiento esperado a medida que el percentil varía. Como se esperaría, el PDA es mayor cuando el percentil es menor, y, al contrario, el PDA es menor cuando el percentil aumenta. Además, a mayor percentil, la serie elimina de manera considerable el ruido en la información, lo que permite identificar eventos específicos con una alta severidad. Adicionalmente a esto, se puede apreciar un comportamiento general muy similar al encontrado con el análisis de DI para el PDA, esto permitirá después compararlos y determinar una posible correlación.



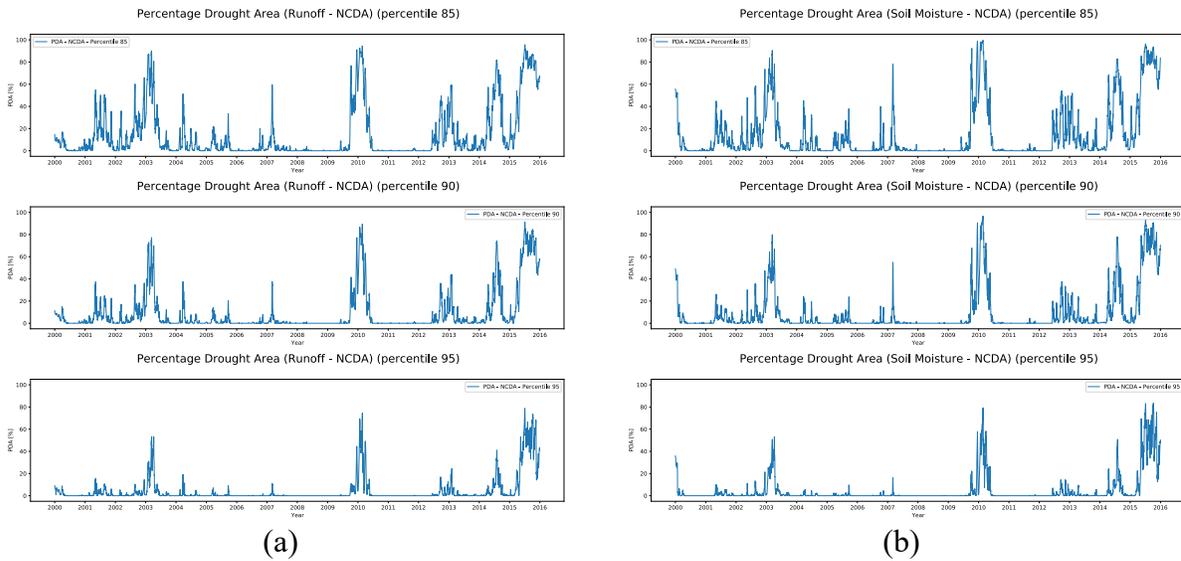
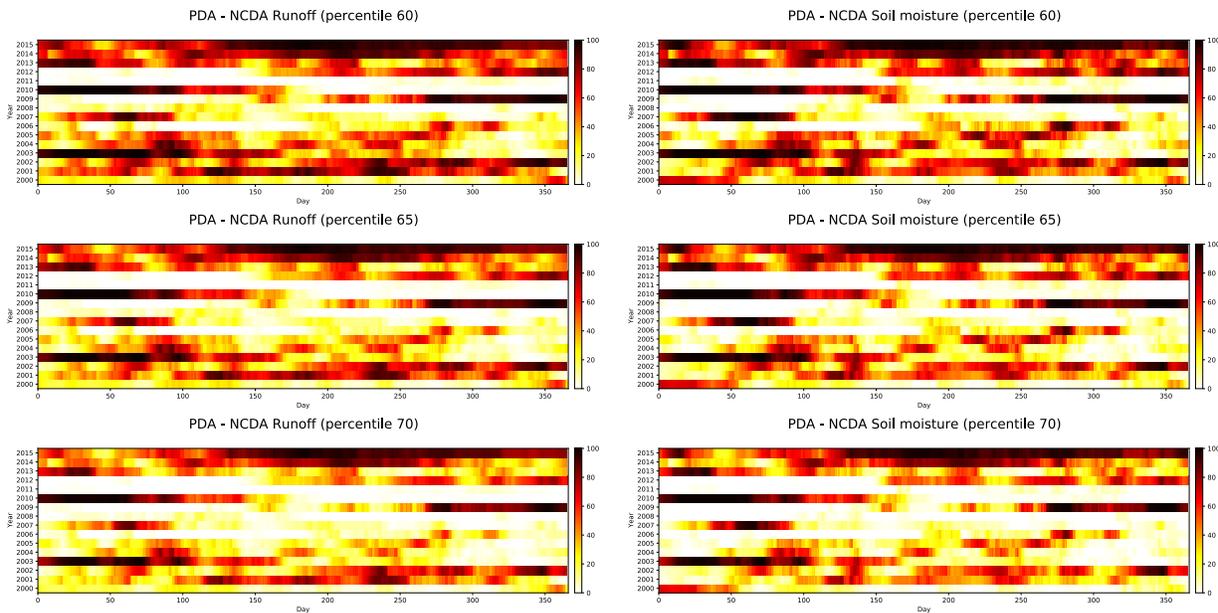


Figura 32. Porcentaje de área en sequía (PDA) de acuerdo con el análisis NCCA y diferentes percentiles, calculado a partir de: (a) escorrentía y (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

Adicionalmente, el PDA para el análisis NCCA se puede representar como se hizo en la Figura 29 para los DI. En esta ocasión a una escala diaria con la misma rampa de color como se ve en la Figura 33.



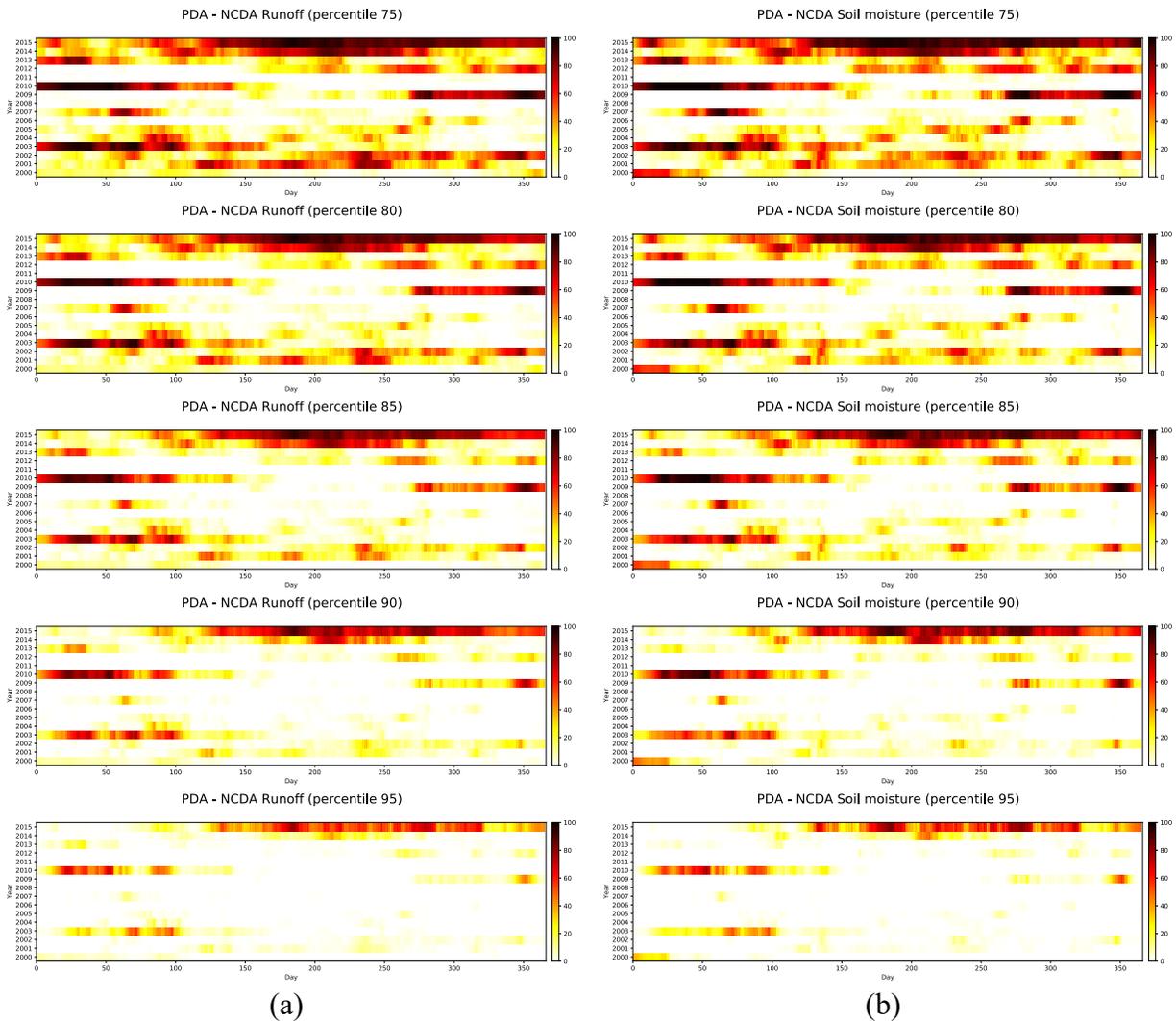
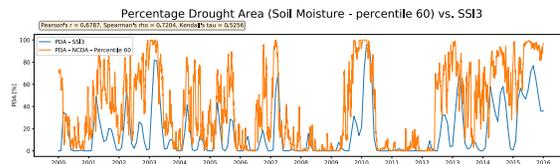
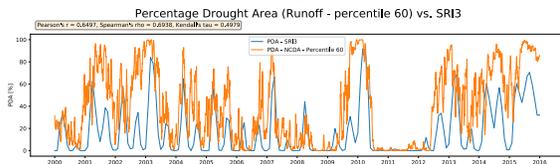
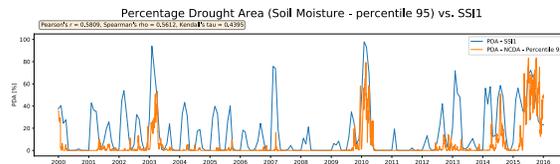
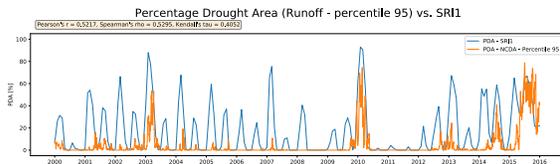
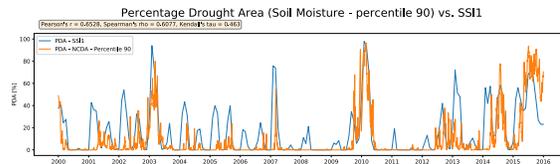
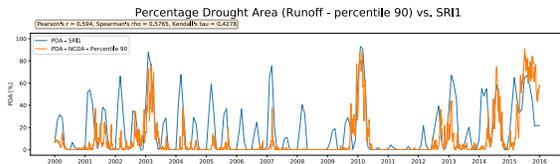
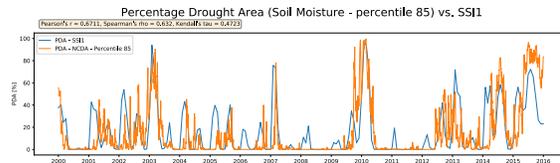
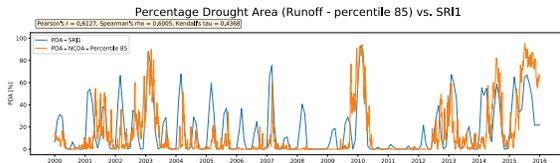
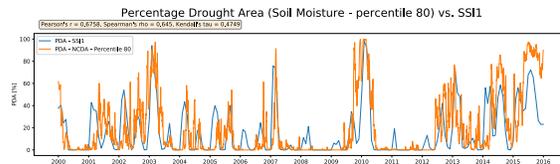
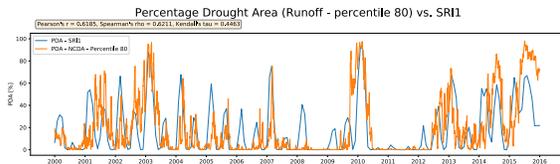
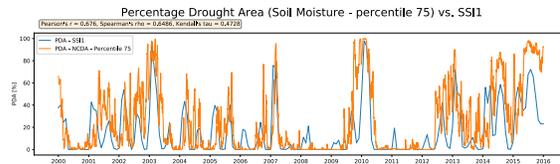
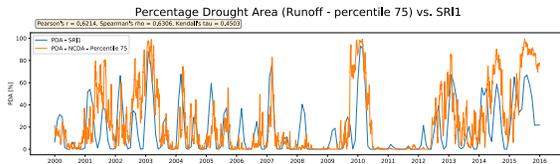
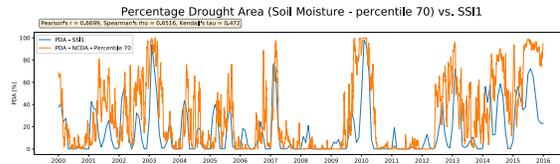
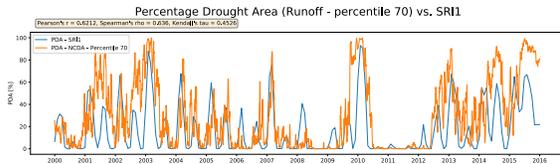
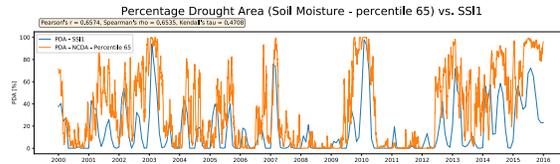
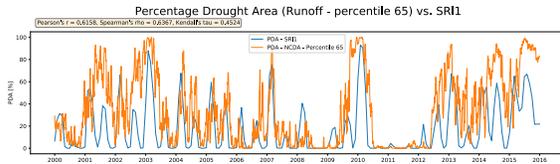
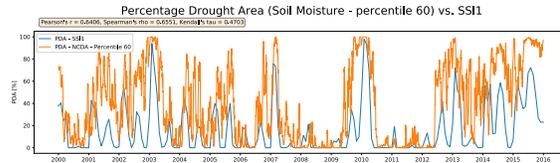
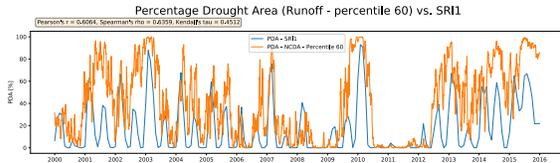
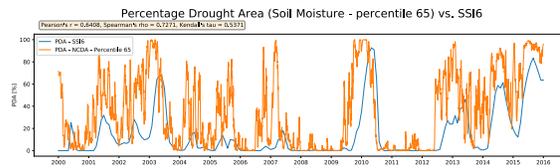
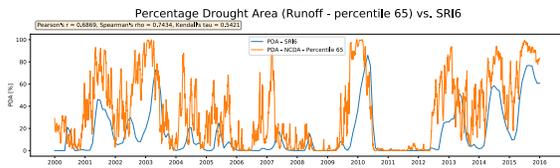
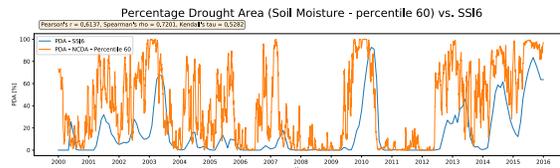
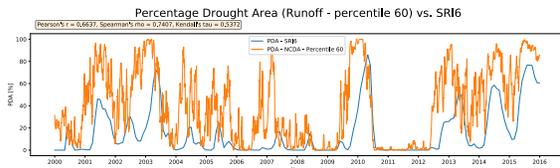
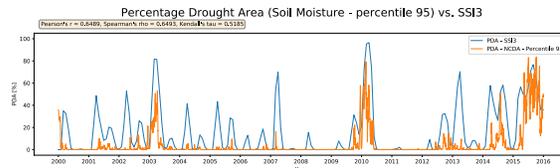
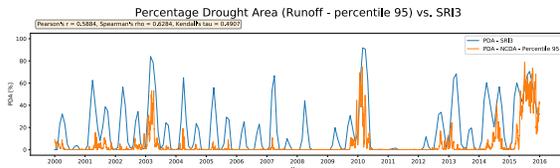
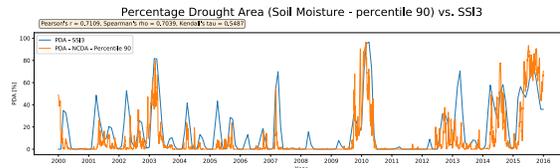
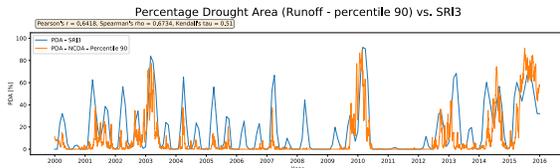
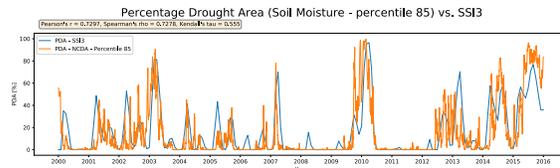
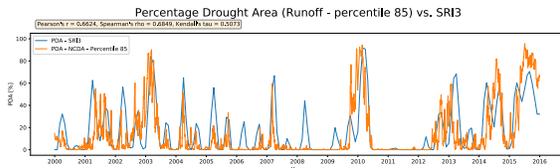
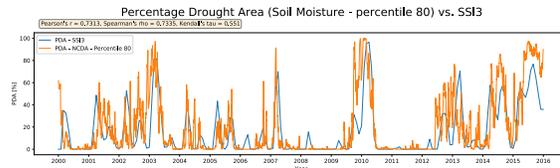
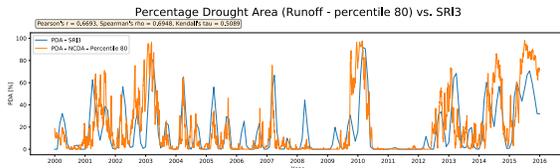
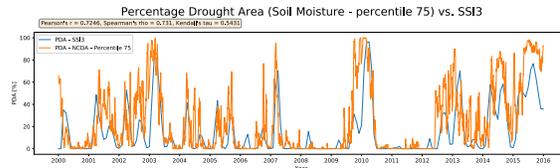
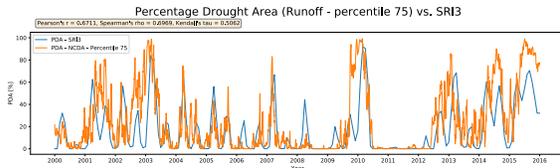
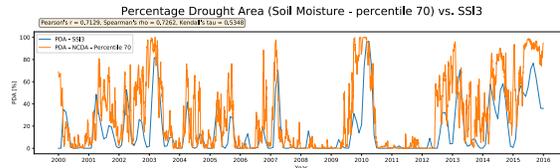
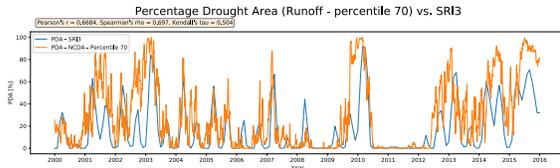
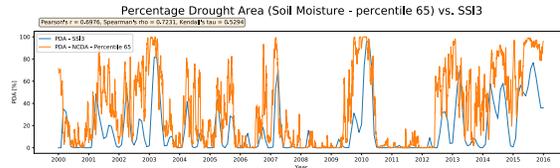
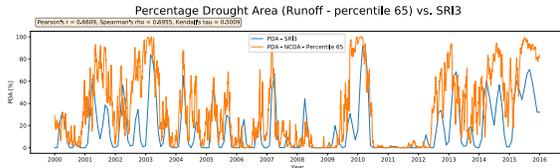


Figura 33. PDA para diferentes percentiles: (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

Para determinar la correlación que hay entre los análisis de DI y NCDA, se usaron tres pruebas estadísticas; los coeficientes r de Pearson, ρ de Spearman, tau de Kendall. En la Figura 34 se aprecia para cada combinación de DI – periodo de agregación, percentil (NCDA) y variable hidrológica, la correlación existente entre las series de datos según los coeficientes mencionados con anterioridad. De acuerdo con esto, la combinación que resultó en un mayor grado de correlación fue para la escorrentía, SRI6 – percentil 85, y para la humedad del suelo, SSI3 – percentil 80.





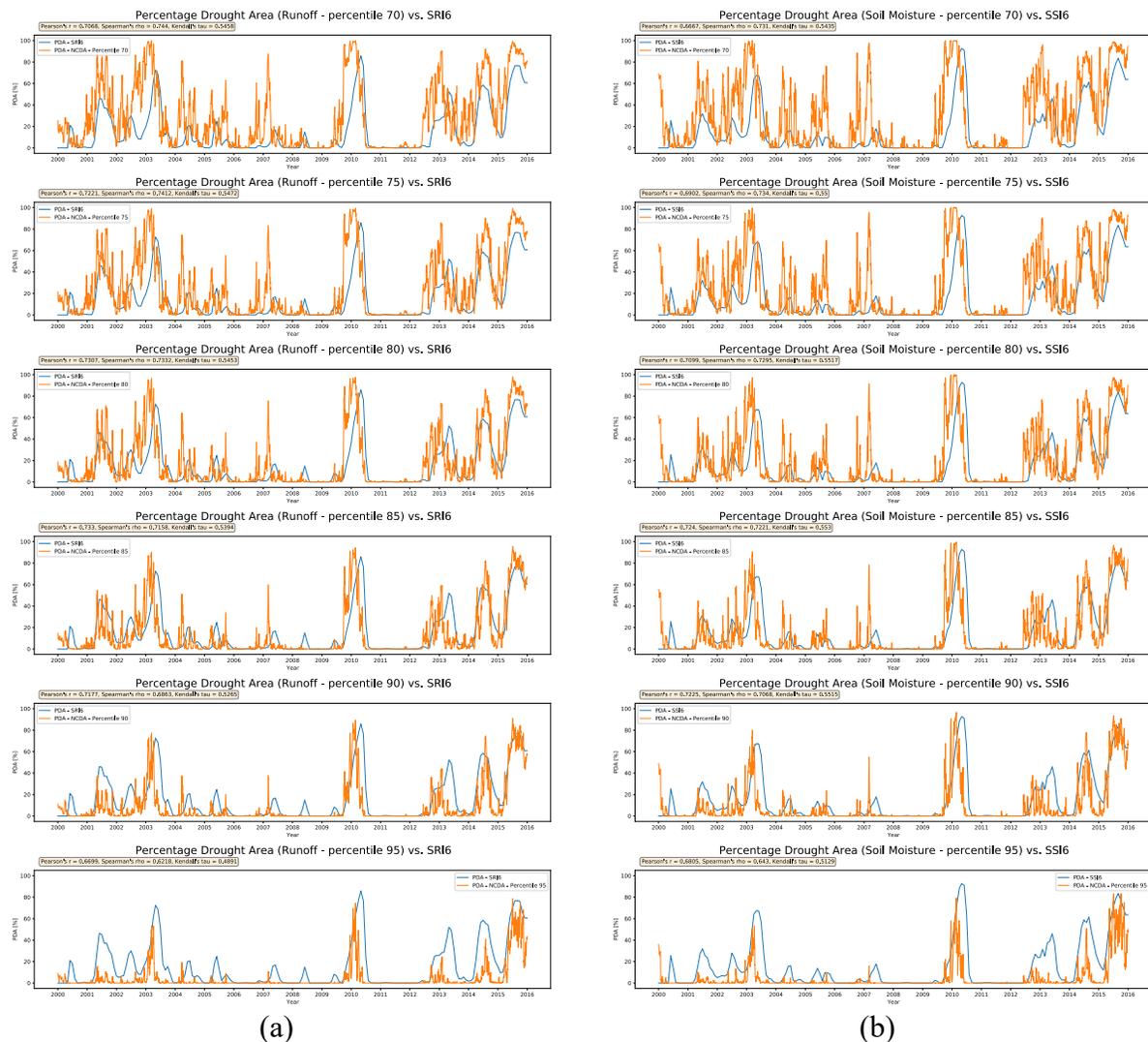


Figura 34. Correlación entre los DI y percentiles del análisis NCDA para: (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

El comportamiento de la sequía general para estas variables se mostró similar espacial y temporalmente en el análisis NCDA. Esto se puede apreciar especialmente en la Figura 35 para una fecha específica dentro del periodo de análisis donde los resultados son comparados para cada variable hidrológica. Se comparan los percentiles respectivos para cada variable de acuerdo con la mayor correlación encontrada en la Figura 34. En la Figura 35 también se aprecia el análisis CDA, mostrando el número de *clusters* de sequía en toda la cuenca para la fecha analizada.

Se puede ver la diferencia entre los resultados para escorrentía y humedad del suelo, en tanto que, para esta última variable, el área en sequía es mucho mayor, aunque tiende a aparecer en las mismas zonas que la escorrentía, pero abarcando más área. Esto puede deberse a que el percentil analizado para la humedad del suelo es menor que el analizado para la escorrentía, lo cual quiere decir que, para la primera, la aparición de un estado de sequía en una celda determinada es más sensible que para la segunda. De igual manera, al tener menos área en sequía, en el caso del análisis de la escorrentía, para esta fecha en particular se formaron 6 *clusters*, cada uno identificado con un color diferente. Por otra parte, en el caso de la humedad del suelo, en donde el área en estado de sequía es visiblemente mayor, se encontraron únicamente 2 *clusters*.

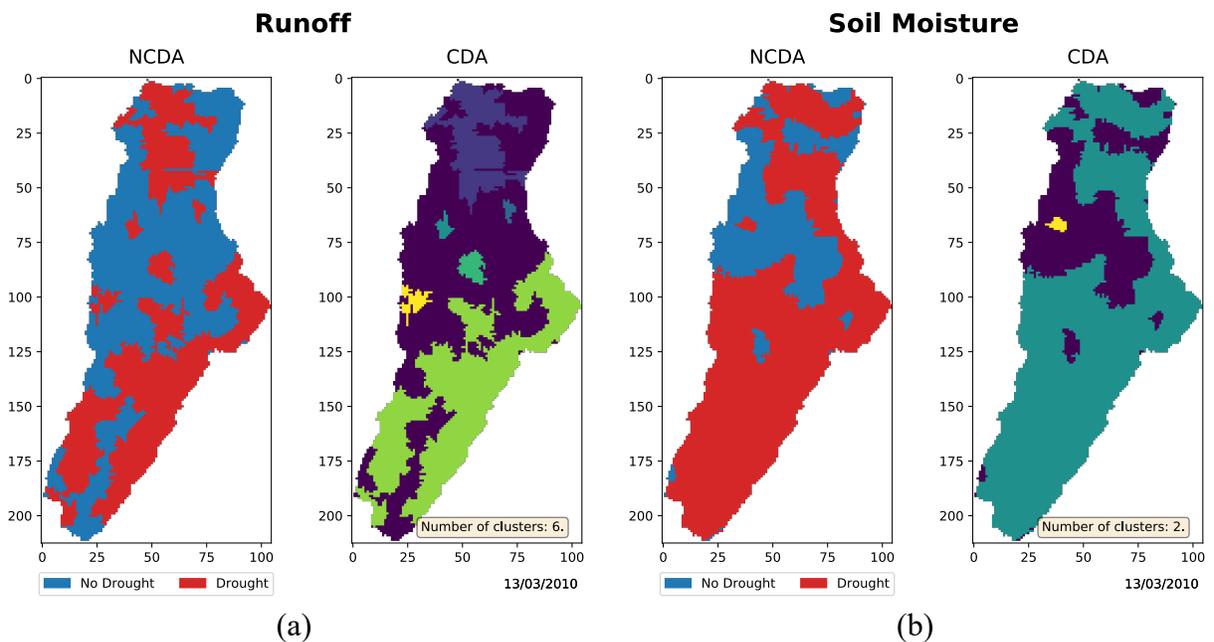


Figura 35. Análisis NCCA y CCA en una fecha particular para: (a) escorrentía – percentil 85, (b) humedad del suelo – percentil 80. Fuente: Autores.

En cuanto al análisis CCA de manera temporal es posible calcular el número de *clusters* de sequía en toda la cuenca a través del tiempo como se ve en la Figura 36 para el análisis de las variables de escorrentía y humedad del suelo, lo que indicaría los momentos en los que la sequía

fue más concentrada en ciertas áreas o si, al contrario, fueron eventos dispersos. Por otra parte, la relación entre el PDA y el número de *clusters* puede dar una idea de qué tan agrupados estuvieron los eventos.



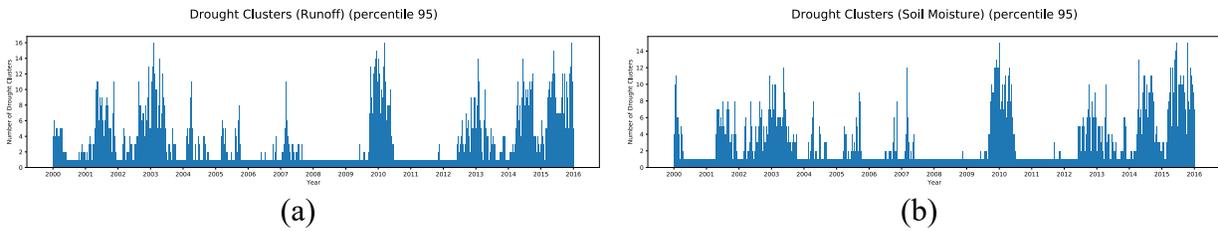


Figura 36. Número de clusters de sequía (análisis CDA) para: (a) escorrentía y (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

4.3.1. Análisis departamental

Como se comentó al inicio de este documento, se propone un análisis sectorizado de acuerdo con la división política colombiana a nivel de Departamentos (ver Figura 37). Este análisis permite determinar cuáles son los Departamentos que más han sufrido del fenómeno de sequías. Este análisis se desarrolló para todos los percentiles propuestos; sin embargo, en este trabajo únicamente se presentarán los resultados obtenidos con el percentil 90, que resulta ser uno de los escenarios más desfavorables, de otra manera sería bastante extenso al considerarse los otros percentiles analizados.

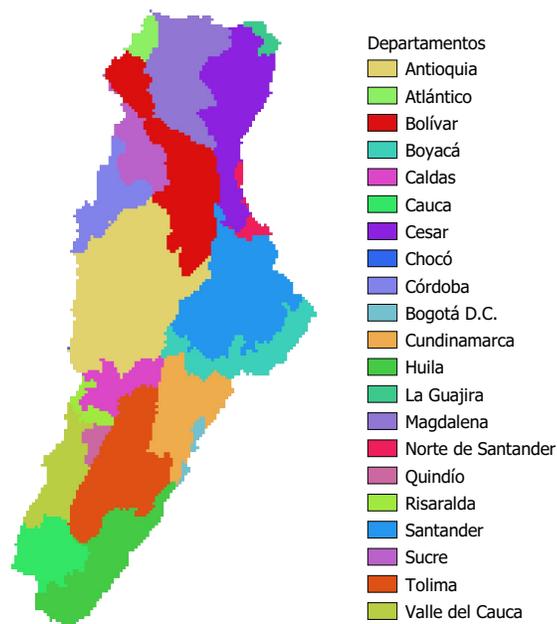
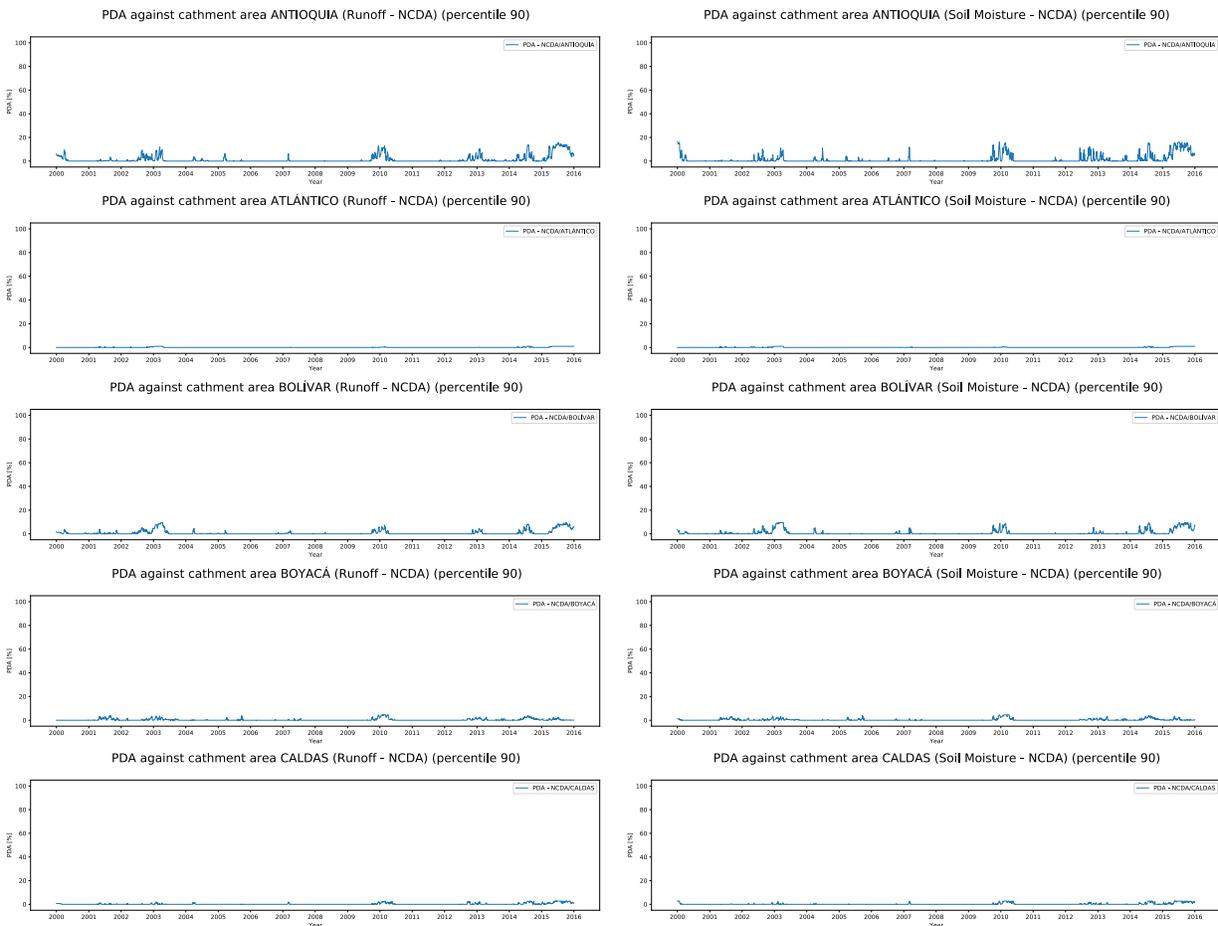
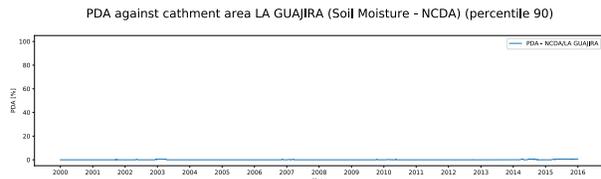
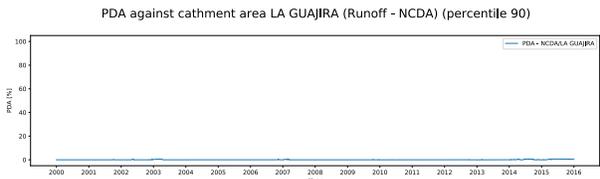
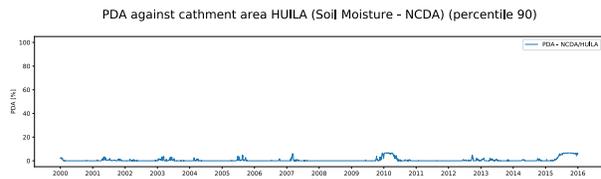
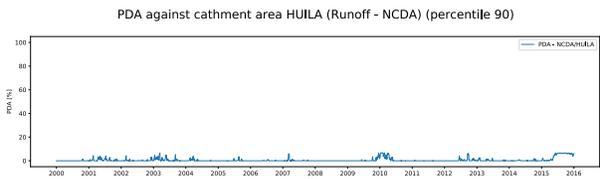
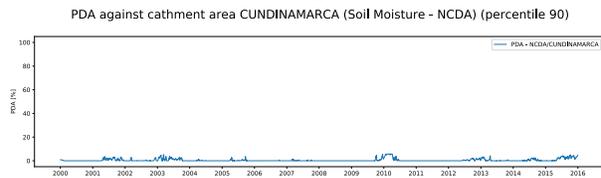
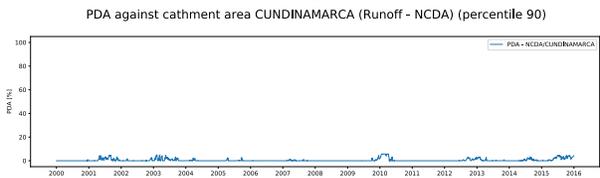
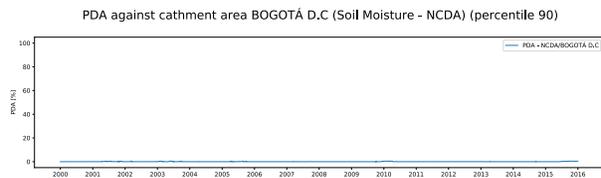
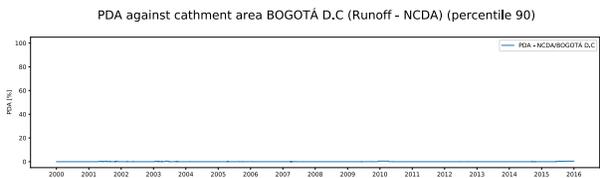
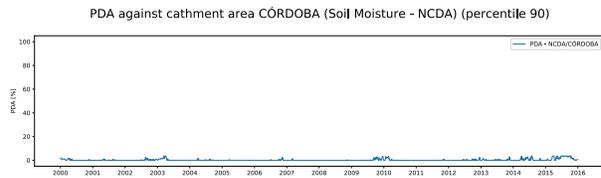
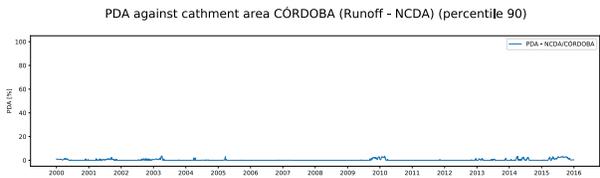
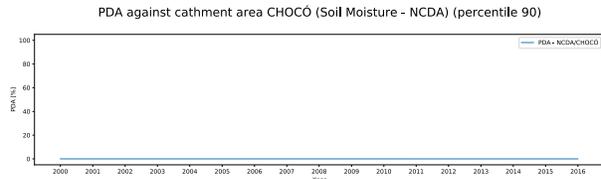
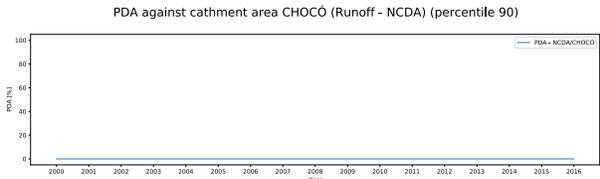
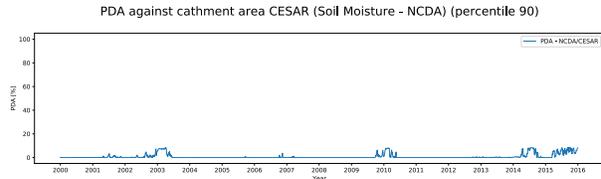
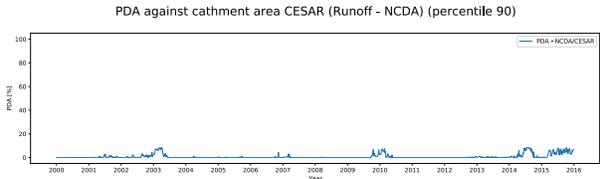
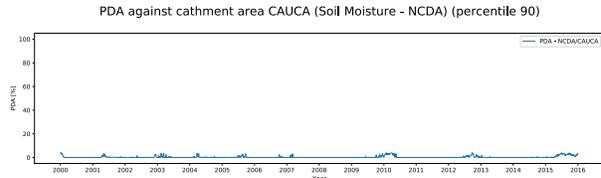
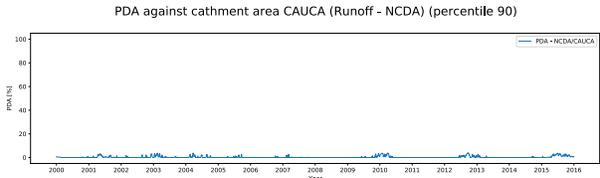


Figura 37. Mapa de sectorización de la Cuenca Magdalena – Cauca por departamentos. Fuente: Autores.

En este caso existen dos tipos de PDA, uno calculado teniendo como referencia el área total de la cuenca, y otro teniendo como referencia el área de cada uno de los departamentos. El primero es útil en tanto permite determinar qué departamento es el que aporta más área en sequía a la cuenca (ver Figura 38), y el segundo es útil para conocer qué porcentaje de área afectada hubo en cada departamento a través del tiempo (ver Figura 39). Es importante aclarar que, en este caso, los departamentos que se encuentran al borde de la cuenca pueden sobrepasar los bordes de esta, por lo que no se consideraría una medida real de PDA a nivel de departamento. En el desarrollo de este análisis, se encontró que existe una única celda asignada al departamento del Chocó, por lo que se considera no representativo, aunque se mostrará.





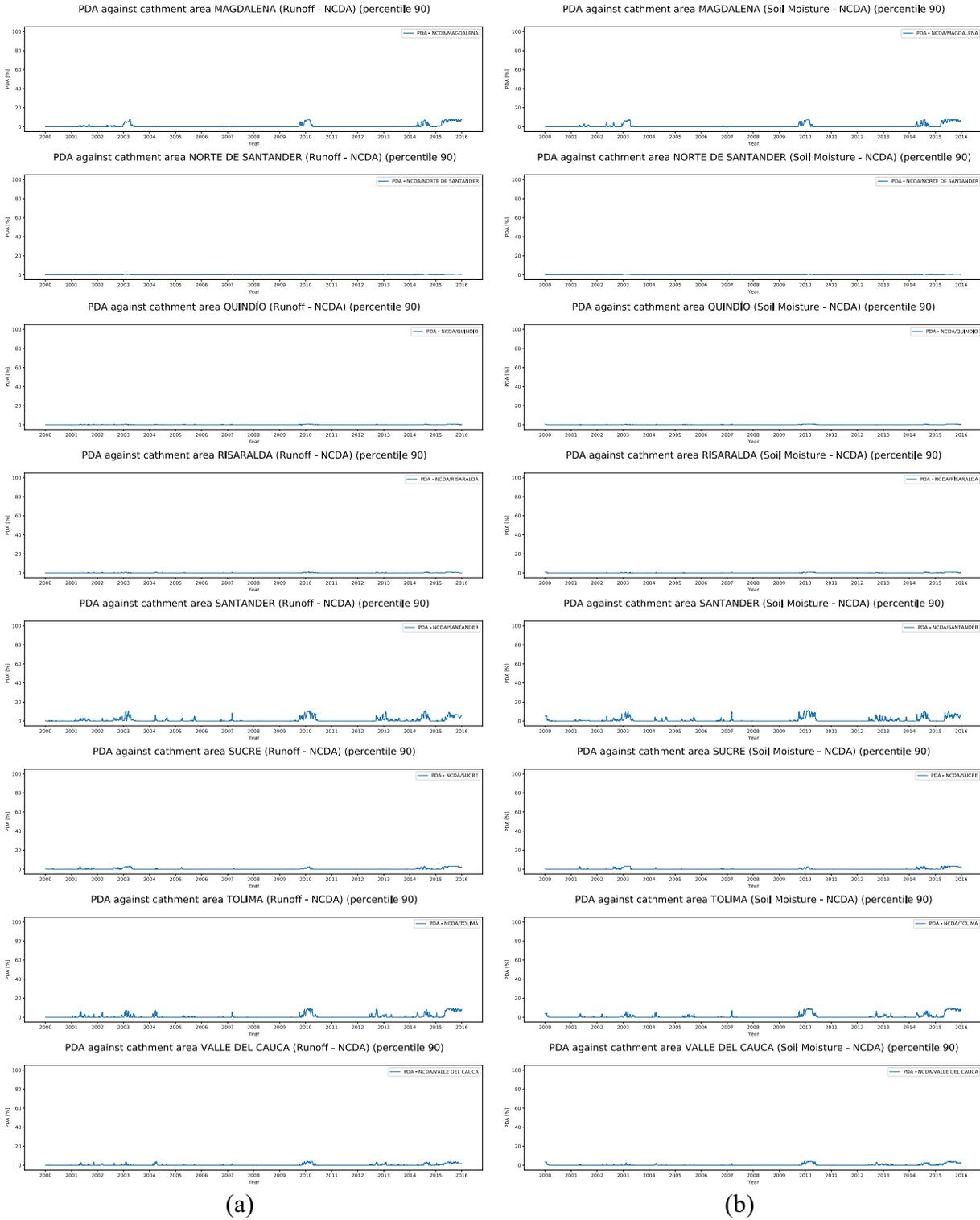
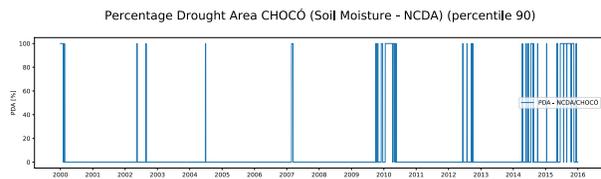
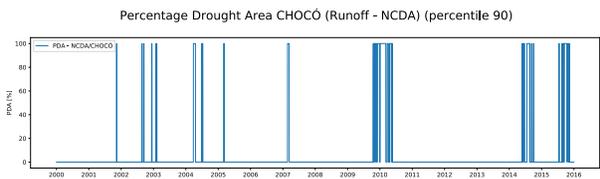
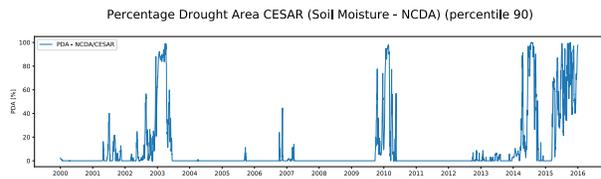
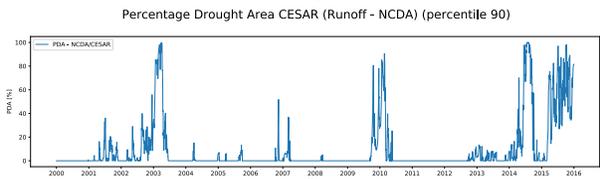
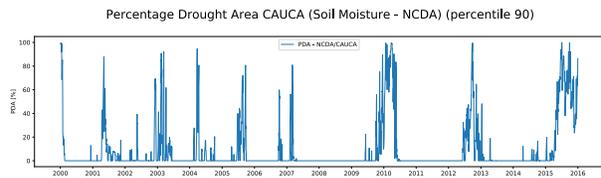
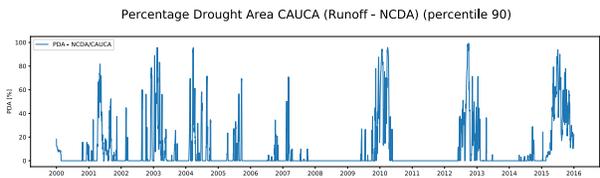
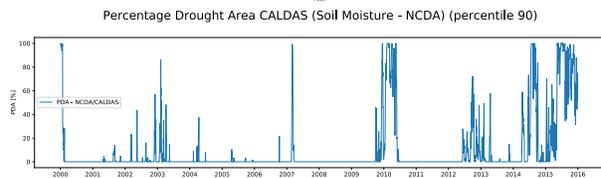
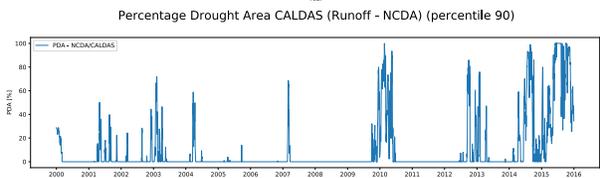
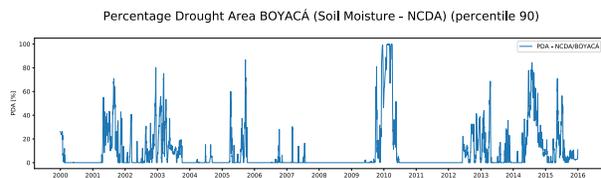
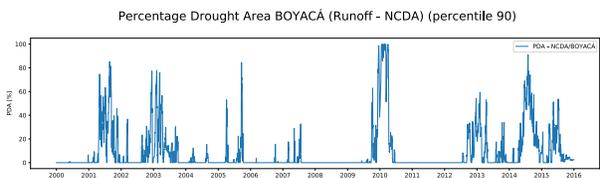
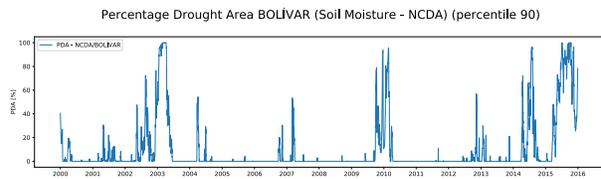
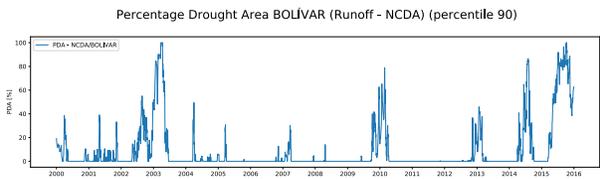
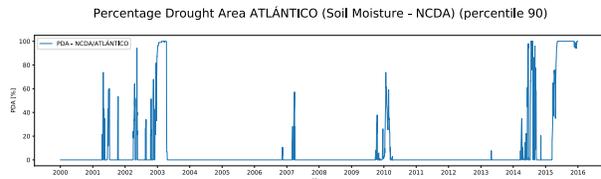
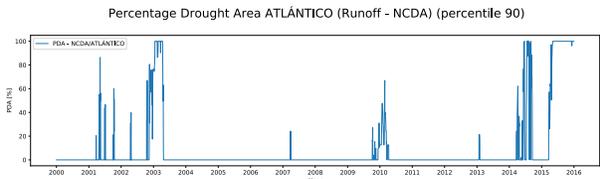
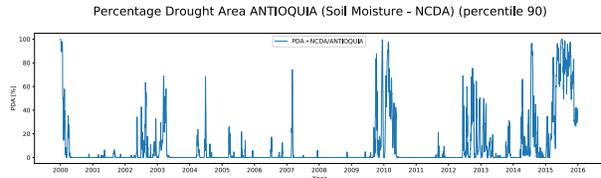
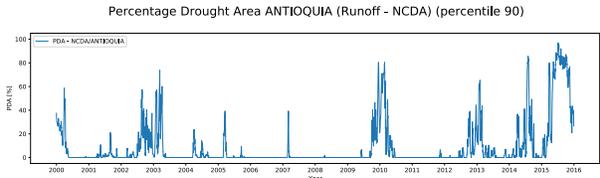


Figura 38. PDA sectorizado por departamentos teniendo como referencia el área total de la cuenca. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.





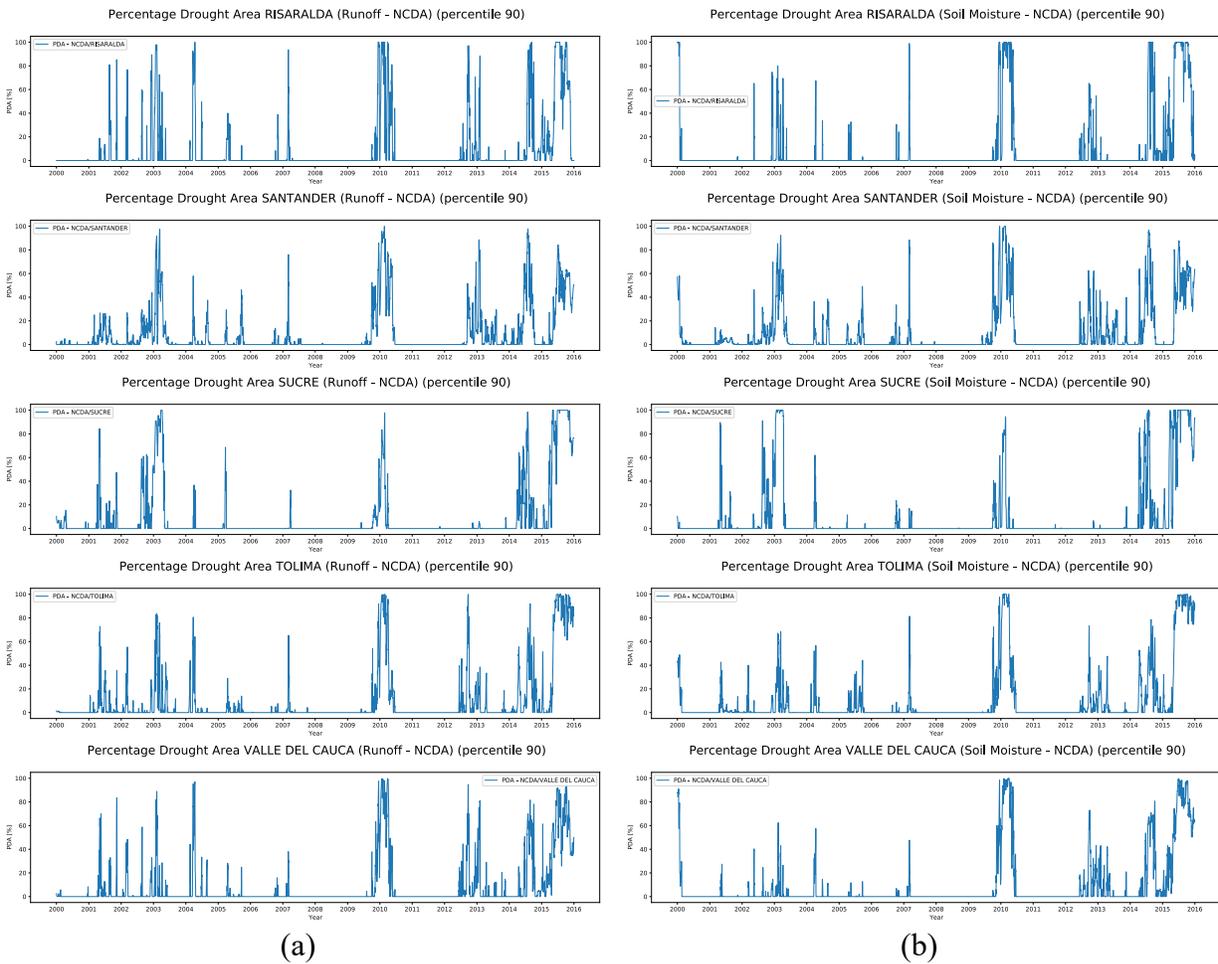


Figura 39. PDA sectorizado por departamentos teniendo como referencia su propia área. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

Adicionalmente, se puede analizar el área en sequía acumulada a lo largo del periodo de estudio por departamento para determinar cuál de estos ha sido el más desfavorecido por este fenómeno. En la Tabla 10 se muestra el acumulado de sequía en km² de acuerdo con el percentil 90 como ejemplo para cada parámetro analizado y su respectiva gráfica en la Figura 40.

Tabla 10.

Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por departamentos.

Departamento	Runoff	Soil Moisture
Antioquia	7864.17	8372.53
Atlántico	495.28	499.68
Bolívar	4858.78	5059.42
Boyacá	2242.75	2274.40
Caldas	1474.86	1504.92
Cauca	1895.29	2006.67
Cesar	4412.03	4643.51
Chocó	3.47	3.77
Córdoba	1624.22	1785.26
Bogotá D.C	226.14	234.32
Cundinamarca	2967.73	3031.14
Huila	3412.22	3475.48
La Guajira	343.93	338.63
Magdalena	4318.18	4314.20
Norte de Santander	379.18	390.86
Quindío	364.87	374.01
Risaralda	432.54	445.95
Santander	5659.01	5882.28
Sucre	1586.07	1630.92
Tolima	4708.40	4872.65
Valle del Cauca	1898.03	2096.85

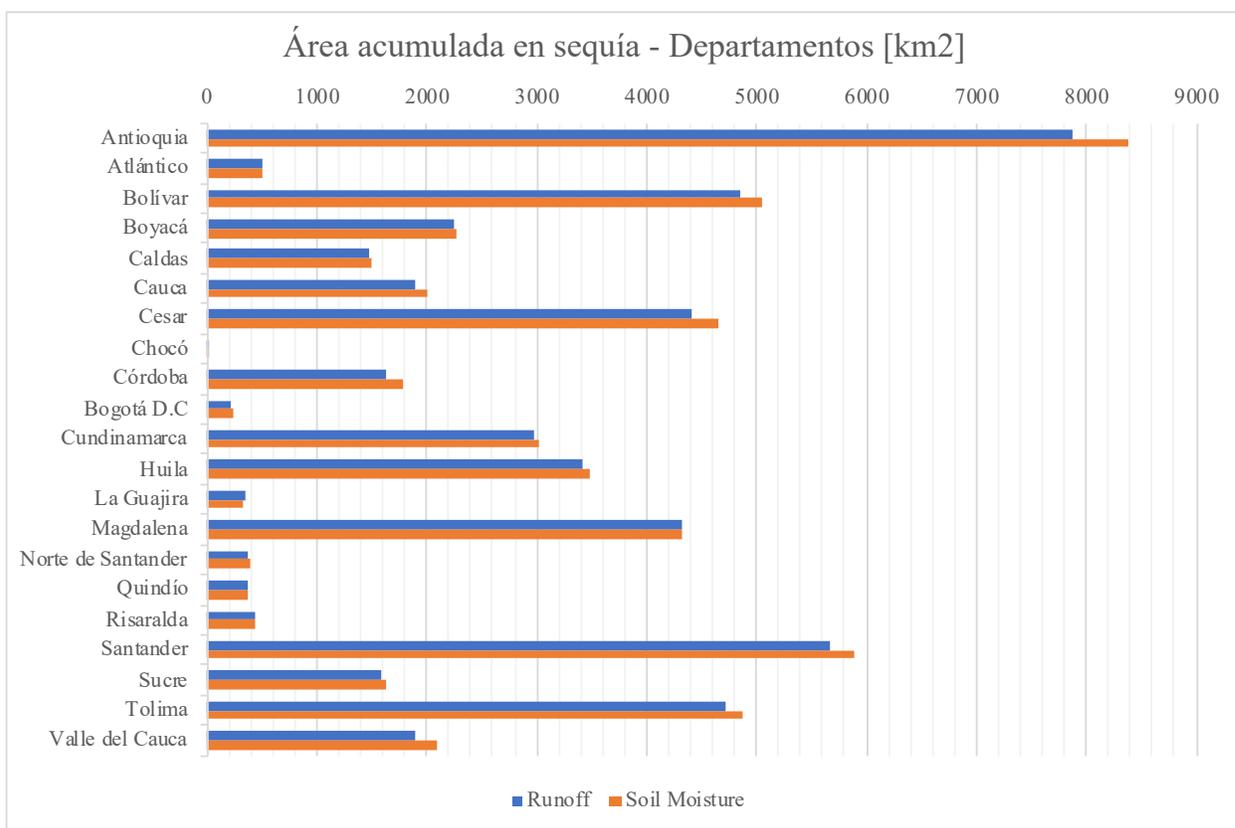


Figura 40. Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por departamentos.

4.3.2. Análisis por pisos térmicos

De igual manera, se realizó la sectorización de la cuenca por pisos térmicos según la clasificación de la Tabla 5 (ver Figura 41) y se encontró el PDA para cada una de las categorías propuestas de la misma manera que se hizo con los departamentos. La primera, teniendo como referencia el área total de la cuenca (ver Figura 42), y la segunda teniendo como referencia el área de cada uno de los pisos térmicos (ver Figura 43).

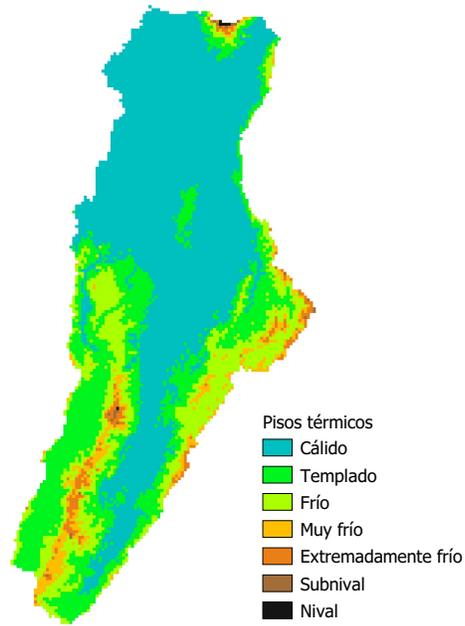
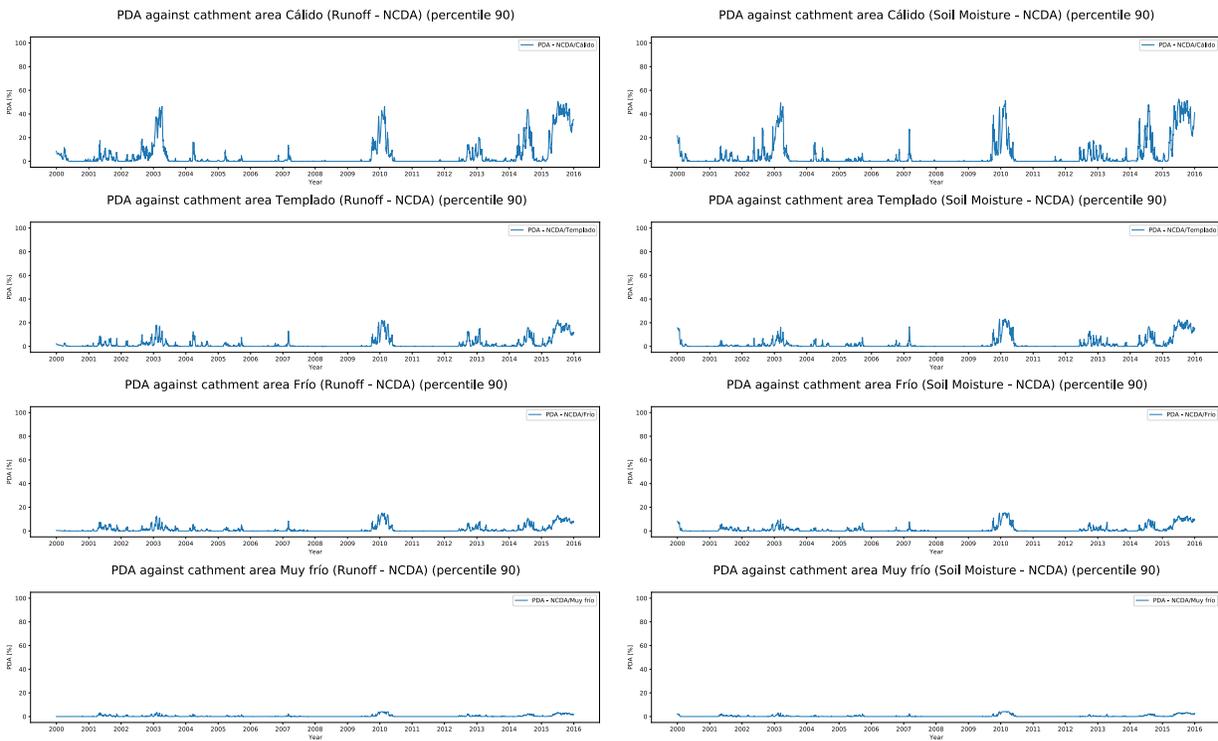


Figura 41. Mapa de sectorización de la cuenca Magdalena – Cauca por pisos térmicos. Fuente: Autores.



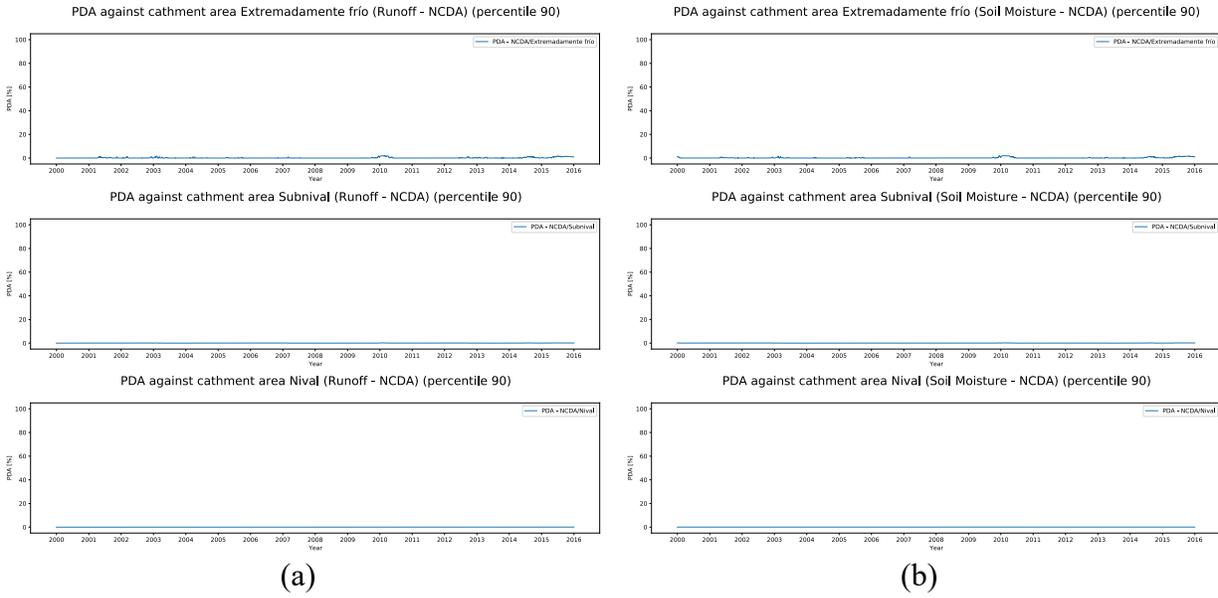
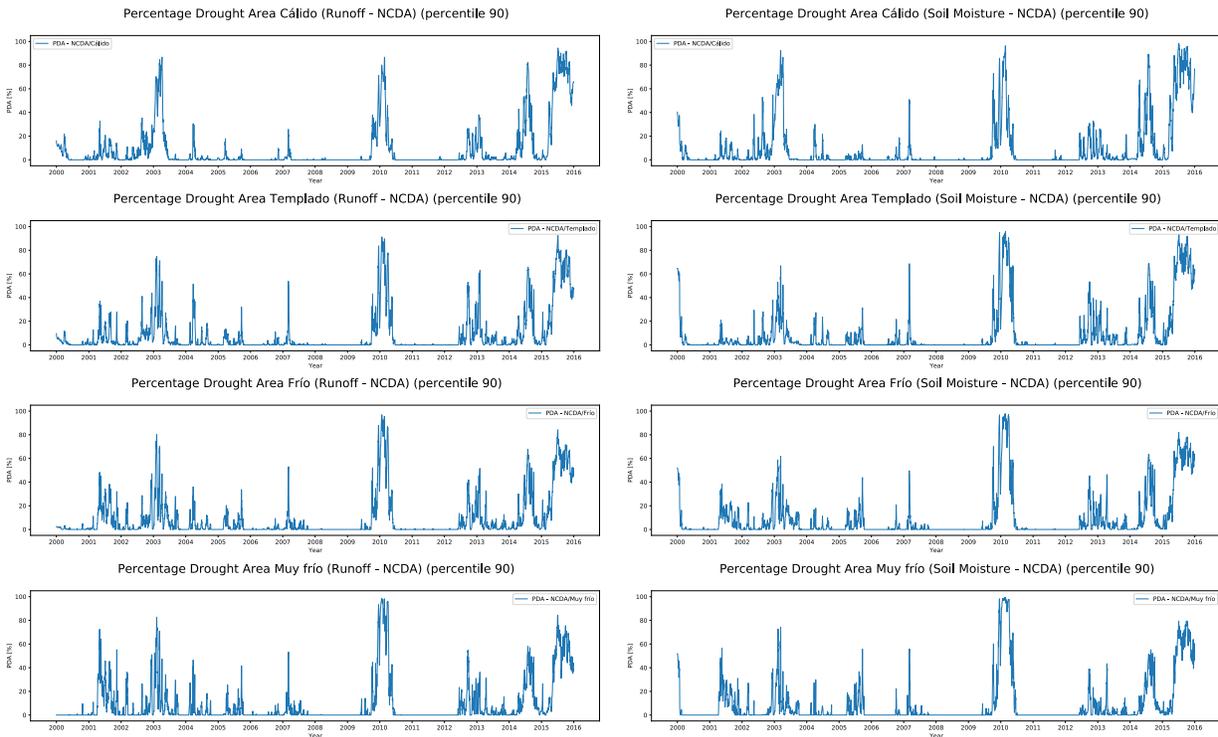


Figura 42. PDA sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia el área total de la cuenca.
 (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.



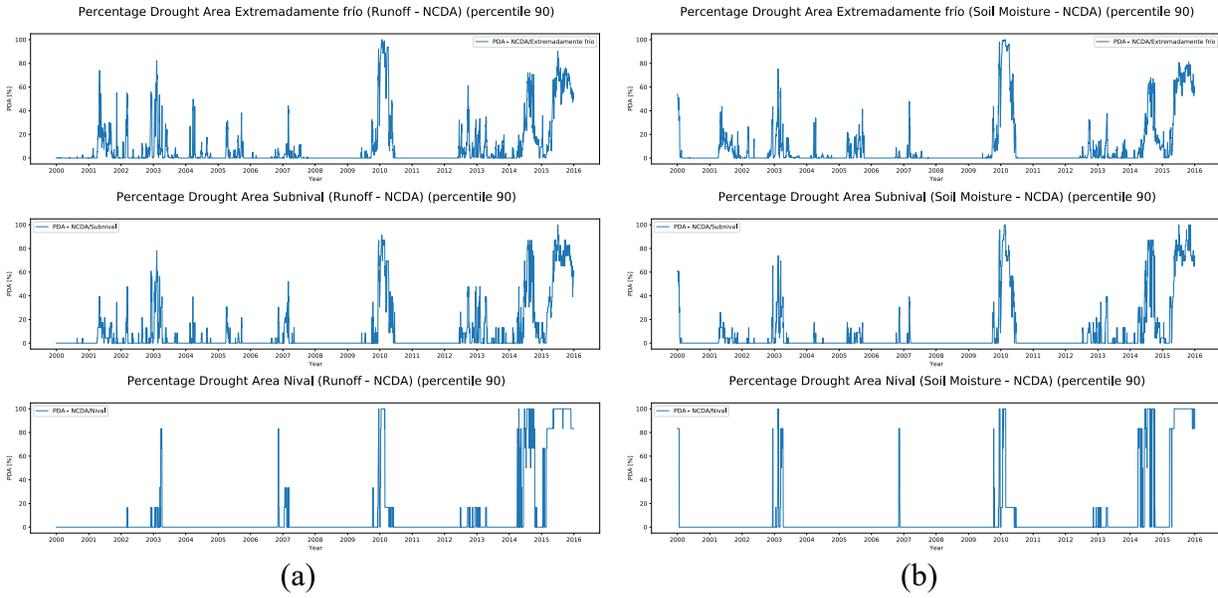
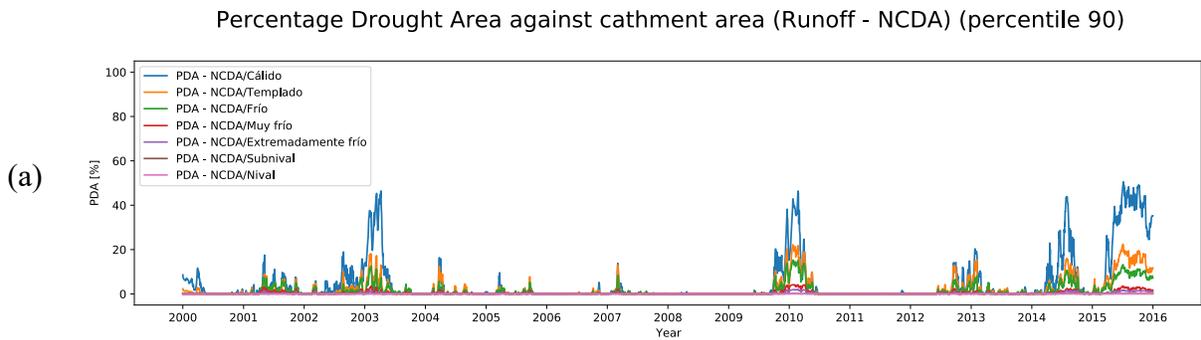


Figura 43. PDA sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia su propia área. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

Puesto que hay menos categorías en la sectorización por pisos térmicos, es posible hacer una gráfica en donde reúnen las diferentes categorías. En este caso, la Figura 44 muestra el PDA de cada piso térmico frente al área total de la cuenca para ambas variables analizadas, mientras que la Figura 45 muestra el PDA para cada piso térmico respecto a su misma área.



Percentage Drought Area against cathment area (Soil Moisture - NCDA) (percentile 90)

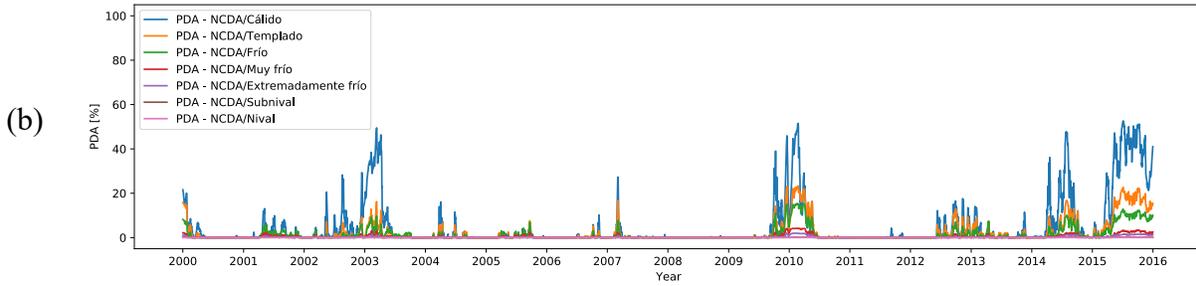
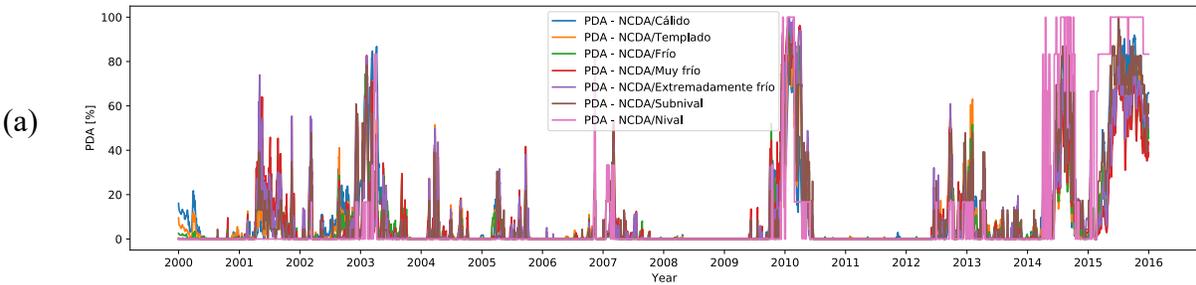


Figura 44. PDA agrupado sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia el área total de la cuenca. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores

Percentage Drought Area against thermal floors area (Runoff - NCDA) (percentile 90)



Percentage Drought Area against thermal floors area (Soil Moisture - NCDA) (percentile 90)

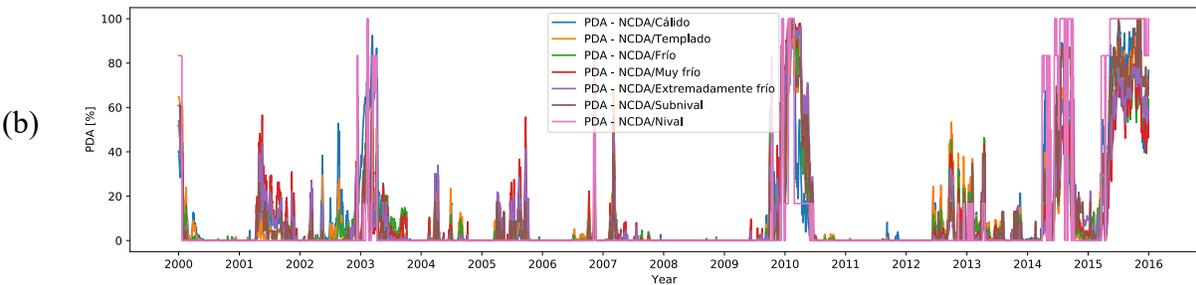


Figura 45. PDA agrupado sectorizado por pisos térmicos teniendo como referencia su propia área. (a) escorrentía, (b) humedad del suelo. Fuente: Autores.

Adicionalmente, se puede analizar el área en sequía acumulada a lo largo del periodo de estudio por pisos térmicos para determinar cuál de estos ha sido el más desfavorecido por este fenómeno. En la Tabla 11 se muestra el acumulado de sequía en km² de acuerdo con el percentil 90 como ejemplo para cada parámetro analizado y su respectiva gráfica en la Figura 28.

Tabla 11.

Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por pisos térmicos.

Piso Térmico	Runoff	Soil Moisture
Cálido	27502.18	28862.48
Templado	12201.87	12743.92
Frío	8112.28	8261.89
Muy frío	2173.72	2197.85
Extremadamente frío	1033.60	1032.02
Subnival	112.26	109.75
Nival	31.25	29.55

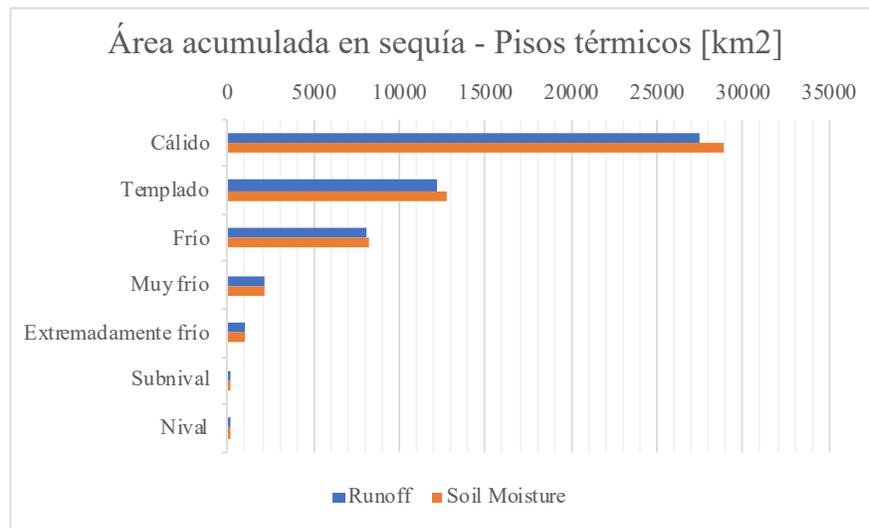


Figura 46. Área acumulada de sequía en el periodo de análisis para el percentil 90 regionalizada por pisos térmicos.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Existen diferentes metodologías para el cálculo de la sequía propuestas por diversos investigadores como, por ejemplo, el percentil de las variables hidrológicas y los índices de sequía. Cada una de ellas se ha desarrollado para unas necesidades específicas, pero todas son una poderosa herramienta para el ordenamiento y planeación territorial. El análisis de la sequía requiere un estudio profundo de las variables hidrológicas, del terreno y de las herramientas matemáticas para describir el proceso del fenómeno natural en un modelo computacional. Este estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento de las sequías en la macrocuenca Magdalena-Cauca, una de las más importante de Colombia.

En el presente estudio se consideró adecuado el uso de datos hidrometeorológicos obtenidos de información satelital, a pesar de que los mismos tienden a presentar una menor precisión que los datos reales medidos en campo; sin embargo, la calibración se realizó mediante 6 estaciones de caudales con datos reales medidos en la cuenca.

La construcción de la herramienta HAPI tuvo en cuenta por parte de su desarrollador un módulo de calibración de los parámetros del modelo, en el cual se define por parte del usuario un límite inferior y superior para ser procesados por la herramienta y encontrar la mejor combinación en los rangos establecidos para cada uno de ellos; sin embargo, es necesario que el usuario tenga la experticia para la determinación de dichos límites buscando la optimización del tiempo computacional. En el presente estudio de caso se realizaron múltiples simulaciones con diferentes rangos de parámetros del modelo hidrológico para encontrar el conjunto de datos que presentara el mejor desempeño para caracterizar el comportamiento hidrológico de la zona de estudio.

Con los datos satelitales utilizados y la calibración del modelo hidrológico, se pudo observar, a partir de los resultados obtenidos, que los datos simulados de la celda r19c46, correspondiente a

la estación de calibración Calamar, tuvieron un alto ajuste con los datos medidos en dicha estación, a la cual se le dio un mayor peso puesto que tiene la mayor área aportante de la cuenca y, por tanto, la mayor concentración de caudal, tanto para el período de calibración como para el de validación.

Se encontró en el análisis bibliográfico y de los resultados en la implementación de los DI, que el SRI y el SSI presentan comportamientos similares en la cuenca de estudio para el periodo de tiempo seleccionado, lo cual resulta congruente en cuanto dichos índices son usados en la estimación de sequías hidrológicas, es decir, aquellas que presentan niveles anormalmente bajos de agua superficial. Por otro lado, el SEDI describe la sequía agrícola, dada la capacidad para deyectar la reducción de la humedad del suelo y su relación con el ciclo vascular en las plantas, por lo cual su presencia determina eventos de menor duración en la cuenca respecto al SRI y el SSI.

En la estimación de DI se encontró que un periodo de agregación menor puede determinar mayor presencia de eventos de sequía, los cuales pueden ser de gran intensidad, pero corta duración; por otro lado, un mayor periodo de agregación determina una menor cantidad de eventos de sequía, pero con una larga duración. Adicionalmente, se encontró que los periodos secos se presentaban en el primer cuatrimestre de cada año antes del 2013; posteriormente, los eventos se empezaron a presentar a lo largo de todo el año hasta el 2015.

En la Figura 32 se ve claramente cómo cambia el PDA para cada percentil elegido. Cuanto mayor es el percentil menos ruido se capta del análisis. Esto, en el percentil 95 en particular, significa que sólo se registran las sequías severas y se muestran como picos en el gráfico. Del mismo modo, la escala temporal usada en el presente estudio de caso fue mensual para la definición del threshold en las metodologías NCDA y CDA, con el fin de evitar pequeñas variaciones que se deriven en cambios bruscos del estado de sequía (ruido en la determinación del threshold).

El análisis NCDA y CDA se realizó a una escala diaria con el fin de determinar aquellos eventos de sequía de escalas menores a las mensuales, que puedan generar un déficit en las necesidades de sectores productivos como, por ejemplo, el agrícola. Aun así, eventos de sequía con escala diaria se consideran despreciables, puesto que sería la suma de varios días consecutivos sin aporte de agua a determinados cultivos, lo que los afecte. En contraste, el estudio de sequías mediante la metodología DI puede o no ser utilizada por el sector productivo agrícola, siempre y cuando sus necesidades de agua alcancen escalas mensuales.

Se realizó la comparación entre las metodologías implementadas observando en la Figura 25 y la Figura 32, una relación gráfica en el periodo del año 2010, donde los DI (SRI6 y SSI6 al menos) mostraron en ese año un nivel anormalmente bajo de agua superficial (escorrentía, humedad del suelo), mientras que el PDA mostró valores altos de sequía. Esto muestra una fuerte correlación entre ambos análisis (percentiles e índices de sequía). Además, se observó que el PDA calculado con el umbral definido por el percentil 85 de las variables hidrológicas (escorrentía y humedad del suelo) tiene una alta correlación con el PDA calculado con los índices de sequía SRI y SSI.

Los análisis de DI y NCDA, demostraron ser herramientas bastante precisas para identificar los periodos de sequía en el espacio y el tiempo describiendo el fenómeno hidrológico natural en la cuenca de estudio. De la Figura 32, gráficos de escorrentía y humedad del suelo, se observó una ocurrencia periódica de alto PDA, que resulta ser consistente con la ocurrencia del ENSO, el cual tiene un recurrencia entre 4 y 6 años (Montealegre, 2014).

Con todo lo anterior, se realizó el análisis de sequías espacialmente distribuidas en la cuenca Magdalena – Cauca, encontrando los diferentes estados de sequía en la escala temporal seleccionada, correspondiente al periodo comprendido entre 2000 y 2015. Se encontró que para la división política los departamentos que aportan un mayor PDA, respecto del área total de la cuenca,

corresponden a Antioquia, Huila, Santander y Tolima; sin embargo, se determina que todos los departamentos presentan un comportamiento equivalente en términos de sequía al ser comparados respecto a su misma área, lo cual concluye que la sequía afecta equitativamente a toda la cuenca en los mismos periodos de tiempo.

En cuanto a la división planteada por pisos térmicos, se observó que el cálido es el mayor aportante de PDA para toda la cuenca, dado que el mismo representa la mayor área de la misma; sin embargo, se observó que, para el análisis versus su propia área, los pisos correspondientes a frío, muy frío y extremadamente frío presentaban mayor PDA.

Todos los análisis aquí realizados, muestran un incremento de la ocurrencia de sequía para la cuenca analizada al final del período de estudio (2015). Esto puede estar relacionado con los efectos del cambio climático que comenzaron a ser más evidentes en los últimos 5 años del periodo seleccionado.

Capítulo 6. Discusiones

- Para futuros análisis se podría considerar el uso de los datos medidos por las estaciones hidrometeorológicas disponibles, así como la regulación de los embalses existentes en la cuenca para tener una mejor aproximación a su comportamiento hidrológico, y por lo tanto al análisis de las sequías, con el fin de desarrollar planes de inversión, estudios de manejo integral de la cuenca y gestión del riesgo.
- En el presente estudio se realizó la calibración del modelo por medio de un conjunto de parámetros unificados para toda la cuenca, los cuales fueron mostrados en la Tabla 8; sin embargo, la calibración puede involucrar un mayor nivel de complejidad de acuerdo a las necesidades del investigador en la zona a estudiar. En dicho sentido, la calibración del modelo puede estar determinada por el cálculo de los parámetros del modelo diferenciado en cada celda, teniendo en cuenta, por ejemplo, los usos del suelo en la cuenca, el cual es variable en el espacio y en el tiempo. Futuras investigaciones pueden determinar si aumentar el nivel de complejidad en la calibración del modelo puede generar un impacto significativo en los resultados encontrados.
- En el presente estudio no se implementaron ajustes probabilísticos adicionales a la distribución Gamma propuesta por McKee et al. (1993) y EDO (2019) teniendo en cuenta que a partir de la calibración del modelo los datos originales son transformados para adaptarse a la configuración establecida en el modelo hidrológico, por lo que se recomienda en futuras investigaciones, implementar diferentes distribuciones para encontrar la que mejor se ajuste a la serie temporal de parámetros hidrológicos de cada celda dependiendo también de la zona de estudio y sus peculiaridades.

- En la bibliografía consultada se encontró que diferentes investigadores suelen incluir periodos de agregación mayores a los seleccionados en el presente estudio (1, 3 y 6 meses), clasificando aquellos eventos de larga duración e intensidad que afectan a las diferentes cuencas. Se considera adecuado para futuras investigaciones, incrementar los periodos de agregación y determinar si el cambio en el comportamiento de las sequías a partir del año 2013 se sigue presentando hasta la actualidad y su relación con el cambio climático.
- En cuanto al análisis NCDA y CDA, y el ruido generado para percentiles menores al 85, se recomienda para un estudio posterior, realizar el análisis para percentiles mayores, que tienden a mostrar un PDA extremo en el tiempo. Por otro lado, se considera que futuras investigaciones para el análisis de sequías mediante la metodología DI en cultivos en pequeñas extensiones de tierra (incluso menor a una pequeña cuenca) puedan definir un threshold a una escala quincenal, con un análisis de sequía diario, lo cual se puede ajustar mejor a las necesidades de un cultivo particular.

Capítulo 7. Bibliografía

- Abdo, K. S., Fiseha, B. M., Rientjes, T. H. M., Gieske, A. S. M., & Haile, A. T. (2009). Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in Lake Tana basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7363>
- Afzali, A., Keshtkar, H., Pakzad, S., Moazami, N., Azizabadi Farahani, E., & Golpaygani, A. (2016). Spatio-Temporal Analysis of Drought Severity Using Drought Indices and Deterministic and Geostatistical Methods (case study: Zayandehroud River basin). *Desert*, *21*, 165–172.
- Aristizábal, G. L. (2011). ASPECTOS DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA DE GRAN ESCALA SOBRE EL NOROCCIDENTE DE SURAMÉRICA ASOCIADA AL CICLO ENOS 2009-2010 Y SUS CONSECUENCIAS EN EL RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA. *IDEAM*.
http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulación+Atmosférica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf
- Bae, S., Lee, S. H., Yoo, S. H., & Kim, T. (2018). Analysis of drought intensity and trends using the modified SPEI in South Korea from 1981 to 2010. *Water (Switzerland)*, *10*(3). <https://doi.org/10.3390/w10030327>
- Carty, T. (2017). *El clima, en crisis: Cómo el cambio climático está agravando la sequía y el desastre humanitario en África Oriental*.
<https://oxfamilibrary.openrepository.com/bitstream/handle/10546/620263/mb-climate-crisis-east-africa-drought-270417-es.pdf;jsessionid=593F679EAC1885CD9E3BFEE3B8B4CAC4?sequence=5>
- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations

- on their calibration and use. *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)
- Copernicus European Drought Observatory (EDO). (2019). *SPI: Standardized Precipitation Index*. <https://edo.jrc.ec.europa.eu/>
- CORPOMAGDALENA., I.-. (2001). *Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena - Cauca y elementos para su Ordenamiento Territorial*. 235.
- Corzo Perez, G. A., Van Huijgevoort, M. H. J., Voß, F., & Van Lanen, H. A. J. (2011). On the spatio-temporal analysis of hydrological droughts from global hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2963-2011>
- Diaz Mercado, V., Corzo Perez, G., Solomatine, D., & Van Lanen, H. A. J. (2016). Spatio-temporal Analysis of Hydrological Drought at Catchment Scale Using a Spatially-distributed Hydrological Model. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.577>
- Diaz, V., Corzo, G., Van Lanen, H. A. J., & Solomatine, D. P. (2019). Spatiotemporal Drought Analysis at Country Scale Through the Application of the STAND Toolbox. In *Spatiotemporal Analysis of Extreme Hydrological Events*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811689-0.00004-5>
- Dooge, J. C. I. (1968). The hydrologic cycle as a closed system. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*. <https://doi.org/10.1080/02626666809493568>
- European Commission. (2005). *STARDEX*.
- Farrag, M. (2018a). *HAPI - Hydrological library for Python*. GitHub.
- Farrag, M. (2018b). *Spatio-temporal simulation of catchment response based on dynamic weighting of hydrological models Case Study : Jiboa catchment in El Salvador* (Issue April). UNESCO-IHE Institute for Water Education.

- Farrag, M., Perez, G. C., & Solomatine, D. (2021). Spatio-temporal hydrological model structure and parametrization analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/jmse9050467>
- González, J., Daza, C., & Urueña, C. (2008). esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano Distributed generation scheme analysis as an option for colombian. In *Ingenieria.Udea.Edu.Co* (Vol. 44). <http://ingenieria.udea.edu.co/grupos/revista/buscador/descargas/index.php?codigo=4410&texto=n44a10.pdf>
- González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, Ó. A., Jiménez, J., & Navar, J. de J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia Uanl*.
- IDEAM. (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2010.compressed.pdf
- IDEAM. (2012). *SEQUÍA METEOROLÓGICA Y SEQUÍA AGRÍCOLA EN COLOMBIA: INCIDENCIA Y TENDENCIAS SEQUÍA METEOROLÓGICA Y SEQUÍA AGRÍCOLA EN COLOMBIA: INCIDENCIA Y TENDENCIAS CONTENIDO 1. Generalidades*. [moz-extension://d1db482d-1b8a-46ff-9cff-a40c40a0eb55/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fdocuments%2F21021%2F21138%2FSequias%2BIncidencias%2By%2BTendencias.pdf%2F3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a](http://d1db482d-1b8a-46ff-9cff-a40c40a0eb55/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fdocuments%2F21021%2F21138%2FSequias%2BIncidencias%2By%2BTendencias.pdf%2F3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a)
- Inocêncio, T. de M., Neto, A. R., & Souza, A. G. S. S. (2020). Soil moisture obtained through remote sensing to assess drought events. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(9), 575–580. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p575-580>
- Kim, D., & Rhee, J. (2016). A drought index based on actual evapotranspiration from the Bouchet

- hypothesis. *Geophysical Research Letters*, 43(19), 10,277-10,285.
<https://doi.org/10.1002/2016GL070302>
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1–4), 272–288. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3)
- Lovino, M., García, N. O., & Baethgen, W. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *Journal of Hydrology: Regional Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.001>
- Martinez, Y. (2018). *ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN EL VALLE DEL CAUCA Y SU RELACIÓN CON LA AMENAZA DE SEQUÍA METEOROLÓGICA, ENTRE LOS AÑOS 2000 AL 2015*. Universidad del Valle.
- McEvoy, D. J., Huntington, J. L., Hobbins, M. T., Wood, A., Morton, C., Anderson, M., & Hain, C. (2016). The evaporative demand drought index. Part II: CONUS-wide assessment against common drought indicators. *Journal of Hydrometeorology*, 17(6), 1763–1779. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0122.1>
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES. In *Eighth Conference on Applied Climatology*.
- McKee, T. B., Nolan, J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc.*
- Méndez, C. E. C., Dualiby, Y. del C. A., & Sánchez, F. S. (2016). Modelo climático de los páramos de la Cordillera Oriental colombiana aplicado a regímenes de temperatura del suelo.

Perspectiva Geográfica, 21(1), 33–62. <https://doi.org/10.19053/01233769.4541>

Ministerio de vivienda y desarrollo territorial. (n.d.). *Gestión del agua - IDEAM*. Retrieved February 15, 2020, from <http://www.siac.gov.co/gestionagua>

Ministerio de vivienda y desarrollo territorial. (2015). *Avances en la Implementación de los Planes Estratégicos de Macrocuenca | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/planificacion-de-cuencas-hidrograficas/macrocuenca/avances-en-la-formulacion-de-los-planes-estrategicos#macrocuena-magdalena>

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. In *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

Montealegre, J. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. *IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)*, 1–134. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Niño+-+La+Niña.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>

NOAA's Climate Prediction Center Internet Team. (2019). *NOAA's Climate Prediction Center*. National Weather Service.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), & Asociación Mundial para el Agua. (2016). Manual de indicadores e índices de sequía. In *Programa de gestión integrada de sequías*.

Pértega, S., & Pita, S. (2004). Cálculo de probabilidades: nociones básicas. *Cad. Aten. Primaria*, 11(1), 176–179. <https://www.fisterra.com/mbe/investiga/probabilidades/probabilidades.asp>

PNUD, P. de las N. U. para el D., & IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2014). *Plan Regional Integral*

de Cambio Climático, Región Capital Bogotá - Cundinamarca.

- Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639.
<https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2), 1–7.
<https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Strosser, P., Dworak, T., Andrés Garzon Delvaux, P., Berglund, M., Schmidt, G., Mysiak, J., Kossida, M., Iacovides, I., Ashton, V., Seiz Puyuelo, R., De Paoli, G., & Stanley, K. (2012). *Final Report Gap Analysis of the Water Scarcity and Droughts Policy in the EU European Commission*. <http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/WSDGapAnalysis.pdf>
- Tan, M. L., Chua, V. P., Li, C., & Brindha, K. (2018). Spatiotemporal analysis of hydro-meteorological drought in the Johor River Basin, Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2409-5>
- THOM, H. C. S. (1958). A NOTE ON THE GAMMA DISTRIBUTION. *Monthly Weather Review*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1958\)086<0117:anotgd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1958)086<0117:anotgd>2.0.co;2)
- Tierras, M. de D. R. y. (n.d.). *Tipos de sequía*. MDRyT. Retrieved February 13, 2020, from https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/Observatorio_Nacional_Sequia_1_1_tipos_sequia.aspx
- Tsakiris, G., Loukas, A., Pangalou, D., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G., & Cancelliere, A. (2007). Chapter 7. Drought characterization. *Options Méditerranéennes*.
- United Nations. (2018). *Central America: drought, resulting crop losses threaten food security of two million people, UN warns*.

- Van Loon, A. F., Van Lanen, H. A. J., Hisdal, H., Tallaksen, L. M., Fendeková, M., Oosterwijk, J., Horvát, O., & Machlica, A. (2010). Understanding hydrological winter drought in Europe. *IAHS-AISH Publication*.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Miralles, D. G., Domínguez-Castro, F., Azorin-Molina, C., El Kenawy, A., Mcvicar, T. R., Tomás-Burguera, M., Beguería, S., Maneta, M., & Peña-Gallardo, M. (2018). Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *Journal of Climate*, 31(14), 5371–5393. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0775.1>
- WaterGAP. (n.d.). *En Wikipedia*.
- World Meteorological Organization, & Global Water Partnership. (2016). Handbook of drought indicators and indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). *Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1984-6>
- Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., & Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.047>
- Xu, Y., Wang, L., Ross, K. W., Liu, C., & Berry, K. (2018). 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. *Remote Sensing*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/rs10020301>

- Yao, J., Zhao, Y., Chen, Y., Yu, X., & Zhang, R. (2018). Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.200>
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers*, 23, 19. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90110-3)
- Zhang, X., Li, M., Ma, Z., Yang, Q., Lv, M., & Clark, R. (2019). Assessment of an Evapotranspiration Deficit Drought Index in Relation to Impacts on Ecosystems. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(11), 1273–1287. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-9061-6>
- Zhu, N., Xu, J., Li, W., Li, K., & Zhou, C. (2018). A comprehensive approach to assess the hydrological drought of inland river basin in Northwest China. *Atmosphere*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/atmos9100370>
- Zhu, Y., Liu, Y., Wang, W., Singh, V. P., Ma, X., & Yu, Z. (2019). Three dimensional characterization of meteorological and hydrological droughts and their probabilistic links. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124016>