

EVALUACIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LA SEQUÍA HIDROMETEOROLÓGICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PATÍA



JULIAN DAVID MERA FRANCO

SANTIAGO DE CALI, 2023



**EVALUACIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LA SEQUÍA HIDROMETEOROLÓGICA EN LA CUENCA
ALTA DEL RÍO PATÍA EMPLEANDO ÍNDICES ESTANDARIZADOS DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL**

JULIAN DAVID MERA FRANCO

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**

DIRECTORES:

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Ing. Agrícola PhD, Profesor titular Universidad del Valle

TERESITA CANCHALA NASTAR

Ing. Sanitaria PhD, Profesora Universidad Mariana



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE - EIDENAR
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
SEPTIEMBRE DE 2023**

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a los investigadores y comunidades encausadas en la gestión integral del riesgo de la sequía en el suroccidente colombiano

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por otorgarme la sabiduría y la fortaleza necesarias para llevar a cabo este trabajo. A mi amada familia, quienes me inculcaron los principios y valores que han guiado mi vida. A mis estimados directores de tesis: Teresita Canchala Nastar y Yesid Carvajal Escobar, quienes me han orientado y motivado durante este proceso.

Mi gratitud se extiende al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA), un lugar al que llegué de forma inesperada y en el que terminé forjando valiosos conocimientos en hidroclimatología a la vez que desarrollé habilidades investigativas y de liderazgo con el apoyo de Camilo Ocampo Marulanda, mis directores de tesis, Daniel Felipe Zorrilla y demás estudiantes e investigadores con los que tuve la fortuna de compartir y aprender.

Finalmente, agradezco a la Universidad del Valle por ser el alma mater en que me formé como Ingeniero Sanitario y Ambiental con el apoyo de profesores y amistades memorables, especialmente Yuleidy Ramírez (q.e.p.d), Laura Arroyave, Valeria García, Valeria Torres, Mariana Ramírez, Isabella Cifuentes, Manuel Rodríguez, Juan Maldonado y David Villareal.

RESUMEN

La evaluación de las sequías es de primordial importancia para la planificación y gestión del recurso hídrico. Esto requiere comprender las sequías históricas de una región en particular, así como los impactos de las sequías durante su ocurrencia. La presente investigación se enfocó en realizar una evaluación espacial y temporal de la sequía hidrometeorológica a escala semestral y anual en la cuenca alta del río Patía, localizada al suroccidente colombiano. Para alcanzar este objetivo, se realizó un análisis de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación mensual y el caudal medio mensual en la cuenca. Posteriormente, se examinó el comportamiento de los eventos de sequía hidrometeorológica a nivel semestral y anual, tanto en términos espaciales como temporales. Se investigó la relación de estos eventos con variables macro climáticas de los océanos Pacífico y Atlántico, centrándose en aquellas relacionadas con el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Por último, se identificó el grado de susceptibilidad a las sequías hidrometeorológicas en la zona de estudio.

De los resultados se destaca que la cuenca presenta un patrón bimodal en lo que respecta a la lluvia y el caudal, con diferencias notables en el norte y sur del territorio. Además, se logró identificar el número de eventos de sequía meteorológica e hidrológica, señalando que la sequía hidrometeorológica más prolongada y severa ocurrió entre 2001 y 2003, mientras que la más intensa y extremadamente magnitud se registró entre 2015 y 2016. Por otro lado, el análisis de las teleconexiones reveló que los eventos de sequía hidrometeorológica en la cuenca guardan principalmente relación con el calentamiento de la superficie de las aguas del océano Pacífico norte y tropical, así como con la debilitación de los vientos alisios. En menor medida, también se encontró una conexión con el enfriamiento de las aguas superficiales del océano Atlántico. En última instancia, se determinó que la cuenca presenta un nivel entre moderado y alto de susceptibilidad a las sequías hidrometeorológicas, siendo las subzonas hidrográficas de los ríos Guachicono y Guáitara las más afectadas por estos eventos.

Los anteriores resultados representan valiosa información para tomadores de decisiones municipales y departamentales, así como para la comunidad académica que desarrolla investigaciones sobre el tema en el suroccidente colombiano. Asimismo, proporcionan un análisis detallado de la cuenca que contribuye a una mejor comprensión del comportamiento de la precipitación mensual y el caudal medio mensual, así como su respuesta ante períodos de sequía en la región. Esta información es de utilidad para potenciar las herramientas de planificación territoriales con el objetivo de fortalecer las estrategias de adaptación y resiliencia de los sistemas ambientales, económicos y sociales a la sequía. Por último, estos resultados aportan al avance de investigaciones actuales y futuras en el ámbito de la sequía.

Palabras clave: Sequía meteorológica, Sequía hidrológica, Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Índice de Sequía de Caudales Fluviales (SDI), Teleconexiones, Susceptibilidad.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	16
4.1 Objetivo general	16
4.2 Objetivos específicos	16
5. MARCO TEÓRICO	17
5.1 Sistema climático	17
5.2 Variabilidad climática en Colombia	18
5.3 Sequía	18
5.4 Información hidroclimatológica	19
5.5 Índices de sequía	20
5.5.1 Índice estandarizado de precipitación	21
5.5.2 Índice estandarizado de caudal	21
5.6 Evaluación de la sequía	22
5.7 Índices macroclimáticos y sequía	22
6. METODOLOGÍA	24
6.1 Zona de estudio	24
6.2 Datos	25
6.2.1 Precipitación	25
6.2.1.1 Datos de precipitación in situ - IDEAM	25
6.2.1.2 Datos de precipitación ex situ - CHIRPS	25
6.2.2 Caudal	27
6.2.3 Variables macroclimáticas	28
6.2.4 Índices de sequía	30
6.2.4.1 Índice Estandarizado de Precipitación	31
6.2.4.2 Índice de Sequía de Caudales Fluviales	31
6.3 Esquema metodológico	31
6.3.1 Análisis espaciotemporal de la precipitación y el caudal	32
6.3.2 Evaluación espaciotemporal de eventos de sequía hidrometeorológica	33
6.3.3 Identificación de zonas susceptibles a sequía	35
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
7.1 Análisis espaciotemporal de la precipitación y el caudal	38
7.1.1 Análisis exploratorio y confirmatorio de los datos hidrometeorológicos	38

7.1.2 Regionalización de precipitación y caudal	42
7.1.3 Análisis temporal de precipitación y caudal	46
7.1.4 Análisis espaciotemporal de la precipitación	49
7.2 Evaluación espaciotemporal de eventos de sequía hidrometeorológica	51
7.2.1 Caracterización de eventos de sequía	51
7.2.1.1 Análisis de componentes principales	51
7.2.1.2 Identificación de eventos de sequía	52
7.2.1.3 Caracterización de eventos de sequía	54
7.2.1.4 Relación de los eventos de sequía con la intensidad del fenómeno ENOS	56
7.2.1.5 Espacialización de eventos de sequía hidrometeorológica	59
7.2.2 Correlación entre la sequía meteorológica e hidrológica	64
7.2.3 Teleconexiones	65
7.3 Identificación de zonas susceptibles a sequías hidrometeorológicas	69
7.3.1 Variables seleccionadas para el análisis de susceptibilidad	69
7.3.1.1 Frecuencia de la intensidad de la sequía hidrometeorológica	69
7.3.1.2 Frecuencia de la severidad de la sequía hidrometeorológica	70
7.3.1.3 Pendiente	72
7.3.1.4 Erosión	73
7.3.1.5 Aridez	74
7.3.2 Estandarización de variables	75
7.3.3 Proceso analítico jerárquico	75
7.3.4 Análisis de susceptibilidad	78
8. CONCLUSIONES	80
9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	82
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
11. ANEXOS	95

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes, procesos e interacciones del sistema climático	17
Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio	24
Figura 3. Ubicación estaciones meteorológicas	26
Figura 4. Ubicación estaciones CHIRPS	26
Figura 5. Ubicación de las estaciones hidrológicas	27
Figura 6. Regiones de indicadores macroclimáticos	30
Figura 7. Esquema metodológico	32
Figura 8. Estimación de datos faltantes.	41
Figura 9. Correlación entre la precipitación mensual de las estaciones IDEAM y CHIRPS	42
Figura 10. Regionalización de la precipitación mensual	44
Figura 11. Regionalización del caudal medio mensual	46
Figura 12. Ciclos anuales de precipitación mensual por regiones	47
Figura 13. Ciclos anuales de caudal medio mensual por regiones	48
Figura 14. Isoyetas estacionales multianuales	50
Figura 15. Identificación de eventos de sequía meteorológica	52
Figura 16. Identificación de eventos de sequía hidrológica	53
Figura 17. Caracterización de eventos de sequía a escala semestral y anual	55
Figura 18. Relación de eventos extremos de ENOS con eventos de sequía meteorológica	57
Figura 19. Relación de eventos extremos de ENOS con eventos de sequía hidrológica	58
Figura 20. Variación espacial de la sequía meteorológica semestral durante 2001-2003	59
Figura 21. Variación espacial de la sequía hidrológica semestral durante 2001-2003	60
Figura 22. Variación espacial de la sequía meteorológica semestral durante 2015-2016	62
Figura 23. Variación espacial de la sequía hidrológica semestral durante 2015-2016	63
Figura 24. Correlaciones cruzadas con el SPI a escala semestral y anual.	65
Figura 25. Correlaciones cruzadas con el SDI a escala semestral y anual.	66
Figura 26. Mapas de frecuencia relativa de las intensidades de la sequía meteorológica (SPI) semestral	69
Figura 27. Mapas de frecuencia relativa de las intensidades de la sequía hidrológica (SDI) semestral	69

Figura 28. Mapas de frecuencia relativa de la severidad de la sequía meteorológica (SPI) semestral	70
Figura 29. Mapas de frecuencia relativa de la severidad de la sequía hidrológica (SDI) semestral	71
Figura 30. Mapa de pendiente	72
Figura 31. Mapa de erosión del suelo	73
Figura 32. Mapa de aridez	74
Figura 33. Esquematización del proceso para la obtención de la susceptibilidad	77
Figura 34. Nivel de susceptibilidad de la sequía hidrometeorológica	78

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales variables para la caracterización de eventos de sequía	23
Tabla 2. Variables macroclimáticas analizadas	29
Tabla 3. Clasificación del SPI y SDI	35
Tabla 4. Clasificación de la susceptibilidad	37
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las series de precipitación mensual (1985-2018)	39
Tabla 6. Estadísticos descriptivos de las series de caudal medio mensual (1985-2018)	40
Tabla 7. Resultados del ACP de los conjuntos de datos de precipitación y caudal	43
Tabla 8. Resultados del ACP de los conjuntos de datos de SPI y SDI semestral y anual	51
Tabla 9. Correlación entre la sequía meteorológica e hidrológica	64
Tabla 10. Estandarización de las variables seleccionadas para la susceptibilidad	75
Tabla 11. Matriz de comparaciones pareadas	76
Tabla 12. Matriz de comparaciones pareadas normalizada	76

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Información general estaciones meteorológicas IDEAM	95
Anexo 2. Información general estaciones hidrológicas IDEAM	96
Anexo 3. Matriz de correlaciones entre series de precipitación mensual	97
Anexo 4. Matriz de correlaciones entre series de caudal medio mensual	98
Anexo 5. Ciclos anuales de precipitación mensual por estaciones	99
Anexo 6. Ciclos anuales de caudal medio mensual por estaciones	104
Anexo 7. Isoyetas mensuales multianuales	107
Anexo 8. Caracterización de eventos de sequía meteorológica a escala semestral y anual	108
Anexo 9. Caracterización de eventos de sequía hidrológica a escala semestral y anual	109
Anexo 10. Variación espacial de la sequía meteorológica anual durante 2001-2003	110
Anexo 11. Variación espacial de la sequía hidrológica anual durante 2001-2003	110
Anexo 12. Variación espacial de la sequía meteorológica anual durante 2015-2016	111
Anexo 13. Variación espacial de la sequía hidrológica anual durante 2015-2016	111
Anexo 14. Frecuencia relativa de las intensidades de la sequía meteorológica (SPI) anual	112
Anexo 15. Frecuencia relativa de las intensidades de la sequía hidrológica (SDI) anual	112
Anexo 16. Frecuencia relativa de las severidades de la sequía meteorológica (SPI) anual	113
Anexo 17. Frecuencia relativa de las severidades de la sequía hidrológica (SDI) anual	113

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una amenaza de naturaleza multiplicadora, ya que magnifica otras amenazas existentes y agrava los actuales desafíos económicos, ambientales y sociales, lo que dificulta el avance hacia las metas de los objetivos de desarrollo sostenible (ONU, 2019). Las comunidades dedicadas a la agricultura, la ganadería, la pesca y la silvicultura, que son responsables de la mayor parte del suministro global de alimentos, son las más impactadas por el cambio climático (FAO, 2016).

Es innegable que el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero causado por la actividad humana ha resultado en una mayor frecuencia y/o intensidad de eventos meteorológicos y climáticos extremos a nivel mundial desde 1850. Esto se refleja especialmente en las temperaturas extremas, los episodios de precipitaciones intensas, las sequías y los ciclones tropicales (IPCC, 2021). Estos eventos por sí solos no tienen el potencial de ser un desastre, sino cuando se combinan con las condiciones de vulnerabilidad de una población.

La sequía es un fenómeno climático generado por una reducción prolongada de la precipitación en una región, lo que resulta en la reducción de la humedad del suelo y la falta de agua disponible para diversos usos, como riego agrícola, abastecimiento de agua potable, generación de energía hidroeléctrica y otros fines industriales (Mishra y Singh, 2010).

Por su parte, Colombia es un país que al estar rodeado por los océanos Pacífico y Atlántico presenta un clima influenciado en gran medida por las temperaturas superficiales del mar y los fenómenos vinculados al acoplamiento atmósfera-océano a gran escala, tales como El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual está vinculado a peligros hidrometeorológicos como fuertes lluvias, inundaciones y sequías (OMM 2023). Aunque el país es conocido por la abundancia de sus recursos hídricos, la sequía es una amenaza que no debe subestimarse en su territorio, especialmente para las comunidades campesinas con prácticas de agricultura de secano, las cuales son altamente vulnerables a los efectos de los fenómenos de variabilidad climática (UNGRD et al., 2018).

En este estudio, se llevó a cabo una evaluación espaciotemporal de la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía, ubicada en la región suroccidental de Colombia, que abarca una fracción de los departamentos de Cauca y Nariño. Esta área se distingue por su vocación agropecuaria, lo que la hace especialmente vulnerable a las variaciones climáticas y a los efectos del cambio climático. Para llevar a cabo la evaluación de la sequía, se realizó un análisis de la variabilidad espaciotemporal de la precipitación mensual y el caudal medio mensual en la cuenca. Posteriormente, se examinó el comportamiento de los eventos de sequía hidrometeorológica en términos espaciales y temporales, y se estudió su relación con el fenómeno ENOS. En última instancia, se logró identificar el grado de susceptibilidad a las sequías hidrometeorológicas en la zona estudiada.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La **sequía** es un evento natural subrepticio con desarrollo lento, constante y de gran alcance espacial con el que la humanidad siempre ha convivido (OMM, 2006). Sin embargo, el crecimiento demográfico y el desarrollo de los sectores agrícola, industrial y energético han generado una gran presión sobre los recursos hídricos, lo cual, junto con el cambio climático y la contaminación de las fuentes de abastecimiento, han producido mayor escasez de agua en diversas regiones del mundo, incrementando la vulnerabilidad y el riesgo de sociedades, ecosistemas y economías frente a la amenaza de eventos de sequía, que se espera aumenten en frecuencia y severidad sobre extensas áreas globales (Mishra y Singh, 2010; Spinoni et al., 2020).

El **cambio climático**, potencializado por la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera y el consecuente calentamiento global, ha provocado alteraciones en los patrones de circulación atmosférica y en los eventos océano-atmosféricos, los cuales son los principales desencadenantes naturales de la sequía; incrementando así su frecuencia y severidad. La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), la Oscilación del Atlántico Norte (OAN), el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y las alteraciones en la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), son algunos ejemplos de los causantes de la reducción anómala de las precipitaciones en diferentes regiones del mundo (Lee y Zhang, 2011; Vicente-Serrano et al., 2011; Cai et al., 2012; Basara et al., 2013; Ortega Gaucin, 2013; Trenberth et al., 2014; Cai et al., 2015; De Oliveira-Júnior et al., 2018).

El déficit en la precipitación es el detonante de todo evento de sequía. Se conoce como **sequía meteorológica** a la reducción anómala de la precipitación en un lugar y período determinado. Dependiendo del tiempo en que perduren estas condiciones los efectos de la sequía pueden propagarse a través del ciclo hidrológico evolucionando hasta **sequía hidrológica**; que se ve reflejada en la reducción de caudales en las corrientes hídricas superficiales (Wilhite y Glantz, 1985; Spinoni et al., 2013).

De acuerdo con la OMM (2021a), entre 1970 y 2019 se han registrado 11.072 desastres naturales en el **mundo** que han costado la vida de 2,06 millones de personas y 3,6 billones de dólares en pérdidas económicas; de las anteriores cifras, 664 desastres (6 %) corresponden a sequías, las cuales han cobrado la vida de 702.076 personas (34 %) y han generado pérdidas por 252.000 millones de dólares (7 %).

África ha sido el continente más afectado por la sequía con 271 desastres registrados; en Etiopía, el evento registrado en 1983 cobró la vida de 300.000 personas, posicionándolo como el desastre natural más mortal del mundo en los últimos 50 años. En el caso de **Asia**, se tiene registro de 138 de estos desastres, de los que sobresale el de China en 1994, configurándose como la sequía más costosa del mundo con 23.720 millones de dólares en pérdidas económicas. Por otra parte, en **Europa** se han registrado 50 desastres de sequías y se proyecta que estos eventos aumenten su

duración e intensidad en la región. Respecto al **suroeste del Pacífico**, se han contabilizado 56 desastres de sequía, siendo Australia el país más afectado por ellos. En **América del Norte, América Central y el Caribe** se tiene registro de 79 desastres de sequías, entre los cuales sobresale el de Estados Unidos en 2012 con pérdidas por 21.790 millones de dólares. Finalmente, en **América del Sur**, de los 60 desastres de sequías registrados, ninguno ha cobrado vidas humanas; en cuanto a los más costosos, estos han sido los eventos de Brasil en 1978 y 2014 y Argentina en 2018, con pérdidas económicas por 9.020, 5.280 y 3.400 millones de dólares respectivamente ([Rohter, 1978](#); [Wolde-Georgis, 1997](#); [van Dijk et al., 2013](#); [AghaKouchak, 2014](#); [Otto et al., 2015](#); [Zhang et al., 2019](#); [Böhnisch et al., 2021](#); [Rivera et al., 2021](#); [OMM, 2021a](#)).

La sequía en **América del sur** ha tenido un impacto considerable en las rutas de navegación fluviales, en la generación de energía, en el rendimiento de los cultivos y en la producción de alimentos, incrementando la inseguridad alimentaria y energética en varios países del continente. La extensa sequía registrada entre 2019 y 2020, que afectó a Colombia, Venezuela, Brasil, Bolivia, Paraguay, Chile y Argentina, se posicionó como uno de los eventos más intensos de la región desde 2002, siendo superada solo por la sequía de 2015-2016 ([NASA, 2020](#); [Forero, 2021](#); [OMM, 2021b](#); [Souza Gomes et al., 2021](#)). Por su parte, la evaluación de la sequía en Colombia entre 2015 y 2016 reveló que, durante los 15 meses que duró el evento, 719 municipios de 28 departamentos fueron afectados, se declararon 367 calamidades públicas por desabastecimiento parcial y racionamiento de agua, y 188.650 hectáreas fueron consumidas por incendios forestales ([UNGRD, 2016](#)).

Aunque **Colombia** es uno de los países del mundo con mayor riqueza hídrica, no es incoherente estudiar la sequía en su territorio. El poseer abundantes recursos hídricos puede hacer que muchos subestimen aún más el peligro de esta amenaza, siendo un tema relevante más allá de las zonas desérticas del país. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), es la entidad encargada de realizar el seguimiento de los eventos de sequía en Colombia, en 2006 realizó la primera evaluación de la sequía meteorológica a nivel nacional entre 1971 y 2000 ([Mayorga Márquez y Hurtado, 2006](#)). Posteriormente, en 2012 se hizo una segunda evaluación, ampliando 10 años el período de estudio (1971-2010) e incluyendo el análisis de la sequía agrícola ([Hurtado, 2012](#)). La última actualización de las estadísticas de la sequía en el país se realizó en 2018, caracterizando espacio-temporalmente la sequía meteorológica y agrícola entre 1981 y 2015 ([Gómez Blanco y Cadena, 2018](#)); de este informe se destaca que las sequías de mayor alcance territorial que afectaron zonas densamente pobladas y áreas de vocación agrícola ocurrieron en 1985, 1988, 1991-1992, 1997-1998, 2001, 2009 y 2015-2016.

Por su parte, el evento de **1991-1992** es recordado por generar una crisis energética en el país de la que se derivó una difícil situación socioeconómica ([Farah, 1992](#)). Por otro lado, el evento de **1997-1998** afectó el rendimiento de los principales cultivos de exportación y de la producción lechera, provocó racionamientos de agua, disparó los casos de dengue hemorrágico e incrementó el número de incendios forestales ([CAF, 2000](#)). Por último, el evento de **2015 y 2016** afectó 1.190.000 hectáreas agrícolas, provocó la muerte de 40.100 animales por falta de alimento, desencadenó una epidemia de Chikunguña, Dengue y Zika, demandó más de 37 millones de dólares en importación de energía eléctrica desde Ecuador y le costó al país el 0,6% del PIB de 2015 ([Martín, 2016](#); [Alvis-Guzmán et al., 2017](#); [Cadena et al., 2018](#)).

Si bien estos estudios previos brindan información general a nivel de regiones en el país, es necesario complementar con investigaciones locales, tomando las cuencas hidrográficas como áreas de análisis, para disponer de información más específica que sea la base para la preparación y gestión del riesgo de la sequía en territorios específicos ([DAFP, 2012](#)).

La **cuenca del río Patía** es un área estratégica para los departamentos de Cauca y Nariño. El Patía es el único río que rompe transversalmente la cordillera Occidental para alcanzar el litoral Pacífico ([Díaz Merlano y Gregory Robertson, 2013](#)). Su complejidad orográfica y la variedad de ecosistemas permite que cuente con un capital natural valioso para el desarrollo socioeconómico de Caucanos y Nariñenses ([DNP, 2018a](#); [CORPONARIÑO, 2017a](#); [Gobernación del Cauca, 2020](#)).

La zona alta de la cuenca es compartida por ambos departamentos y se encuentra sobre la región Andina, mientras que las zonas media y baja se ubican completamente en el departamento de Nariño, sobre el piedemonte y la llanura de la región Pacífico. La mayoría de los municipios que conforman el **Alto Patía** se caracterizan por tener una prominente vocación agropecuaria, elevada ruralidad y alta incidencia de pobreza monetaria. Adicionalmente, se tiene identificado que la región es altamente afectada por procesos de desertificación y presenta una alta vulnerabilidad en cuanto a disponibilidad de agua, haciendo vulnerable a la población y a las economías incipientes de la región frente a esta amenaza ([MAVDT, 2005](#); [Parra et al., 2019](#); [DPS, 2021](#); [Gobernación del Cauca, 2020](#); [Gobernación de Nariño, 2020](#)).

Históricamente varios municipios que conforman el Alto Patía se han visto afectados por la sequía; en el departamento del Cauca los municipios más impactados han sido Balboa, Bolívar, Florencia, La Sierra, La Vega, Mercaderes y Patía. En cuanto a afectaciones en los municipios del departamento de Nariño, se tiene registro de Albán, Buesaco, Contadero, El Rosario, El Tablón de Gómez, El Tambo, La Cruz, La Unión, Leiva, Pasto, Policarpa, San Bernardo, San Lorenzo, San Pedro de Cartago y Taminango. Algunas de las consecuencias de la sequía en el Alto Patía han sido el incremento de los incendios forestales, déficits en la calidad y cantidad de agua para consumo humano, pérdidas de cultivos como la papa, maíz, plátano, yuca, caña panelera y pastos, reducción en la producción del sector agropecuario, inseguridad alimentaria, deterioro de la calidad de vida de los campesinos e incluso la migración de familias ante las condiciones

adversas desencadenadas (Calle et al., 2015; Gobernación de Nariño, 2016; Guevara et al., 2016; MADS, 2016; Arteaga y Burbano, 2018).

Lo anterior hace evidente la necesidad de gestionar integralmente el riesgo la sequía en el Alto Patía, para lo cual es imprescindible realizar inicialmente la evaluación de la amenaza en cuestión (UNGRD, 2017). Por lo tanto, la presente investigación pretende evaluar espacial y temporalmente la sequía meteorológica e hidrológica (hidrometeorológica) en la cuenca alta del río Patía. La evaluación de la sequía meteorológica en la región resultará de utilidad especialmente para el sector de la agricultura de secano, mientras que la evaluación de la sequía hidrológica puede ser de interés para el sector de agua y saneamiento, entre otros. Para ello se busca responder a las siguientes preguntas de investigación: **¿Cómo es el comportamiento de la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía? ¿Cuál es la influencia del fenómeno ENOS, y otros fenómenos macroclimáticos, en los eventos de sequía de la cuenca del río Patía? y ¿Cuáles son las zonas de la cuenca más susceptibles a la sequía?**

3. JUSTIFICACIÓN

La sequía se ha convertido en una barrera para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. La preocupación internacional frente al tema condujo a que en 2013 se realizara la Reunión de Alto Nivel de Políticas Nacionales Sobre la Sequía, cuyo objetivo fue proporcionar información práctica sobre acciones útiles basadas en la ciencia con el fin de abordar los problemas clave de la amenaza y establecer diversas estrategias para orientar a las naciones en la gestión del riesgo de la sequía ([Sivakumar et al., 2014](#)).

Por su parte, Colombia publicó en 2018 su estrategia nacional para la gestión integral de la sequía, expresando que para lograr una gestión integral de dicha amenaza en el país se requiere del fortalecimiento de la investigación e innovación en el tema, siendo la academia un actor clave en la generación de conocimiento sobre la prevención, mitigación y adaptación frente a los eventos de sequía ([UNGRD et al., 2018](#)).

Adicionalmente, de acuerdo con [Guevara et al. \(2016\)](#) y el [MADS \(2016\)](#), la sequía es una amenaza que se debe considerar dentro de la gestión del riesgo de desastres de origen hidrometeorológico en los departamentos del Cauca y Nariño. De modo que es importante que, dentro de la planeación del ordenamiento y manejo de las subzonas hidrográficas que componen la cuenca alta del río Patía se considere a la sequía como una amenaza relevante en la gestión del riesgo.

Ante la pertinencia de gestionar el riesgo de la sequía en el Alto Patía, y siendo la evaluación de la misma de primordial importancia para la planificación y gestión del recurso hídrico ([Mishra y Singh, 2010](#)), es pertinente el desarrollo de esta investigación; con la cual se pretende aportar a la generación de conocimiento sobre el riesgo de la sequía en el territorio, siendo de utilidad para la formulación de políticas y el ordenamiento tanto de la cuenca como de los municipios que la integran, reduciendo así las condiciones existentes del riesgo de esta amenaza.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar espaciotemporalmente la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía mediante índices estandarizados de precipitación y caudal.

4.2 Objetivos específicos

- Analizar la variabilidad espaciotemporal de la precipitación y el caudal en la cuenca alta del río Patía.
- Evaluar espaciotemporalmente eventos de sequía hidrometeorológica y su relación con el fenómeno El Niño Oscilación del Sur.
- Identificar zonas susceptibles a sequías hidrometeorológicas en la cuenca alta del río Patía.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Sistema climático

El sistema climático terrestre (Figura 1) y el equilibrio entre sus cinco componentes (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) determinan el clima y el desarrollo humano; factores internos y externos hacen que este sistema se mantenga en constante evolución. Por su parte, el **clima** es representado por las condiciones atmosféricas promedio de al menos 30 años de un lugar o región; dichas condiciones atmosféricas se describen mediante variables climatológicas como la precipitación, temperatura, humedad, etc. Las continuas fluctuaciones de las variables atmosféricas alrededor de sus promedios se conocen como **variabilidad climática**, siendo en gran parte el resultado de dinámicas entre los componentes del sistema climático, especialmente entre el océano y la atmósfera. Por otra parte, aunque existen factores naturales causantes de cambios a largo plazo en el clima, las actividades antrópicas han perturbado las interacciones entre todos los componentes del sistema, generando un **cambio global** que a su vez ha producido un acelerado **cambio climático** durante el último siglo, lo que ha traído consecuencias negativas para el desarrollo humano, como ha sido el incremento de eventos hidrometeorológicos extremos, entre ellos la sequía; poniendo en riesgo la sostenibilidad de sociedades en diferentes regiones del mundo (Duarte et al., 2006; Carvajal-Escobar y Mina Viveros, 2018; IPCC, 2018; Cabrera Silva, 2019)

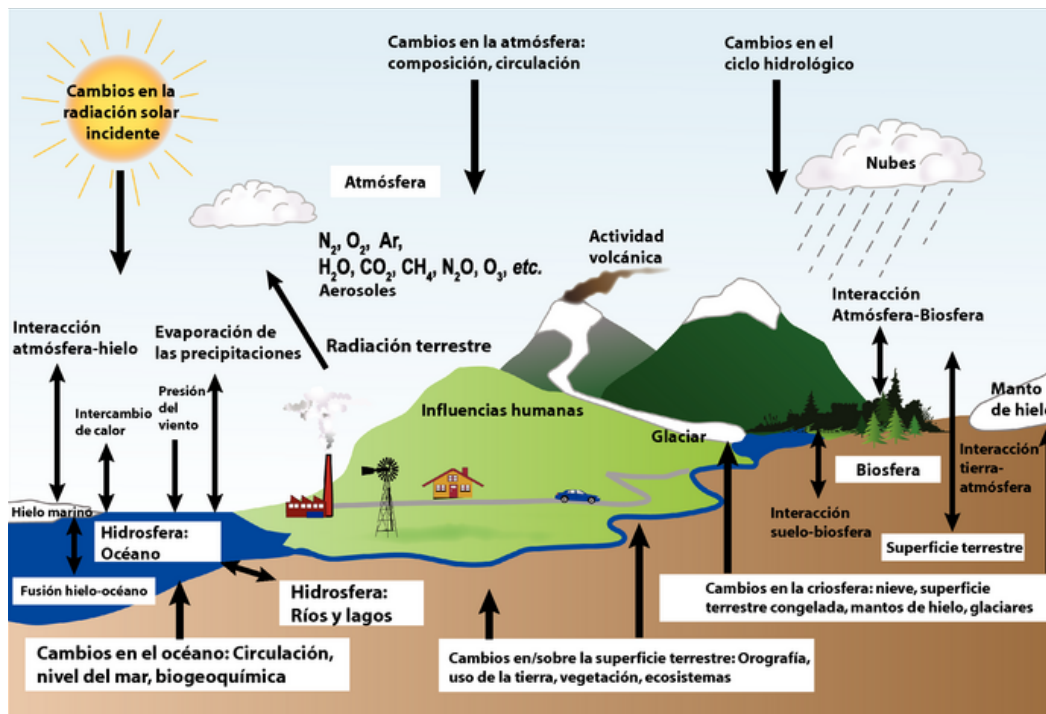


Figura 1. Componentes, procesos e interacciones del sistema climático

Fuente: Le Treut et al. (2007)

5.2 Variabilidad climática en Colombia

Un evento de variabilidad climática puede presentarse en diferentes períodos de tiempo (meses, años, decenios) de acuerdo con la frecuencia con que influyen las condiciones que lo provocan. La variabilidad climática en Colombia está condicionada por diferentes características físico-geográficas, tales como su localización en la zona tropical, la cercanía a los océanos Pacífico y Atlántico junto con el mar Caribe, el 42 % del territorio continental que conforma el bioma amazónico (Guio Rodríguez y Rojas Suárez, 2019) y su compleja orografía dada por la cordillera de los Andes y su ramificación a través del territorio en las cordilleras occidental, central y oriental (IDEAM y UNAL, 2018).

La interacción de las dinámicas océano-atmosféricas con las características físico-geográficas de Colombia le otorgan una compleja variabilidad climática en diferentes escalas temporales. A la **variabilidad intraestacional** le corresponden las desviaciones de las variables climatológicas entre 30 a 60 días durante el transcurso de las temporadas lluviosas y secas del país; lo que se atribuye al efecto natural de las ondas tropicales del este y de la oscilación Madden-Julian. Por su parte, la **variabilidad anual** manifiesta alteraciones en el clima a lo largo del año; los factores naturales asociados a esta escala temporal son la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los cambios en la corriente de chorro del Chocó y el desarrollo de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). En cuanto a la **variabilidad interanual** se observan variaciones de un año a otro en las variables climatológicas, lo cual se percibe en años más o menos lluviosos que otros; sobre esta escala influye la oscilación cuasi bienal de vientos ecuatoriales y principalmente el fenómeno ENOS con sus fases extremas de El Niño y La Niña. Por último, la **variabilidad interdecadal** son fluctuaciones en el clima a nivel de décadas, por lo que pasan desapercibidas ante la percepción de las personas; sobre estos eventos interviene la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Poveda, 2004; IDEAM y UNAL, 2018).

Dependiendo de las dinámicas océano-atmosféricas y su interacción con las características físico-geográficas de una determinada región de Colombia durante un momento específico, se presentarán eventos hidrometeorológicos extremos como la sequía, destacando que el fenómeno ENOS se tiene identificado como uno de los principales desencadenantes de sequías en el país (DNP, 2018b).

5.3 Sequía

La Sequía es un estado relativo, por lo que dar una definición precisa de este fenómeno es difícil debido a las complejas interrelaciones que tiene con el ambiente, la sociedad y la economía. Este término se asocia principalmente con un déficit en las precipitaciones que causa un grave desequilibrio hidrológico durante un período y lugar determinado (OMM, 2006; Mishra y Singh,

2010; IPCC, 2018), lo cual no implica necesariamente que todo déficit hídrico sea atribuido a una sequía o que se tengan períodos sin precipitación, especialmente en regiones muy lluviosas.

Por lo general se clasifica a la sequía en cuatro categorías para facilitar su estudio y comprensión (Wilhite y Glantz, 1985); inicialmente se presenta la **sequía meteorológica** cuando en una región se reduce anormalmente la precipitación respecto a su promedio histórico; posteriormente se establece la **sequía agrícola** al verse afectada la humedad del suelo de forma que los cultivos no pueden desarrollarse adecuadamente; una vez la sequía evoluciona hasta reducir el caudal de los arroyos y bajar los niveles de los cauces principales, se expresa la **sequía hidrológica**; y en caso que las condiciones de déficit permanezcan hasta afectar la oferta y demanda de bienes y servicios en la sociedad se evolucionará a una **sequía socioeconómica**. Adicionalmente, Mishra y Singh (2010), propusieron agregar la clasificación de **sequía subterránea**, la cual se establece cuando la recarga de los acuíferos se ha afectado lo suficiente para producir un descenso en su nivel y descarga. Estos diferentes tipos de sequía son manifestaciones progresivas de una misma sequía propagándose a través del ciclo hidrológico en función del tiempo (UNDRR, 2021).

Además de las **definiciones conceptuales** presentadas previamente, las cuales ayudan a entender el significado relativo de la sequía y sus efectos, también es posible dar una **definición operacional**, la cual describe los eventos de sequía en términos de variables como el inicio, la intensidad y la finalización, permitiendo así analizar su frecuencia, duración, severidad, entre otras variables (Wilhite y Glantz, 1985; Mayorga Márquez y Hurtado, 2006). Esta definición operacional se puede llevar a cabo mediante diferentes índices de sequía según la etapa en el ciclo hidrológico que se quiere analizar.

5.4 Información hidroclimatológica

La información hidroclimatológica es un insumo crucial para el seguimiento y evaluación de eventos de sequía. Una buena evaluación de la sequía hidrometeorológica requiere series de precipitación y caudal con un registro extenso (al menos 30 años), continuo y confiable. En Colombia, el IDEAM es la entidad encargada de operar la red nacional de **estaciones hidrometeorológicas**, siendo una de las principales fuentes de información para estudios hidroclimatológicos en el país (IDEAM, 2018). Sin embargo, la cobertura y distribución de estas estaciones, junto con la extensión y continuidad de sus registros, en ocasiones son limitantes para realizar un análisis adecuado y detallado de la sequía en la región en que se estudia.

Una alternativa a las estaciones meteorológicas que realizan observaciones *in situ* de la precipitación es la base de datos Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (**CHIRPS**), creada y administrada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la Universidad de California de Santa Bárbara (UCSB). Su cobertura espacial se limita a zonas terrestres en todas las longitudes y entre las latitudes 50° S y 50° N con una resolución de 0,05°.

Mientras que su cobertura temporal va desde 1981 hasta el presente con registros diarios de precipitación (Funk et al., 2015).

Esta alternativa de datos de precipitación ha sido analizada en Colombia por Urrea et al. (2016), quienes validaron el conjunto de datos CHIRPS a escala diaria, mensual y anual usando 904 series de precipitación de estaciones *in situ* del IDEAM distribuidas sobre el territorio nacional con un periodo común de registro entre 1981 y 2014, encontrando que CHIRPS conserva características importantes de la precipitación en Colombia como el promedio, la precipitación acumulada y la estacionalidad en las tres escalas temporales estudiadas, no obstante, identificaron que la variabilidad temporal de la precipitación se ve mejor representada a escala mensual que a escalas menores. Por su parte, Ocampo-Marulanda et al. (2022a), evaluaron espaciotemporalmente los datos CHIRPS en el departamento de Nariño empleando 46 series de precipitación mensual de estaciones *in situ* del IDEAM entre 1983 y 2019, encontrando que CHIRPS tiene mejor desempeño sobre la región Andina respecto a la región Pacífico, validando el uso de estos datos en estudios hidrometeorológicos de Nariño. Por último, se destaca que aunque el uso de CHIRPS haya sido validado en algún lugar, las observaciones *in situ* son necesarias.

5.5 Índices de sequía

Los índices de sequía son herramientas que se emplean para describir el estado de la sequía durante un periodo determinado, permitiendo evaluar la amenaza con el fin de adoptar medidas orientadas a mitigar los efectos de futuros eventos. Al igual que no hay una sola definición de sequía, no existe un único índice que pueda ser aplicado a todos los tipos de sequía, climas y sectores afectados, por lo que la selección de uno o más índices para realizar una evaluación debe considerar el contexto en que van a ser aplicados y el tipo de sequía a estudiar. Otro aspecto importante en la selección de uno o más índices de sequía es que los indicadores de sequía (precipitación, caudal, temperatura, etc.) requeridos para su estimación deben estar disponibles y ser confiables en el lugar en que se utilizarán, también es necesario que los índices sean sensibles espacial y temporalmente ante las manifestaciones de la sequía y que su interpretación y análisis sean claros (Zargar et al., 2011; OMM y GWP, 2016; UNDRR, 2021). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) junto con la Asociación Mundial del Agua (GWP) realizaron un compilado de indicadores e índices de sequía ampliamente utilizados en todo el mundo (OMM y GWP, 2016). Considerando el objetivo general de esta investigación a continuación se detalla sobre los índices estandarizados de precipitación y caudal fluvial, así como la justificación de su aplicación para evaluar la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía.

5.5.1 Índice estandarizado de precipitación

El índice estandarizado de precipitación o SPI por sus siglas en inglés (Standardized Precipitation Index) es uno de los índices de más usados en el mundo, siendo recomendado en la *Declaración de Lincoln sobre los índices de sequía* como índice universal para el seguimiento de la sequía

meteorológica (Hayes et al., 2011). Este índice fue desarrollado por McKee et al. (1993), siendo conocido por su facilidad de uso a diferentes escalas temporales permitiendo evaluar el suministro de agua a corto plazo (importante para la agricultura) y a largo plazo (relevante en la disponibilidad de agua en acuíferos, ríos, lagos y embalses). El resultado de este índice puede interpretarse estadísticamente como el número de desviaciones estándar por las que la precipitación normalmente distribuida se desvía de su media a largo plazo (Guenang y Kamga, 2014), valores negativos a partir de un umbral indican condiciones de sequía. El SPI se destaca por aportar mejores resultados que otros índices de sequía meteorológica, ya que permite definir operacionalmente un evento de sequía meteorológica empleando sólo datos de precipitación con un periodo de registro de al menos 30 años (OMM, 2012).

No obstante, una de las desventajas de este índice es que al tener como único dato de entrada la precipitación, deja de lado indicadores importantes como la variación de la temperatura, la cual influye en la evapotranspiración, siendo de importancia en el balance hídrico general y en la disponibilidad de agua en una región (Vicente-Serrano, 2010; Zargar et al., 2011). Sin embargo, Triana Madrid (2021), evaluó la sequía en el departamento de Nariño entre 1983 y 2019 mediante el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) a escala trimestral, semestral y anual, y lo correlacionó con el SPI obteniendo un coeficiente R^2 de 0,97 en promedio, infiriendo que la inclusión de la evapotranspiración no influye significativamente en la evaluación de la sequía en Nariño, por lo que no se justifica utilizar un índice de mayor complejidad que genera resultados aproximados a los obtenidos con el SPI.

5.5.2 índice estandarizado de caudal

El índice estandarizado de caudal, mejor conocido como índice de sequía de caudales fluviales o SDI en inglés (Streamflow Drought Index), permite evaluar la sequía hidrológica a partir de registros de caudales. Este índice fue desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2009), quienes se basaron en la metodología y cálculos del SPI propuestos por McKee et al. (1993), validando su aplicación en series de caudales empleando datos de la cuenca del río Evinos en Grecia entre 1970 y 2000. Las ventajas de este índice, al igual que su interpretación, son análogas al SPI, permitiendo definir operativamente la sequía hidrológica a diferentes escalas temporales requiriendo únicamente registros de caudales de mínimo 30 años (OMM y GWP, 2016; Malik et al., 2021).

5.6 Evaluación de la sequía

Los índices de sequía permiten evaluar un evento mediante la interpretación de las magnitudes que alcanza el índice elegido y sus variaciones en el tiempo (Yevjevich, 1967; Mishra y Singh, 2010). En la Tabla 1 se resumen las principales variables para evaluar eventos de sequía mediante índices como el SPI y SDI, indicando su descripción y la relevancia. Estas variables permiten

caracterizar eventos de sequía, proporcionando una visión general de los potenciales impactos de esta amenaza en sociedades, ecosistemas y economías. Se destaca la diferenciación entre el cese de la sequía y el fin; una vez se restablecen las condiciones meteorológicas normales se afirma que la sequía ha cesado, sin embargo, los impactos de la sequía pueden continuar manifestándose, siendo necesarios otros indicadores diferentes a los meteorológicos para indicar punto de finalización de un evento ([Vogt et al., 2018](#); [UNDRR, 2021](#)).

5.7 índices macroclimáticos y sequía

Debido a que los eventos de sequía surgen de cambios en las condiciones atmosféricas, y dado que las dinámicas atmosféricas están fuertemente relacionadas con las oceánicas, es importante identificar las teleconexiones entre variaciones océano-atmosféricas y los eventos de sequía en la región estudiada ([UNDRR, 2021](#)). Algunos de los índices macroclimáticos representativos de fenómenos océano-atmosféricos que más influyen en los eventos de sequía hidrometeorológica en Colombia son: índice del Niño Oceánico (ONI); índice de Oscilación del Sur (SOI); Índice Multivariado de ENOS (MEI); Índice del Niño Modoki (EMI); la temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2 (TSM-Niño1+2), región Niño 3 (TSM-Niño3), región Niño 4 (TSM-Niño4) y región Niño 3.4 (TSM-Niño3.4); Índice de Oscilación Cuasi Bienal (QBO); Oscilación del Atlántico Norte (NAO) e Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) ([Montealegre Bocanegra, 2009](#); [Córdoba-Machado et al., 2015](#); [Canchala et al., 2020a](#); [Canchala et al., 2020b](#); [Loaiza Cerón et al., 2020](#); [Ocampo-Marulanda et al., 2022b](#)).

Tabla 1. Principales variables para la caracterización de eventos de sequía

Variable	Descripción	Relevancia
Frecuencia	Número de eventos de sequía por intervalo definido.	Sequías frecuentes pueden ocasionar impactos a largo plazo en el ecosistema afectado.
Severidad (magnitud)	Se relaciona con el déficit hídrico. Calculado como la suma de las diferencias, en valores absolutos, entre los valores del indicador de sequía (DI) y el umbral utilizado para indicar la condición de sequía. $S_i = \sum DI_i < Umbral$	Déficit de agua en relación con el agua requerida para usos específicos, por ejemplo, riego, consumo doméstico, producción de energía, etc.
Intensidad	Severidad dividida por la duración del evento.	Indica el potencial de generar impactos.
Duración	Tiempo que dura el evento (días, semanas, meses).	Sequías más extensas tienen un mayor alcance de propagación a través del ciclo hidrológico con un mayor potencial de efectos secundarios y en cascada.
Inicio	Primer día, mes u otra unidad de tiempo en el que el índice está por debajo del umbral de sequía.	Importante si una sequía comienza en períodos sensibles con mayor demanda de agua como períodos de siembra y floración. Es clave para la gestión de sequías y la declaración de emergencias agropecuarias.
Cesación	Los indicadores meteorológicos han vuelto a niveles normales, la humedad del suelo comienza a restaurarse, el crecimiento de las plantas empieza a restablecerse, los embalses y lagos comienzan a llenarse.	Importante para la gestión.
Final	La productividad agrícola y de los ecosistemas naturales regresa a las condiciones promedio previas a la sequía, los niveles de lagos y embalses regresan a la normalidad. Las condiciones socioeconómicas se estabilizan en condiciones normales.	Importante para la gestión.
Mes pico	Mes con el valor más bajo del indicador de sequía.	Período con el impacto potencialmente más fuerte.
Área afectada	Área o porcentaje de una región con valores del indicador de sequía por debajo del umbral de sequía.	Cuanto más amplia sea el área, más bienes se ven afectados.

Fuente: [Vogt et al. \(2018\)](#)

6. METODOLOGÍA

6.1 Zona de estudio

La cuenca alta del río Patía se encuentra localizada sobre la cordillera de los Andes en el suroeste de Colombia (Figura 2). Su área corresponde al 54% de toda la cuenca del río Patía, teniendo una extensión aproximada de 13.047 km² distribuidos en el departamento del Cauca (41 %), el departamento de Nariño (56 %) y Ecuador (3 %). Posee una amplia variación altitudinal entre los 277 y 4.756 m.s.n.m. y la integran 4 de los 5 tributarios principales del río Patía, localizados en las subzonas hidrográficas de Guachicono, Mayo, Juanambú y Guáitara.

Se destaca que se tomó como punto de cierre de la cuenca a la estación hidrológica Los Nortes (código 52077020), la cual es operada por el IDEAM; esta estación se encuentra ubicada estratégicamente sobre el río Patía en las coordenadas (1,74°N, 77,53°W) registrando diariamente el caudal escurrido superficialmente en toda la zona de estudio (Velásquez-Restrepo y Poveda, 2019).

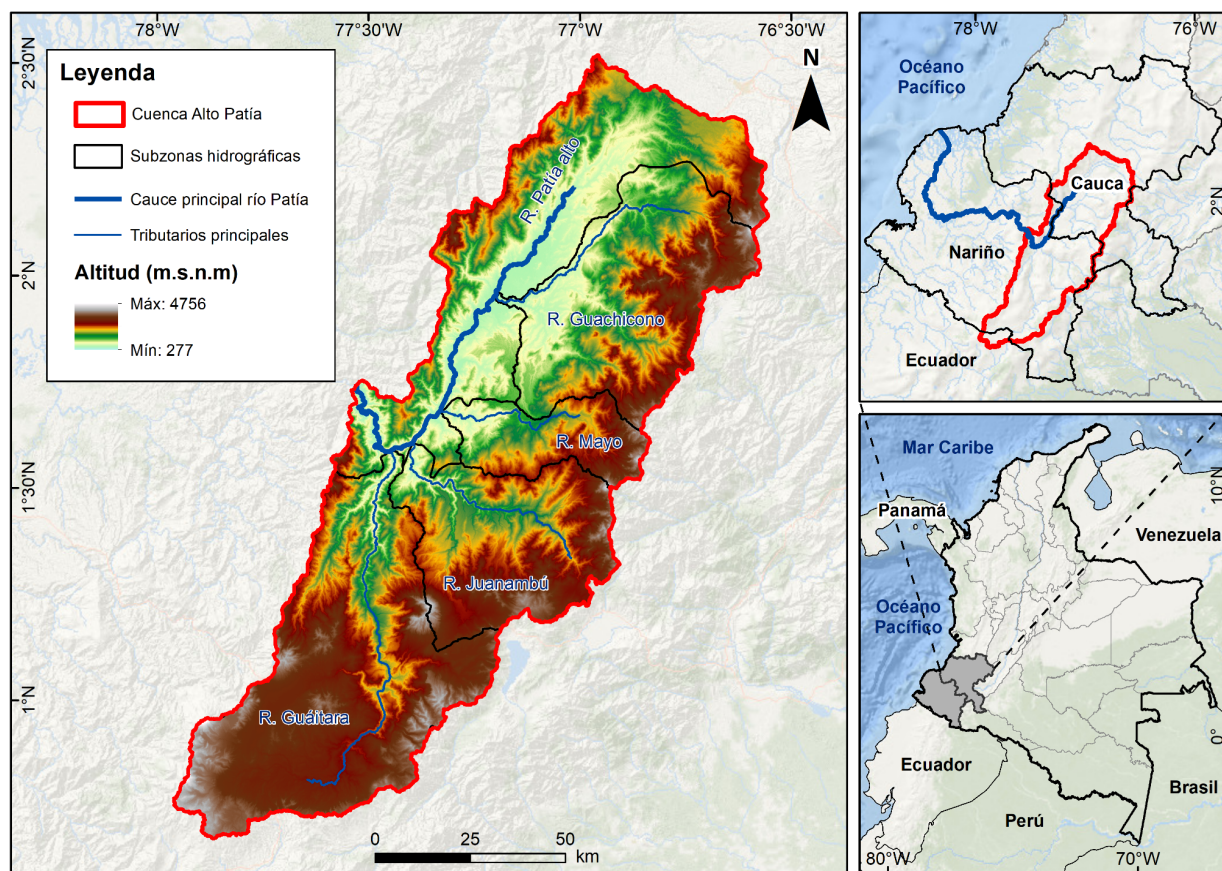


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

6.2 Datos

Para realizar la evaluación de la sequía se utilizó la siguiente información hidroclimatológica: **1)** series de precipitación mensual *in situ* y *ex situ*, **2)** series de caudal medio mensual, **3)** series mensuales de variables indicadoras del fenómeno ENOS y otros eventos macroclimáticos del océano Pacífico y Atlántico y **4)** series mensuales de los índices de sequía meteorológica e hidrológica a escalas semestral y anual.

6.2.1 Precipitación

Las series de datos de precipitación *in situ* fueron obtenidas de estaciones meteorológicas localizadas dentro de los límites de la cuenca y administradas por el IDEAM, estos datos se utilizaron principalmente para realizar los análisis temporales de la precipitación. Por otro lado, las series de precipitación *ex situ* fueron obtenidas del conjunto de datos CHIRPS, y se utilizaron principalmente para realizar los análisis espaciales aprovechando la distribución homogénea de los píxeles sobre la cuenca.

6.2.1.1 Datos de precipitación *in situ* - IDEAM

Se identificaron las estaciones meteorológicas localizadas dentro de los límites de la cuenca alta del río Patía y se evaluaron diferentes períodos de estudio considerando los siguientes criterios: **1)** Garantizar el periodo más extenso posible con al menos 30 años de registro. **2)** Perder la menor cantidad de estaciones posible. **3)** Mantener un porcentaje de datos faltantes inferior o igual a 20 % en cada serie. **4)** Mantener la menor cantidad de datos faltantes continuos en cada serie. **5)** Mantener una buena distribución espacial de las estaciones. Al final se determinó que el período 1973 a 2021 (49 años) fue el que mejor se ajustó a los criterios establecidos, conservando 35 estaciones meteorológicas (Figura 3). En el Anexo 1 se presentan los códigos, nombres, abreviaturas y coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas utilizadas.

6.2.1.2 Datos de precipitación *ex situ* - CHIRPS

Se descargaron del ClimateSERV (<https://climateserv.servirglobal.net/map>) las imágenes satelitales diarias de CHIRPS de manera que se cubriera toda la extensión de la cuenca alta del río Patía. Mediante ArcGIS se obtuvieron las coordenadas geográficas de los centroides de 423 píxeles CHIRPS (estaciones CHIRPS) localizados dentro de los límites de la cuenca (Figura 4). Posteriormente se le extrajo a cada imagen los valores diarios de precipitación de los 423 píxeles entre 1981 y 2021 (41 años). Finalmente, se acumularon los datos diarios para obtener las series de precipitación mensual requeridas. El procesamiento de los datos CHIRPS y la consolidación de esta base de datos se realizó aplicando un algoritmo desarrollado en Google Colaboratory por [Fernandez Alvarez \(2022\)](#).

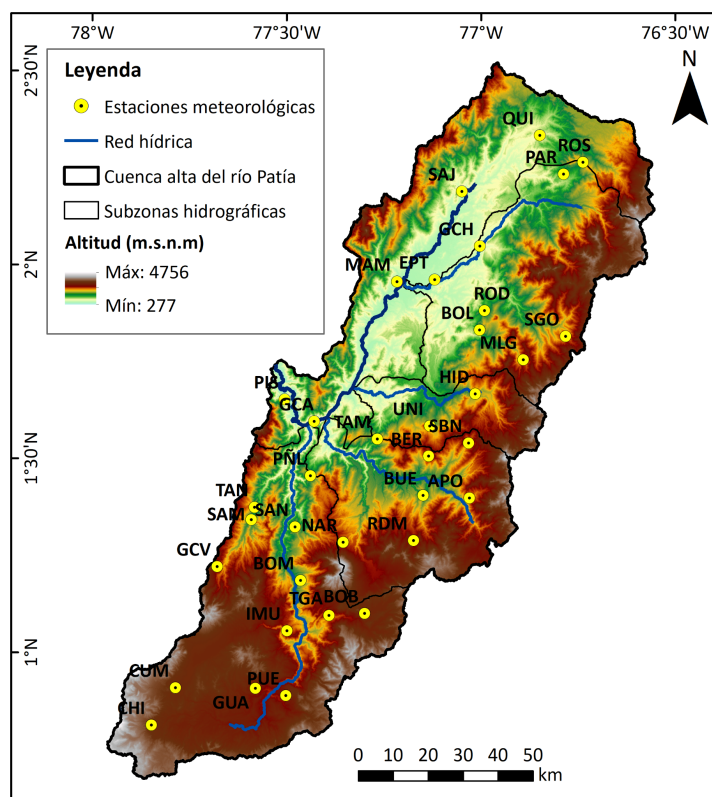


Figura 3. Ubicación estaciones meteorológicas

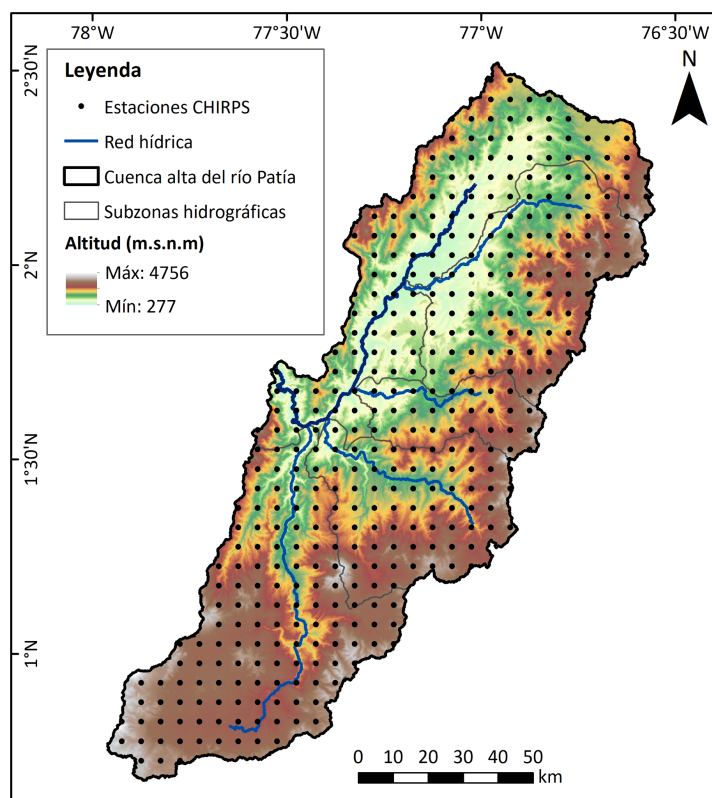


Figura 4. Ubicación estaciones CHIRPS

6.2.2 Caudal

Para obtener las series de caudal medio mensual se solicitaron al IDEAM los registros históricos de caudal de las estaciones hidrológicas identificadas dentro de los límites de la cuenca. Posteriormente se evaluaron diferentes períodos de estudio considerando los siguientes criterios: **1)** Conservar la estación Los Nortes debido a su ubicación estratégica como punto de cierre de la cuenca. **2)** Perder la menor cantidad posible de estaciones hidrológicas, haciendo énfasis en las estaciones ubicadas más aguas abajo en la unión de tributarios importantes. **3)** Garantizar el periodo más extenso posible con al menos 30 años de registro. **4)** Mantener un porcentaje de datos faltantes inferior o igual al 40 % en cada serie debido a que en situaciones con información escasa debemos trabajar con lo que se dispone. **5)** Mantener la menor cantidad de datos faltantes continuos en cada serie. Con lo anterior se determinó que el período de 1985 a 2018 (34 años) fue el que mejor se ajustaba a los criterios establecidos, quedando con 21 estaciones hidrológicas (Figura 5). En el Anexo 2 se presentan los códigos, nombres, abreviaturas y coordenadas geográficas de las estaciones hidrológicas utilizadas.

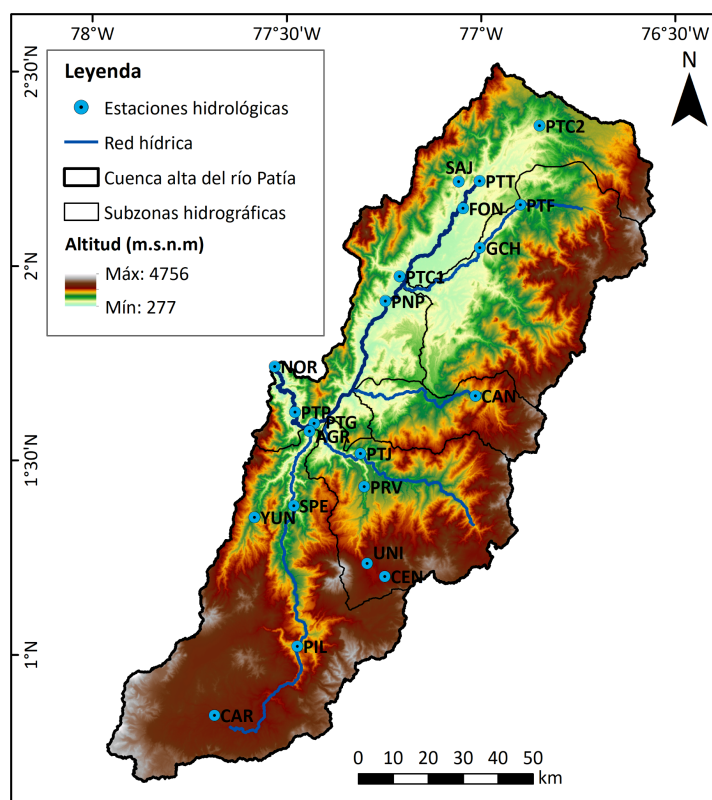


Figura 5. Ubicación de las estaciones hidrológicas

Para garantizar la coherencia en el procesamiento de los datos y la obtención de resultados, es necesario contar con un período común de registro en todas las series temporales. Con este fin, se decidió adoptar el período definido por las series de caudales (1985 a 2018), ya que este período se superpone tanto con los datos de precipitación *in situ* (1973-2021) como con los datos de precipitación *ex situ* (1981-2021).

6.2.3 Variables macroclimáticas

Se seleccionaron 12 variables macroclimáticas para analizar las teleconexiones que existen entre los eventos de sequía y los fenómenos océano-atmosféricos en el océano Pacífico y Atlántico. 7 de estas variables están relacionadas directamente con el fenómeno ENOS, siendo de especial interés por su fuerte incidencia en el comportamiento de las precipitaciones en Colombia, por consiguiente en los eventos de sequía que se generan (Poveda, 2004; IDEAM y UNAL, 2018).

En la Tabla 2 se presenta una descripción de las variables macroclimáticas empleadas. La selección de estos indicadores se realizó considerando estudios nacionales e internacionales sobre teleconexiones con la precipitación, el caudal y la sequía meteorológica e hidrológica realizados por Canchala et al. (2020a), Canchala et al. (2020b), Ocampo-Marulanda et al. (2022b), Abdelkader y Yerdelen (2022). Las series mensuales de cada uno de estos indicadores se descargaron de la página web del Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>).

En las Figuras 6 se presentan las regiones a las que corresponde cada variable macroclimática empleada, de manera que se facilite el entendimiento del análisis sobre el efecto que tienen las variaciones oceánicas y atmosféricas ocurridas en esas regiones en específico sobre la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía. Las regiones de las que se compone el EMI se presentaron en la Figura 6B, aparte de las demás regiones indicadas en la Figura 6A, para evitar superposiciones de áreas que puedan resultar confusas.

Tabla 2. Variables macroclimáticas analizadas

VMC	Descripción	Tipo	Ubicación	Referencia
Niño 1+2	TSM en la región Niño 1+2: Anomalía de la TSM media en el extremo oriental del océano Pacífico tropical (0°–10°S , 90°W–80°W).	OC	Pacífico	Trenberth y Stepaniak (2001)
Niño 3	TSM en la región Niño 3: Anomalía de la TSM media en el océano Pacífico Tropical centro-oriental (5°N–5°S , 150°W–90°W).	OC	Pacífico	Trenberth y Stepaniak (2001)
Niño 4	TSM en la región Niño 4: Anomalía de la TSM media en el océano Pacífico tropical centro-occidental (5°N–5°S , 160°E–150°W).	OC	Pacífico	Trenberth y Stepaniak (2001)
Niño 3.4	TSM en la región Niño 3.4: Anomalía de la TSM media en el océano Pacífico Tropical Central (5°N–5°S , 170°W–120°W).	OC	Pacífico	Trenberth y Stepaniak (2001)
ONI	Índice del Niño Oceánico: Media móvil de 3 meses de las anomalías de la TSM media en la región Niño 3.4 basadas en un período de referencia de 30 años.	OC	Pacífico	Glantz y Ramirez (2020)
EMI	Índice del Niño Modoki: Anomalía de la TSM media sobre 3 regiones; “A” (10°S–10°N , 165°E–140°W), “B” (15°S–5°N , 110°W–70°W) y “C” (10°S–20°N , 125°E–145°E).	OC	Pacífico	Ashok et al. (2007)
SOI	Índice de Oscilación del Sur: Fluctuaciones a gran escala en la presión del aire a nivel del mar que ocurren entre Darwin en el norte de Australia y Tahití en la Polinesia Francesa, es decir entre el Pacífico tropical occidental y oriental.	AT	Pacífico	Ropelewski y Jones (1987)
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico: Anomalía mensuales de la TSM media en el océano Pacífico norte (20°N–70°N , 110°E–100°W).	OC	Pacífico	Trenberth y Fasullo (2013); Mantua y Hare (2002)
NTA	Índice del Atlántico Norte Tropical: Anomalía de la TSM media en el océano Atlántico norte tropical (5°N–20°N , 40°W–20°W).	OC	Atlántico	Enfield et al. (1999)
TSA	Índice del Atlántico Sur Tropical: Anomalía de la TSM media en el océano Atlántico sur tropical (0°–20°S , 10°E–30°W).	OC	Atlántico	Enfield et al. (1999)
AMO	Oscilación Multidecadal Atlántica: TSM promediada en el Atlántico Norte (0°–60°N , 0°–80°W) menos la TSM promediada en el Atlántico (60°S–60°N).	OC	Atlántico	Enfield et al. (2001)
CAR	Índice del Caribe: Anomalía de TSM media en el mar Caribe	OC	Mar Caribe	Penland y Matrosova (1998)

VMC: Variable Macroclimática; **TSM:** Temperatura Superficial del Mar; **OC:** Oceánica; **AT:** Atmosférica.

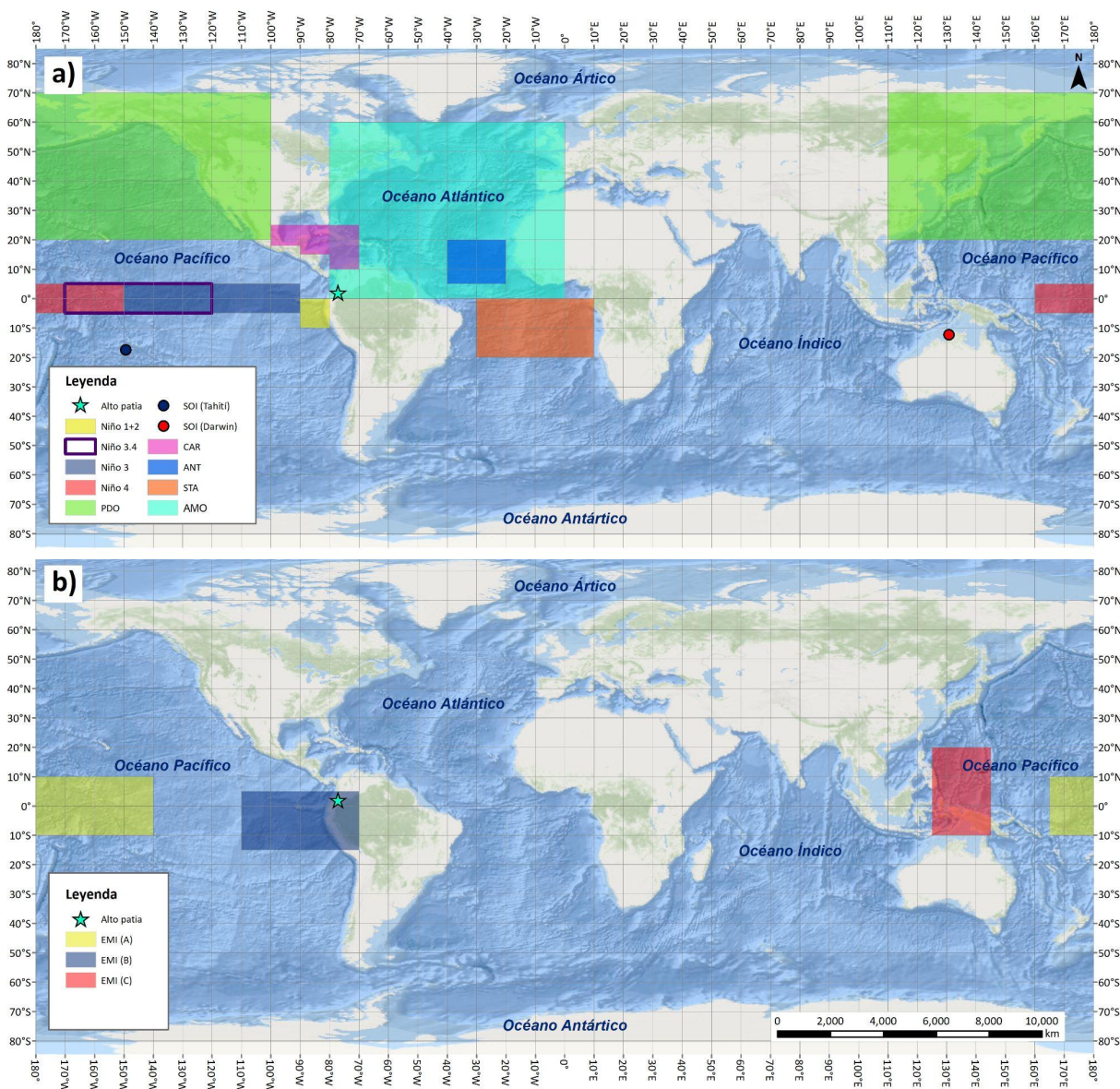


Figura 6. Regiones de indicadores macroclimáticos.

6.2.4 Índices de sequía

Se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI: Standardized Precipitation Index) y el Índice de Sequía de Caudales Fluviales (SDI: Streamflow Drought Index) para evaluar la sequía meteorológica e hidrológica, respectivamente. Se optó por analizar estas variables a escala semestral y anual, con el fin de comprender el comportamiento de ambos tipos de sequía a mediano y largo plazo. Siendo útil en la comprensión de los períodos de sequía, así como para la planificación del recurso hídrico, el monitoreo de eventos de sequía y otras aplicaciones de interés (Mishra y Singh, 2010). A continuación se detalla el procedimiento utilizado para calcular estos índices

6.2.4.1 Índice Estandarizado de Precipitación

Se utilizó el software "SPI_SL_6.exe", siguiendo las indicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012), para calcular el SPI en cada una de las 35 series de precipitación mensual. El software aplica un procedimiento de cálculo que implica acumular la precipitación mediante una suma móvil que es de 6 y 12 meses para las escalas semestral y anual, respectivamente. Luego, se ajusta cada serie acumulada a una función de distribución gamma y se estandariza a una distribución normal con una media de 0 y una varianza de 1. De esta manera, el SPI indica cuántas desviaciones estándar se aleja el valor de precipitación acumulada de la media (McKee et al., 1993).

6.2.4.2 Índice de Sequía de Caudales Fluviales

Para el cálculo del SDI utilizó el software "DrinC: Drought Indices Calculator" desarrollado por Tigkas et al. (2015). El método de cálculo se basa en el empleado para el SPI, con la diferencia de que para el SDI se utilizan series de caudal medio mensual como datos de entrada. Además, la función de distribución comúnmente empleada en este método es la Lognormal (Nalbantis y Tsakiris, 2009).

6.3 Esquema metodológico

En la Figura 7 se presenta el esquema metodológico que describe las macroactividades desarrolladas secuencialmente para cada objetivo específico. El propósito de este estudio fue realizar una evaluación espaciotemporal de la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía. Para lograr esto, se llevó a cabo un análisis espaciotemporal de la precipitación y el caudal (**objetivo 1**), seguido de una evaluación de los eventos de sequía hidrometeorológica que tuvieron lugar en la zona de estudio (**objetivo 2**). Por último, se identificaron las zonas susceptibles a eventos de sequía (**objetivo 3**). A continuación, se proporciona una descripción detallada de la metodología empleada para cada objetivo.

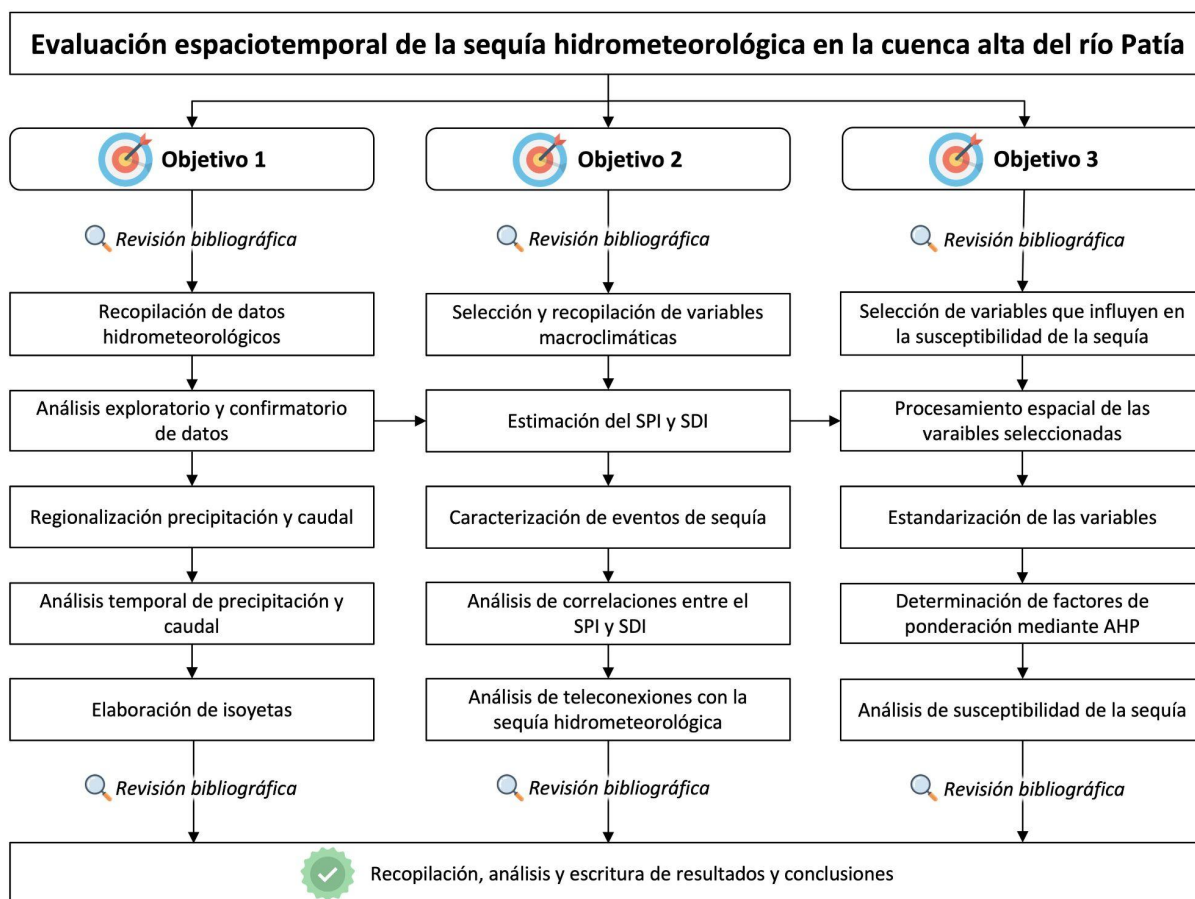


Figura 7. Esquema metodológico

6.3.1 Análisis espaciotemporal de la precipitación y el caudal

El abordaje de este objetivo se inició con la recopilación de los datos de precipitación y caudal, los cuales se describen detalladamente en los apartados 5.2.1 (*Precipitación*) y 5.2.2 (*Caudal*). Posteriormente, se llevó a cabo un análisis exploratorio y confirmatorio de las series hidrometeorológicas del IDEAM empleando Excel. Para ello se determinaron los valores máximos, mínimos, media, desviación estándar y coeficiente de variación de las series, y se elaboraron matrices de correlaciones de Pearson entre las series de precipitación y entre las series de caudales (Castro y Carvajal-Escobar, 2010).

Por su parte, los datos faltantes fueron completados aplicando análisis de componentes principales no lineales (ACPNL) con un enfoque de redes neuronales artificiales, siguiendo las pautas propuestas por Canchala et al. (2019) y aplicando un código en MatLab. En el caso de CHIRPS, se realizó una comparación punto-píxel mediante la cual se identificó con ArcGIS, en cada estación del IDEAM, el píxel de CHIRPS con el centroide más cercano. Esto permitió analizar el grado de correlación y realizar comparaciones entre ambas fuentes de precipitación. Con lo anterior, se consolidaron las bases de datos de precipitación mensual y caudal medio mensual, en preparación para su posterior procesamiento.

A continuación, se procedió a regionalizar la precipitación y el caudal utilizando el método de K-medias a través del software R ([Kassambara, 2017](#)). Este enfoque de regionalización se basa en un algoritmo no supervisado que agrupa objetos en "K" conjuntos según sus características ([MacQueen, 1967](#)). La elección de este método se fundamentó en los resultados obtenidos por [Ocampo Marulanda \(2022c\)](#) al regionalizar en el departamento de Nariño el índice de sequía SPI, el cual se basa en datos de precipitación mensual. Tras la evaluación de cuatro métricas (Índice de Silueta, Davies-Bouldin, Calinski-Harabasz e Índice CS) determinó que el método de K-medias ofreció los resultados más satisfactorios en comparación con otros cuatro métodos evaluados (Mapas Autoorganizados de Kohonen, Agrupamiento Difuso y Cluster Jerárquico Aglomerativo y Cluster Jerárquico Divisivo).

Al realizar la regionalización, el número de agrupaciones de cada conjunto de datos se asignó considerando la cantidad de autovalores mayores a 1 resultantes del análisis de componentes principales (ACP) realizado previamente mediante el software R, junto con la coherencia espacial de los resultados. La aplicación del ACP se evaluó con la prueba de Kaiser Meyer Olkin (KMO) ([Hair et al., 1995](#)).

Posteriormente, se realizó un análisis temporal de la precipitación y el caudal mediante la elaboración de gráficos del ciclo medio anual de cada serie de datos con el fin de identificar el tipo de régimen pluvial y fluvial que predomina en la cuenca. Además, se elaboraron los ciclos anuales promedio entre las respectivas agrupaciones de las estaciones de precipitación y caudal conformadas con la regionalización para identificar diferencias en su comportamiento.

Por último, se procedió a realizar un análisis espacial de la precipitación, se generaron isoyetas promedio anuales y mensuales utilizando ArcGIS. En este proceso, se aplicó la técnica de interpolación Cokriging, utilizando un modelo de semivariograma de tipo esférico y tomando la altitud como covariable, siguiendo las recomendaciones propuestas por [Cerón et al. \(2021\)](#).

6.3.2 Evaluación espaciotemporal de eventos de sequía hidrometeorológica

Para dar inicio a este objetivo, se llevó a cabo la selección y recopilación de los indicadores macroclimáticos, lo cual se detalla en el apartado 5.2.3 (*Variables macroclimáticas*). A continuación, se procedió a estimar las series temporales de los índices de sequía SPI y SDI a escala semestral y anual, cuyos procedimientos están descritos detalladamente en las secciones 5.2.4.1 (*Índice Estandarizado de Precipitación*) y 5.2.4.2 (*Índice de Sequía de Caudales Fluviales*), respectivamente.

Luego, se procedió a calcular una serie promedio para cada conjunto de datos, una a partir de las 35 series del SPI y otra con las 21 series del SDI. Además, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para ambos conjuntos de datos con el fin de comparar visualmente el comportamiento del principal modo de variabilidad con el de la serie promedio de cada respectivo índice. Este enfoque permitió identificar y caracterizar los eventos de sequía

meteorológica e hidrológica de manera general en toda la cuenca, a la vez que permitió evaluar si la serie promedio representaba de manera adecuada dichos eventos.

La caracterización de cada evento de sequía meteorológica e hidrológica se realizó teniendo en cuenta múltiples aspectos, tales como su severidad, intensidad, duración, inicio, cesación, final y el mes en el que alcanzaron su punto más crítico ([Vogt et al., 2018](#)). Además, se determinó la frecuencia de ocurrencia de ambos tipos de sequías, se estimó el porcentaje del área afectada durante el mes crítico de cada evento de sequía meteorológica, mientras que para los eventos de sequía hidrológica se calculó el porcentaje de estaciones afectadas. La descripción y relevancia de estas variables se encuentran detalladas en la Tabla 1.

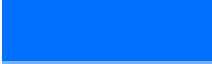
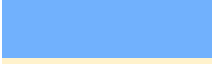
Se estableció que un evento de sequía meteorológica (hidrológica) comienza cuando el valor medio mensual de los 35 (21) registros del SPI (SDI), en una escala semestral o anual, se mantiene en valores negativos durante 3 meses consecutivos y alcanzan una magnitud mínima de 0,5. Por otro lado, la finalización de ambos tipos de eventos se determinó cuando el promedio mensual del índice respectivo se vuelve positivo.

Los eventos de sequía más destacados en cuanto a duración, severidad e intensidad se espacializaron en ArcGIS. Para los eventos de sequía meteorológica, se empleó la técnica de interpolación Cokriging. Dado que el SPI se calcula utilizando datos de precipitación, y existe una correlación entre esta variable y la altitud, se asumió que el SPI y la altitud comparten dicha correlación. Por lo tanto, en el proceso de interpolación se aplicó un modelo de semivariograma esférico y se utilizó la altitud como covariable, siguiendo las indicaciones de [Cerón et al. \(2021\)](#).

En cuanto a los eventos de sequía hidrológica, se llevó a cabo una espacialización puntual debido a que, a diferencia del SPI, el SDI no puede ser interpolado espacialmente. Por lo tanto, en cada estación hidrológica se asignó una categoría de sequía según el valor del SDI. Además, se utilizó la gama de colores de la Tabla 3, asociada a las categorías tanto del SPI como del SDI, para la representación gráfica de los eventos de sequía hidrológica y meteorológica.

Adicionalmente, se realizó un análisis de correlaciones cruzadas entre la sequía meteorológica e hidrológica con el objetivo de determinar el intervalo de tiempo en el cual la sequía meteorológica incide más en la aparición de la sequía hidrológica. Para hacer este análisis, se empleó el software SPSS y se correlacionaron la serie de la primera componente principal del SPI con la primera componente principal del SDI con rezagos que variaron de 0 a 12 meses. Este proceso se llevó a cabo para los índices a escala semestral como anual.

Tabla 3. Clasificación del SPI y SDI

Rango del SPI y SDI	Categoría	Probabilidad (%)	Gama de colores
2,00 o más	Humedad extrema	2,3	
1,99 a 1,50	Humedad severa	4,4	
1,49 a 1,00	Humedad moderada	9,2	
0,99 a -0,99	Cerca de lo normal	68,2	
-1,00 a -1,49	Sequía moderada	9,2	
-1,50 a -1,99	Sequía severa	4,4	
-2,00 o menos	Sequía extrema	2,3	

Fuente: adaptado de [Lloyd y Saunders \(2002\)](#) y [Nalbantis y Tsakiris \(2009\)](#)

Por último, se llevó a cabo un análisis de teleconexiones entre la sequía meteorológica e hidrológica en la cuenca alta del río Patía y los fenómenos océano-atmosféricos ocurridos en los océanos Pacífico y Atlántico con el propósito de identificar el grado de correlación entre las variables explicativas (variables macroclimáticas) y las variables explicadas (índices de sequía) ([Montealegre Bocanegra, 2009](#); [Guevara Díaz, 2014](#)). Para esto, se calcularon correlaciones cruzadas con rezagos de 0 a 12 meses entre las series de las dos primeras componentes principales del SPI y el SDI a escala semestral y anual, y las series de las variables macroclimáticas indicadas en la sección 5.2.3 (*Variables macroclimáticas*). La interpretación de estos resultados se llevó a cabo mediante la creación de una matriz de correlaciones con una codificación de colores para identificar los fenómenos que ejercen mayor influencia en la sequía de la cuenca y determinar el período de mayor incidencia.

6.3.3 Identificación de zonas susceptibles a sequía

Para desarrollar este objetivo primero se seleccionaron las variables que influyen en la susceptibilidad a la sequía tomando como referencia la investigación realizada por [Loaiza Cerón \(2015\)](#). En total se seleccionaron siete variables las cuales fueron: **1)** Frecuencia relativa de la intensidad de la sequía meteorológica. **2)** Frecuencia relativa de la intensidad de la sequía hidrológica. **3)** Frecuencia relativa de la severidad de la sequía meteorológica. **4)** Frecuencia relativa de la severidad de la sequía hidrológica. **5)** Pendiente. **6)** Erosión. **7)** Aridez.

Posteriormente se obtuvo la información espacial de cada una de las anteriores variables al interior de la cuenca. Para la aridez se trabajó con la capa del índice de aridez de 2014 y para la erosión se utilizó la capa de la zonificación de la degradación de suelos por erosión, línea base 2010-2011. Ambos insumos se descargaron de la página web del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC): <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>. Por otro lado, la

pendiente se obtuvo mediante el Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) de la cuenca, descargado del sitio web: <https://climateserv.servirglobal.net/map>, y utilizando la herramienta *Slope* en ArcGIS se calculó la pendiente en términos de porcentaje.

La determinación de la frecuencia relativa de la intensidad y de la severidad de la sequía meteorológica e hidrológica se consiguió a partir del procesamiento en Excel de las series de SPI y SDI a escala semestral y anual. Por su parte, la frecuencia de la intensidad de la sequía se obtuvo identificando en cada estación meteorológica (CHIRPS) e hidrológica la cantidad de registros mensuales en los cuales el SPI (en el caso de las estaciones meteorológicas) y el SDI (en el caso de las estaciones hidrológicas) mostraron valores indicativos de sequía ($SPI \text{ o } SDI \leq -1$). A partir de esta recopilación de registros, se calculó el porcentaje correspondiente a tres niveles de intensidad: moderada ($-1,0 \leq SPI \text{ o } SDI < -1,5$), severa ($-1,5 \leq SPI \text{ o } SDI < -2,0$) y extrema ($SPI \text{ o } SDI \leq -2,0$). Posteriormente, se interpolaron las frecuencias relativas aplicando el método geoestadístico Cokriging. Para mejorar la precisión de las estimaciones se incluyó la altitud como covariable en este proceso. De esta manera se generaron mapas que ilustran las frecuencias relativas de las tres categorías de intensidad de la sequía meteorológica e hidrológica a escala semestral y anual. Se escogió el mapa de la categoría con mayor frecuencia para realizar el análisis de susceptibilidad.

En cuanto a la frecuencia relativa de la severidad, al igual que con la intensidad, fue determinada para las series de SPI y SDI en cada una de las 423 estaciones meteorológicas y 21 estaciones hidrológicas. Para esto, se calculó la severidad para cada evento de sequía, definiendo el inicio (final) de un evento cuando el SPI o SDI es inferior (superior) al umbral de -1. La severidad de cada evento corresponde a la acumulación del índice mientras se mantenga por debajo de las condiciones del umbral de sequía. Posteriormente, se cuantificó el número de eventos junto con su respectiva magnitud de severidad (S), y se determinó la frecuencia relativa siguiendo la categorización establecida por [Ángel Hernández \(2008\)](#): leve ($1 \leq S < 2$), poco fuerte ($2 \leq S < 3$), fuerte ($3 \leq S < 4$), muy fuerte ($4 \leq S < 5$), extremadamente fuerte ($S \geq 5$). Luego, se procedió a generar mapas de distribución espacial de la frecuencia de la severidad utilizando la misma técnica de interpolación empleada para los mapas de frecuencia de intensidad y se escogió el mapa de la categoría con mayor frecuencia para realizar el análisis de susceptibilidad.

Una vez obtenida la información espacial de cada una de las variables seleccionadas, se estandarizaron en una escala de 1 a 5 para asociar los valores de cada variable con los 5 niveles de susceptibilidad a la sequía (Tabla 4). Para esto se utilizó como referencia las agrupaciones realizadas por [Loaiza Cerón \(2015\)](#).

Posteriormente se aplicó el proceso de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) propuesto por [Saaty \(1990\)](#) para determinar las ponderaciones de cada una de las variables y así realizar el álgebra de mapas en ArcGIS con las 7 capas en formato raster aplicando la herramienta

Raster Calculator. De esta manera se obtuvo el mapa de susceptibilidad a la sequía a escala semestral y anual.

Tabla 4. Clasificación de la susceptibilidad

Escala de evaluación	Nivel de susceptibilidad	Gama de colores
1	Muy baja	
2	Baja	
3	Media	
4	Alta	
5	Muy alta	

Fuente: [Loaiza Cerón \(2015\)](#)

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 Análisis espaciotemporal de la precipitación y el caudal

7.1.1 Análisis exploratorio y confirmatorio de los datos hidrometeorológicos

En la Tabla 5 se presenta la estadística descriptiva de las series de precipitación mensual de las 35 estaciones meteorológicas, mientras que la Tabla 6 muestra los estadísticos correspondientes a las 21 series de caudal medio mensual de las estaciones hidrológicas, abarcando el período comprendido entre 1985 y 2018.

En cuanto a las series de precipitación mensual, la mayoría de ellas presentaron un porcentaje de datos faltantes inferior al 3 %. No obstante, la estación SAJ se destacó por tener el mayor porcentaje de datos faltantes, alcanzando un 14 %. Entre las series, se destacan SBN, CUM, PUE, GUA y BOB en términos de registros mínimos. A diferencia del resto de las estaciones, que comparten un valor mínimo de 0 mm, estas presentan valores que oscilan entre 1 y 6 mm. Además, se resalta que cuatro de estas cinco estaciones se encuentran agrupadas en el sur de la cuenca, con altitudes entre 2.800 y 3.100 m.s.n.m., lo cual indica una frecuencia notable de precipitaciones en esa región.

Los valores promedio de estas series mensuales varían entre 40 y 200 mm, y los valores máximos oscilan entre 240 y 830 mm, lo que brinda una idea inicial de la cantidad de precipitación mensual que se puede esperar en la cuenca. Por último, se observa una alta dispersión de los valores de precipitación con respecto a su media, según se refleja en la desviación estándar (44-160 mm) y en el coeficiente de variación (54-93 %). Esto es común en la precipitación debido a su naturaleza de variable aleatoria (Wilks, 2019).

En relación con las series de caudal medio mensual, ninguna de ellas presentó registros completos, variando el porcentaje de datos faltantes desde un 3 % hasta un 40 %. Además, se observó un amplio rango entre el que varían los valores mínimos (0,7-75 m³/s), promedios (1,5-360 m³/s) y máximos (8,0-1.420 m³/s), debido a que estas magnitudes están en función de las características morfológicas de cada una de las 5 subzonas hidrográficas que componen la cuenca y de la configuración espacial de las 21 estaciones. En general, las estaciones ubicadas a mayores altitudes presentan registros más bajos, mientras que las ubicadas a menores altitudes presentan registros más altos.

Por otro lado, a pesar de que el caudal es una variable aleatoria al igual que la precipitación, en términos generales, estas series muestran una menor variación de los datos con respecto a sus promedios, con coeficientes de variación entre el 40% y el 86%.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las series de precipitación mensual (1985-2018)

Estación meteorológica	Datos faltantes (%)	Mínimo (mm)	Promedio (mm)	Máximo (mm)	D.E. (mm)	C.V. (%)
APO	0,5	0	128	703	115	90
BER	3,7	0	145	625	112	77
BOB	1,5	6	90	282	51	57
BOL	0,5	0	142	665	109	77
BOM	2,2	0	86	276	61	72
BUE	1,2	0	104	545	92	88
CHI	2,5	0	92	355	62	68
CUM	0,2	2	75	313	48	65
EPT	2,5	0	103	499	87	84
GCA	0,2	0	48	248	44	93
GCH	0,5	0	172	700	140	81
GCV	0,7	0	136	418	92	67
GUA	2,5	6	79	460	54	68
HID	1,2	0	108	468	88	81
IMU	1,0	0	82	252	60	72
MAM	1,0	0	111	503	97	87
MLG	1,2	0	124	425	95	76
NAR	1,7	0	167	579	127	76
PAR	1,7	0	190	759	149	78
PIS	0,0	0	103	387	78	75
PÑL	0,0	0	90	330	65	72
PUE	0,5	5	86	275	46	54
QUI	7,6	0	175	792	135	77
RDM	1,0	0	110	430	88	80
ROD	0,5	0	130	623	107	82
ROS	1,7	0	198	827	160	81
SAJ	14	0	178	569	135	76
SAM	0,0	0	128	548	97	76
SAN	1,7	0	96	456	78	81
SBN	2,2	1	169	539	120	71
SGO	1,7	0	104	421	86	83
TAM	0,7	0	139	515	95	68
TAN	1,0	0	114	431	80	70
TGA	0,7	0	84	282	61	72
UNI	0,7	0	165	560	115	70

D.E.: Desviación Estándar; **C.V.:** Coeficiente de variación.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de las series de caudal medio mensual (1985-2018)

Estación hidrológica	Datos faltantes (%)	Mínimo (m ³ /s)	Promedio (m ³ /s)	Máximo (m ³ /s)	D. E (m ³ /s)	C. V. (%)
AGR	40	21	81	248	35	44
CAN	11	4,0	14	46	5	40
CAR	6	0,9	3	16	2	58
CEN	20	0,1	1,5	8	1	58
FON	20	4,1	61	313	49	80
GCH	27	5,5	33	114	21	62
NOR	35	71	363	1.418	226	62
PIL	25	1,1	33	99	14	42
PNP	30	10	140	641	108	77
PRV	29	1,4	9	30	5	54
PTC1	31	1,1	14	64	10	69
PTC2	36	0,3	11	44	8	76
PTF	34	3,6	21	84	13	58
PTG	40	41	217	877	142	65
PTJ	10	7,5	36	160	17	47
PTP	33	76	313	1.006	174	56
PTT	31	1,8	26	111	18	72
SAJ	32	0,1	12	75	10	84
SPE	4	3,9	55	190	24	44
UNI	3	0,8	3	10	2	47
YUN	4	0,5	7	32	5	74

D.E.: Desviación Estándar; **C.V.:** Coeficiente de variación.

Al realizar el completado de datos faltantes aplicando ACPNL con enfoque de redes neuronales se utilizó la arquitectura [35-34-35] para el conjunto de datos de precipitación y [21-20-21] para el conjunto de datos de caudal. La mejor reconstrucción del conjunto de datos de precipitación presentó una varianza explicada total del 87,9 % y un error cuadrático medio (RMSE) de $\pm 8,2$ mm. Mientras que para el conjunto de datos de caudal medio mensual se obtuvo una varianza explicada de 97,9 % y un RMSE de $\pm 1,7$ m³/s.

En relación con el rango de variación del conjunto completo de datos de precipitación mensual (0-830 mm) y caudal medio mensual (0,1-1.418 m³/s), los resultados del error cuadrático medio de la imputación de cada conjunto de datos indican que la reconstrucción de las series utilizando el método de ACPNL con redes neuronales es satisfactoria.

La Figura 8 muestra un ejemplo gráfico de la reconstrucción en la serie de precipitación mensual (Figura 8A) y en la serie de caudal medio mensual (Figura 8B) con las mayores cantidades de datos faltantes. Ambos gráficos demuestran que los datos estimados se ajustan de manera precisa a la

variación de los datos reales, lo que garantiza la calidad de los datos utilizados para el análisis de la sequía.

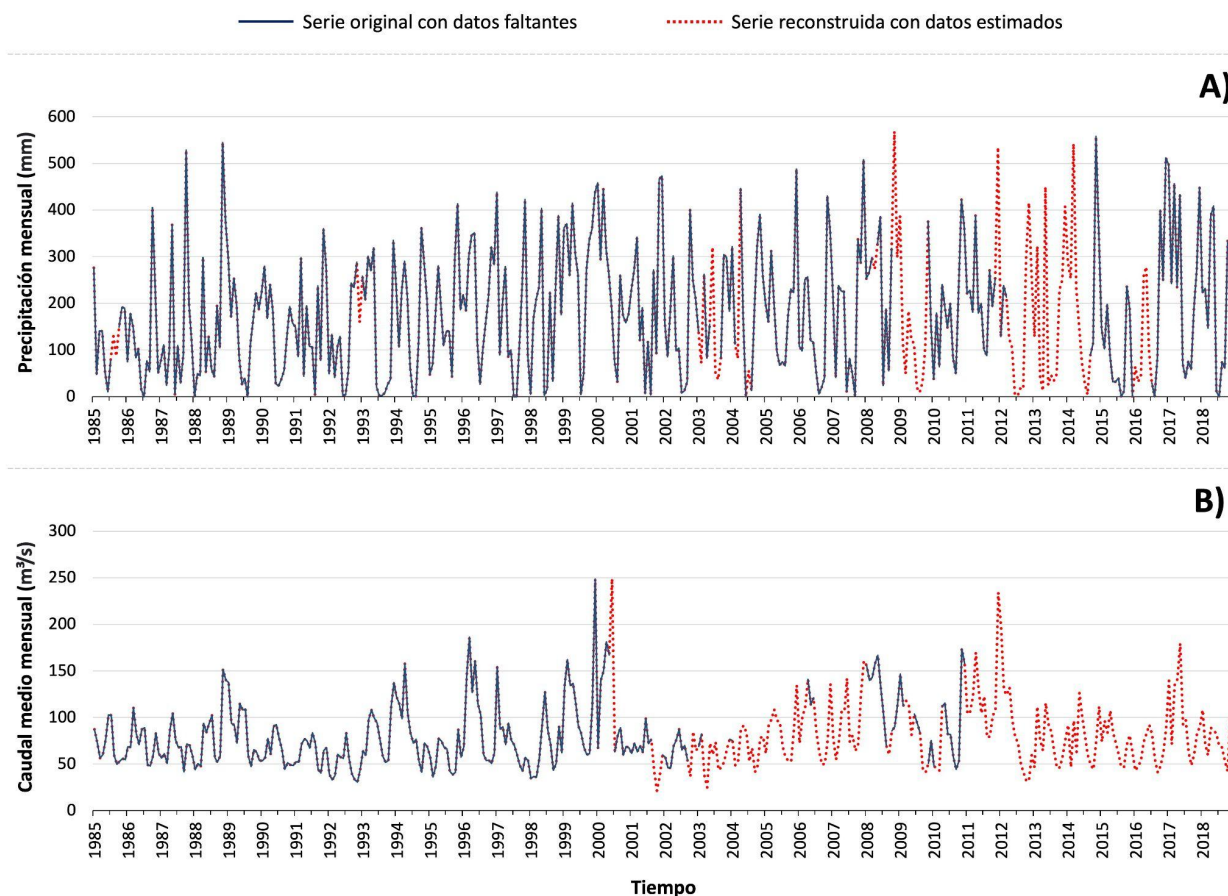


Figura 8. Estimación de datos faltantes. **A)** Serie de precipitación mensual de la estación SAJ. **B)** Serie de caudal medio mensual de la estación AGR.

Los resultados obtenidos a partir de las correlaciones entre las series de precipitación mensual (y caudal medio mensual) presentados en el Anexo 3 (Anexo 4) muestran correlaciones directas (directas) que varían en un rango de 0,37 a 0,91 (0,23 a 0,97). Estos resultados indican homogeneidad de los conjuntos de datos, pero al mismo tiempo revelan diferenciaciones entre algunas estaciones de precipitación (caudal), lo que sugiere la posibilidad de identificar agrupaciones entre las 35 estaciones de precipitación (21 estaciones de caudal) mediante regionalización.

En relación con las series de precipitación, se observó que las estaciones SAN, SAM, BOB, GUA, CHI, CUM y PUE presentan las correlaciones más bajas con las demás series. Destacando que estas estaciones están ubicadas al sur de la cuenca en la subzona hidrográfica Guáitara entre los 1.700 y 3.100 m.s.n.m.

Por otro lado, en cuanto a las series de caudal, se encontró que las estaciones FON, GCH, NOR, PTF, PTC2, PTT, SAJ, PNP, PTG y PTP presentan correlaciones más altas entre sí. Estas estaciones

comparten aspectos tales como su ubicación en las subzonas hidrográficas Guachicono y Patía Alto, a una altitud por debajo de los 1.000 m.s.n.m.

En la Figura 9 se presentan los resultados de las correlaciones de Pearson entre las series de precipitación mensual de las 35 estaciones in situ del IDEAM y sus respectivas estaciones homólogas ex situ de CHIRPS. Se observaron correlaciones altas que oscilan entre 0,84 y 0,88, lo cual indica que los registros de precipitación obtenidos mediante sensores remotos de CHIRPS son una buena aproximación a los registros de precipitación obtenidos con las estaciones in situ. Además, se identificó que las correlaciones aumentan hacia el norte y el este de la cuenca, mientras que disminuyen hacia el oeste y sobre todo hacia el sur.

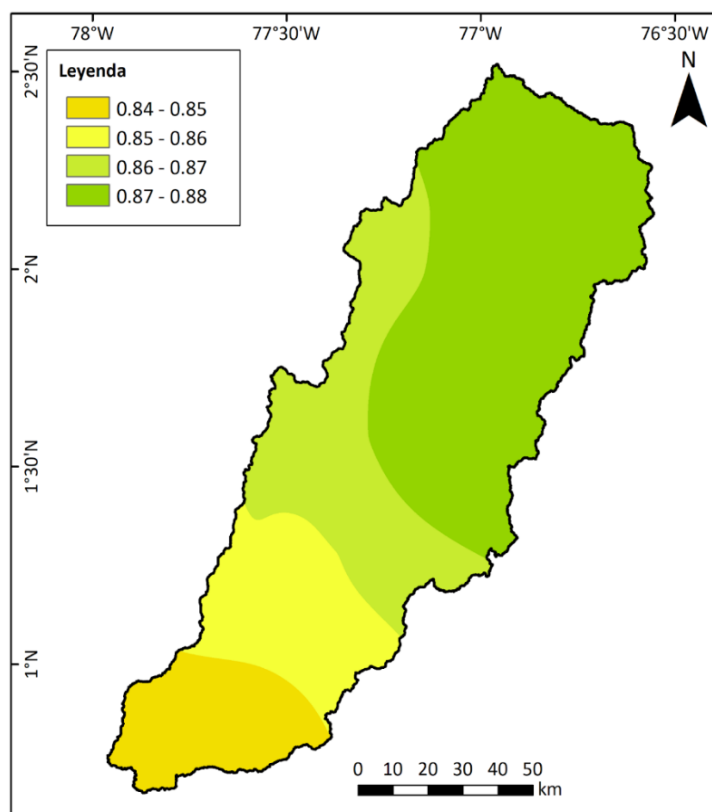


Figura 9. Correlación entre la precipitación mensual de las estaciones IDEAM y CHIRPS

7.1.2 Regionalización de precipitación y caudal

Los resultados de la prueba de Kaiser Meyer Olkin (KMO) fueron de 0,98 para el conjunto de datos de precipitación mensual del IDEAM y de 0,93 para el conjunto de datos de caudal medio mensual. Esto indica una excelente adecuación de ambos conjuntos de datos al análisis de componentes principales para extraer sus principales modos de variabilidad (Hair et al., 1995).

En la Tabla 7 se presentan los resultados de los conjuntos de datos de precipitación y caudal, enfatizando en los autovalores, la varianza explicada y la varianza acumulada de sus primeras 5 componentes.

Tabla 7. Resultados del ACP de los conjuntos de datos de precipitación y caudal

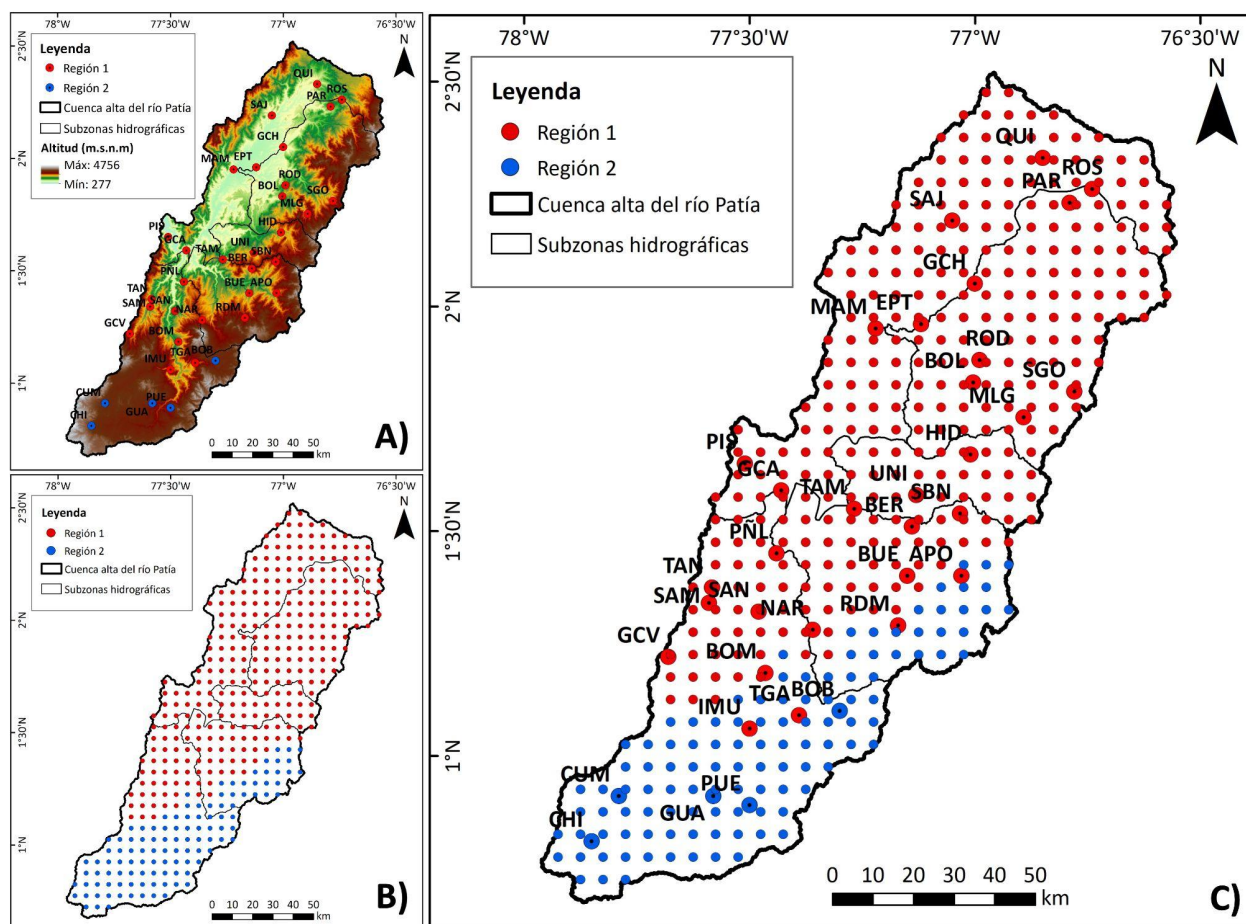
Conjunto de datos	Componente principal	Autovalores	Varianza explicada (%)	Varianza explicada acumulada (%)
Precipitación mensual (IDEAM)	1	25,3	72,2	72,2
	2	1,4	4,1	76,3
	3	1,1	3,2	79,5
	4	0,7	2,0	81,5
	5	0,6	1,8	83,3
Caudal medio mensual	1	15,7	71,4	71,4
	2	2,3	10,4	81,8
	3	0,7	3,2	84,9
	4	0,6	2,5	87,5
	5	0,4	1,9	89,3

En ambos conjuntos de datos, se observó que la primera componente contenía una varianza explicada mayor al 70 %, lo cual indica una reducción de la dimensionalidad de los datos con una representación de buena parte de la información más relevante sobre su variabilidad.

Los autovalores son un indicativo de qué parte de toda la variabilidad del conjunto de datos está siendo retenida en cada componente (Wilks, 2019). Se identificaron 3 componentes con autovalores mayores a 1 en el conjunto de datos de precipitación y 2 componentes en el conjunto de datos de caudales.

Utilizando esta información, se procedió a realizar la regionalización de la precipitación considerando 2 y 3 agrupaciones, mientras que para el caudal se utilizaron únicamente 2 agrupaciones. Tras analizar la coherencia espacial de los resultados obtenidos, se concluyó que el número óptimo de agrupaciones era de 2 tanto para la precipitación como para el caudal.

En la Figura 10 se presentan los resultados de la regionalización de la precipitación mensual utilizando las estaciones del IDEAM y las estaciones de CHIRPS. Al hacer la agrupación en 2 regiones se observa que se hace una diferenciación entre la precipitación del sur y sureste de la cuenca y la precipitación del resto del territorio.



Entre las estaciones del IDEAM (Figura 10A), se observa que las estaciones CHI, CUM, GUA, PUE y BOB, ubicadas al sur en la subzona hidrográfica Guáitara, se agrupan en una región separada (Región 2) de las otras 30 estaciones de precipitación (Región 1). Estos resultados corresponden con el análisis previo de la matriz de correlaciones, en el cual se evidenció que estas cinco estaciones comparten bajas correlaciones con el resto de las estaciones y que además presentan las magnitudes más bajas de precipitación mensual en la cuenca.

De manera similar, al revisar los resultados obtenidos con CHIRPS (Figura 10B), se observó una clasificación de 112 píxeles en una región distinta al sur y sureste de la cuenca (Región 2), separada de los otros 311 píxeles (Región 1). La distribución homogénea de los píxeles de CHIRPS permite inferir que la Región 1 abarca el 74% de la cuenca, mientras que la Región 2 abarca el 26% restante.

A diferencia de la región sur conformada con el conjunto de datos del IDEAM, la región conformada con el conjunto de datos de CHIRPS revela que esta no se limita únicamente a la

subzona del río Guáitara, sino que también abarca parte de la subzona del río Juanambú, donde no se disponen de estaciones in situ en ubicaciones estratégicas para realizar una comparación. No obstante, al superponer los resultados de la regionalización de ambos conjuntos de datos (Figura 10C), se observa una correspondencia en los límites de ambas regiones.

Los resultados obtenidos en este estudio contribuyen significativamente al conocimiento del comportamiento de la precipitación mensual en el territorio. A diferencia de otros estudios a nivel nacional y regional, esta investigación tiene un enfoque más específico al analizar específicamente el comportamiento de la precipitación dentro de la cuenca alta del río Patía.

Por ejemplo, [Guzman et al. \(2014\)](#) llevaron a cabo una regionalización de la precipitación a nivel nacional basada en su estacionalidad, lo que resultó en la creación de una macro región que agrupa subregiones correspondientes a las cuencas altas de los ríos Patía, Cauca y Magdalena debido a su comportamiento bimodal. Por su parte, [Canchala et al. \(2022\)](#) evaluaron diversas técnicas para regionalizar la precipitación mensual en el departamento de Nariño, lo que les permitió diferenciar la precipitación en 2 regiones del departamento, clasificadas como región Andina y región Pacífico. Asimismo, [Ocampo Marulanda \(2022c\)](#) también realizó una regionalización de la precipitación en el departamento de Nariño, identificando cuatro regiones más específicas denominadas Pacífico norte, Pacífico sur, Andes y Transiciones.

No obstante, ninguno de los estudios mencionados anteriormente obtuvo una agrupación de la precipitación al sur de la región Andina nariñense, como se presenta en esta investigación. Por lo tanto, los resultados de este estudio complementan la literatura científica existente, al proporcionar una comprensión más detallada y específica del comportamiento de la precipitación en la cuenca alta del río Patía, una zona geográfica de particular interés para el suroccidente colombiano.

En relación con la regionalización del caudal medio mensual, en la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos tras la clasificación de las 21 estaciones hidrológicas en dos regiones distintas. La región 1 está compuesta por 12 estaciones, ubicadas principalmente en las subzonas hidrográficas Guachicono y Alto Patía, y engloba a aquellas estaciones con magnitudes de caudal más elevadas, situadas mayormente por debajo de los 1.000 m.s.n.m. Por otro lado, las 9 estaciones restantes se agruparon en la región 2, abarcando las subzonas hidrográficas de Mayo, Juanambú y Guáitara. La mayoría de estas estaciones se encuentran por encima de los 1.000 m.s.n.m y presentan magnitudes de caudal más reducidas.

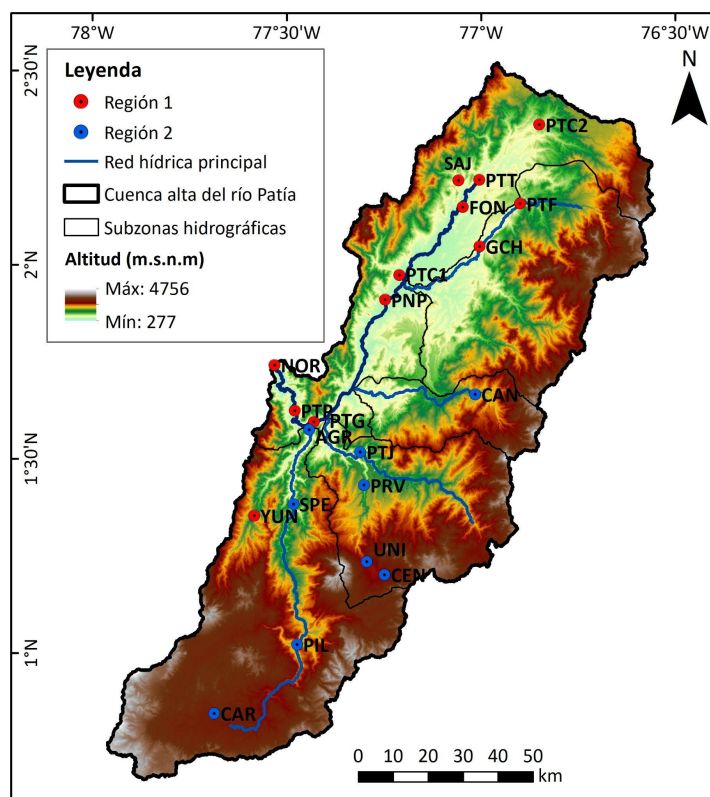


Figura 11. Regionalización del caudal medio mensual

7.1.3 Análisis temporal de precipitación y caudal

Con base en los resultados previos de la regionalización de la precipitación mensual y el caudal medio mensual, se elaboraron los ciclos anuales promedio de precipitación y caudal correspondientes a cada una de las regiones. En el Anexo 5 (Anexo 6) se presenta para cada una de las estaciones meteorológicas (hidrológicas) los ciclos anuales de precipitación mensual (caudal medio mensual).

La Figura 12 muestra los ciclos anuales de precipitación promedio para las dos regiones formadas utilizando las estaciones del IDEAM. Ambas regiones comparten un régimen bimodal de precipitación, aunque éste se ve más marcado en la región 2 que en la región 1.

El comportamiento de la precipitación mensual en la región 1 (Figura 12A) se caracteriza por una amplia variación a lo largo del año, generalmente con magnitudes superiores a las de la región 2. La principal temporada de lluvias en esta región abarca los meses de septiembre a noviembre, siendo noviembre el mes más lluvioso del año, con una precipitación de 235 mm en promedio. Por el contrario, la temporada más seca se observa claramente entre junio y agosto, siendo agosto el mes con menos lluvia en el año, con tan solo 27 mm en promedio.

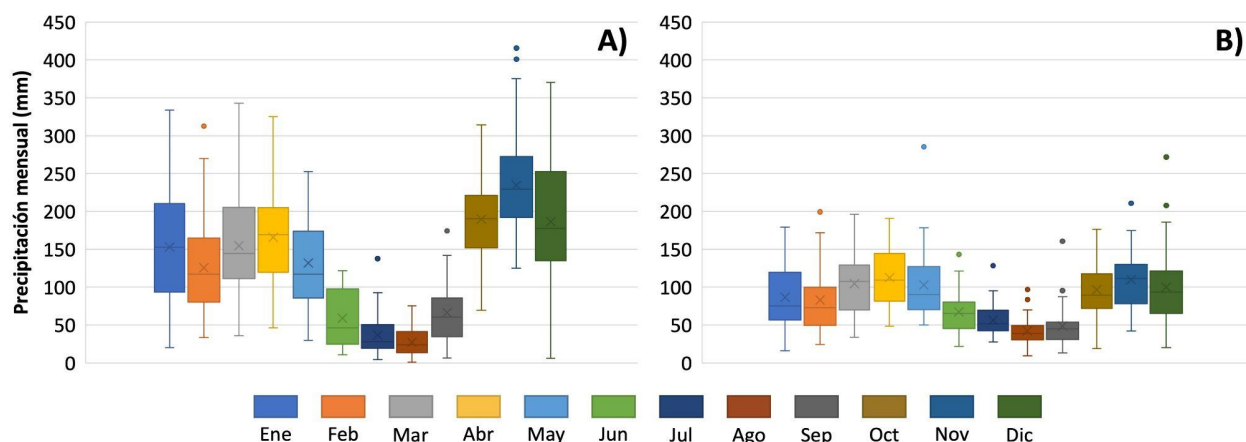


Figura 12. Ciclos anuales de precipitación mensual por regiones. **A)** Región 1. **B)** Región 2.

Por otro lado, el comportamiento de la precipitación mensual en la región 2 (Figura 12B) muestra una variación anual más limitada en comparación con la región 1, junto con magnitudes más bajas. En esta región, la diferencia entre las dos temporadas lluviosas es menos pronunciada que en la región 1. La temporada principal de lluvias abarca los meses de marzo a mayo, siendo abril el mes con mayor precipitación promedio en el año, con un valor de 113 mm, ligeramente superior al registrado en noviembre (111 mm). La temporada seca se extiende de junio a agosto, siendo agosto el mes con menor cantidad de lluvia registrada, alcanzando tan solo 43 mm. Es importante destacar que, durante esta temporada, la precipitación se mantiene por encima de cero en esta región y a pesar de ser menos lluviosa que la región 1, la región 2 recibe más lluvia durante la temporada seca.

Las estaciones lluviosas y secas observadas en ambas regiones coinciden con las definiciones de [Canchala et al. \(2022\)](#), quienes señalan que las estaciones lluviosas se extienden de marzo a mayo y de noviembre a septiembre, mientras que las estaciones secas abarcan de diciembre a febrero y de junio a agosto. La región 1, con su temporada lluviosa principal en el segundo semestre del año, presenta similitudes con la variabilidad de las precipitaciones en gran parte de la zona andina de Nariño y Cauca ([Canchala et al., 2020c](#); [Guzman et al., 2014](#)). Por otro lado, la región 2, con su temporada lluviosa principal en el primer semestre del año, guarda una mayor relación con las condiciones climáticas variables de la región andina norte del Ecuador, donde se ubica la provincia de Carchi ([UNESCO, 2010](#)).

En contraste, respecto al régimen estacional de las lluvias, [Urrea et al. \(2019\)](#), llevaron a cabo un estudio sobre la distribución espacial de la estacionalidad de la precipitación en todo el territorio colombiano. Al hacer un enfoque de sus resultados en la zona andina del suroccidente colombiano, donde se localiza la cuenca alta del río Patía, se observa que el extremo sur de la cuenca presenta un comportamiento bimodal de las lluvias, mientras que el resto del territorio tiene un comportamiento mixto. Estos resultados podrían explicar por qué las 2 temporadas

lluviosas y las 2 temporadas secas en el ciclo anual de la región 2 se aprecian mejor definidas, mientras que en la región 1 esta bimodalidad no es tan pronunciada.

Por último, se resalta que el régimen de lluvias en la región, al estar sobre la zona Andina y en la franja ecuatorial, está determinando en gran medida por la migración de la ZCIT, y la precipitación es principalmente de origen convectivo y orográfico (Poveda, 2004; Guzman et al., 2014; IDEAM y UNAL, 2018)

Con relación al comportamiento del caudal medio mensual, en la Figura 13 se muestran los ciclos anuales promedio correspondientes a las dos regiones. De manera similar a la precipitación, el caudal medio mensual en ambas regiones presenta un patrón bimodal, aunque este es más pronunciado en la región 2 (Figura 13B) en comparación con la región 1 (Figura 13A).

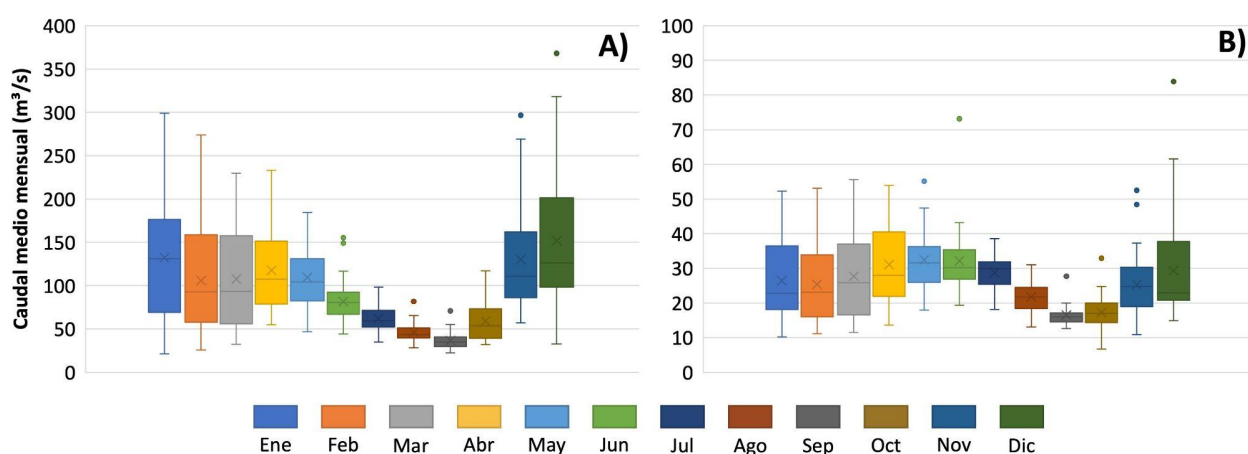


Figura 13. Ciclos anuales de caudal medio mensual por regiones. **A)** Región 1. **B)** Región 2.

El comportamiento promedio del caudal medio mensual en la región 1 se distingue por su mayor magnitud y rango de variabilidad en comparación con la región 2. En la región 1, el mes de diciembre registra el mayor escurrimiento superficial con un promedio de 152 m³/s, mientras que septiembre presenta el menor escurrimiento superficial con 37 m³/s. Por otro lado, en la región 2, el mayor escurrimiento ocurre en mayo con 33 m³/s, y septiembre continúa siendo el mes con menor escurrimiento, con un promedio de 16 m³/s en esta región.

Al contrastar los ciclos anuales de precipitación con los de caudal en la cuenca, se observa que no hay un efecto inmediato de las precipitaciones mensuales sobre los caudales medios mensuales. Por ejemplo, al comparar el mes con mayor (menor) precipitación en la región 1, que es noviembre (agosto), con el mes de mayor (menor) escurrimiento, que es diciembre (septiembre), se evidencia un rezago de 1 mes en el efecto de la precipitación sobre el caudal. Este patrón también se observa al comparar los picos máximos y mínimos en los ciclos anuales de precipitación y caudal en la región 2.

Con lo anterior, se puede inferir que la cuenca cumple una función de regulación de la escorrentía generada por las precipitaciones. Este proceso puede ser favorecido por las características morfométricas y fisiográficas de las cinco subzonas hidrográficas que conforman la cuenca, así como por la influencia de la cobertura y uso del suelo, la presencia de lagos y lagunas, y el ciclo bimodal de la precipitación caracterizado por 3 meses lluviosos seguidos de 3 meses secos.

7.1.4 Análisis espaciotemporal de la precipitación

En este estudio, se elaboraron isoyetas estacionales multianuales (Figura 14) e isoyetas mensuales multianuales (Anexo 7) con el propósito de complementar el análisis temporal previo. Proporcionando así una descripción detallada del comportamiento espaciotemporal de la precipitación en la cuenca.

Las isoyetas estacionales se elaboraron considerando los períodos lluviosos y secos: diciembre a febrero, marzo a mayo, junio a agosto y septiembre a noviembre. Estos períodos se definieron con base en el ciclo anual de precipitación.

Durante el trimestre más seco de la cuenca (Jun-Jul-Ago), se observan precipitaciones trimestrales promedio inferiores a 150 mm de sur a norte en la zona central de la cuenca, cubriendo parcialmente todas las subzonas hidrográficas. Alrededor de este núcleo de baja lluvia, las precipitaciones aumentan y oscilan entre 150 y 250 mm.

El trimestre más seco es antecedido por el trimestre más lluvioso (Sep-Oct-Nov). Las precipitaciones más altas, superiores a 650 mm, ocurren en el norte de la cuenca, principalmente en la subzona Alto Patía. Desde esa región, la cantidad de precipitación se reduce gradualmente hacia el sur, estando entre 250 y 350 mm trimestrales en la zona más meridional de la cuenca.

Posteriormente, en el trimestre (Dic-Ene-Feb), hay una leve reducción de la precipitación en el territorio. Hacia el sur, las precipitaciones oscilan entre 150 y 350 mm, mientras que en el centro los valores varían entre 350 y 550 mm. En el extremo norte, algunas áreas mantienen precipitaciones por encima de los 650 mm en el trimestre.

Finalmente, sigue el segundo trimestre más lluvioso de la cuenca (Mar-Abr-May). Durante esta época predominan las precipitaciones entre 350 y 550 mm en la mayor parte del territorio. Una pequeña área en el norte, en la subzona Alto Patía, mantiene precipitaciones por encima de los 650 mm, mientras que los niveles más bajos se presentan hacia el sur, en parte de las subzonas Guaitara y Juanambú, fluctuando entre 250 y 350 mm.

De lo descrito anteriormente, se deduce que la zona sur de la cuenca presenta la menor cantidad de lluvias, mientras que la zona norte es la más lluviosa. Además, al organizar las subzonas hidrográficas desde aquellas que reciben la menor precipitación durante el año hasta las que reciben la mayor, se obtiene el siguiente orden: Guaitara, Juanambú, Mayo, Guachicono y Patía Alto.

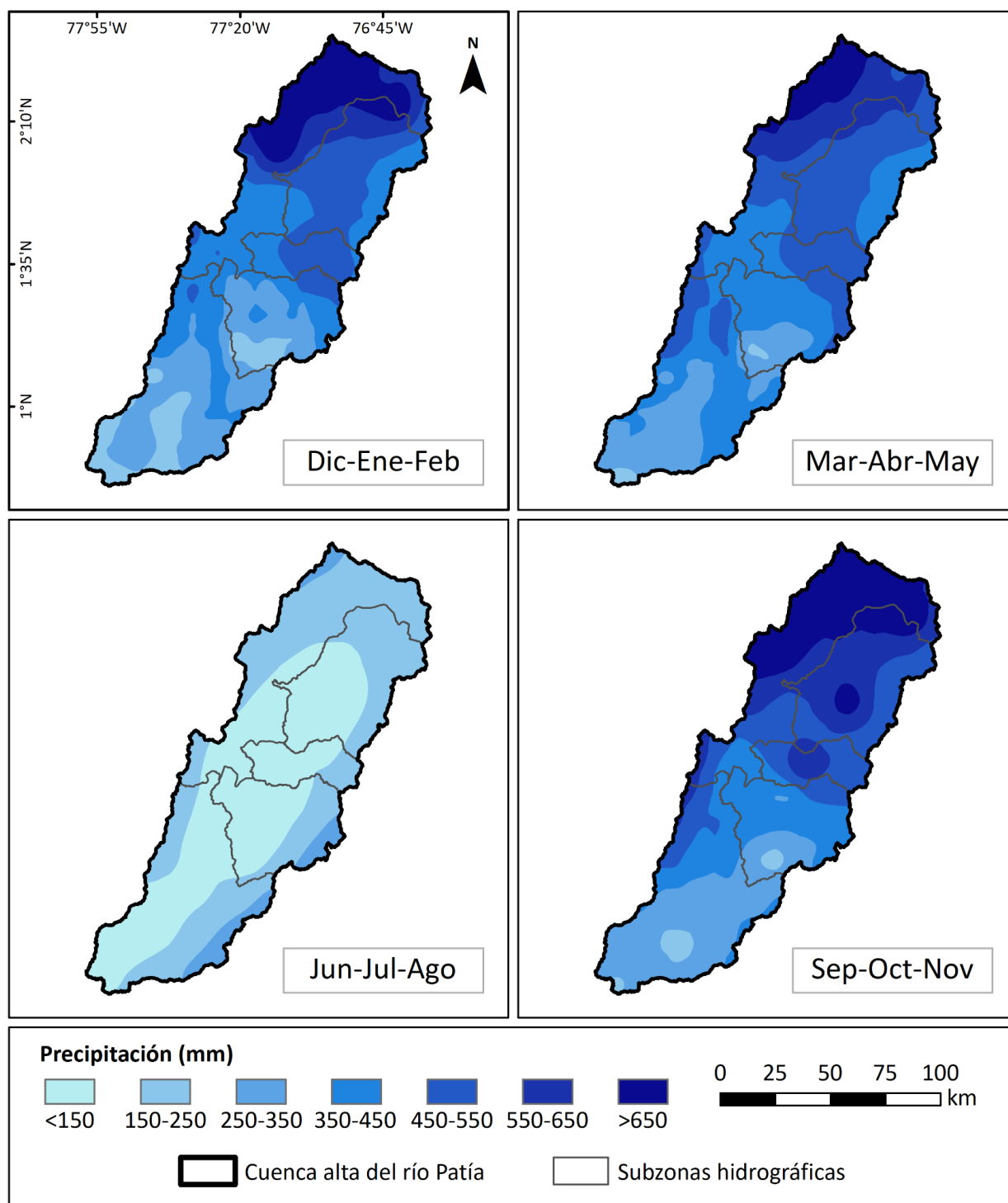


Figura 14. Isoyetas estacionales multianuales

7.2 Evaluación espaciotemporal de eventos de sequía hidrometeorológica

7.2.1 Caracterización de eventos de sequía

A continuación, se presenta la caracterización de eventos de sequía para la cual se realizó un análisis de componentes principales con el fin de identificar en la serie temporal los eventos de sequías. Posteriormente se caracterizaron los eventos identificados en términos de su fecha de inicio y fin, duración, severidad, intensidad y mes crítico. Posteriormente, se analizó su relación con las intensidades de las fases extremas del fenómeno ENOS y se describió el comportamiento espacio temporal de algunos de los eventos que más han impactado la cuenca.

7.2.1.1 Análisis de componentes principales

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las primeras tres componentes principales de los conjuntos de datos del SPI y SDI a escalas semestral (6) y anual (12). La varianza explicada de la primera componente fue superior al 60 % en los cuatro conjuntos de datos, siendo levemente mayor para el SDI respecto al SPI (Tabla 8). Además, se destaca que la varianza explicada aumenta conforme a la escala temporal, presentando los resultados más altos en la escala anual.

Tabla 8. Resultados del ACP de los conjuntos de datos de SPI y SDI semestral y anual

Conjunto de datos	Escala temporal	Componente principal	Autovalores	Varianza explicada (%)	Varianza explicada acumulada (%)
SPI	6	1	22,3	63,7	63,7
		2	1,7	4,7	68,4
		3	1,4	4,0	72,4
	12	1	23,7	67,6	67,6
		2	1,9	5,5	73,1
		3	1,4	4,1	77,2
SDI	6	1	15,1	68,7	68,7
		2	1,9	8,7	77,4
		3	0,9	4,3	81,6
	12	1	16,4	74,5	74,5
		2	1,6	7,4	81,9
		3	0,9	4,0	85,9

Por su parte, los autovalores mayores a 1 se limitaron a las dos primeras componentes para el SDI tanto semestral como anual, mientras que para el SPI el autovalor fue mayor a 1 hasta la cuarta componente principal en ambas escalas temporales. No obstante, el análisis de la sequía se realizó considerando hasta la segunda componente de cada conjunto de datos debido a que los aportes en la varianza explicada de la tercera y cuarta componente son inferiores al 5 %.

7.2.1.2 Identificación de eventos de sequía

En la Figura 15 (Figura 16) se realizó la identificación de eventos de sequía meteorológica (hidrológica). En ambas figuras el gráfico “A” corresponde al comportamiento del índice de sequía a escala semestral mientras que el gráfico “B” muestra el comportamiento del índice de sequía a escala anual, siendo el SPI (SDI) el índice empleado para la caracterización de la sequía meteorológica (sequía hidrológica).

En ambos gráficos se observa que el comportamiento de la primera componente principal, de los conjuntos de datos del SPI y SDI a escala semestral y anual, se ajusta bien al comportamiento de su respectiva serie promedio. Considerando los porcentajes de varianza explicada retenidos en la primera componente de cada uno de estos conjuntos de datos (Tabla 8), se deduce que las series promedios son representativas para realizar la identificación y caracterización de los eventos de sequía a nivel de la cuenca.

Estos resultados corresponden con los obtenidos por [Ocampo Marulanda \(2022c\)](#), quien identificó eventos de sequía a escala trimestral, semestral y anual en el departamento de Nariño mediante gráficos combinados entre la serie promedio del SPI y su respectiva primera componente principal no lineal, obteniendo un buen ajuste entre ambas series.

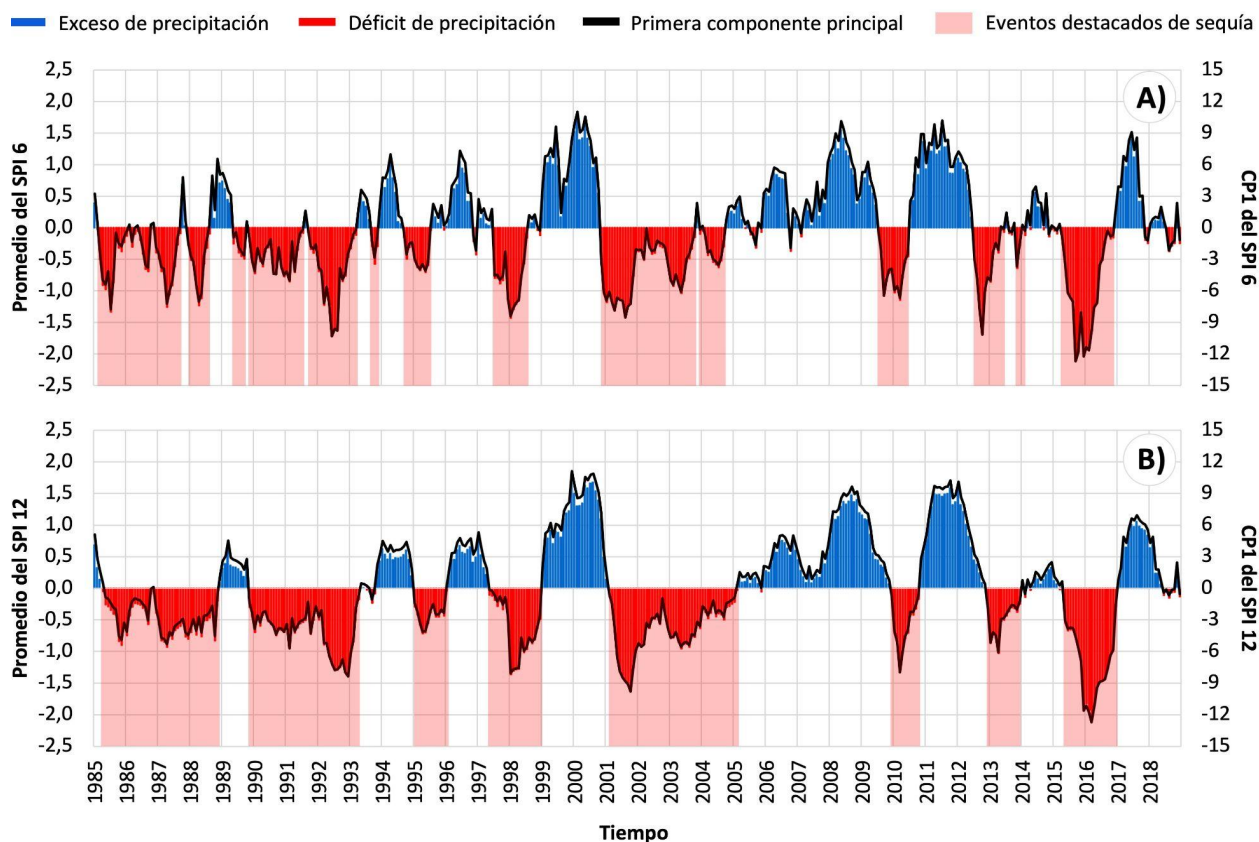


Figura 15. Identificación de eventos de sequía meteorológica. **A)** Escala semestral. **B)** Escala anual.

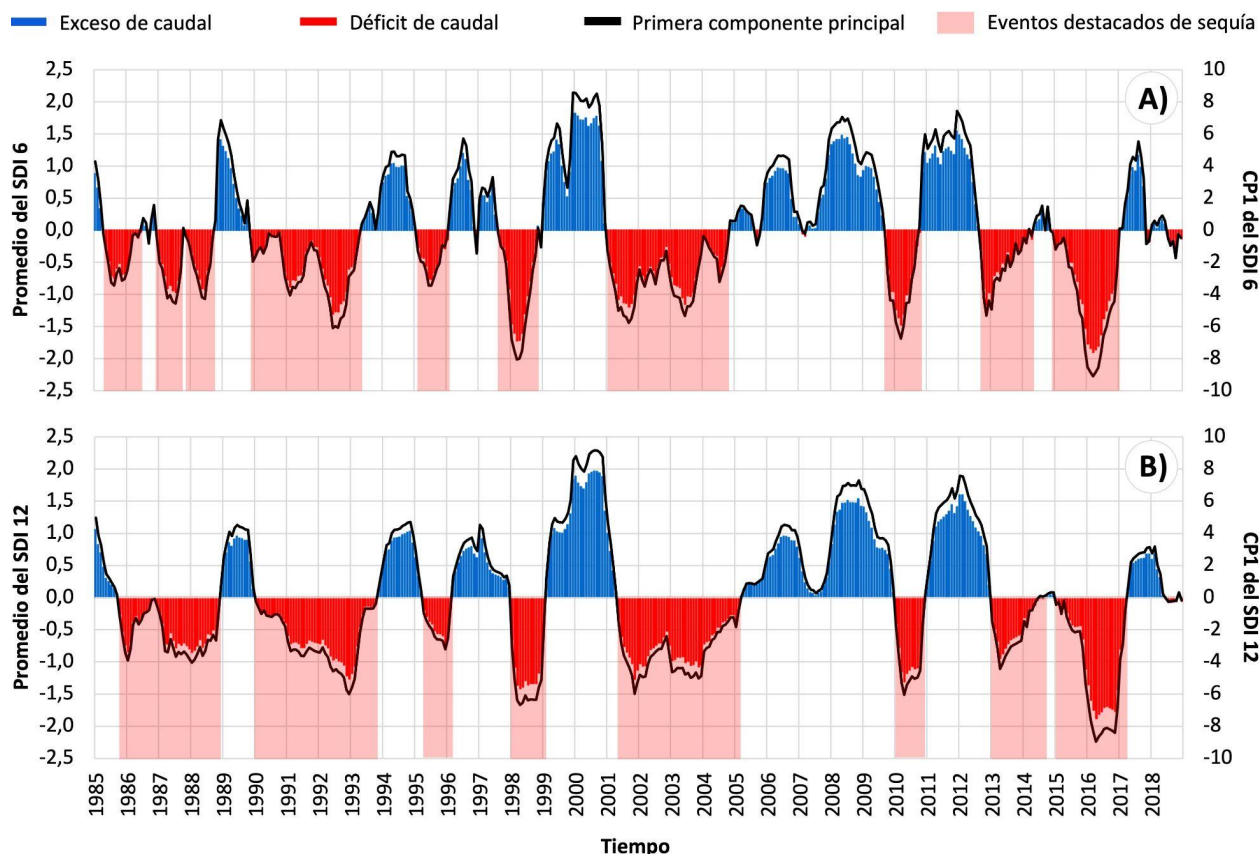


Figura 16. Identificación de eventos de sequía hidrológica. **A)** Escala semestral. **B)** Escala anual.

En términos de escala temporal, en ambos índices se observa una mayor variabilidad a escala semestral en comparación con la escala anual. Además, los eventos de sequía se hacen menos frecuentes al reducir su número, sin embargo, se incrementan en duración conforme aumenta la escala temporal. Estas observaciones coinciden con lo mencionado por [McKee et al. \(1993\)](#), quienes señalaron que a medida que se extiende la escala temporal, el SPI muestra una respuesta más lenta a los cambios en la precipitación. En el caso del SDI, se aplica el mismo principio, pero con relación a los caudales ([Gonzales-López y Carvajal-Escobar, 2020](#)).

Por otro lado, al comparar la variabilidad entre el SPI y el SDI, se observa que el SPI presenta una mayor variabilidad en comparación con el SDI. Esta diferencia podría atribuirse a la naturaleza intrínseca de las variables involucradas en el cálculo de cada índice, es decir, precipitación y caudal. La precipitación, al ser más susceptible a cambios climáticos y atmosféricos, tiende a ser más variable que el caudal. Además, el caudal no solo es influenciado por la precipitación, sino que también está sujeto a regulaciones por otros factores, como se mencionó previamente al final del apartado 6.1.3 (*Análisis temporal de precipitación y caudal*).

Entre 1985 y 2018 se identificaron 14 eventos de sequía meteorológica a escala semestral y 8 eventos a escala anual. Mientras que se identificaron 10 eventos de sequía hidrológica a escala semestral y 8 eventos a escala anual.

Al comparar los eventos de sequía meteorológica con los de sequía hidrológica en una misma escala temporal, se evidencia una correspondencia entre ambos tipos de eventos, como es de esperarse, ya que la sequía meteorológica y la hidrológica son estados de propagación a través del ciclo hidrológico de un mismo evento de sequía (UNDRR, 2021).

Esta relación es más evidente en la escala anual, donde a diferencia de la escala semestral, se identifica una cantidad equivalente de eventos de sequía meteorológica e hidrológica. Esto sugiere que a medida que las escalas temporales son mayores el número de eventos de sequía meteorológica e hidrológica converge.

Aunque en la escala semestral hay más eventos de sequía meteorológica que hidrológica, se observó que durante un evento de sequía hidrológica se pueden presentar eventos consecutivos de sequía meteorológica, en los que el retorno de las condiciones normales de precipitación entre el fin de un evento y el inicio del otro, no son suficientes para que retornen las condiciones normales en los caudales.

Por ejemplo, en la escala semestral, entre 1989 y 1993 se registró un evento de sequía hidrológica durante el cual se identificaron tres eventos consecutivos de sequía meteorológica. Los 2 meses en los que el SPI promedio fue positivo, si bien redujeron la magnitud del SDI, el efecto no fue suficiente para hacer que este índice adoptara también un valor positivo.

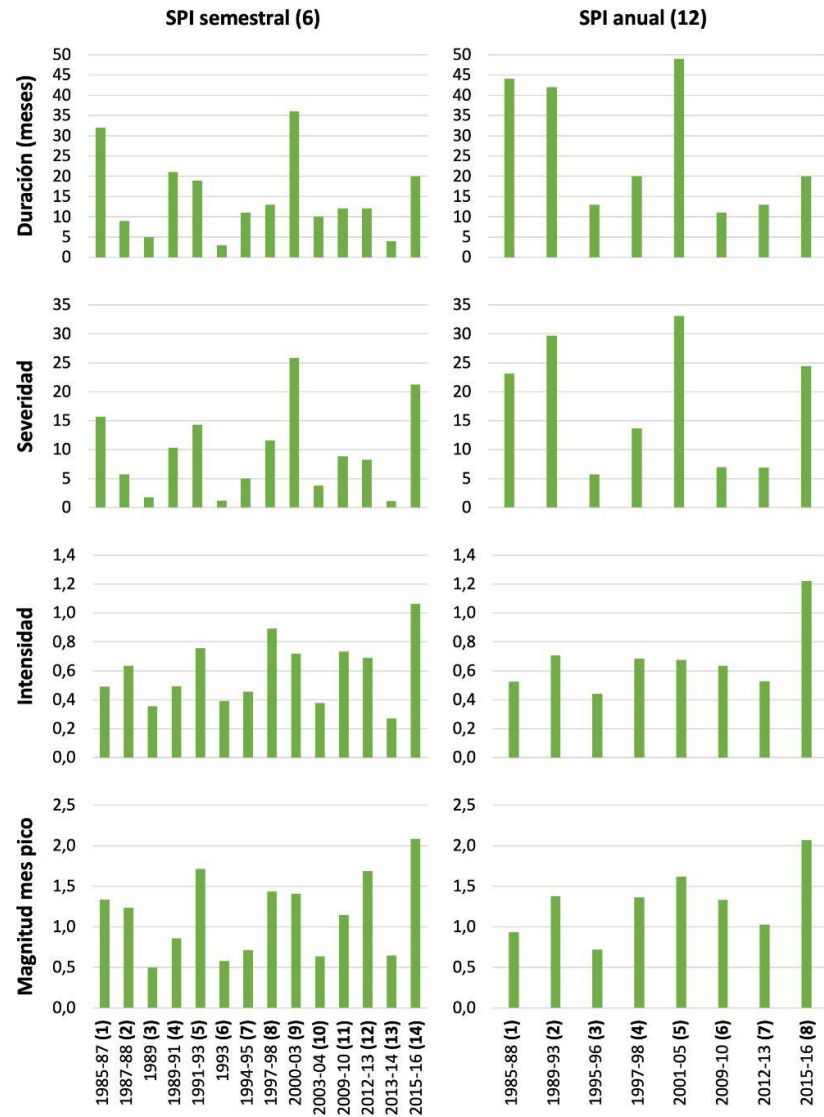
7.2.1.3 Caracterización de eventos de sequía

En la Figura 17 se presentan mediante gráficos de barras los resultados de la caracterización de los eventos semestrales y anuales de sequía meteorológica (Figura 17A) e hidrológica (Figura 17B) de acuerdo con su duración, severidad, intensidad y magnitud crítica. En el Anexo 8 y el Anexo 9 se presenta esta información con los valores tabulados indicando adicionalmente el inicio y fin de cada evento junto con el mes en que se presenta su magnitud crítica. Las barras de cada gráfico corresponden a cada uno de los eventos de sequía identificados organizados cronológicamente. Los gráficos de la duración, severidad, intensidad y magnitud pico corresponden a las filas 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

De los eventos de sequía meteorológica a escala semestral (anual), se destaca que el período de mayor duración abarcó 36 meses (49 meses), desarrollándose desde Nov-00 hasta Oct-03 (Feb-01 hasta Feb-05). Adicionalmente, estos eventos también fueron identificados como los más severos en ambas escalas temporales. En términos de intensidad, el más destacado fue el de 2015-2016 (1998-1999), mientras que la magnitud crítica en ambas escalas temporales se alcanzó en el evento de 2015-2016, registrando un valor de 2,09 (2,07) en el mes de Sep-15 (Mar-16).

A)

Eventos de sequía meteorológica



B)

Eventos de sequía hidrológica

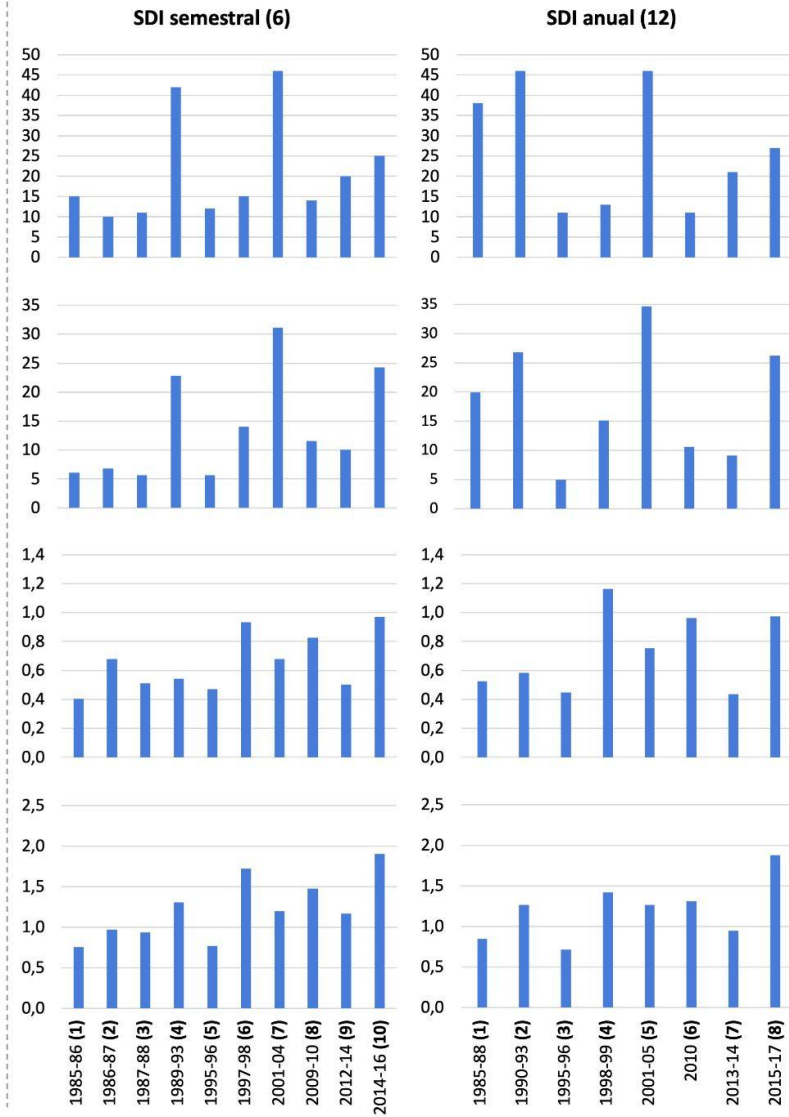


Figura 17. Caracterización de eventos de sequía a escala semestral y anual. **A)** Eventos de sequía meteorológica. **B)** Eventos de sequía hidrológica

En relación con los eventos de sequía hidrológica a escala semestral (anual), el período de mayor duración abarcó 46 meses (46 meses), ocurriendo entre Ene-01 y Oct-04 (Ene-90 a Oct-93 y May-01 a Feb-05). Aunque hubo dos eventos de sequía hidrológica a escala anual con duraciones más largas, la severidad del evento en la década de 1990 fue un 23% mayor que el de la década de los 2000. En cuanto a la intensidad, el evento más significativo ocurrió en 2015-2016 (2015-2017), y estos eventos también presentaron los picos más prominentes durante todo el período de estudio, con una magnitud de 1,0 (1,0) en el mes de Mar-16 (Abr-16).

De lo expuesto anteriormente se desprende que los eventos de sequía, tanto en escala semestral como anual, tienden a mostrar una correlación entre su duración y severidad, donde aquellos de mayor duración también son los más severos. Asimismo, los eventos más intensos son aquellos que presentan magnitudes extremas en los índices de sequía.

Al contrastar los resultados obtenidos con los de otros autores, se encontró que el estudio nacional del agua elaborado por IDEAM (2023) registró un total de 25 eventos de sequía a escala semestral y 13 eventos a escala anual en la cuenca del río Patía, en el período comprendido entre 1983 y 2020. Estos eventos fueron identificados mediante un índice multivariado integral de sequía, que considera variables como la precipitación, la humedad del suelo y la escurrimiento. Cabe destacar que la cifra de eventos obtenida en esta investigación es aproximada a la reportada por el IDEAM, teniendo en cuenta que el período de estudio difiere en cuatro años.

Por otro lado, Gómez Blanco y Cadena (2018) llevaron a cabo un inventario de eventos de sequía meteorológica a nivel nacional, utilizando el SPI semestral en el período 1981-2015. Sus conclusiones indican que Colombia ha enfrentado sequías intensas y de amplia extensión territorial en los años 1985, 1988, 1991-1992, 1997-1998, 2001, 2009 y 2015-2016, mientras que los años con eventos de menor magnitud fueron 1986-1987 y 2002-2003. En relación a la sequía hidrológica, Gonzales-López y Carvajal-Escobar (2020) emplearon el SDI a escala semestral y anual para caracterizar eventos de sequía en la cuenca alta del río Cauca, identificando eventos en los años 1987-1988, 1992-1993, 2001-2002, 2002-2003, 2009-2010 y 2015-2016. Resulta relevante destacar que los años reportados en ambos estudios coinciden con los identificados en esta investigación para la cuenca alta del río Patía.

7.2.1.4 Relación de los eventos de sequía con la intensidad del fenómeno ENOS

En la Figura 18 (Figura 19) se contrastan las series del SPI (SDI) semestral y anual con las intensidades de las fases extremas del fenómeno ENOS, El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), que ocurrieron durante el período de estudio con el fin de analizar la relación de El Niño y La Niña con los eventos de sequía hidrometeorológica.

En primer lugar, se observa una correspondencia entre eventos de El Niño con los eventos de sequía meteorológica e hidrológica, mientras que los eventos de La Niña se relacionan con el efecto opuesto, es decir exceso de precipitación y caudal.

Esta relación en la región y parte del territorio nacional ha sido ampliamente documentada por autores como [Poveda \(2004\)](#), [IDEAM y UNAL \(2018\)](#), [Loaiza Cerón et al. \(2020\)](#). No obstante, se destaca que no todos los eventos sequías en la cuenca se han iniciado o desarrollado durante eventos El Niño, como es el caso de las sequías presentadas durante 1985-1986, 1989-1990, 2000-2001 y 2012-2013, observación que también fue realizada por [IDEAM \(2019\)](#) sobre los eventos de sequía a nivel nacional.

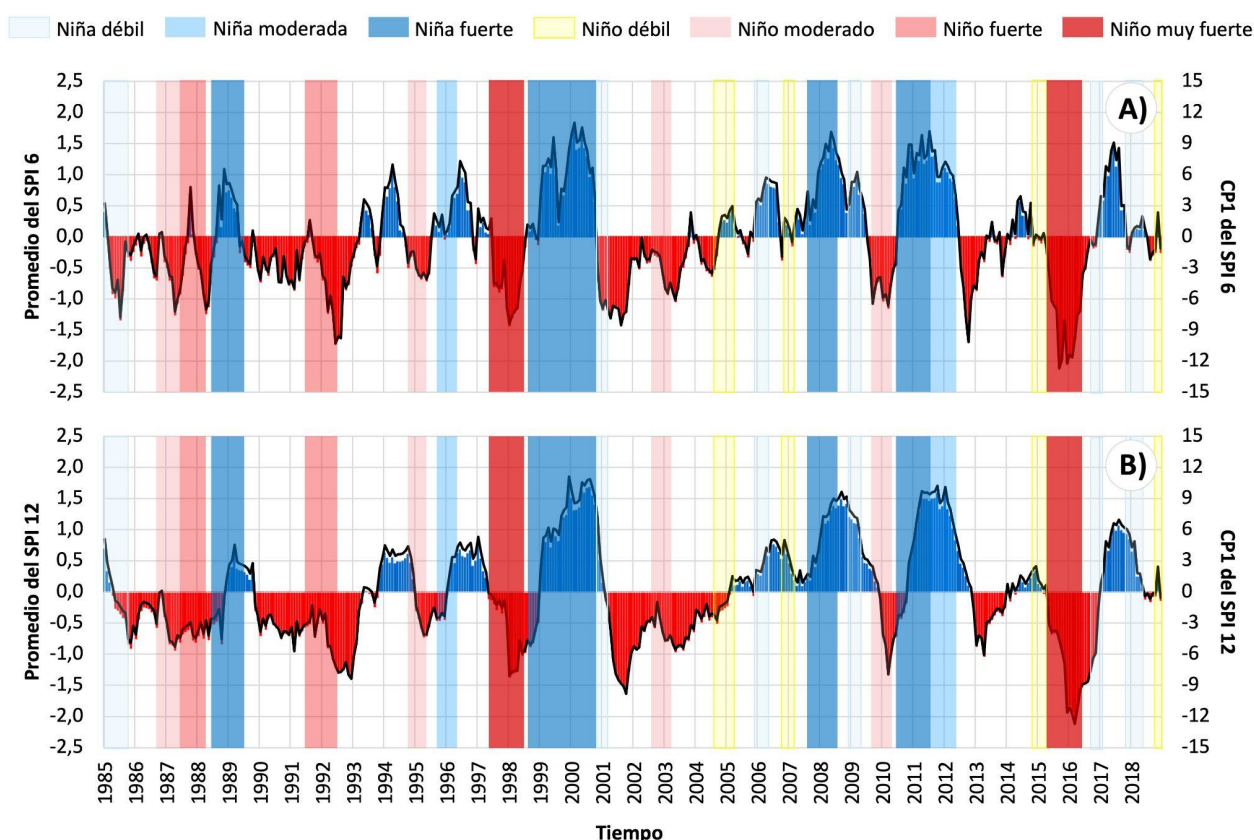


Figura 18. Relación de eventos extremos de ENOS con eventos de sequía meteorológica.

A) Eventos de sequía a escala semestral. **B)** Eventos de sequía a escala anual.

Los eventos de El Niño de intensidad muy fuerte, es decir en los que se generó un calentamiento de la superficie del océano Pacífico tropical mayor a 2 °C, presentados en los años 1997-1998 y 2015-2016 están relacionados con los eventos de sequía de mayor intensidad y magnitud crítica. Los eventos de ambos períodos están documentados por sus impactos económicos, sociales y ambientales en el país y la región por [CAF \(2000\)](#), [Velásquez y Rosales \(2002\)](#), [Martín \(2016\)](#), [Alvis-Guzmán et al. \(2017\)](#), [Arteaga y Burbano \(2018\)](#), entre los que destacan la reducción en el rendimiento de los principales cultivos de exportación y de la producción lechera, los racionamientos de agua potable, el incremento de los casos de Dengue y la importación de energía eléctrica para asegurar el abastecimiento del país.

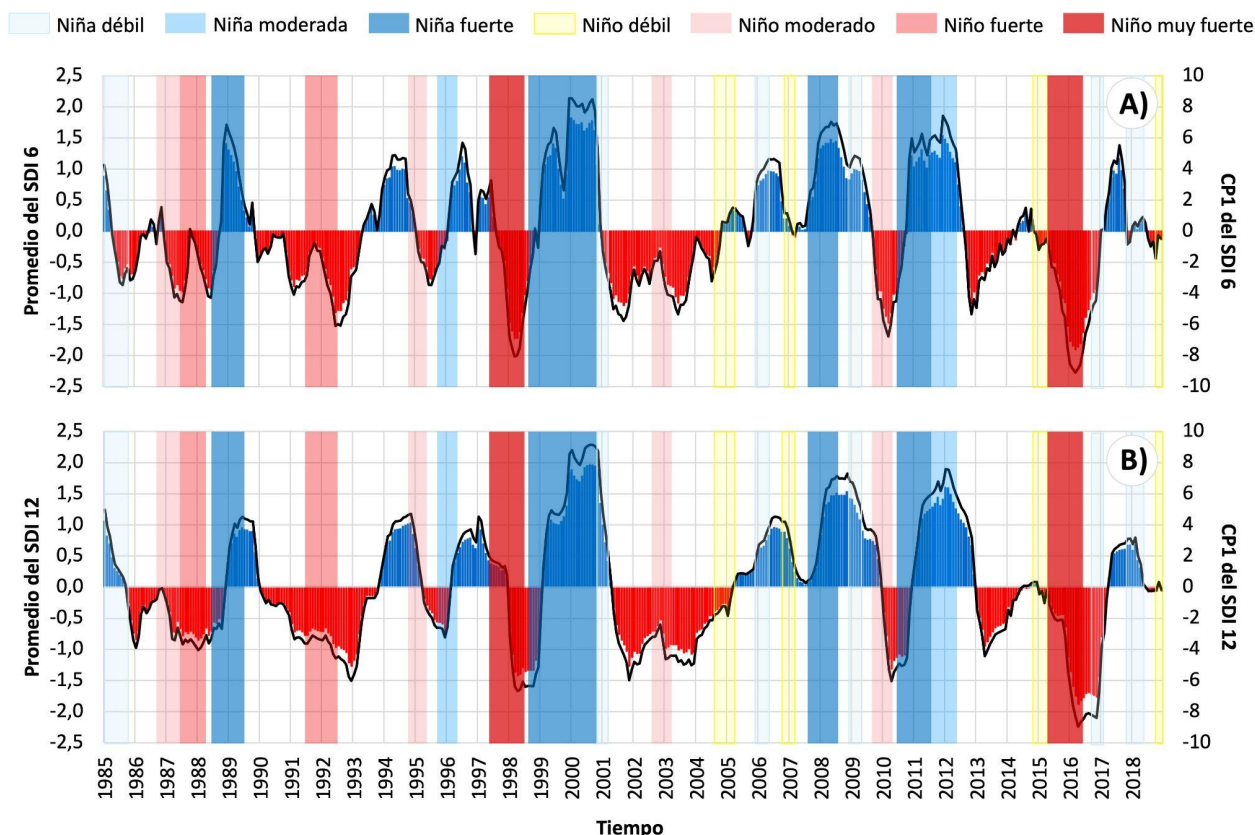


Figura 19. Relación de eventos extremos de ENOS con eventos de sequía hidrológica.
A) Eventos de sequía a escala semestral. **B)** Eventos de sequía a escala anual.

Por otro lado, se observó que el comportamiento promedio de ambos índices de sequía a escala semestral presenta una mayor relación con las fases extremas del fenómeno ENOS que con la escala anual. Esto se infiere debido a que el inicio y fin de los eventos tanto de sequía como de exceso de precipitación coinciden de manera más precisa con el inicio y fin de las fases extremas de ENOS. Un ejemplo ilustrativo de esta relación son los eventos ocurridos en los años 1988-1989, 1994-1995, 1997-1998, 1998-2000, 2009-2010, 2010-2012 y 2015-2016, principalmente con la serie del SPI 6. Lo anterior indica que la escala semestral de estos índices es más apropiada para realizar análisis con el fenómeno ENOS.

7.2.1.5 Espacialización de eventos de sequía hidrometeorológica

A continuación, se presenta la variación espaciotemporal de los eventos de sequía meteorológica e hidrológica de mayor duración, severidad e intensidad a escala semestral con el propósito de analizar su evolución, desde su inicio y desarrollo, hasta alcanzar su magnitud máxima, debilitarse y finalmente concluir.

Sequía hidrometeorológica 2001-2003

En las Figuras 20 y 21 se presentan los eventos de sequía meteorológica e hidrológica a escala semestral correspondientes al período 2001-2003, los cuales se catalogan como los más prolongados y severos entre todos los eventos caracterizados. En el Anexo 10 y el Anexo 11 se presentan los mapas del mismo evento de sequía meteorológica e hidrológica a escala anual.

El evento de sequía meteorológica (Figura 20) inició a partir de noviembre de 2000. Este mes, considerado en una escala semestral, abarca el período de junio de 2000 a noviembre de 2000. En otras palabras, la cantidad de precipitación registrada durante este lapso comenzó a situarse por debajo del promedio histórico acumulado para ese semestre.

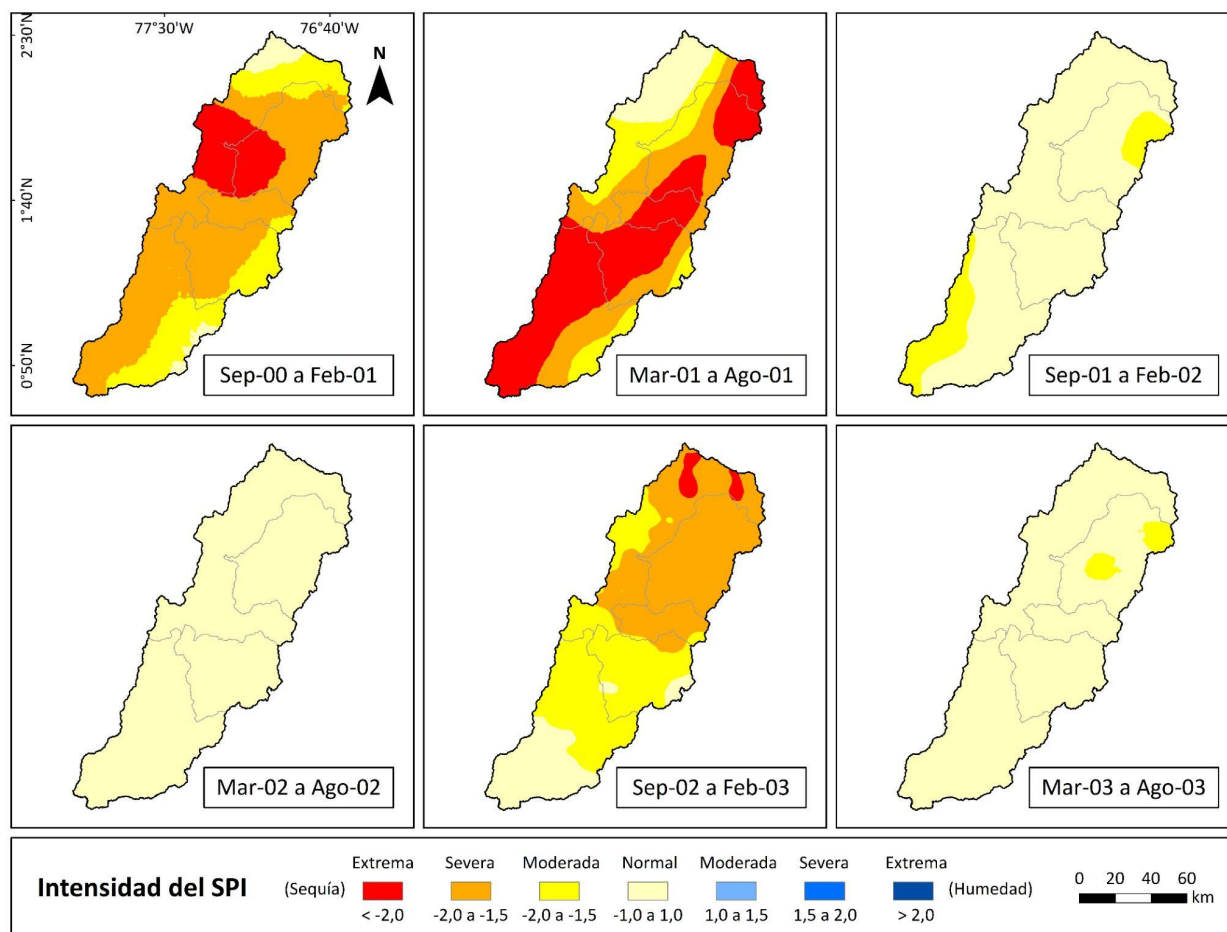


Figura 20. Variación espacial de la sequía meteorológica semestral durante 2001-2003

Para febrero de 2001 (Sep-00 a Feb-01), la sequía se había extendido prácticamente a la totalidad del territorio, con intensidades que variaron de moderadas a extremas, siendo predominante la sequía severa, y viéndose afectada la principal temporada de lluvias. En el mes de agosto de 2001 (Abr-01 a Ago-01), el evento alcanzó su punto máximo de magnitud, afectando el 16 % del territorio con sequía moderada, el 29 % con sequía severa y el 45 % con sequía extrema.

Afectando principalmente a las subzonas hidrográficas de Guaitara, Juanambú, Mayo y Guachicono durante la segunda temporada lluviosa de la cuenca.

En los meses posteriores la sequía redujo su magnitud, predominando condiciones normales en la mayoría del territorio, hasta que en febrero de 2003 (Sep-02 a Feb-03) se desarrolló un segundo pico menos intenso, el cual afectó mayormente al norte de la cuenca durante la principal temporada lluviosa, predominando la sequía severa y moderada. Posteriormente, las condiciones normales comenzaron a retornar nuevamente hasta que el evento finalizó en octubre de 2003 (May-03 a Oct-03).

Por otra parte, el evento de sequía hidrológica (Figura 21) inició en enero de 2001 (Ago-00 a Ene-01), 2 meses después de iniciada la sequía meteorológica. En marzo de 2001 (Oct-00 a Mar-01) una sequía moderada afectó principalmente los caudales del río Guachicono y del cauce principal del río Patía, justo en la zona cercana a la desembocadura del río Guachicono. La disminución de los caudales en esta región está estrechamente vinculada a las condiciones extremadamente secas que prevalecieron en términos meteorológicos.

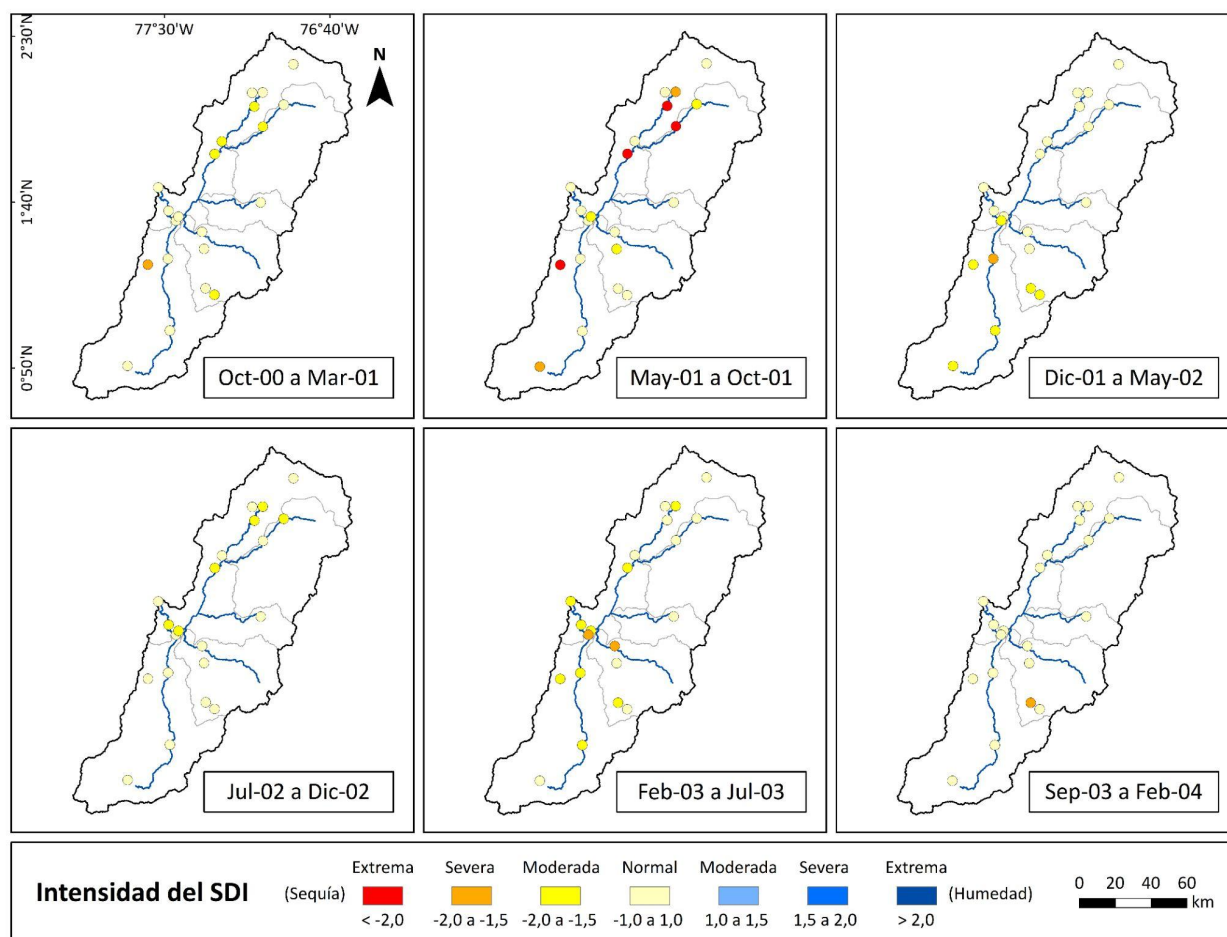


Figura 21. Variación espacial de la sequía hidrológica semestral durante 2001-2003

En octubre de 2001 (May-01 a Oct-01) la sequía hidrológica alcanzó su magnitud máxima, con intensidades extremas y moderadas en los ríos Guachicono, Patía, Guáitara y Juanambú. La única estación disponible sobre el río Mayo no mostró afectaciones por sequía. Si bien en este mes fue en el que más estaciones se vieron afectadas por sequía extrema, los caudales en las estaciones más aguas abajo sobre los ríos Patía, Guáitara y Juanambú se mantuvieron en condiciones normales.

Posteriormente, en mayo de 2002 (Dic-01 a May-02) los caudales en todas las estaciones de las subzonas Alto Patía, Guachicono y Mayo estaban en condiciones normales. Mientras que en la subzona Guáitara, todas las estaciones indican condiciones de sequía hidrológica, predominando intensidad moderada. Después, en diciembre de 2002 (Jul-02 a Dic-02) aunque predominaban las condiciones normales en los caudales de las cuatro subzonas de los tributarios del río Patía, la mayoría de las estaciones en la subzona Alto Patía mostraron una sequía moderada.

En julio de 2003 se desarrolló un segundo pico de sequía hidrológica, asociado al segundo pico de sequía meteorológica ocurrido en el mismo período, el cual afectó a 11 de las 21 estaciones hidrológicas con sequía entre moderada y severa, siendo el mayor número de estaciones afectadas durante todo el evento. Además, se manifestó por primera vez sequía en la estación Los Nortes, destacada por registrar el caudal escurrido en toda la cuenca alta del río Patía. En el mes de febrero de 2004 (Sep-03 a Feb-04) la sequía hidrológica disminuyó, retornando las condiciones normales de caudal en la mayoría de las estaciones hidrológicas.

Se destaca que durante todo el evento la única estación en la subzona Mayo no registró afectaciones por sequía, y junto con todo lo descrito anteriormente se muestra la complejidad de la red hídrica en la cuenca, resaltando su capacidad para presentar diferencias notables de la sequía hidrológica en distintos puntos de observación.

Sequía hidrometeorológica 2015-2016

Las Figuras 22 y 23 presentan los eventos de sequía meteorológica e hidrológica correspondientes al período 2015-2016, los cuales se catalogan como los de mayor intensidad y magnitud pico entre todos los eventos caracterizados. En el Anexo 12 y el Anexo 13 se presentan los mapas del mismo evento de sequía meteorológica e hidrológica a escala anual.

En cuanto a la sequía meteorológica (Figura 22) este evento inició en abril de 2015 (Nov-14 a Abr-15). Para julio de 2015 (Feb-15 a Jul-15) la sequía afectaba moderadamente la totalidad de las subzonas Juanambú, Mayo y Alto Patía. Hacia septiembre de 2015 (Abr-15 a Sep-15) la sequía alcanzó su punto máximo, afectando a todo el territorio con sequía moderada en un 17 %, severa en el 28 % y extrema en un 55 %, siendo más impactadas las subzonas Juanambú, Mayo, Alto Patía, el norte de Guáitara y el sur de Guachicono.

Posteriormente, en noviembre de 2015 (Jun-15 a Nov-15) hubo una reducción en la intensidad de la sequía, predominando la moderada y severa. Sin embargo, en enero de 2016 (Ago-15 a Ene-16) se intensificó nuevamente afectando principalmente a las subzonas Mayo, Guachicón y Alto Patía con sequía extrema y a Juanambú y Guaitara con sequía severa. Hacia marzo de 2016 (Oct-15 a Mar-16) continuaba afectada el 100 % de la cuenca, pero con sequías moderadas y severas. Para mayo (Dic-15 a May-16) la sequía severa había retrocedido y predominaba la moderada. La intensidad continuó reduciéndose hasta que el evento terminó en noviembre de 2016 (Jun-16 a Nov-16) entrando a la temporada lluviosa.

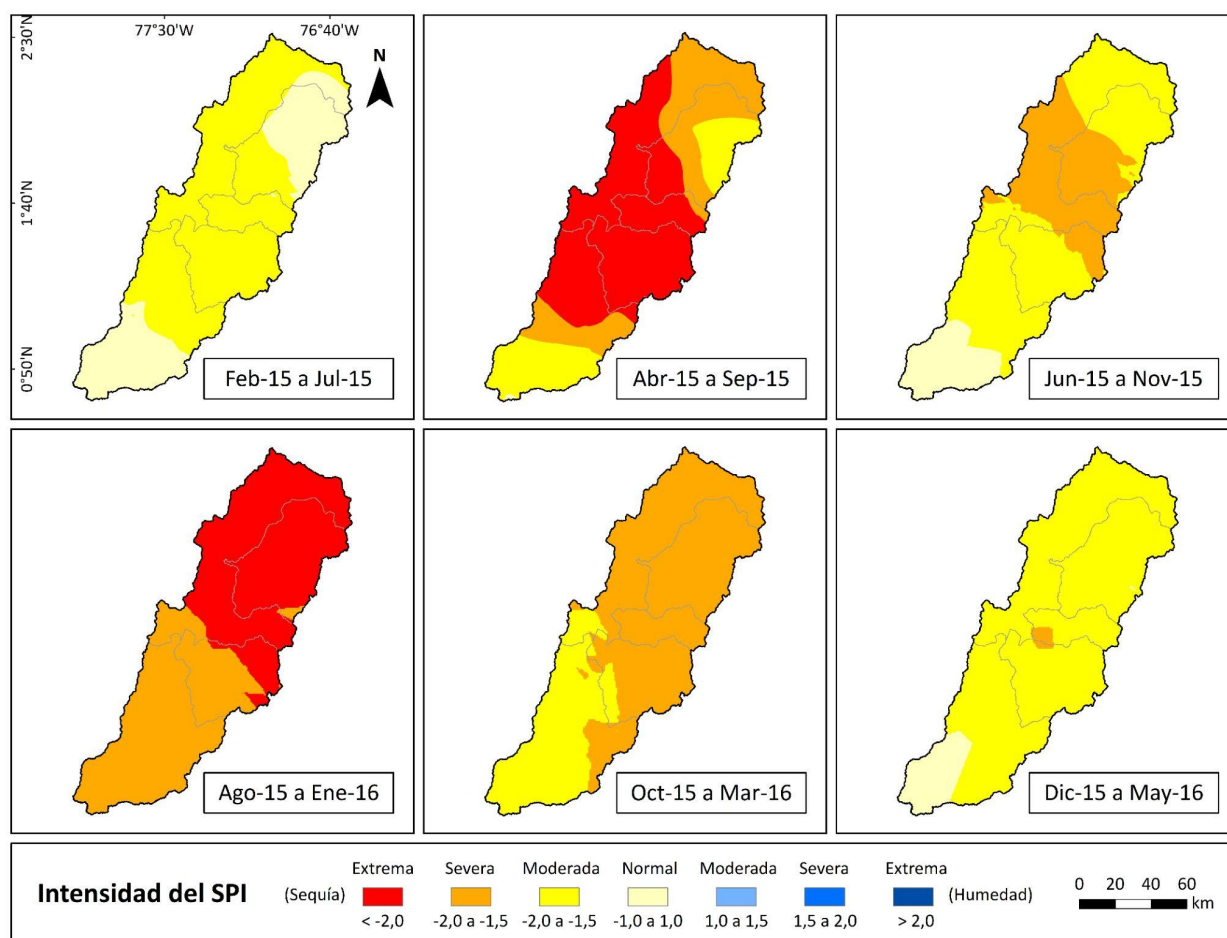


Figura 22. Variación espacial de la sequía meteorológica semestral durante 2015-2016

La evolución de la sequía hidrológica (Figura 23) inició en diciembre de 2014 (Jul-14 a Dic-14). No obstante, al espacializar los resultados se observó que la mayoría de las estaciones presentaron condiciones normales hasta julio de 2015 (Feb-15 a Jul-15), cuando solo una estación al norte de la subzona Alto Patía presentaba sequía extrema. En noviembre de 2015 (Jun-15 a Nov-15) la sequía hidrológica se extendió en dirección norte-sur, afectando a las subzonas Guachicón, Juanambú y Alto Patía.

En marzo de 2016 (Oct-15 a Mar-16) se alcanzó el pico más extremo del evento, siendo afectadas con sequía extrema el caudal en 11 estaciones ubicadas en las subzonas Guachicono, Juanambú y en su mayoría de Alto Patía. Mientras que el caudal en la subzona Mayo continuaba en condiciones normales, por su parte en algunas áreas de la subzona Guátara se presentaba sequía moderada y severa. En total se vieron afectadas 15 de las 21 estaciones durante este período.

Posteriormente, en julio de 2016 (Feb-16 a Jul-16) la intensidad de la sequía hidrológica comenzó a descender en varias estaciones, aunque se mantuvieron las condiciones de sequía extrema en el caudal de la estación NOR y en el caudal de varias de las estaciones del norte. Mientras que el caudal de la estación en la subzona Mayo presentó una condición de sequía moderada.

En noviembre de 2016 (Jun-16 a Nov-16) dejó de registrarse sequía extrema en los caudales de la cuenca, predominando sequía moderada en Juanambú y severa en algunas estaciones de Alto Patía y Guátara. El evento de sequía hidrológica finalizó en diciembre de 2016 (Jul-16 a Dic-16), 1 mes después de finalizada la sequía meteorológica.

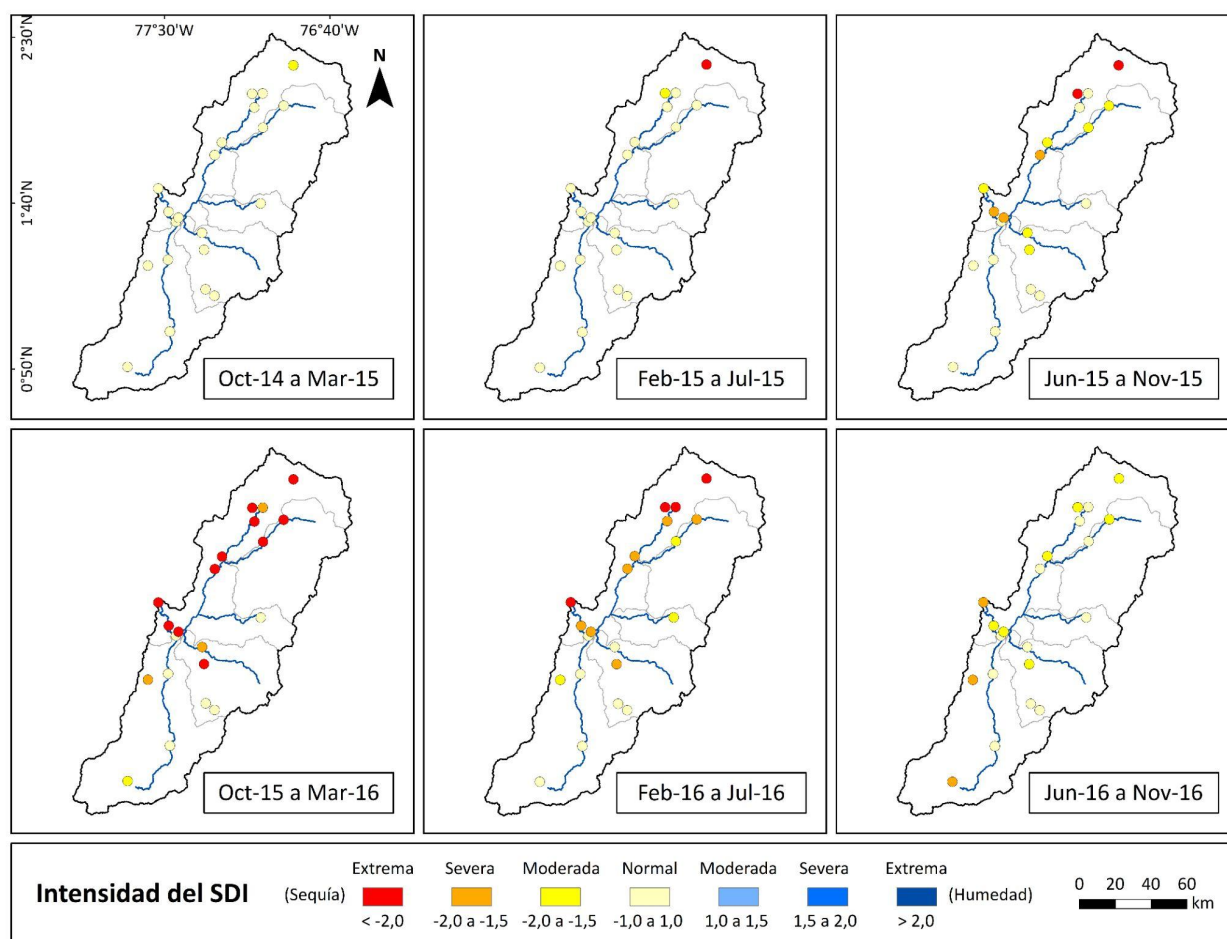


Figura 23. Variación espacial de la sequía hidrológica semestral durante 2015-2016

7.2.2 Correlación entre la sequía meteorológica e hidrológica

En la Tabla 9 se presentan las correlaciones cruzadas entre la sequía meteorológica, representada por el SPI, y la sequía hidrológica, representada por el SDI, con rezagos de 0 a 12 meses. Las correlaciones se realizaron a escala semestral (6) y anual (12) empleando la primera componente principal de cada conjunto de datos. Lo anterior con el objetivo de identificar en cuantos meses la sequía meteorológica se manifiesta en hidrológica en la cuenca Alta del río Patía.

Tabla 9. Correlación entre la sequía meteorológica e hidrológica

Rezago (meses)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SPI 6 vs SDI 6	0,85	0,74	0,62	0,50	0,38	0,27	0,16	0,09	0,02	-0,04	-0,09	-0,14	-0,17
SPI 12 vs SDI 12	0,91	0,84	0,76	0,66	0,57	0,47	0,37	0,28	0,18	0,09	0,00	-0,08	-0,14

Los resultados obtenidos muestran las correlaciones más altas de forma sincrónica, es decir con rezago 0. La correlación fue de 0,85 para la escala semestral y de 0,91 para la escala anual. Al comparar estos resultados con otros estudios se encontró que [Adnan Abbas et al. \(2021\)](#) calcularon correlaciones cruzadas para evaluar la relación entre las sequías meteorológicas e hidrológicas en la cuenca del río Soan, en Pakistán, empleando índices de sequía a escala trimestral, semestral y anual, y aplicando rezagos de 0 a 12 meses; determinando que las correlaciones entre ambos estados de sequía fueron más altas en el rezago cero para todas las escalas temporales, reduciéndose las correlaciones a medida que el rezago aumentaba.

De manera similar, [Jincy Rose y Chithra \(2022\)](#) realizaron correlaciones cruzadas para comprender la propagación de la sequía meteorológica a la hidrológica en 4 puntos de la cuenca del río Bharathapuzha, en India, usando índices de sequía a escala mensual, trimestral, semestral y anual, y empleando rezagos de 0 a 7 meses. Encontrando que en uno de los puntos la correlación más alta fue a los 3 meses con un valor de 0,8 a escala anual, mientras que en los otros 3 puntos las correlaciones más altas se presentaron en el rezago 0.

Con lo anterior, se plantea realizar un análisis de correlaciones a escalas más pequeñas, como la mensual y trimestral, para explorar si con ellas se logra identificar la correlación más alta con algún mes de rezago entre la sequía meteorológica y la hidrológica en la cuenca alta del río Patía.

7.2.3 Teleconexiones

En la Figura 24 (Figura 25), se presentan las correlaciones cruzadas entre la primera y segunda componente principal del conjunto de datos del SPI (SDI) a escala semestral y anual, y las 12 variables macroclimáticas descritas en la Tabla 2. Se añade que se incluyeron las 3 variables (A, B y C) que componen el índice del Niño Modoki (EMI) para evaluar si hay mejores correlaciones con el índice o con las variables que lo componen.

Se determinó que las correlaciones estadísticamente significativas, con un valor de confianza del 99 % ($\alpha=0,01$), corresponden a un $r > |0,128|$. Estas correlaciones se indicaron con un “-” sobre los recuadros que las presentan.

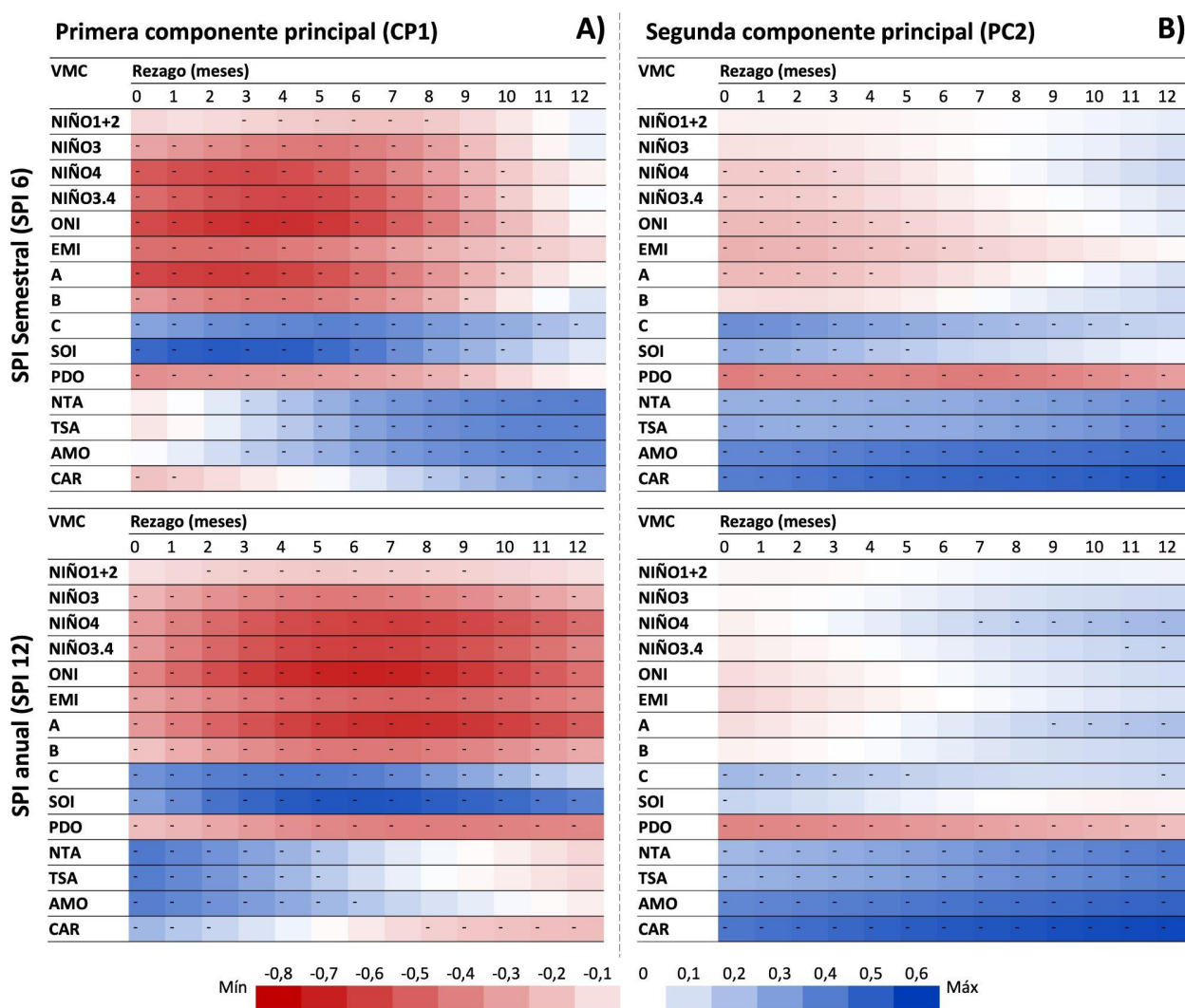


Figura 24. Correlaciones cruzadas con el SPI a escala semestral y anual. **A)** Correlaciones con la primera componente. **B)** Correlaciones con la segunda componente.

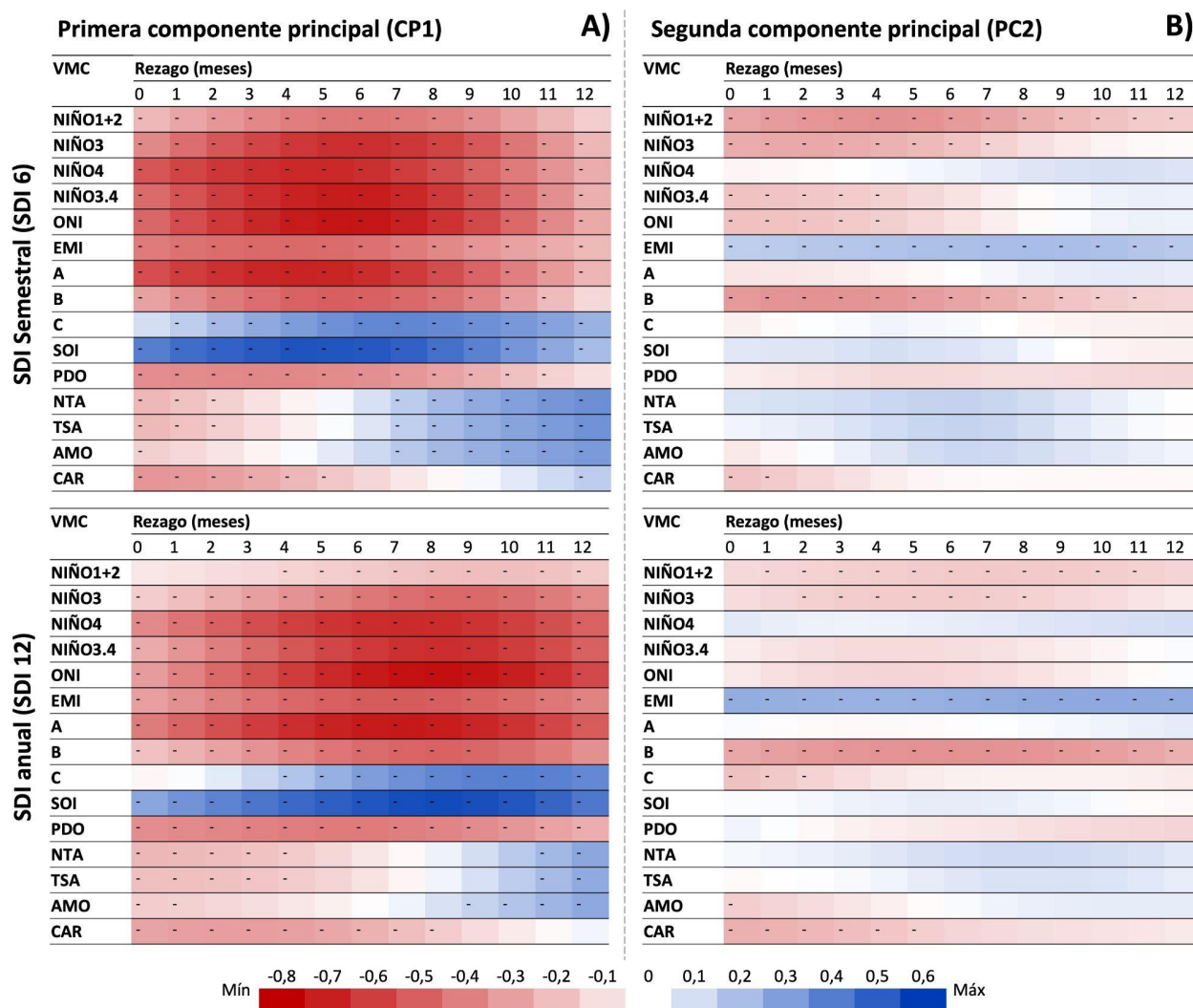


Figura 25. Correlaciones cruzadas con el SDI a escala semestral y anual. **A)** Correlaciones con la primera componente. **B)** Correlaciones con la segunda componente.

Del análisis de la primera componente principal se deduce que tanto el SPI como el SDI, en ambas escalas temporales, exhiben correlaciones inversas estadísticamente significativas con las variables NIÑO1+2, NIÑO3, NIÑO4, NIÑO3.4, ONI, EMI, A, B y PDO. Estas variables actúan como indicadores del estado de la temperatura en regiones específicas del océano Pacífico (Figura 6), lo que implica que un aumento en la temperatura en estas zonas genera valores negativos del SPI y SDI, lo que se traduce en la disminución de los niveles de precipitación y caudal en la cuenca alta del río Patía, generando así los episodios de sequía meteorológica e hidrológica.

En cambio, el SPI y el SDI en ambas escalas temporales presentaron correlaciones directas significativas con las variables C y SOI. En primer lugar, C es una de las tres variables que constituyen el Índice EMI (Figura 6), la cual refleja las condiciones de temperatura en la región oeste del océano Pacífico tropical. Siendo la única de las regiones del océano Pacífico, analizadas en esta investigación, en la que la disminución de su temperatura conlleva una reducción en las

precipitaciones y los caudales en la cuenca. Por otro lado, el SOI es un índice que señala el gradiente de presión atmosférica entre Darwin y Tahití (Figura 6), lo que se relaciona con el estado de los vientos alisios. Un valor negativo del SOI se asocia con una disminución de la presión atmosférica en Tahití y un aumento en Darwin, lo cual resulta en una disminución de la fuerza de los vientos alisios. En contraste, cuando las condiciones de presión se invierten entre Tahití y Darwin, se genera un fortalecimiento de los vientos alisios (OMM, 2014). Esto lleva a la conclusión de que la disminución en la intensidad de los vientos alisios resulta en una reducción de los niveles normales de precipitación y caudal en la cuenca, lo que a su vez origina los episodios de sequía hidrometeorológica.

En cuanto al SPI 6 y SPI 12, se observaron correlaciones directas y significativas con las variables NTA, TSA y AMO, que son indicativas de la temperatura en áreas específicas del océano Atlántico (Figura 6), lo que sugiere que la disminución de la temperatura en estas regiones está asociada con una reducción en las precipitaciones y los caudales en la cuenca. En contraste, para el SDI a 6 y 12 meses, se encontraron correlaciones significativas inversas en los rezagos más cortos, pero estas correlaciones se volvieron directas en los rezagos más largos.

En referencia a la variable CAR, es aquí donde se observan las mayores discrepancias en el comportamiento de las correlaciones entre ambos índices de sequía y en las distintas escalas temporales. A nivel semestral, tanto el SPI como el SDI presentan correlaciones inversas significativas con rezagos que abarcan desde 0 hasta 5 meses, las cuales cambian a correlaciones directas cuando el rezago se extiende entre 8 y 12 meses. Por otro lado, en la escala anual, el SPI muestra correlaciones directas significativas en los rezagos más cortos, mientras que en los rezagos más largos estas correlaciones se tornan inversas. En contraste, el SDI únicamente presenta correlaciones inversas.

En resumen, tanto el SPI como el SDI exhiben correlaciones inversas más notables ($r > 0,5$) con las variables NIÑO4, NIÑO3.4, ONI y A, mientras que presentan correlaciones directas con el índice SOI. Estas relaciones se hacen evidentes principalmente en la escala semestral, destacando en los rezagos de 1 a 4 meses para la sequía meteorológica y de 3 a 6 meses para la sequía hidrológica. A nivel anual, las correlaciones más sólidas emergen en rezagos más extensos, abarcando entre 4 y 8 meses para la sequía meteorológica y de 6 a 10 meses para la sequía hidrológica. Además, en términos generales, se observa que las correlaciones con la primera componente principal del SDI presentan una mayor intensidad que aquellas con el SPI, en ambas escalas temporales.

Con relación al EMI, es importante señalar que, aunque se encuentran correlaciones significativas, al contrastarlas con las de las variables A, B y C, se evidencia que las correlaciones más robustas se manifiestan con la región C, la cual intercepta parte de las zonas NIÑO3.4 y principalmente NIÑO4. De hecho, se aprecia una similitud marcada en el comportamiento de las correlaciones entre C y NIÑO4, lo que sugiere la posibilidad de prescindir tanto del EMI como de

las tres regiones de las que se compone el índice para llevar a cabo análisis más detallados de las teleconexiones relacionadas con la sequía hidrometeorológica en la región.

En cuanto a los resultados obtenidos con la segunda componente, se observó que con el SPI se incrementaron las correlaciones directas con las variables del océano Atlántico (NTA, TSA, AMO y CAR) al igual que las correlaciones inversas con la PDO. Mientras que con las variables relacionadas al ENOS (NIÑO1+2, NIÑO3, NIÑO4, NIÑO3.4, ONI, EMI, A, B, C y SOI) se redujeron notablemente. Por su parte, con el SDI las correlaciones disminuyeron con todas las variables, dejando de ser significativas en su mayoría.

Comparando los resultados con estudios anteriores se encontró que [Canchala et al. \(2020a\)](#) analizaron las teleconexiones entre variables océano-atmosféricas del Pacífico y las precipitaciones mensuales en la región Andina del suroeste de Colombia, identificando correlaciones inversas con las variables NIÑO1+2, NIÑO3, NIÑO4, NIÑO3.4, ONI, MEI y PDO, así como correlaciones directas con el SOI. Estos hallazgos guardan coherencia con los resultados obtenidos en relación al SPI, dado que este índice constituye un indicador del déficit o exceso de precipitación. Por otro lado, [Canchala et al. \(2020b\)](#) estudiaron las teleconexiones entre variables océano-atmosféricas del Pacífico y Atlántico con los caudales medios mensuales de la cuenca del río Patía, encontrando correlaciones inversas con las variables oceánicas del Pacífico y directas con las variables atmosféricas, en cuanto a las variables del Atlántico las correlaciones no fueron significativas. Los anteriores resultados apuntan a que la precipitación y el caudal, al igual que la sequía meteorológica e hidrológica, son influenciados por los cambios océano-atmosféricos del océano Pacífico principalmente y en menor medida por el océano Atlántico.

[Ocampo Marulanda et al. \(2022b\)](#), por su parte, llevaron a cabo un análisis de teleconexiones entre variables océano-atmosféricas tanto del océano Pacífico como del Atlántico, y la sequía meteorológica en la zona este del departamento de Nariño, correspondiente a la región Andina. En su estudio, utilizaron las dos primeras componentes principales del SPI a escala semestral. Los resultados que obtuvieron indican que la primera componente presenta correlaciones significativas con variables del Pacífico que son indicativas de ENOS, mientras que la segunda componente muestra una relación más marcada con las variables del Atlántico. Estos hallazgos concuerdan con los resultados obtenidos en la presente investigación.

7.3 Identificación de zonas susceptibles a sequías hidrometeorológicas

A continuación, se exponen los resultados del proceso llevado a cabo para desarrollar el análisis de susceptibilidad a la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía. En primer lugar, se detalla el comportamiento espacial de las variables elegidas en relación con la cuenca. Luego, se presenta la estandarización aplicada a todas estas variables. Posteriormente, se desglosan los resultados del proceso analítico jerárquico, el cual se llevó a cabo para determinar las ponderaciones de cada variable. Por último, se detallan los mapas que muestran la susceptibilidad de la cuenca a la sequía hidrometeorológica.

7.3.1 Variables seleccionadas para el análisis de susceptibilidad

7.3.1.1 Frecuencia de la intensidad de la sequía hidrometeorológica

La variación espacial de la frecuencia relativa de la intensidad moderada, severa y extrema de la sequía meteorológica (hidrológica) a escala semestral se presenta en la Figura 26 (Figura 27). En los anexos 14 y 15 se presentan los resultados a escala anual.

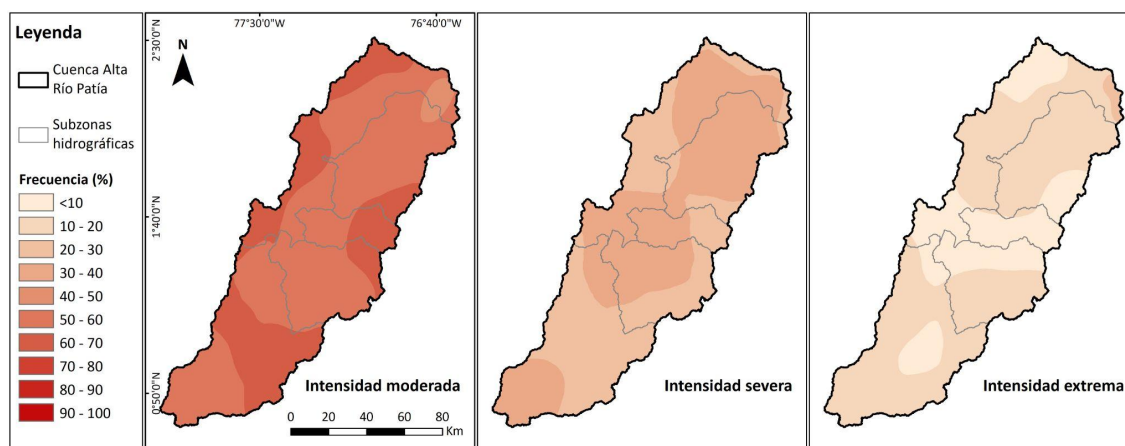


Figura 26. Mapas de frecuencia relativa de las intensidades de la sequía meteorológica (SPI) semestral

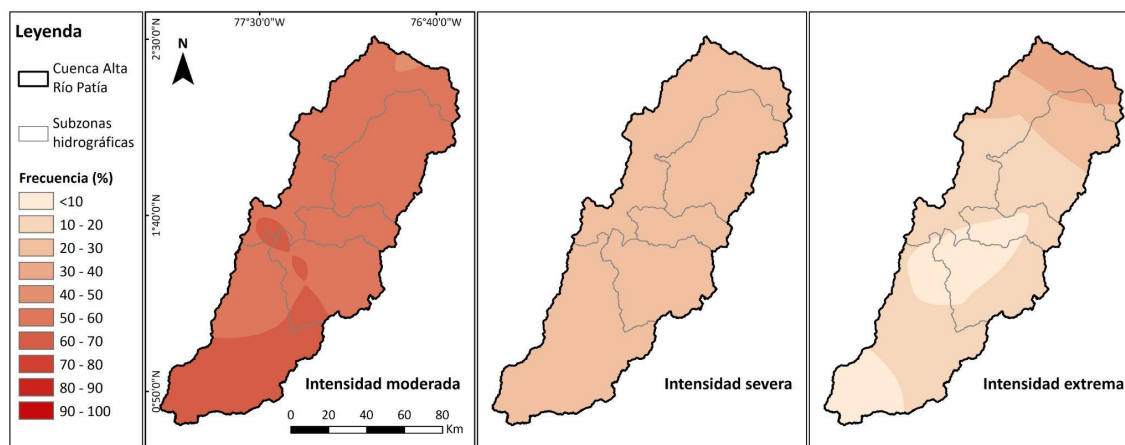


Figura 27. Mapas de frecuencia relativa de las intensidades de la sequía hidrológica (SDI) semestral

En ambas figuras, se evidencia que las frecuencias más altas se manifiestan en la categoría de intensidad moderada, mientras que las frecuencias más bajas se encuentran en la categoría de intensidad extrema. Con base en esta observación, se optó por seleccionar la capa correspondiente a la intensidad moderada tanto del SPI como del SDI para llevar a cabo el análisis de susceptibilidad.

7.3.1.2 Frecuencia de la severidad de la sequía hidrometeorológica

Los mapas de la Figura 28 (Figura 29) presentan la distribución espacial de la frecuencia de la severidad de los eventos de sequía meteorológica (hidrológica) a escala semestral. Por otro lado, en los anexos 16 y 17 se pueden encontrar los mapas correspondientes a la escala anual.

Se observó que la fracción más significativa de eventos de sequía, tanto meteorológica como hidrológica, se sitúa en la categoría de "extrafuerte". Esta observación llevó a la elección de esta capa en ambos índices de sequía para tomarlas como insumos clave en la evaluación del nivel de susceptibilidad de la cuenca ante las condiciones de sequía hidrometeorológica.

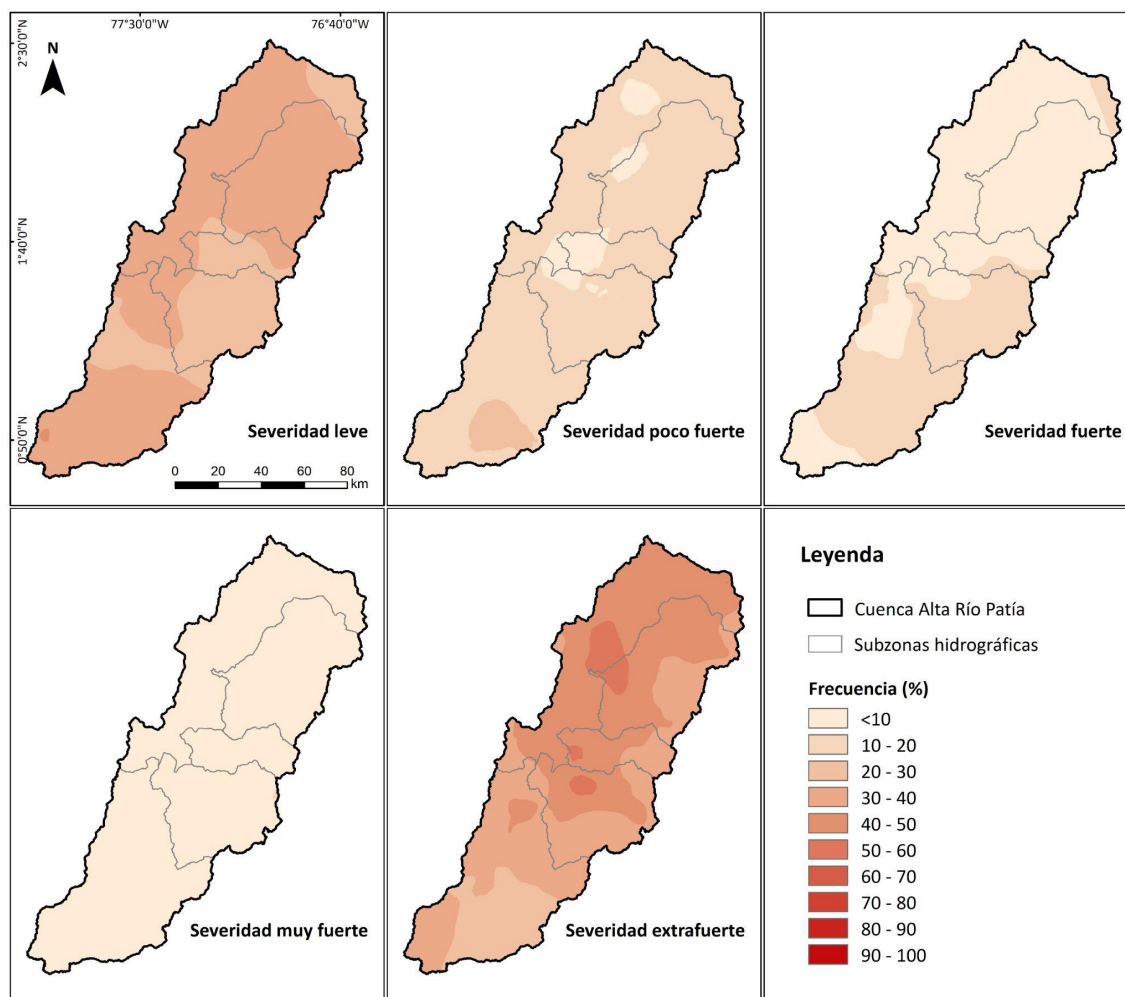


Figura 28. Mapas de frecuencia relativa de la severidad de la sequía meteorológica (SPI) semestral

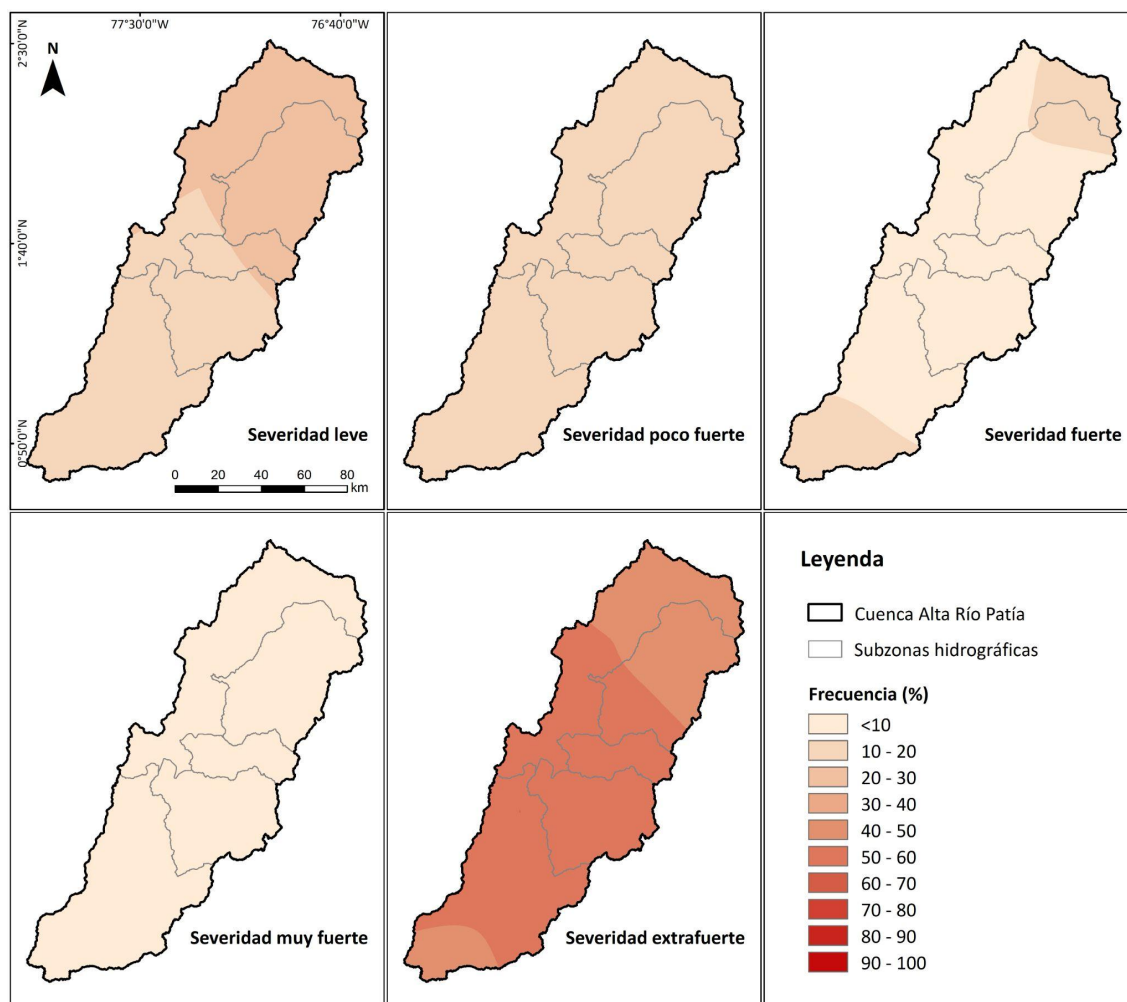


Figura 29. Mapas de frecuencia relativa de la severidad de la sequía hidrológica (SDI) semestral

7.3.1.3 Pendiente

La pendiente ejerce una influencia indirecta en la susceptibilidad a las sequías hidrometeorológicas. Esta influencia se deriva de la relación entre la pendiente y la regulación del flujo de escorrentía. En terrenos con pendientes pronunciadas, el agua tiende a desplazarse rápidamente hacia áreas más bajas, lo que resulta en una menor capacidad de retención de agua en el suelo. Además, estas pendientes abruptas fomentan la erosión del suelo debido a la velocidad de la escorrentía, lo que puede dar lugar a la pérdida de nutrientes y suelo fértil, dificultando así el establecimiento de vegetación que regula los procesos hidrológicos.

La Figura 30 ilustra la diversidad de pendientes en la cuenca, variando entre 0 y 520 %. Se destacan áreas extensas de valles, principalmente al norte y sur de la cuenca, en las subzonas hidrográficas de Alto Patía y Guaitara. Por otro lado, las zonas con pendientes más pronunciadas se sitúan mayormente en el oeste, alrededor de los puntos de desembocadura de los ríos Mayo, Juanambú y Guaitara en el río Patía, así como en el noreste, en la subzona de Guachicono.

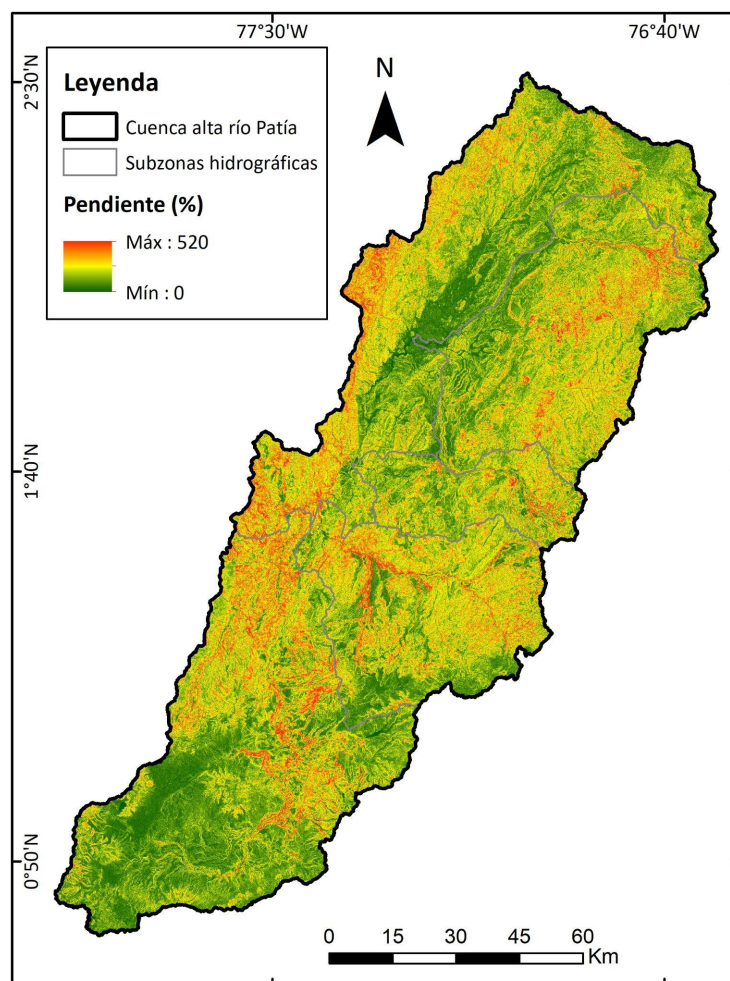


Figura 30. Mapa de pendiente

7.3.1.4 Erosión

La erosión es un proceso natural, pero se denomina degradación cuando es debida a acciones humanas que lo aceleran. Sus efectos se pueden resumir en la reducción de las funciones del suelo y los servicios ecosistémicos que provee, como la resiliencia frente a eventos de sequías. (IDEAM y UDCA, 2015). En la Figura 31 se presenta el mapa del estado erosión del suelo de la cuenca alta del río Patía. La información del mapa es clasificada por IDEAM y UDCA (2015) en 6 categorías indicadas en la leyenda, de las cuales predomina el estado de erosión moderado en la mayor parte del territorio de la cuenca.

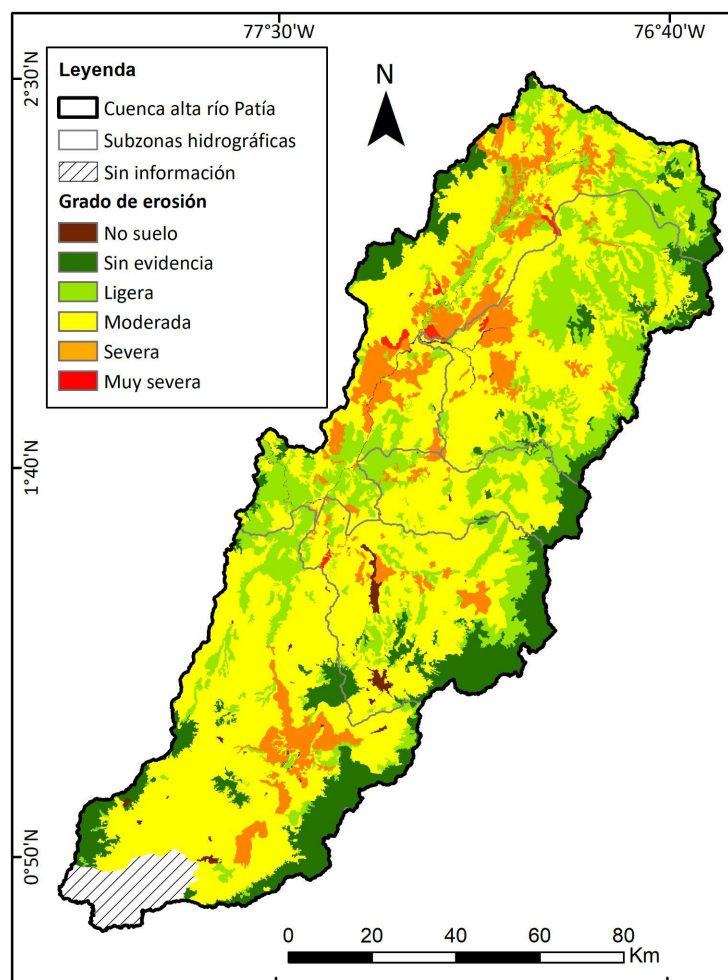


Figura 31. Mapa de erosión del suelo

7.3.1.5 Aridez

La aridez es una de las principales causas de vulnerabilidad del suelo frente a los agentes de su degradación, pues determina características del territorio que lo hacen más susceptible a los procesos de erosión (MITECO, 2022), que a su vez favorecen la susceptibilidad a sequías. En Colombia se ha empleado el índice de aridez como un indicador que califica cualitativamente las condiciones naturales de aridez, midiendo el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región (IDEAM, 2019).

En la Figura 32 se presenta el mapa del estado de aridez de la cuenca alta del río Patía. De las 7 categorías que tiene el índice, la cuenca presenta 6, observando zonas con altos excedentes de agua al norte de la cuenca, hasta zonas con niveles deficitarios de agua alrededor del punto de descarga de los ríos Guáitara y Juanambú en el río Patía.

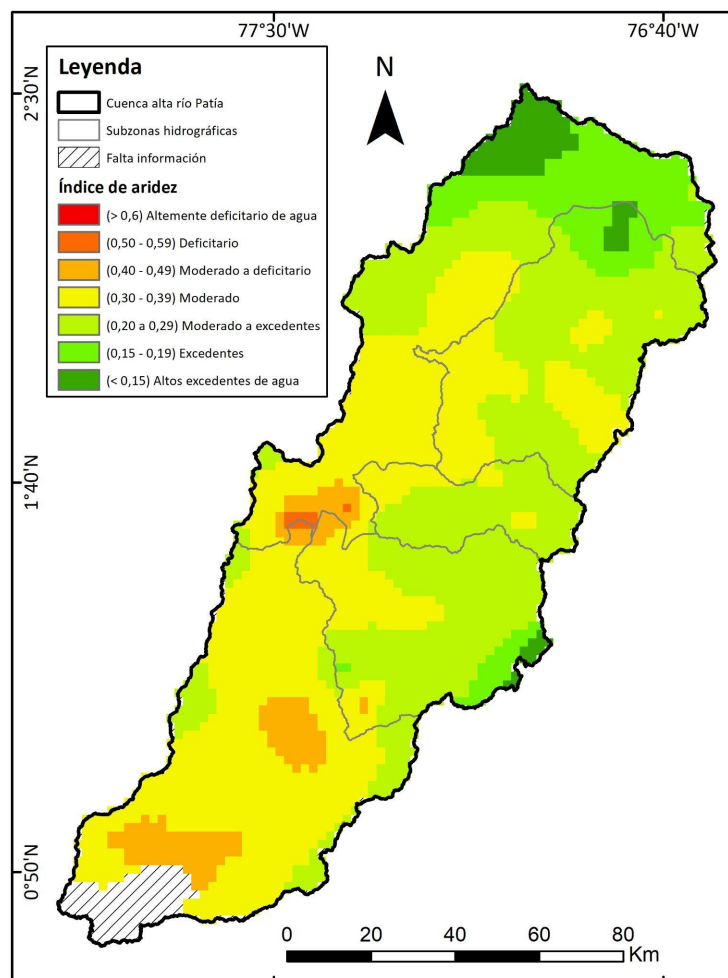


Figura 32. Mapa de aridez

7.3.2 Estandarización de variables

En la Tabla 10 se presentan las agrupaciones de los valores de cada una de las siete variables y su estandarización en los 5 niveles de susceptibilidad a la sequía.

Tabla 10. Estandarización de las variables seleccionadas para la susceptibilidad

Variables seleccionadas	Nivel de susceptibilidad				
	1 = Muy bajo	2 = Bajo	3 = Medio	4 = Alto	5 = Muy alto
1. Intensidad SPI (%)	< 10	10 - 30	30 - 50	50 - 70	> 70
2. Intensidad SDI (%)	< 10	10 - 30	30 - 50	50 - 70	> 70
3. Severidad SPI (%)	< 10	10 - 30	30 - 50	50 - 70	> 70
4. Severidad SDI (%)	< 10	10 - 30	30 - 50	50 - 70	> 70
5. Pendiente (%)	< 12	12 - 25	25 - 50	50 - 75	> 75
6. Índice de aridez	< 0,15	0,15 - 0,30	0,30 - 0,40	0,40 - 0,50	> 0,50
7. Grado de erosión	Sin erosión	Ligera	Moderada	Severa	Muy severa

Con base en lo anterior, se procedió a reclasificar los valores de los mapas que reflejan la información espacial correspondiente a cada una de las variables seleccionadas en los cinco niveles mencionados. Esta acción tuvo como objetivo estandarizar la presentación de la información para lograr comparabilidad entre ellas al momento de realizar el álgebra de mapas con las ponderaciones de cada una de las variables obtenidas del proceso analítico jerárquico indicado a continuación.

7.3.3 Proceso analítico jerárquico

Para el proceso analítico jerárquico se procedió a realizar la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 11) considerando la escala de valoración numérica propuesta por Saaty (1990): 1 cuando ambas variables tienen igual importancia, 3 cuando una de la variables es moderadamente más importante que otra, 5 cuando una de las variables es fuertemente más importante que otra, 7 cuando la importancia de una de las variables es mucho más fuerte que otra y 9 cuando la importancia de una variable es extremadamente fuerte frente a otra.

Después de establecer las comparaciones entre cada par de variables con la escala de valoración indicada, se sumaron los valores de cada columna con el fin de normalizar las relaciones pareadas (Tabla 12). Finalmente se calculó el valor promedio entre los valores de cada fila, los cuales son los factores de ponderación de cada variable; siendo 0,21 para la intensidad del SPI (I_{SPI}), 0,21 para la intensidad del SDI (I_{SDI}), 0,21 para la severidad del SPI (S_{SPI}), 0,21 para la severidad del SDI (S_{SDI}), 0,02 para la pendiente (P), 0,04 para la erosión (E) y 0,10 para la aridez (A). Es decir que:

$$\text{Susceptibilidad} = 0,21 \cdot (I_{\text{SPI}}) + 0,21 \cdot (I_{\text{SDI}}) + 0,21 \cdot (S_{\text{SPI}}) + 0,21 \cdot (S_{\text{SDI}}) + 0,02 \cdot (P) + 0,04 \cdot (E) + 0,10 \cdot (A)$$

Con el propósito de evaluar la coherencia de las comparaciones pareadas entre las variables presentes en la matriz de la Tabla 11 y validar los resultados derivados de dichas comparaciones, se llevó a cabo la prueba de consistencia de Saaty. Los resultados de esta evaluación indicaron un valor del 4 %, lo que demuestra que los valores asignados en las comparaciones pareadas realizadas mantienen coherencia, al ser inferior al 10 % (Saaty, 1990).

Tabla 11. Matriz de comparaciones pareadas

	Intensidad SPI	Intensidad SDI	Severidad SPI	Severidad SDI	Pendiente	Grado de erosión	Índice aridez
Intensidad SPI	1/1	1/1	1/1	1/1	9/1	5/1	3/1
Intensidad SDI	1/1	1/1	1/1	1/1	9/1	5/1	3/1
Severidad SPI	1/1	1/1	1/1	1/1	9/1	5/1	3/1
Severidad SDI	1/1	1/1	1/1	1/1	9/1	5/1	3/1
Pendiente	1/9	1/9	1/9	1/9	1/1	1/3	1/5
Grado de erosión	1/5	1/5	1/5	1/5	3/1	1/1	1/3
Índice aridez	1/3	1/3	1/3	1/3	5/1	3/1	1/1
Suma	4,64	4,64	4,64	4,64	45,00	24,33	13,53

Tabla 12. Matriz de comparaciones pareadas normalizada

	Intensidad SPI	Intensidad SDI	Severidad SPI	Severidad SDI	Pendiente	Grado de erosión	Índice aridez	Promedio
Intensidad SPI	0,22	0,22	0,22	0,22	0,20	0,21	0,22	0,21
Intensidad SDI	0,22	0,22	0,22	0,22	0,20	0,21	0,22	0,21
Severidad SPI	0,22	0,22	0,22	0,22	0,20	0,21	0,22	0,21
Severidad SDI	0,22	0,22	0,22	0,22	0,20	0,21	0,22	0,21
Pendiente	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
Grado de erosión	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,04	0,02	0,04
Índice aridez	0,07	0,07	0,07	0,07	0,11	0,12	0,07	0,10

Con los mapas reclasificados en formato raster y la obtención y validación de las ponderaciones de cada variable se procedió a realizar el proceso de álgebra de mapas en ArcGIS utilizando la herramienta *Raster Calculator*. Cada una de las 7 variables utilizadas influye en menor o mayor medida sobre la susceptibilidad de la sequía hidrometeorológica, el nivel de influencia lo determinan las ponderaciones asignadas y de esa manera se obtiene el mapa de susceptibilidad tal como se muestra en el esquema presentado en la Figura 33.

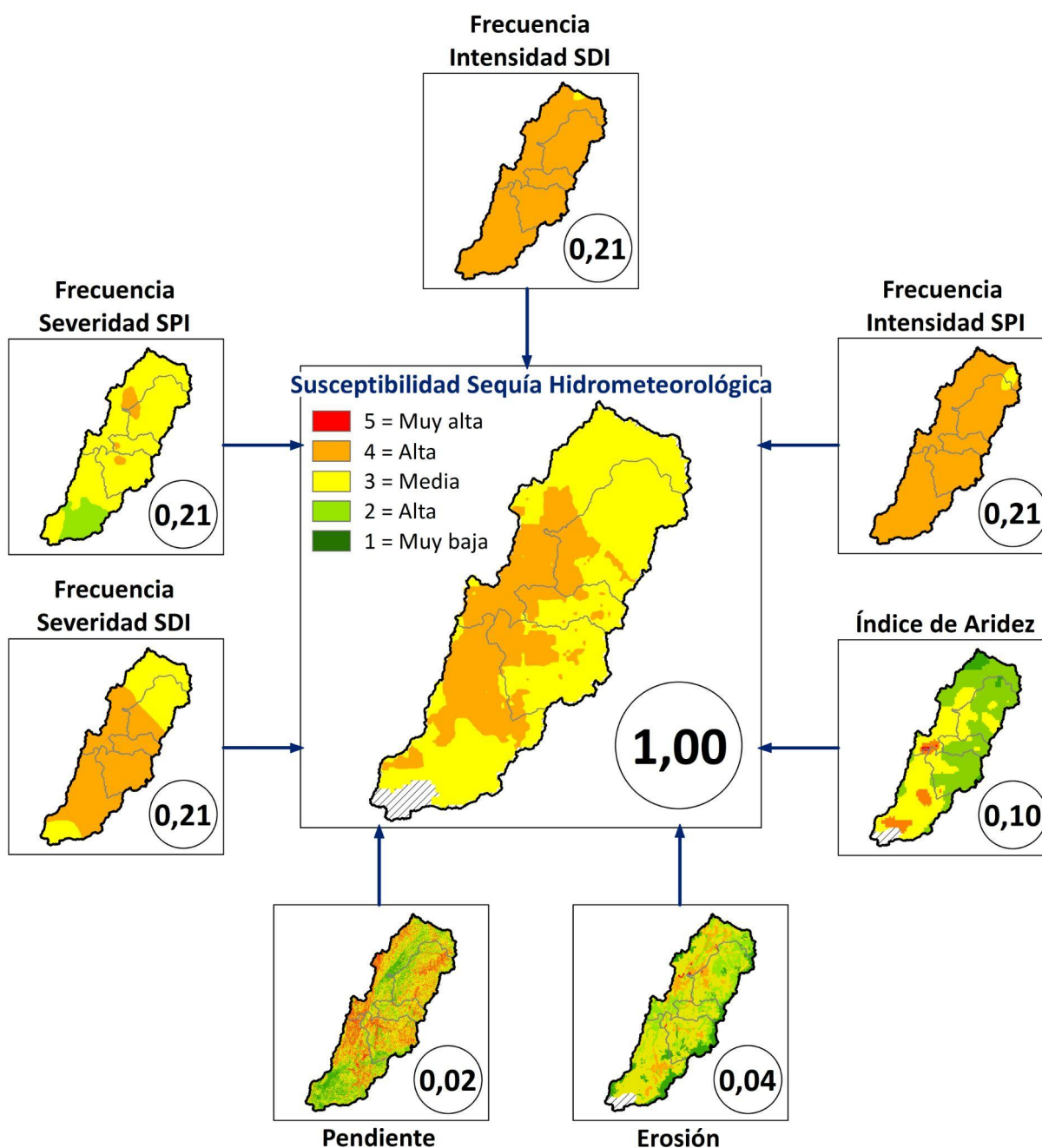
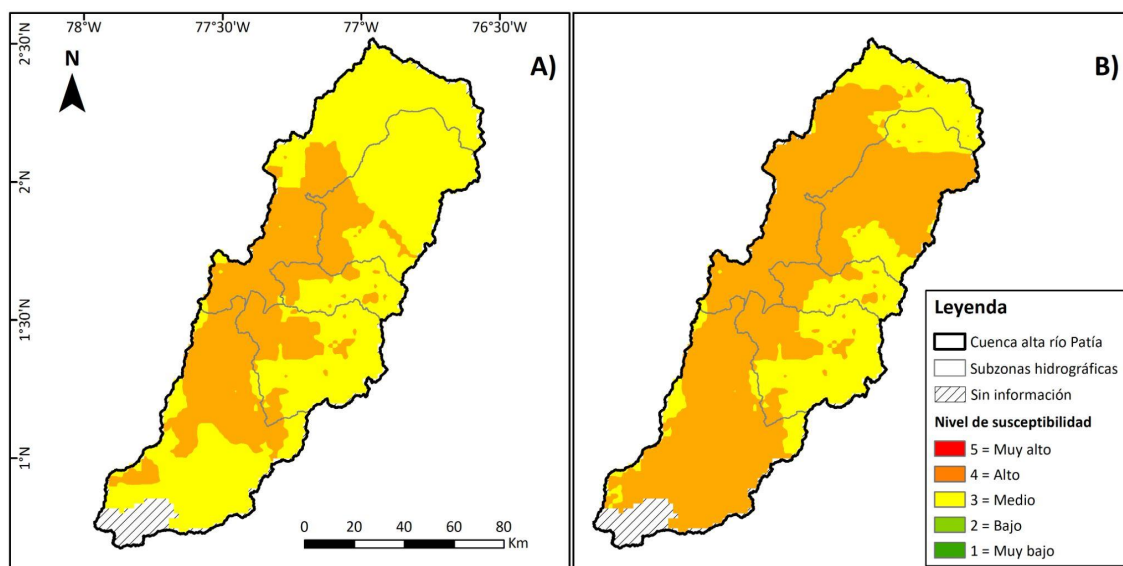


Figura 33. Esquemización del proceso para la obtención de la susceptibilidad

7.3.4 Análisis de susceptibilidad

En la Figura 34, se presenta el nivel de susceptibilidad a sequías hidrometeorológicas tanto para la escala semestral (Figura 34A) como anual (Figura 34B) en la cuenca alta del río Patía. En ambas escalas temporales, se observa una variación del nivel de susceptibilidad entre medio y alto. A nivel semestral (anual), se obtuvo que el 45 % (17 %) del territorio de la cuenca exhibe una susceptibilidad de nivel medio, mientras que el 52 % (80 %) muestra una susceptibilidad alta. Se anota que el 3 % del área del sur de la cuenca correspondiente al territorio ecuatoriano no presenta información ya que las variables erosión y aridez estaban disponibles solo para el territorio colombiano.



Es importante destacar que las sequías a nivel semestral muestran una mayor propensión a impactar el oeste de la cuenca, específicamente en las áreas bajas de las cinco subzonas hidrográficas. Por otro lado, en la escala anual, la susceptibilidad alta a la sequía se expande hacia el norte y el sur, afectando la mayor parte del territorio de las subzonas Guáitara, Guachicono y Alto Patía. En contraste, en las subzonas Juanambú y Mayo, las condiciones de susceptibilidad de la sequía anual son similares a las de la sequía semestral.

Si bien la anterior información indica que todas las subzonas hidrográficas se presenta una susceptibilidad alta a la sequía hidrometeorológica, se sugiere a los tomadores de decisiones priorizar las medidas de adaptación y mitigación frente a esta amenaza en las subzonas hidrográficas de los ríos Guáitara y Guachicono.

Por parte de la subzona del río Guáitara, Según la [Gobernación de Nariño \(2019a\)](#), la región sur del departamento, donde se encuentra esta subzona hidrográfica, es la que más aporta a la

producción agropecuaria, y la sequía es la amenaza de origen hidrometeorológico más incidente en la zona. Adicionalmente, 11 de los 15 municipios cuya producción agrícola es más vulnerable a eventos de heladas y sequías conforman la subzona Guáitara, estos municipios son: Consacá, Cumbal, El Tambo, Guaitarilla, Imues, La Florida, Pasto, Policarpa, Providencia, Sandoná y Túquerres ([CORPONARIÑO, 2017b](#); [Gobernación de Nariño, 2019b](#)).

En cuanto a la subzona del río Guachicón, de acuerdo con [MADS \(2016\)](#) 7 municipios localizados en el sur del departamento del Cauca han venido experimentando problemas de sequía y desertificación, de los cuales los municipios de Bolívar, Florencia, La Sierra, La Vega y Mercaderes hacen parte de esta subzona hidrográfica. Esta misma fuente además indica que si se intensifican estas condiciones en la región, la habitabilidad del sur del departamento puede cambiar drásticamente, incluso llegando a promover el desplazamiento poblacional.

8. CONCLUSIONES

- La precipitación mensual y el caudal medio mensual en la cuenca alta del río Patía se caracterizan por presentar un comportamiento bimodal. Sin embargo, el comportamiento de ambas variables se diferencia en 2 regiones. La precipitación presenta menores magnitudes hacia el sur y sureste de la cuenca, siendo abril el mes más lluvioso. Mientras que en el resto del territorio las precipitaciones incrementan su magnitud hacia el norte y el mes más lluvioso se presenta en noviembre. De manera similar los caudales presentan sus mayores magnitudes con un mes de rezago frente a la precipitación, siendo diciembre el mes más caudaloso en las subzonas Guáitara, Juanambú y Mayo, mientras que para las subzonas Guachicono y Alto Patía el mes más caudaloso es mayo.
- Los eventos de sequía hidrometeorológica a mayor escala temporal se hacen menos frecuentes, pero más duraderos. Entre 1985 y 2018 se identificaron 14 eventos de sequía meteorológica a escala semestral y 8 eventos a escala anual. Mientras que se identificaron 10 eventos de sequía hidrológica a escala semestral y 8 eventos a escala anual. Adicionalmente, se observó que durante un evento de sequía hidrológica pueden ocurrir eventos consecutivos de sequía meteorológica, en los que el retorno de las condiciones normales de precipitación entre el fin de un evento y el inicio del otro, no son suficientes para que retornen las condiciones normales en los caudales.
- Los eventos de mayor duración por lo general también son los más severos, mientras que los eventos más intensos usualmente son los que alcanzan magnitudes más extremas. El evento de sequía de mayor duración y severidad en la cuenca se desarrolló principalmente entre 2001-2003, mientras que el evento de mayor intensidad y magnitud extrema ocurrió entre 2015-2016.
- Los eventos de sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía están relacionados con la fase cálida de ENOS (El Niño), mientras que su fase fría (La Niña) se relacionan con el fin de los eventos de sequía y el desarrollo de eventos de exceso de precipitación. Sin embargo, algunos eventos de sequía hidrometeorológica pueden desarrollarse en condiciones neutras de ENOS.
- El análisis de correlaciones cruzadas entre la sequía meteorológica y la hidrológica a escala semestral y anual indicó que la correlación más alta para ambas escalas se obtiene en el rezago 0. No obstante, se recomienda realizar un análisis de correlaciones a escalas más pequeñas, como la mensual y trimestral, para explorar si con ellas se logra identificar correlaciones rezagadas.

- La primera componente principal del SPI y el SDI a escala semestral y anual en la cuenca alta del río Patía presentó correlaciones significativas inversas principalmente con las variables oceánicas analizadas en el Pacífico (NIÑO1+2, NIÑO3, NIÑO4, NIÑO3.4, ONI, EMI, PDO), e inversas con la variable atmosférica (SOI). Mientras que la segunda componente principal mostró las correlaciones más fuertes con las variables oceánicas del Atlántico (CAR, AMO, TSA y NTA).
- La cuenca alta del río Patía presenta un nivel de susceptibilidad a la sequía hidrometeorológica entre medio y alto. El nivel de susceptibilidad alto se concentra en las partes bajas de todas las subzonas hidrográficas para la escala semestral, mientras que con la escala anual la afectación se extiende hacia el sur y el norte de la cuenca. Las subzonas hidrográficas con un mayor nivel de susceptibilidad a la sequía hidrometeorológica son la del río Guáitara y la del río Guachicono.

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación representa una contribución significativa al conocimiento y el análisis del riesgo de sequías en la cuenca alta del río Patía, siendo el primero de los cuatro componentes fundamentales de un sistema de alerta temprana (SAT). Por ende, se sugiere que futuras investigaciones se centren en la identificación de los elementos expuestos a la sequía y en el análisis de la vulnerabilidad en las regiones con mayor susceptibilidad, para así complementar este componente inicial.

Otra área de investigación promisoría se encuentra en el desarrollo de estrategias de monitoreo y vigilancia de sequías, que constituye el segundo componente esencial de un SAT. Dada la vocación agropecuaria de la mayoría de los territorios que conforman la cuenca, este monitoreo y vigilancia debería ser llevado a cabo mediante un enfoque comunitario, con el propósito de construir herramientas que sean adecuadas y efectivas para la comunidad a lo largo del proceso de participación y desarrollo.

Los dos últimos componentes de un SAT abordan aspectos más logísticos, enfocándose en la difusión de alertas y la capacidad de respuesta. Se sugiere que estos componentes sean considerados como parte de un macroproyecto, permitiendo así el desarrollo y la integración de los cuatro componentes para la consolidación de un SAT frente a sequías.

Por otra parte, es esencial verificar si los eventos de sequía identificados a través de los índices e indicadores, junto con sus umbrales, reflejan la percepción que las comunidades tienen de los impactos económicos, sociales y ambientales. Por último, se recomienda investigar el comportamiento de la propagación de la sequía desde la perspectiva meteorológica hasta la agrícola e hidrológica, con el objetivo de caracterizar los impactos sociales, económicos y ambientales generados a medida que se transita por cada una de las tres fases de una sequía.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, A., Waseem, M., Ullah, W., Zhao, C. y Zhu, J. (2021). Spatiotemporal Analysis of Meteorological and Hydrological Droughts and Their Propagations. *Water*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/w13162237>
- Abdelkader, M. y Yerdelen, C. (2022). Hydrological drought variability and its teleconnections with climate indices. *Journal of Hydrology*, 605, 127290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127290>
- AghaKouchak, A. (2014). A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), 2485–2492. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2485-2014>
- Alvis-Guzmán, N., Zakzuk-Sierra, J., Vargas-Moranth, R., Alcocer-Olaciregui, A. y Parra-Padilla, D. (2017). Dengue, Chikunguña y Zika en Colombia 2015-2016. *Revista MVZ Córdoba*, 22, 5994-6003. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1069>
- Ángel Hernández, R. (2008). Caracterización de la sequía meteorológica en los climas Árido, Semiárido y Subhúmedo seco en los Llanos Centro Orientales de Venezuela, para el manejo de los recursos hídricos. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada].
- Arteaga, L. y Burbano, J. (2018). Efectos del cambio climático: Una mirada al Campo. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 35(2), 79-91. doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183502.93>
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H. y Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A. y Svensson, C. (2016). From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2483–2505. doi:10.5194/hess-20-2483-2016
- Basara, J., Maybourn, J., Peirano, C., Tate, J., Brown, P., Hoey, J. y Smith, B. (2013). “Drought and Associated Impacts in the Great Plains of the United States - A Review,” *International Journal of Geosciences*, 4(6B), 72-81. doi:10.4236/ijg.2013.46A2009
- Böhnisch, A., Mittermeier, M., Leduc, M., & Ludwig, R. (2021). Hot Spots and Climate Trends of Meteorological Droughts in Europe—Assessing the Percent of Normal Index in a Single-Model Initial-Condition Large Ensemble. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.716621>

- Cabrera Silva, S. (2019). Cambio global: una mirada desde la biología. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 35(1), 9-14. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-73482019000100009>
- Cadena, M. C., Pérez, J. y Martínez Gómez, M. T. (2018). Colombia. En Núñez Cobo, J. y Verbist, K. (Eds.), *Atlas de sequías de América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO y Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe - CAZALAC.
- Cai, W., Lengaigne, M., Borlace, S., Collins, M. Cowan, T., McPhaden, M. J., Timmermann, A., Power, S., Brown, J., Menkes, C., Ngari, A., Vincent, E. M. y Widlansky, M. J. (2012). More extreme swings of the South Pacific convergence zone due to greenhouse warming. *Nature*, 488, 365–369. <https://doi.org/10.1038/nature11358>
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S-W., An, S.-H., Cobb, K. M., Collins, M., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Takahashi, K., Timmermann, A., Vecchi, G., Watanabe, M. y Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Clim Change* 5(9), 849–859. <https://doi.org/10.1038/nclimate2743>
- Calle, Z., Murgueitio, E. y Caicedo, J. M. (2015). *Cómo enfrentar la sequía y la degradación extrema de las tierras*. En Cortés Dueñas, R. y Santana Díaz, A. (Eds.), Carta FEDEGAN. Fondo Nacional del Ganado- FEDEGAN.
- Canchala-Nastar, T., Carvajal-Escobar, Y., Alfonso-Morales, W., Loaiza Cerón, W. y Caicedo, E. (2019). Estimation of missing data of monthly rainfall in southwestern Colombia using artificial neural networks. *Data in Brief*, 26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104517>
- Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Cerón, W. L., Carvajal-Escobar, Y. y Caicedo-Bravo, E. (2020a). Teleconnections between Monthly Rainfall Variability and Large-Scale Climate Indices in Southwestern Colombia. *Water*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071863>
- Canchala, T., Loaiza Cerón, W., Francés, F., Carvajal-Escobar, Y., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Alfonso-Morales, W., Caicedo-Bravo, E. y de Souza, R. A. (2020b). Streamflow Variability in Colombian Pacific Basins and Their Teleconnections with Climate Indices. *Water*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020526>
- Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Carvajal-Escobar, Y., Cerón, W. L. y Caicedo-Bravo, E. (2020c). Monthly Rainfall Anomalies Forecasting for Southwestern Colombia Using Artificial Neural Networks Approaches. *Water*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092628>
- Canchala, T., Ocampo-Marulanda, C., Alfonso-Morales, W., Carvajal-Escobar, Y., Cerón, W. L. y Caicedo-Bravo, E. (2022). Techniques for monthly rainfall regionalization in southwestern Colombia. En *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (Vol. 94). Scielo.

- Carvajal Escobar, Y. y Mina Viveros, B. (2018). *Cambio climático*. En D'Alisa, G., Demaria, F. y Kallis, G. (Eds.), *Decrecimiento: un vocabulario para una nueva era*. Icaria.
- Castro, L. M. y Carvajal Escobar, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 15-25.
- Cerón, W. L., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y. y Souza, R. A. F. (2021). Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. En *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (Vol. 93). Scielo.
- Cerón, W., Andreoli, R., Kayano, M., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y. y Souza, R. (2021). Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. *Journal of Geosciences*, 93(1). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190674>
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y. y Esteban-Parra, M. J. (2015). Influence of tropical Pacific SST on seasonal precipitation in Colombia: prediction using El Niño and El Niño Modoki. *Climate Dynamics*, 44(5), 1293–1310. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2232-3>
- CORPONARIÑO (2017a). *Plan de gestión ambiental regional del departamento de Nariño 2016 - 2036*.
- CORPONARIÑO. (2017b). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Guáitara: Capítulo etnico territorios indígenas*.
- Corporación Andina de Fomento - CAF (2000). *El Fenómeno de El Niño 1997-1998, Memoria, Retos y Soluciones, Volumen III: Colombia*.
- De Oliveira-Júnior, J. F., de Gois, G., de Bodas Terassi, P. M., da Silva Junior, C. A., Cavalcante Blanco, C. J., Serafini Sobral, B. y Cruz Gasparini, K. A. (2018). Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro - Brazil. *Atmospheric Research*, 212, 91-105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.022>.
- Departamento Administrativo de la Función Pública - DAFP (2012). *Decreto 1640 de 2012*.
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2018a). *CONPES 3915: Lineamientos de política y estrategias para el desarrollo regional sostenible del macizo colombiano*.
- Departamento Nacional de Planeación - DNP (2018b). *CONPES 3947: Estrategias de actuación y coordinación para reducir las afectaciones ante la eventual ocurrencia de un fenómeno de variabilidad climática: El Niño 2018-2019*.

- Departamento para la Prosperidad Social - DPS (2021). *Mapa de pobreza para los municipios en Colombia 2018-2019*. <https://cutt.ly/TSuzdlm>.
- Díaz Merlano, M. y Gregory Robertson, K. (2013). *Cañones de Colombia*. Banco de Occidente.
- Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, M., Ríos, A. F., Simó, R. y Valladares, F. (2006). *Cambio global: Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC.
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M. y Trimble, P. J. (2001). The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077–2080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2000GL012745>
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., Mayer, D. A. y Cid-Serrano, L. (1999). How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7841–7848. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1998JC900109>
- Farah, D. (22 de abril de 1992). Colombia rations electricity, blaming drought. *The Washington Post*. <https://cutt.ly/VSudW1W>
- Forero, J. (26 de octubre de 2021). Severe Drought Hits South America. *The Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/articles/severe-drought-hits-south-america-11635240602>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Glantz, M. H. y Ramirez, I. J. (2020). Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to Enhance Societal Readiness for El Niño's Impacts. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(3), 394–403. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00275-w>
- Gobernación de Nariño (2016). *Plan de desarrollo departamental de Nariño 2016-2019*.
- Gobernación de Nariño (2020). *Plan de desarrollo departamental de Nariño 2020-2023*.
- Gobernación de Nariño. (2019a). *Plan departamental de extensión agropecuaria del departamento de Nariño PDEA - Nariño*.
- Gobernación de Nariño. (2019b). *Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial de Nariño*.
- Gobernación del Cauca (2020). *Plan departamental de desarrollo 2020-2023*.

- Gomes, M. S., Cavalcanti, I. F. de A., & Müller, G. V. (2021). 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100404>
- Gómez Blanco, J. A. y Cadena, M. C. (2018). *Actualización de las estadísticas de la sequía en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- González-López, N. y Carvajal-Escobar, Y. (2020). Caracterización de sequías hidrológicas en el río Cauca en su valle alto. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1), 235-265. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-06>
- Guenang, G. M. y Kamga, F. M. (2014). Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and Its Use to Assess Drought Occurrences in Cameroon over Recent Decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2310–2324. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0032.1>
- Guevara Díaz, J. M. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra Nueva Etapa*, 30(47), 79-102.
- Guevara, O., Abud, M., Trujillo, A. F., Suárez, C. F., Cuadros, L., López, C. y Flórez, C. (2016). *Plan Territorial de Adaptación Climática del departamento de Nariño*. CORPONARIÑO y WWF-Colombia.
- Guzmán, D., Ruíz, J. F. y Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP)*.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. y Black, W. C. (1995). *Multivariate Data Analysis: With Readings*, 4th ed.; Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, ISBN 978-0-02-349020-0.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. y Widhalm, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>
- Hurtado, G. (2012). *Sequía meteorológica y sequía agrícola en Colombia: incidencia y tendencias*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales - UDCA (2015). *Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia 2015*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2023). *Estudio nacional del agua 2022*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2018). *Metodología de la operación estadística de variables meteorológicas*.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y Universidad Nacional de Colombia - UNAL (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2018). *Anexo I: Glosario*. En Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield, T. (Eds.), *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*.
- Jahangir, M. H. y Yarahmadi, Y. (2020). Hydrological drought analyzing and monitoring by using Streamflow Drought Index (SDI) (case study: Lorestan, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 110. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5059-8>
- Jincy Rose, M. A. y Chithra, N. R. (2022). Establishing a statistical relation between meteorological and hydrological drought indices. *Water Supply*, 22(4), 4262–4277. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.048>
- Kaiser, H. F. y Rice, J. (1974). Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement*, 34(1), 111–117. doi:10.1177/001316447403400115
- Kassambara, A. (2017). *Multivariate Analysis I: Practical Guide to Cluster Analysis in R. Unsupervised Machine Learning*. Taylor y Francis Group.
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T. y Prather, M. (2007). *Historical Overview of Climate Change*. En Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. y Miller, H.L (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Lee, H. F. y Zhang, D. D. (2011). Relationship between NAO and drought disasters in northwestern China in the last millennium. *Journal of Arid Environments*, 75(11), 1114-1120, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.06.008>.
- Lloyd-Hughes, B. y Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571–1592. doi:10.1002/joc.846
- Loaiza Cerón, W. (2015). *Evaluación de sequías meteorológicas y procesos de adaptación de las comunidades agrícolas de la cuenca del Río Dagua - Valle del Cauca. Caso de estudio*:

- microcuena la Centella* [Tesis de maestría, Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/8003>.
- Loaiza Cerón, W., Carvajal-Escobar, Y., Andreoli de Souza, R. V., Toshie Kayano, M. y González López, N. (2020). Spatio-temporal analysis of the droughts in Cali, Colombia and their primary relationships with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) between 1971 and 2011. *Atmósfera*, 33(1), 51-69..<https://doi.org/10.20937/atm.52639>
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Project Euclid*, 5(1), 281-297.
- Malik, A., Kumar, A., Salih, S. y Yaseen, Z. (2020). *Hydrological Drought Investigation Using Streamflow Drought Index* (pp. 63–88). Deo, R. C., Samui, P., Kisi, O. y Mundher Yaseen, Z. (Eds.), *Intelligent Data Analytics for Decision-Support Systems in Hazard Mitigation*. Springer, Singapore.
- Mantua, N. J. y Hare, S. R. (2002). The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 58(1), 35–44. <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>
- Martín, L. (2016). *¡Es Niño! Impacto económico en la Región Andina*. Banco Interamericano de Desarrollo -BID.
- Mayorga Márquez, R. y Hurtado, G. (2006). *La sequía en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J. y Kleist J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, Estados Unidos.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS (2016). *Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Departamento de Cauca 2040*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT (2005). *Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía en Colombia (PAN)*.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - MITECO. (2022). *Estrategia nacional de lucha contra la desertificacion*.
- Miró, J. J., Caselles, V. y Estrela, M. J. (2017). Multiple imputation of rainfall missing data in the Iberian Mediterranean context. *Atmospheric Research*, 197, 313–330. doi:10.1016/j.atmosres.2017.07.016
- Mishra, A. K. y Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.

- Montealegre Bocanegra, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Nalbantis, I. y Tsakiris, G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881–897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
- National Aeronautics and Space Administration - NASA (26 de octubre de 2020). *Severe Drought in South America*. Earth Observatory. <https://cutt.ly/xSui1ub>
- Ocampo-Marulanda, C., Fernández-Álvarez, C., Cerón, W. L., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y. y Alfonso-Morales, W. (2022a). A spatiotemporal assessment of the high-resolution CHIRPS rainfall dataset in southwestern Colombia using combined principal component analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101739>
- Ocampo-Marulanda, C., Carvajal-Escobar, Y., Canchala, T., Cerón, W. L., Fernández-Álvarez, C., y Alfonso-Morales, W. (2022b). *Teleconexión entre la sequía meteorológica y la climatología global en el departamento de Nariño* (pp. 16-20). En Benítez Muñoz, S. J. y Parrado Contreras, H. F. (Eds.) 25 años de formación, investigación e innovación en ingeniería para las regiones. Unisangil Editorial.
- Ocampo-Marulanda, C. (2022c). *Evaluación de la sequía meteorológica usando inteligencia artificial en el departamento de Nariño - Colombia*. [Tesis de maestría, Universidad del Valle].
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO (2010). *Atlas pluviométrico del Ecuador*.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM (2012). *Índice normalizado de precipitación - Guía del usuario*.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM (2014). El Niño/Oscilación del Sur. *OMM Tiempo-Clima-Agua*, N°1145, 12.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM (2021a). *Atlas de la OMM sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970–2019)*.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM (2021b). El estado del clima en América Latina y el Caribe 2020.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM y Asociación Mundial para el Agua - GWP (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía*.

- Ortega Gaucín, D. (2013). Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. *Ciencia UANL*, 16(61) 8-15.
- Otto, F. E. L., Haustein, K., Uhe, P., Coelho, C. A. S., Aravequia, J. A., Almeida, W., King, A., Coughlan de Perez, E., Wada, Y., Jan van Oldenborgh, G., Haarsma, R., van Aalst, M., & Cullen, H. (2015). Factors Other Than Climate Change, Main Drivers of 2014/15 Water Shortage in Southeast Brazil. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), S35–S40. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00120.1>
- Parra, M., Higuera, L. y Rodríguez, A. (2018). *Potencial de crecimiento verde, departamento de Nariño*. Global Green Growth Institute Colombia - GGGI.
- Peñalba, O. y Rivera, J. (2012). *Uso de la distribución gamma para la representación de la precipitación mensual en el sudeste de Sudamérica. Cambios espacio-temporales en sus parámetros*. Conferencia. XI Congreso Argentino de Meteorología (CONGREMET). Mendoza, Argentina.
- Penland, C. y Matrosova, L. (1998). Prediction of Tropical Atlantic Sea Surface Temperatures Using Linear Inverse Modeling. *Journal of Climate*, 11(3), 483–496. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<0483:POTASS>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<0483:POTASS>2.0.CO;2)
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28, 201–222.
- Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021). A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544>
- Rohter, L. (14 de mayo de 1978). Devastating Drought Spreads Havoc in Brazil's Farm Area. *The Washington Post*. <https://cutt.ly/7SuyhtB>
- Ropelewski, C. F. y Jones, P. D. (1987). An Extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review*, 115(9), 2161–2165. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<2161:AEOTTS>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<2161:AEOTTS>2.0.CO;2)
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sivakumar, M. V. K., Stefanski, R., Bazza, M., Zelaya, S., Wilhite, D. y Magalhaes, A. R. (2014). High Level Meeting on National Drought Policy: Summary and Major Outcomes. *Weather and Climate Extremes*, 3, 126–132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.03.007>
- Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., Christensen, O. B., Coppola, E., Evans, J., Geyer, B., Giorgi, F., Hadjinicolaou, P., Jacob, D., Katzfey, J.,

- Koenigk, T., Laprise, R., Lennard, C. J., Kurnaz, M. L., Li, D., Llopart, M., McCormick, N., Naumann, G., Nikulin, G., Ozturk, T., Panitz, H., Porfirio da Rocha, R., Rockel, B., Solman, S. A., Syktus, J., Tangang, F., Teichmann, C., Vautard, R., Vogt, J. V., Winger, K., Zittis, G., & Dosio, A. (2020). Future Global Meteorological Drought Hot Spots: A Study Based on CORDEX Data. *Journal of Climate*, 33(9), 3635-3661 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1>.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P. y Vogt, J. (2013). World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792–2804. doi:10.1002/joc.3875
- Tabari, H., Nikbakht, J. y Hosseinzadeh Talaee, P. (2013). Hydrological Drought Assessment in Northwestern Iran Based on Streamflow Drought Index (SDI). *Water Resour Manage*, 23, 137-151. DOI 10.1007/s11269-012-0173-3
- Tigkas, D., Vangelis, H. y Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8(3), 697–709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
- Tomlin, C. D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice-Hall.
- Trenberth, K. E. y Fasullo, J. T. (2013). An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1(1), 19–32. <https://doi.org/10.1002/2013EF000165>
- Trenberth, K. E. y Stepaniak, D. P. (2001). Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697–1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2)
- Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G. Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K.R y Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Clim Change*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Triana-Madrid, J. C. (2021). *Evaluación de la sequía en el departamento de Nariño mediante el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) utilizando inteligencia artificial* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/21520>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD (2016). *Boletín No. 146: tras 15 meses de El Niño se da por terminada la temporada seca en Colombia*.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, Ministerio de relaciones exteriores y United Nations Convention to

- Combat Desertification - UNCCD (2018). *Estrategia nacional para la gestión integral de la sequía en Colombia*.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR (2021). *GAR Special Report on Drought 2021*.
- Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2016). *Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014*. Actas del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú. <https://cutt.ly/RSuABum>
- Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149–4162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Van Dijk, A. I. J. M., Beck, H. E., Crosbie, R. S., de Jeu, R. A. M., Liu, Y. Y., Podger, G. M., Timbal, B. y Viney, N. R. (2013). The Millennium Drought in southeast Australia (2001-2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research*, 49(2), 1040–1057. doi:10.1002/wrcr.20123
- Velásquez-Restrepo, M. y Poveda, G. (2019). Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana. *DYNA*, 86(208), 297-306. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73587>
- Velásquez, A. y Rosales, C. (2001). *Los pasos de El Niño en Colombia 1980 – 2001: Algunas interpretaciones, oportunidades y utilizaciones*.
- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Kenawy A. E., Azorin-Molina, C., Morán-Tejada, E., Pasho, E., Zabalza, J., Beguería, S. y Angulo-Martínez, M. (2011). The NAO Impact on Droughts in the Mediterranean Region. En Vicente-Serrano S. M. y Trigo R. M. (eds), *Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1372-7_3
- Vogt, J., Naumann, G., Masante, D., Spinoni, J., Cammalleri, C., Erian, W., Pischke, F., Pulwarty, R. y Marinho Ferreira Barbosa, P. (2018). *Drought Risk Assessment and Management*. doi:10.2760/919458
- Wilhite, D. A. y Glantz, M. H. (1985). Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. doi:10.1080/02508068508686328
- Wilks, D. S. (2019). *Chapter 13 - Principal Component (EOF) Analysis* (D. S. B. T.-S. M. in the A. S. (Fourth E. Wilks (ed.); pp. 617–668). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815823-4.00013-4>
- Wolde-Georgis, T. (1 de marzo de 1997). El Niño and Drought Early Warning in Ethiopia. *Internet Journal of African Studies*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1589710
- Yevjevich, V. (1967). *An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Drought*. Hydrology Paper No. 23, Colorado State University.

- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. y Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(1), 333–349. <http://www.jstor.org/stable/envirevi.19.333>
- Zhang, J., Chen, H., & Zhang, Q. (2019). Extreme drought in the recent two decades in northern China resulting from Eurasian warming. *Climate Dynamics*, 52(5), 2885–2902. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4312-2>

11. ANEXOS

Anexo 1. Información general estaciones meteorológicas IDEAM

N°	Código	Nombre	ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m.s.n.m)
1	52040050	APONTE	APO	-77,031	1,397	1.800
2	52040160	BERRUECOS	BER	-77,135	1,505	2.200
3	52050060	RIO BOBO	BOB	-77,300	1,109	2.983
4	52025010	BOLIVAR	BOL	-77,004	1,830	1.510
5	52055030	BOMBONA	BOM	-77,465	1,184	1.493
6	52040040	BUESACO	BUE	-77,150	1,404	2.001
7	52050130	CHILES	CHI	-77,848	0,812	3.100
8	52050110	CUMBAL	CUM	-77,787	0,908	3.111
9	52025080	ESTRECHO PATIA	EPT	-77,120	1,960	720
10	52010140	GUASCA LA	GCA	-77,429	1,594	500
11	52020010	GUACHICONO	GCH	-77,003	2,046	720
12	52050050	GUACHAVES	GCV	-77,680	1,221	2.834
13	52050100	GUALMATAN	GUA	-77,581	0,907	2.830
14	52030060	HIDROMAYO CAMP	HID	-77,015	1,666	1.820
15	52050090	IMUES	IMU	-77,500	1,055	2.550
16	52010060	MAMACONDE	MAM	-77,216	1,955	650
17	52025020	MILAGROS LOS	MLG	-76,892	1,753	2.300
18	52040070	NARINO	NAR	-77,355	1,283	2.590
19	52010050	PARRAGA	PAR	-76,788	2,232	1.500
20	52080010	PISANDA	PIS	-77,506	1,651	826
21	52050010	PENOL EL	PÑL	-77,439	1,454	1.620
22	52050120	PUERRES	PUE	-77,503	0,888	2.817
23	52010100	QUILCASE	QUI	-76,849	2,332	916
24	52040060	ROSAL DEL MONTE	RDM	-77,174	1,287	2.568
25	52020050	RODEO EL	ROD	-76,992	1,880	1.400
26	52010040	ROSAS	ROS	-76,738	2,262	1.750
27	52010080	SAJANDI	SAJ	-77,050	2,187	750
28	52050020	SAMANIEGO	SAM	-77,591	1,341	1.700
29	52050040	SANDONA	SAN	-77,479	1,322	1.786
30	52045030	SAN BERNARDO	SBN	-77,033	1,539	2.190
31	52020070	SANTIAGO	SGO	-76,783	1,814	2.180
32	52045040	TAMINANGO	TAM	-77,268	1,549	1.875
33	52055060	TANAMA	TAN	-77,583	1,374	1.500
34	52050080	TANGUA	TGA	-77,392	1,094	2.420
35	52030030	UNION LA	UNI	-77,133	1,583	1.745

Anexo 2. Información general estaciones hidrológicas IDEAM

N°	Código	Nombre	ID	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m.s.n.m)
1	52057030	AGROYACO	AGR	-77,442	1,574	480
2	52037010	CANADA LA	CAN	-77,015	1,666	1.750
3	52057040	CARLOSAMA	CAR	-77,686	0,844	2.920
4	52047030	BOCATOMA CENTENARIO	CEN	-77,248	1,201	2.740
5	52017030	LA FONDA	FON	-77,047	2,148	700
6	52027010	GUACHICONO	GCH	-77,003	2,046	720
7	52077020	LOS NORTES	NOR	-77,531	1,741	340
8	52057010	PILCUAN	PIL	-77,473	1,022	1.780
9	52017001	PUERTO NUEVO PATIA	PNP	-77,246	1,909	525
10	52047040	PROVIDENCIA	PRV	-77,301	1,432	1.250
11	52017080	PUENTE CARRETERA	PTC1	-77,210	1,972	615
12	52017100	PUENTE CARRETERA	PTC2	-76,850	2,360	918
13	52027030	PUENTE FIERRO - GUACHICONO	PTF	-76,899	2,157	900
14	52017010	PUENTE GUASCAS	PTG	-77,429	1,594	450
15	52047020	PUENTE JUANAMBU	PTJ	-77,310	1,517	760
16	52077010	PUENTE PUSMEO	PTP	-77,479	1,624	380
17	52017130	PUENTE COLGANTE TIMBIO	PTT	-77,004	2,218	740
18	52017070	BOCATOMA SAJANDI	SAJ	-77,058	2,217	740
19	52057050	SAN PEDRO	SPE	-77,482	1,383	850
20	52047010	UNIVERSIDAD	UNI	-77,293	1,234	2.500
21	52057060	YUNGUILLA	YUN	-77,584	1,353	1.450

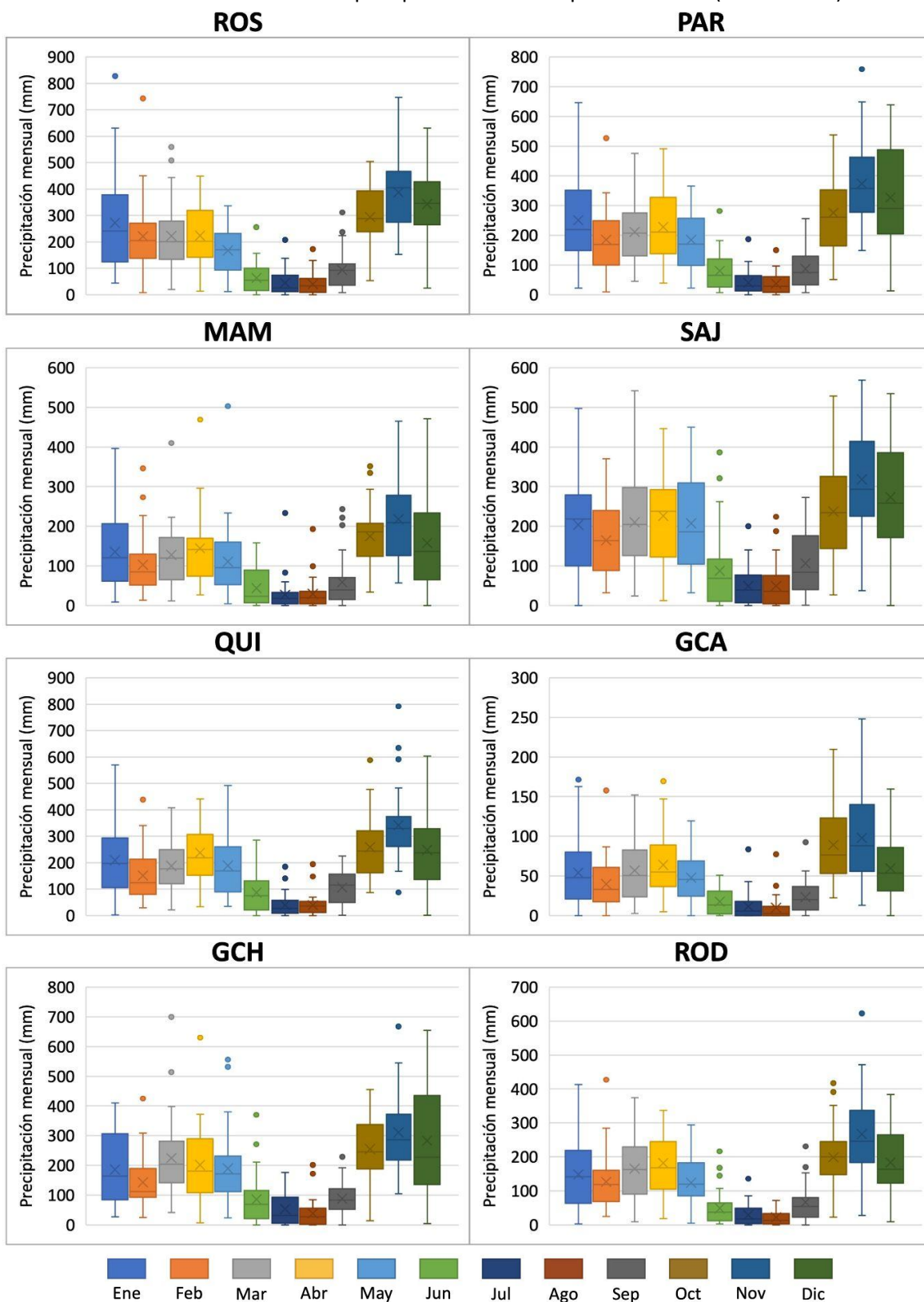
Anexo 3. Matriz de correlaciones entre series de precipitación mensual

	ROS	PAR	MAM	SAJ	QUI	GCA	GCH	ROD	SGO	BOL	MLG	EPT	UNI	HID	BUE	APO	RDM	NAR	BER	SBN	TAM	PÑL	SAM	SAN	GCV	BOB	TGA	IMU	GUA	CUM	PUE	CHI	BOM	TAN	PIS
ROS	1,00	0,85	0,69	0,72	0,77	0,65	0,75	0,76	0,80	0,79	0,85	0,74	0,75	0,77	0,69	0,77	0,78	0,81	0,81	0,83	0,67	0,66	0,60	0,51	0,74	0,58	0,71	0,69	0,47	0,64	0,41	0,56	0,72	0,69	0,73
PAR	0,85	1,00	0,76	0,81	0,82	0,67	0,78	0,80	0,75	0,83	0,85	0,79	0,80	0,81	0,73	0,75	0,79	0,83	0,85	0,85	0,74	0,71	0,64	0,57	0,76	0,59	0,77	0,73	0,49	0,66	0,43	0,58	0,77	0,73	0,76
MAM	0,69	0,76	1,00	0,69	0,73	0,65	0,74	0,77	0,66	0,78	0,75	0,80	0,78	0,76	0,70	0,68	0,73	0,74	0,75	0,75	0,70	0,61	0,59	0,72	0,57	0,69	0,70	0,51	0,62	0,45	0,55	0,71	0,72	0,70	
SAJ	0,72	0,81	0,69	1,00	0,76	0,58	0,73	0,72	0,63	0,73	0,72	0,71	0,76	0,71	0,67	0,65	0,72	0,76	0,77	0,78	0,74	0,66	0,62	0,61	0,72	0,57	0,70	0,70	0,55	0,67	0,45	0,58	0,72	0,67	0,65
QUI	0,77	0,82	0,73	0,76	1,00	0,67	0,75	0,75	0,70	0,80	0,78	0,77	0,80	0,75	0,74	0,66	0,76	0,77	0,79	0,80	0,77	0,72	0,70	0,57	0,75	0,61	0,74	0,72	0,51	0,68	0,43	0,61	0,78	0,75	0,72
GCA	0,65	0,67	0,65	0,58	0,67	1,00	0,65	0,73	0,65	0,69	0,71	0,71	0,70	0,69	0,60	0,64	0,69	0,71	0,67	0,69	0,71	0,78	0,64	0,59	0,73	0,53	0,66	0,67	0,48	0,60	0,40	0,50	0,70	0,75	0,79
GCH	0,75	0,78	0,74	0,73	0,75	0,65	1,00	0,74	0,73	0,75	0,76	0,76	0,77	0,73	0,70	0,68	0,71	0,76	0,76	0,75	0,74	0,69	0,59	0,64	0,73	0,63	0,69	0,70	0,53	0,66	0,52	0,56	0,72	0,70	0,68
ROD	0,76	0,80	0,77	0,72	0,75	0,73	0,74	1,00	0,72	0,88	0,82	0,81	0,82	0,80	0,73	0,75	0,79	0,81	0,82	0,82	0,79	0,77	0,69	0,63	0,79	0,61	0,76	0,77	0,52	0,68	0,43	0,57	0,78	0,78	0,74
SGO	0,80	0,75	0,66	0,63	0,70	0,65	0,73	0,72	1,00	0,74	0,85	0,69	0,72	0,78	0,70	0,78	0,79	0,80	0,77	0,80	0,65	0,65	0,53	0,51	0,67	0,62	0,71	0,72	0,50	0,61	0,52	0,47	0,70	0,63	0,68
BOL	0,79	0,83	0,78	0,73	0,80	0,69	0,75	0,88	0,74	1,00	0,85	0,81	0,85	0,85	0,77	0,75	0,81	0,85	0,85	0,85	0,81	0,78	0,74	0,59	0,81	0,62	0,79	0,78	0,55	0,70	0,43	0,61	0,81	0,79	0,75
MLG	0,85	0,85	0,75	0,72	0,78	0,71	0,76	0,82	0,85	0,85	1,00	0,81	0,84	0,89	0,81	0,84	0,89	0,88	0,89	0,91	0,78	0,74	0,69	0,57	0,81	0,67	0,82	0,81	0,54	0,74	0,49	0,62	0,81	0,77	0,75
EPT	0,74	0,79	0,80	0,71	0,77	0,71	0,76	0,81	0,69	0,81	0,81	1,00	0,78	0,80	0,75	0,73	0,77	0,78	0,80	0,78	0,79	0,74	0,71	0,58	0,74	0,58	0,74	0,73	0,51	0,65	0,44	0,58	0,75	0,78	0,72
UNI	0,75	0,80	0,78	0,76	0,80	0,70	0,77	0,82	0,72	0,85	0,84	0,78	1,00	0,84	0,80	0,78	0,84	0,85	0,90	0,87	0,88	0,79	0,76	0,65	0,82	0,67	0,80	0,82	0,55	0,75	0,49	0,65	0,86	0,83	0,74
HID	0,77	0,81	0,76	0,71	0,75	0,69	0,73	0,80	0,78	0,85	0,89	0,80	0,84	1,00	0,77	0,79	0,83	0,83	0,87	0,86	0,78	0,75	0,68	0,59	0,77	0,64	0,80	0,78	0,54	0,69	0,47	0,57	0,80	0,78	0,75
BUE	0,69	0,73	0,70	0,67	0,74	0,60	0,70	0,73	0,70	0,77	0,81	0,75	0,80	0,77	1,00	0,75	0,83	0,79	0,83	0,82	0,78	0,72	0,68	0,58	0,75	0,67	0,80	0,78	0,57	0,72	0,48	0,63	0,77	0,72	0,64
APO	0,77	0,75	0,68	0,65	0,66	0,64	0,68	0,75	0,78	0,75	0,84	0,73	0,78	0,79	0,75	1,00	0,85	0,82	0,82	0,81	0,70	0,67	0,63	0,49	0,74	0,67	0,81	0,77	0,51	0,68	0,53	0,57	0,73	0,70	0,70
RDM	0,78	0,79	0,73	0,72	0,76	0,69	0,71	0,79	0,79	0,81	0,89	0,77	0,84	0,83	0,83	0,85	1,00	0,88	0,90	0,86	0,80	0,75	0,68	0,57	0,80	0,75	0,86	0,85	0,59	0,77	0,58	0,65	0,81	0,76	0,73
NAR	0,81	0,83	0,74	0,76	0,77	0,71	0,76	0,81	0,80	0,85	0,88	0,78	0,85	0,83	0,79	0,82	0,88	1,00	0,90	0,88	0,79	0,74	0,71	0,59	0,83	0,72	0,82	0,83	0,59	0,75	0,51	0,64	0,84	0,79	0,78
BER	0,81	0,85	0,75	0,77	0,79	0,67	0,76	0,82	0,77	0,85	0,89	0,80	0,90	0,87	0,83	0,82	0,90	0,90	1,00	0,91	0,84	0,73	0,71	0,60	0,81	0,71	0,84	0,83	0,59	0,77	0,54	0,64	0,85	0,79	0,75
SBN	0,83	0,85	0,75	0,78	0,80	0,69	0,75	0,82	0,80	0,85	0,91	0,78	0,87	0,86	0,82	0,81	0,86	0,88	0,91	1,00	0,81	0,74	0,71	0,60	0,82	0,67	0,83	0,81	0,54	0,74	0,49	0,65	0,83	0,77	0,75
TAM	0,67	0,74	0,75	0,74	0,77	0,71	0,74	0,79	0,65	0,81	0,78	0,79	0,88	0,78	0,78	0,70	0,80	0,79	0,84	0,81	1,00	0,80	0,75	0,72	0,81	0,66	0,79	0,80	0,58	0,74	0,48	0,66	0,81	0,83	0,73
PÑL	0,66	0,71	0,70	0,66	0,72	0,78	0,69	0,77	0,65	0,78	0,74	0,74	0,79	0,75	0,72	0,67	0,75	0,74	0,73	0,74	0,80	1,00	0,75	0,71	0,79	0,62	0,75	0,76	0,53	0,66	0,44	0,59	0,78	0,83	0,77
SAM	0,60	0,64	0,61	0,62	0,70	0,64	0,59	0,69	0,53	0,74	0,69	0,71	0,76	0,68	0,68	0,63	0,68	0,71	0,71	0,71	0,75	0,75	1,00	0,55	0,80	0,55	0,70	0,72	0,51	0,67	0,37	0,61	0,75	0,87	0,67
SAN	0,51	0,57	0,59	0,61	0,57	0,59	0,64	0,63	0,51	0,59	0,57	0,58	0,65	0,59	0,58	0,49	0,57	0,59	0,60	0,60	0,72	0,71	0,55	1,00	0,69	0,50	0,59	0,61	0,51	0,60	0,44	0,54	0,65	0,69	0,60
GCV	0,74	0,76	0,72	0,72	0,75	0,73	0,73	0,79	0,67	0,81	0,81	0,74	0,82	0,77	0,75	0,74	0,80	0,83	0,81	0,82	0,81	0,79	0,80	0,69	1,00	0,69	0,79	0,81	0,58	0,77	0,49	0,66	0,83	0,86	0,77
BOB	0,58	0,59	0,57	0,57	0,61	0,53	0,63	0,61	0,62	0,62	0,67	0,58	0,67	0,64	0,67	0,67	0,75	0,72	0,71	0,67	0,66	0,62	0,55	0,50	0,69	1,00	0,75	0,76	0,62	0,70	0,66	0,60	0,67	0,60	0,55
TGA	0,71	0,77	0,69	0,70	0,74	0,66	0,69	0,76	0,71	0,79	0,82	0,74	0,80	0,80	0,80	0,81	0,86	0,82	0,84	0,83	0,79	0,75	0,70	0,59	0,79	0,75	1,00	0,87	0,66	0,80	0,59	0,68	0,81	0,76	0,70
IMU	0,69	0,73	0,70	0,70	0,72	0,67	0,70	0,77	0,72	0,78	0,81	0,73	0,82	0,78	0,78	0,77	0,85	0,83	0,83	0,81	0,80	0,76	0,72	0,61	0,81	0,76	0,87	1,00	0,65	0,80	0,61	0,66	0,83	0,77	0,69
GUA	0,47	0,49	0,51	0,55	0,51	0,48	0,53	0,52	0,50	0,55	0,54	0,51	0,55	0,54	0,57	0,51	0,59	0,59	0,59	0,54	0,58	0,53	0,51	0,51	0,58	0,62	0,66	0,65	1,00	0,71	0,66	0,51	0,60	0,54	0,49
CUM	0,64	0,66	0,62	0,67	0,68	0,60	0,66	0,68	0,61	0,70	0,74	0,65	0,75	0,69	0,72	0,68	0,77	0,75	0,77	0,74	0,74	0,66	0,67	0,60	0,77	0,70	0,80	0,80	0,71	1,00	0,65	0,73	0,77	0,72	0,61
PUE	0,41	0,43	0,45	0,45	0,43	0,40	0,52	0,43	0,52	0,43	0,49	0,44	0,49	0,47	0,48	0,53	0,58	0,51	0,54	0,49	0,48	0,44	0,37	0,44	0,49	0,66	0,59	0,61	0,66	0,65	1,00	0,52	0,53	0,45	0,37
CHI	0,56	0,58	0,55	0,58	0,61	0,50	0,56	0,57	0,47	0,61	0,62	0,58	0,65	0,57	0,63	0,57	0,65	0,64	0,64	0,65	0,66	0,59	0,61	0,54	0,66	0,60	0,68	0,66	0,51	0,73	0,52	1,00	0,63	0,63	0,50
BOM	0,72	0,77	0,71	0,72	0,78	0,70	0,72	0,78	0,70	0,81	0,81	0,75	0,86	0,80	0,77	0,73	0,81	0,84	0,85	0,83	0,81	0,78	0,75	0,65	0,83	0,67	0,81	0,830							

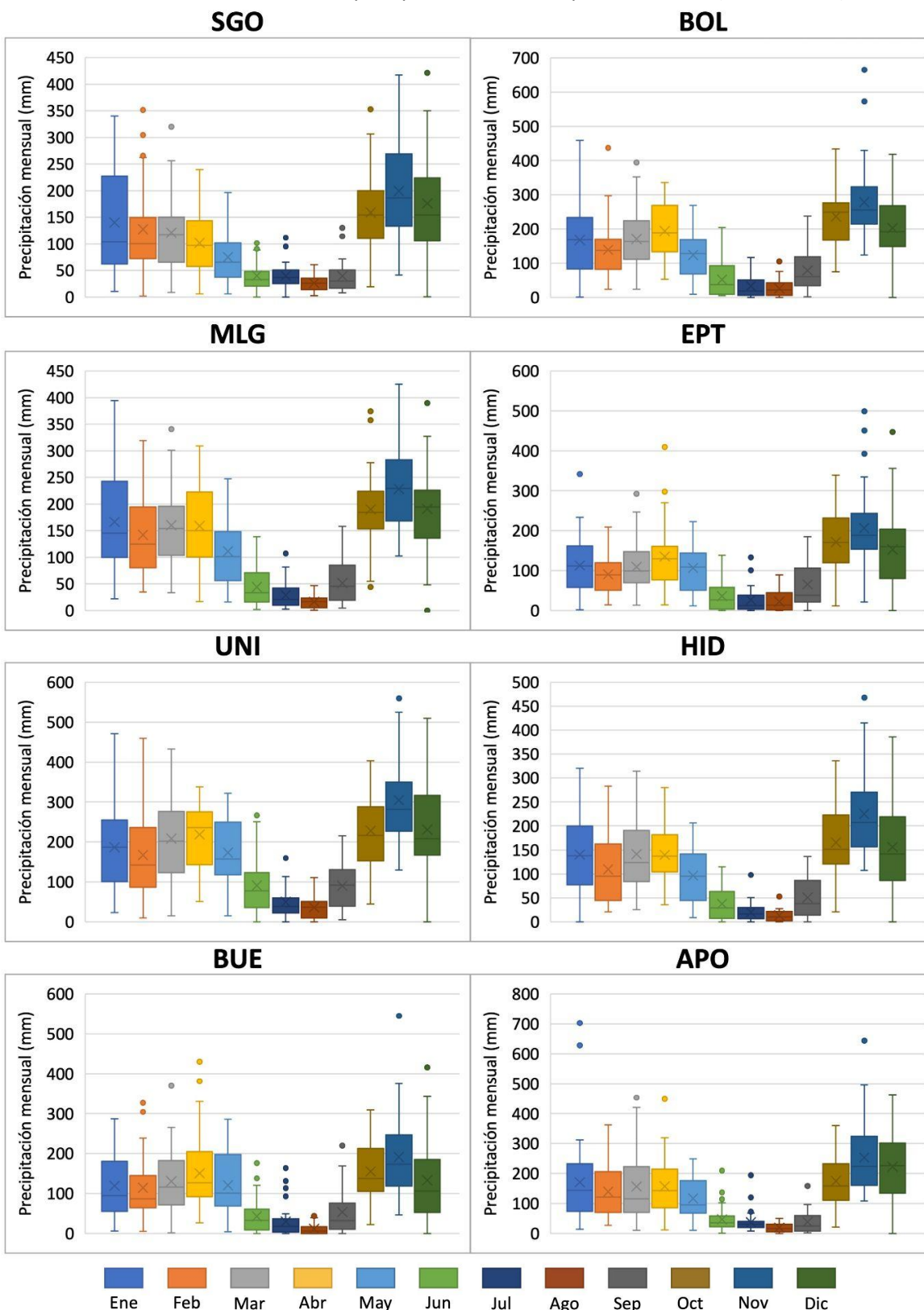
Anexo 4. Matriz de correlaciones entre series de caudal medio mensual

	CAR	YUN	PIL	SPE	AGR	CEN	UNI	PRV	PTJ	CAN	PTF	GCH	PTC2	PTT	SAJ	FON	PTC1	PNP	PTG	PTP	NOR
CAR	1,00	0,67	0,67	0,67	0,71	0,57	0,65	0,70	0,60	0,45	0,60	0,63	0,56	0,61	0,58	0,62	0,43	0,63	0,68	0,69	0,70
YUN	0,67	1,00	0,51	0,61	0,73	0,53	0,63	0,75	0,57	0,43	0,67	0,75	0,73	0,72	0,68	0,74	0,62	0,76	0,79	0,80	0,79
PIL	0,67	0,51	1,00	0,83	0,81	0,66	0,64	0,59	0,68	0,73	0,53	0,46	0,39	0,45	0,43	0,42	0,23	0,43	0,53	0,58	0,59
SPE	0,67	0,61	0,83	1,00	0,92	0,69	0,76	0,80	0,77	0,72	0,62	0,56	0,52	0,53	0,50	0,54	0,37	0,55	0,66	0,74	0,68
AGR	0,71	0,73	0,81	0,92	1,00	0,70	0,81	0,86	0,77	0,71	0,66	0,69	0,64	0,68	0,65	0,68	0,52	0,70	0,78	0,82	0,76
CEN	0,57	0,53	0,66	0,69	0,70	1,00	0,75	0,62	0,71	0,73	0,57	0,51	0,43	0,47	0,47	0,46	0,40	0,47	0,55	0,59	0,62
UNI	0,65	0,63	0,64	0,76	0,81	0,75	1,00	0,82	0,73	0,68	0,64	0,70	0,62	0,63	0,60	0,65	0,52	0,68	0,74	0,75	0,72
PRV	0,70	0,75	0,59	0,80	0,86	0,62	0,82	1,00	0,74	0,60	0,72	0,78	0,75	0,74	0,69	0,76	0,59	0,77	0,83	0,84	0,81
PTJ	0,60	0,57	0,68	0,77	0,77	0,71	0,73	0,74	1,00	0,74	0,69	0,62	0,60	0,60	0,57	0,65	0,40	0,63	0,74	0,76	0,72
CAN	0,45	0,43	0,73	0,72	0,71	0,73	0,68	0,60	0,74	1,00	0,63	0,56	0,49	0,51	0,52	0,53	0,40	0,51	0,61	0,62	0,63
PTF	0,60	0,67	0,53	0,62	0,66	0,57	0,64	0,72	0,69	0,63	1,00	0,85	0,85	0,84	0,75	0,83	0,59	0,78	0,83	0,81	0,87
GCH	0,63	0,75	0,46	0,56	0,69	0,51	0,70	0,78	0,62	0,56	0,85	1,00	0,89	0,88	0,77	0,90	0,70	0,90	0,89	0,84	0,86
PTC2	0,56	0,73	0,39	0,52	0,64	0,43	0,62	0,75	0,60	0,49	0,85	0,89	1,00	0,92	0,84	0,92	0,69	0,90	0,90	0,87	0,89
PTT	0,61	0,72	0,45	0,53	0,68	0,47	0,63	0,74	0,60	0,51	0,84	0,88	0,92	1,00	0,86	0,94	0,71	0,92	0,91	0,87	0,89
SAJ	0,58	0,68	0,43	0,50	0,65	0,47	0,60	0,69	0,57	0,52	0,75	0,77	0,84	0,86	1,00	0,84	0,61	0,81	0,85	0,81	0,84
FON	0,62	0,74	0,42	0,54	0,68	0,46	0,65	0,76	0,65	0,53	0,83	0,90	0,92	0,94	0,84	1,00	0,72	0,94	0,94	0,88	0,89
PTC1	0,43	0,62	0,23	0,37	0,52	0,40	0,52	0,59	0,40	0,40	0,59	0,70	0,69	0,71	0,61	0,72	1,00	0,78	0,72	0,68	0,69
PNP	0,63	0,76	0,43	0,55	0,70	0,47	0,68	0,77	0,63	0,51	0,78	0,90	0,90	0,92	0,81	0,94	0,78	1,00	0,96	0,92	0,90
PTG	0,68	0,79	0,53	0,66	0,78	0,55	0,74	0,83	0,74	0,61	0,83	0,89	0,90	0,91	0,85	0,94	0,72	0,96	1,00	0,97	0,94
PTP	0,69	0,80	0,58	0,74	0,82	0,59	0,75	0,84	0,76	0,62	0,81	0,84	0,87	0,87	0,81	0,88	0,68	0,92	0,97	1,00	0,93
NOR	0,70	0,79	0,59	0,68	0,76	0,62	0,72	0,81	0,72	0,63	0,87	0,86	0,89	0,89	0,84	0,89	0,69	0,90	0,94	0,93	1,00

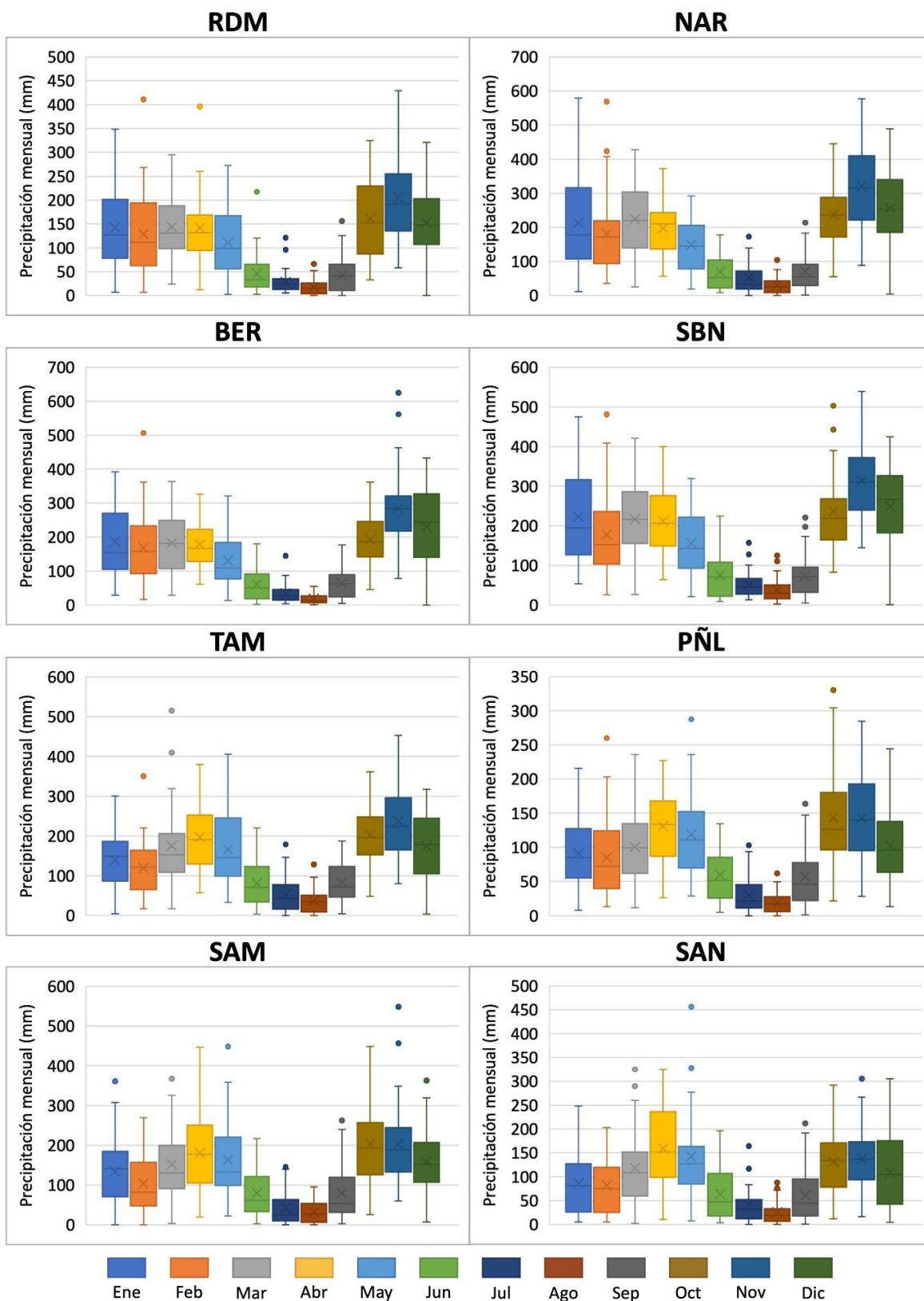
Anexo 5. Ciclos anuales de precipitación mensual por estaciones (Parte 1 de 5)



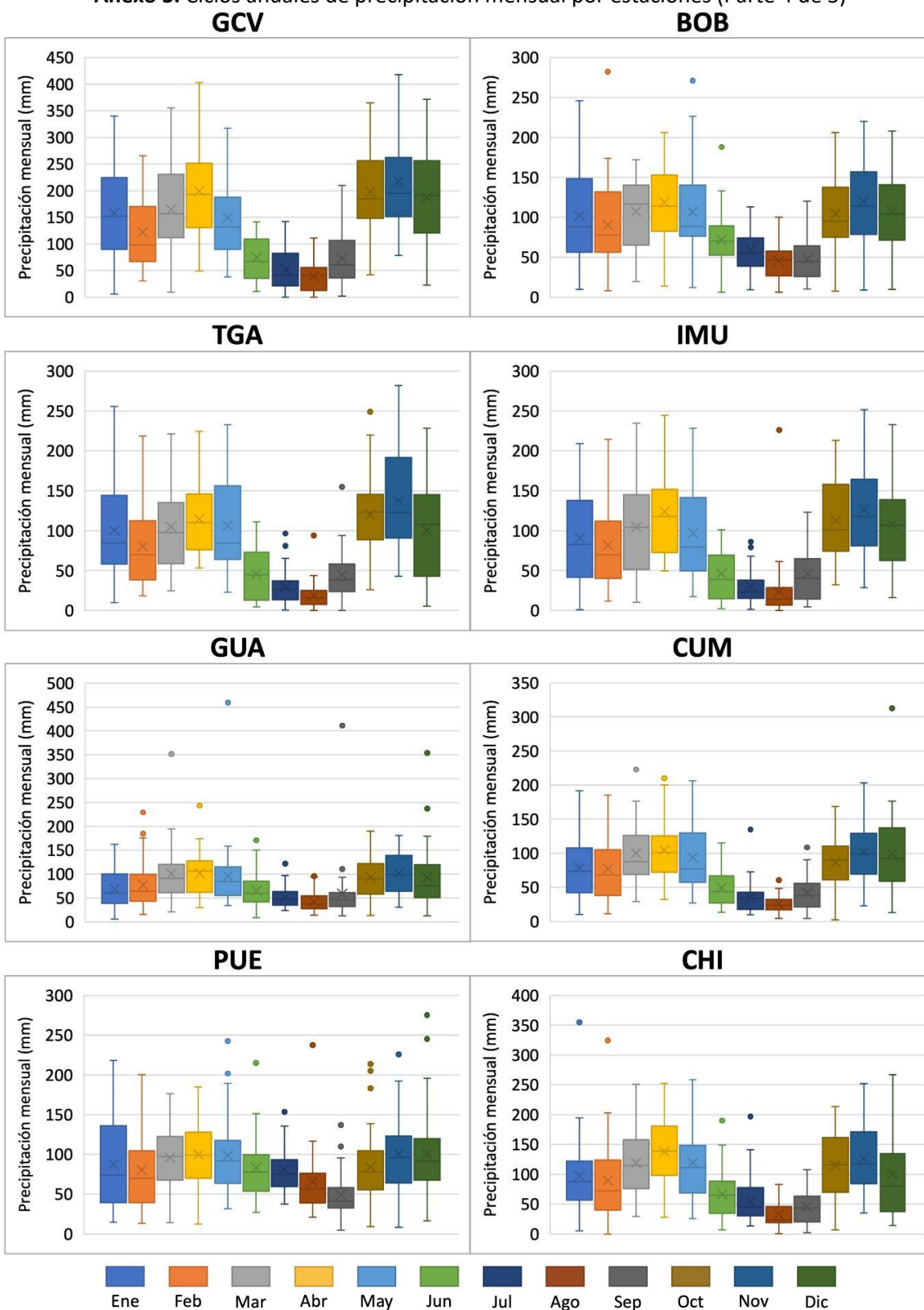
Anexo 5. Ciclos anuales de precipitación mensual por estaciones (Parte 2 de 5)



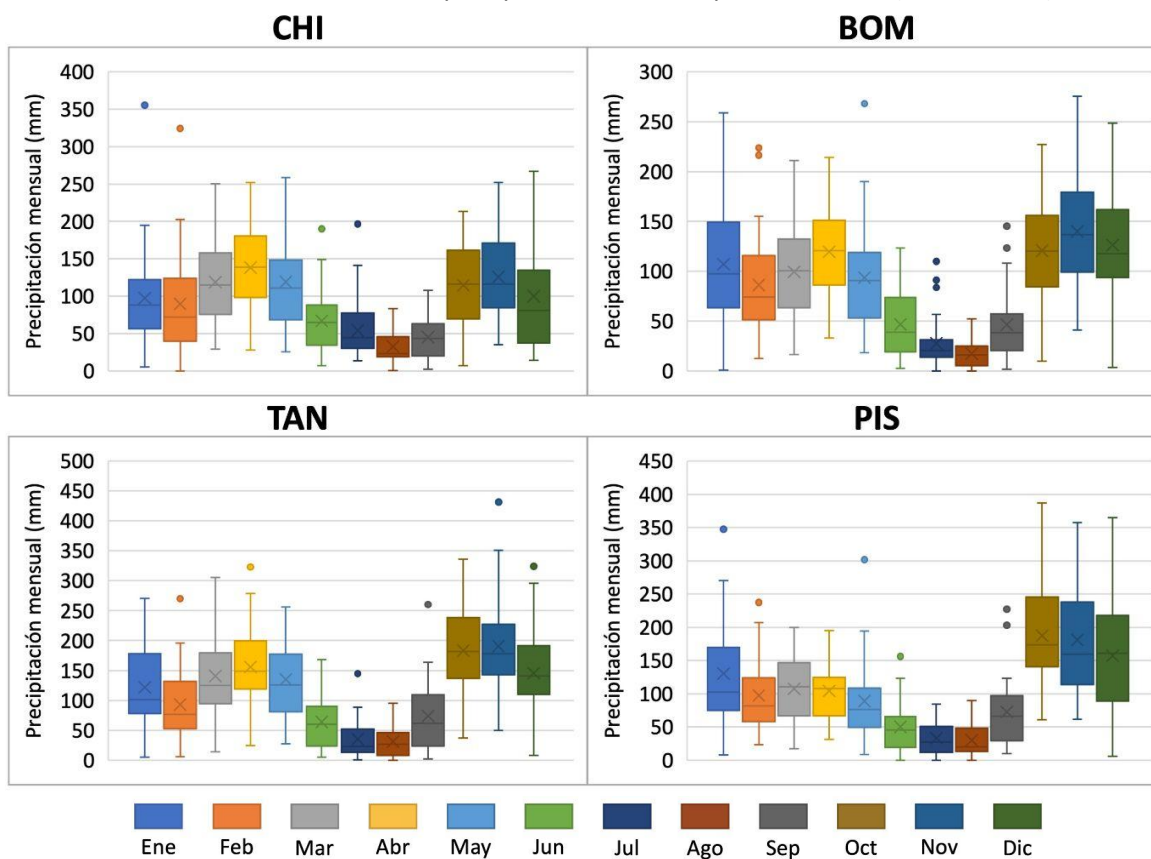
Anexo 5. Ciclos anuales de precipitación mensual por estaciones (Parte 3 de 5)



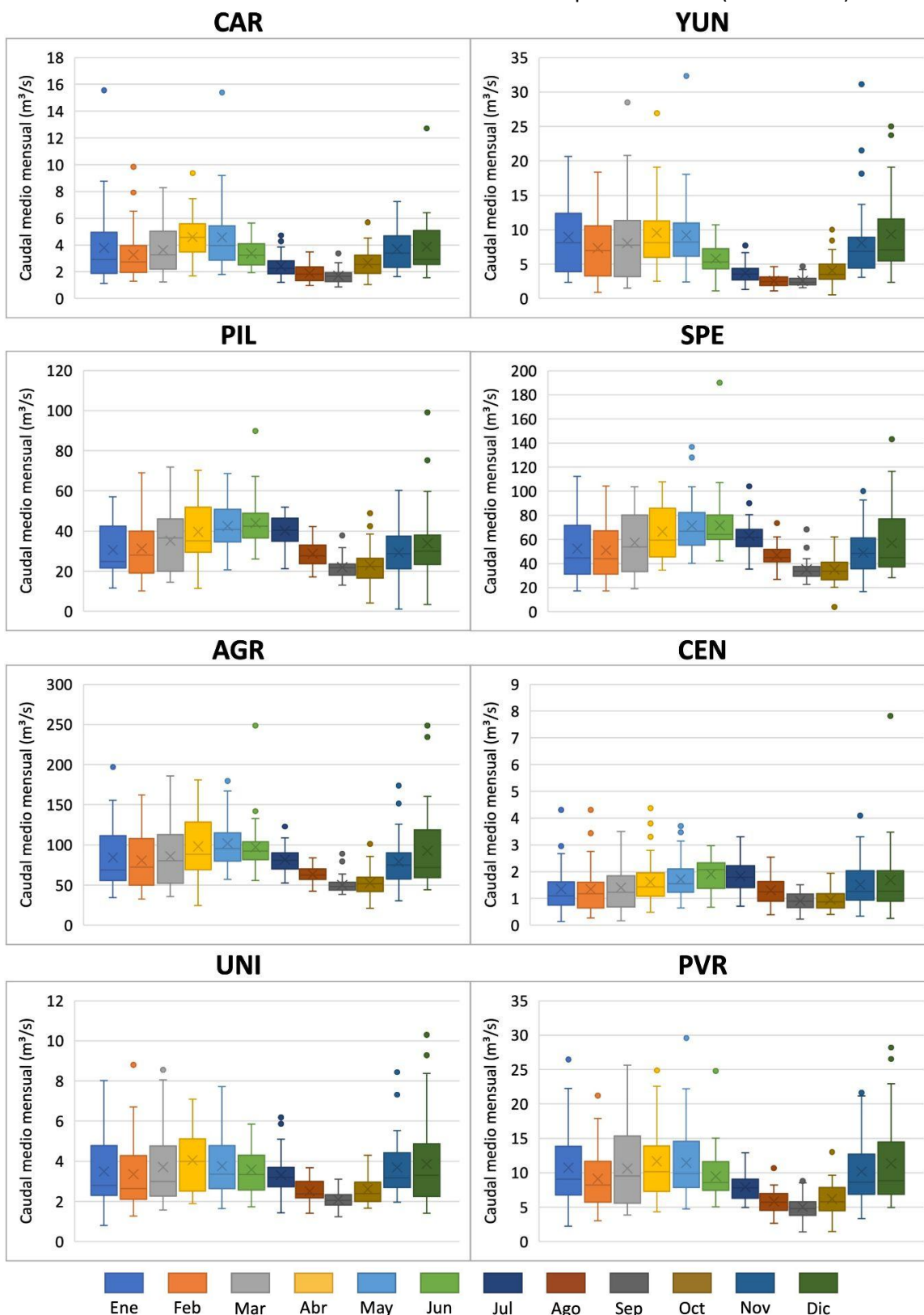
Anexo 5. Ciclos anuales de precipitación mensual por estaciones (Parte 4 de 5)



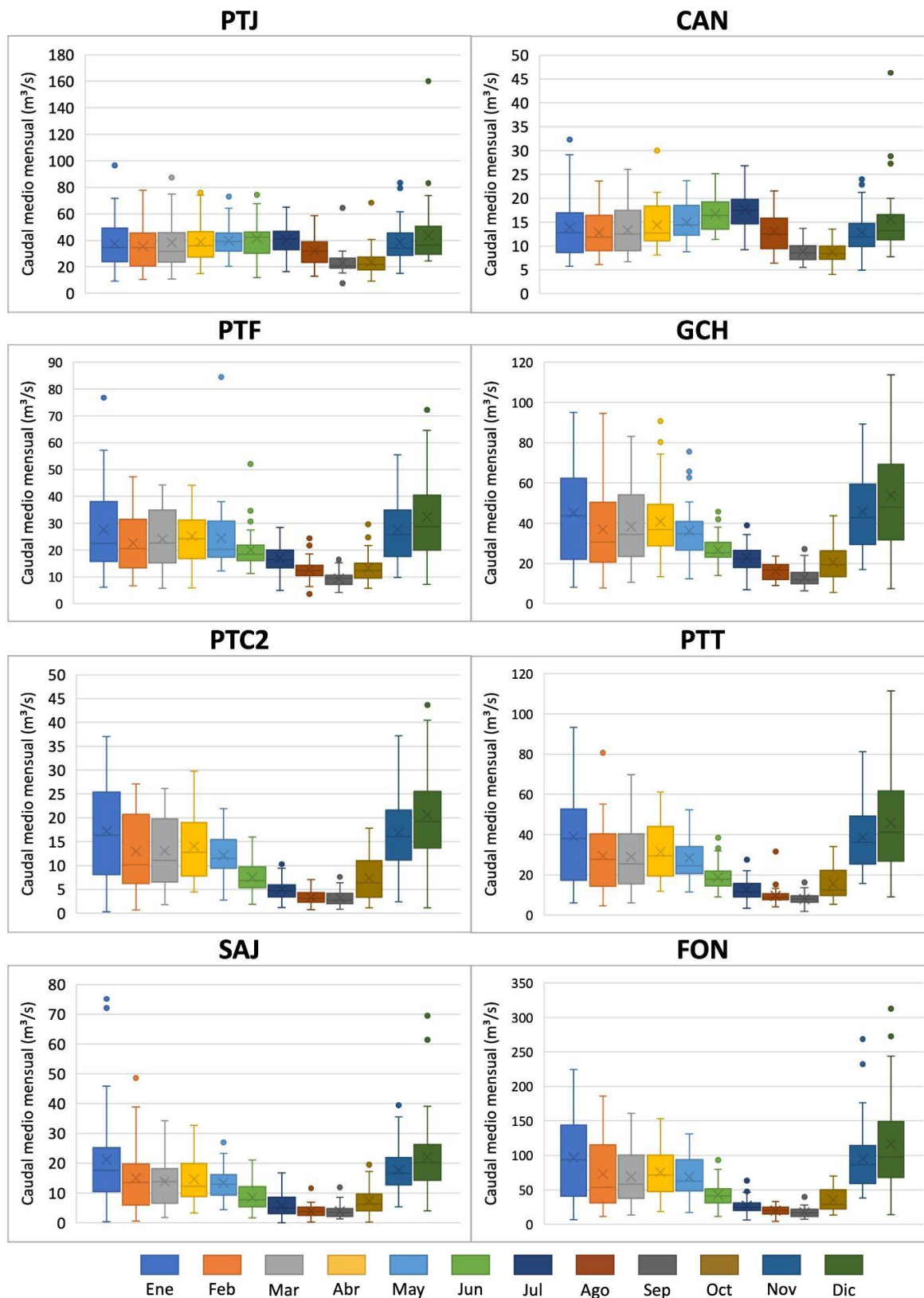
Anexo 5. Ciclos anuales de precipitación mensual por estaciones (Parte 5 de 5)



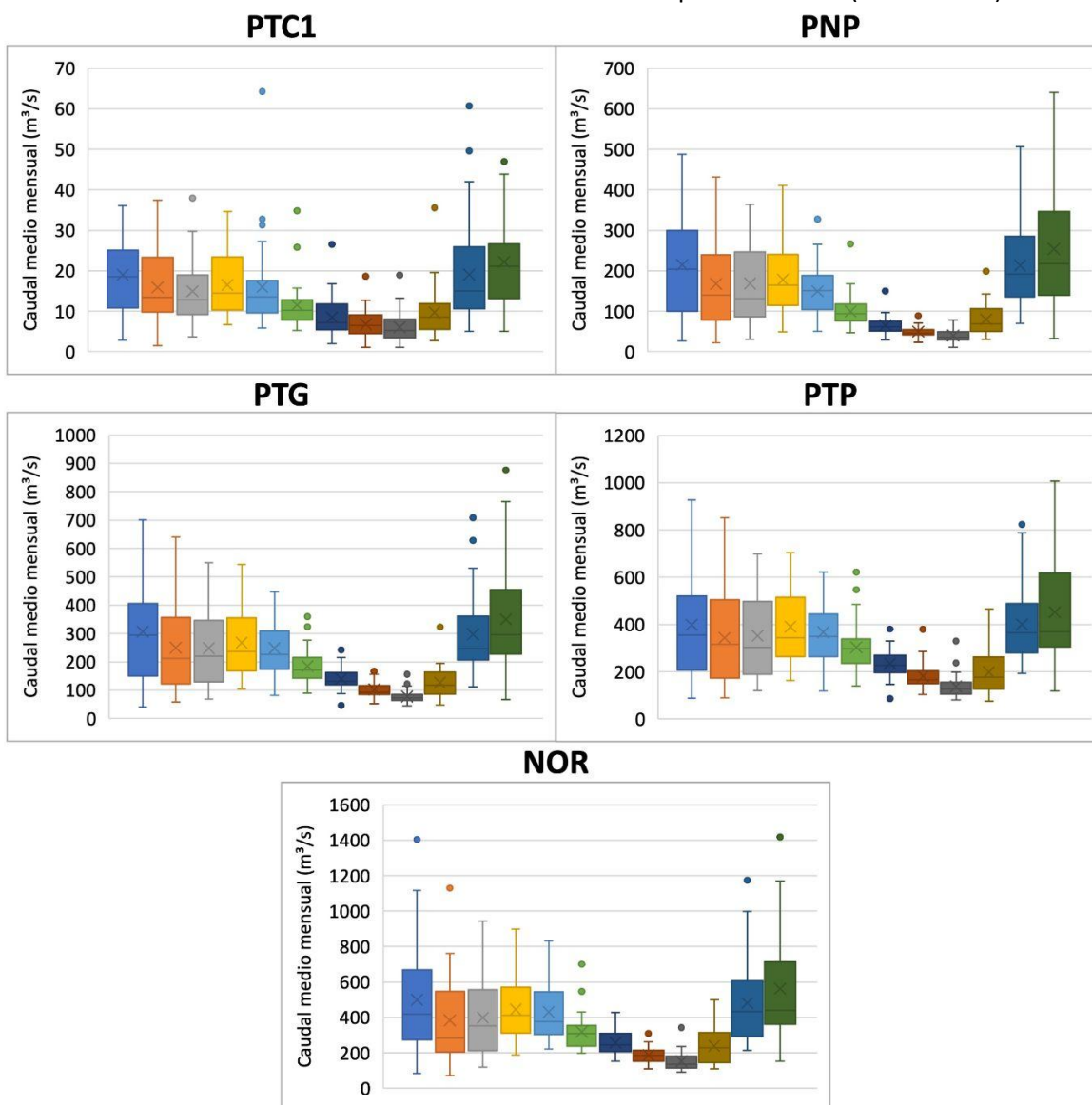
Anexo 6. Ciclos anuales de caudal medio mensual por estaciones (Parte 1 de 3)



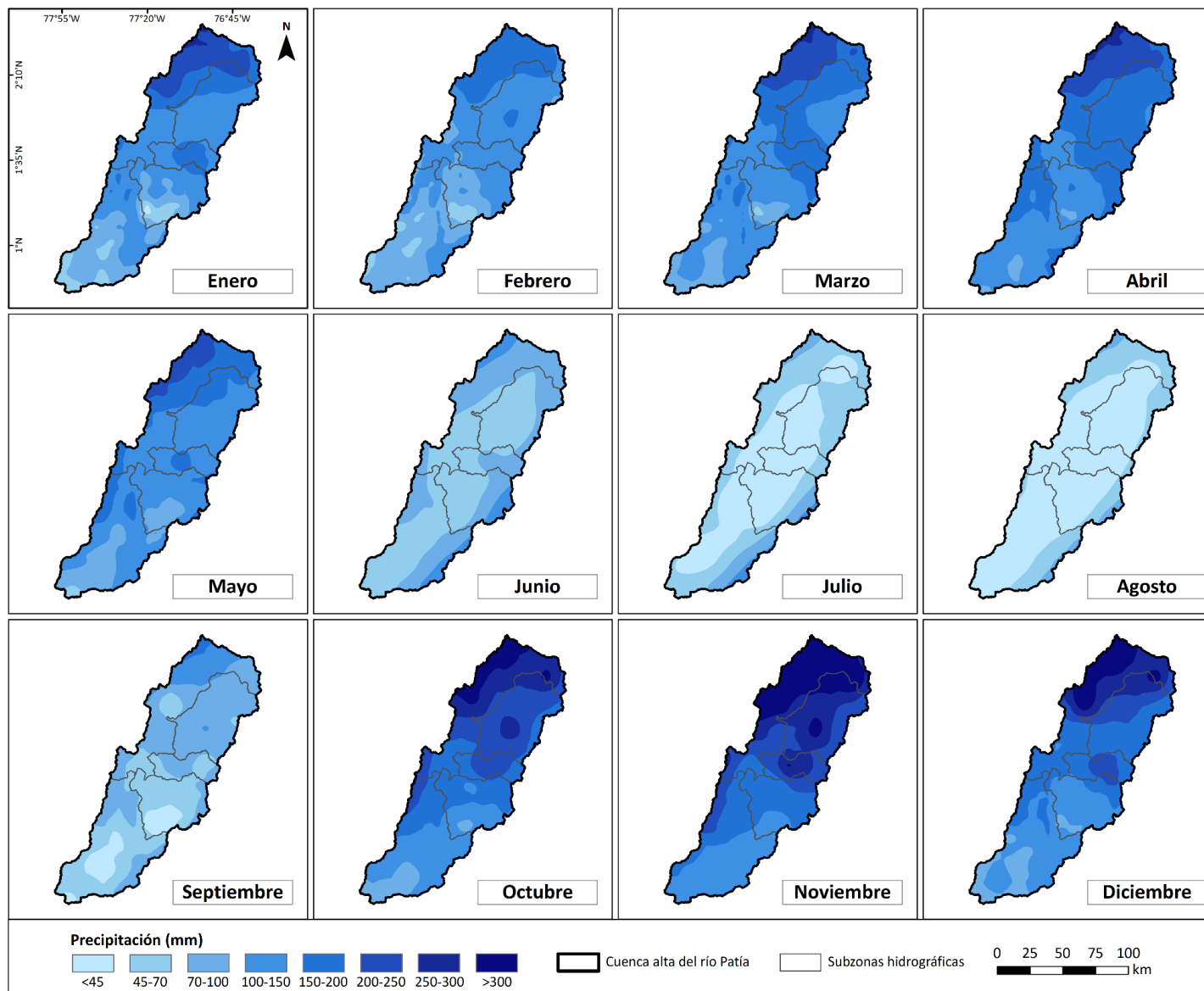
Anexo 6. Ciclos anuales de caudal medio mensual por estaciones (Parte 2 de 3)



Anexo 6. Ciclos anuales de caudal medio mensual por estaciones (Parte 3 de 3)



Anexo 7. Isoyetas mensuales



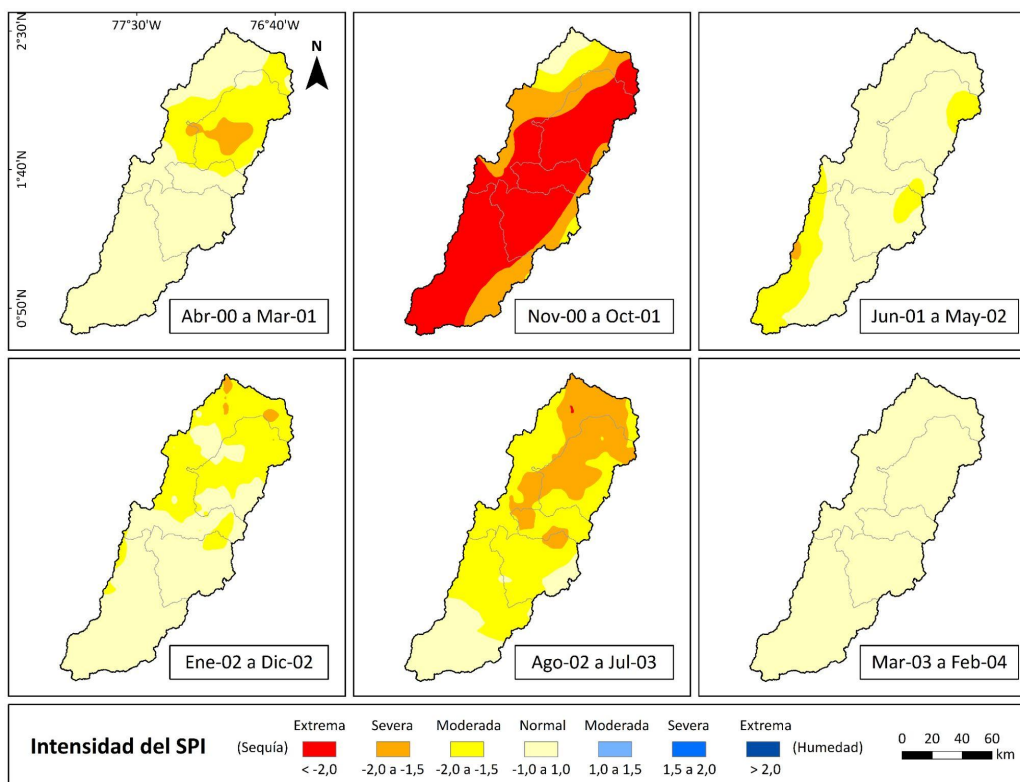
Anexo 8. Caracterización de eventos de sequía meteorológica a escala semestral y anual

Eventos de sequía a escala semestral (SPI 6)							
N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Mes pico		Severidad	Intensidad
				Mes	Magnitud		
1	feb-85	sep-87	32	jul-85	1,34	15,7	0,5
2	dic-87	ago-88	9	abr-88	1,24	5,7	0,6
3	may-89	sep-89	5	sep-89	0,50	1,8	0,4
4	nov-89	jul-91	21	feb-91	0,86	10,3	0,5
5	sep-91	mar-93	19	jun-92	1,71	14,3	0,8
6	sep-93	nov-93	3	oct-93	0,58	1,2	0,4
7	sep-94	jul-95	11	may-95	0,71	5,0	0,5
8	jul-97	jul-98	13	ene-98	1,44	11,6	0,9
9	nov-00	oct-03	36	ago-01	1,41	25,9	0,7
10	dic-03	sep-04	10	jul-04	0,63	3,8	0,4
11	jul-09	jun-10	12	mar-10	1,15	8,8	0,7
12	jul-12	jun-13	12	oct-12	1,69	8,3	0,7
13	nov-13	feb-14	4	nov-13	0,64	1,1	0,3
14	abr-15	nov-16	20	sep-15	2,09	21,2	1,1
Eventos de sequía a escala anual (SPI 12)							
N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Mes pico		Severidad	Intensidad
				Mes	Magnitud		
1	abr-85	nov-88	44	abr-87	0,93	23,1	0,5
2	nov-89	abr-93	42	dic-92	1,38	29,7	0,7
3	ene-95	ene-96	13	abr-95	0,72	5,7	0,4
4	may-97	dic-98	20	ene-98	1,36	13,7	0,7
5	feb-01	feb-05	49	oct-01	1,62	33,1	0,7
6	dic-09	oct-10	11	mar-10	1,33	7,0	0,6
7	dic-12	dic-13	13	abr-13	1,03	6,9	0,5
8	may-15	dic-16	20	mar-16	2,07	24,4	1,2

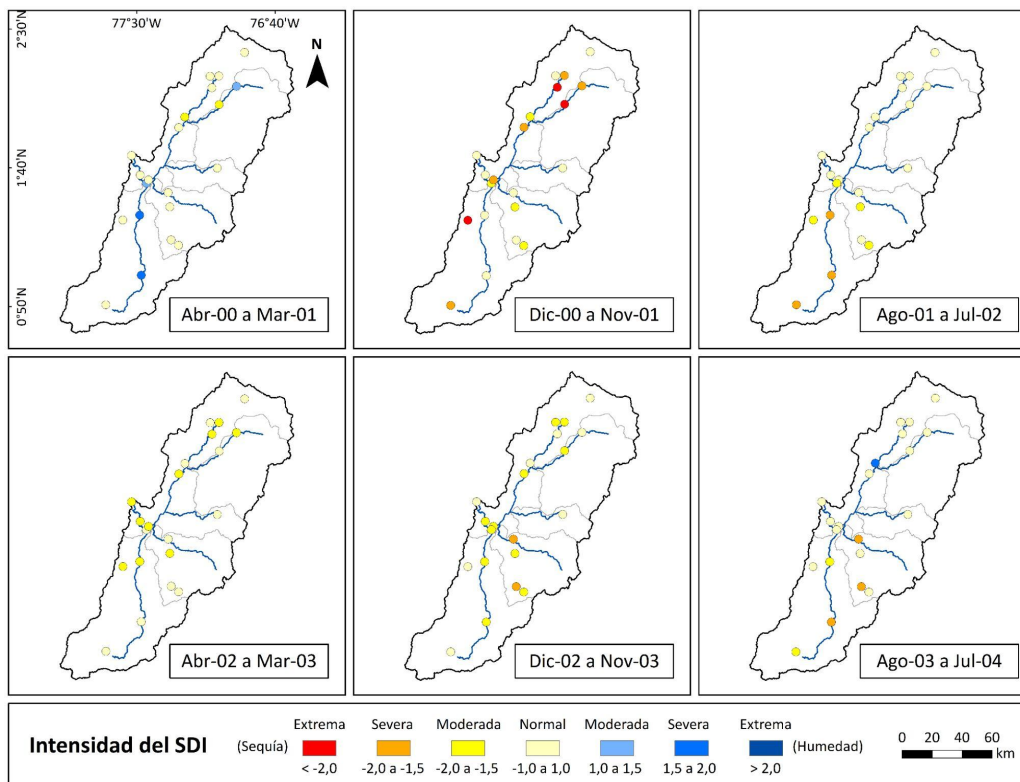
Anexo 9. Caracterización de eventos de sequía hidrológica a escala semestral y anual

Eventos de sequía hidrológica a escala semestral (SDI 6)							
N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Mes pico		Severidad	Intensidad
				Mes	Magnitud		
1	abr-85	jun-86	15	ago-85	0,75	6,1	0,4
2	dic-86	sept-87	10	jul-87	0,97	6,8	0,7
3	nov-87	sept-88	11	jun-88	0,93	5,6	0,5
4	nov-89	abr-93	42	jun-92	1,31	22,8	0,5
5	feb-95	ene-96	12	jul-95	0,77	5,6	0,5
6	ago-97	oct-98	15	mar-98	1,73	14,0	0,9
7	ene-01	oct-04	46	sept-01	1,19	31,2	0,7
8	sept-09	oct-10	14	mar-10	1,47	11,6	0,8
9	sept-12	abr-14	20	nov-12	1,17	10,1	0,5
10	dic-14	dic-16	25	mar-16	1,90	24,3	1,0
Eventos de sequía hidrológica a escala anual (SDI 12)							
N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Mes pico		Severidad	Intensidad
				Mes	Magnitud		
1	oct-85	nov-88	38	ene-88	0,85	20,0	0,5
2	ene-90	oct-93	46	dic-92	1,27	26,8	0,6
3	abr-95	feb-96	11	dic-95	0,71	4,9	0,4
4	ene-98	ene-99	13	abr-98	1,42	15,1	1,2
5	may-01	feb-05	46	nov-01	1,27	34,7	0,8
6	ene-10	nov-10	11	abr-10	1,31	10,6	1,0
7	ene-13	sept-14	21	abr-13	0,94	9,1	0,4
8	ene-15	mar-17	27	abr-16	1,88	26,3	1,0

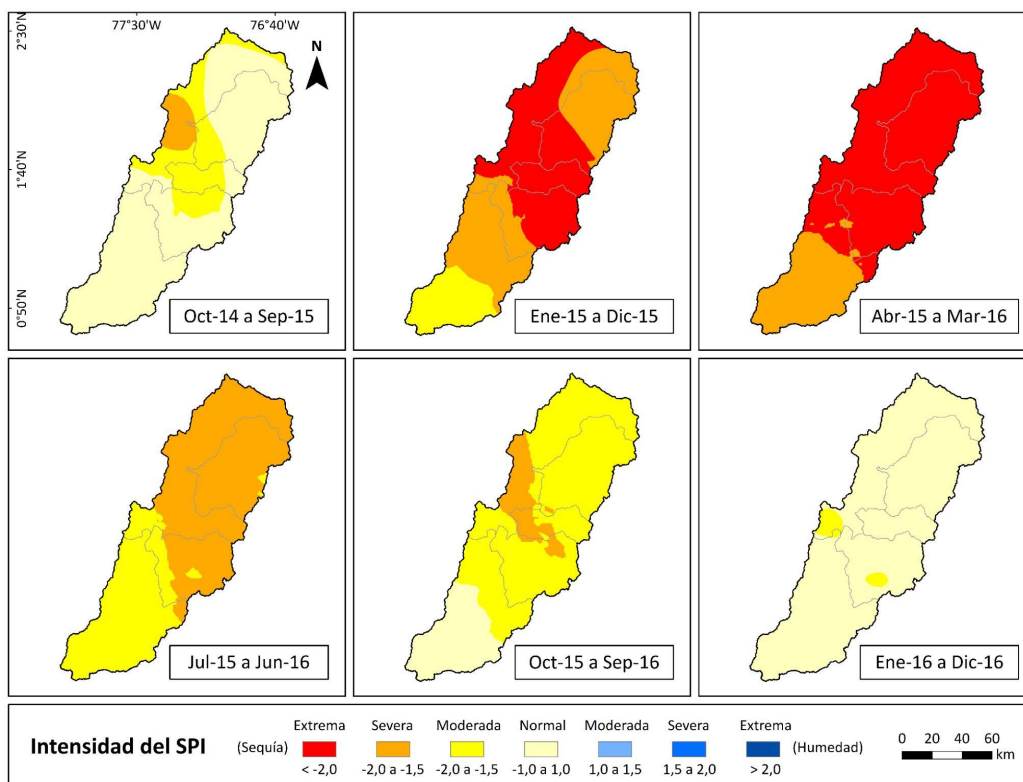
Anexo 10. Variación espacial de la sequía meteorológica anual durante 2001-2003



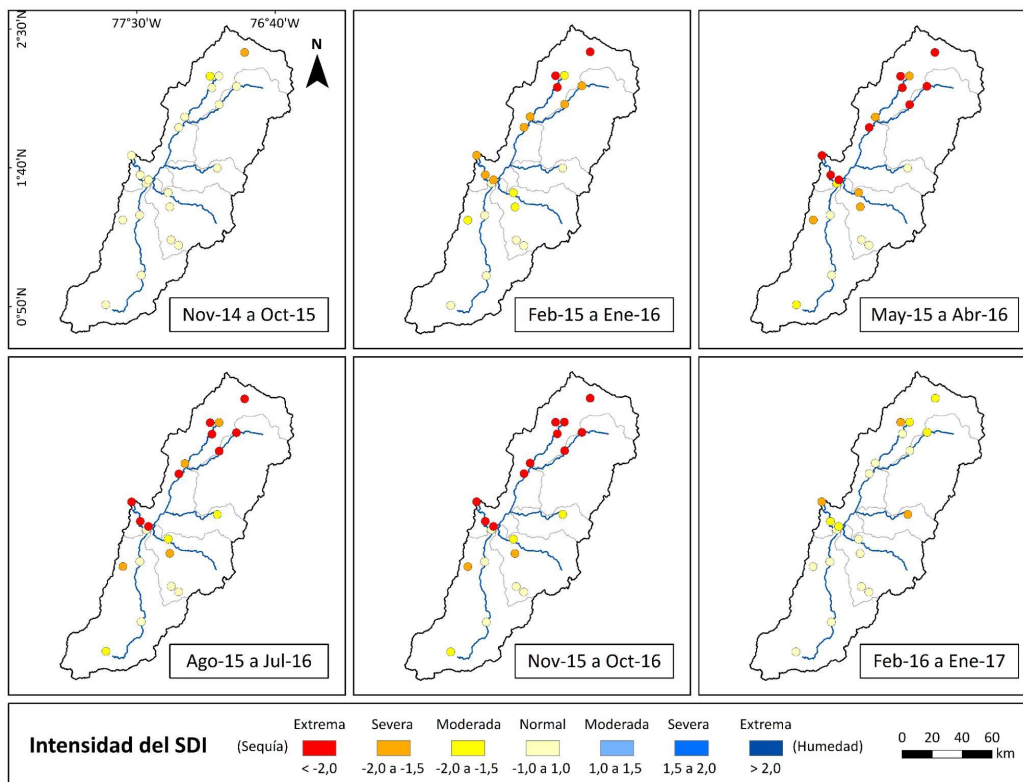
Anexo 11. Variación espacial de la sequía hidrológica anual durante 2001-2003



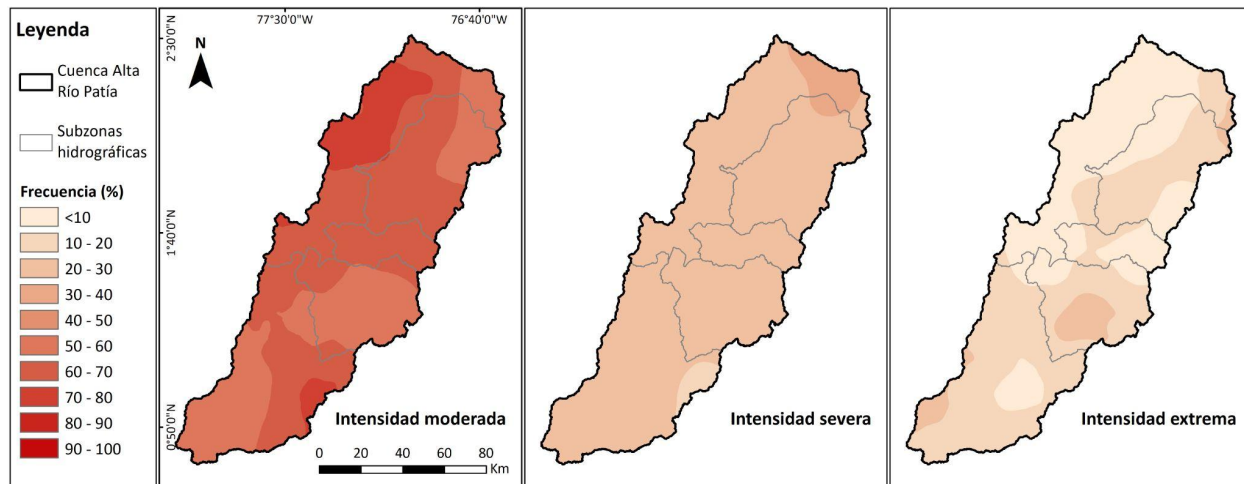
Anexo 12. Variación espacial de la sequía meteorológica anual durante 2015-2016



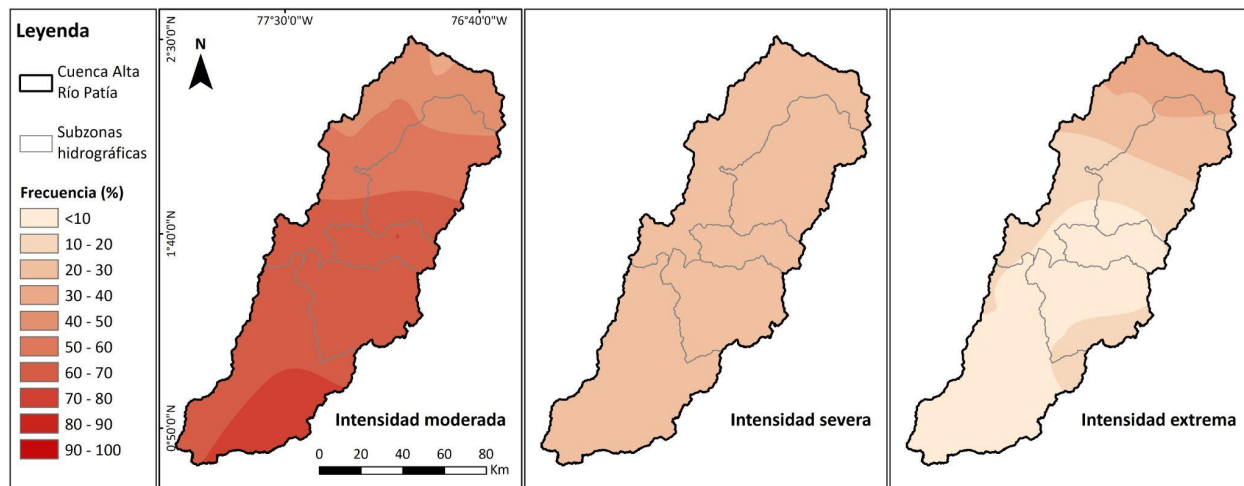
Anexo 13. Variación espacial de la sequía hidrológica anual durante 2015-2016



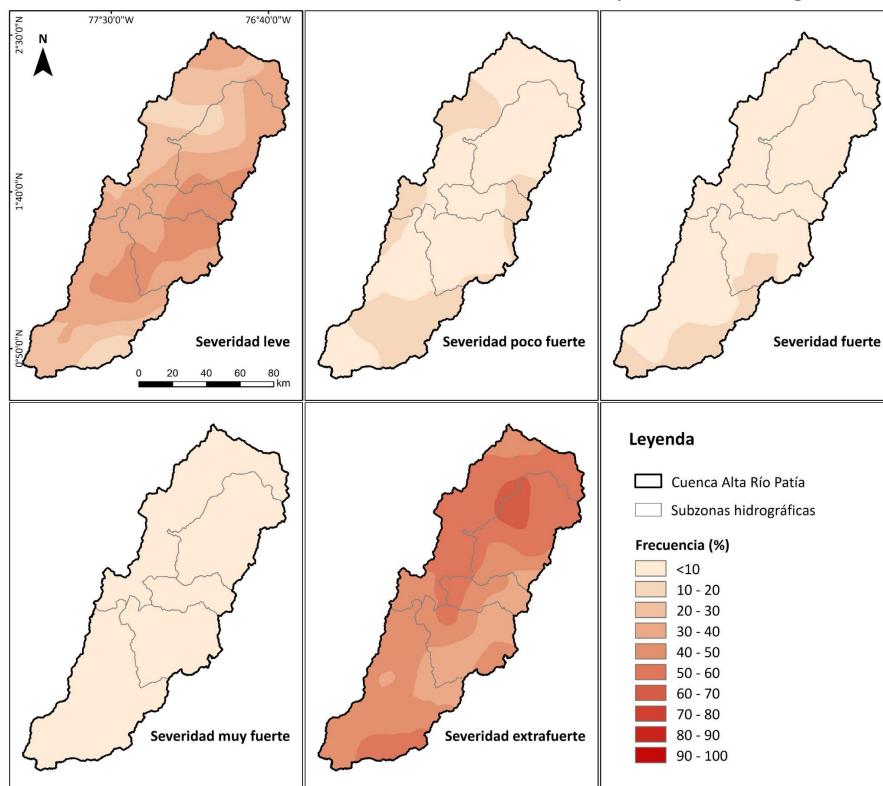
Anexo 14. Frecuencia relativa de las intensidades de la sequía meteorológica (SPI) anual



Anexo 15. Frecuencia relativa de las intensidades de la sequía hidrológica (SDI) anual



Anexo 16. Frecuencia relativa de las severidades de la sequía meteorológica (SPI) anual



Anexo 17. Frecuencia relativa de las severidades de la sequía hidrológica (SDI) anual

