

Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones

Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones

Néstor Ricardo Bernal Suárez
Juan Sebastián Barrios Moreno
Marcos Andrés Ramos Castañeda
Wendy Carolina Velásquez Martínez
Julio Eduardo Beltrán Vargas
Yuli Carmenza Ibarra Burbano
Walter Iván Velásquez Méndez





UD
Editorial



© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© Néstor Ricardo Bernal Suárez, Juan Sebastián Barrios Moreno,
Marcos Andrés Ramos Castañeda, Wendy Carolina Velásquez Martínez,
Julio Eduardo Beltrán Vargas, Yuli Carmenza Ibarra Burbano,
Walter Iván Velásquez Méndez
Primera edición, mayo de 2021
ISBN: 978-958-787-264-4

Dirección Sección de Publicaciones

Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial

Edwin Pardo Salazar

Corrección de estilo

María Carolina Ochoa Gutiérrez

Diagramación

Astrid Prieto Castillo

Imagen de portada

Marcos Andrés Ramos Castañeda

Ronda del río Sinú. Montería, Córdoba, Colombia

Editorial UD

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Carrera 24 N°. 34-37

Teléfono: 3239300 ext. 6202

Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones / Néstor Ricardo Bernal Suárez ... [et al.]. -- 1a ed. -- Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021.
p. -- (Colección tierra y vida)

Incluye datos biográficos de los autores. -- Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-787-264-4

1. Precipitación atmosférica – Colombia 2. Análisis de series de tiempo I. Bernal Suárez, Néstor Ricardo II. Serie

CDD: 551.577 ed. 23

CO-BoBN– a1073975

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

Agradecimientos	11
Prólogo	13
Introducción	17
Capítulo 1. Homogenización de series mensuales de precipitación	19
1.1 Descripción de la precipitación en Colombia	21
1.2 Procesos generadores de la precipitación en Colombia	23
1.3 Régimen de lluvias en la región Caribe y el Bajo Magdalena	27
1.4 Homogenización de series de tiempo	33
1.5 Modelo ARIMA y estimación de datos faltantes	33
1.6 Algunos modelos ARIMA identificados para la zona del Bajo Magdalena	38
1.7 Familia de modelos ARIMA	47
1.8 Identificación de la tendencia en las series de tiempo de precipitación	47
1.9 Búsqueda de una señal en la precipitación relacionada con la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña	51
1.10 Detección de puntos de cambio en los valores promedio de precipitación	53
1.11 Identificación de estaciones meteorológicas vecinas	56
1.12 Homogenización de series de tiempo	62
1.13 Anomalías promedio de precipitación	67
1.14 Alteraciones más probables de la precipitación	72
1.14.1 Épocas de ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña	72
1.14.2 Índices acumulado y categórico	73

1.14.3 Frecuencias absoluta y relativa	79
1.14.4 Condición más probable de alteración de la precipitación	80
Referencias bibliográficas	84
 Capítulo 2. Planificación ambiental, ordenamiento territorial y su relación con la precipitación: estudio de caso región climática Bajo Magdalena	 97
Introducción	99
2.1 Desarrollo sostenible y dimensión ambiental	100
2.2 Planificación ambiental regional	102
2.3 Niveles, actores e instrumentos de la planificación ambiental	107
2.4 Uso de información climática en ordenamiento territorial y planificación ambiental	111
2.5 Propuesta de integración de resultados de la homogenización de series mensuales de precipitación en el proceso de planificación ambiental	113
2.6 Descripción de resultados	116
2.7 Ordenamiento territorial	145
2.7.1 Antecedentes	145
2.7.2 Metodología usada actualmente para la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial	146
2.7.3 Líneas de actuación	147
2.8 Relación entre detección de puntos de cambio y la planificación territorial	150
2.8.1 Aproximación regional, visión urbano-regional y su relación con procesos de detección de cambios	152
Referencias bibliográficas	162

Capítulo 3. Utilización de series de tiempo de precipitación homogenizadas para la estimación del caudal del río San Jorge	169
3.1 Introducción	171
3.2 Zona de estudio	172
3.3 Metodología	174
3.3.1 Cálculo del área aferente de la cuenca del río San Jorge	174
3.3.2 Estimación del caudal	174
3.3.3 Análisis de sensibilidad	176
3.3.4 Validación del modelo	176
3.4 Resultados	176
3.4.1 Estimación del caudal	177
<i>Submodelo Cuenca Alta</i>	177
<i>Submodelo Cuenca Media 1</i>	179
<i>Submodelo Cuenca Media 2</i>	181
<i>Submodelo Cuenca Baja</i>	183
<i>Cuenca río San Jorge</i>	186
3.4.2 Análisis de sensibilidad	188
3.4.3 Validación del modelo	190
3.5 Discusión	191
Referencias bibliográficas	193
 Capítulo 4. Modelación para la toma de decisiones: el pequeño agricultor y la calidad en los datos de precipitación, una perspectiva para el desarrollo sustentable	 195
Referencias bibliográficas	205

Capítulo 5. Perspectivas: propuesta de análisis de valores extremos de precipitación y su utilidad en el contexto de gestión del riesgo, estudio de caso: una zona del medio Magdalena	211
5.1 Introducción	213
5.2 Conceptos básicos	216
5.3 Zona de estudio	221
5.4 Metodología	225
5.4.1 Revisión y ajuste de series de tiempo de precipitación a nivel mensual	225
5.4.2 Descripción de la climatología de la zona	226
5.4.3 Análisis de valores extremos de precipitación mensual	226
5.4.4 Comparación de los resultados con series de caudal mensual	228
5.4.5 Propuesta de integración del análisis de valores extremos mensuales en los planes de gestión del riesgo	229
5.5 Resultados	231
5.5.1 Revisión y ajuste de series de tiempo de precipitación a nivel mensual	231
5.5.2 Descripción de la climatología de la zona	232
<i>Anomalías promedio de precipitación</i>	244
<i>Alteraciones más probables de precipitación</i>	245
5.5.3 Análisis de valores extremos de precipitación mensual	245
5.5.4 Comparación de los resultados con series de caudal mensual	268
5.5.5 Propuesta de integración del análisis de valores extremos mensuales en los planes de gestión del riesgo	276
Referencias bibliográficas	282
Autores	287
Colaboradores	288
Citación sugerida	289

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su apoyo financiero, logístico y de gestión para la realización del proyecto de investigación. Al director del CIDC, Giovanni Mauricio Tarazona Bermúdez, y a Alexandra García Rodríguez, gestora académica y presupuestal de proyectos del CIDC. A los profesores Carlos Zafra Mejía, director del grupo de investigación de Ingeniería Ambiental (GIIAUD), y a Julio Beltrán Vargas, coordinador de la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental y líder del grupo de investigación para el Desarrollo Sostenible (INDESOS), por su acompañamiento en el proceso. A los profesores Jaime Eddy Ussa Garzón, decano de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales (FAMARENA); a Freddy Leonard Alfonso Moreno, coordinador del proyecto curricular de Ingeniería Ambiental y a Wilson Gordillo Thiriat, coordinador de la Unidad de Investigaciones de la FAMARENA.

A Yolanda González Hernández, directora general del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam); a la Subdirección de Meteorología del IDEAM, por el apoyo técnico y el suministro de información, en particular a Ruth Correa Amaya; por las sugerencias a Gonzalo Hurtado y Gloria León; y por el apoyo a Olga González. A los subdirectores, Ernesto Rangel Mantilla (q. e. p. d), María Teresa Martínez, José Franklin Ruíz (E), Mayor Yadira Cárdenas Posso, Eliécer Díaz Almanza y Hugo Armando Saavedra Umba (E), y a Henry Romero, de la Subdirección de Hidrología, por su apoyo en el análisis de inundaciones para la subzona de estudio del Bajo Magdalena.

A José Edgar Montealegre Bocanegra, Fernando Ruiz Guzmán y Jorge Martínez Collantes (q. e. p. d) por sus sugerencias desde el punto de vista metodológico y apoyo al proyecto. A Julio César Vargas y Rubén Darío Mateus, por el soporte dado en la elaboración de cartografía y el desarrollo de la macroinstrucción para la identificación de estaciones vecinas y elaboración de curvas de doubles masas. Al profesor José Daniel Pabón Caicedo, del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional

de Colombia, por su constante apoyo al proceso de investigación en meteorología. A los profesores Henry Zúñiga Palma (q. e. p. d) por sus sugerencias y apoyo respecto a la temática de ordenamiento territorial. Y a la investigadora Inés Toro, de Corpoica, por sus sugerencias de la zona de estudio de La Mojana referentes a la producción agropecuaria sostenible.

Por último, a los jurados de los trabajos de grado de Ingeniería Ambiental y de la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y a los profesores pares revisores del libro, quienes brindaron sugerencias para mejorar el resultado que aquí presentamos..

Prólogo

Los estudios e investigaciones realizados durante los últimos años en el campo de la meteorología han puesto de manifiesto la existencia de una gran cantidad de inconsistencias en el interior de las bases de datos. El hecho de que intereses particulares hubiesen matizado, de alguna manera, la conformación original de la actual red de estaciones meteorológicas, antes de la creación del Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología-SCMH (hoy Ideam), trajo como consecuencia una diversidad muy significativa en los métodos de observación y medición, en el instrumental utilizado, en las fechas de instalación y por ende en la longitud de las series, así como en la calidad y confiabilidad de la información recolectada.

El tratamiento estadístico de los datos meteorológicos, en particular de los datos de precipitación (uno de los elementos climatológicos de mayor variabilidad), requiere como condición básica que estos sean de la misma naturaleza y del mismo origen, obtenidos mediante observaciones y mediciones que hayan seguido procedimientos y métodos semejantes, en una palabra, que sean homogéneos. Para ello, es necesario verificar la consistencia de las series mediante el desarrollo de diversas etapas, como la estimación de datos faltantes y la detección de cambios en los promedios, con lo cual se asegura la calidad de los datos en la etapa de diagnóstico climático; adicionalmente, el proceso de homogenización garantiza la calidad de la información climática a través de otras metodologías, como la contemplada en el análisis de estaciones vecinas.

Algunos de estos aspectos impulsaron al profesor Néstor Ricardo Bernal y a su grupo de trabajo a abordar este importante tópico del conocimiento, y enfocaron su tema de investigación en la profundización de las metodologías existentes, a efectos de establecer, con mayor rigor, la calidad de la información básica utilizada tendiente a obtener resultados mejores y más confiables en el marco de las investigaciones desarrolladas.

El análisis de la información histórica debe ser exhaustivo. Una mala práctica de este análisis podría conducir a considerar como datos erróneos algunos relativos a

verdaderas fluctuaciones extremas del clima. Un buen ejemplo de ello corresponde a la visualización de señales relacionadas con la variabilidad climática interanual, en la que los puntos de cambio en las series evidencian, así mismo, cambios derivados por la ocurrencia de eventos dentro de la misma escala temporal, tales como los registrados en presencia de los fenómenos de El Niño y La Niña.

Un aspecto de especial importancia de esta publicación es la aplicación directa de los datos meteorológicos, lo cual se hace una vez han sido sometidos a los procesos de depuración y calidad a estudios e investigaciones de vital importancia para el desarrollo del país. El primero de ellos corresponde a la planificación ambiental y el ordenamiento territorial, temas que se enmarcan dentro de la teoría del desarrollo sostenible, que plantea la solución de las necesidades de la población actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. En este caso, el procesamiento estadístico y la homogenización de series mensuales de precipitación para la región climática del Bajo Magdalena facilitaron la descripción de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en esa zona del país, a partir de bases de datos meteorológicas depuradas.

Otro buen ejemplo de aplicación corresponde a la estimación del caudal del río San Jorge mediante la utilización de series de tiempo de precipitación, debidamente tratadas y depuradas, sin información faltante y con datos homogenizados y de calidad garantizada, con lo cual se asegura que los resultados obtenidos son óptimos y confiables.

De igual importancia es el hecho de que no siempre las relaciones entre la sociedad y la naturaleza se han basado en parámetros de sostenibilidad; los seres humanos hemos forzado la capacidad de los ecosistemas, y en consecuencia, hemos tenido que implementar medidas de mitigación. Por ello, la identificación metodológica y el uso de la homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación en la implementación de procesos de toma de decisiones en el sector agrícola, para el caso de una zona en la región del Bajo Magdalena, constituye otra de las aplicaciones directas de la metodología descrita.

Finalmente, la propuesta de análisis de valores extremos de precipitación y su utilidad en el contexto de la gestión del riesgo para una zona del Medio Magdalena fue otro de los temas de gran importancia seleccionados como parte de las aplicaciones de la metodología descrita. Esto, porque la gestión del riesgo debe ser contemplada como una prioridad gubernamental, por cuanto la calidad de vida de los habitantes depende, en muy buena parte, de su consideración. Los análisis relativos a la calidad de los valores extremos de precipitación y su tratamiento

estadístico de depuración y homogeneización se reflejan muy bien en la calidad y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Los autores de los estudios anteriores basaron sus desarrollos en los avances logrados por el profesor Néstor Ricardo Bernal, quien lideró el equipo del Ideam en la propuesta de una metodología para la homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación en las regiones climatológicas de la Sabana de Bogotá, el río Sogamoso y el Catatumbo.

La comunidad meteorológica de Colombia supo del profesor Néstor Ricardo Bernal por la época en que terminaba sus estudios de pregrado de Estadística en la Universidad Nacional. Los meteorólogos de aquel entonces identificaron al profesor Bernal como un profesional visionario. Posteriormente, durante su paso como estudiante de la Maestría en Meteorología, comprobaron su creciente interés por la investigación. Su aporte en el desarrollo y el fortalecimiento del procesamiento y la calidad de la información meteorológica ha sido crucial. La planeación y organización pormenorizada de sus actividades y su capacidad de trabajo sin límites son un rasgo característico de su personalidad, que seguramente se perpetuará como un factor fundamental en la formación de las nuevas generaciones.

Con el propósito de avanzar en los procesos de investigación, el profesor Bernal manifestó su intención al profesor Julio Beltrán, coordinador de la maestría en aquel momento, de formular el proyecto de investigación que soporta los resultados de este libro. Esta alianza entre el proyecto curricular de Ingeniería Ambiental y la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental —desde sus grupos de investigación GIAUD e INDESOS, respectivamente— constituyó un elemento fundamental para su exitosa realización sin desconocer, claro está, el valioso apoyo del meteorólogo Ernesto Rangel, subdirector de Meteorología del Ideam. El equipo lo completaron los estudiantes de pregrado ganadores de la convocatoria del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas: Juan Barrios, Marcos Ramos, Walter Velásquez, Lorena Lombana y Juan David Oidor, quienes se vincularon al proyecto junto con los estudiantes de posgrado Carolina Velásquez y Yuli Ibarra; al igual que Rubén Dario Mateus, quien hizo aportes en Sistemas de Información Geográfica.

Los logros aquí representados constituyen un reflejo del esfuerzo, la persistencia y la confianza de los estudiantes como equipo de trabajo, quienes se sensibilizaron al visitar la zona de estudio de los municipios de San Marcos y San Benito Abad en el departamento de Sucre. Juan Barrios lideró el proceso de consolidación de las bases de datos, hizo sugerencias a la metodología de homogenización y propuso

el reto de la integración entre la información de las series de precipitación y los procesos de planificación ambiental; y Marcos Ramos se concentró en la detección de cambios y su vínculo con periodos de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, y logró consolidar una propuesta de cómo estos resultados se pueden emplear en planes de ordenamiento territorial (POT).

Carolina Velásquez propuso un modelo de toma de decisiones para el caso de las inundaciones del río San Jorge e integró a su desarrollo un modelo dinámico para los caudales; el profesor Julio Beltrán aportó los conocimientos de sus estudios de doctorado y su experiencia en planificación, en biología y, en particular, en modelación en el caso de humedales, al desarrollo del análisis de caudales.

Yuli Ibarra sintetizó la revisión bibliográfica aportando insumos para el uso de la información de precipitación en el sector agrícola; y Walter Velásquez motivó el estudio de los valores extremos de precipitación, y progresivamente logró avances y propuso la integración de sus resultados en el marco de la gestión de riesgos en la escala regional.

Es posible que estos breves comentarios sobre el presente trabajo se queden cortos ante la magnitud de la labor desarrollada, su importancia y la calidad de los productos obtenidos.

José Edgar Montealegre Bocanegra

Introducción

Los resultados que se presentan en esta publicación corresponden al proyecto de investigación titulado: “Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones”, que se desarrolló en la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas con los aportes de los grupos de investigación GIIAUD, del proyecto curricular de Ingeniería Ambiental, e INDESOS, de la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental (Convocatoria 03-2011). La financiación de proyectos de investigación fue presentada por alianzas de grupos de investigación institucionalizados en el sistema de investigaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y registrados en la plataforma Scienti, del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), y contó con el apoyo técnico de la Subdirección de Meteorología del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

La publicación está organizada en cinco capítulos. El primer capítulo presenta los aspectos metodológicos del tema de homogenización de series de tiempo de precipitación e ilustra algunos ejemplos para estaciones meteorológicas localizadas en la zona climatológica del Bajo Magdalena; el segundo capítulo presenta el tema relacionado con el uso de las series de tiempo en ordenamiento territorial y planificación ambiental; el tercer capítulo ilustra un modelo de toma de decisiones aplicado al caso de inundaciones del río San Jorge; el cuarto capítulo presenta una revisión bibliográfica sobre el uso de las series en el contexto agrícola; y el quinto capítulo presenta una perspectiva relacionada con la gestión del riesgo haciendo uso del análisis de valores extremos.

El desarrollo de cada uno de los capítulos se logró gracias al aporte de estudiantes en sus trabajos de grado de Ingeniería Ambiental: Juan Barrios, Marcos Ramos y Walter Velásquez, y de la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental: Carolina Velásquez y Yuli Ibarra; gracias a la participación de los auxiliares de investigación Lorena Lombana y Juan David Oidor, y a los docentes Néstor Bernal

y Julio Beltrán; y gracias a los aportes de Ruth Correa desde la Subdirección de Meteorología del Ideam y a las valiosas sugerencias de Edgar Montealegre, Jorge Martínez y Fernando Ruiz.

Adicionalmente, se contó con el apoyo del personal técnico y administrativo de la Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana) y de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), así como de la Alcaldía Municipal, la Unidad Municipal de Asistencia Técnica y Agropecuaria (Umata) y la Unidad Regional del Instituto Colombiano de Agricultura (ICA) de San Marcos. Por último, se contó con la Alcaldía Municipal de San Benito de Abad en el departamento de Sucre y con sus pobladores que apoyaron la recolección de información y la aplicación de encuestas en la región de estudio.

Capítulo 1. Homogenización de series mensuales de precipitación

NÉSTOR RICARDO BERNAL SUÁREZ
JUAN SEBASTIÁN BARRIOS MORENO
MARCOS ANDRÉS RAMOS CASTAÑEDA



Zonas de inundación, municipio de San Marcos, Sucre

Foto: Marcos Ramos

1.1 Descripción de la precipitación en Colombia

En el territorio colombiano, la precipitación evidencia una alta variabilidad tanto espacial como temporal. Desde el punto de vista espacial, algunos factores relacionados con dicha variabilidad son la orografía, la distancia de los lugares al mar, la circulación regional y local y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Pabón et al., 1998). Y según el componente temporal, se presentan regímenes unimodales —cuando las mayores intensidades de lluvia tienden a concentrarse en un mes del año— o regímenes bimodales —para aquellos casos con predominancia de las mayores intensidades de lluvia en dos meses del año—. Adicional a la caracterización espacial y temporal, algunos autores describen sistemas y procesos meteorológicos que permiten explicar la generación de la lluvia (Hurtado, 2000; León y Zea, 1998), y también identifican algunos núcleos de mayor intensidad y frecuencia relacionados con la presencia de conglomerados de nubes que se forman con las condiciones locales y regionales de contenidos de humedad, energía y la dinámica de los vientos (Jaramillo y Cháves, 2000; Holton, 1999; Montoya, 2008).

Una alternativa para analizar los contrastes de la precipitación es describirla para cada una de las regiones en Colombia: i) Caribe, ii) Andina, iii) Orinoquia, iv) Amazonia y v) Pacífico. Este capítulo trata el caso de la región Caribe, en particular en la región climática de la cuenca del Bajo Magdalena.

Para describir de la precipitación, se tienen en cuenta la variabilidad climática y sus escalas. Pabón y Montealegre (2017) describen dicha variabilidad como: “En diferentes años, los valores de las variables climatológicas (temperatura del aire, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal (condición generalmente representada por el valor promedio de una variable climatológica en un periodo de por lo menos 30 años)”. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de anomalías (la diferencia resultante entre el valor de la variable climatológica y su valor promedio), definición que también fue abordada por Pabón et al. (1998). Otra alternativa de estimar las anomalías corresponde a las alteraciones más probables, que consisten en determinar la “mayor frecuencia” de los cambios en volúmenes de lluvia respecto al valor normal, al tener en cuenta varios periodos de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña. Esta metodología se

empleó en el proyecto del Plan Regional Integral de Cambio Climático de Bogotá-Cundinamarca (PRICC) (Montealegre, 2012).

Las escalas de variabilidad climática se pueden clasificar en: i) estacional, ii) intraestacional, iii) interanual e interdecadal (Pabón y Montealegre, 2017; Montealegre, 2017). Algunos autores como Guzmán et al. (2014) han propuesto el análisis en la escala estacional como una alternativa de regionalización de Colombia, desde el punto de vista espacial, empleando como variable la precipitación. Otras alternativas de regionalización han sido propuestas por Eslava et al. (1986) y Jaramillo y Chávez (1997), quienes han contribuido a los análisis concernientes a clasificaciones climáticas. En relación con el tema de la variabilidad intraestacional, Rojas (2012) desarrolla un marco teórico para el desarrollo de un modelo con fines de realizar predicciones climáticas en el Ideam, y en particular, describe las ondas Madden-Julian y propone un modelo basado en redes neuronales.

Con el propósito de avanzar en el entendimiento de la variabilidad climática y su análisis, el elemento climático de la precipitación (Montealegre, 2009) describe las siguientes características: i) consideraciones generales sobre la variabilidad interanual del campo térmico superficial de los océanos Pacífico Tropical y Atlántico Norte y Sur, sus características estacionales; ii) variabilidad interanual del campo térmico superficial en el Atlántico Norte y Sur; iii) relación entre las anomalías de la TSM en el océano Pacífico ecuatorial central y los sectores norte y sur del océano Atlántico; iv) comportamiento de la TSM del océano Atlántico durante las fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) del Pacífico Ecuatorial Central; v) influencia de los océanos Pacífico y Atlántico en la variabilidad de la precipitación de Colombia; vi) algunos aspectos de la variabilidad interanual del océano Pacífico y su efecto climático en Colombia; y vii) algunos aspectos de la variabilidad interanual del océano Atlántico y su efecto climático en Colombia.

La variabilidad espacio-temporal de la precipitación y otros elementos climatológicos se afectan por la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña en la escala interanual. Autores como Mesa et al. (1997) refieren: “El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un evento natural que se da como resultado de la interacción ente el océano y la atmósfera en la región del océano Pacífico ecuatorial”. Los mismos autores citan a Trenberth (1991): “El ENSO es un fenómeno cuasi-periódico con una recurrencia promedio de cuatro años, pero que varía entre dos y siete años”. Referente a los impactos del ENOS, mencionan: “Las anomalías climáticas que ocasionan ambas fases del ENSO, El Niño y La Niña, son diversas y variadas. En otras regiones del planeta, las anomalías son de signo contrario a aquellas que suceden en la región tropical de las Américas”. Por otro lado, Pabón y

Montealegre (2017) analizan aspectos como: i) las causas del fenómeno, ii) las etapas de desarrollo, iii) la intensidad y iv) la duración.

El ENOS, que representa una fase de variabilidad climática extrema (Ideam y Unal, 2018), tiene efectos i) en el ambiente marino y costero colombianos; ii) en la temperatura del mar; iii) en el nivel medio del mar; iv) en la circulación oceánica del Pacífico colombiano; v) en la salinidad y los nutrientes; vi) en el clima del área continental; vii) en la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra; viii) en la temperatura del aire; ix) en la precipitación, y como este tema es relevante para esta publicación, citan a autores como Poveda (1994), Poveda (2004), y los abordajes de Puertas y Carvajal (2007); ix) en los niveles y caudales de los ríos y en la oferta hídrica natural. Otros autores como Ávila et al. (2014) han tratado el análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica, y como estudio de caso, la cuenca del río Cali sobre los suelos y la cobertura vegetal, y en la frecuencia de valores extremos.

1.2 Procesos generadores de la precipitación en Colombia

Autores como Mesa, Poveda y Carvajal (1997) describen algunos fenómenos oceánicos atmosféricos de gran escala que tienen influencia sobre Colombia en su hidroclimatología; entre ellos están: el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur y los mecanismos oceánico-atmosféricos que interactúan con el ENOS y que pueden generar anomalías en variables climatológicas e hidrológicas como la oscilación del Atlántico Norte (NAO), los complejos convectivos de mesoescala, las ondas del Este y la oscilación quasibienal. Adicionalmente, en la investigación de la Universidad Nacional y el Ideam (2018) se hace referencia a las ondas Madden-Julian, y también se apunta:

El comportamiento de la precipitación a través del año en diferentes regiones del país [...], es posible constatar que en el país hay tres regímenes en el ciclo anual de la precipitación: monomodal en la parte oriental, bimodal en las regiones Andina y Caribe y cuasimonomodal (o cuasibimodal) en la región Caribe.

En el estudio del Ideam y la Universidad Nacional (2018), se realiza la descripción de la precipitación con base en los resultados y los mapas de Alarcón (2017):

Sobre el territorio colombiano se destacan núcleos con precipitación superiores de 4.000 milímetros al año, los que se localizan en: sectores sur, centro y norte de la región Pacífico, en el piedemonte amazónico y llanero (occidente de la Orinoquía), en el departamento de Antioquia, así como en un área reducida de la cuenca alta del río Arauca y en el Catatumbo. En el Pacífico se presentan zonas

extremadamente lluviosas localizadas en los departamentos del Cauca y del Chocó; en dichas zonas la precipitación anual sobrepasa los 10.000 milímetros al año.

El clima regional de Colombia puede definirse por las propiedades de los valores medios de los campos atmosféricos, que están forzados por las condiciones de frontera de la atmósfera, la distribución de continente-océano y las variaciones espaciotemporales de la radiación solar en superficie. Estos fenómenos atmosféricos son fuertemente influenciados por la distribución de la topografía y la vegetación en la superficie dentro del territorio colombiano. Ruiz y Melo (2019) citan a Ideam (2005), señalando que:

[...] dentro de los sistemas sinópticos que influyen las condiciones de tiempo y clima en Colombia destaca los vientos alisios, la zona de convergencia intertropical, las ondas del este del Caribe, los ciclones tropicales, los sistemas sinópticos del Pacífico y la Amazonia, las vaguadas de latitudes medias del hemisferio norte, las vaguadas tropicales de la alta troposfera (TUTT) e incluso los sistemas convectivos de mesoescala.¹

En este marco, entre los procesos que generan lluvias, acorde con Hurtado (2000), se destacan los siguientes:

a. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT):

La ZCIT marca la confluencia entre el aire del hemisferio Norte y el hemisferio Sur. En esta zona, los vientos alisios del Noreste, que son originados por el aire que fluye alrededor del anticiclón del Atlántico Norte, encuentran a los alisios del Sureste, que a su vez son originados por los anticiclones del Pacífico y el Atlántico Sur. Debido al flujo convergente, la ZCIT es la región de mayor nubosidad y lluvias del planeta. La convección y la precipitación asociada se concentra alrededor de conglomerados de nubosidad muy definidas que la hacen fácilmente identificable.

En este sentido, Mesa et al. (1997) señalan: “Sobre el océano, la banda de la ZCIT raramente es continua y casi nunca está sobre el Ecuador, casi siempre está sobre el Ecuador, casi siempre está formada por racimos de nubes con tamaños del orden de varios cientos de kilómetros separado por regiones de cielo despejado”. Ruiz y Melo (2019) describen el movimiento latitudinal de la ZCIT en las longitudes 110°W, 80°W y frente a la línea de costa colombiana empleando el modelo CSFR para la longitud 80°W. La simulación muestra que en los meses febrero-marzo la ZCIT se desplaza a una menor latitud (2,4°N) y se observan cuatro valores con los mayores

1 Los sistemas convectivos de mesoescala son referidos por Pabón y Montealegre (2017) en la descripción de la dinámica atmosférica.

desplazamientos de $6,8^{\circ}\text{N}$ en mayo, $7,4^{\circ}\text{N}$ en junio y $6,8^{\circ}\text{N}$ en julio y de $7,8^{\circ}\text{N}$ en octubre. Hace tres décadas y en este contexto, Bernal et al. (1989) mencionan:

El desplazamiento de la ZCIT sigue el movimiento aparente del Sol y lleva un retraso de uno o dos meses aproximadamente respecto a él; es bastante continua sobre los océanos y se divide al llegar a los continentes. A comienzos del año se encuentra ubicada cerca a los 6° de latitud sur sobre el continente, en tanto que en el océano está casi sobre los 0° , en el Ecuador. Hay evidencia de una segunda banda nubosa asociada con la ZCIT en el Pacífico, frente a las costas de Ecuador (entre diciembre y mayo), aproximadamente a los 5° sur. En julio o agosto se halla ligeramente al norte de las costas colombianas. Durante el resto del año se halla en posiciones intermedias produciendo a su paso el tiempo atmosférico asociado a ella.

- b. Sistemas de alta presión: los anticiclones subtropicales no participan directamente en la generación de lluvias en Colombia, pero su posición y su intensidad en un momento dado condicionan el comportamiento de la ZCIT y de las ondas del Este, ya que pueden bloquear o desviar su trayectoria. Estos sistemas de presión alta son conocidos como semipermanentes porque cambian de posición solo del verano al invierno boreal. Entre estos anticiclones se encuentra el anticiclón del Pacífico Norte, que es una gran celda de alta presión que cubre la mayor parte del Pacífico Norte, afectando la cuenca del Caribe en forma indirecta en niveles medios y altos. Su mayor influencia consiste en desarrollar vientos del Oeste en niveles altos por encima de los 3000 m durante la temporada seca (noviembre-abril) y un cizallamiento en niveles altos que inhibe la intensificación hacia el Norte de los ciclones del Pacífico Oriental en octubre y noviembre.

- c. Ondas del Este del Caribe:

Constituyen alteraciones en la corriente de los alisios, generalmente con curvatura ciclónica, los cuales deforman el campo de presión, originando cambios bruscos en el tiempo predominante. Generalmente, son precedidas por escasa nubosidad, la cual comienza a aumentar a medida que se acerca el eje de la onda. El paso del eje de la onda da lugar a bruscos cambios en la dirección del viento y aumento de la nubosidad. A la derecha del eje, sube la presión y la humedad, y es común observar actividad tormentosa. Las ondas del Este frecuentemente generan buena parte de los ciclones y huracanes tropicales. Se presentan únicamente en la temporada de mayo a noviembre y durante esta época son responsables en alto porcentaje de los cambios de tiempo observados en la región Caribe. (Hurtado, 2000)

- d. Procesos de convección locales: este proceso es de importancia fundamental en el origen de las lluvias en Colombia. Los procesos convectivos tienen lugar en las zonas planas, tales como la región Caribe. Son originados por ascensos verticales de aire debido al calentamiento de la superficie de la Tierra. Al ascender, el aire se enfría adiabáticamente hasta alcanzar el nivel de condensación a una altura determinada, luego de lo cual aparecen los procesos de condensación, desarrollo vertical y precipitación. Son procesos generalmente rápidos, localizados y con escaso desplazamiento horizontal, aun cuando pueden afectar grandes áreas. Los núcleos convectivos comienzan a desarrollarse hacia la media mañana o al final de la tarde produciendo lluvias vespertinas o nocturnas, respectivamente.
- e. Ciclones tropicales:

Los ciclones tropicales se forman en la cuenca del Caribe (entre otros sitios) comúnmente sobre aguas cálidas, bajo condiciones de dirección del viento constantes con la altura. Con estas condiciones pueden ser desatados por una onda del Este. La influencia directa de los ciclones generalmente solo se observa en las islas de San Andrés y Providencia o en el extremo norte de La Guajira. Sin embargo, su paso también tiene un efecto perturbador sobre el resto del país, al interactuar con la ZCIT o con ondas del Este. (Hurtado, 2000)
- f. Baja Anclada de Panamá: para finales de mayo y comienzos de junio, por lo general, se posiciona un sistema de baja presión, o baja anclada de Panamá, sobre la parte centro y oeste del mar Caribe, generando una disminución de hasta 1008 milibares hacia el Este; la presión barométrica oscila entre 1010 y 1012 milibares.
- g. Frentes fríos: el comportamiento atmosférico en Colombia está determinado no solo por la acción de los sistemas sinópticos que cruzan el país, sino también por la influencia que en ellos tienen algunos sistemas característicos de otras latitudes, entre los cuales se destacan algunos típicos del hemisferio norte y el hemisferio sur, como los frentes fríos. Delante del frente frío, los alisios son reemplazados por un flujo ecuatorial cálido y húmedo, la convección se intensifica con los días y se organiza en una línea de convergencia prefrontal. Tras el paso del frente, la temperatura baja y se reestablece el régimen de alisios. Sobre el mar Caribe, los frentes fríos empiezan a transitar desde diciembre hasta marzo, provenientes de las altas latitudes, descendiendo en ocasiones hasta los 10° Norte. Estos sistemas

frontales suelen producir aumentos significativos en el gradiente de presión en el área y generan incrementos en la intensidad de los vientos.

1.3 Régimen de lluvias en la región Caribe y el Bajo Magdalena

Bernal et al. (1989) describen la precipitación anual para la región del Caribe:

En la Alta Guajira la precipitación total anual es inferior a 500 mm y se va incrementado hacia la parte media y baja donde alcanza los 1000 mm. La Sierra Nevada de Santa Marta conforma una zona meteorológica prácticamente desligada del comportamiento general de la región. En su parte norte, se registran precipitaciones algo superiores a los 2500 mm, mientras que en los sectores oriental y suroriental son menores, alrededor de 1500 mm. En las llanuras del Caribe, la precipitación aumenta del litoral hacia el interior. En Barranquilla y Cartagena, se registraron alrededor de 1000 mm. En las llanuras de Córdoba, Sucre, Magdalena y el Cesar oscila entre 1500 y 2500 mm. Hacia el litoral de Urabá se registran cantidades de ese mismo orden, mientras que en las estribaciones de las cordilleras Occidental y Central supera los 3000 mm.

Mesa, Poveda y Carvajal (1997) describen la precipitación en la región Caribe, así:

[...] la precipitación media es apenas del orden de 1500 mm por año. Esta lluvia cae principalmente de mayo a octubre, con dos máximos separados en mayo-junio y septiembre-octubre. La distribución espacial es uniforme, en comparación con el resto de regiones de Colombia. La más alta precipitación anual ocurre en una franja estrecha por debajo de los 2000 m a lo largo de la cara occidental de la Sierra. El extremo seco ocurre en la Alta Guajira con totales anuales de 300 mm por año.

Desde el punto de vista de un análisis de regionalización climatológica, Guzmán y Ruiz (2012) y el Ideam (2005) describen la variabilidad, así: el régimen de lluvias en la región Caribe colombiana es bimodal con una temporada seca muy marcada a principio de año y una segunda con volúmenes de precipitación menos críticos a mediados de año. La primera temporada responde principalmente a la ubicación del anticiclón del Pacífico Norte, cuyos movimientos temporales durante el invierno boreal (de enero a marzo), en la cuenca del Caribe y las zonas costeras próximas, favorecen el debilitamiento de la nubosidad y la precipitación, esto sumado al hecho de que para este periodo la ZCIT (principal proceso generador de precipitaciones) se encuentra en su posición más al sur del país. En el verano boreal (de julio a septiembre), el área del anticiclón es un poco menor y excluye las inmediaciones de la ZCIT.

La época de lluvias se extiende desde abril hasta noviembre con volúmenes abundantes. En esta época, suelen presentarse fenómenos como los ciclones tropicales, las ondas del Este y las colas de frentes fríos del hemisferio Norte, los cuales pueden aumentar las precipitaciones en todo el Caribe colombiano. Durante el inicio de la temporada lluviosa en abril, comienza a percibirse el ascenso paulatino de la ZCIT sobre los 8° Norte, así como la reactivación de la baja presión anclada de Panamá, con lo cual se presentan las primeras precipitaciones.

En la región de La Mojana en particular, se presentan volúmenes de lluvia más altos que al norte de la región Caribe, dada la influencia de masas húmedas que incursionan desde el océano Pacífico; sin embargo, los procesos pluviogénéticos mencionados afectan a ambas zonas. La proximidad con las serranías de la cordillera occidental es un factor adicional en este incremento de las lluvias, que causa que la temporada seca de mitad de año en sectores del Bajo Magdalena y la cuenca del Cesar prácticamente desaparezca conformando un régimen más cercano al monomodal con un periodo a mitad de año conocido como “veranillo”.

La zona de estudio que se analiza en el presente documento cuenta con dieciséis municipios ubicados en cuatro departamentos dentro de los límites de la región climática del Bajo Magdalena, así: San Marcos, San Benito de Abad, Majagual y Guarandá en el departamento de Sucre; San Jacinto del Cauca, Achí, Magangué y Mompós en el departamento de Bolívar; Planeta Rica, Pueblo Nuevo, Buenavista, La Apartada y Ayapel en el municipio de Córdoba; y Nechí y Caucasia en el departamento de Antioquia.

En esta región, se definió una subzona de estudio que atiende a los siguientes criterios: i) los municipios de la región climática que cuenten con al menos una estación meteorológica; ii) de los municipios seleccionados, aquellos que cuenten con estaciones que midan precipitación; y iii) de los municipios seleccionados, aquellos con potencial de afectación por exceso o defecto de lluvias u ocurrencia de eventos de variabilidad climática extrema. Esta subzona se ubica dentro de la región climática del Bajo Magdalena, es por ello que se incluyen en los análisis y resultados un total de 87 estaciones meteorológicas que pueden verse en el mapa 1.1. Allí se ilustra tanto la región climática del Bajo Magdalena, como la subzona de estudio y los municipios de la subzona se delimitan con color rojo.

Adicionalmente, en la subzona se encuentra la jurisdicción de tres corporaciones: la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB), la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS) y la Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana), así

como las subregiones hidrográficas Arroyo Corozal, Bajo Cesar, Bajo San Jorge-La Mojana, Directos al Bajo Cauca-Ciénaga La Raya y Directos al Bajo Magdalena (Mapa 1.2).

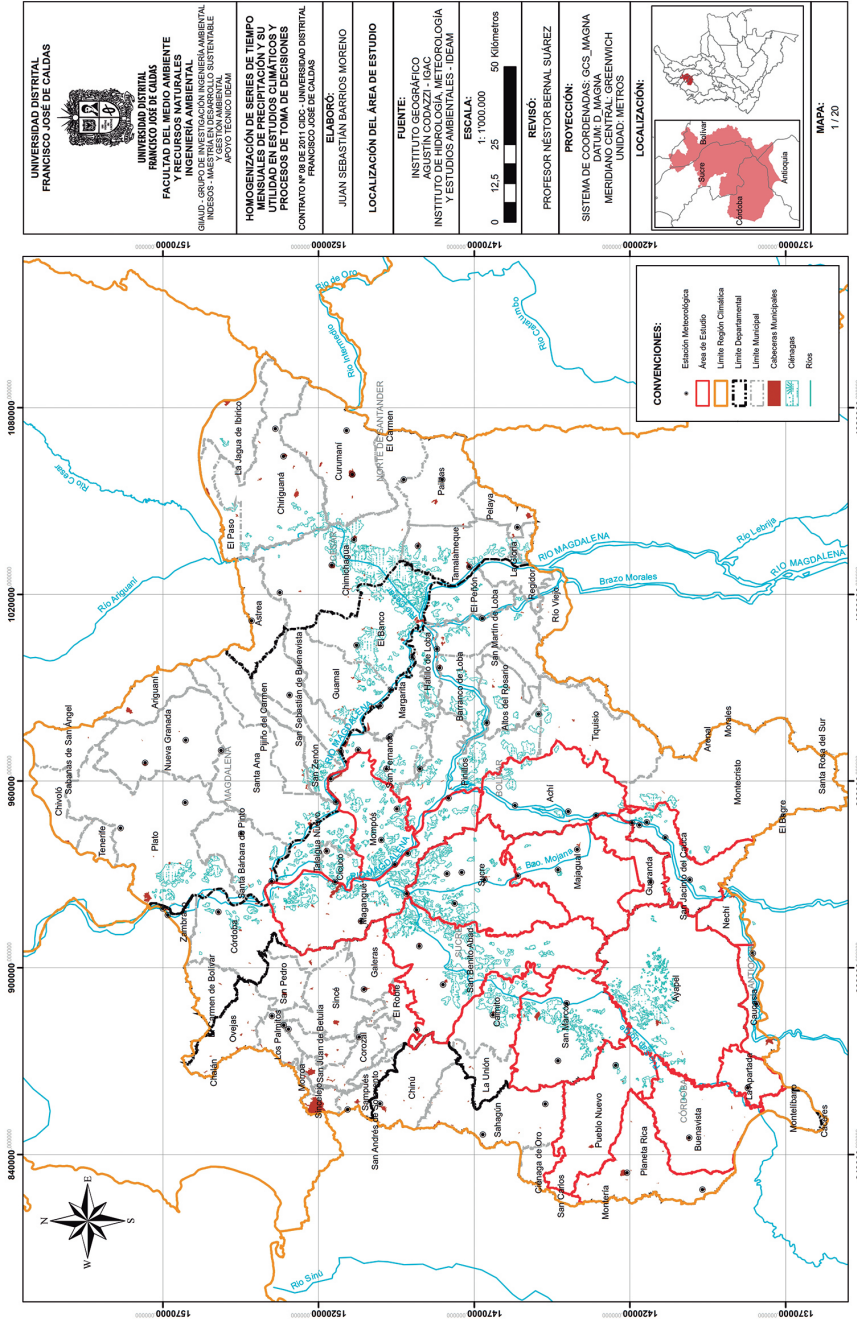
En el contexto regional, la región climática del Bajo Magdalena se ubica en el Caribe colombiano, en la zona de confluencia de tres grandes corrientes superficiales: los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, con lo que hace parte de la denominada “depresión momposina”, una zona que por recibir la escorrentía de los valles interandinos se comporta como delta aluvial interior de tierra baja, inundable en variada intensidad durante ciertas épocas del año. La región comprende las áreas de la macrocuenca hidrográfica del río Magdalena y del río Cauca ubicadas en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Cesar, Córdoba, Magdalena y Sucre, al norte del país.

La importancia de la región está dada por su papel fundamental en la regulación de caudales, la absorción de contaminantes, la retención de sedimentos y la recarga de acuíferos por parte de un complejo sistema de humedales asociados a gran diversidad de fauna y flora silvestre. Se presenta, además, un alto potencial productivo en el sector agropecuario y forestal, y una riqueza cultural que contrasta con los bajos niveles de calidad de vida de su población.

Como parte de un complejo de humedales, la región cumple la función de amortiguar inundaciones, ya que permite distribuir los volúmenes de agua originados por precipitación. Sin embargo, la alteración de la dinámica hídrica, causada por la construcción de obras civiles improvisadas y prácticas productivas inadecuadas, ha hecho que los fenómenos de inundación superen los niveles históricos en los últimos años. Este hecho se acentúa debido a la ocurrencia de fenómenos climáticos de variabilidad interanual extrema como El Niño y La Niña en el país.

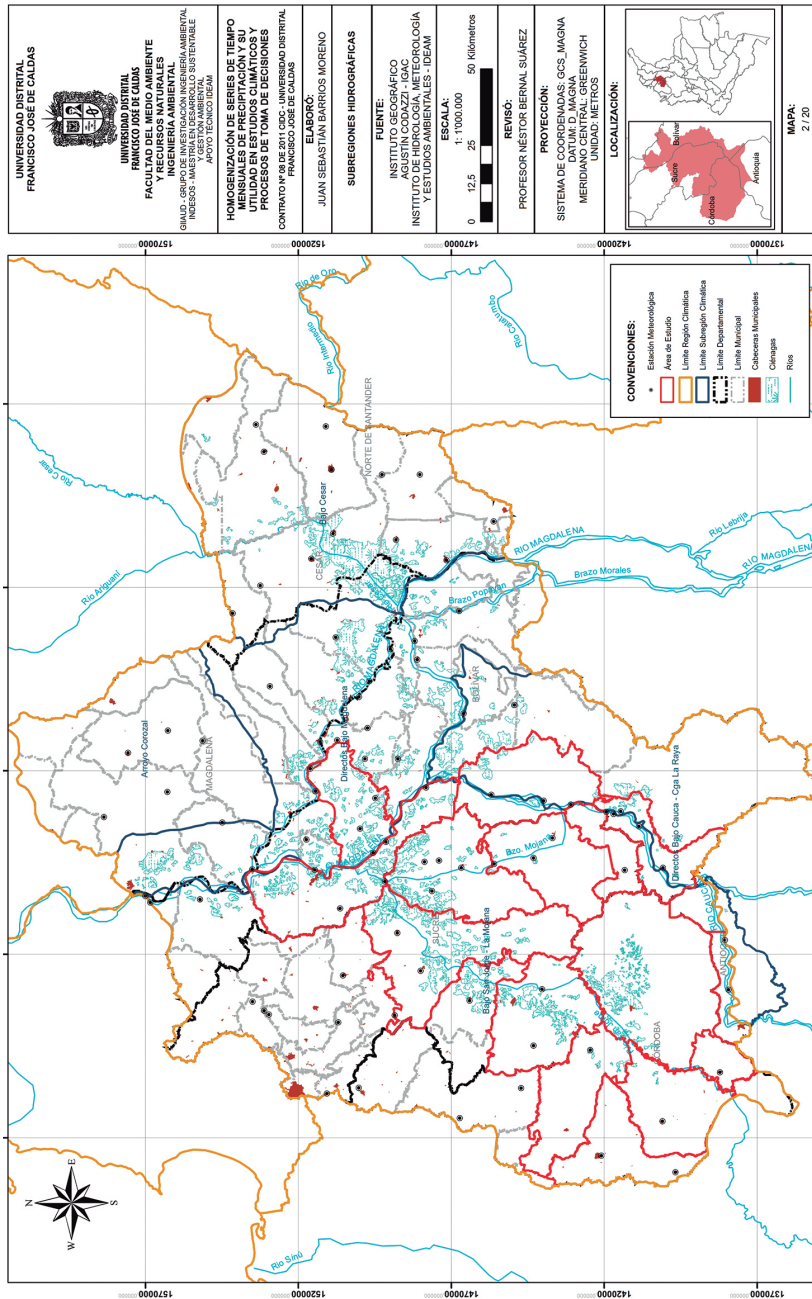
Los procesos ambientales de la región están condicionados entonces por las inundaciones, que corresponden a fenómenos naturales de normal ocurrencia periódica asociados a la dinámica de las corrientes aluviales de los ríos presentes en la zona y su sistema de ciénagas conexas (Mapa 1.3). Teniendo en cuenta este contexto regional, a continuación se describe el proceso metodológico implementado en la presente investigación.

Mapa 1.1.1. Localización del área de estudio



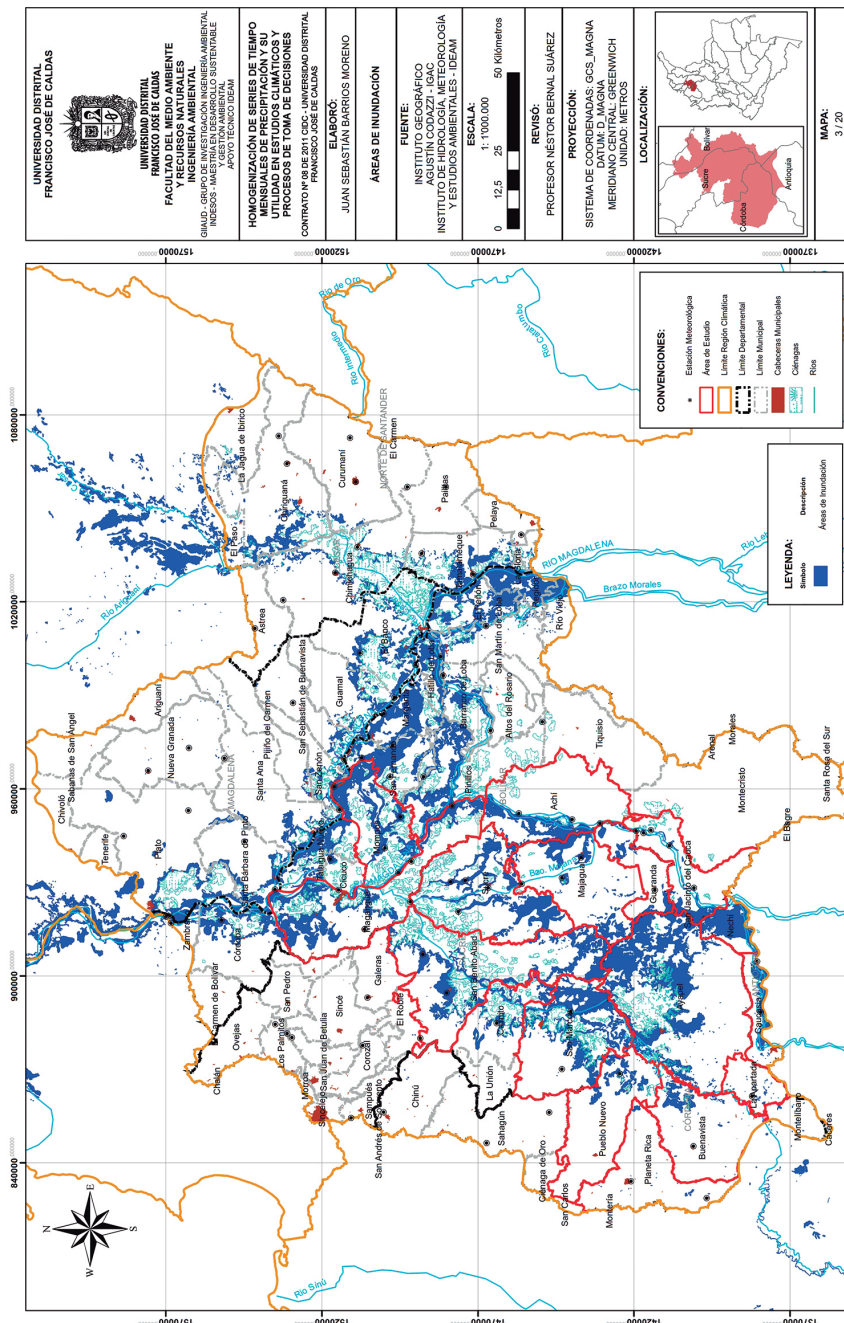
Fuente: elaboración propia

Mapa 1.2. Subregiones hidrográficas



Fuente: elaboración propia

Mapa 1.3. Áreas de inundación



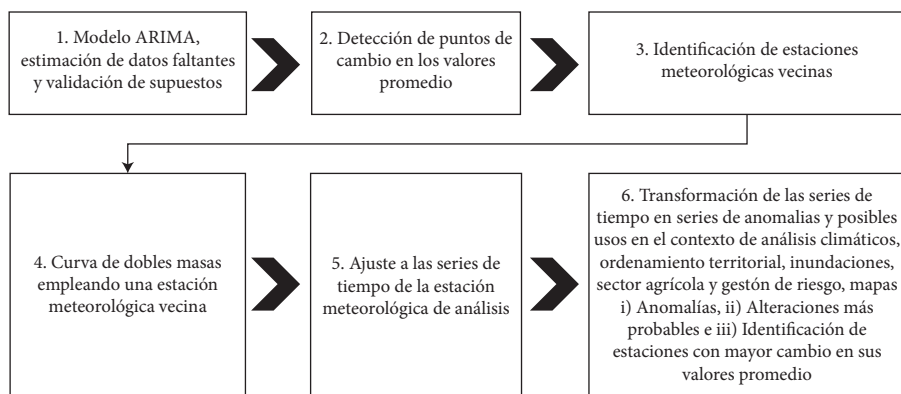
Fuente: Ideam, 2012

1.4 Homogenización de series de tiempo

El proceso de homogenización de series de tiempo consiste en realizar algunos ajustes, en particular en los registros de precipitación mensual, para aquellos casos en los que se han evidenciado algunos cambios atribuibles a errores de medición o a probables fallas de los instrumentos de medición, o cambios generados por la construcción de obras civiles cercanas a la estación meteorológica de análisis.

La metodología para el proceso de homogenización incluye las siguientes etapas: i) modelo ARIMA y estimación de datos faltantes, ii) detección de puntos de cambio en los valores promedio, iii) identificación de estaciones meteorológicas vecinas, iv) curva de dobles masas empleando una estación meteorológica vecina, v) ajuste a las series de tiempo de la estación meteorológica de análisis, y vi) transformación de las series de tiempo en series de anomalías y posibles usos en el contexto de análisis climáticos, ordenamiento territorial, inundaciones, sector agrícola y gestión del riesgo (Figura 1.1).

Figura 1.1. Etapas del proceso de homogenización y uso de las series de tiempo de precipitación mensual



Fuente: elaboración propia

1.5 Modelo ARIMA y estimación de datos faltantes

Los modelos ARIMA corresponden a modelos que permiten integrar componentes autorregresivos y aleatorios en la modelación de la variabilidad temporal de una serie de tiempo. Este enfoque originalmente fue presentado por Box y Jenkins (1976), quienes señalan algunas aplicaciones de las series en el contexto de la naturaleza del sistema que genera las series, los pronósticos óptimos y las funciones de transferencia, con el fin de definir políticas de control óptimas ilustrando cómo una

variable de control podría ser manipulada para minimizar las perturbaciones en una variable dependiente. En este último contexto, Berthoeux y Box (1996) ilustran un ejemplo de aplicación de las series de tiempo para la evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Algunos autores como Storch y Zwiers (1999), Wilks (2006) y Barbulescu et al. (2010) presentan esta familia de modelos como alternativa para modelar series meteorológicas, en ambos casos se presenta el enfoque de la modelación desde el punto de vista del dominio del tiempo o la frecuencia. En el primer enfoque, el objetivo es encontrar los efectos de tipo aleatorio y autorregresivo que permiten la modelación de la serie, y en el dominio de la frecuencia, el propósito es descomponer la serie de tiempo en subseries que permiten identificar posibles ciclos en las series. Este último enfoque ha sido presentado por Duchon y Hale (2012), quienes presentan algunas alternativas de filtros en series de tiempo; el enfoque de filtro también es presentado por Box y Jenkins (1976). Autores como Abraham y Ledolter (1983) y Montgomery et al. (1990) ilustran otros enfoques de modelos complementarios basados en métodos de suavizamiento para la modelación de las series. Holan et al. (2010) ilustran un conjunto de modelos de la familia ARIMA, que permiten visualizar otras perspectivas de modelación, y autores como Nieto (2008) ilustran otras alternativas de los modelos de umbrales descritos por Storch y Zwiers (1999) como modelos autorregresivos de régimen dependiente.

Bernal (2011) realiza una síntesis de algunos modelos ARIMA aplicados en series meteorológicas, reconociendo que algunos de ellos han sido propuestos por el Ideam; allí se aprecia la evolución que ha tenido la modelación de las series de tiempo: modelos lineales como los modelos ARIMA, en los cuales los coeficientes estimados de tipo autorregresivo cobran relevancia por su interpretación física de la persistencia mensual del fenómeno de la lluvia en las escalas intraestacional y estacional; modelos no lineales como los TAR y modelos de la escuela bayesiana.

Tabla 1.1. Modelos ARIMA aplicados en series meteorológicas

Autor(es)	Tipos de modelos
Herrero y Álvarez (2007)	Alternativas de estimación de datos que están direccionadas al uso de estaciones con vecindad espacial.
Ruiz (1996)	Modelo para series de tiempo de temperatura, altiplano cundi-boyacense.
Martínez et al. (1996)	Modelo genérico para serie de tiempo de precipitación y metodología de estimación de datos faltantes.

Autor(es)	Tipos de modelos
Nieto y Ruiz (2002)	Identificación de modelos ARIMA que permitan modelar la variabilidad temporal de la precipitación y su utilidad para la estimación de los datos faltantes, y las estrategias para la estimación de los datos para aquellos casos cuya longitud de la serie es larga. Tal es el caso de series de tiempo diarias.
Chaves (2002)	Modelación mensual de la serie de tiempo de brillo solar para estaciones ubicadas en la región cafetera colombiana.
Murillo et al. (2005)	Analizan el caso de la precipitación diaria en el municipio de Quibdó en el departamento del Chocó.
Chi (2006)	Descripción de varios métodos de estimación de datos faltantes.
Mirón et al. (2006)	Se trata el caso de series de tiempo diarias de temperatura y estimación de datos faltantes en una aplicación en España.
Nieto (2008); Fierro-Renoy (s. f.)	Modelos de umbrales TAR (Threshold Autoregressive), constituyen una nueva alternativa para abordar la modelación de las series de tiempo de precipitación y estimación de datos faltantes.
Cepeda y Bermúdez (2012)	Modelos bayesianos, aplicados a series de caudales y permiten establecer la relación funcional con series de precipitación.

Fuente: elaboración propia

Existen diversas aplicaciones de los modelos ARIMA en el modelamiento de series de precipitación y de datos meteorológicos y climáticos. En casos puntuales, se han propuesto modelos estocásticos como técnicas de generación de escenarios futuros de cambio climático, teniendo en cuenta la simulación y el modelamiento de precipitación mensual y el promedio mensual de temperatura, por ejemplo, para zonas como el sur de Irán, particularmente para la estación sinóptica Shiraz (Babazadeh y Shamsnia, 2014). En este estudio, se tomó una serie de datos de precipitación y de promedio de temperatura mensual correspondiente a un periodo de veintinueve años; basado en los modelos ARIMA se usaron métodos de autocorrelación y autocorrelación parcial con el fin de obtener modelos adecuados de pronóstico de precipitación mensual y de promedios de temperatura mensual.

La metodología de apropiación de los modelos ARIMA consistió en tres fases: identificación del modelo, estimación de parámetros y prueba de diagnóstico. Como resultado de la investigación, se logró obtener un modelo apropiado para la estimación de valores de precipitación en la estación Shiraz $ARIMA(0,0,0) \times (2,1,0)_{12}$; así mismo, se obtuvo el modelo $ARIMA(2,1,0) \times (2,1,0)_{12}$ para la estimación del promedio de la temperatura mensual.

En este contexto, El-Fandy et al. (1994) utilizan los modelos ARIMA para identificar niveles estacionarios de inundaciones para el río Nilo en El Cairo (Egipto) y modelar la precipitación anual sobre Etiopía. El autor toma como base una serie de

registros de datos de inundaciones y niveles del río Nilo durante un periodo de 835 años (622 a 1457), incluyendo periodos más recientes (1907-1984), y las tendencias de lluvias y zonas de descargas de algunos ríos del este y centro de África.

Se utilizaron funciones de autocorrelación y de autocorrelación parcial con el fin de obtener modelos ARIMA apropiados para los datos registrados y su posterior pronóstico. Los métodos utilizados para el análisis de los datos fueron: 1) periodograma² para la detección de patrones periódicos en un contexto de ruido blanco; y 2) análisis de tendencias. Con el fin de construir el modelo ARIMA para estos datos, se utilizaron solo 400 años de los 835 evidenciados (622-1021 d. C.), y se calcularon las autocorrelaciones y las autocorrelaciones parciales. Con base en estos cálculos y después de identificar varios modelos, se obtuvo el modelo ARIMA (1,0,1) (3,1,0)₁₄, el cual es un insumo para el pronóstico de valores futuros de los niveles de inundación estacional del río Nilo. Por otra parte, para el modelamiento y el pronóstico de lluvias en Etiopía, se identificó el modelo ARIMA (1,0,0) (1,1,0)₁₀.

A su vez, Shamsnia et al. (2011) utilizan los modelos ARIMA como métodos estocásticos para el modelamiento de parámetros climáticos. En su investigación, emplearon datos de veinte años de humedad relativa y de temperatura y precipitación promedio mensual en la región de Abadeh, en Irán, y obtuvieron los siguientes modelos: a) ARIMA (0,0,1)x(1,1,1)₁₂ para el modelamiento de la precipitación, b) ARIMA (2,1,0)x(2,1,0)₁₂ para la temperatura promedio mensual y c) ARIMA (2,1,1)x(1,1,0)₁₂ para humedad relativa. Para el estudio de los datos de temperatura promedio mensual, se tomó un periodo de cuarenta años (1959-1998) con base en las funciones de autocorrelación parcial y de autocorrelación total, así como el control de la normalidad de los residuos.

Bernal et al. (2011) emplearon el siguiente modelo ARIMA para la estimación de datos faltantes: (0,1,1)x(0,1,1)₁₂. Este modelo posee una diferencia estacional y no estacional de orden 1 y dos coeficientes que representan componentes aleatorios: uno estacional y el otro no estacional.

El modelo ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)_E se puede describir así (Guerrero, 1991):

$$\phi(B)\Phi(B^E)\nabla^I \nabla_E^D Z_t = \theta(B)\Theta(B^E)a_t$$

Para el caso particular del modelo, queda expresado:

$$\nabla^I \nabla_{12}^{-1} Z_t = (1-\theta_1 B)(1-\theta B^{12})a_t$$

2 Método de análisis de series de tiempo basado en el supuesto de que una serie de tiempo de análisis se puede descomponer como una suma de ondas seno y coseno con diferentes frecuencias.

Z_t : Es la serie de precipitación mensual

a_t : Corresponde al componente aleatorio

∇^1 : Es el operador de diferencia de orden 1 no estacional

∇_{12}^1 : Es el operador de diferencia de orden 1 estacional ($E=12$)

θ_1 : Es el coeficiente no estacional vinculado con a_t

Θ_1 : Es el coeficiente estacional vinculado con a_t

De esta forma, se expresa la variabilidad de la serie de tiempo de precipitación diferenciada como una suma ponderada de choques aleatorios representados en los a_t 's, donde los valores de los coeficientes representan las ponderaciones.

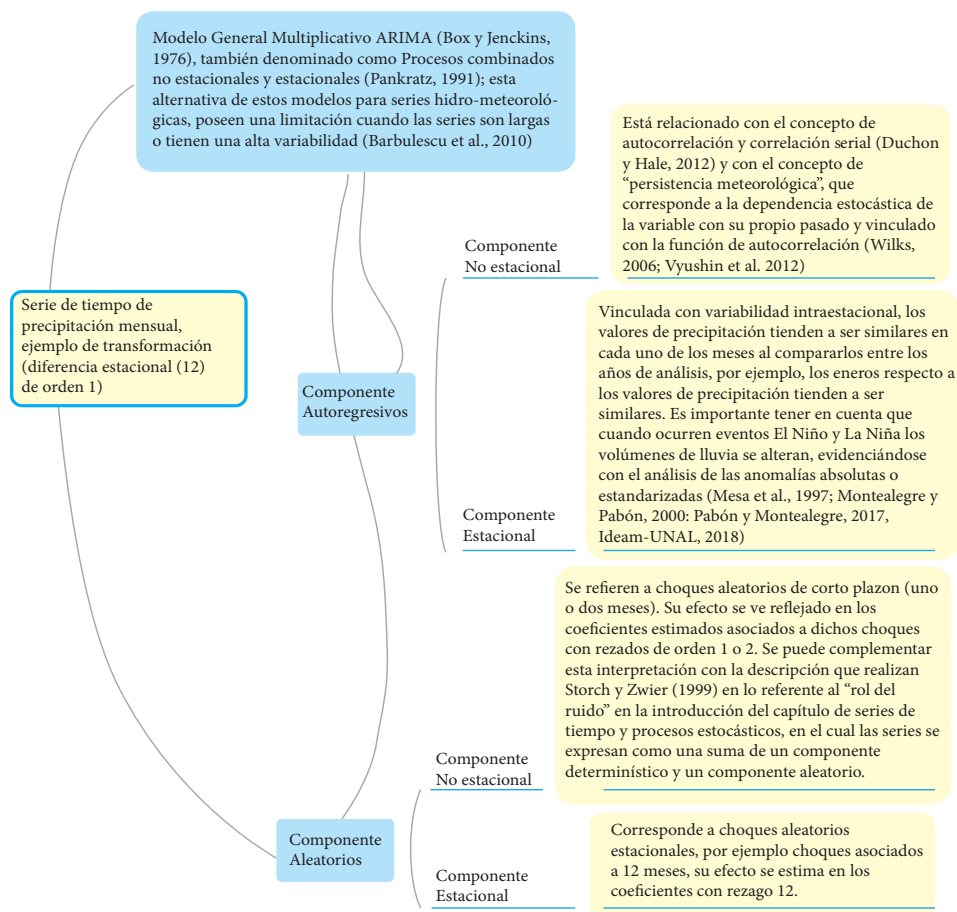
Este modelo supone que la serie de tiempo que se modela $Y_t = \nabla^d \nabla_E^D Z_t$ es una serie de tiempo estacionaria. Acorde con Montgomery et al. (2008), es aquella que “muestra una variabilidad similar en el tiempo, caracterizada por una distribución de probabilidad constante en el tiempo”. Se define como estacionaria (débil) si satisface: i) el valor esperado de la serie no depende del tiempo y ii) la función de autocovarianza definida como $Cov(y_t, y_{t+k})$ para cualquier rezago k es solo función de k y no del tiempo; así $\gamma_y(k) = Cov(y_t, y_{t+k})$.

Montgomery et al. (2008) describen las siguientes etapas para construir un modelo ARIMA: i) identificación del modelo, ii) estimación de parámetros y iii) verificación de diagnóstico. Esta última etapa se denomina también “validación o verificación de supuestos” (Guerrero, 2003). Estos pasos se ilustrarán con un ejemplo.

Los modelos ARIMA que se emplean corresponden a modelos ARIMA estacionales para las series mensuales de precipitación, pues la estación corresponde a doce meses. Desde el punto de vista climatológico, este análisis está relacionado con la variabilidad intraestacional de la precipitación.

En la figura 1.2, se ilustran los componentes de los modelos ARIMA para las series mensuales de precipitación y su interpretación: i) componente autorregresivo no estacional, ii) componente autorregresivo estacional, iii) componente aleatorio no estacional y iv) componente aleatorio estacional.

Figura 1.2. Interpretación de los modelos ARIMA para el
análisis de series mensuales de precipitación



Fuente: elaboración propia

1.6 Algunos modelos ARIMA identificados para la zona del Bajo Magdalena

A continuación, se describen algunos modelos ARIMA que se identificaron para la región climática del Bajo Magdalena:

- El modelo $ARIMA (0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de choques aleatorios: componente no estacional (mes anterior) y componente estacional (doce meses), la serie que se modela es la serie de incrementos de meses sucesivos de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

$$\nabla^I \nabla_{12}^{-1} Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta B^{12}) a_t$$

- b. El modelo ARIMA $(0,0,0) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de choques aleatorios: componente estacional (doce meses), la serie que se modela es la serie de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

$$\nabla_{12}^{-1} Z_t = (1 - \theta B^{12}) a_t$$

- c. El modelo ARIMA $(0,0,1) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de choques aleatorios: componente estacional (doce meses), la serie que se modela es la serie de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

$$\nabla_{12}^{-1} Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta B^{12}) a_t$$

- d. El modelo ARIMA $(1,0,0) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de componente autorregresivo (mes anterior) y choques aleatorios: componente estacional (doce meses), la serie que se modela es la serie de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

$$(1 - \theta_1 B) \nabla_{12}^{-1} Z_t = (1 - \theta B^{12}) a_t$$

- e. El modelo ARIMA $(1,0,1) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de componente autorregresivo (mes anterior) y choques aleatorios: componente no estacional (mes anterior), componente estacional (doce meses), la serie que se modela es la serie de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

$$(1 - \theta_1 B) \nabla_{12}^{-1} Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta B^{12}) a_t$$

- f. El modelo ARIMA $(2,0,0) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de componentes autorregresivos (uno y dos meses anteriores) y choques aleatorios: componente no estacional (mes anterior), componente estacional (doce meses), la serie que se modela es la serie de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

$$(1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2) \nabla_{12}^{-1} Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta B^{12}) a_t$$

- g. El modelo ARIMA $(3,0,0) \times (0,1,1)_{12}$: combinación de componentes auto-regresivos (uno, dos y tres meses anteriores) y choques aleatorios: componente no estacional (mes anterior) componente estacional (doce meses), la serie que se

modela es la serie de incrementos anuales, evidencia de series que poseen tendencia.

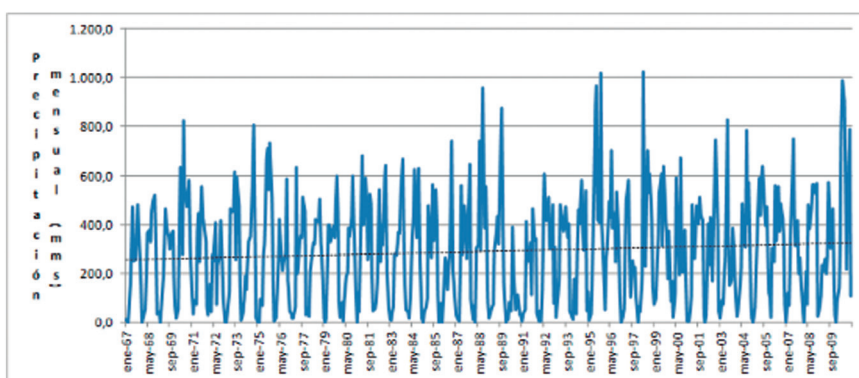
$$(1-\phi_1 B-\phi_2 B^2-\phi_3 B^3)\nabla_{12}^{-1} Z_t=(1-\theta_1 B)(1-\theta B^{12})a_t$$

A continuación, se presenta un ejemplo de un modelo ARIMA:

Modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)₁₂

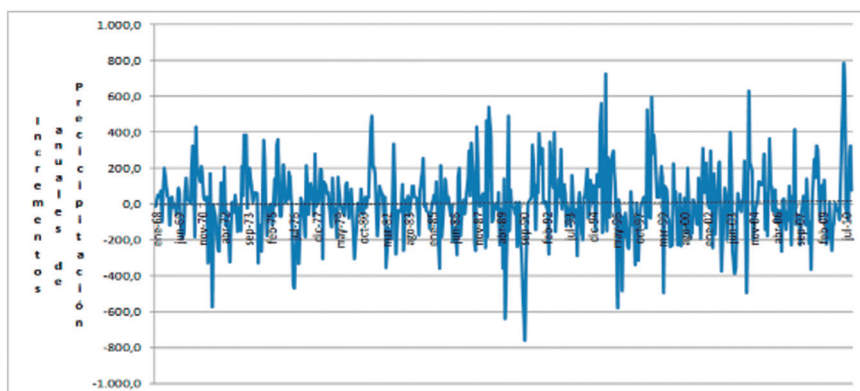
Como se observa en la figura 1.3, la serie de tiempo de la precipitación mensual evidencia una tendencia a incrementar (ver línea de tendencia punteada).

Figura 1.3. Serie de tiempo de precipitación mensual estación 2502035 (Guaranda)



Fuente: elaboración propia

Figura 1.4. Serie de tiempo de incrementos anuales de precipitación mensual estación 2502035 (Guaranda)



Fuente: elaboración propia

Tabla 1.2. Coeficientes estimados

Coeficientes	Valor estimado	Error estándar	Valor t calculado
Componente autorregresivo no estacional	-,62416	0,25059	-2,49
Componente aleatorio no estacional	-,52235	0,27120	-1,93
Componente aleatorio estacional	-,96093	0,32572E-01	-29,50

Fuente: elaboración propia

Modelo propuesto para la serie de tiempo de precipitación mensual z_t :

$$Z_t = Z_{t-12} + \phi_1 Z_{t-1} - \phi_1 Z_{t-13} - \theta_1 a_{t-1} - \theta_1 a_{t-12} + \theta_1 \theta_1 a_{t-13} + a_t$$

Modelo estimado:

$$\hat{Z}_t = Z_{t-12} - 0,624 * Z_{t-1} - 0,624 * Z_{t-13} + 0,522 * a_{t-1} + 0,960 * a_{t-12} + (0,522 * 0,960) * a_{t-13} + a_t$$

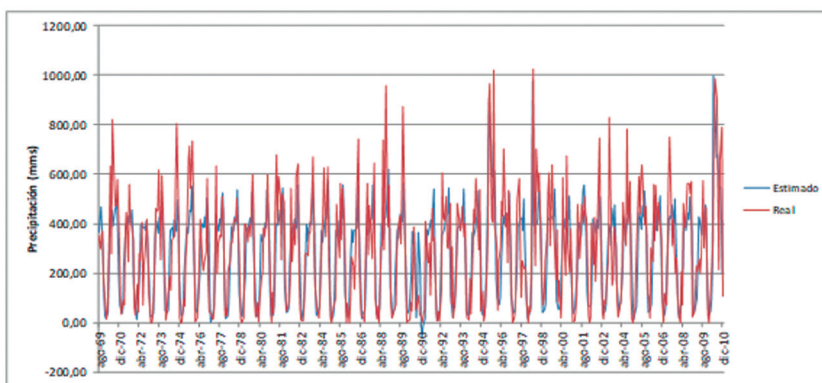
En la figura 1.4, se presenta la comparación de los valores estimados versus los valores reales de precipitación con el modelo descrito arriba. Es importante señalar que en los meses de diciembre de 1990, enero de 1991 y febrero de 1991, los valores estimados por el modelo fueron valores negativos, por ello en la figura 1.5 se observan estos tres valores como valores negativos. Así mismo, estos datos realmente se estimarían como valores ceros, pues la naturaleza de la variable analizada (la precipitación) solo tiene sentido para valores mayores o iguales a cero. Sin embargo, los datos estimados se presentan así al lector, pues fueron los valores obtenidos por el modelo ARIMA identificado.

Para la validación de los supuestos, se emplean las siguientes pruebas estadísticas: i) normalidad de los residuales: Shapiro-Wilk (1965); ii) no autocorrelación de los residuales: Ljung-Box (1978); y iii) varianza constante: prueba de Levene (1960).

En la figura 1.6, se presenta el histograma de los residuales; se observa una cola a la derecha que indica que el modelo subestima los valores extremos de precipitación. En la figura 1.7, se presenta el gráfico percentil-percentil, allí se evidencia que algunos residuales se alejan de los valores esperados bajo el supuesto de normalidad, de acuerdo con los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk de 0,981 y p-valor 0,00. De esta forma, se concluye que los residuales no provienen de un modelo probabilístico normal, pues al observar los veinte valores extremos que hacen

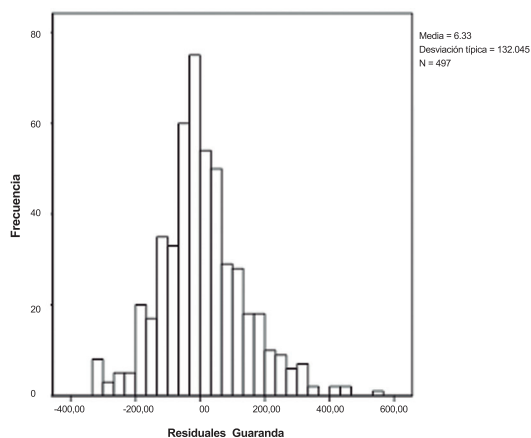
generar la cola a la derecha de la distribución de los datos, se evidencia que ocho de dichos meses corresponden a meses con ocurrencia de eventos La Niña y dos de ellos corresponden a fechas de ocurrencia de eventos El Niño. Entonces, este modelo ARIMA tiene la limitación de no estimar los valores extremos de forma adecuada y por ello no se cumple el supuesto de normalidad. Aun cuando se tiene esta limitación, la aproximación de los modelos ARIMA permite analizar la variabilidad temporal de las series mensuales de precipitación y contribuye a tener en cuenta la persistencia meteorológica representada por el coeficiente de tipo autorregresivo no estacional en el modelo planteado.

Figura 1.5. Comparación de valores reales versus estimados



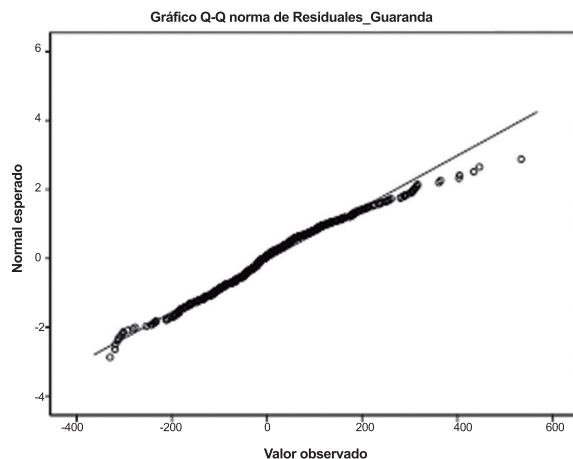
Fuente: elaboración propia

Figura 1.6. Histograma de los residuales



Fuente: elaboración propia

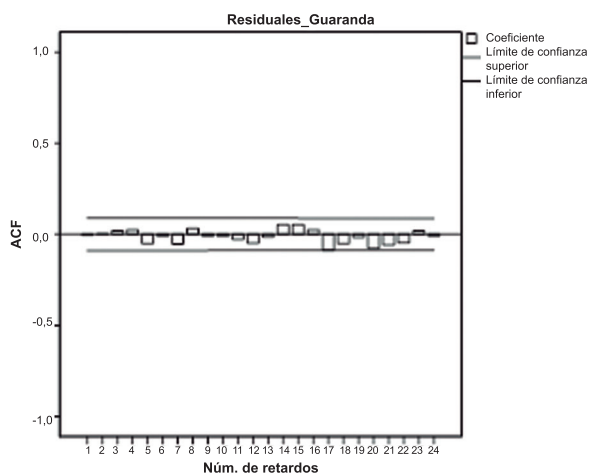
Figura 1.7. Gráfico percentil-percentil de los residuales



Fuente: elaboración propia

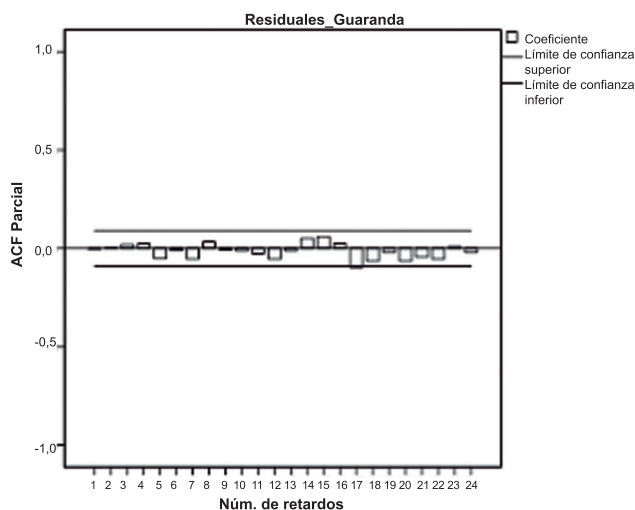
Para la validación de segundo supuesto de no autocorrelación temporal, en las figuras 1.8 y 1.9 se presentan las funciones de autocorrelación total y parcial de los residuales. Allí se observa que no hay autocorrelaciones que superen los límites de confianza; adicionalmente, el estadístico de Ljung-Box para rezagos (meses) es 20,19 y el p-valor es 0,686. Por lo tanto, se concluye que no hay evidencia de autocorrelaciones significativas hasta el rezago de veinticuatro meses.

Figura 1.8. Función de autocorrelación total de los residuales



Fuente: elaboración propia

Figura 1.9. Función de autocorrelación parcial de los residuales

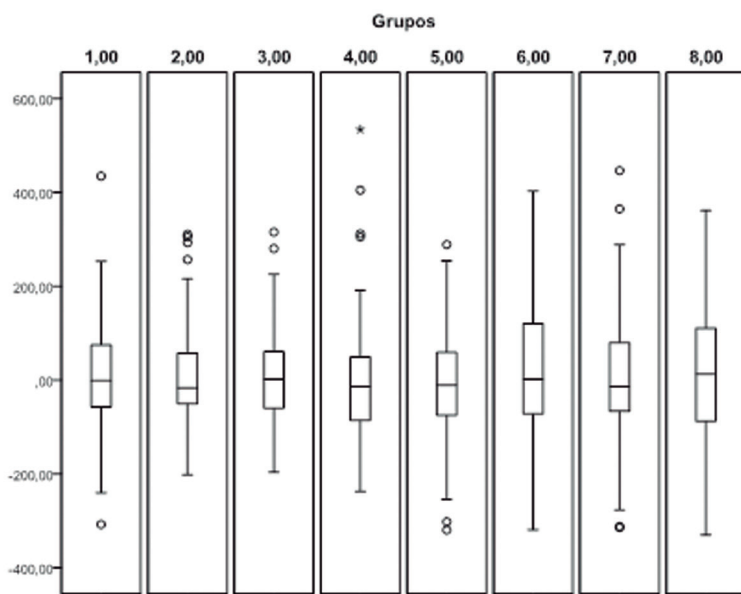


Fuente: elaboración propia

Respecto al supuesto de varianza constante, se definieron ocho grupos de meses consecutivos de los valores de los residuales; en la figura 1.10 se ilustran los gráficos de caja de cada uno de los grupos. Allí se observa que la variabilidad de cada grupo es aproximadamente igual; sin embargo, grupos como el 1,4 y el 7 tienen algunos valores atípicos y atípicos extremos, lo cual hace incrementar su variabilidad. Para evaluar si hay varianza constante (homogeneidad), se emplea la prueba de Levene cuyo valor es 1,559 y el p-valor respectivo es 0,145; por lo tanto, no hay evidencia para rechazar la hipótesis de varianzas diferentes en los ocho grupos, y de esta forma se concluye que los residuales tienen varianza constante.

Después de describir los resultados del modelo ARIMA para esta estación de Guaranda, se vislumbra el reto de plantear un modelo de función de transferencia o un modelo de regresión dinámica (Pankratz, 1991), incluyendo como serie de tiempo predictora un indicador que permita tener en cuenta las ocurrencias de eventos El Niño y La Niña; por ejemplo, el índice oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés). Esto considerando que la falta de la normalidad de los residuales se debió en 50 % a valores que el modelo ARIMA propuesto no logra modelar en los valores extremos coincidentes con fechas de ocurrencia de estos eventos. Por lo tanto, se espera que esta serie de tiempo del ONI contribuya a explicar la variabilidad temporal de la precipitación, en particular para estas fechas.

Figura 1.10. Gráficos de caja de cada uno de los ocho grupos de residuales conformados

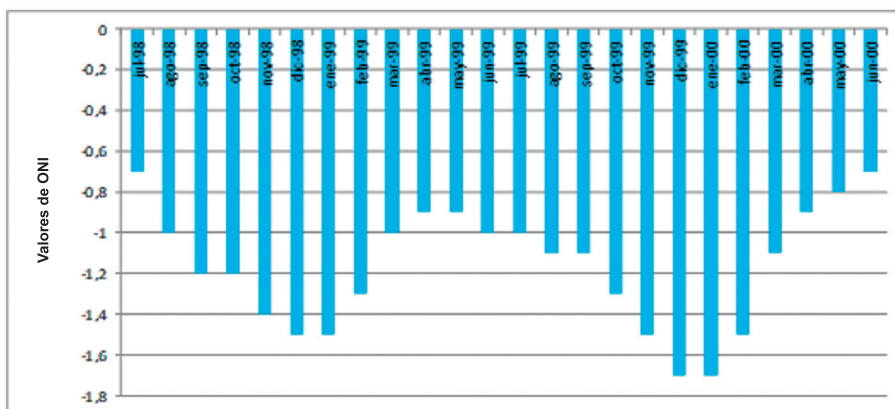


Fuente: elaboración propia

Otra alternativa que se visualiza es considerar que los meses identificados como datos que hacen perder la normalidad en los residuales se pueden pensar como meses identificados como valores atípicos aditivos o valores atípicos vinculados con un cambio temporal de los valores de precipitación; es decir, esta última alternativa es plantear un modelo ARIMA desde el punto de vista del análisis de intervención (Wei, 2006), que se deriva de la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña. A manera de ilustración, Ramos (2013) analizó la duración de los eventos El Niño y La Niña, acorde con el ONI.

En la figura 1.11, se visualiza la duración del evento La Niña de veinticuatro meses, el cual inició en julio de 1998 y finalizó en junio del 2000; en este periodo uno de los meses que estuvo vinculado como valor extremo que no logró ser estimado por el modelo ARIMA fue diciembre de 1999; el valor real fue 373 mms y el valor estimado por el modelo fue de 90 mms. En este contexto, Montealegre (2013) señala cómo la precipitación es modulada por fluctuaciones de indicadores relacionados con la ocurrencia de El Niño y La Niña para el departamento de Cundinamarca, y para ello propone la metodología de alteraciones más probables de precipitación derivadas de la ocurrencia de dichos fenómenos en el marco del PRICC.

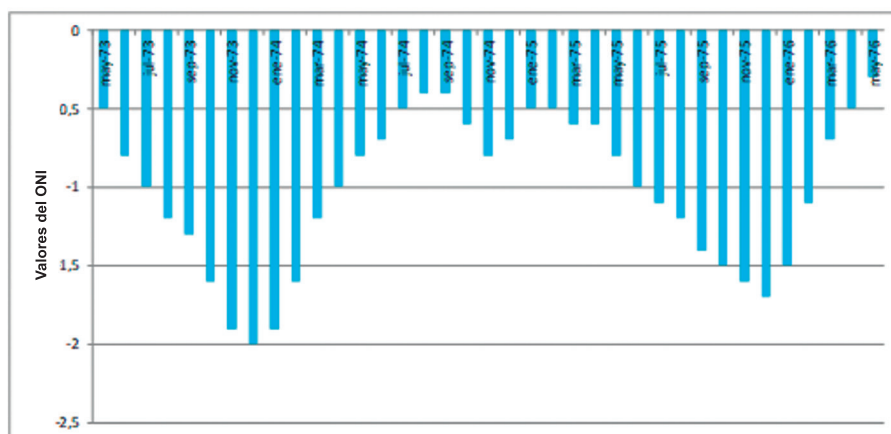
Figura 1.11. Valores del ONI en el periodo de la ocurrencia
del evento La Niña (julio de 1998 a junio de 2000)



Fuente: elaboración propia

Otros meses en los cuales se evidenció que el modelo no estima el valor extremo fueron octubre de 1974 y julio de 1975, pues los valores reales de precipitación fueron 806 y 664 mms, respectivamente, y los valores estimados para estos dos meses fueron 495,7 y 359,1 mms. En la figura 1.12, se presentan los valores del ONI para el periodo de ocurrencia de La Niña de mayo de 1973 a mayo de 1976.

Figura 1.12. Valores del ONI en el periodo de la ocurrencia
del evento La Niña (mayo de 1973 a mayo de 1976)



Fuente: elaboración propia

1.7 Familia de modelos ARIMA

De acuerdo con el conjunto de modelos ARIMA identificados en la zona de estudio, en el mapa 1.4 se presenta cada uno de los modelos en las estaciones meteorológicas analizadas. Se observa que los modelos con los componentes tipo autorregresivo (ver en el mapa 1.4 etiquetas de los modelos identificados con las letras AR) se concentran en lugares próximos a los municipios en el círculo grande azul como Achí, Sucre, zona sur de Magangué, Pinillos, Altos del Rosario, Barranco de Loba, San Martín de Loba, Hatilo de Loba, Margarita y San Francisco. Esta misma tendencia se visualiza en la zona del círculo azul pequeño en los municipios de Tamalameque, Chimichagua, zona occidental de Pailitas y El Banco. En contraste, en las zonas de color rojo se evidencian los modelos ARIMA que poseen una estructura temporal tipo aleatoria (ver en el mapa etiquetas de los modelos identificados con las letras CA); estas zonas están más próximas a la zona costera Atlántica y en el círculo grande rojo coinciden con zonas de presencia de ciénagas en los municipios de San Marcos, Caimito, San Benito Abad, Galeras, El Roble, Corozal y zona suroriental de Pueblo Nuevo.

1.8 Identificación de la tendencia en las series de tiempo de precipitación

Para el análisis de tendencia de las series de tiempo de precipitación mensual, se planteó la relación de tipo lineal de la precipitación mensual versus el tiempo para los años disponibles de cada estación meteorológica, se estimó la pendiente de modelos de regresión lineal simple y luego se realizó el mapa de interpolación de estos valores de las pendientes. Un enfoque metodológico similar es ilustrado por Liu et al. (2015), quienes emplean la prueba de Mann-Kendall para el análisis de la tendencia de las series de tiempo y muestran su aplicación para un conjunto de estaciones en China.

Para cada estación, se planteó el siguiente modelo de regresión:

$$Z_t = \beta_0 + \beta_1 * t + \varepsilon$$

Z_t : Precipitación mensual

β_0 : Constante del modelo

β_1 : Pendiente del modelo

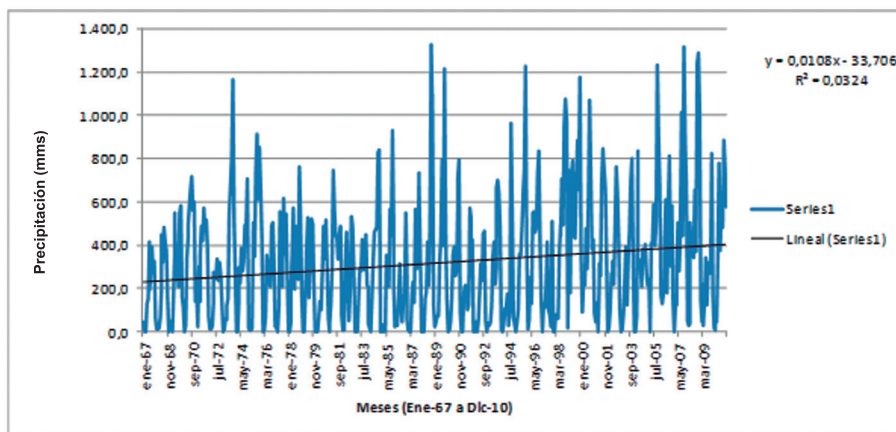
ε : Componente aleatorio



En la figura 1.13, se ilustra un ejemplo para la estación 25020030, estación meteorológica Guacamayo, en el municipio de Achí, Bolívar, en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB). Allí se evidencia una tendencia al incremento en los valores de precipitación y el valor de la pendiente corresponde a 0,0108, lo cual significa que por cada mes transcurrido la precipitación ha tendido a aumentar 0,0108 mms.

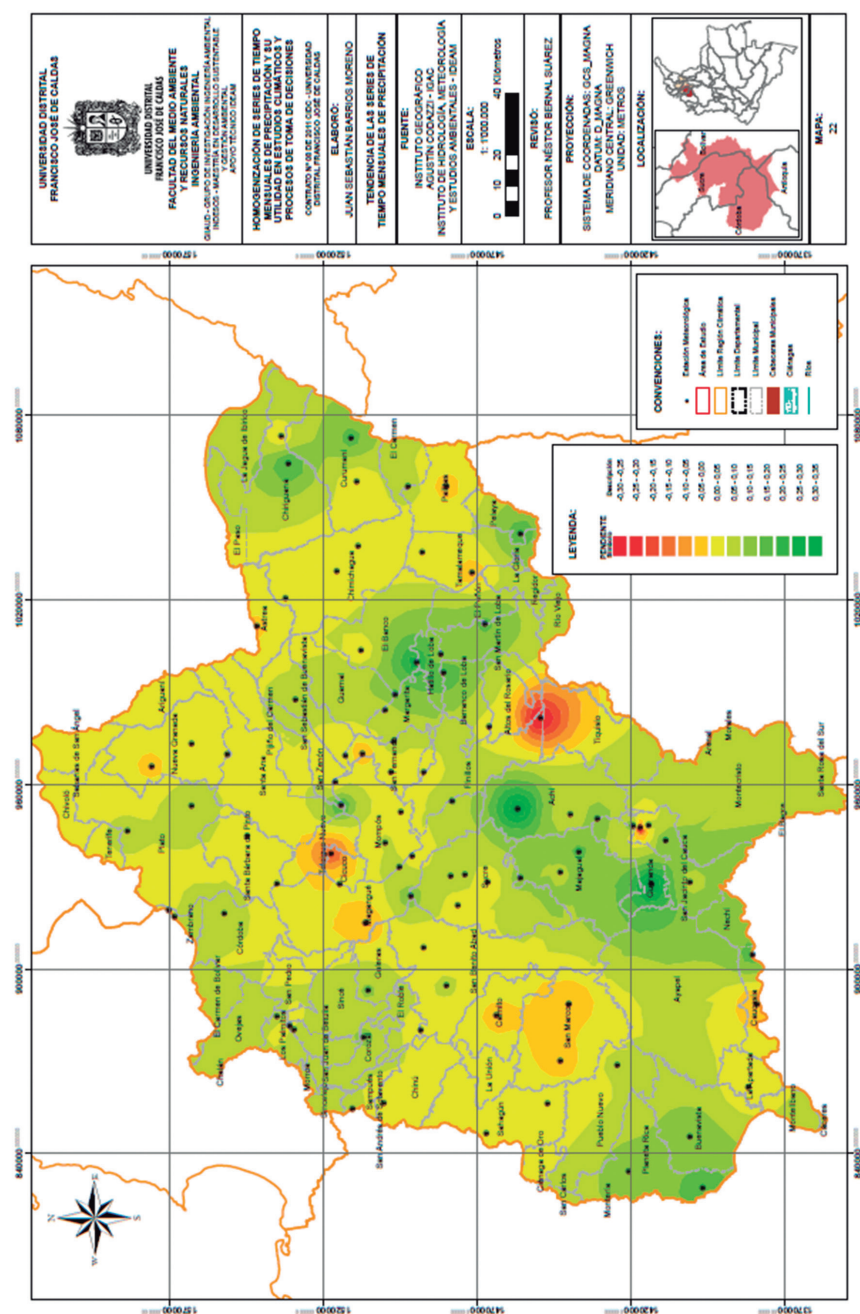
Al analizar los valores de las pendientes de todas las estaciones meteorológicas, se presenta el mapa 1.5 de las tendencias. Las subzonas de tonalidades verde oscuro indican una tendencia a incrementar los valores de precipitación y las tonalidades de color amarillo oscuro indican zonas con evidencia histórica de disminuir con mayor intensidad. Teniendo en cuenta el análisis referido en el apartado anterior, en las zonas donde predomina la familia de modelos ARIMA con énfasis en el componente autorregresivo se evidencian tendencias al incremento en los valores de precipitación. En contraste, se evidencia en general que en las zonas de modelos ARIMA predomina el componente aleatorio y la tendencia a incrementar es débil, tienden a mantenerse los valores de la climatología normal. En este contexto del análisis de tendencias que se visualizan en el mapa 1.5, la interpretación es que dichas tendencias constituyen una evidencia de la señal de cambio climático en la zona climatológica del Bajo Magdalena.

Figura 1.13. Serie de tiempo de precipitación



Fuente: elaboración propia

Mapa 1.5. Mapa de tendencias de precipitación



Fuente: elaboración propia

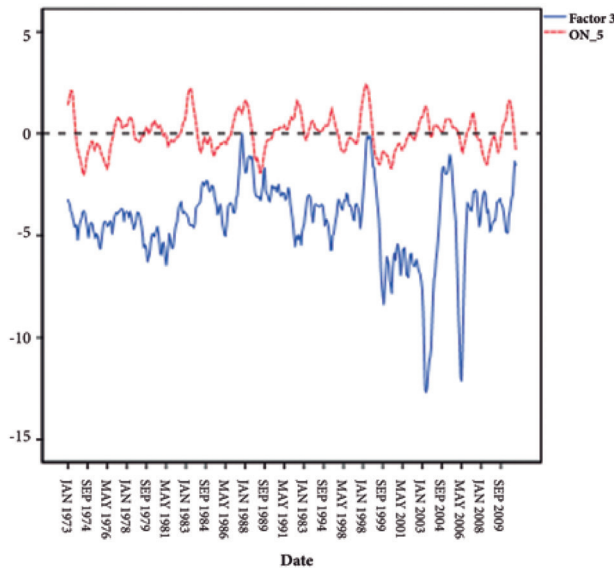
1.9 Búsqueda de una señal en la precipitación relacionada con la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña

Las series de tiempo de precipitación mensual pueden evidenciar diferentes señales asociadas al patrón estacional, otras señales pueden estar vinculadas con la variabilidad climática extrema asociadas a la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, y otras pueden vincularse al cambio climático, como se indicó en el apartado anterior. Bernal et al. (2014) presentan un análisis para la identificación de estas señales empleando la técnica de Análisis Factorial Dinámico (AFD) (Zuur, 2010). A continuación, se ilustra una síntesis de estos resultados.

El AFD permite extraer un conjunto de factores comunes para once series de tiempo que se analizaron en la zona de estudio; los tres primeros factores permiten brindar la siguiente interpretación: el primero está relacionado con el patrón estacional de la precipitación, y el segundo evidencia la tendencia de incremento de los valores de precipitación, probablemente relacionada con una señal de cambio climático.

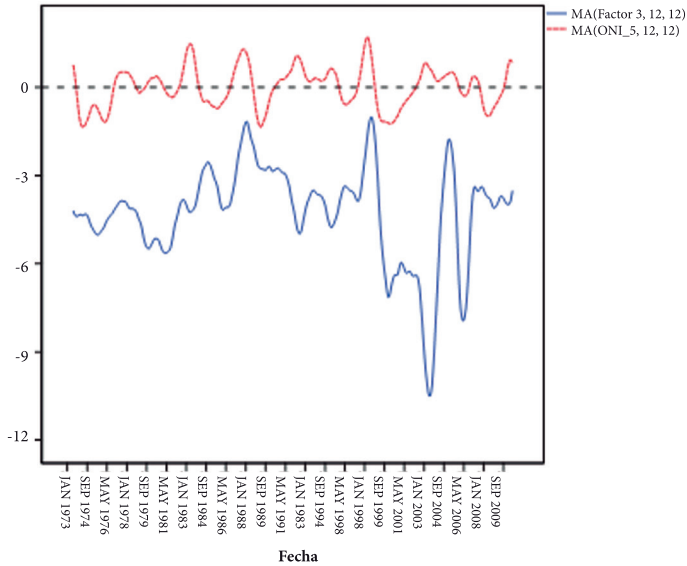
En la figura 1.13, se presentan las series superpuestas del factor tres y el ONI con rezago de orden cinco. Los valores positivos del ONI identifican épocas de eventos El Niño (línea roja) y los valores negativos identifican épocas de ocurrencia de eventos La Niña (línea roja). Se observa que el factor tres identificado presenta valores asimétricos con los valores ONI; sin embargo, no hay una total correspondencia de asimetría (línea azul), pues después de agosto de 1999 el ONI toma valores muy negativos y el factor tres cambia de patrón temporal. En la figura 1.14, se complementa esta descripción; allí se ilustran las dos series de tiempo de promedio móvil de orden 12, lo cual permite evidenciar la correspondencia del ONI (con rezago de orden cinco) con el factor tres.

Figura 1.14. Factor tres identificado y la serie de ONI con rezago cinco meses



Fuente: elaboración propia

Figura 1.15. Series de tiempo de promedio móvil de orden 12 del ONI (rezago 5) y el factor



Fuente: elaboración propia

1.10 Detección de puntos de cambio en los valores promedio de precipitación

Según los valores de precipitación para cada uno de los meses, se emplea la prueba estadística de Worsley (1979), con el fin de detectar cambios en los valores promedio de precipitación. Estos análisis relacionados con detección de cambios han sido abordados por autores como Beaulieu et al. (2012), quienes refieren algunos métodos para la detección de cambios, entre ellos: i) cambios en el promedio y varianza, ii) uso de modelos de regresión, iii) uso de métodos no paramétricos (Pettitt, 1979). Estos métodos se proponen cuando las variables climatológicas no son normales, y proponen un método de detección de cambios que incluye la estructura de autocorrelación de las series de tiempo empleando el enfoque del criterio de información de Schwartz.

Otros autores como Rodionov (2004) han propuesto el uso de pruebas estadísticas para detectar cambios en el promedio y la varianza empleando pruebas sucesivas con estadísticos como t-student y F. Rodríguez et al. (2010) y Bernal et al., (2009) emplearon la metodología de Rodionov para el análisis de detección de cambios en series de precipitación y su relación con el cambio de uso del suelo en una región de los Andes colombianos. Thompson y Sieber (2012) analizaron los cambios considerando el contexto de la no linealidad de las series de tiempo, aspecto también referido por Beaulieu et al. (2012), quienes señalaban cuáles cambios para series climáticas de larga longitud como la temperatura global pueden evidenciar cambios abruptos y no linealidades.

Autores como Kundzewicz y Robson (2004) presentan una revisión de métodos para la detección de cambios en datos hidrológicos y cambios de salto en el promedio, entre ellos: i) prueba de cambio puntual en la mediana de Petit, ii) prueba de Mann-Whitney, iii) prueba de sumas acumuladas-distribución libre, iv) prueba de Kruskal-Wallis, v) pruebas de desviaciones acumuladas y vi) prueba de t-student; y señalan la importancia de analizar los supuestos de las pruebas y las alternativas de pruebas basadas en métodos de remuestreo: permutaciones y bootstrap.

Štěpanek (2008) y Štěpanek et al. (2009), en el *software* Anclim®, implementan varias pruebas estadísticas para la detección de puntos de cambio, entre ellas: Worsley, Mann-Whitney, Pettitt, desviaciones acumuladas y t-máxima penalizada. Chiew y Siriwardena (2005) ilustran el uso de métodos de detección empleando el *software* Trend® como la prueba de distribución libre de suma acumuladas (CUSUM).

Barbulescu et al. (2010) describieron algunos métodos para la detección de cambios bayesianos: i) prueba de Buishand (1982, 1984), ii) prueba de Lee y Heghinian (1977); para la detección de múltiples puntos de cambio: procedimiento de segmentación de Hubert (1989, 2000), prueba de Kruskal-Wallis (Seskin, 2007; Kundzewicz y Robson, 2000). En el contexto de monitoreo ambiental, Manly (2009) ilustra el uso de las cartas CUSUM para detectar cambios.

A continuación, se describe la prueba de Worsley y se presenta un ejemplo de su aplicación.

El propósito de la prueba es detectar un cambio en el promedio de una serie de tiempo después de m observaciones. Así, se consideran dos niveles en la serie de tiempo, definidos así:

$$\text{Nivel 1: } E(x_i) = \mu, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{Nivel 2: } E(x_i) = \mu + \Delta, i = m+1, m+2, \dots, n$$

Donde Δ indica la magnitud del cambio del nivel 2 en relación con el nivel 1.

Para definir el estadístico de la prueba de Worsley, se emplean las siguientes expresiones:

Las desviaciones acumuladas:

$$S_o^* = 0, S_k^* = \sum (x_i - \bar{x}), k = 1, 2, \dots, n$$

$$Z_k^{**} = \frac{Z_k^*}{D_k}, k = 1, 2, \dots, n$$

$$Z_k^* = [k(n-k)]^{0.5} S_k^*, k = 1, 2, \dots, n$$

$$D_x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}$$

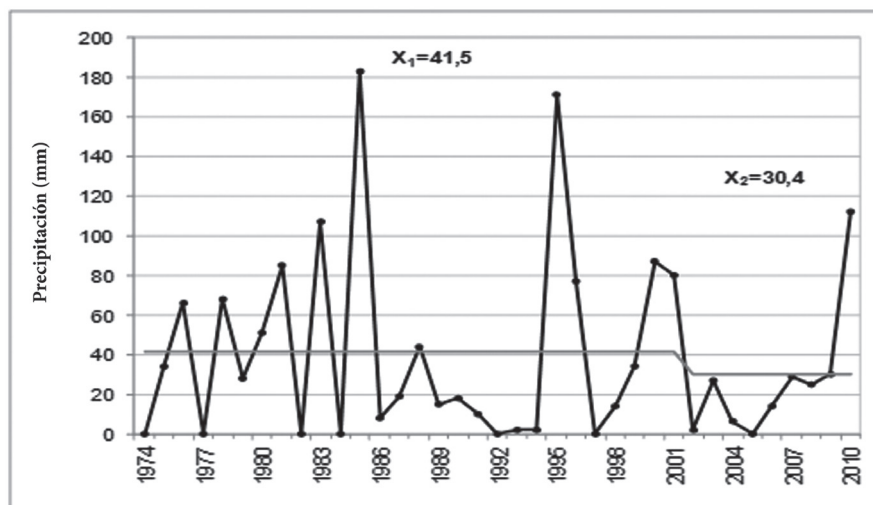
$$W = \frac{(n-2)^{0.5} V}{(1-V^2)^{0.5}}$$

El estadístico de la prueba se define como $V = \max |Z_k^{**}|$. Los valores críticos de este estadístico se pueden ver en la tabla definida por Worsley (1979) y señalada por Chiew y Siriwardena (2005) en el *software* Trend®.

A continuación, se presenta un ejemplo de la prueba de Worsley:

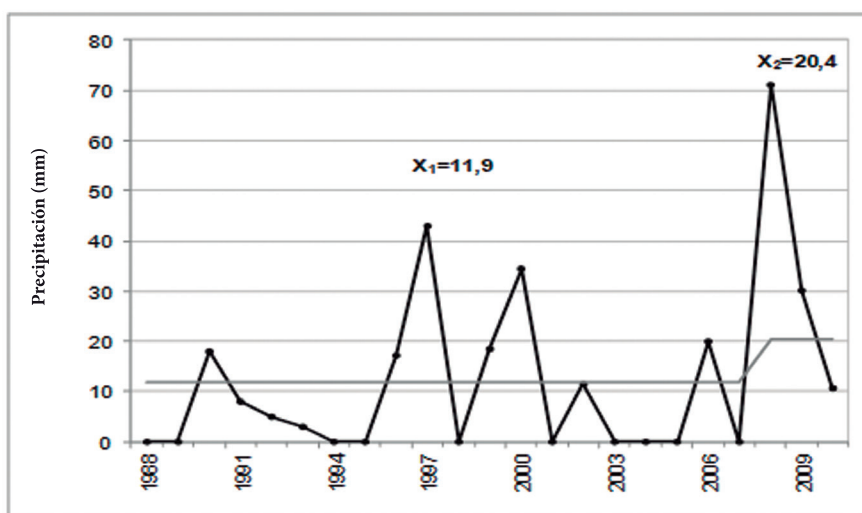
Algunos puntos de cambio identificados se ilustran a continuación, en las figuras 1.16 y 1.17, para una muestra de series mensuales de las estaciones meteorológicas ubicadas en la región (Barrios, 2013).

Figura 1.16. Cambio de nivel mes diciembre estación 2502035 (Guaranda)



Fuente: elaboración propia

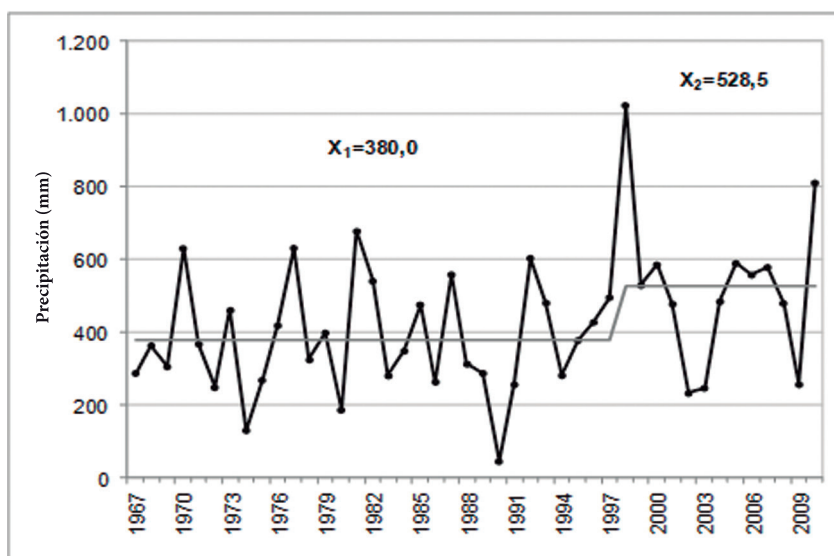
Figura 1.17. Cambio de nivel mes enero estación 2502040 (segmento gris)



Fuente: elaboración propia

Mientras que las series mensuales de las estaciones 2502040 (Libra Arriba) y 2502076 (Santiago Apóstol) presentan cambios de nivel con un aumento en el promedio del 71,4 % y el 39,1 %, respectivamente, en la estación 2502035 (Guaranda) se presenta una disminución del promedio del 26,7%. Puede notarse que para las series mensuales mostradas los puntos de cambio coinciden, generalmente, con la presencia de un registro extremo que afecta su variabilidad. En este sentido, la figura anterior permite identificar la vinculación de estos cambios con la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática interanual extrema o con factores no climáticos relacionados con cambios en los métodos de medición y las condiciones de la estación meteorológica.

Figura 1.18. Cambio de nivel mes septiembre estación 2502076 (Santiago Apóstol)



Fuente: elaboración propia

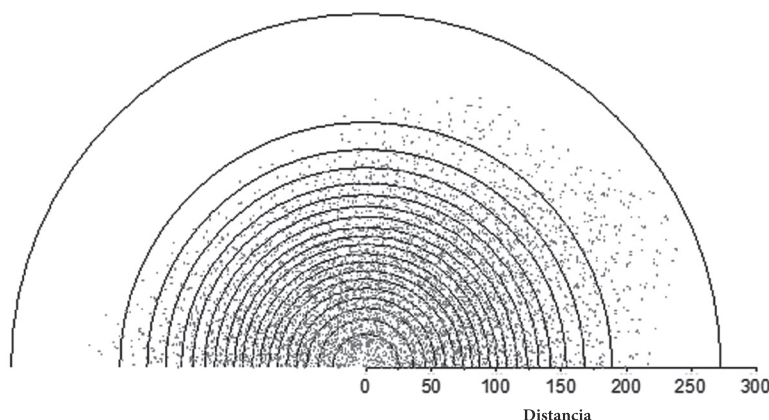
1.11 Identificación de estaciones meteorológicas vecinas

El análisis de vecindad requiere, como paso previo, la definición del radio de correlación espacial en la región, entendido como la distancia en la cual existe una autocorrelación significativa entre los valores de precipitación media anual multianual, teniendo en cuenta los cuatro criterios definidos para la identificación de estaciones vecinas. La definición de este parámetro se lleva a cabo empleando los resultados del cálculo del índice de Moran para diferentes rangos de distancia entre estaciones meteorológicas, usando el *software* PASSAGE®.

Algunos autores que han abordado este tema son Boulanger et al. (2010), quienes han incluido criterios de vecindad de estaciones para los procesos de homogenización y control de calidad; en particular, analizan el caso de temperatura y precipitación diaria para Argentina. De igual forma, Domonkos (2014) emplea estaciones de referencia para el proceso de homogenización desde el punto de vista de considerar una composición de series de tiempo de precipitación en la zona de estudio; teniendo la estructura de correlación espacial, el autor señala la importancia de la metodología para condiciones en la estación de invierno: lluviosas y con presencia de nieve. Datsenko et al. (2002) emplean el coeficiente de correlación para cuantificar el grado de asociación entre los valores de temperatura para diferentes estaciones meteorológicas en el proceso de homogenización y presentan un estudio de caso para Suecia. Şensoy et al. (2007) recopilan algunos aspectos a tener en cuenta para las estaciones vecinas, entre ellos: i) densidad de la red de estaciones, ii) problemas de cobertura de la red, iii) tipo de elemento meteorológico analizado, iv) escala temporal, v) región climatológica y vi) no homogeneidad en estaciones vecinas. Y Bernal et al. (2012) describen algunos aspectos relacionados con la identificación de estaciones vecinas, en particular, señalan cómo Ramos-Calzado et al. (2008) emplean el estadístico chi cuadrado para el análisis de estaciones vecinas y conocer el grado de similitud entre ellas.

Con este propósito, se miden inicialmente las distancias entre todos los pares posibles de estaciones en el área de estudio, como se ilustra en la figura 1.19, en la que cada punto representa una distancia entre dos estaciones, con lo que se observa que la máxima distancia hallada es de 273,0 km.

Figura 1.19. Medición de distancias entre pares de estaciones meteorológicas



Fuente: elaboración propia.

Con estos resultados, se establecen veinte rangos de distancia, con criterio de igual número de observaciones en cada rango, para el cálculo del coeficiente de correlación. El resultado esperado es que a medida que se incremente la distancia entre pares de estaciones, la fuerza de correlación disminuya. Sin embargo, se evidenció que para el rango de distancia menor, de 0 a 25,8 km, el índice de Moran tiene un valor muy bajo de 0,128. Los rangos definidos y el valor del índice para cada uno de ellos se muestran en la siguiente tabla.

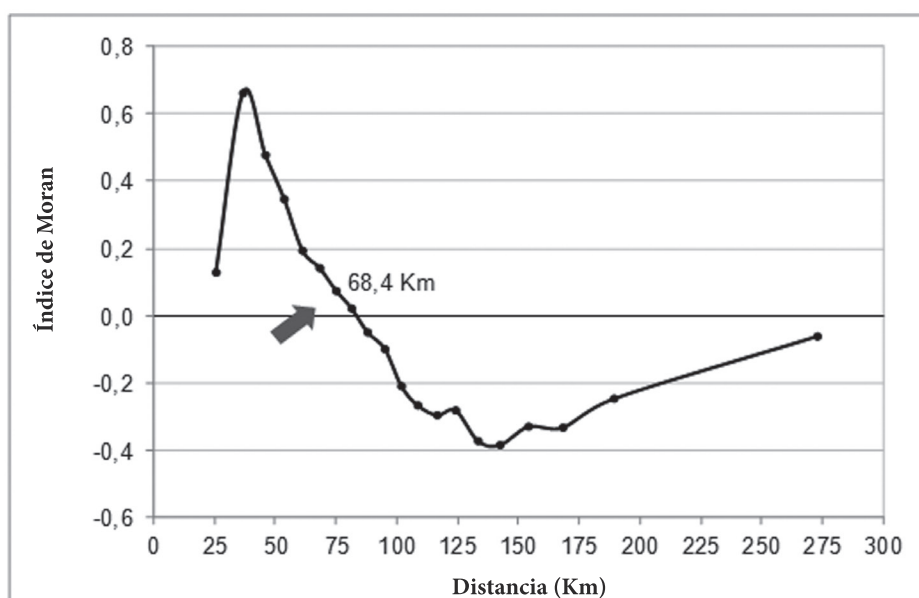
Tabla 1.3. Rangos de distancia e índice de correlación de Moran

Rango	Distancia (km)		Índice de Moran
	Mínima	Máxima	
1	0,0	25,8	0,128
2	25,8	36,9	0,661
3	36,9	46,1	0,477
4	46,1	53,8	0,346
5	53,8	61,3	0,193
6	61,3	68,4	0,141
7	68,4	75,2	0,073
8	75,2	81,5	0,021
9	81,5	88,1	-0,050
10	88,1	95,2	-0,100
11	95,2	102,0	-0,210
12	102,0	108,7	-0,267
13	108,7	116,7	-0,296
14	116,7	124,3	-0,282
15	124,3	133,5	-0,373
16	133,5	142,5	-0,385
17	142,5	154,2	-0,330

Rango	Distancia (km)		Índice de Moran
	Mínima	Máxima	
18	154,2	168,4	-0,333
19	168,4	189,4	-0,247
20	189,4	273,0	-0,062

Fuente: elaboración propia.

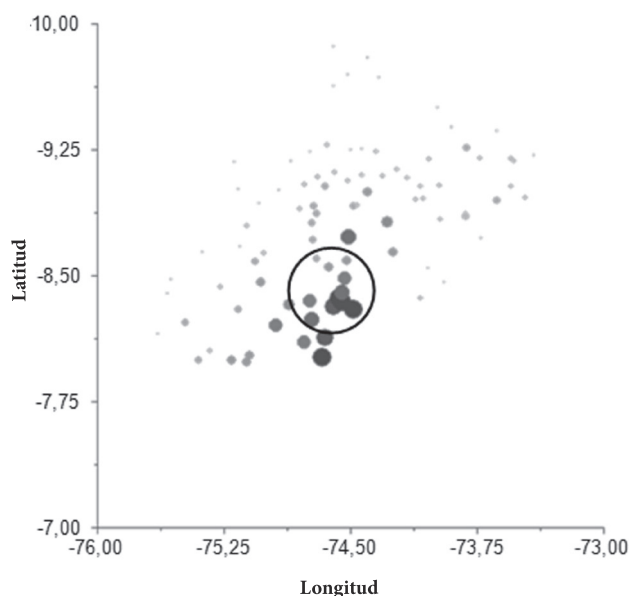
Figura 1.20. Correlograma de precipitación para diferentes rangos de distancia



Fuente: elaboración propia.

A manera de ejemplo, la figura 1.21 muestra la distribución espacial de los valores de precipitación promedio anual a nivel multianual, en la que las estaciones meteorológicas se muestran como puntos cuyo tamaño e intensidad de color aumenta a medida que lo hace el valor de lluvia. De igual forma, el círculo en la figura representa el radio de correlación espacial en la región, con el fin de realizar una aproximación geométrica del resultado del radio de correlación espacial referido anteriormente.

Figura 1.21. Distribución de la precipitación y rango de correlación espacial



Fuente: elaboración propia.

Los restantes criterios definidos para la identificación de estaciones vecinas están relacionados con la ubicación de estas en un rango específico de precipitación y elevación, y con su localización en una subregión hidrográfica. Para este último criterio, se tiene en cuenta la información consignada en el mapa 1.2 de las subregiones hidrográficas.

La verificación del cumplimiento de los cuatro criterios para la identificación de estaciones vecinas se realiza utilizando la macro de aplicación implementada en Microsoft Excel®, elaborada por Julio César Vargas y Rubén Darío Mateus, que fue desarrollada como parte de los avances en temas de homogenización de series de tiempo desde el punto de vista metodológico y su aplicación en regiones climatológicas, en el marco del Contrato 086-2010 de la Subdirección de Meteorología del Ideam durante el año 2010.

En dicho desarrollo, se retomaron experiencias previas (Martínez et al., 1996; Nieto y Ruiz, 2002; Barrero y Sabogal, s. f.; Montealegre, 1990; Zea, 1995), y algunos de los avances referentes a la homogenización se presentaron al Congreso de Meteorología celebrado en marzo de 2011 (Bernal et al., 2011) en la ciudad de Bogotá. La macro de aplicación, que permite identificar pares de estaciones vecinas mediante la práctica de los criterios referidos, obtuvo una segunda versión en el

desarrollo del proyecto de investigación institucionalizado en el que se suscribe la presente publicación, lo que la facultó para la consulta de información climática y espacial por parte del usuario, la actualización de las bases de datos para el ingreso de nuevas regiones climáticas, la optimización de los procesos de análisis y la elaboración de las curvas de dobles masas.

Figura 1.22. Pantalla inicial macro de aplicación

Seleccione la Zona :

- Alto Cauca
- Alto Magdalena
- Bajo Magdalena
- Catatumbo
- Medio Cauca
- Medio Magdalena
- Rio Sogamoso
- Sabana Bogota

Estaciones Vecinas

Seleccione la SubZona :

Busqueda por entidades

Departamento Municipio

Corporacion Areas Operativas

Google **Importar** **Exportar DBF** **Dobles Masas** **Ayuda** **Salir**

Fuente: Bernal et al. (2011)

Los resultados desplegados para los pares de estaciones vecinas por la macro de aplicación son agrupados por subregiones hidrográficas, atendiendo a los criterios de identificación y contando con cinco de ellas que son: Arroyo Corozal, Bajo Cesar, Bajo San Jorge-La Mojana, Directos al Bajo Magdalena y Directos al Bajo Cauca-Ciénaga La Raya. Para cada subregión hidrográfica, los resultados logrados, considerando las 87 estaciones procesadas previamente, se agrupan en matrices de doble entrada como se muestra en la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Matriz de estaciones vecinas subregión Bajo Cesar

Código	2502009	2502025	2502026	2502027	2502065	2502066	2502067	2502069	2502092	2502124	2502164	Vecinas
2502009		X		X	X	X					X	5
2502025	X			X	X	X					X	5
2502026										X		1
2502027	X	X			X	X					X	5
2502065	X	X		X		X					X	5
2502066	X	X		X	X						X	5
2502067								X	X			2
2502069							X		X			2
2502092							X	X				2
2502124			X									1
2502164	X	X		X	X	X						5

Fuente: elaboración propia.

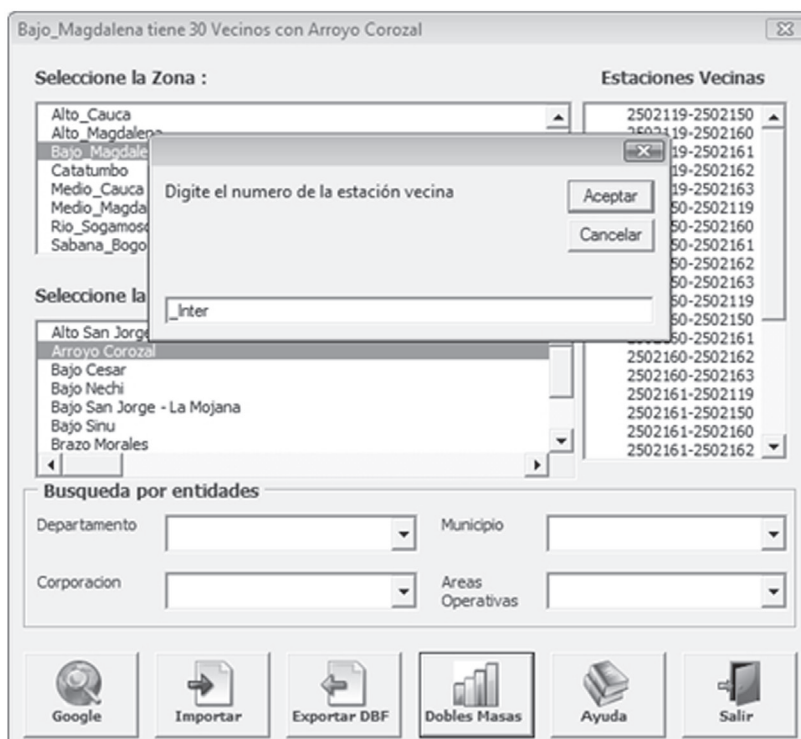
1.12 Homogenización de series de tiempo

Después de la identificación de estaciones vecinas en la región de estudio, en los casos en que se identificó más de una estación vecina se procedió a escoger la estación de referencia más apropiada teniendo en cuenta los criterios referidos para este fin. De tal forma, se obtuvieron 64 pares de estaciones vecinas para la elaboración de la curva de doubles masas, que se realizó tanto para la totalidad de la serie de tiempo, como para cada mes en la estación de análisis.

El proceso de homogenización se llevó a cabo entonces para las series mensuales de precipitación, cuyo punto de cambio, previamente identificado, no coincide con un fenómeno de variabilidad climática interanual extrema, es decir, un fenómeno El Niño o La Niña, y por lo tanto se considera que es un punto de cambio generado por factores no climáticos, como pueden ser cambios en la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas, cambios en los instrumentos de medición, errores de medición y observación, y deterioro de los instrumentos de

medición por cumplir su vida útil, entre otros. En este proceso en particular, se utilizó la macro de aplicación para la elaboración de las curvas de dobles masas.

Figura 1.23. Elaboración de curvas de dobles masas en la macro de aplicación



Fuente: Bernal et al. (2011)

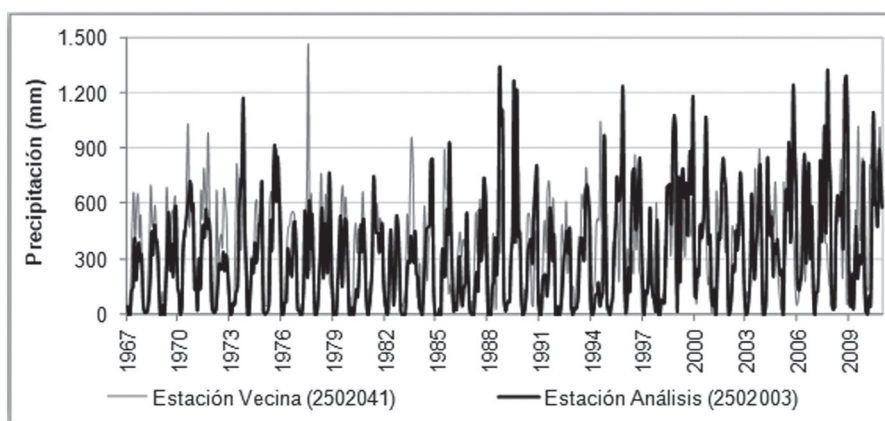
A continuación, se presentan tres ejemplos del proceso para una muestra de series mensuales de precipitación de las estaciones 2502003 (Guacamayo), 2502065 (Hacienda El Terror) y 2502147 (Hacienda El Torno). Para la estación de análisis 2502003 (Guacamayo), se identificó una estación de referencia correspondiente a la estación 2502041 (La Candelaria) con un periodo de 44 años en común, por lo cual no fue necesario aplicar los criterios de selección de la estación vecina más apropiada.

Tabla 1.5. Información de la estación de análisis
(2502003) y la estación vecina (2502041)

Información	Estación de análisis	Estación de referencia
Código	2502003	2502041
Nombre	Guacamayo	La Candelaria
Municipio	Achí	San Jacinto del Cauca
Departamento	Bolívar	Bolívar
Periodo y longitud	1967-2010 (44 años)	
Subregión hidrográfica	Directos al Bajo Cauca-Ciénaga La Raya	

Fuente: Ideam (2011)

Figura 1.24. Comparación estación de análisis (2502003) y estación vecina (2502041)



Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los puntos de cambio identificados para la serie de tiempo de precipitación en la estación de análisis, se encuentra que en junio de 1995 se detecta una alteración en el promedio de los datos que no coincide con ningún fenómeno de variabilidad climática interanual extrema, como se ilustra en la tabla 1.6, por lo cual se considera que este punto de cambio se debe a factores no climáticos y se requiere su homogenización.

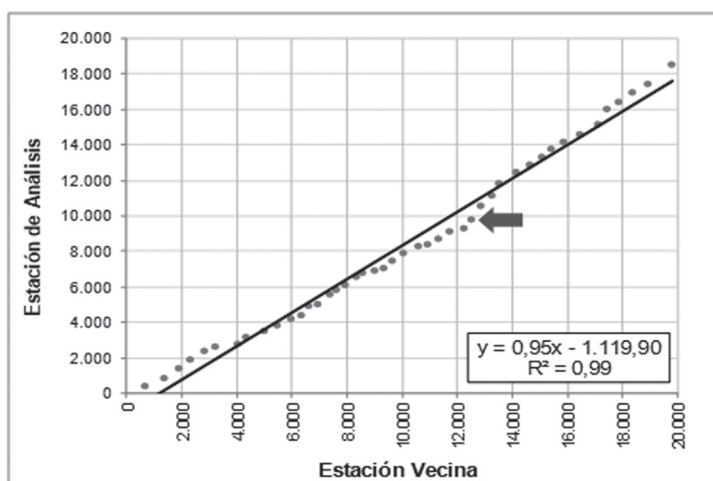
Tabla 1.6. Puntos de cambio estación 2502003 (Guacamayo)

Mes	Punto de cambio	El Niño	La Niña
Enero	2000		X
Febrero	1998	X	
Marzo	1996		X
Abril	1999		X
Mayo	2003		
Junio	1995		
Julio	1989		
Agosto	2006	X	
Septiembre	1988		X
Octubre	1973		X
Noviembre	1987	X	
Diciembre	1998		X

Fuente: elaboración propia

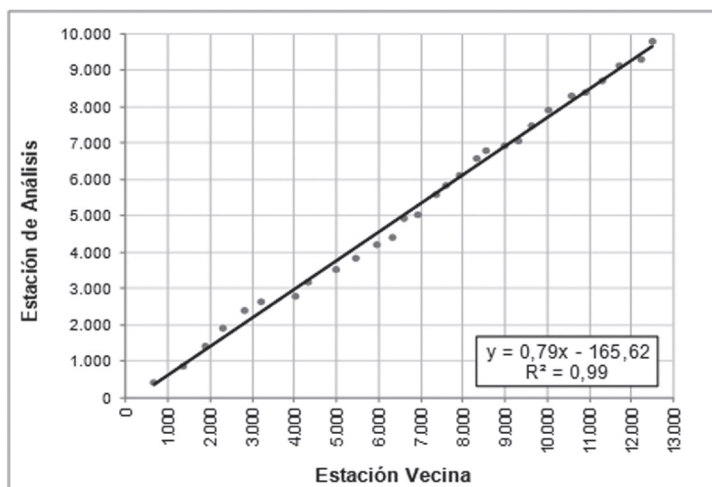
De acuerdo con esto, se realizaron las curvas de dobles masas de la serie mensual de julio para todo el periodo, antes y después del punto de cambio en la estación de análisis.

Figura 1.25. Curvas de dobles masas todo el periodo estación 2502003



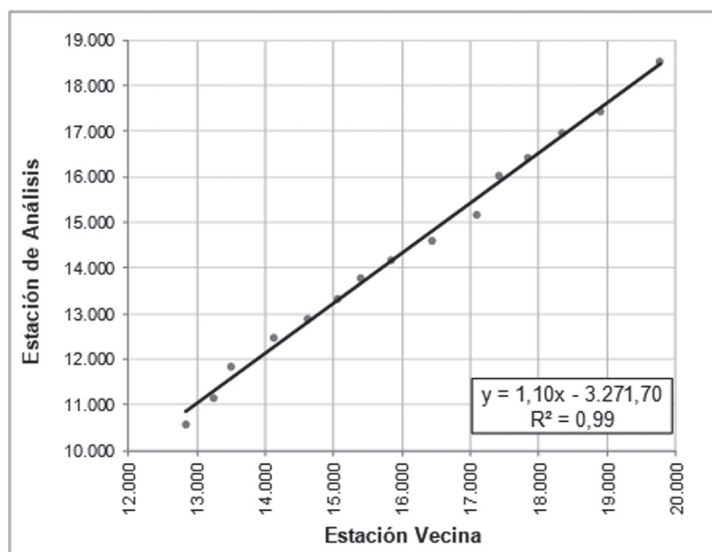
Fuente: elaboración propia

Figura 1.26. Curvas de doubles masas antes del punto de cambio estación 2502003



Fuente: elaboración propia

Figura 1.27. Curvas de doubles masas después del punto de cambio estación 2502003

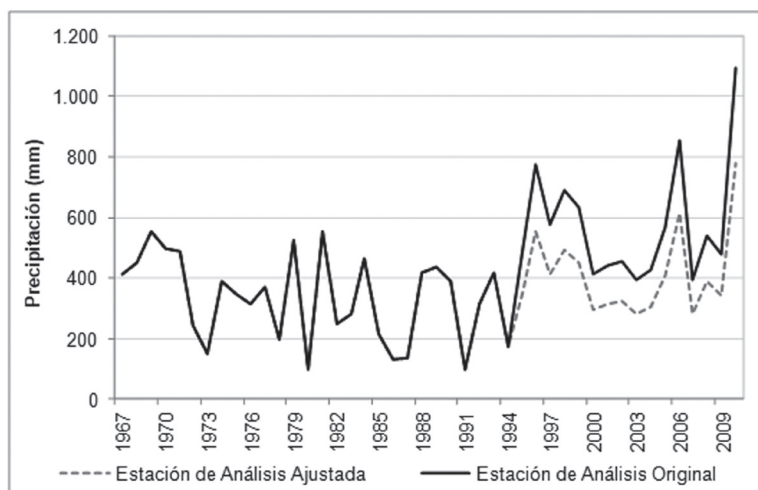


Fuente: elaboración propia

Con la información de la pendiente de las líneas de tendencia antes y después del punto de cambio, se estableció un factor de ajuste de la serie con un valor de 0,715 y

se realizó la homogenización del periodo después del punto de cambio, que corresponde al periodo más corto.

Figura 1.28. Homogenización mes de junio estación 2502003



Fuente: elaboración propia

Para la estación de análisis 2502065 (Hacienda El Terror), se identificaron cinco estaciones de referencia que son: 2502009 (Tamalameque), 2502025 (Curumaní), 2502027 (Saloa), 2502066 (Zapatoza) y 2502164 (Santa Isabel). La estación de referencia más apropiada, según los criterios de selección, es la estación 2502025 (Curumaní), con un valor de la razón de error cuadrático medio de 104,1 mm y un periodo de tiempo de 35 años en común.

1.13 Anomalías promedio de precipitación

A partir de los resultados logrados en el proceso de homogenización de las series mensuales de precipitación, se pueden obtener promedios multianuales que cuentan con una ganancia en resolución temporal, dada por los procedimientos aplicados para el control de calidad de la información. En este sentido, la variabilidad climática puede definirse también a partir de la desviación de los registros del clima desde estos promedios, es decir, a partir de las anomalías. Las series de anomalías normalizadas mensuales están calculadas con base en información homogenizada.

En adición, se calcula el promedio de estos valores durante la ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña, con el objetivo de identificar la variabilidad típica en relación con la normal climática cuando se presentan eventos extremos de

variación del clima a escala interanual. Estos promedios se pueden clasificar en siete rangos, correspondientes a diferentes grados de variación de la precipitación en el área de estudio, teniendo en cuenta los parámetros del Ideam, como se muestra en la tabla 1.7.

Tabla 1.7. Variación de la precipitación por anomalías promedio

Anomalías promedio	Descripción de la variación de la precipitación
Menor a -0,7	Muy por debajo de lo normal
Entre -0,7 y -0,4	Moderadamente por debajo de lo normal
Entre -0,4 y -0,1	Ligeramente por debajo de lo normal
Entre -0,1 y 0,1	Normal
Entre 0,1 y 0,4	Ligeramente por encima de lo normal
Entre 0,4 y 0,7	Moderadamente por encima de lo normal
Mayor a 0,7	Muy por encima de lo normal

Fuente: Ideam (2013)

Los valores de anomalías promedio de precipitación durante la ocurrencia típica de estos fenómenos se registran en la tabla 1.8.

Tabla 1.8. Anomalías promedio de precipitación para fenómenos típicos

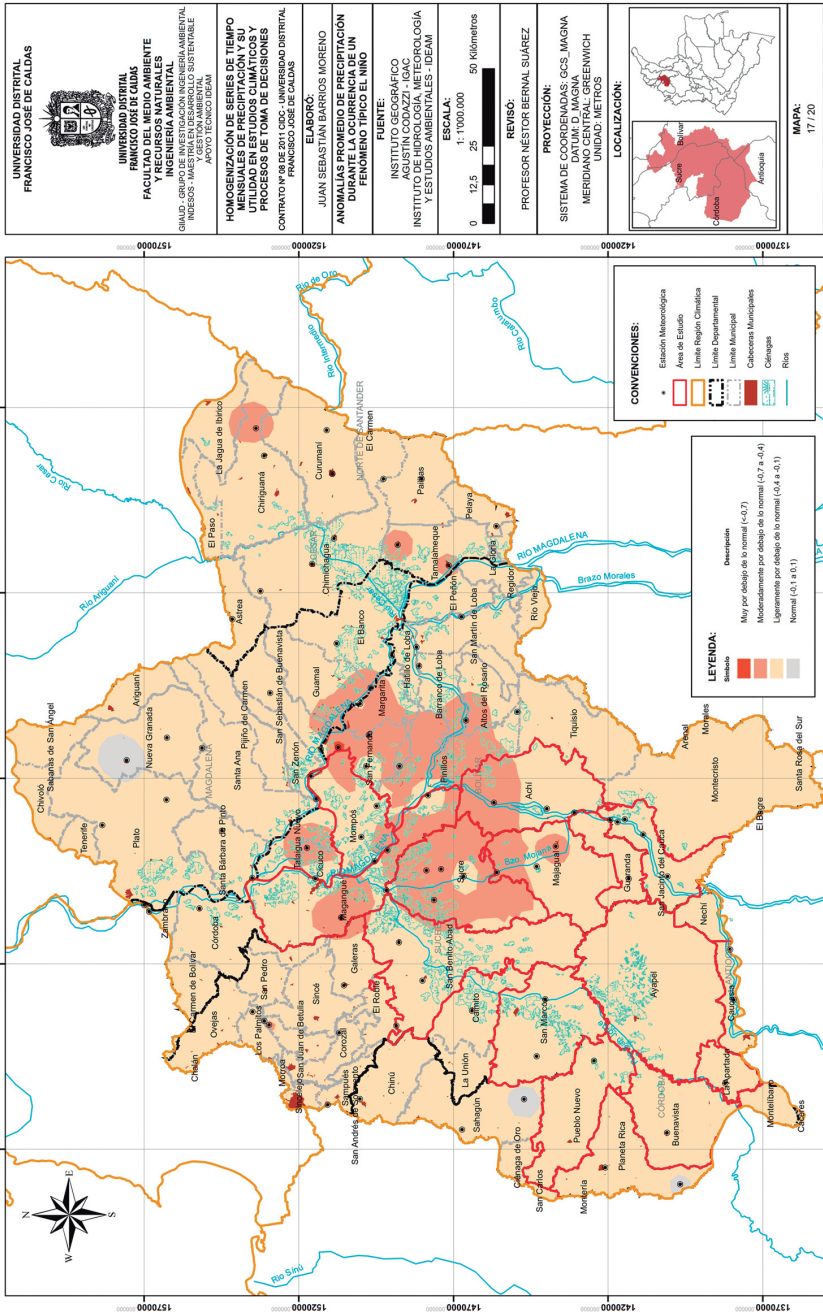
Código	Anomalía promedio		Código	Anomalía promedio		Código	Anomalía promedio	
	El Niño	La Niña		El Niño	La Niña		El Niño	La Niña
2501501	-0,090	0,062	2502079	-0,484	0,255	2502129	-0,354	0,255
2502003	-0,560	0,475	2502080	-0,275	0,266	2502130	-0,468	0,062
2502004	-0,786	0,151	2502081	-0,175	0,164	2502131	-0,435	0,336
2502009	-0,421	0,350	2502082	-0,384	0,348	2502132	-0,336	0,359
2502019	-0,245	0,348	2502087	-0,232	0,330	2502133	-0,372	0,164
2502022	-0,354	0,146	2502088	-0,219	0,137	2502134	-0,355	0,148
2502024	-0,345	0,248	2502089	-0,395	0,387	2502135	-0,300	0,254
2502025	-0,210	0,146	2502090	-0,274	0,122	2502136	-0,483	0,184

Código	Anomalía promedio		Código	Anomalía promedio		Código	Anomalía promedio	
	El Niño	La Niña		El Niño	La Niña		El Niño	La Niña
2502026	-0,354	0,282	2502091	-0,482	0,517	2502137	-0,443	0,101
2502027	-0,364	0,214	2502092	-0,232	0,109	2502138	-0,485	0,251
2502033	-0,125	-0,043	2502094	-0,261	0,508	2502147	-0,213	0,141
2502035	-0,257	0,267	2502095	-0,384	0,284	2502149	0,260	0,130
2502037	-0,374	0,773	2502096	-0,192	0,239	2502150	-0,344	0,125
2502039	-0,158	0,217	2502098	-0,265	0,080	2502151	-0,504	0,258
2502040	-0,477	0,389	2502099	-0,170	0,137	2502154	-0,368	0,164
2502041	-0,350	0,346	2502100	-0,262	-0,023	2502156	-0,491	0,197
2502042	-0,366	0,412	2502101	-0,250	0,032	2502160	-0,271	-0,041
2502050	-0,332	0,212	2502102	-0,362	0,221	2502161	-0,197	0,033
2502053	-0,136	0,215	2502103	-0,361	0,219	2502162	-0,200	0,379
2502065	-0,385	0,020	2502104	-0,270	0,174	2502163	0,012	0,061
2502066	-0,429	0,354	2502109	-0,401	0,282	2502164	-0,134	0,092
2502067	-0,277	0,260	2502118	-0,362	0,207	2502166	-0,284	0,173
2502069	-0,448	0,229	2502119	-0,253	0,203	2502502	-0,343	0,203
2502070	-0,267	0,148	2502120	-0,341	0,377	2502518	-0,254	0,072
2502071	-0,181	0,114	2502121	-0,173	0,083	2502519	-0,156	0,030
2502072	-0,056	0,098	2502124	-0,376	0,174	2502524	-0,473	0,461
2502073	-0,323	0,068	2502126	-0,480	-0,047	2502527	-0,402	0,244
2502075	-0,230	0,112	2502127	-0,383	0,313	2502530	-0,255	0,304
2502076	-0,303	0,032	2502128	-0,365	0,234	2901005	-0,167	0,015

Fuente: elaboración propia

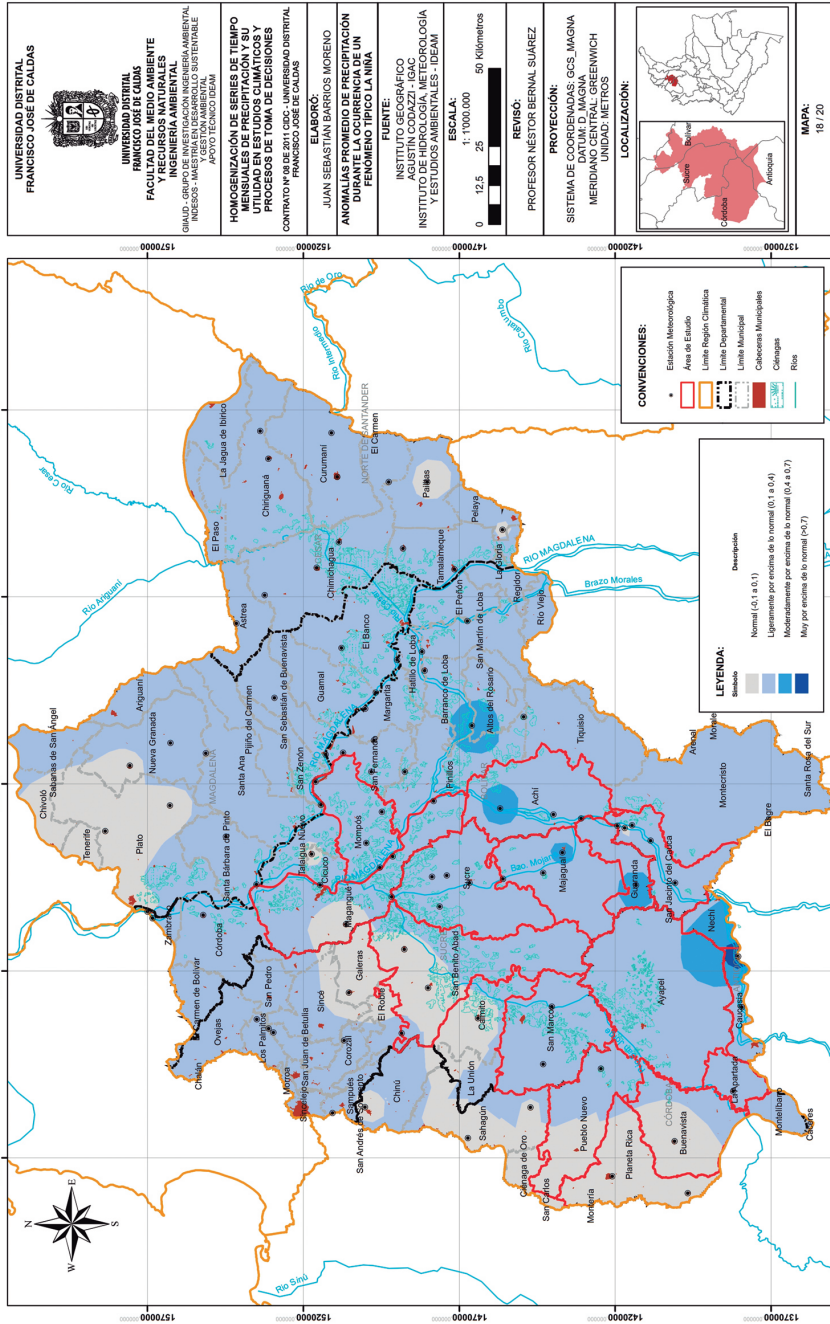
A continuación, se presentan los mapas de anomalías para los fenómenos típicos El Niño y La Niña. Allí se ilustran las subzonas con los mayores valores de anomalías: tonalidad más naranja para el caso del evento El Niño (Mapa 1.6) y tonalidad más azul para el caso del evento La Niña (Mapa 1.7).

Mapa 1.6. Anomalías de precipitación evento típico El Niño



Fuente: elaboración propia

Mapa 1.7. Anomalías de precipitación para evento típico La Niña



Fuente: elaboración propia

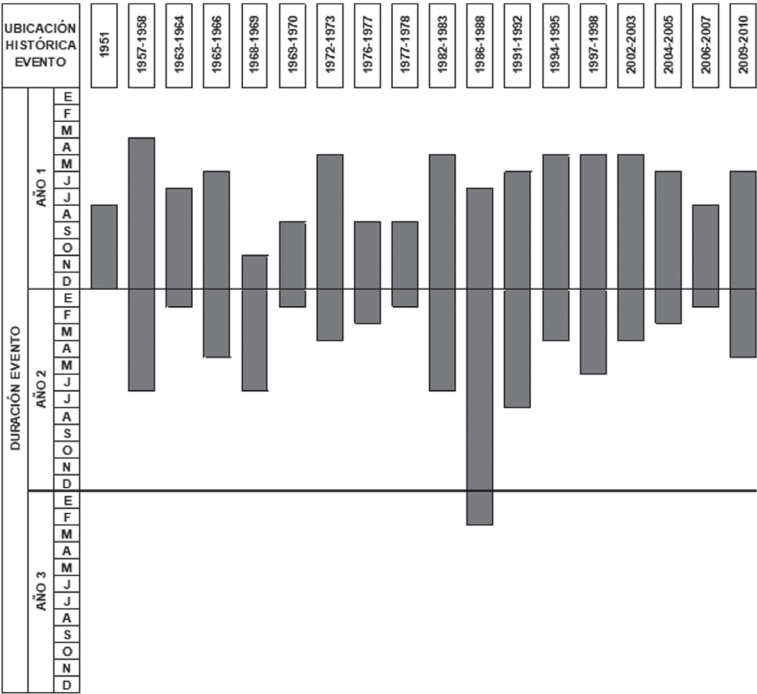
1.14 Alteraciones más probables de la precipitación

La determinación de las alteraciones más probables de precipitación durante la ocurrencia de fenómenos típicos del ciclo ENOS-Oscilación del Sur se realiza siguiendo la metodología propuesta por Montealegre (2012), en el marco del PRICC. El algoritmo de la metodología planteada cuenta con las siguientes etapas: i) definición de las épocas de ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña, ii) cálculo de los índices acumulado y categórico, iii) cálculo de frecuencias absolutas y relativas, y iv) determinación de la condición más probable. Estas se desarrollan a continuación.

1.14.1 Épocas de ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña

En primer lugar, se definieron las épocas de inicio y finalización de los fenómenos El Niño y La Niña, teniendo en cuenta los valores históricos del ONI. En las figuras 1.5 y 1.6, se pueden observar los periodos de ocurrencia de estos fenómenos durante los últimos sesenta años.

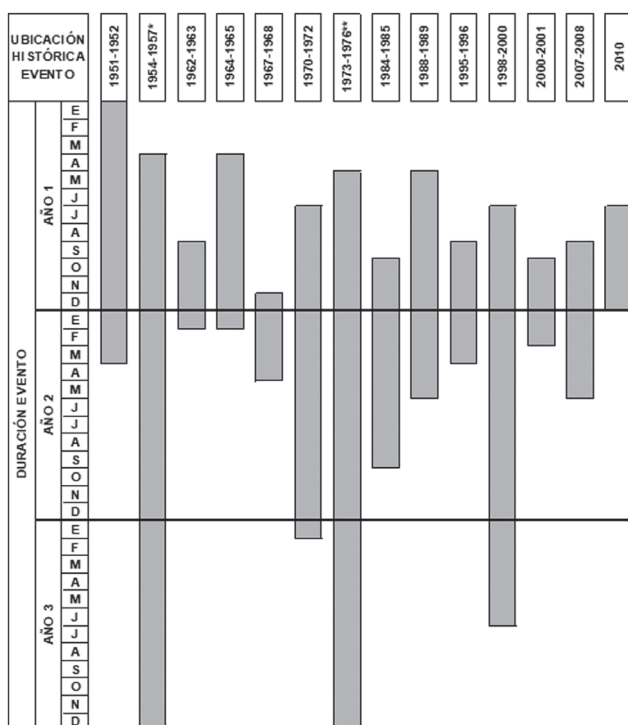
Figura 1.29. Épocas de ocurrencia fenómeno El Niño, basado en el ONI



Fuente: elaboración propia

Para el fenómeno El Niño, se encuentran dieciocho periodos de ocurrencia con longitudes entre los cinco y los veinte meses de duración, con los periodos más cortos en 1951, de 1969 a 1970 y de 1977 a 1978, y con el periodo más largo entre 1986 y 1988. Por su parte, para el fenómeno La Niña se encuentran quince periodos de ocurrencia con longitudes entre los cinco y los 37 meses de duración, con los periodos más cortos de 1962 a 1963, de 1967 a 1968 y de 2000 a 2001, y con el periodo más largo entre 1973 y 1976.

Figura 1.30. Épocas de ocurrencia fenómeno La Niña, basado en el ONI



* Termina en enero de 1957 / ** Termina en mayo de 1976

Fuente: elaboración propia

1.14.2 Índices acumulado y categórico

Después de conocer los periodos de ocurrencia de los fenómenos en estudio en la región y con la información de promedios mensuales multianuales de las series de precipitación homogenizadas en el periodo de referencia climática, se calculan los índices acumulados y categóricos para cada una de las estaciones.

El índice acumulado consiste en la relación porcentual comparativa entre i) el valor acumulado de los registros de lluvia durante los meses de un periodo de ocurrencia de los fenómenos considerados y ii) el valor acumulado de los promedios multianuales de estos meses durante dicho periodo. El valor obtenido refleja, en términos porcentuales, la característica del comportamiento de la precipitación durante el periodo analizado (normal, deficitario o excesivo), de forma que se establecen cinco categorías de interpretación. Una vez determinado el índice acumulado, se expresan en términos categóricos los rangos de variabilidad, asignando a cada uno de ellos un valor que describa su comportamiento, siendo este valor el índice categórico. Las categorías de interpretación son:

Tabla 1.9. Comportamiento de la precipitación según el índice acumulado y el categórico

Índice acumulado	Descripción	Índice categórico
Menor o igual a 40 %	Déficit severo	-2
Entre mayor a 40 % y menor o igual a 80 %	Déficit	-1
Entre mayor a 80 % y menor o igual a 120 %	Normal	0
Entre mayor a 120 % y menor o igual a 160 %	Excedente	1
Mayor o igual a 160 %	Excedente severo	2

Fuente: elaboración propia

Este análisis se efectúa para todas las series mensuales de precipitación analizadas y para cada uno de los periodos en los que ocurrieron los eventos El Niño y La Niña. A manera de ejemplo, la tabla 1.10 describe el cálculo de los índices referidos para la serie temporal de la estación 2502040 (Libra Arriba).

Tabla 1.10. Cálculo de índices acumulado y categórico estación 2502040 (Libra Arriba)

Ubicación del evento		El Niño							La Niña					
		1991-1992	1994-1995	1997-1998	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2009-2010	1988-1989	1995-1996	1998-2000	2000-2001	2007-2008	2010
Precipitación (P)														
Año 1	E	29	22	19	13	20	33	58	0	30	0	69	0	7
	F	8	0	43	12	0	20	30	0	0	0	35	0	11
	M	22	24	38	46	55	10	94	0	25	3	12	26	85
	A	4	197	35	38	130	227	245	34	117	59	78	158	78
	M	121	172	119	97	58	144	137	119	117	74	163	187	77
	J	94	150	118	107	46	134	78	136	79	87	79	209	145
	J	145	220	60	34	105	122	67	95	88	46	27	224	155
	A	44	81	0	67	28	130	165	215	119	149	176	224	222
	S	9	51	149	105	156	124	46	266	6	182	111	45	210
	O	28	129	44	210	268	147	91	134	291	197	97	66	114
	N	11	177	26	58	172	25	63	77	10	148	0	40	241
	D	0	0	0	12	28	26	23	20	16	20	54	33	51
Año 2	E	0	30	0	11	148	0	7	10	53	22	34	13	
	F	5	0	0	0	0	0	11	0	17	19	0	71	
	M	0	25	3	26	42	26	85	104	74	97	0	75	
	A	18	117	59	82	108	158	78	96	24	90	40	107	
	M	102	117	74	61	161	187	77	71	266	176	270	93	
	J	71	79	87	152	152	209	145	201	106	257	15	122	
	J	157	88	46	192	80	224	155	119	108	157	28	132	
	A	230	119	149	17	82	224	222	146	164	120	109	140	
	S	56	6	182	94	79	45	210	91	94	113	165	204	
	O	135	291	197	167	37	66	114	273	154	146	121	175	
	N	47	10	148	113	95	40	241	82	22	76	63	98	
	D	11	16	20	29	147	33	51	16	0	30	88	48	

Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad
en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones

Ubicación del evento		El Niño							La Niña					
		1991-1992	1994-1995	1997-1998	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2009-2010	1988-1989	1995-1996	1998-2000	2000-2001	2007-2008	2010
Promedios multianuales (M)														
Año 1	E	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	F	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	M	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
	A	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
	M	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
	J	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128
	J	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
	A	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	S	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
	O	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
	D	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Año 2	E	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	F	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	M	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
	A	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
	M	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
	J	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128
	J	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
	A	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	S	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
	O	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
	D	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Ubicación del evento		El Niño							La Niña					
		1991-1992	1994-1995	1997-1998	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2009-2010	1988-1989	1995-1996	1998-2000	2000-2001	2007-2008	2010
P	683	1035	650	726	951	452	714	1306	513	2485	296	673	1088	
M	1204	901	1103	901	732	483	829	1032	494	1933	362	591	680	
Í-ACU	57 %	115 %	59 %	81 %	130 %	94 %	86 %	127 %	104 %	129 %	82 %	114 %	160 %	
Í-CAT	-1	0	-1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	2	

Fuente: elaboración propia

En la tabla 1.10, se resaltan los datos de precipitación mensual y los promedios multianuales en colores gris oscuro y gris claro para los periodos de ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña, respectivamente. Se encuentra, por ejemplo, que durante el fenómeno El Niño ocurrido entre mayo de 1997 y mayo de 1998 se registró un volumen total de 650 mm de lluvia, mientras que para el mismo periodo la suma de los valores promedios multianuales correspondiente es de 1103 mm, que equivale al volumen históricamente esperado. La relación porcentual entre estos dos valores, o índice acumulado, muestra que durante el periodo de ocurrencia del fenómeno mencionado se registró 59 % del volumen esperado de lluvia, teniendo en cuenta los datos históricos, lo que corresponde a un índice categórico de valor -1, es decir, una condición de déficit.

Así mismo, durante el fenómeno La Niña ocurrido entre abril de 1988 y abril de 1989 se registró un volumen total de 1306 mm de lluvia, mientras que para el mismo periodo la suma de los valores promedios multianuales correspondientes es de 1032 mm, que equivale al volumen históricamente esperado. La relación porcentual entre estos dos valores, o índice acumulado, muestra que durante el periodo de ocurrencia del fenómeno mencionado se registró 127 % del volumen esperado de lluvia, teniendo en cuenta los datos históricos, lo que corresponde a un índice categórico de valor 1, es decir, una condición de excedente. Los resultados de estos índices se muestran a continuación para cada uno de los periodos de ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña en un grupo de estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Tabla 1.11. Índices acumulado y categórico para la ocurrencia de fenómeno El Niño

Ubicación del evento	El Niño													
	1968-1969	1969-1970	1972-1973	1976-1977	1977-1978	1982-1983	1986-1988	1991-1992	1994-1995	1997-1998	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2009-2010
Índice acumulado														
2502003	78	84	61	69	60	70	74	66	63	51	94	88	103	76
2502035	83	88	65	76	97	93	97	84	99	96	99	96	90	93
2502040								57	115	59	81	130	94	86
2502065				89	83	50	101	47	70	98	108	140	49	
2502076				66	67	117	109	83	57	54	88	93	73	101
2502147							98	99	62	79	72	96	77	92
Índice categórico														
2502003	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	-1
2502035	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2502040								-1	0	-1	0	1	0	0
2502065				0	0	-1	0	-1	-1	0	0	1	-1	
2502076				-1	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0
2502147							0	0	-1	-1	-1	0	-1	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 1.12. Índices acumulado y categórico para la ocurrencia de fenómeno La Niña

Ubicación del evento	La Niña									
	1967-1968	1970-1972	1973-1976	1984-1985	1988-1989	1995-1996	1998-2000	2000-2001	2007-2008	2010
Índice acumulado										
2502003	49	116	116	87	137	154	187	139	188	141
2502035	75	111	111	98	124	148	123	76	74	164

Ubicación del evento	La Niña									
	1967-1968	1970-1972	1973-1976	1984-1985	1988-1989	1995-1996	1998-2000	2000-2001	2007-2008	2010
2502040					127	104	129	82	114	160
2502065			104	94	106	131	97	113		
2502076				71	114	131	93	118	128	204
2502147				120	116	119	106	79	91	136
Índice categórico										
2502003	-1	0	0	0	1	1	2	1	2	1
2502035	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	2
2502040					1	0	1	0	0	2
2502065			0	0	0	1	0	0		
2502076				-1	0	1	0	0	1	2
2502147				1	0	0	0	-1	0	1

Fuente: elaboración propia

1.14.3 Frecuencias absoluta y relativa

La siguiente etapa corresponde al cálculo de las frecuencias absolutas con el que se presenta cada uno de los cinco rangos de afectación establecidos durante los diferentes periodos de ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña. Debido a que la longitud de las series temporales en la región no es la misma para todas las estaciones analizadas, estos valores de frecuencia absoluta no son comparables entre sí, por lo que es necesario calcular la frecuencia relativa para todos los casos, es decir, la probabilidad de ocurrencia de cada rango en términos porcentuales.

Para este fin, se construye una tabla de frecuencias absolutas y relativas a partir de los índices categóricos calculados, en la que se muestra el número de veces y la probabilidad de los diferentes grados de afectación dentro de las cinco categorías definidas. La tabla 1.13 muestra un grupo de estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Tabla 1.13. Frecuencias absoluta y relativa para ocurrencia fenómeno El Niño

Código	Frecuencia absoluta					Frecuencia relativa				
	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
2502003	0	10	4	0	0	0	71	29	0	0
2502035	0	2	12	0	0	0	14	86	0	0
2502040	0	2	4	1	0	0	29	57	14	0
2502065	0	4	5	1	0	0	40	50	10	0
2502076	0	5	6	0	0	0	45	55	0	0
2502147	0	4	4	0	0	0	50	50	0	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 1.14. Frecuencias absoluta y relativa para ocurrencia fenómeno La Niña

Código	Frecuencia absoluta					Frecuencia relativa				
	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
2502003	0	1	3	4	2	0	10	30	40	20
2502035	0	3	3	3	1	0	30	30	30	10
2502040	0	0	3	2	1	0	0	50	33	17
2502065	0	0	5	1	0	0	0	83	17	0
2502076	0	1	3	2	1	0	14	43	29	14
2502147	0	1	4	2	0	0	14	57	29	0

Fuente: elaboración propia

1.14.4 Condición más probable de alteración de la precipitación

Por último, con base en la matriz de frecuencias resultante (en particular de la frecuencia relativa o la probabilidad), se determina la condición más probable de afectación de la precipitación para los eventos típicos El Niño y La Niña, derivada de la categoría con mayor valor porcentual. Para la determinación de este parámetro, se utiliza un criterio de selección que favorece el fenómeno que se analiza, cuando existe igual porcentaje de presentación en dos o más categorías en

particular. En tal sentido, si los porcentajes se reparten igualitariamente entre dos categorías opuestas al fenómeno que se está analizando, se da prelación a la condición típica que se esté considerando, es decir, condiciones de déficit para El Niño o condiciones de excedentes para La Niña.

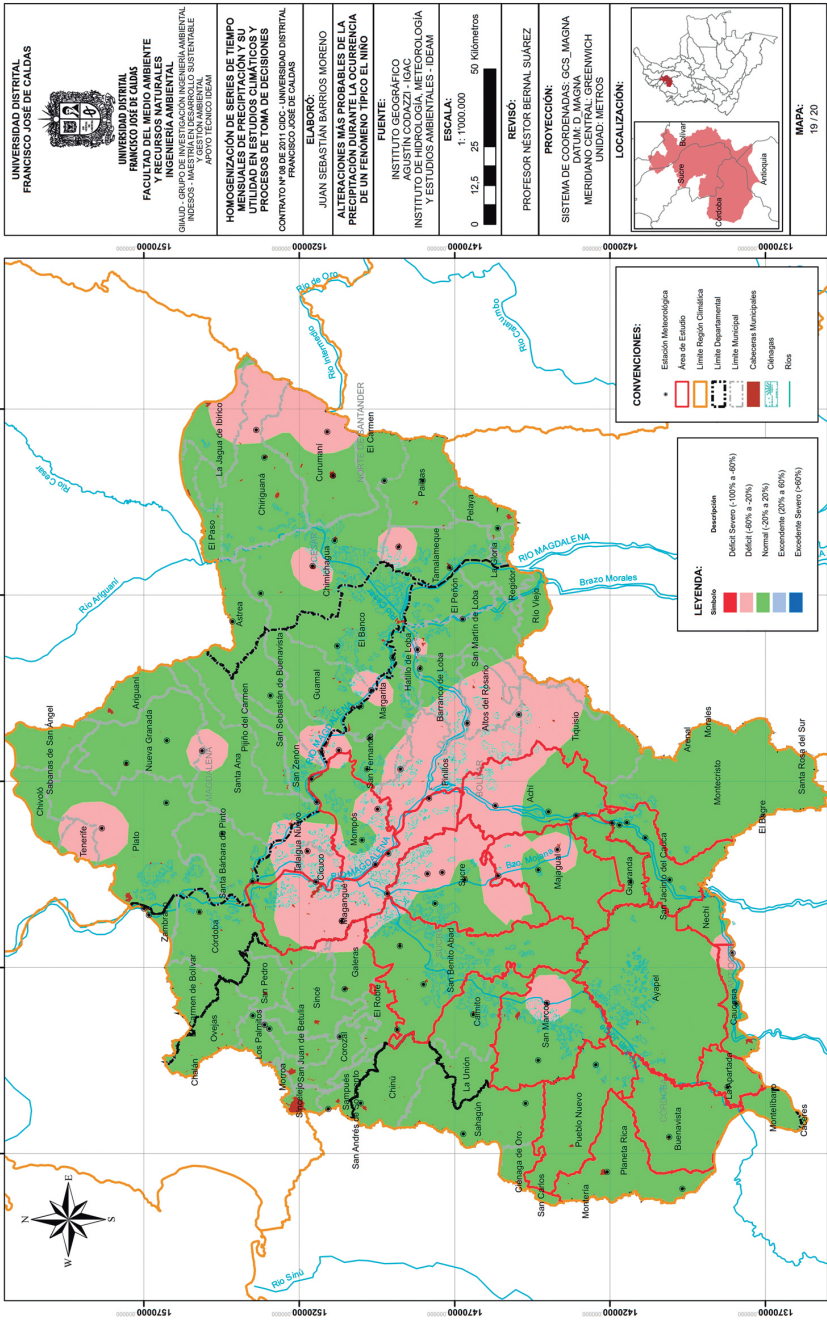
Ahora bien, si la igualdad es entre los rangos moderado y severo de una misma condición fría o cálida, se le da prelación al valor más extremo, ya que se quiere establecer el mayor efecto. En síntesis, las tablas construidas mediante esta metodología corresponden a la probabilidad de alteración de la precipitación, expresada en términos porcentuales, en la región climática del Bajo Magdalena para cinco categorías de afectación durante la ocurrencia de un fenómeno típico El Niño o La Niña, relativos al tipo de afectación predominante. La condición más probable de alteración de la precipitación para un grupo de estaciones meteorológicas en el área de estudio se muestra en la tabla 1.15, y en los mapas 1.8 y 1.9 se presentan las alteraciones más probables para eventos típicos El Niño y La Niña, respectivamente. En este contexto de identificar las alteraciones de los valores de los volúmenes de precipitación, se aprecia que el mapa 1.7 identifica más subzonas con alteraciones en la precipitación en un evento típico La Niña en comparación con el mapa 1.5 de anomalías de precipitación.

Tabla 1.15. Condición más probable de alteración de la precipitación

Código	El Niño		La Niña	
	CMP	Descripción	CMP	Descripción
2502003	-1	Déficit	1	Excedente
2502035	0	Normal	1	Excedente
2502040	0	Normal	0	Normal
2502065	0	Normal	0	Normal
2502076	0	Normal	0	Normal
2502147	-1	Déficit	0	Normal

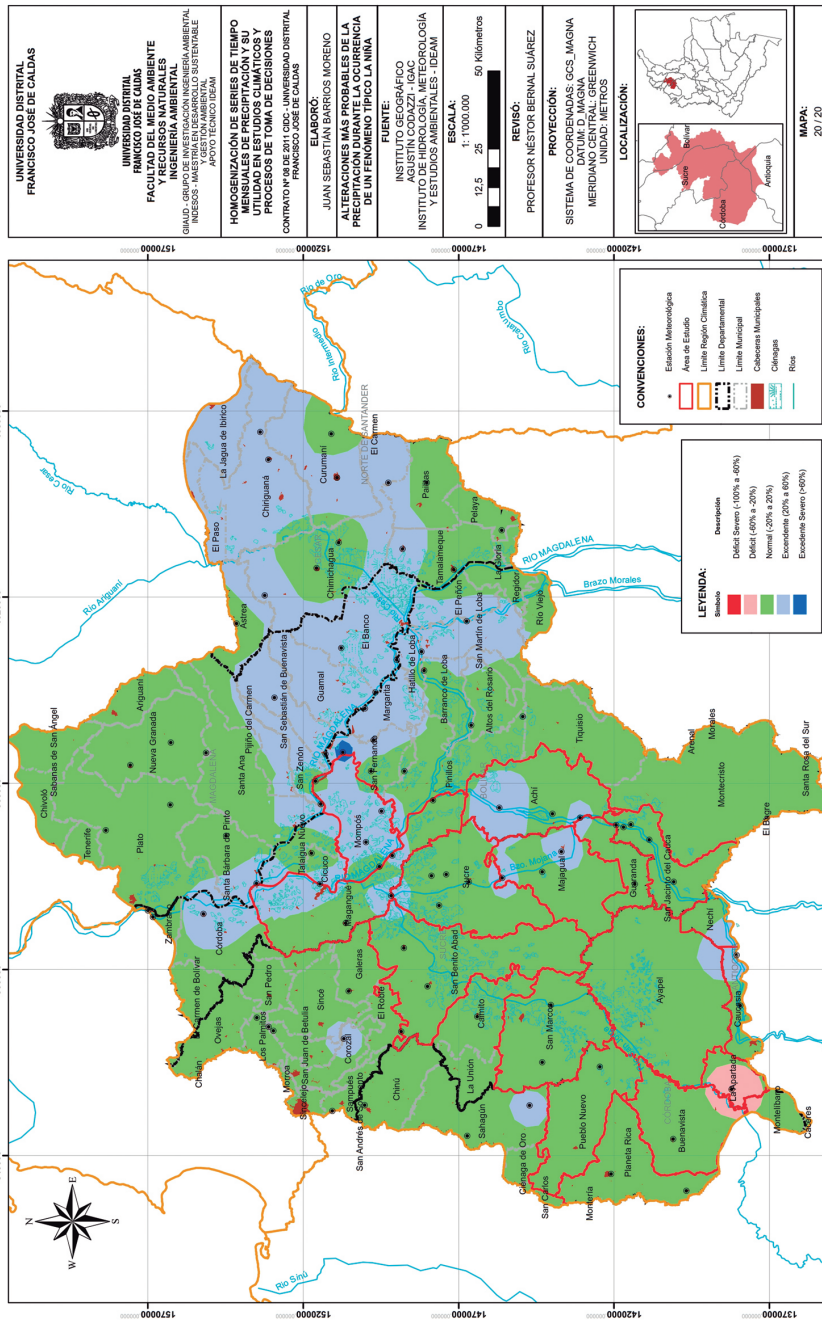
Fuente: elaboración propia

Mapa 1.8. Alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico El Niño



Fuente: elaboración propia

Mapa 1.9. Alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico La Niña



Fuente: elaboración propia

Referencias bibliográficas

- Abraham, B. y Ledolter, J. (1983). *Statistical Methods for Forecasting*. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley-Interscience Paperback Series
- Aguilar, E., Llansó, P. y WMO. (2006). *Guidance on Metadata and Homogenization*. WMO.
- Aguilar, E., Peterson, T. C., Ramírez Obando, P y Frutos, R. (2005). Changes in Precipitation and Temperature Extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Ahmad S. y Simonovic S. P. (2006). An Intelligent Decision Support System for Management of Floods. *Water Resources Management*, (20), 391-410. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-0326-3>
- Alarcón-Hincapié J. C. (2017). *El cambio climático como factor transformador del territorio*. www.bdigital.unal.edu.co/58092/1/79558538.2017.
- Auer, I., et al. (2005). *High Quality Climate Data for the Assessment of Alpine Climate, its Variability and Change on Regional Scale — Collection and Analysis of Historical Climatological Data and Metadata*. ForAlps Alpine Space Program.
- Ávila, A., Carvajal, Y. y Gutiérrez, S. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Revista Tecnura*, 18, 120-133.
- Awadallah, A. (2012). Selecting Optimum Locations of Rainfall Stations using Kriging and Entropy. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 12(1), 36-41.
- Babazadeh, H. y Shamsnia, S. A. (2014). Modelling Climate Variables using Time Series Analysis in Arid and Semi-arid Regions. *African Journal of Agricultural Research*, 9(26), 2018-2027. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1128>
- Barbulescu, A., Maftei, C. y Bautu, E. (2010). *Modeling the Hydro-meteorological Time Series, Applications to Dobruja Region*. Lambert Academic Publishing.
- Barbulescu, A. y Bautu, E. (2009). Alternative Models in Precipitation Analysis. *Analele Stiintifice ale Universitatii Ovidius Constanta, Seria Matematica*, 17(3), 45-68.
- Barrero, A. y Sabogal N. (s. f.). *Curva de dobles masas*. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT).
- Barrios Moreno, J. S. (2013). *Aporte al proceso de toma de decisiones en la planificación ambiental de la región climática del Bajo Magdalena con base en análisis estadístico empleando una metodología para la homogenización de series men-*

- suales de precipitación* [tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional UD.
- Beaulieu, C. A, Chen, J., Sarmiento, J. L. (2012). Change-point Analysis as a Tool to Detect Abrupt Climate Variations. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1962), 1228-1249. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0383>
- Begert, M., Schlegel, T. y Kirchhofer, W. (2005). Homogeneous Temperature and Precipitation Series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25(1), 65-80. <https://doi.org/10.1002/joc.1118>
- Begert, M., Zenklusen, E., Häberli, C. y Appenzeller, C. (2008). An Automated Procedure to Detect Discontinuities; Performance Assessment and Application to a Large European Climate Data Set. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(5), 663-672. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0314>
- Beltrán, V. J., Capera, C. L. y Velásquez, M. L. (2003). *Guía de planificación ambiental regional. Herramientas de prospectiva y participación*. Sistema Nacional Ambiental; GTZ-Cooperación Técnica Alemana.
- Bermúdez, D. y Cepeda, E. (2012). Modelamiento bayesiano de caudal y precipitación aplicando modelos dinámicos y procesos de poisson no homogéneos. *XXII Simposio Nacional de Estadística*. Bucaramanga, Colombia.
- Bernal, N., Barrios, J., Martínez, J. y Ramos, M. (2014). Identification of common factors in monthly precipitation time series in the climatic region of Bajo Magdalena-Colombia (South America). *Memorias III International Conference on ENSO*. CIIFEN.
- Bernal García, G., Montealegre, E., Rangel Montilla, E. y Sabogal Torres, N. (1989). *Régimen de la precipitación en Colombia*. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT).
- Bernal, N., Martínez, J., Rodríguez, N., Pabón, D. y Galindo, G. (2009). *Detección de cambios en el promedio y varianza de una serie de tiempo meteorológica* [ponencia]. VI Encuentro Colombia Venezuela de Estadística y VIII Jornadas de Aplicaciones Matemáticas, Valencia, Venezuela, octubre 26-29 de 2009.
- Bernal, N., Correa, R., Rangel, E. (2011). *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación* [ponencia]. IX Congreso Colombiano de Meteorología: “200 años de la meteorología y la climatología en América Latina”, Bogotá, Colombia, marzo 23-25 de 2011.
- Bernal, N., Barrios, J., Ramos, M., Velásquez, C., Ibarra, Y., Lombana, L., et al. (2012). *Propuesta metodológica para la homogenización de series de tiempo de precipitación mensual y su utilidad en procesos de toma de decisiones. Estudio de caso*

Región Climatológica del Bajo Magdalena [ponencia]. XXII Simposio Internacional de Estadística, Bucaramanga, Colombia, julio 17-21 de 2012.

- Berthouex, P. M. y Box, G. (1996). Time series forecasting wastewater treatment plant performance. Center of Quality and Productivity Improvement. University of Wisconsin.
- Boissonnade, C., Heitkemper L. y Whitehead D. (2002). Weather Data: Cleaning and Enhancement. En R. S. Dischel, *Climate Risk and the Weather Market* (pp. 73-94). Risk Books.
- Boshell, J. F., León, G. E. y Peña, A. (2011). *Contextualización de los efectos del Cambio Climático en la Agricultura*. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo; GIZ Perú.
- Boulanger, J.-P., Aizpuru, J., Leggieri, L. y Marino, M. (2010). A Procedure for Automated Quality Control and Homogenization of Historical Daily Temperature and Precipitation Data (APACH). Part 1: Quality Control and Application to the Argentine Weather Service Stations. *Climatic Change*, 98(3), 471-491. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9741-9>
- Box, G. y Jenkins, G. (1976). *Time series analysis forecasting and control*. Prentice Hall.
- Brewer, G. D. y Stern, P. C. (Eds). (2005). *Decision Making for the Environment: Social and Behavioral Science Research*. National Academies Press.
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework*. Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper N.º 38. University of East Anglia.
- Brunet, M. (2010). Datos e indicadores para detectar y atribuir eventos al cambio climático: los registros históricos del clima y su problemática. *Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1(1), 19-28.
- Buishand, T. A. (1982). Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology*, 58(1-2), 11-27. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90066-X)
- Buishand, T. A. (1984). Test for Detecting a Shift in the Mean of Hydrological Time Series. *Journal of Hydrology*, 73, 51-59.
- Cardona, O. D. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo: una crítica y una revisión necesaria para la gestión* [ponencia]. International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice, Wageningen, Holanda.
- Chaves, C. B. (2002). Stochastic modeling of monthly sun bright in coffee growing areas. *Revista Colombiana de Estadística*, 25(1), 59-71.

- Chi, D. S. (2006). *Methods for the Estimation of Missing Values in Time Series*. [Thesis]. Faculty of Communications, Health and Science Edith Cowan University Perth, Western Australia.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Guía ilustrativa sobre análisis de vulnerabilidad territorial ante el cambio climático. Propuesta metodológica para los entes territoriales de la jurisdicción de la CAR*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Cliff, A. y Ord, J. K. (1981). *Spatial Process Models & Applications*. Pion Limited.
- Chavarro Pinzón, M., García Guerrero, A., García Portilla, J., Pabón, J. D., Prieto Roza, A. y Ulloa Cubillos, A. (2008). *Amenazas, riesgos, vulnerabilidad y adaptación frente al cambio climático*. UNODC; Colombia Proyecto AD/COL/21. <https://www.unodc.org/documents/colombia/2013/Agosto/DA2013/MATERIAL-DIFUSION-No.3-ADAPTACION.pdf>
- Cheng, H., Tan, P.-N., Potter, C., Klooster, S. (2009). *Detection and Characterization of Anomalies in Multivariate Time Series* [ponencia]. Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining. Sparks, Nevada, Estados Unidos, abril 30–mayo 2 de 2009. <https://doi.org/10.1137/1.9781611972795.36>
- Congreso de la República de Colombia. (1997, 18 de julio). Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 43.091.
- Comunidad Andina (CAN) y Corporación OSSO. (2009). *Atlas de las dinámicas del territorio andino: población y bienes expuestos a amenazas naturales*. CAN.
- Cortés, U., Sánchez-Marré, M., Sangüesa, R. y Comas, J. (2001). Knowledge Management in Environmental Decision Support Systems. *AI Communications*, 14(1), 3-12.
- Correa, E. (Comp.). (2011). *Reasentamiento preventivo de poblaciones en riesgo de desastre: experiencias de América*. Banco Mundial.
- Costa Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería Uniandes*, (26), 74-80. <http://dx.doi.org/10.16924%2Friua.voi26.298>
- Chiew, F. y Siriwardena, L. (2005). *TREND. Trend/Change Detection Software. CRC for Catchment Hydrology*. <https://toolkit.ewater.org.au/trend>
- Coughlan, K. J. y Huda, A. K. S. (2008). Use of Weather and Climate Information for Agricultural Planning and Decision Making. *Journal of Agrometeorology*, (Special issue–Part 2), 249-260.
- Datsenko, N. M., Moberg, A., Sonechkin, D. M. (2002). Objective Time-scale-dependent Homogenization of Early Instrumental Temperature Series. *Theoretical and Applied Climatology*, 72(1), 103-126. <https://doi.org/10.1007/s007040200016>

- Departamento Nacional de Planeación. (2010, 5 de agosto). Decreto 2820 de 2010. Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Diario Oficial 47.792.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2011). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014*. DNP.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). Índice Municipal de Riesgo de Desastres ajustado por *capacidades*. DNP.
- Domonkos, P. (2014). The ACMANT2 software package. *Eighth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, World Climate Monitoring Program (WCDMP)*. www.c3.urv.cat/publicacions/publicacions.html
- Duchon, C. y Hale, R. (2012). *Time Series Analysis in Meteorology and Climatology*. John Wiley and Sons.
- El-Fandy, M. G., Ashour, Z. H. y Taniel, S. M. M. (1994). Time Series Models Adoptable for Forecasting Nile Floods and Ethiopian Rainfalls. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75(1).
- Fierro-Renoy, V. (s. f.). *Modelos de umbral autoregresivos (TAR): una primera aproximación al tipo de cambio nominal en el caso ecuatoriano*. Nota técnica 42.
- Gelfand, A., Diggle, P., Fuentes, M. y Guttorp, P. (2010). *Handbook of Spatial Statistics*. CRC Press.
- Gómez, V. y Maravall, A. (1994). Estimation, Prediction and Interpolation for Nonstationary Series with Kalman Filter. *Journal of the American Statistical Association*, 89(426), 611-624. <https://doi.org/10.1080/01621459.1994.10476786>
- Gómez, V. y Maravall, A. (1998). *Automatic Modeling Methods for Univariate Series*. Banco de España Servicio de Estudios, Documento de Trabajo N.º 9808. Banco de España.
- González Hidalgo, J. C., De Luis Arrillaga, M., Stepánek, P., Raventós Bonvehí, J. y Cuadrat Prats, J. M. (2002). Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. VII Reunión Nacional de Climatología, Albarracín, España, julio de 2002.
- González-Rouco, J., Jiménez, J., Quesada V. y Valero, F. (2001). Quality control and homogeneity of precipitation data in the Southwest of Europe. *Journal of Climate*, 14(5), 964-978. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0964:QCAHOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0964:QCAHOP>2.0.CO;2)
- Grupo de Investigación de Ingeniería Ambiental (GIIAUD) y Grupo de Investigación para el Desarrollo Sostenible (INDESOS). (2011). *Homogenización de series de*

- tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones*. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Guijarro, J. (2004). CLIMATOL: software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. En C. Diego Liaño, J. C. García Codrón, C. Garmendia Pedraja y D. Rasilla Álvarez (Coords.), *El clima entre el mar y la montaña* (pp. 493-502). Editorial Universidad de Cantabria.
- Guerrero, V. M. (1991). *Análisis estadístico de series de tiempo económicas*. Editorial Universidad Autónoma Metropolitana de México.
- Guerrero, V. M. (2003). *Análisis estadístico de series de tiempo económicas* (2.^a ed.). International Thomson Editores.
- Gutiérrez, M. E. y Espinosa, T. (2010). *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Guzmán, D. y Ruiz, J. F. (2012). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual a través del análisis de componentes principales (ACP)*. Ideam.
- Hammer, G. L., Hansen, J. W., Philips, J. G., Mjelde, J. W., Hill, H., Love, A., et al. (2001). Advances in Application of Climate Prediction in Agriculture. *Agricultural Systems*, 70(2-3), 515-553.
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación* (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- Herrero, M. y Álvarez, R. (2007). *Análisis de series temporales pluviométricas en la cuenca del Duero*. Observatorio Medioambiental, Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Madrid.
- Holan, S. H., Lund, R. y Davis, G. (2010). The ARMA alphabet soup: A tour of ARMA model variants. *Statistics Surveys*, 4, 232-274.
- Holton, J. (1999). *An Introduction to dynamic meteorology*. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington. Seattle.
- Hubert, P., Carbonnel, J. P. y Chaouche, A. (1989). Segmentation des séries hydrologiques: applications à des séries de précipitations et débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367.
- Hubert, P. (2000). The segmentation procedure as a tool for discrete modeling of hydrometeorological regimes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14(4-5), 297-304.
- Hurtado, G. (2000). *La precipitación en Colombia*. Nota Técnica Ideam-Meteo/006-00. Ideam.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (s. f.). *Mapas de anomalías de precipitación para eventos El Niño y La Niña típicos*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2002). *Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno El Niño en Colombia*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2010a). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2010b). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2012). *Mapa de zonas susceptibles a inundación*. Ideam. <http://www.siac.gov.co/inundaciones>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Variabilidad climática y cambio climático en Colombia*. Ideam.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2011). *Reporte n.º 5 de áreas afectadas por inundaciones 2010-2011*. Ideam.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- ITIA Research Team. (2010). *Hydrognomon*. National Technical University of Athens.
- Jaramillo, A. y Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2), 102-113. <http://hdl.handle.net/10778/971>
- Karabörk, Ç., Çağatay, K., y Kömüßçü, E. y Ümran, A. (2007). Analysis of Turkish Precipitation Data: Homogeneity and the Southern Oscillation Forcings on Frequency Distributions. *Hydrological Process*, 21(23), 3203-3210.
- Keogh, E., Lin, J. y Fu, D. (2005). *HOT SAX: Finding the Most Unusual Time Series Subsequence: Algorithms and Applications* [ponencia]. Fifth IEEE International Conference on Data Minin, Houston, Texas, Estados Unidos, noviembre 27-30 de 2005.

- Kundzewicz, Z. W. y Robson, A. (eds.). (2000). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. *World Climate Programme-Water, World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD, 1013*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Kundzewicz, Z. W. y Robson, A. J. (2004). Change Detection in Hydrological Records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 7-19. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.53993>
- Lakatos, M., Szentimrey, T. y Bihari, Z. (2010). *Change of Several Dry Climate Indices on Homogenized Precipitation Data* [ponencia]. Water Observation and Information System for Balkan Countries Conference (BALWOIS), Ohrid, República de Macedonia, mayo 25-29 de 2010.
- Laudon, K. C. and Laudon, J. P. (2002). *Sistemas de información gerencial, organización y tecnología de la empresa conectada en red*. Addison Wesley Longman.
- Lee, A. F. S. y Heghinian, M. S. (1977). A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables-A Bayesian Approach. *Technometrics*, 19(4), 503-506.
- Lehre, K. L. y Wenstøp, F. (2006). *A Primer on Environmental Decision-making. An Integrative Quantitative Approach*. Springer.
- León, G. y Zea, J. (1998). *Sistemas sinópticos que determinan el estado del tiempo en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de Meteorología.
- Lombana, L., Bernal, N. y Barrios, J. (2018). *Guía para el procesamiento de series de tiempo de precipitación y temperatura: estimación de cambios y homogenización procesamiento de datos en Excel, SPSS, TSW y ANCLIM*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Levy J. (2005). Multiple Criteria Decision Making and Decision Support Systems for Flood Risk Management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 438-447. <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0009-2>
- Liu, B., Chen, J., Lu, W., Chen X. y Lian, Y. (2015). Spatiotemporal Characteristics of Precipitation Changes in the Pearl River Basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1375-4>
- Manly, B. F. J. (2009). *Statistics for Environmental Science and Management* (2.^a ed.). CPC Press; Taylor & Francis Group.
- Martínez, J., Montealegre, E. y Rangel, E. (1996). *Estimación de observaciones faltantes en una serie de tiempo usando modelos ARIMA* [ponencia]. IV Congreso Colombiano de Meteorología, Ideam, Bogotá, Colombia, marzo 19-23 de 1996.

- Martínez, M. (2010). *La vigilancia hidrometeorológica en el Ideam y los sistemas de alerta temprana*. Ideam.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. MAVDT.
- Mayorga, R. y Hurtado, G. (2006). *La sequía en Colombia. Documento técnico de respaldo a la información en la página web del Ideam*. Ideam.
- Mesa, O., Poveda G. y Carvajal, L. (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Mestre, O. (2008). A Review of Homogenisation Procedures. En *Proceedings of the International Workshop on Rescue and Digitization of Climate Records in the Mediterranean Basin* (pp. 41-45). World Meteorological Organization (WMO).
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2011). *Base de datos agrícola nacional 2007-2011*. MinAgricultura.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006, 30 de junio). Resolución 1255 de 2006. Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para proyectos puntuales y se adoptan otras determinaciones. Diario Oficial 46.368.
- Mirón, I. J., Montero, J. C., Criado, J. J., Gutiérrez, G., Paredes, D., Mayoral, S. y Linares, C. (2006). Tratamiento y estudio de series de temperatura para su aplicación en salud pública. El caso de Castilla-La Mancha. *Rev. Esp. Salud Pública*, 80, 113-124.
- Montgomery, D., Lynwood, A. y Gardiner, J. (1990). *Forecasting and Time Series Analysis*. McGraw-Hill.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L. y Kulahci, M. (2008). *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. Wiley-Interscience.
- Montealegre, E. (1990). *Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT).
- Montealegre, E. y Pabón, J. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, (2), 7-21.
- Montealegre, E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Ideam.

- Montealegre, E. (2012). *Análisis de la variabilidad climática interanual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá Cundinamarca*. Plan Regional Integral de Cambio Climático.
- Montealegre, E. (2017). *El Niño y La Niña: dos fenómenos desastrosos*. Sociedad Geográfica de Colombia.
- Montoya, G. (2008). *Lecciones de meteorología dinámica y modelamiento atmosférico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Morán, A. E. y Bianchi, G. (2011). *Toma de decisiones ambientales: marco conceptual y metodológico para su estudio*. Asociación de Administradores Gubernamentales de Buenos Aires. <http://www.asociacionag.org.ar/pdfaportes/24/o6.pdf>
- Murillo, W., Banguero, E. y Aragón, G. (2005). El régimen diario de la precipitación en el municipio de Quibdó (Colombia). *Revista de Meteorología*, (5), 1-7.
- Nieto, F. H. (2008). Forecasting with univariate TAR models. *Statistical Methodology*, 5(3), 263-276.
- Nieto, F. y Ruiz, F. (2002). About a Prompt Strategy for Estimating Missing Data in Long Time Series. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 26(100), 411-418.
- No, F. I. (2011). Agricultura campesina adaptable a las condiciones climáticas. Introducción.
- Pabón, J. D., Zea, J., León, G., Hurtado, G., González, O. C. y Montealegre, E. (1998). *La atmósfera, el tiempo y el clima*. Agrosavia.
- Pabón, J. D. y Montealegre, E. (2017). *Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Pacheco, M. (2009). *Adaptación al cambio climático en la planificación del territorio desde una perspectiva regional*. Centro de Naciones Unidas para el Desarrollo Regional (UNCRD).
- Pankratz, A. (1991). *Forecasting with Dynamic Regression Models*. John Wiley and Sons.
- Peterson, T. C., Easterling, D. R., Karl, T. R., et al. (1998). Homogeneity Adjustments of *in situ* Atmospheric Climate Data: A Review. *International Journal of Climatology*, (18), 1493-1517. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19981115\)18:13<1493::AID-JOC329>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19981115)18:13<1493::AID-JOC329>3.0.CO;2-T)
- Poveda G. (1994). *Cuantificación de los efectos de El Niño y La Niña sobre los caudales mensuales de los ríos colombianos*. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología. IAHS, Santiago, Chile.

- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., et al. (2001). Seasonality in ENSO-related Precipitation, River Discharges, Soil Moisture, and Vegetation Index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169-2178.
- Presidencia de la República de Colombia. (1998, 13 de mayo). Decreto 879 de 1998. Por el cual se reglamentan las disposiciones referentes al ordenamiento del territorio municipal y distrital y a los planes de ordenamiento territorial. Diario Oficial 43.300.
- Presidencia de la República de Colombia. (2002, 6 de agosto). Decreto 1729 de 2002. Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-Ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5 de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 44.893.
- Presidencia de la República de Colombia. (2004, 20 de abril). Decreto 1200 de 2004. Por el cual se determinan los instrumentos de planificación ambiental y se adoptan otras disposiciones. Diario Oficial 45.526.
- Puertas, O. y Carvajal Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 23, 104-118.
- Ramos, M. (2013). *Propuesta metodológica: utilidad de los procesos de detección de cambios históricos en el promedio de series de precipitación en planes de ordenamiento territorial para la región climatológica del bajo magdalena*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ramos-Calzado, P., Gómez Camacho, J., Pérez-Bernal, F., Pita, M. F. (2008). A Novel Approach to Precipitation Series Completion in Climatological Datasets: Application to Andalusia. *International Journal of Climatology*, 28(11), 1525-1534. <https://doi.org/10.1002/joc.1657>
- Rodríguez-Eraso, N., Pabón-Caicedo, J. D., Bernal-Suárez, N. R. y Martínez-Collantes, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Editorial Universidad Nacional de Colombia; Colciencias.
- Rojas Ruiz, A. (2012). *Actividades operativas y de investigación para generar predicciones climáticas mensuales mediante los sistemas de modelamiento numérico CWRF, CMM5 Y CAM*. Ideam.

- Root, E. (2011). *Class Notes. Introduction to Quantitative Methods, Geography Department, University of Colorado*. http://www.colorado.edu/geography/class_homepages/geog_4023_s11/index.html
- Rosenberg, M. S. y Anderson, C. D. (2011). PASSaGE: Pattern Analysis, Spatial Statistics and Geographic Exegesis. Version 2. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(3), 229-232.
- Ruíz, F. (1996). Pronóstico de la temperatura del aire en el altiplano cundiboyacense con base en los modelos ARIMA. *Memorias del IV Congreso Colombiano de Meteorología, Ideam-Socolmet*.
- Ruiz, F. y Melo, J. (2019). *Patrones sinópticos bajo las tres fases del ENOS visto a través del REANALISI CFSR y su respuesta en la precipitación para Colombia*. Ideam.
- Şensoy, S., Demircan, M. y Alan, I. (2007). *Trends in Turkey climate indices from 1971 to 2004*. <https://www.researchgate.net/publication/236168135>
- Seskin, D. J. (2007). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Chapman & Hall/CRC.
- Shamsnia, S. A., Shahidi, N., Liaghat, A., Sarraf, A. y Vahdat, S. F. (2011). *Modeling of Weather Parameters using Stochastic Methods (ARIMA Model) (Case Study: Abadeh Region, Iran)* [ponencia]. International Conference on Environment and Industrial Innovation IPCBEE, Singapur.
- Štěpánek, P. (2008). *AnClim-software for time series analysis*. MU, Brno.
- Štěpánek, P., Zahradnický, P. y Skalák, P. (2009). Data Quality Control and Homogenization of Air Temperature and Precipitation Series in the Area of the Czech Republic in the Period 1961-2007. *Advances in Science and Research*, (3), 23-26.
- Storch, H. y Zwiers, F. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.
- Thompson, J. M. y Sieber, J. (2012). Climate Predictions: The Influence of Nonlinearity and Randomness. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, (370), 1007-1011. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0423>
- Trenberth, K. (1991). General characteristics of El Niño-Southern Oscillation. *Introducción al clima en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Unwin, D. J. (1981). *Introductory Spatial Analysis*. Routledge Kegan & Paul.
- Vázquez, J. (2006). *Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimientos inmediatos* [ponencia]. I Foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz, Veracruz, México, febrero 9-10 de 2006.

- Vyushin, D. I., Kushner, P. J. y Zwiers, F. (2012). Modeling and Understanding Persistence of Climate Variability. *Journal of Geophysical Research*, 117(D21). <https://doi.org/10.1029/2012JD018240>.
- Wei, W. W. S. (2006). *Time Series Analysis Univariate and Multivariate Methods*. Addison Wesley, 33-59.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2.^a ed.). Elsevier.
- World Meteorological Organization (WMO). (2007). *Directrices sobre la gestión de datos climáticos*. WMO.
- World Meteorological Organization (WMO). (2009a). *Hoja informativa N.º 1: La información sobre el clima, un instrumento para reducir los riesgos de desastres* [ponencia]. World Climate Conference, Ginebra, Suiza, agosto 31–septiembre 4 de 2009.
- World Meteorological Organization (WMO). (2009b). *Hoja informativa N.º 6: La información sobre el clima, un instrumento para un medio ambiente saludable* [ponencia]. World Climate Conference, Ginebra, Suiza, agosto 31–septiembre 4 de 2009.
- Widjanarko Otok, B. y Suhartono. (2009). Development of Rainfall Forecasting Model in Indonesia by using ASTAR, Transfer Function, and ARIMA Methods. *European Journal of Scientific Research*, 38(3), 386-395.
- Yeşilirmak, E., Akçay, S., Dağdelen, N. y Gürbüz, T. (2008). Quality Control and Homogeneity of Annual Precipitation Data in Büyük Menderes Basin, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(9a), 1748-1757.
- Zea, J. A. (1995). Diseño de una red óptima de estaciones para medir la precipitación. *Atmósfera*, 23, 57- 62.
- Zúñiga, H. (2001). *Hagamos el ordenamiento territorial del sector rural de nuestro municipio: manual técnico-legal*. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Zuur, A. F. y Pierce, G. J. (2004). Common trends in northeast Atlantic Squid Time Series. *Journal of Sea Research*, 52, 57-72.
- Zwiers, F. y Storch, H. (2004). On the Role of Statistics in Climate Research. *International Journal of Climatology*, 24(6), 665-680.

Capítulo 2. Planificación ambiental, ordenamiento territorial y su relación con la precipitación: estudio de caso región climática Bajo Magdalena

JUAN SEBASTIÁN BARRIOS MORENO

MARCOS ANDRÉS RAMOS CASTAÑEDA

NÉSTOR RICARDO BERNAL SUÁREZ



Zonas de inundación, municipio de San Marcos, Sucre

Foto: Carolina Velásquez

Introducción

Este capítulo presenta dos enfoques. El primero corresponde a una propuesta de integración del clima en los procesos de planificación ambiental, haciendo énfasis en las series de tiempo de precipitación mensual; este enfoque tiene en cuenta las escalas y los actores a nivel nacional, regional y local. El segundo corresponde a una propuesta metodológica para incluir información climática de calidad (series de tiempo de precipitación homogenizadas) en el componente climático de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), haciendo énfasis en la detección de cambios en los valores promedio de precipitación.

Se espera que este tipo de propuestas contribuyan, complementen y que estén dirigidas al objetivo común de incluir el componente climático en la planificación ambiental regional y local. Algunas iniciativas actuales en este contexto son:

- i. el proyecto Plan Regional Integral de Cambio Climático de Bogotá-Cundinamarca (PRICC), en el cual se empleó la metodología de alteraciones más probables de precipitación en periodos de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, con lo que se evidenció la importancia de incorporar este tipo de productos en la planificación regional;
- ii. la Región Administrativa y de Planificación Especial (RAPE), que considera incluir las dimensiones ambiental, económica y social en la integración regional de los departamentos de Cundinamarca, Tolima, Meta, Boyacá y el Distrito Capital;
- iii. el Plan Nacional de Desarrollo de Colombia (2014-2018), en el cual se hace referencia a la necesidad de aportar a los programas relacionados con la gestión del riesgo, derivada de la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos en pro de mitigar posibles efectos adversos y reducir la vulnerabilidad de la población, temáticas abordadas en el marco de la degradación de ecosistemas, contaminación y conflictos ambientales en la Estrategia Transversal Crecimiento Verde;
- iv. el Plan Distrital de Adaptación y Mitigación a la variabilidad y al Cambio Climático de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, 2014), el cual desarrolla cuatro ejes temáticos: Eje 1. Bogotá Verde (ecoeficiencia para la

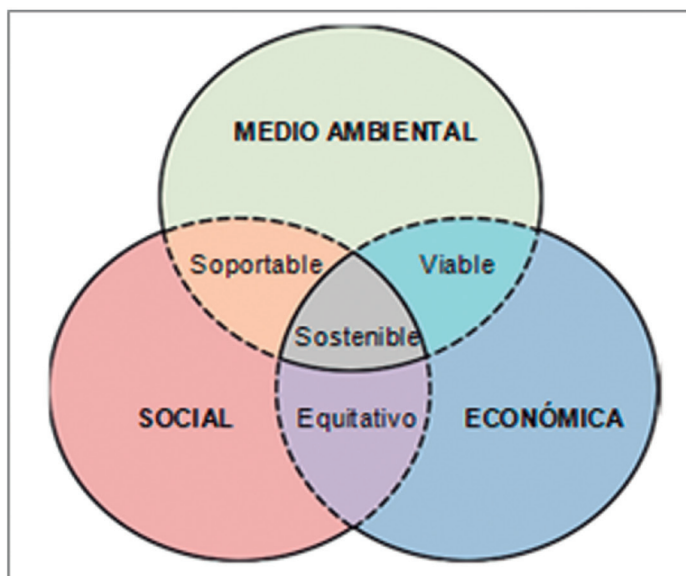
adaptación y mitigación al cambio climático), Eje 2. Bogotá Ordenada Alrededor del Agua y el Río Bogotá (un territorio que gestiona el riesgo y se ordena alrededor del agua), Eje 3. Bogotá Solidaria (articulación distrital y regional en torno al cambio climático), Eje 4. Gobernabilidad y Gobernanza para Afrontar el Cambio Climático; y

- v. la reciente experiencia del Ministerio de Ambiente de Ecuador (2013), que ha diseñado una guía para la inserción del tema del cambio climático en la elaboración de ordenamiento territorial.

2.1 Desarrollo sostenible y dimensión ambiental

La planificación ambiental y el ordenamiento territorial se enmarcan dentro de la teoría del desarrollo sostenible, que plantea solucionar las necesidades de la población del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para solucionar sus propias necesidades (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987). En tal sentido, pretende conducir al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta y evitando el deterioro del ambiente (Zúñiga, 2009).

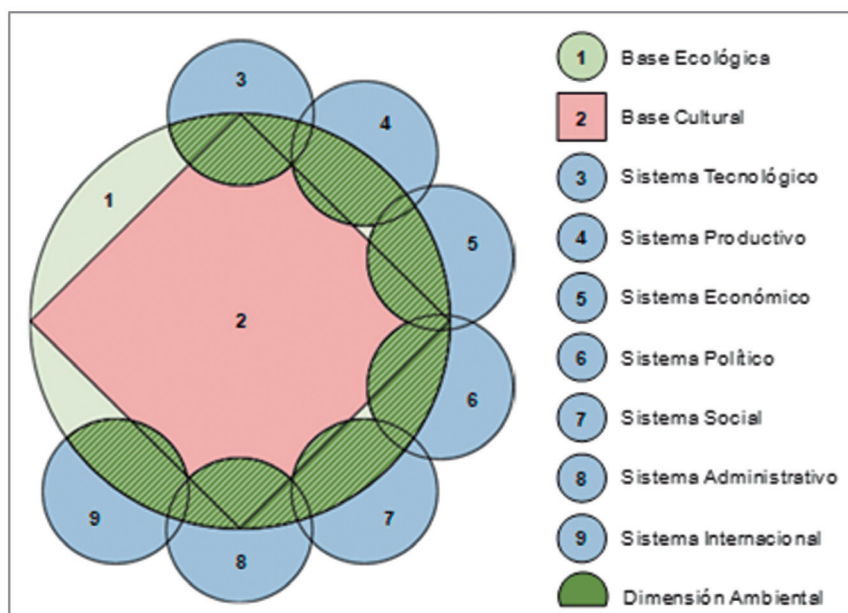
Figura 2.1. Dimensiones del desarrollo sostenible



Fuente: Barber y Zapata (2009)

La figura 2.1 muestra el modelo de desarrollo sostenible definido a partir de las relaciones funcionales entre tres dimensiones: ambiental, social y económica (Barber y Zapata, 2009). En dicha figura, se encuentra que el desarrollo sostenible equivale al balance armónico de las tres dimensiones citadas, mientras que la omisión de una de estas equivale a desarrollos de otro tipo. Así, por ejemplo, si se tiene en cuenta únicamente el aspecto antropocéntrico (ambiental-social), se tendrá un desarrollo soportable que no podrá ser viable ni equitativo por haber omitido el aspecto económico. Ahora bien, si se atiende exclusivamente el área mercadológica (social-económica), se estaría cayendo en un equilibrio, pero esta interrelación no sería ni soportable ni viable. Por último, si se estudia solo una relación ecosistémica (ambiental-económica), se tendrá un modelo viable, pero no soportable ni equitativo y, por lo tanto, no sostenible.

Figura 2.2. Componentes del desarrollo sostenible y la dimensión ambiental



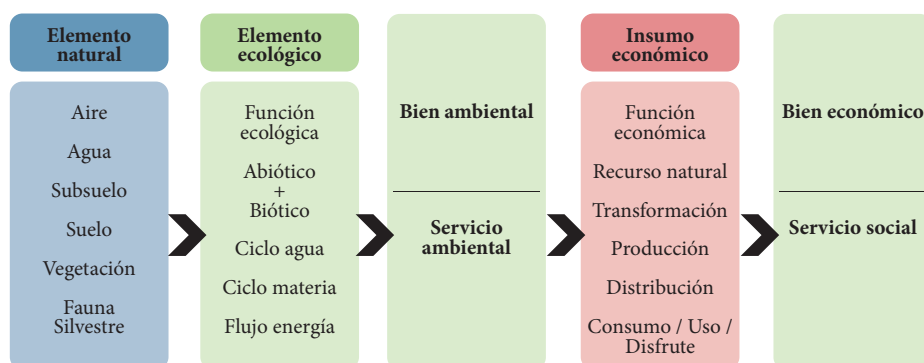
Fuente: Zúñiga (2009)

El desarrollo sostenible puede entenderse también a partir de los siguientes componentes (Figura 2.2): i) un sistema tecnológico orientado a buscar nuevas soluciones de tecnologías apropiadas y limpias; ii) un sistema productivo que tiene como soporte la base ecológica del sistema natural; iii) un sistema económico que, en forma segura y sostenida, es capaz de generar excedentes para acumular y

distribuir; iv) un sistema político que asegura la participación ciudadana en procesos de decisión; v) un sistema social con enfoque equitativo orientado a proveer soluciones para las tensiones de un desarrollo desigual; y vi) un sistema administrativo flexible (Zúñiga, 2009).

Los componentes mencionados actúan de manera interrelacionada, es decir que los sistemas interactúan entre sí, pero a su vez lo hacen con los sistemas ecológico y cultural que les sirven de soporte, dando lugar a la aparición de la dimensión ambiental, que permite interpretar y entender los elementos del sistema natural como bienes y servicios ambientales. El aire, el agua, el subsuelo, el suelo, la vegetación y la fauna silvestre son elementos naturales que pasan a ser elementos ecológicos como resultado de las funciones en las cuales participan, ya sea en el ciclo del agua, en los ciclos de la materia o en los flujos de energía.

Figura 2.3. Tránsito de elemento natural a bien económico o servicio social



Fuente: Zúñiga (2011)

Al ubicarse en el ámbito de la dimensión ambiental, estos elementos se conocen como *bienes* o *servicios ambientales* (Figura 2.3); son bienes ambientales cuando en su uso se transforman perdiendo las características que los identifican y son servicios ambientales cuando en su aprovechamiento no sufren cambios sustanciales en sus propiedades. Al encontrar precios de mercado, estos bienes y servicios se denominan *recursos naturales* y participan como insumos en funciones económicas, con lo que se presentan a la población asentada en un territorio como bienes económicos o servicios sociales.

2.2 Planificación ambiental regional

La planificación ambiental territorial es un proceso dinámico que permite orientar, de manera coordinada y concertada, la administración y el aprovechamiento de los

recursos naturales para contribuir a la consolidación de alternativas de desarrollo sostenible acordes con las características ecológicas, económicas y sociales del entorno (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.). En este contexto, su finalidad es el planeamiento del uso y el manejo de los recursos y la regulación de las actividades de los usuarios, de modo que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico y la preservación de la estructura físico-biótica del territorio (Decreto 1729 de 2002).

Para este fin, se requiere el establecimiento de una línea base ambiental, definida como el conocimiento de las condiciones del medio en cuanto a las aptitudes de desarrollo territorial, las potencialidades y los conflictos asociados a la funcionalidad ecológica de los recursos naturales y los impactos de las relaciones sociedad-naturaleza sobre el entorno. Este conocimiento es la base para el diseño de los programas y proyectos que conduzcan a lograr un desarrollo sostenible en el territorio (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

El proceso descrito comprende cuatro etapas (Zúñiga, 2000). En la primera etapa, se definen los objetivos de planificación, que deben estar relacionados con la aptitud del territorio y la conservación de recursos naturales. En la segunda etapa, se realiza un inventario del entorno biofísico y socioeconómico, que consiste fundamentalmente en la recolección de información secundaria, empleando datos primarios para subsanar las deficiencias encontradas en las fuentes existentes.

En la tercera etapa, de validación de factores, se interpretan y se valoran los componentes de las dimensiones del desarrollo referidas, considerando los objetivos planteados, la aptitud del territorio, los recursos naturales disponibles y el impacto en el medio debido a las actividades humanas y a los fenómenos naturales. Por último, en la etapa de generación de alternativas se presentan y se evalúan las propuestas concretas para ocupar racionalmente el territorio mediante el uso y el manejo sostenible de los recursos naturales. Las etapas de inventario y valoración se conocen como diagnóstico, mientras que la etapa de generación y evaluación de alternativas corresponde a la formulación.

Precisamente, con el objetivo de llevar estos esfuerzos de planificación ambiental regional a las comunidades y a los diferentes ámbitos de actuación en los que se pueden desarrollar, existen también los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomcas). Como instrumentos, permiten realizar la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca, proceso en el que participa la población que habita en el territorio, conducente al buen uso y el manejo de tales recursos (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Como principales objetivos de los Pomcas se encuentran: a) evitar nuevas condiciones de riesgo en la cuenca, b) garantizar una ocupación del territorio en forma segura y c) fomentar la protección, la conservación, y el uso y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables. Por este motivo, es necesario contar con todos los actores que puedan participar en el ordenamiento de cuencas, ya que se busca aplicar criterios técnicos, procedimientos y metodologías reconocidas y validadas que orienten la caracterización, el análisis situacional, la síntesis ambiental y la gestión del riesgo en la cuenca de ordenación (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Uno de los principales intereses de la realización de estos Pomcas es la priorización de cuencas hidrográficas, lo cual implica proporcionar a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) los criterios de priorización que les permitan establecer el orden en el que las cuencas hidrográficas en el área de su jurisdicción deben iniciar los Pomcas. Este modelo de priorización toma información con base en insumos técnicos suministrados por el Ideam concernientes a componentes, factores y parámetros, así como en resultados de talleres de expertos ejecutados por autoridades ambientales.

Para el manejo y la ordenación de una cuenca hidrográfica, se necesitan obtener datos climáticos que permitan determinar regímenes de lluvia, comportamientos prospectivos del clima y análisis relacionados con la variabilidad climática de la cuenca, lo cual sirve para verificar zonas de recarga de los cuerpos hídricos, su comportamiento en el tiempo y cómo se relacionan sus cauces con otros. De esta manera, el componente climático, la identificación de puntos de cambio en series de precipitación y la homogenización de estas mismas series aportan datos muy valiosos y consistentes para definir aspectos de ordenación y manejo de cuencas. Estos esfuerzos, sumados a la participación de actores y entidades ambientales, permiten la implementación de los Pomcas a escala regional y nacional.

A estas iniciativas de organización del territorio se suman herramientas como los Planes Estratégicos Metropolitanos de Ordenamiento Territorial (Pemot), como el caso de estudio para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Amva), experiencia del Instituto de Estudios Urbanos (Universidad Nacional, 2019). Los Pemot están dirigidos a ordenar y administrar las instituciones y los municipios que se encuentran dentro de una misma área metropolitana de acuerdo con la Ley 1625 de 2013, con el fin de asegurar la adopción de los POT. Esta herramienta ha establecido un enfoque metropolitano en el que se deberán formular e implementar POT en todos los municipios, instituciones que puedan integrar esta área común, llevando al

cumplimiento de obras, gestión de servicios públicos, ordenación del territorio, e incremento y desarrollo de potencialidades económicas y territoriales, todo enmarcado en la región en la que se pueda desarrollar.

Así mismo, existen diferentes orientaciones dentro de la ordenación del territorio llevadas a cabo por diferentes instrumentos institucionales, tales como el Sistema Nacional Ambiental (Sina), el cual crea departamentos enfocados en ordenamiento territorial, y promueve la organización de espacios y mecanismos para fomentar la coordinación, el fortalecimiento, la articulación y la mutua cooperación de las entidades que integran el Sina. Es de vital importancia dado que, en medio de su quehacer, solicita a las autoridades y demás entidades gubernamentales del sector ambiental y de desarrollo sostenible información necesaria para formular y ejecutar políticas ambientales, y evaluar y seguir el cumplimiento de programas y proyectos de ordenamiento territorial en el país.

También hay mecanismos que permiten la descentralización de la actividad administrativa de las diferentes regiones y actores ambientales dentro de los municipios. Instrumentos como las Regiones Administrativas y de Planificación (RAP) (Presidencia de la República, 2019) pueden definirse como alianzas establecidas entre diferentes regiones o departamentos para conseguir objetivos comunes de desarrollo territorial, haciendo un paralelo con los planes estratégicos metropolitanos al estar enfocados en la región. En estas alianzas, se puede encontrar la explotación de territorios conjuntos entre departamentos y regiones (parques naturales) y sus recursos naturales compartidos, la creación de negocios con infraestructura común, y los proyectos de desarrollo y ordenamiento territorial, entre muchas otras posibilidades.

Una vez establecidas en los diferentes territorios, estas alianzas no implicarán necesariamente distribuir los diferentes departamentos en una sola región, pero sí permitirán que una vez alcanzado este desarrollo se pueda impulsar la creación e implementación de las RET (Región Entidad Territorial), proceso en el que sí se consolidarían cambios administrativos enfocados en el desarrollo y el adecuado ordenamiento del territorio, con un enfoque ambiental y de crecimiento en el marco del desarrollo sostenible.

Por último, existen entidades gubernamentales que apoyan e impulsan precisamente estos esfuerzos de ordenación. Es el caso del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac), que constituye un componente técnico de apoyo encaminando su quehacer en la producción, investigación, reglamentación, disposición y divulgación de información cartográfica, agrológica, catastral, entre otras, como insumo

para la gestión técnica del ordenamiento y conocimiento de las regiones y su territorio. Entre sus principales funciones está: asesoría técnica a entes territoriales en procesos de planeación y ordenamiento territorial; brindar información de calidad cartográfica precisa y consistente para los procesos de planeación del territorio; el diseño y la divulgación de estudios y metodologías de ordenamiento territorial; capacitaciones y participación en procesos de ordenamiento territorial (comisiones). A su vez, incluye ejercicios regionales de ordenamiento territorial para el caso del departamento del Meta y de la región de Montes de María (Igac et al., 2010a, 2010b), y las recomendaciones de la Procuraduría General de la Nación (PGN) y el Igac mediante Circular 007 de 2016 proponiendo un decálogo para el ordenamiento territorial (PGN e Igac, 2016).

De igual forma, es importante reconocer los aportes institucionales en este contexto de ordenamiento territorial, entre ellos: i) el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2014) con análisis departamentales de ordenamiento territorial, integrando aportes de la UPRA, experiencias de Antioquia, Cundinamarca y Santander, y el estudio de caso internacional de España; y ii) el Ministerio de Ambiente con insumos relacionados con incorporación de la prevención y reducción de riesgos en los procesos de ordenamiento territorial (MAVDT, 2005), y con aportes al ordenamiento ambiental territorial.

De tal manera, se han ofrecido orientaciones a las autoridades ambientales para la definición y actualización de los determinantes ambientales y su incorporación en los POT municipal y distrital (MADS, 2016), elementos ofrecidos por la Dirección General de Ordenamiento Ambiental Territorial y la Coordinación del Sina, y por aportes de las entidades adscritas al Ministerio de Ambiente: el Ideam, el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John von Neumann, y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis.

En síntesis, estos avances institucionales contribuyen a complementar y a fortalecer el componente de los análisis de la variabilidad climática y su integración a los POT, así como la perspectiva de los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo vinculados con la ocurrencia de valores extremos de precipitación y alteraciones de los volúmenes normales de precipitación ante la ocurrencia de eventos como El Niño y La Niña (Pabón y Montealegre, 2017; Universidad Nacional e Ideam, 2018).

2.3 Niveles, actores e instrumentos de la planificación ambiental

El proceso de planificación ambiental comprende varias escalas (de conformidad con las competencias de las entidades territoriales involucradas) que corresponden al ámbito nacional, regional y local. Este hecho implica la existencia de políticas para el manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales, la ocupación del territorio y la ejecución de planes y proyectos que afectan entidades en más de un nivel.

El desconocimiento de las implicaciones de la intervención de cada entidad en el proceso de planificación ambiental y su accionar individual, aislado e inconexo no permite lograr una integralidad en los planes y proyectos planteados en cada nivel, ignorando la realidad del territorio. Ante esta problemática, el enfoque de planificación urbano-regional, presentado en el Sistema de Gestión Ambiental Municipal (Sigam), propone considerar los efectos de las actuaciones territoriales de una entidad en cada uno de los niveles para lograr una coherencia de estas actuaciones en un esquema de planificación integral.

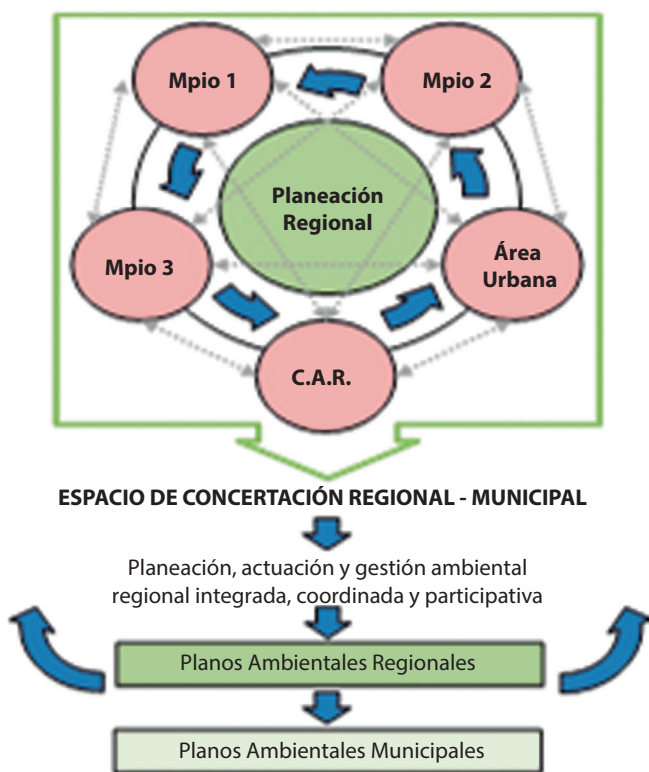
Como ámbito propicio para lograr este fin, se plantea la conformación de un espacio de concertación regional-municipal (Figura 2.4), donde los actores regionales y locales partícipes tienen un peso fundamental en la toma de decisiones de planificación, dado que afectan de manera singular a cada una de las partes. Este espacio es el mecanismo para conciliar y armonizar planteamientos individuales con una visión construida colectivamente, a partir de la cual se definen objetivos, metas, políticas, estrategias, programas y proyectos concertados entre entidades en diferentes escalas territoriales.

El enfoque descrito se basa entonces en la formulación conjunta, concertada y convalidada entre los actores en cada nivel territorial de una visión ambiental y territorial común, de forma que exista coherencia entre las actuaciones nacionales, regionales y locales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Los actores de orden nacional son los encargados de dar los lineamientos básicos para la planificación ambiental mediante la definición de políticas que determinan las directrices a seguir en cada escala territorial. Entre estos actores se incluyen los ministerios e institutos descentralizados de orden nacional que conforman el Sina (Ley 99 de 1993).

Los actores regionales están representados por la corporación autónoma y el departamento, los cuales orientan la planificación del desarrollo sostenible en el área de su jurisdicción mediante la identificación, definición, priorización y actuación sobre problemáticas comunes a varios municipios. Por último, los actores

locales, representados por el municipio, acuerdan las acciones necesarias para controlar, mitigar, prevenir y compensar los impactos causados por el uso y manejo de sus recursos naturales, para lo cual dictan normas y estatutos que atienden las disposiciones legales de carácter superior (Figura 2.5). Adicionalmente, en cada nivel territorial se cuenta con la participación de actores sociales, económicos y comunitarios que aportan al proceso de toma de decisiones, tales como los gremios productivos, la sociedad civil, la academia y las organizaciones no gubernamentales, entre otros.

Figura 2.4. Concertación para la planificación ambiental regional

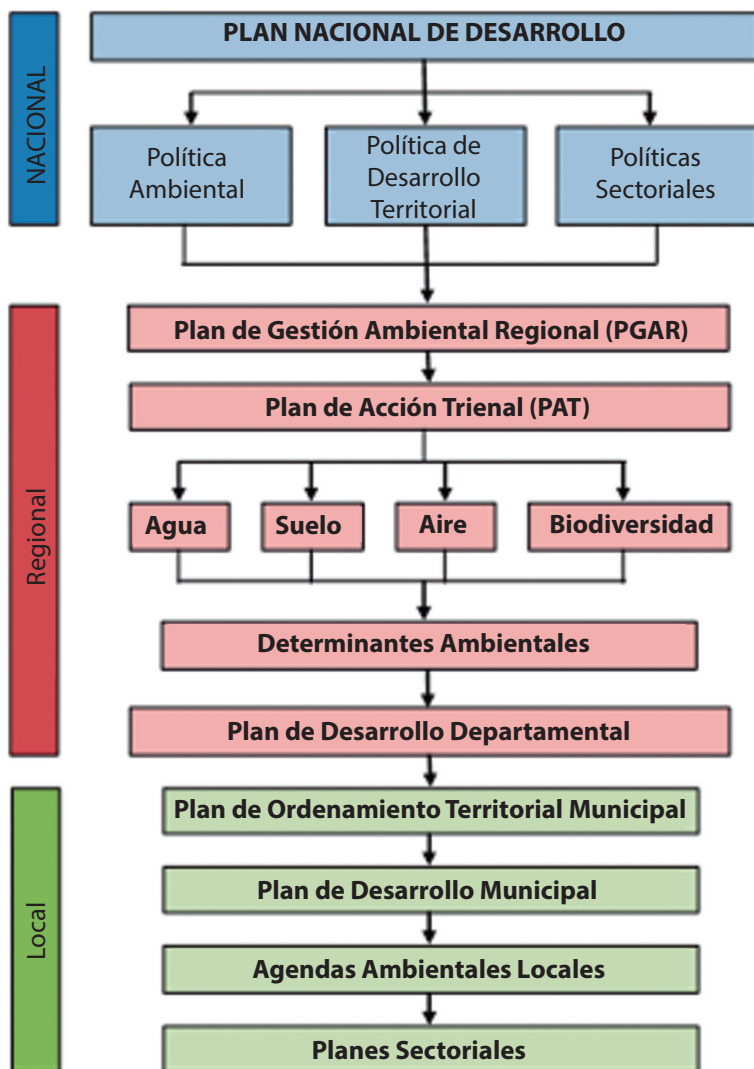


Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2002)

La planificación ambiental regional cuenta además con instrumentos para cada uno de los niveles territoriales (denominados planes de manejo), que contienen consideraciones de tipo ambiental y propuestas de acción orientadas hacia un desarrollo más sostenible. Estos instrumentos son actos expedidos por las entidades que, conforme a la ley, contienen decisiones administrativas referidas a la planeación y el

ordenamiento ambiental, en las que definen los programas, los proyectos y las actuaciones de orden sectorial o territorial, los recursos y tiempos destinados para su ejecución y los demás aspectos que estipule la legislación (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Figura 2.5. Niveles e instrumentos de planificación ambiental



Fuente: adaptado de Auditoría General de la República (2010)

Estos instrumentos incluyen el Plan Nacional de Desarrollo y políticas ambientales, de desarrollo territorial y sectorial. A escala regional, los Planes de Gestión Ambiental Regional (PGAR) y los Planes de Acción Trienal (PAT) permiten a las CAR orientar su gestión e integrar las determinantes ambientales a considerar por todos los actores territoriales, con el fin de que el proceso de desarrollo y ordenamiento del territorio avance hacia la sostenibilidad (Decreto 1200 de 2004).

Un instrumento común a los ámbitos regional y local son los planes de desarrollo departamental y municipal, los cuales se formulan para cada periodo de gobierno y establecen los objetivos de desarrollo, las metas a alcanzar y los medios y recursos técnicos, humanos y financieros disponibles y necesarios para su cumplimiento. En él se definen las líneas que orientan la actuación de la Administración, además de los programas y los proyectos específicos, su priorización y la asignación de recursos (Ley 152 de 1994).

A escala local, se cuenta también con los POT, los planes sectoriales y las agendas ambientales locales. Los POT tienen por objeto complementar la planificación económica y social con la dimensión territorial, así como racionalizar las intervenciones sobre el territorio, orientar su desarrollo y lograr un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, mediante la definición de estrategias de uso, ocupación y manejo del suelo y la definición de programas y proyectos que concreten estos propósitos (Ley 388 de 1997).

A través de sus dependencias, los municipios también formulan e implementan planes sectoriales, en concordancia con el plan de desarrollo, entre los cuales se encuentran el plan de inversiones, el plan ambiental, el plan educativo, los planes modales de transporte, el plan de salud, y el plan de agua potable y saneamiento básico, entre otros. Por último, la agenda ambiental local permite orientar el desarrollo territorial desde la dimensión ambiental, mediante la recopilación, síntesis y espacialización de la información del entorno municipal contenida en los diferentes planes, a fin de identificar y priorizar las oportunidades, las problemáticas y los requerimientos en materia ambiental, y de puntualizar la visión, los objetivos y los proyectos ambientales que se traducen en un plan operativo con asignación temporal y presupuestal (CNUMAD, 1992).

Cabe resaltar que debe existir una coherencia entre los distintos instrumentos enunciados: desde la formulación de los objetivos y las políticas ambientales, hasta la definición de programas y proyectos, y la respectiva asignación de recursos. Esto es posible debido a la existencia de la dimensión ambiental en cada uno de los planes, toda vez que las interrelaciones de los componentes del desarrollo sostenible

se ven afectadas por cualquier actuación que se pretenda realizar en el territorio (Zúñiga, 2000).

En este sentido, los instrumentos mencionados pretenden incorporar la dimensión ambiental en la planificación del desarrollo sostenible, con lo que permiten predecir y estimar la afectación que un programa o proyecto produce en el entorno, así como prevenir las consecuencias de las acciones generadas por este. Debido a lo anterior, en estos instrumentos se determinan espacialmente las áreas de amenazas y riesgos naturales, y la estructura ecológica principal, las áreas físicas donde se interpretan los bienes y los servicios ambientales (Zúñiga, 2011).

2.4 Uso de información climática en ordenamiento territorial y planificación ambiental

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) considera la información climática como un instrumento para el ordenamiento del territorio y la reducción de riesgos de desastres naturales en el marco de la planificación ambiental regional, ya que las condiciones meteorológicas y climáticas extremas afectan el desarrollo socioeconómico de las comunidades. En este contexto, la generación de información climática, con base en series de tiempo, posibilita su utilización en estudios ambientales (Auer et al., 2005).

Existe la necesidad de contar con información climática para la planificación local y regional, dado que esta es el insumo fundamental para la administración de recursos y riesgos relacionados con las variaciones y los cambios en el clima (Pacheco, 2009). En tal sentido, el objetivo final de la investigación en homogenización de series de tiempo de datos climáticos es establecer productos de información que puedan ser actualizados y usados en procedimientos operacionales a nivel local (Cao y Yan, 2012).

La información climática es usada no solo en el estudio de la distribución de la variabilidad del clima, sino también en el análisis de las afectaciones causadas por el cambio climático en la escala regional. Sin embargo, esta información por lo general carece de un proceso de control de calidad, homogeneidad y análisis temporal y espacial que garantice su utilidad para la generación de productos operativos y de investigación (Vásquez, 2006).

En este aspecto, autores como Brunet (2010) y Pacheco (2009), y documentos como el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 (DNP, 2011) y la Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Ideam, 2010), han resaltado la importancia de contar

con información climática confiable para detectar y atribuir eventos al cambio climático.

La revisión de los instrumentos de planificación territorial mostrados en el apartado anterior permite precisar que existen requerimientos de información relevante para la toma de decisiones de carácter ambiental. En Colombia, se presentan problemáticas relacionadas con la dificultad de acceso y manejo deficiente de esta información, lo cual es un impedimento para lograr una visión apropiada del desarrollo sostenible en el país.

Las dificultades nombradas están relacionadas con una débil cultura en el uso de información ambiental como base para procesos de planificación (Orozco, 2009). Esta debilidad se atribuye a factores como: i) multiplicidad de entidades con responsabilidad sobre la generación y el manejo de información, ii) difícil acceso en razón de su heterogeneidad y dispersión, iii) deficiente sistematización en formatos ajenos a las demandas tecnológicas actuales y iv) carencia de mecanismos para actualizar la información existente.

Los problemas planteados limitan la elaboración de la línea base que debe sustentar los estudios de planificación ambiental y territorial, particularmente en la etapa de diagnóstico, la cual incluye un análisis integral de los componentes sociales, económicos y biofísicos que determinan el estado de los recursos naturales y del entorno en una región (Zúñiga, 2000). Estos aspectos determinan la poca utilidad práctica de la información básica y temática disponible, ya que esta no satisface los requerimientos de los procesos de toma de decisiones (Ideam, 2002).

A escala nacional, la información climática se considera parte de la dimensión ambiental y del componente biofísico en el diagnóstico de los POT (Decreto 879 de 1988; Zúñiga, 2000). Esta información se usa como insumo en la formulación de posibles usos del territorio y en el establecimiento de restricciones o prioridades para estos usos, de modo que sean los más adecuados a las características del medio y a la evaluación de las posibles incidencias de factores ambientales, como el clima, en el desarrollo de planes, programas y proyectos en el medio natural a nivel regional (Decreto 1200 de 2004; Pacheco, 2009), tanto en entidades territoriales (Ley 388 de 1997), como en cuencas hidrográficas (Decreto 1640 de 2012) del país.

De igual forma, la información generada a partir de series de datos climáticos se usa para caracterizar las áreas de influencia en la formulación de líneas base ambientales en la elaboración de estudios de impacto ambiental, planes de manejo ambiental y diagnósticos ambientales de alternativas en el desarrollo de proyectos

que requieran licenciamiento ambiental en una región (Decreto 2820 de 2010 y Resolución 1255 de 2006).

A continuación, con base en los marcos teóricos referenciados, se pretende mostrar cómo la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en la región climática del Bajo Magdalena es un insumo para la planificación ambiental territorial y en particular para el ordenamiento ambiental del territorio, siendo este el tema central de la presente publicación.

2.5 Propuesta de integración de resultados de la homogenización de series mensuales de precipitación en el proceso de planificación ambiental

Los resultados del procesamiento estadístico y la homogenización de series mensuales de precipitación en la región climática del Bajo Magdalena permiten realizar una descripción de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la zona a partir de bases de datos depuradas y cartografía temática, así como ajustar el proceso metodológico utilizado considerando las ventajas y dificultades encontradas en su aplicación.

Al establecer las necesidades de uso de información climática (en particular de lluvias) de las entidades involucradas en procesos de planificación en diferentes niveles de actuación territorial, se encuentra que la precipitación es una variable determinante para la ocurrencia de inundaciones en la región que limita el desarrollo de actividades productivas. A continuación, se desarrolla una propuesta de integración de los productos logrados en procesos de toma de decisiones en el marco de la planificación ambiental regional.

Esta propuesta se basa en la interacción entre los componentes meteorológico, estadístico y de planificación ambiental y las manifestaciones de estos en el territorio regional (Figura 2.6). El componente meteorológico define los procesos físicos y atmosféricos que determinan el clima en la región, mientras que el componente estadístico contribuye al análisis, el procesamiento y el control de la calidad de las series de tiempo en las cuales se registran las observaciones y mediciones de las variables climáticas.

Figura 2.6. Aporte al proceso de toma de decisiones

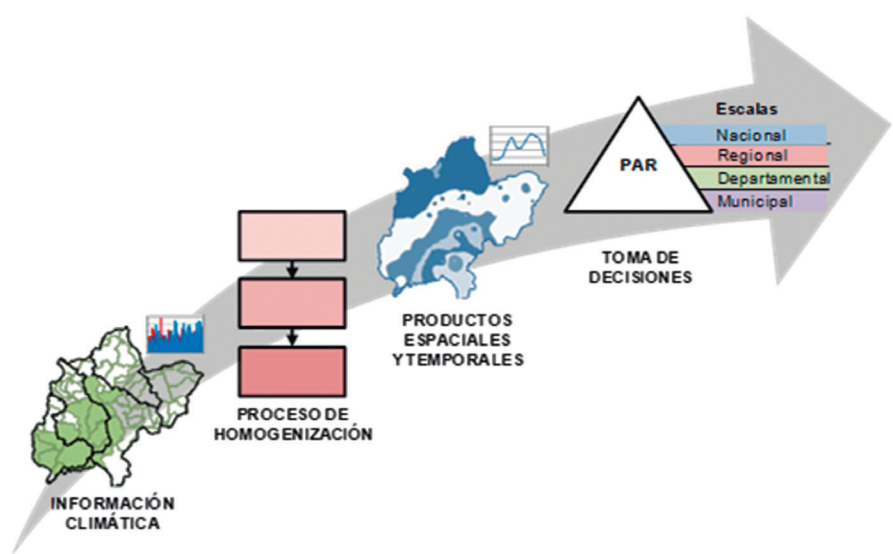


Fuente: Barrios (2013)

Este último componente permite entonces la depuración de la información mediante tratamiento estadístico para eliminar las heterogeneidades causadas por factores ajenos al clima regional, como base para la elaboración de productos operativos, entre los que se incluyen bases de datos y cartografía temática. Finalmente, el componente de planificación hace uso de estos productos como herramienta en el proceso de toma de decisiones ambientales para diferentes niveles de actuación, sabiendo que existe un conocimiento fiable del territorio y sus características biofísicas.

En este contexto, el descrito esquema de interacción entre componentes aporta a la mejora del proceso de toma de decisiones, ya que a los actores involucrados en la planificación se les ofrecen productos actualizables y de interpretación sencilla para la adopción de criterios técnicos. Estos productos se presentan en escalas útiles para la actuación en los niveles nacional, regional y local, dado que se articulan a los planes de manejo ambiental y de ordenamiento del territorio actualmente definidos por la normatividad vigente en el país.

Figura 2.7. Diagrama de propuesta de integración de resultados



Fuente: Barrios (2013)

La propuesta de integración de resultados consta de cuatro actividades bien definidas (Figura 2.7): i) recopilación y tabulación de información de precipitación en la región; ii) procesamiento estadístico, análisis y homogenización de series mensuales de precipitación; iii) elaboración de productos de variabilidad espacial y temporal de la precipitación a partir de bases de datos climáticos depuradas; y iv) adopción de criterios técnicos para el proceso de toma de decisiones con base en los productos obtenidos en el marco de la planificación ambiental regional.

Las actividades iniciales consisten en la recolección y organización de la información inicial que posteriormente será procesada siguiendo la metodología propuesta para el análisis estadístico y la homogenización de series mensuales de precipitación (segunda actividad) (ver Capítulo 1). La tercera actividad busca generar productos actualizables y de fácil interpretación a diversas escalas territoriales con base en información de calidad como insumo para la última etapa, en la cual las entidades involucradas en procesos de planificación finalmente harán uso de herramientas operativas para tomar decisiones sobre el territorio regional.

Para esta última actividad, se propone el uso de las fichas técnicas mostradas a continuación, en las que se especifica la utilidad de las bases de datos y la cartografía producto de la presente investigación en procesos de planificación y toma de decisiones ambientales, así como los actores y niveles territoriales a los que está dirigido su uso y los instrumentos en los cuales se insertan estos productos. La propuesta planteada se enmarca en la creación de bancos de datos y sistemas de información geográfica regional para la consulta de variables climáticas como herramienta de apoyo a estos procesos.

Cabe resaltar que esta propuesta no pretende reemplazar la visión actual de la planificación y el ordenamiento del territorio en su dimensión ambiental; por el contrario, busca ser un complemento que contribuya al mejoramiento de los procesos actuales. Dicha mejora está representada por varios factores: el primero de ellos es la ganancia en resolución temporal y espacial de los productos base para describir la variabilidad del clima regional, dada por los procedimientos estadísticos aplicados para el control de calidad de la información.

En segundo lugar, al incluir un componente de planificación ambiental del territorio en la propuesta, es posible definir de forma concreta el uso de diferentes productos depurados en las escalas nacional, regional y local. Esto permite utilizar un enfoque integrado de los diferentes niveles territoriales, aunque el uso de un producto en particular puede ser diferente en cada escala. Por último, la propuesta permite tener en cuenta no solo las actividades de planificación a cargo de las entidades territoriales, sino también las desarrolladas por los gremios productivos en función de objetivos económicos.

2.6 Descripción de resultados

El sur de la región Caribe colombiana se caracteriza por ser una zona de tierras bajas y planas, con ecosistemas de ciénaga y suministro de agua por parte de la confluencia de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. A nivel interanual, predomina en esta zona un régimen de lluvias monomodal, con una temporada seca marcada desde mediados de diciembre hasta principios de abril y una temporada lluviosa extensa con un patrón variable de pluviosidad, que incluye en algunas ocasiones un periodo seco de baja intensidad (denominado comúnmente “veranillo”) en los meses de junio y julio. En las zonas bajas de las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca, donde se ubica el área de estudio, se aprecia en sentido norte-sur que el veranillo tiende casi a desaparecer.

En la mayor parte del norte y el centro de la región Caribe, el régimen de variabilidad de la precipitación es bimodal y presenta grandes desviaciones frente al

comportamiento descrito en la parte sur. Debido a que la variabilidad climática en la región es uno de los principales factores limitantes del desarrollo económico y productivo, se analizó la distribución temporal y espacial de las lluvias con base en los resultados del proceso de homogenización.

El análisis de distribución temporal se realiza a nivel interanual, es decir, mediante la revisión del régimen de precipitación descrito por los promedios mensuales multianuales de cinco estaciones meteorológicas representativas de cada una de las subregiones hidrográficas en el área de estudio, así:

La estación 2502162 (Irán), ubicada en la subregión hidrográfica Arroyo Corozal, al norte del área de estudio, presenta un régimen bimodal débil con un valor promedio mensual multianual de 122,2 mm y un monto anual de 1466,2 mm. El periodo de mayor pluviosidad se presenta entre abril y noviembre con picos en los meses de mayo (178,3 mm) y septiembre (200,7 mm), mientras que los de menor concentración van desde diciembre hasta marzo con valores mínimos en los meses de enero y febrero (37,7-39,6 mm). Se presenta también un periodo de veranillo a mitad de año en los meses de junio y julio (115,2-115,5 mm).

La estación 2502026 (Rincón Hondo), ubicada en la subregión hidrográfica Bajo Cesar, al nororiente del área de estudio, presenta un régimen bimodal débil con un valor promedio mensual multianual de 191,7 mm y un monto anual de 2299,9 mm. El periodo de mayor pluviosidad se presenta entre abril y noviembre con picos en los meses de mayo (281,5 mm) y octubre (360,0 mm), mientras que los de menor concentración van desde diciembre hasta marzo con valores mínimos en los meses de enero y febrero (22,1-64,7 mm). Se presenta también un periodo de veranillo a mitad de año en los meses de junio y julio (165,2-175,9 mm).

La estación 2502053 (La Ilusión), ubicada en la subregión hidrográfica Bajo San Jorge-La Mojana, en el centro del área de estudio, presenta un régimen monomodal fuerte con un valor promedio mensual multianual de 232,8 mm y un monto anual de 2793,7 mm. El periodo de mayor pluviosidad se presenta entre abril y noviembre con picos en los meses de julio (376,7 mm) y agosto (400,1 mm), mientras que los de menor concentración van desde diciembre hasta marzo con valores mínimos en los meses de enero y febrero (30,5-39,2 mm). En esta localización, desaparece el periodo de veranillo que se presenta a mitad de año al norte de la región climática.

La estación 2502041 (La Candelaria), ubicada en la subregión hidrográfica Directos al Bajo Cauca-Ciénaga La Raya, al sur del área de estudio, presenta un régimen monomodal fuerte con un valor promedio mensual multianual de 320,2 mm y un monto anual de 3842,6 mm. El periodo de mayor pluviosidad se

presenta entre abril y noviembre con picos en los meses de julio (478,9 mm) y agosto (616,9 mm), mientras que los de menor concentración van desde diciembre hasta marzo con valores mínimos en los meses de enero y febrero (47,7-54,7 mm). En esta localización, desaparece el periodo de veranillo, que se presenta a mitad de año al norte de la región climática, y es reemplazado por una fase húmeda más marcada.

La estación 2502104 (Menchiquejo), ubicada en la subregión hidrográfica Directos al Bajo Magdalena, al occidente del área de estudio, presenta un régimen bimodal débil con un valor promedio mensual multianual de 155,8 mm y un monto anual de 1870,2 mm. El periodo de mayor pluviosidad se presenta entre abril y noviembre con picos en los meses de septiembre (263,6 mm) y octubre (303,1 mm), mientras que los de menor concentración van desde diciembre hasta marzo con valores mínimos en los meses de enero y febrero (20,5-32,0 mm). En esta localización, se presenta nuevamente el periodo de veranillo a mitad de año al norte de la región climática, con un volumen de 129,9 mm en el mes de julio.

Se observa que el régimen de precipitación en la región climática del Bajo Magdalena pasa de bimodal débil, con presencia de una época de veranillo a mitad de año, a monomodal fuerte, en sentido noroccidente-suroriente, y siempre se mantiene como rasgo característico una época seca marcada entre diciembre y abril.

Al nororiente de la región, se presentan valores de precipitación media mensual multianual entre 122,2 y 155,8 mm, y montos anuales totales entre 1466,2 y 1890,2 mm, con un gradiente de aumento hacia el sector suroccidental donde toman valores de 232,8 a 320,2 mm y de 2798,7 a 3842,6 mm, respectivamente. La época húmeda presenta volúmenes de lluvia máximos entre 200,7 y 360,0 mm al nororiente que aumentan hasta valores de 400,1 y 616,9 mm en la zona suroccidental; mientras que la época seca presenta pluviosidad con montos mínimos de 20,5 a 37,7 mm al nororiente que aumentan hasta precipitaciones del orden de 30,5 a 47,7 mm en el sector suroccidental.

Por su parte, el análisis de la distribución espacial de la lluvia en la región climática del Bajo Magdalena está basado en la elaboración de cartografía con base en los promedios mensuales y anuales a nivel multianual, de acuerdo con el enfoque tradicional de uso de información climática para planificación del territorio. No obstante, se propone el uso adicional de mapas de valores de anomalías promedio y alteraciones más probables de precipitación durante la ocurrencia de fenómenos típicos del ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur (ENOS). Los mapas basados en

promedios multianuales muestran isoyetas que representan la distribución espacial de la precipitación total anual o mensual.

Los mapas basados en anomalías promedio de precipitación durante la ocurrencia de fenómenos típicos representan áreas uniformes correspondientes a diferentes grados de variación de la lluvia en el área de estudio para condiciones normales, moderadas y extremas por encima o debajo de la normal climática en periodos de la fase cálida y fría del ciclo ENOS. A su vez, los mapas basados en alteraciones más probables de la precipitación muestran áreas de afectación uniformes para el comportamiento de la precipitación durante la fase del fenómeno analizado en cinco categorías de interpretación: deficitario severo, deficitario, normal, excesivo y excesivo severo.

A escala anual, el mapa 2.1 (Distribución espacial de la precipitación total anual. Promedios multianuales) muestra un gradiente de lluvias entre 500 y 5000 mm en la región climática que aumenta en sentido nororiente-suroccidente. Las menores precipitaciones (500-2500 mm) se presentan en las subregiones hidrográficas de Arroyo Corozal, Bajo Cesar, Directos al Bajo Magdalena y Bajo San Jorge-La Mojana, en los departamentos de Magdalena, Cesar, Córdoba y el sector norte de Bolívar y Sucre, y en los municipios de Magangué, Mompós, Sucre, San Benito Abad, San Marcos, Pueblo Nuevo, Buenavista, Planeta Rica y La Apartada. Así mismo, los valores más altos de lluvia (2500-5000 mm) se presentan en la subregión hidrográfica Directos al Bajo Cauca-Ciénaga La Raya, en los departamentos de Antioquia y la zona sur de Bolívar y Sucre, y en los municipios de Majagual, Achí, Guaranda, San Jacinto del Cauca, Ayapel, Caucasia y Nechí. Este patrón de distribución espacial se mantiene para los valores mensuales en la región y varía únicamente el volumen de lluvia registrado.

Hay varios trabajos previos realizados por Corpoica que complementan la descripción climatológica de la zona de estudio respecto a la precipitación y hay datos generales que sirven como insumo para el presente proyecto. Por ejemplo, Terán (1998) nos presenta que la zona corresponde a un clima cálido y húmedo, con una altitud media dentro de la región de La Mojana que oscila entre 10 y 240 metros sobre el nivel del mar. El régimen climático del suelo se considera como údico e isohipertérmico, en el cual la sección de control no permanece seca por 90 días consecutivos durante un año. A su vez, para 1998 la región registraba valores de precipitación promedio de 2066 mm en la parte central norte en cercanías del caño Mojana, reportados con registros climáticos de veintiún años en la estación Isla del Coco, y registraba valores de precipitación promedio de 4689 mm en el suroccidente de la región en cercanías del río Cauca, en el municipio de Achí, reportada

por la estación Caimital. La precipitación promedio general de la zona es de 2990 mm al año (promedios multianuales de catorce estaciones dentro de la región) (Terán, 1998).

Así mismo, una de las principales limitantes de la región son los excesos de agua que contribuyen a la inundación de grandes extensiones de tierra entre mayo y noviembre (Terán, 1998), como se ha mencionado previamente.

La época seca en la región, representada por los mapas 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 (distribución espacial de la precipitación total diciembre, enero, febrero y marzo, promedios multianuales), muestra el gradiente de precipitación con valores iniciales de hasta 250 mm para diciembre, que disminuye hasta volúmenes de lluvia de máximo 90 mm en enero y febrero para aumentar ligeramente en marzo hasta los 110 mm.

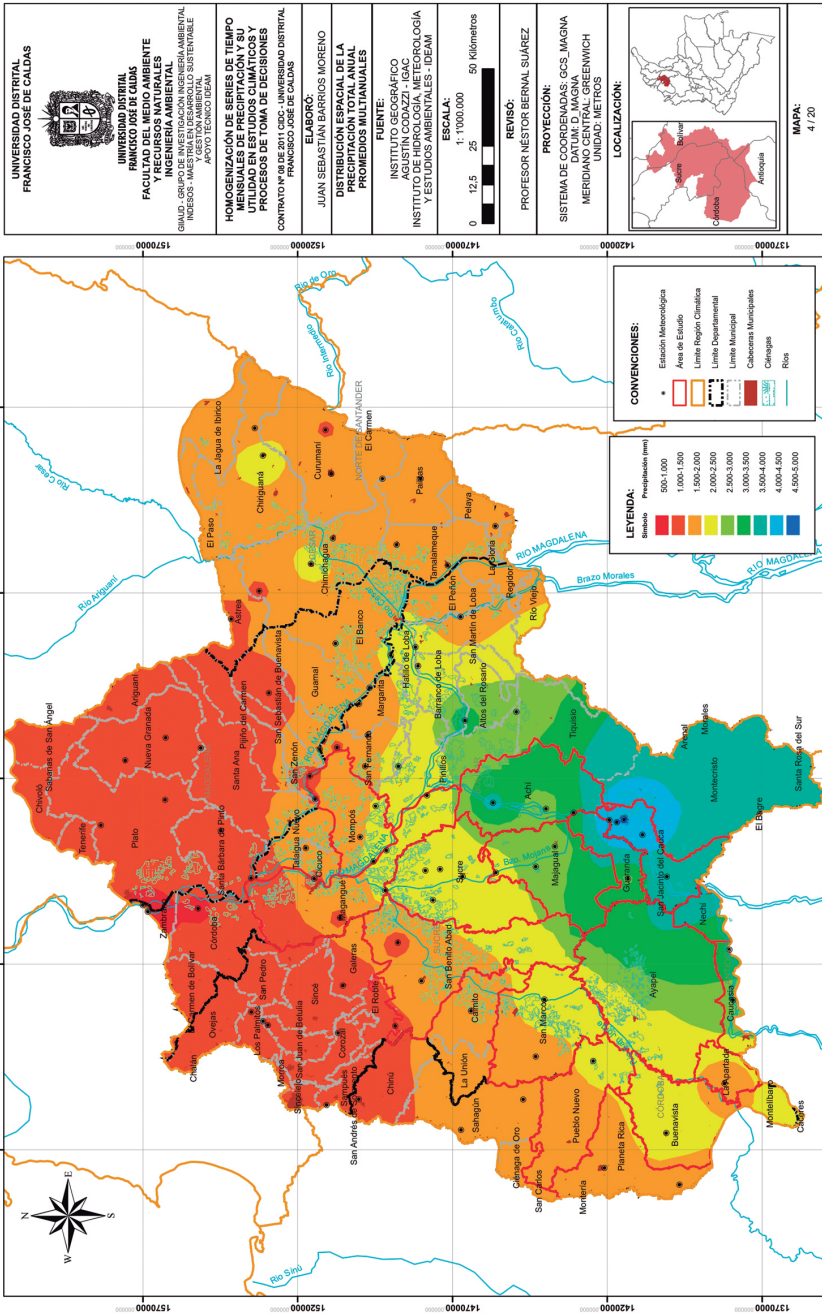
La estación húmeda, que comprende una época lluviosa fuerte en cada semestre, separada por el periodo de veranillo a mitad de año, presenta un comportamiento variable. La época lluviosa del primer semestre, visualizada en los mapas 2.6 y 2.7 (distribución espacial de la precipitación total abril y mayo, promedios multianuales), es la menos fuerte, pues cuenta con registros de pluviosidad entre 50 y 350 mm en abril que aumentan hasta 550 mm en mayo.

El periodo de veranillo a mitad de año, mostrado en los mapas 2.8 y 2.9 (distribución espacial de la precipitación total junio y julio, promedios multianuales), mantiene el mismo rango de precipitación en la región (entre 50 y 550 mm); sin embargo, los rangos de precipitación de menor magnitud (entre 50 y 250 mm) se distribuyen en un área mayor al norte de la región respecto a la del mes anterior.

Por último, la época lluviosa más fuerte en el segundo semestre del año, visualizada en los mapas 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 (distribución espacial de la precipitación total agosto, septiembre, octubre y noviembre, promedios multianuales), muestra un aumento en los rangos de pluviosidad de hasta 650 mm en agosto y 700 mm en octubre. Estos meses en particular muestran una distribución espacial en la cual los rangos con mayores valores de precipitación, es decir, entre 350 y 700 mm, se localizan en un área extensa del sector sur de la región de estudio.

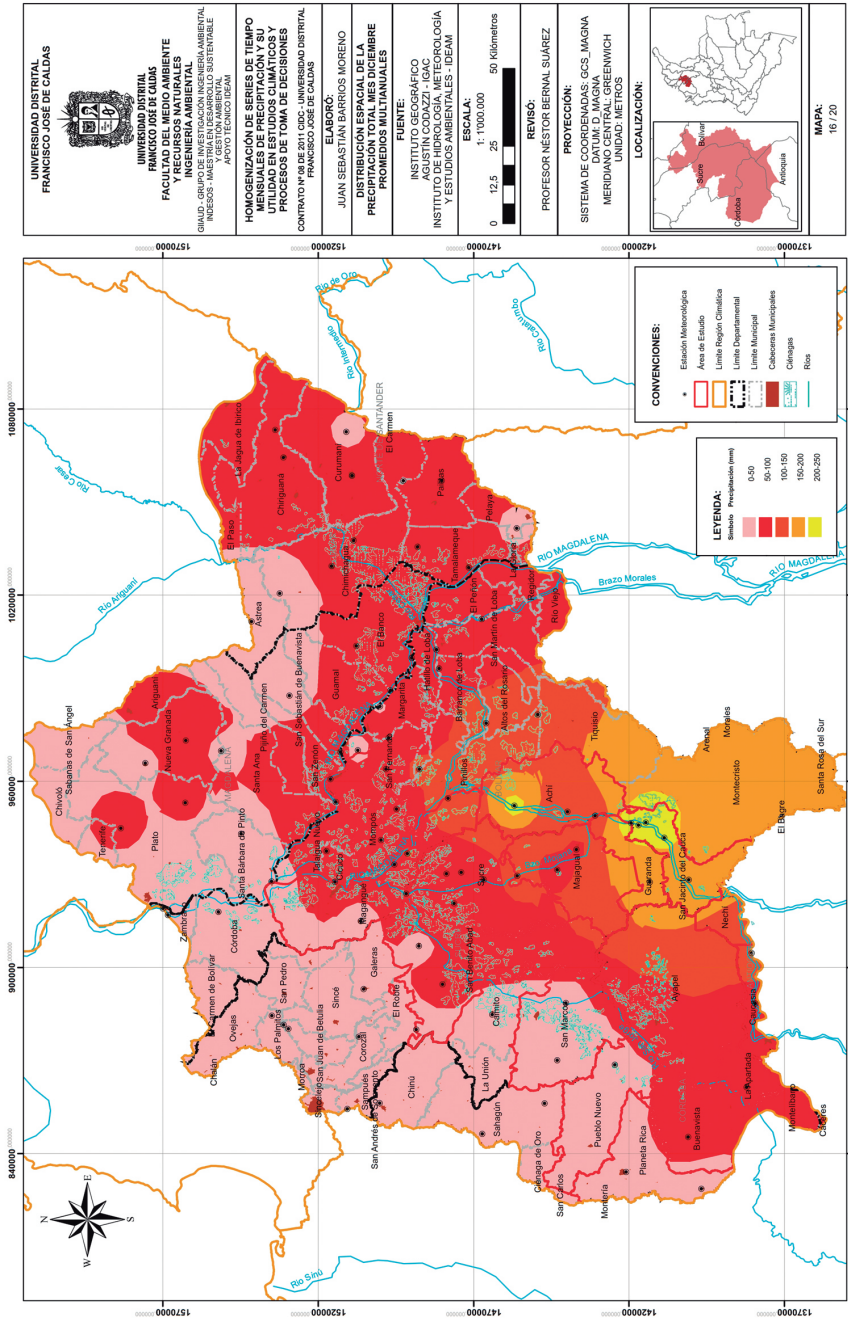
Durante la ocurrencia del fenómeno típico El Niño en la región de estudio (Mapa 2.14. Anomalías promedio de precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico El Niño, y Mapa 2.15. Alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico El Niño), se observan anomalías en el sector central y en algunas áreas al oriente (municipios de Achí, Altos del Rosario y Barranco de Loba).

Mapa 2.1. Distribución espacial de la precipitación total anual. Promedios multianuales



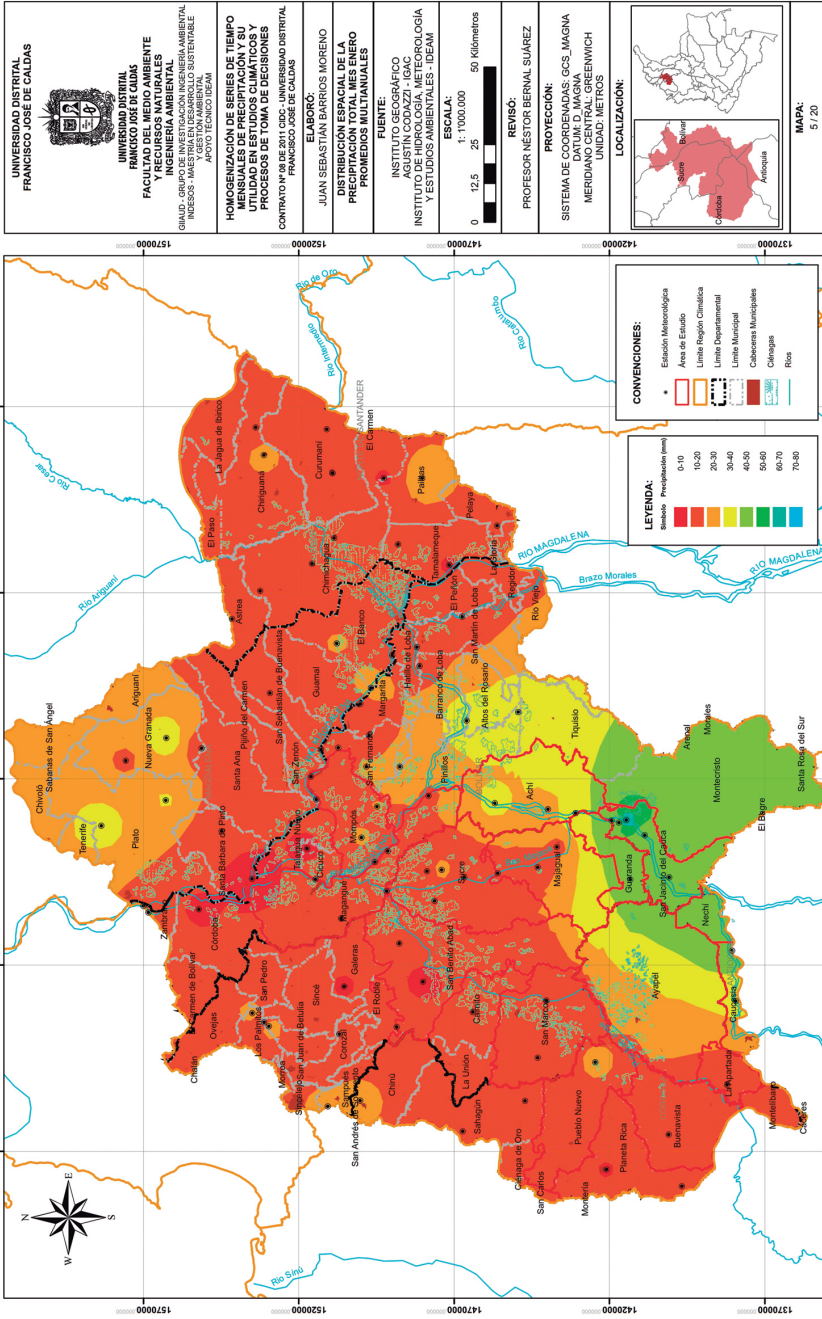
Fuente: elaboración propia

Mapa 2.2. Distribución espacial de la precipitación total en diciembre. Promedios multianuales



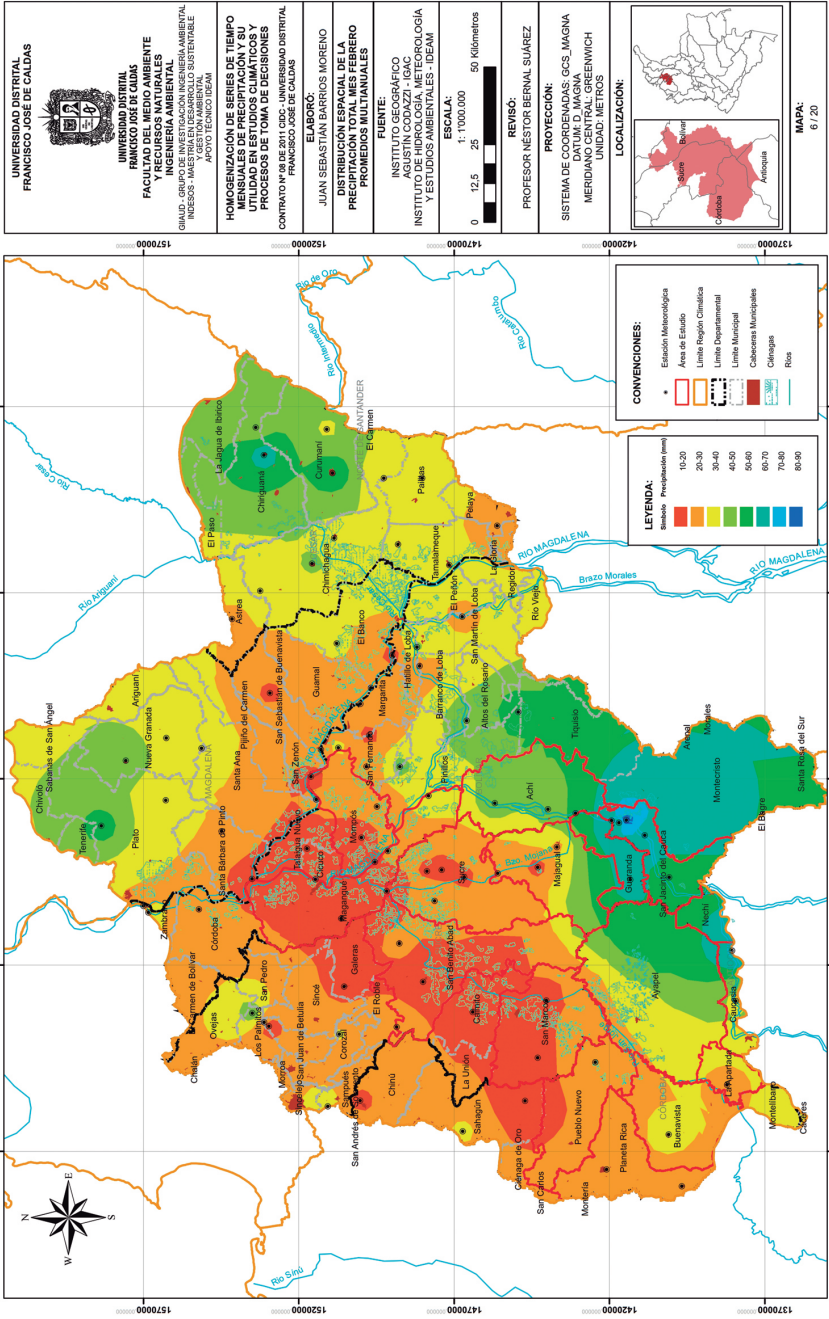
Fuente: elaboración propia

Mapa 2.3. Distribución espacial de la precipitación total en enero. Promedios multianuales



Fuente: elaboración propia

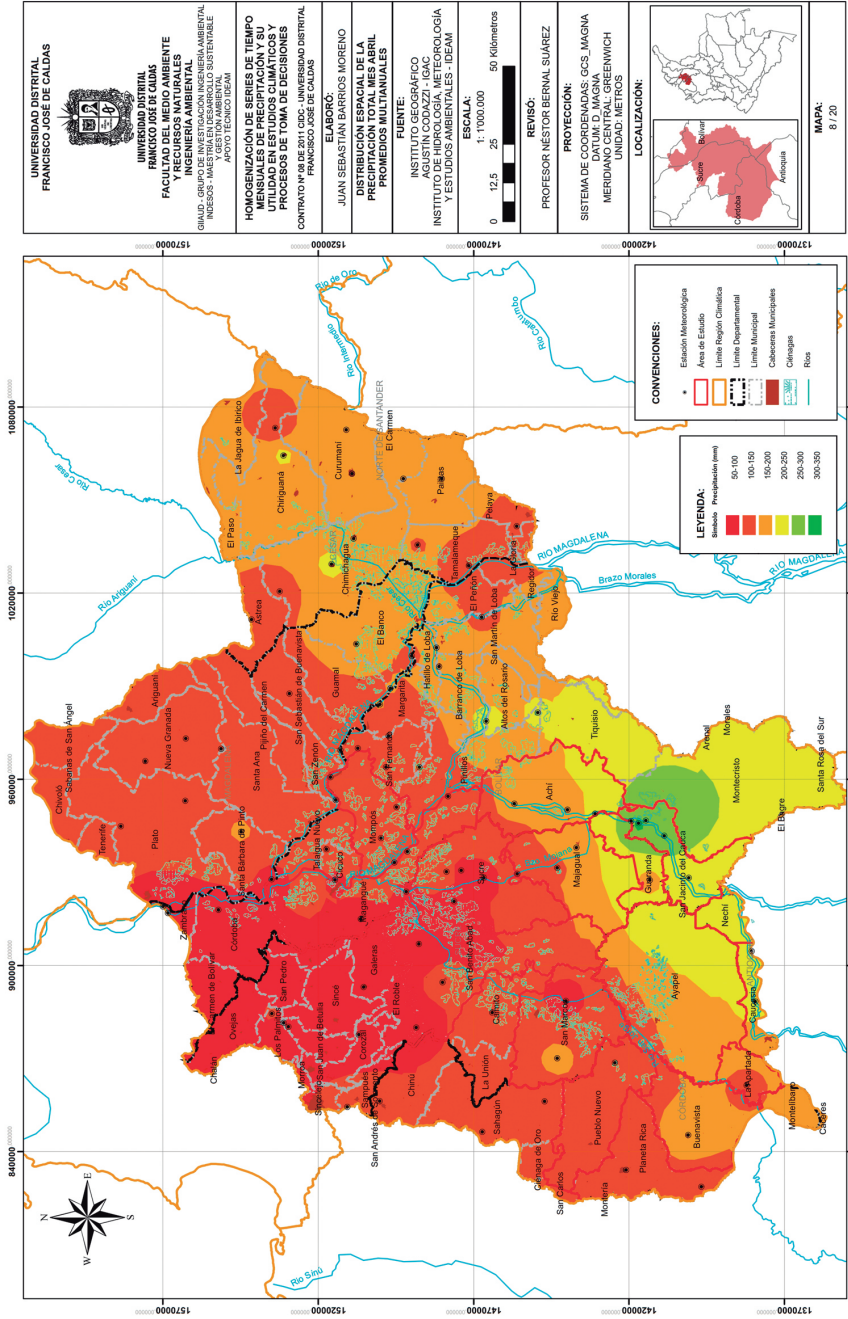
Mapa 2.4. Distribución espacial de la precipitación en febrero. Promedios multianuales



Fuente: elaboración propia



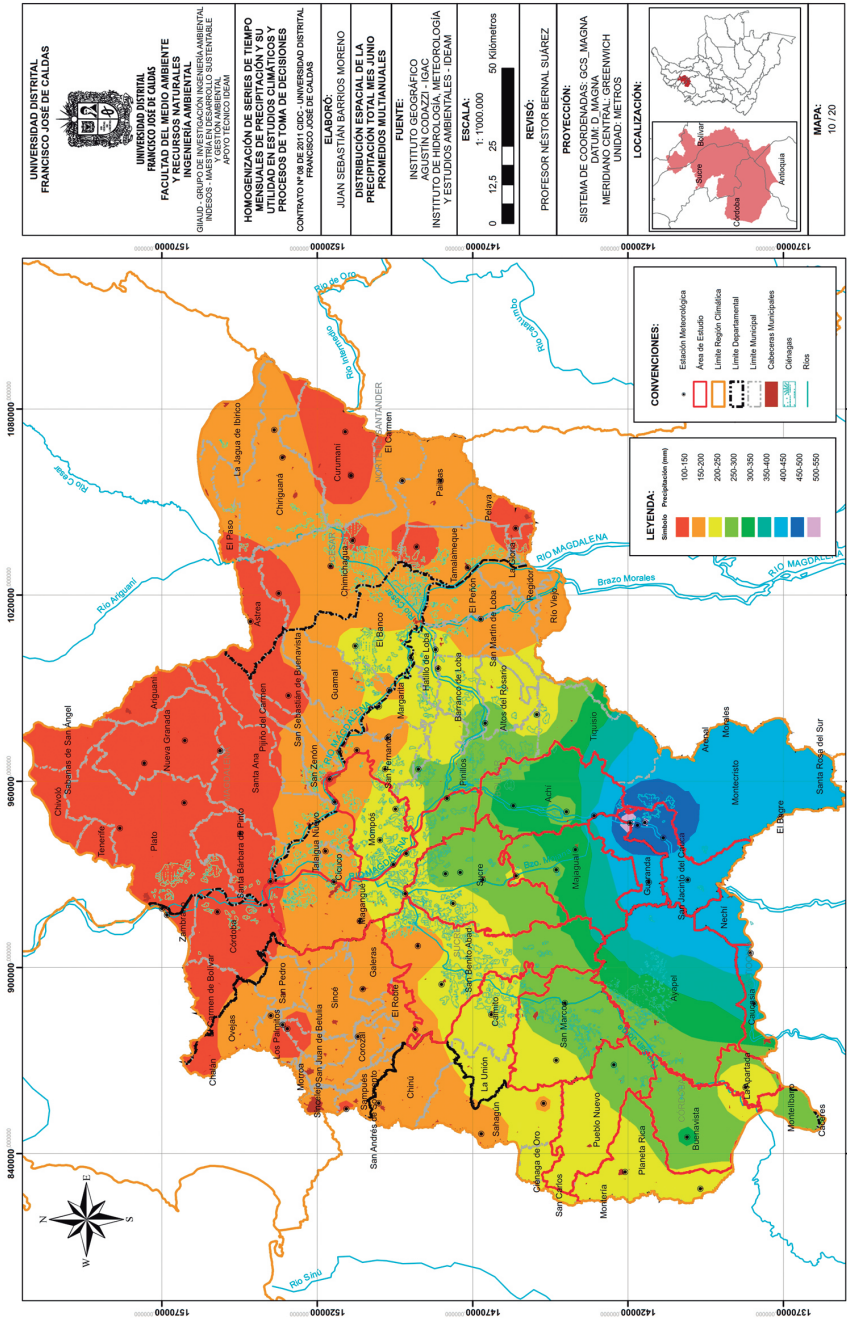
Mapa 2.6. Distribución espacial de la precipitación en abril. Promedios multianuales



Fuente: elaboración propia



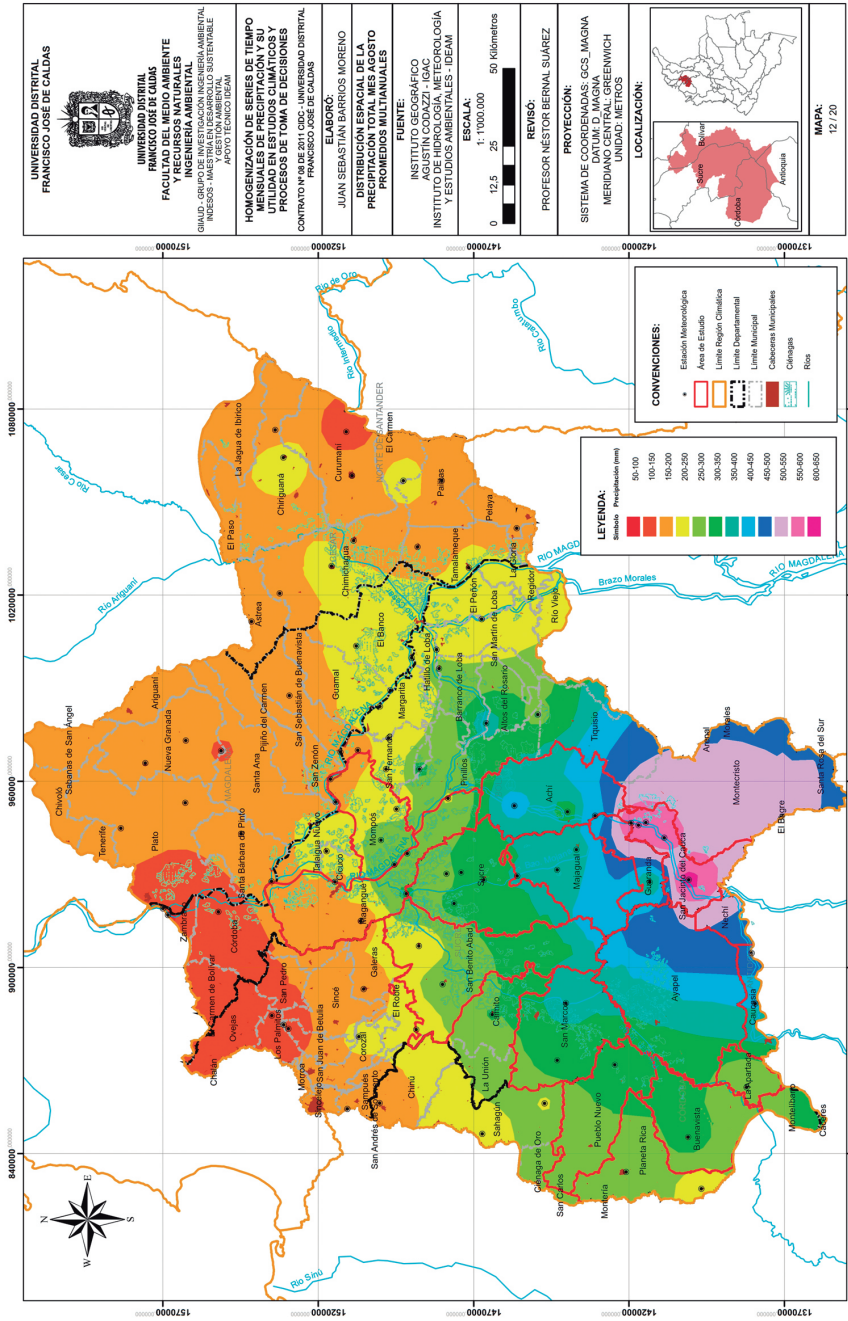
Mapa 2.8. Distribución espacial de la precipitación en junio. Promedios multianuales



Fuente: elaboración propia

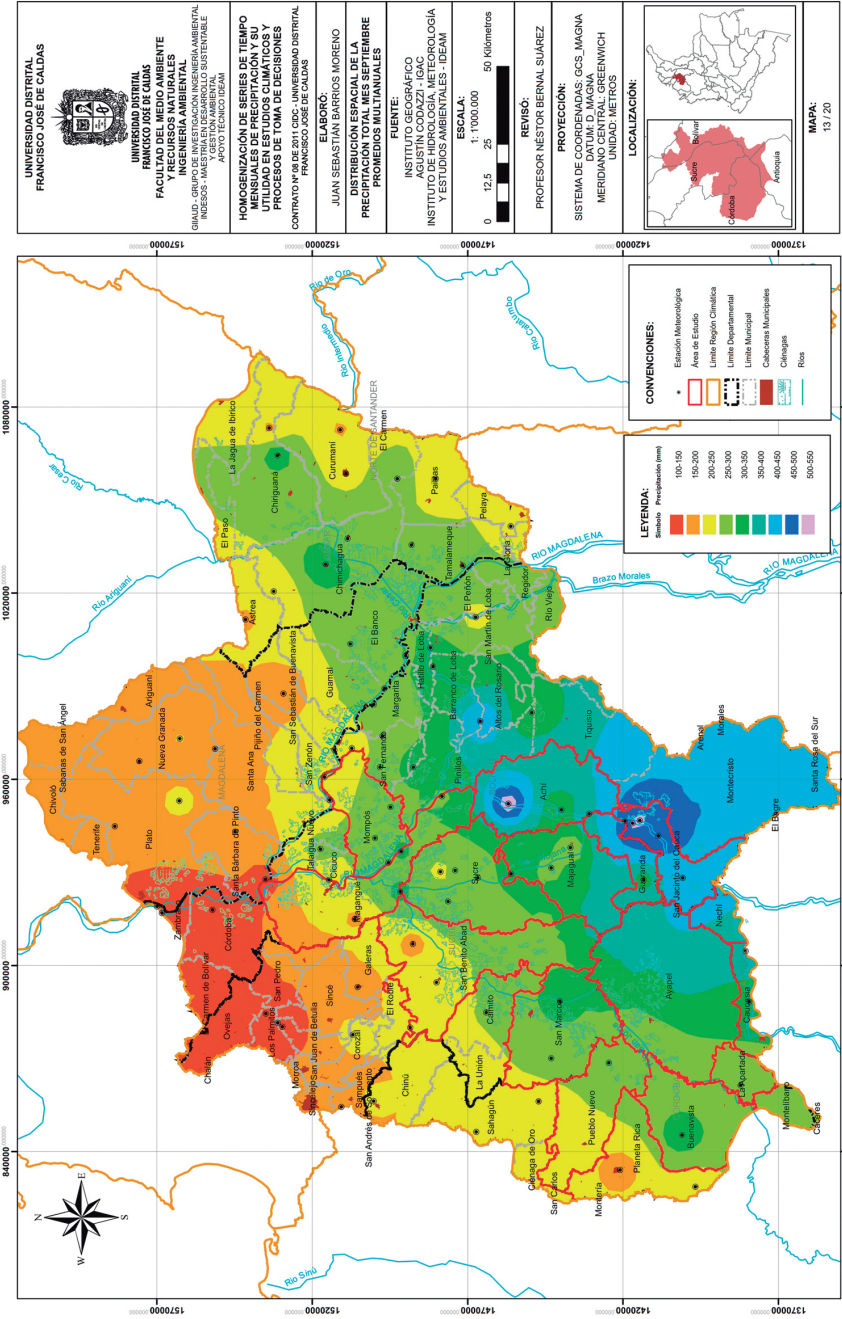


Mapa 2.10. Distribución espacial de la precipitación en agosto. Promedios multianuales



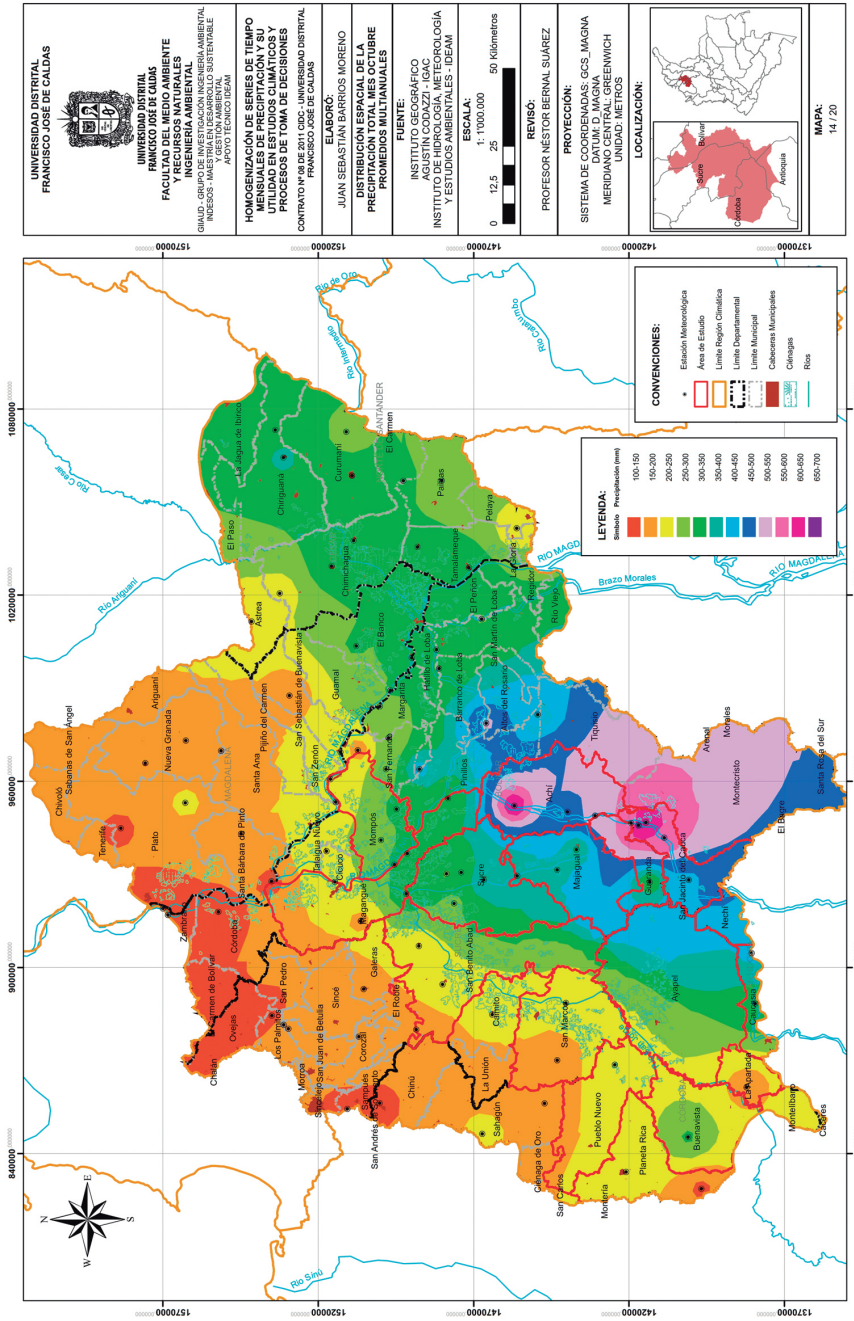
Fuente: elaboración propia

Mapa 2.11. Distribución espacial de la precipitación en septiembre. Promedios multianuales



Fuente: elaboración propia

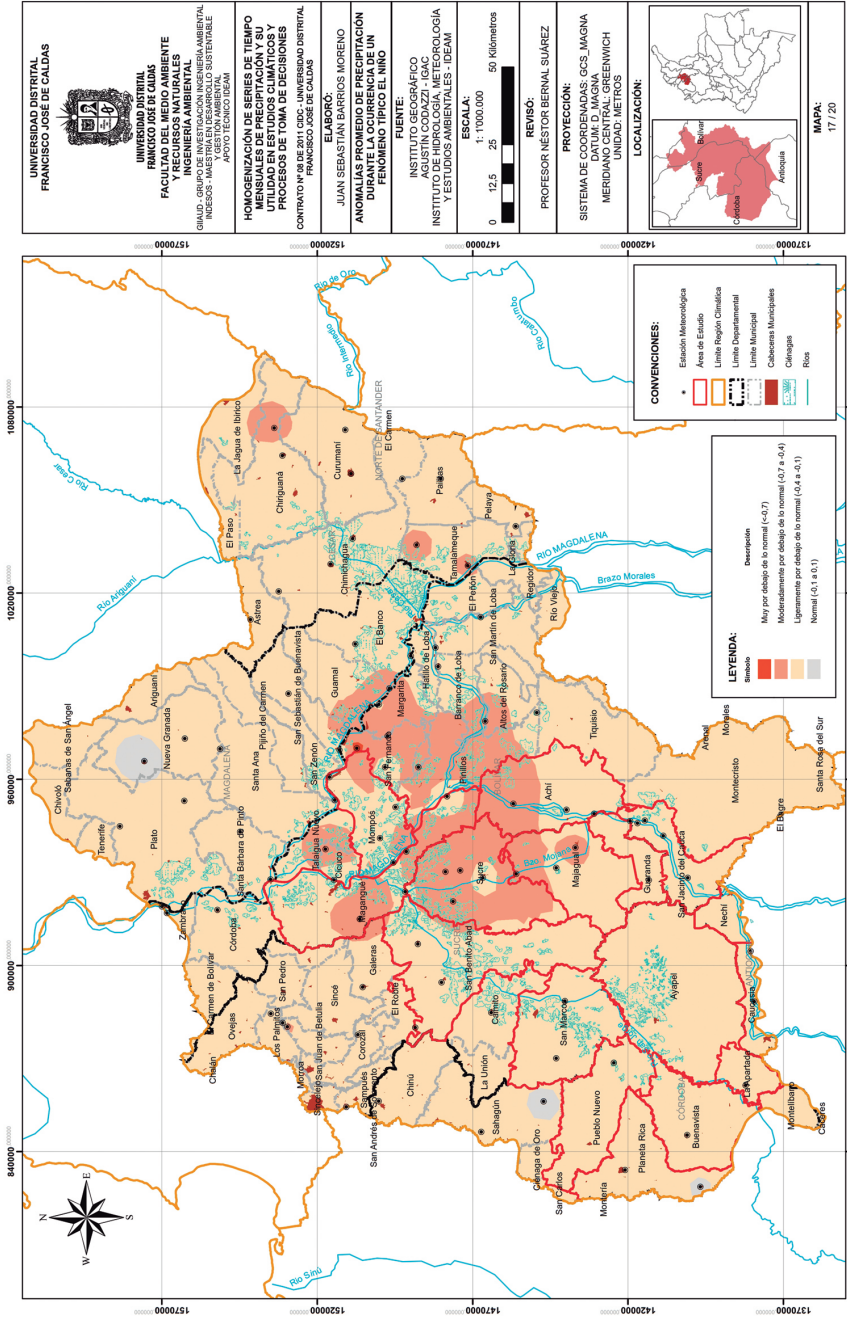
Mapa 2.12. Distribución espacial de la precipitación en octubre. Promedios multianuales



Fuente: elaboración propia



Mapa 2.14. Anomalías promedio de precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico El Niño



Fuente: elaboración propia

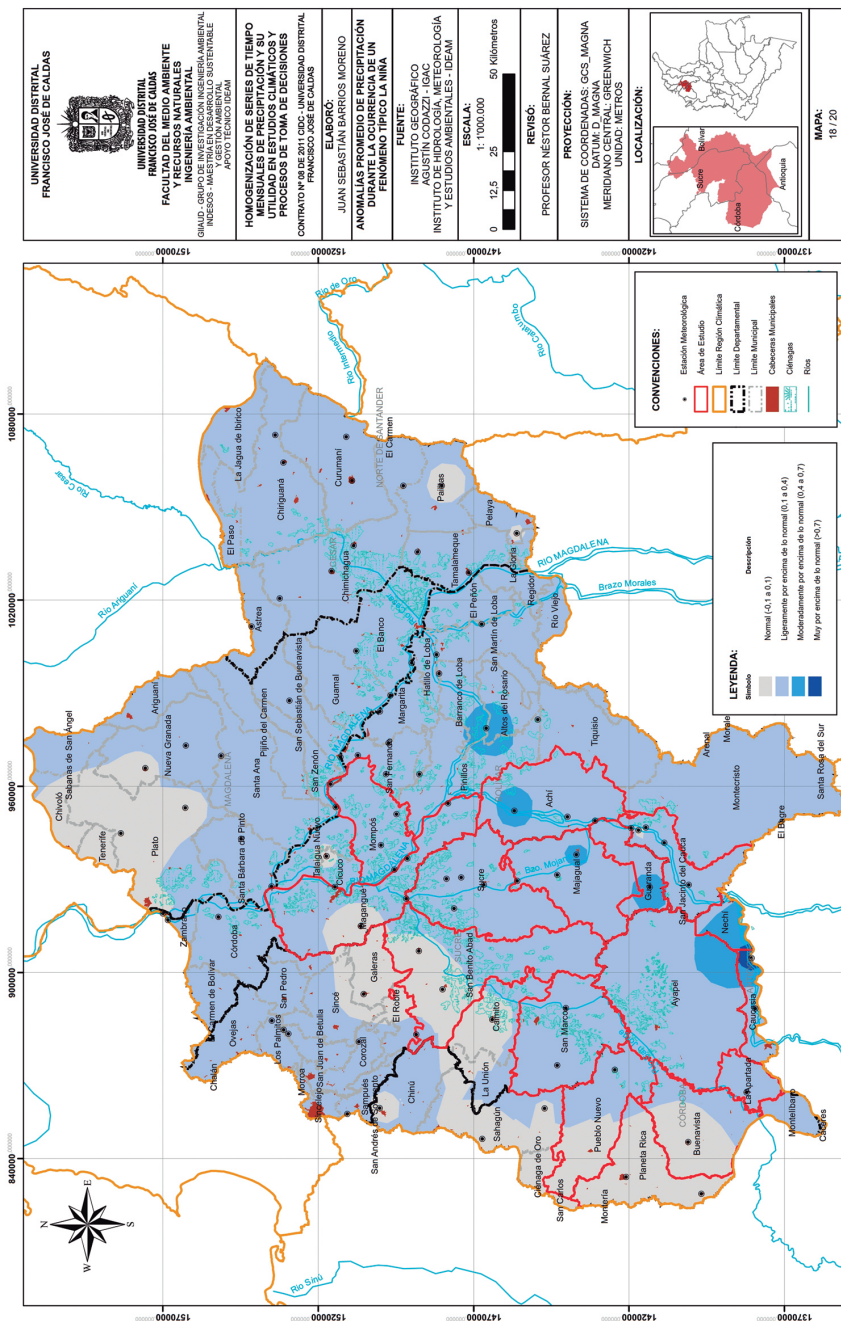


En Chiriguaná, Cicuco, Guamal, Magangué, Majagual, Margarita, Mompós, Pinillos, San Fernando, San Marcos, Sucre, Tamalameque y Talaigua Nuevo, se presentan variaciones de la lluvia moderadamente por debajo de la normal climática, mientras que en el resto de la región estas desviaciones son ligeras y raramente en condiciones de normalidad. Estos municipios presentan como condición más probable comportamientos de la lluvia deficitarios, entre 40 y 80 % de la precipitación histórica esperada, mientras que en el resto de la región el comportamiento más esperado de la lluvia es la normalidad.

De igual forma, durante la ocurrencia de fenómenos típicos La Niña en la región de estudio (Mapa 2.16. Anomalías promedio de precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico La Niña y Mapa 2.17. Alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico La Niña), se observa que en algunas áreas al sur y oriente (municipios de Achí, Altos de Rosario, Ayapel, Barranco de Loba, Caucasia, Cicuco, Guaranda, Magangué, Majagual, Mompós, Nechí y Pinillos) se presentan variaciones de la lluvia moderadamente por encima de la normal climática, mientras que en el sector nororiental estas desviaciones son ligeras y en condiciones de normalidad.

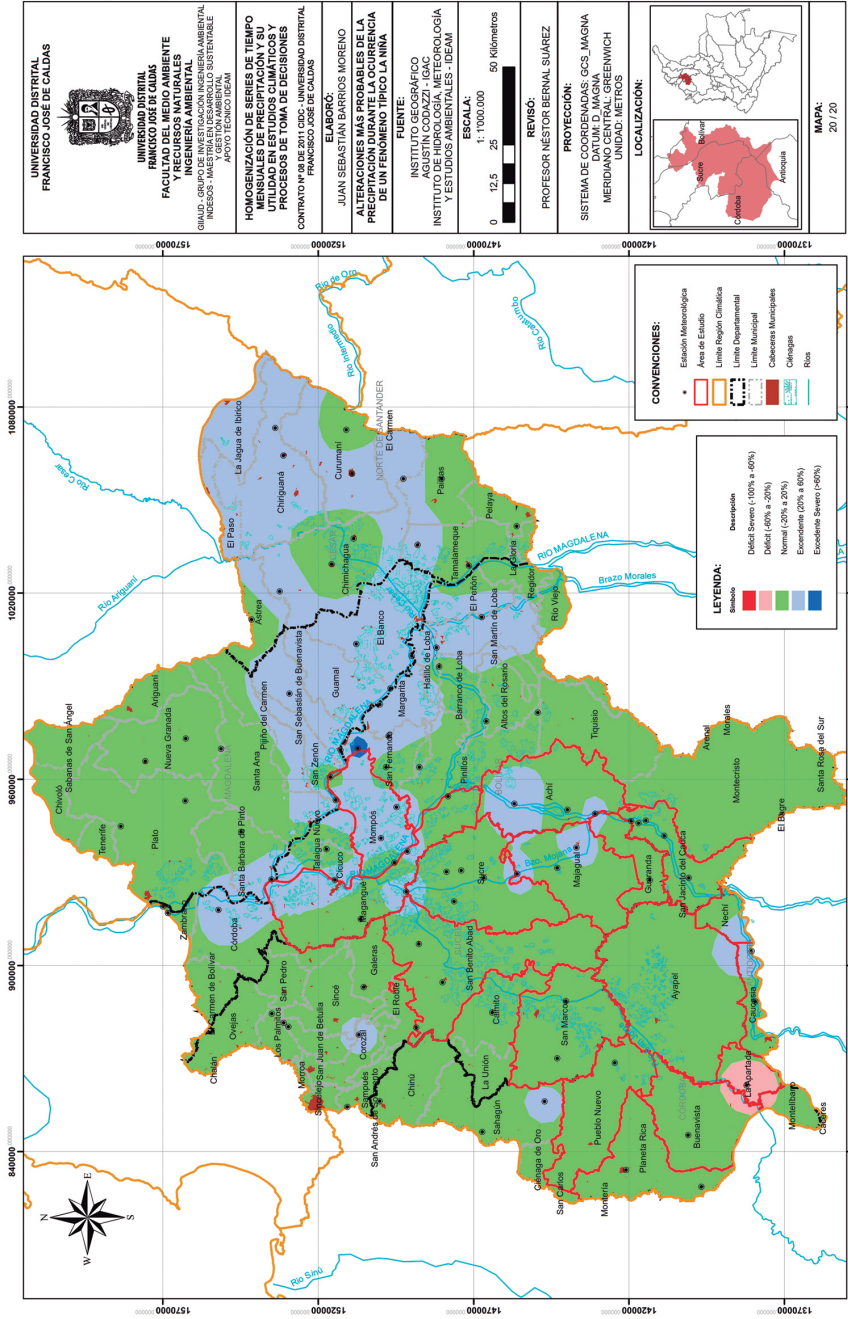
Finalmente, en los municipios de la zona noroccidental se observa que la condición más probable es el excedente de lluvia con valores entre 120 y 160 % de la precipitación histórica esperada, mientras que en el resto de la región el comportamiento más probable es la normalidad; se presenta incluso una pequeña área en el municipio de La Apartada con comportamiento deficitario moderado.

Mapa 2.16. Anomalías promedio de precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico La Niña



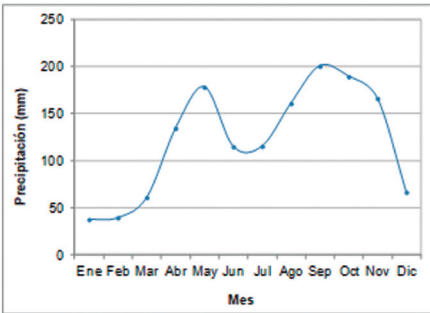
Fuente: elaboración propia

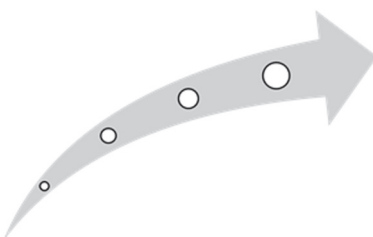
Mapa 2.17. Alteraciones más probables para un evento típico La Niña

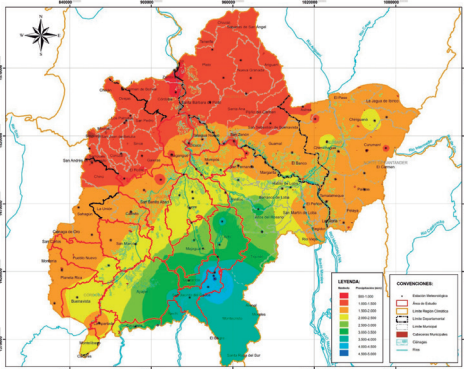


Fuente: elaboración propia

Ficha técnica n.º 1			
Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones			
Producto: base de datos de precipitación homogenizada.			
Descripción: conjunto de series mensuales de precipitación procesadas y ajustadas mediante análisis estadístico empleando una metodología para su homogenización.			
Objetivo de la ficha: proponer una alternativa de integración de bases de datos de precipitación homogenizadas en procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental regional.			
Nivel	Actor	Instrumento	Utilidad
Nacional	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), y entidades generadoras de información	Banco de datos y sistemas de información	Generación de información climática secundaria a escala regional y local para su uso en predicción del clima y estudios ambientales e hidrológicos, en el marco de un sistema de consulta de datos.
Local	Academia e institutos de investigación	Productos de investigación	Investigación y desarrollo de metodologías para el control de calidad de información climática, estudios de variabilidad del clima y su utilidad en procesos de toma de decisiones.

Ficha técnica n.º 2			
Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones			
Producto: base de datos de promedios multianuales y regímenes de precipitación.			
Descripción: promedios mensuales y anuales a escala multianual y gráficos de la variabilidad interanual de la precipitación calculados a partir de bases de datos homogenizadas.			
Objetivo de la ficha: proponer una alternativa de integración de la información de promedios multianuales y regímenes de precipitación en procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental regional.			
Nivel	Actor	Instrumento	Utilidad
Nacional	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural	Políticas de desarrollo rural	Definición de calendarios agrícolas, directrices y políticas para el desarrollo rural sostenible, considerando la variabilidad climática interanual.
	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), y entidades generadoras de información	Sistemas de información	Generación de información del clima secundaria a escala regional y local para su uso en sistemas de alerta climática temprana y boletines agrometeorológicos.
Regional	Corporaciones Autónomas Regionales y Departamentos	Directrices y lineamientos ambientales regionales	Análisis de tendencias históricas de la precipitación para definir estrategias regionales de adaptación al cambio climático y gestión del riesgo asociadas a variaciones del clima a escala interanual.
Local	Gremios económicos	Planes sectoriales	Elaboración de balances hidrológicos oferta-demanda para la planificación de cultivos y otras actividades económicas.

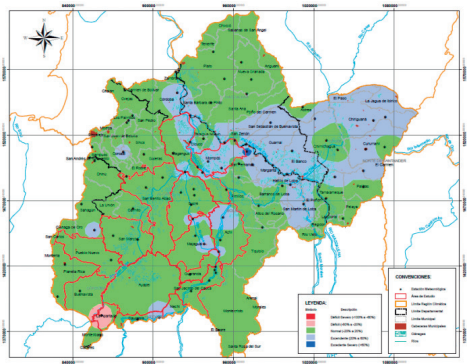
Ficha técnica n.º 3			
Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones			
Producto: proceso metodológico ajustado.			
Descripción: flujograma de actividades a desarrollar para el tratamiento estadístico y la homogenización de series mensuales de precipitación, y para la elaboración de productos espaciales y temporales de fácil interpretación a partir de bases de datos climáticos depurados.			
Objetivo de la ficha: proponer una alternativa de integración del proceso metodológico utilizado en la presente investigación en procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental regional.			
Nivel	Actor	Instrumento	Utilidad
Nacional	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), y entidades generadoras de información	Sistemas de información	Generación de procedimientos para asegurar el control de calidad de la información climática y la actualización periódica en el marco de un sistema de consulta de datos a nivel nacional.
Local	Academia e institutos de investigación	Productos de investigación	Investigación y desarrollo de metodologías para el control de calidad de la información climática y su utilidad en procesos de toma de decisiones.

Ficha técnica n.º 4			
Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones			
Producto: mapas de distribución espacial de la precipitación.			
Descripción: mapas de isoyetas del promedio multianual de precipitación total tanto anual como mensual.			
Objetivo de la ficha: proponer una alternativa de integración de los mapas de distribución espacial de la precipitación total en procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental regional.			
Nivel	Actor	Instrumento	Utilidad
Nacional	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Políticas ambientales	Definición de directrices y políticas para la gestión pública ambiental, considerando la distribución espacial de los elementos del clima.
	Departamento Nacional de Planeación	Plan Nacional de Desarrollo	Definición de estrategias para la adaptación al cambio climático en relación con la variabilidad espacial de la lluvia.
	Unidad para la Gestión del Riesgo de Desastres	Plan de Gestión del Riesgo de Desastres	Definición de lineamientos para la gestión de riesgos relacionados con la variabilidad espacial de la lluvia.
Regional	Corporaciones Autónomas Regionales	Plan de Gestión Ambiental Regional	Caracterización del entorno biofísico y elaboración de la línea base ambiental para definir propuestas de ocupación racional del territorio y uso sostenible de recursos naturales.
	Departamentos	Plan de Desarrollo Departamental	

Ficha técnica n.º 4			
Local	Municipios	Plan de Ordenamiento Territorial	Caracterización del entorno biofísico como base para definir usos del suelo y delimitar áreas de amenazas y riesgo de acuerdo con las características del clima.
		Plan de Desarrollo Municipal	

Ficha técnica n.º 5			
Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones			
Producto: mapas de anomalías promedio de la precipitación.			
Descripción: mapas de isolíneas de los valores promedio de anomalías de precipitación durante la ocurrencia de fenómenos típicos del ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur (ENOS).			
Objetivo de la ficha: proponer una alternativa de integración de los mapas de anomalías promedio de la precipitación total en procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental regional.			
Nivel	Actor	Instrumento	Utilidad
Nacional	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Políticas Ambientales	Definición de directrices y políticas para la gestión pública ambiental, considerando las anomalías de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad extrema.

Ficha técnica n.º 5			
Nacional	Departamento Nacional de Planeación	Plan Nacional de Desarrollo	Definición de estrategias para la adaptación al cambio climático en relación con anomalías de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad extrema.
	Unidad para la Gestión del Riesgo de Desastres	Plan de Gestión del Riesgo de Desastres	Definición de lineamientos para la gestión de riesgos relacionados con anomalías de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad extrema.
Regional	Corporaciones Autónomas Regionales	Plan de Gestión Ambiental Regional	Delimitación de áreas de amenaza o riesgo de inundación o sequía, considerando la desviación promedio histórica, por encima o por debajo del comportamiento normal del clima, durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática extrema.
		Plan de Acción Trienal	

Ficha técnica n.º 6	
Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones	
<p>Producto: mapas de alteraciones más probables de la precipitación.</p>	
<p>Descripción: mapas de áreas de afectación uniforme para la alteración más probable del comportamiento de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos típicos del ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur (ENOS), en cinco categorías de interpretación: deficitario severo, deficitario, normal, excesivo y excesivo severo.</p>	

Ficha técnica n.º 6			
Objetivo de la ficha: proponer una alternativa de integración de los mapas de alteraciones más probables de la precipitación total en procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental regional.			
Nivel	Actor	Instrumento	Utilidad
Nacional	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Políticas ambientales	Definición de directrices y políticas para la gestión pública ambiental, considerando las alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad extrema.
	Departamento Nacional de Planeación	Plan Nacional de Desarrollo	Definición de estrategias para la adaptación al cambio climático en relación con las alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad extrema.
	Unidad para la Gestión del Riesgo de Desastres	Plan de Gestión del Riesgo de Desastres	Definición de lineamientos para la gestión de riesgos relacionados con las alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad extrema.
Regional	Corporaciones Autónomas Regionales	Plan de Gestión Ambiental Regional	Delimitación de áreas de amenaza o riesgo de inundación o sequía, considerando la condición más probable de afectación de la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos típicos de variabilidad climática extrema.
		Plan de Acción Trienal	

2.7 Ordenamiento territorial

2.7.1 Antecedentes

En Colombia, la planificación regional ha sido un punto importante de análisis, estudio e implementación por parte de los actores que intervienen en el ordenamiento territorial, considerando que su importancia radica en definir de forma

eficaz la implementación de planes en las diferentes regiones; se encuentran algunas diferencias en el contenido al momento de pasar de la formulación a su ejecución. Evidentemente, se han establecido las generalidades para los municipios de Colombia, pero es necesario hacer un repaso de los antecedentes que se han tenido en cuenta para la definición actual de la planificación ambiental.

La Constitución Política de Colombia de 1991 definió muchos parámetros para la elaboración de los POT. Aunque antes se tenían mecanismos iniciales para hablar de planificación ambiental, tales como el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (Decreto 2811 de 1974) y el Código de Protección del Medio Ambiente (Decreto 2857 de 1981), que establecían las primeras bases del ordenamiento territorial y cómo se debían manejar las cuencas hidrográficas, junto con las características económicas, técnicas y sociales para su implementación, incluyendo un primer esbozo de los actores que participaban de estos procesos; así mismo, estaba el Código de Régimen Municipal de 1986, que definía en primera instancia algunos procesos de ordenamiento territorial.

Posteriormente, la Constitución de 1991 estableció los principales parámetros actuales para la elaboración de los POT, reunidos bajo los siguientes componentes:

- a. Ordenamiento político-administrativo
- b. Ordenamiento del desarrollo municipal
- c. Ordenamiento ambiental
- d. Desarrollo regional armónico
- e. Ordenamiento del desarrollo social urbano y rural

También, se pueden encontrar varias leyes asociadas que se crearon para aportar al desarrollo de los POT, tales como la Ley 128 de 1994 (Ley Orgánica de Áreas Metropolitanas), la Ley 134 de 1994 (Ley de Mecanismos de Participación Ciudadana) y la Ley 136 de 1994 (Ley de Organización y Funcionamiento de los Municipios).

2.7.2 Metodología usada actualmente para la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial

La forma en que se elaboran los POT actualmente en Colombia está regida por la Ley 388 de 1997, que a su vez fue implementada en el marco del proyecto de investigación realizado, de acuerdo con la integración entre la dimensión técnico-económica, la dimensión sociocultural y el sistema natural dentro de la dimensión ambiental.

Con base en lo anterior y en lo especificado en la Ley 388 de 1997, la planificación territorial se desarrolla actualmente según las siguientes etapas:

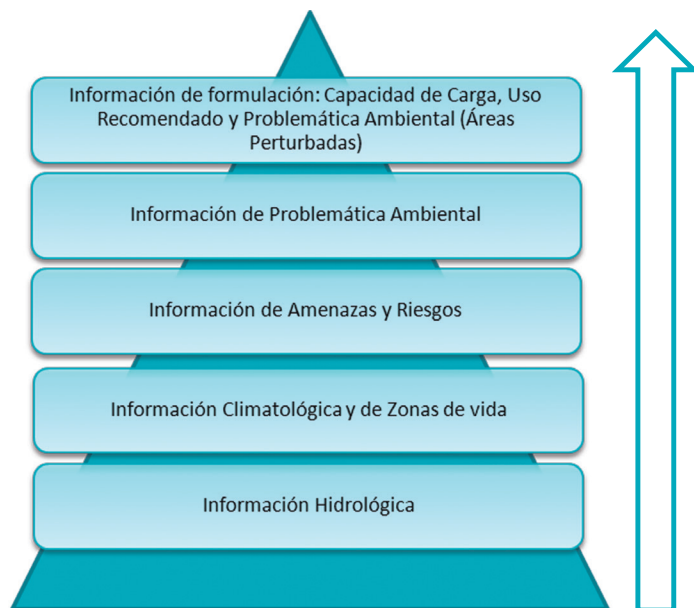
- Etapa preliminar
- Etapa de diagnóstico
- Dimensión biofísica
- Dimensión redes e infraestructura
- Dimensión económica
- Dimensión social
- Dimensión político-administrativa

Estas etapas obedecen principalmente al diagnóstico que se hace de la zona de estudio, la cual está siendo sujeta a procesos de planificación territorial. Una vez se tiene el diagnóstico general, se pasa a la etapa de formulación, en la cual se tratan temas como la visión urbano-regional y la formulación de programas estratégicos de ejecución del POT, que involucra planes, programas y proyectos específicos para cada una de las afectaciones vistas en la región de estudio.

2.7.3 Líneas de actuación

En el desarrollo de los POT, se encuentran varias líneas de actuación para cada uno de los temas que se abordan en el diagnóstico del territorio y de la zona de estudio que se está trabajando. Una de las líneas en las que se basa el ordenamiento territorial, y que se desarrolló en el proyecto de investigación, es la línea climatológica presentada en la figura 2.8.

Figura 2.8. Línea climatológica que se incluye en la elaboración del POT



Fuente: elaboración propia

La línea climatológica es una parte fundamental de nuestra investigación dentro del proyecto, ya que establece el proceso en el que los datos de precipitación son utilizados en su totalidad. Debido a que actualmente no se encuentra información completamente detallada y procesada, y tampoco se tiene en cuenta una dinámica específica para asegurar la calidad de estos datos de precipitación en el desarrollo de los POT, se hizo necesario abordar la línea climatológica como se especifica a continuación:

- *Información Hidrológica:* se hace referencia a las cuencas que se presentan en el municipio o región de estudio, al agua subterránea, al agua superficial, junto con la importancia de formaciones geológicas, y a la calidad de agua sin interferencia humana. Se observan también los Pomcas con el fin de obtener información general sobre la hidrología de la región.
- *Información Climatológica y de Zonas de Vida:* en este componente, se describe la información climatológica que tenga disponible la región (precipitación promedio anual multianual, temperatura promedio anual multianual). Esta información suele obtenerse de las estaciones climatológicas que haya en el municipio o en municipios cercanos. Una vez se obtiene la información de

temperatura y precipitación, se realiza un promedio anual multianual para los datos que se hayan encontrado, incluyendo el periodo de tiempo (años) que tenga hasta la fecha.

Aquí, la metodología de detección de cambios empieza a cobrar mayor importancia, debido a que la información climática de precipitación, específicamente, no es procesada en ningún detalle, sino que solo se tiende a realizar el promedio anual multianual con datos de precipitación promedio anuales durante un periodo de tiempo aleatorio, dependiendo de la cantidad de datos que se haya obtenido. Por lo tanto, lo que aquí se propone es que haya un procesamiento más detallado en la información de precipitación que permita asegurar una mayor calidad en los datos y tener la posibilidad de conseguir una aproximación más real y específica de la región. Esto con el fin de que el proceso de formulación del POT sea mucho más completo, eficaz y apropiado para la zona o región en la que se esté desarrollando.

- *Información de Amenazas y Riesgos:* a partir de la información que se obtiene de la Climatología y Zonas de Vida, el desarrollo de los mapas y la formulación se hace más específico a medida que se avanza de nivel en las etapas de la línea climatológica. De acuerdo con lo anterior, la Información de Amenazas y Riesgos se realiza con base en la información climática de precipitación y temperatura; y también se tiene en cuenta la información de paisaje y relieve, asociaciones de suelos y pendientes para definir inundaciones, coberturas vegetales y zonas de vida para especificar incendios, temperatura y paisajes para precisar heladas e isoyetas con precipitación menor a 600 mm al año, y eventos climáticos extremos (incluido el cambio climático) para definir sequías. A su vez, se deben tener en cuenta las infraestructuras aledañas que pueden presentar amenazas y riesgos por los eventos mencionados.

Es posible ver cómo la información empieza a tomar mayor importancia para la formulación y cómo sin los datos adecuados para su desarrollo la base informativa para el desarrollo de mapas subsiguientes empieza a flaquear por su falta de detalle. La precipitación aquí ocupa un renglón muy importante, ya que determina cuáles zonas de amenazas y riesgos por sequías e inundaciones se encuentran en el municipio, dando información clave para la asignación o restricción de diferentes actividades económicas o incluso acerca de desplazamiento de población afectada.

- *Información de Problemática Ambiental:* después de definir las zonas de amenazas y riesgos, y con base en la información de áreas frágiles (erosionabilidad alta), infraestructura con amenazas altas y conflictos por uso del suelo (esta

información se toma a partir de la comparación entre el uso actual del suelo y el uso recomendado previamente revisado en la dimensión económica), se definen cuáles son las áreas más frágiles para la realización de diferentes actividades económicas, de infraestructura o de vivienda, y se clasifican por grado de afectación (generalmente es “alta” y “muy alta”).

- *Información de Formulación:* una vez se obtienen todos los datos básicos mencionados, se procede a generar la información para la formulación final del POT. Cabe resaltar que la información de precipitación tiene vital importancia en el desarrollo de los mapas de áreas perturbadas y capacidad de carga, ya que son datos complementarios que ayudan a definir los usos recomendados dentro de la región. Estos datos se toman de las áreas presentes que pueden ser fácilmente vulnerables y que están reconocidas como áreas de protección, áreas de conservación y áreas de uso restringido, entre otras.

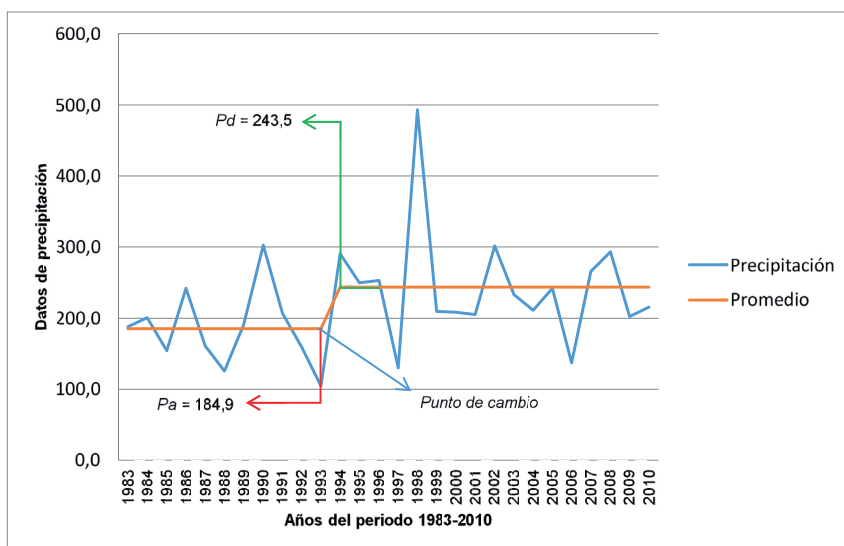
2.8 Relación entre detección de puntos de cambio y la planificación territorial

Como se ha expuesto antes, existen varias deficiencias en cuanto a la calidad de la información que se tiene en cuenta para la realización de la línea climatológica para los POT. Se propone que la metodología que se ha presentado para la detección de puntos de cambio en los promedios históricos de precipitación permita mejorar las bases de datos en las cuales se basa este desarrollo. Lo que se busca principalmente es lograr la integración de la metodología de puntos de cambio en el promedio histórico de precipitación con la metodología actual para el desarrollo de la línea climatológica; de esta forma, se quiere mejorar la calidad de la información base que es tomada para este objetivo (identificación y estimación de datos faltantes en la serie de datos de precipitación), y en etapas más avanzadas de formulación, vincular los puntos de cambio con la planeación regional.

Con el fin de lograr esta vinculación, la premisa de integración está basada en el análisis de los efectos que tienen los eventos climáticos extremos El Niño y La Niña en el comportamiento de los puntos de cambio hallados mediante el proceso metodológico. A manera de ejemplo, en la figura 2.9 se ilustra la detección de cambios para mayo en la estación Centro Alegre, ubicada en el municipio de Planeta Rica en el departamento de Córdoba, donde se observa que el valor promedio antes del punto de cambio corresponde a 184,9 mm y el valor del promedio después del punto de cambio es 243,5 mm, lo que evidencia una magnitud de cambio del 31,7 % respecto al promedio antes del punto de cambio. De esta manera, se busca

determinar si la acción de algún efecto que produce un evento El Niño o La Niña genera la presencia de un cambio brusco en el promedio de precipitación. Con base en esto, la metodología se ha enfocado en identificar cuáles estaciones climatológicas contienen puntos de cambio que hayan surgido en algún punto en un periodo El Niño o La Niña.

Figura 2.9. Salto en el promedio de precipitación, a partir del punto de cambio para la estación 25015010



Fuente: elaboración propia

Para todas las estaciones climatológicas presentes en el área de estudio, se identificaron los puntos de cambio en los promedios para cada mes del año. Esto con el fin de identificar en cuáles puntos el promedio de los datos de precipitación para cada mes tuvo un salto en su valor original y determinó un cambio en el comportamiento de la precipitación a partir de una fecha en particular. Junto con los puntos de cambio, se hizo la comparación y la identificación, para cada estación climatológica, con el índice ONI, a fin de determinar cuáles de los doce puntos de cambio hallados para cada estación se encuentran inmersos en algún periodo El Niño o La Niña. Por eso es que en el listado se identifica cuánto duró cada evento en meses y se define cuál es la distancia que existe entre el inicio del evento y el punto de cambio hallado.

Es importante señalar que el criterio de rezago para el análisis del efecto óptimo de los eventos El Niño y La Niña en los puntos de cambio es de cuatro meses. De esta forma, se identificaron las magnitudes de cambio para aquellas estaciones

que evidenciaron puntos de cambio de rezago hasta máximo cuatro meses y que se vinculan con algún efecto del evento El Niño o La Niña en la escala local. De esta forma, también se especifica la magnitud del salto en el promedio para tener más claro qué tanto influyó cada evento en el cambio en el promedio.

Es aquí cuando el tema de planificación territorial se hace importante, debido a que la premisa fundamental es que al definir los puntos de cambio que han tenido una influencia alta por parte de los eventos El Niño y La Niña, se da a entender que en la zona donde se dieron estos cambios hubo un comportamiento inusual en la precipitación, lo que produjo una alteración bien sea en las actividades económicas de la región, en las propiedades biofísicas de la zona o en cambios en la infraestructura y el desplazamiento de poblaciones.

Lo anterior se puede traducir en lecciones aprendidas o en el proceso de conocimiento que se tiene en cuenta para establecer los cambios históricos en los eventos climáticos. Estas lecciones aprendidas se definen como los eventos que han sucedido históricamente en las series de precipitación, entendidos como los cambios en el promedio con influencia de eventos climáticos extremos (El Niño y La Niña), que dan una idea clara del comportamiento histórico de la precipitación en una zona determinada y que en las etapas de diagnóstico y formulación de los POT permiten mejorar la calidad de información de precipitación y aportar de forma significativa a los procesos de realización de escenarios prospectivos.

Con base en las lecciones aprendidas, se pretende generar un proceso de planeación a partir de los cambios históricos en una región, estableciendo que puede existir una tendencia en la ocurrencia de estos saltos en los últimos años y de esta forma generar un escenario tendencial que se apoye fundamentalmente en la identificación, la evaluación y el análisis de los hechos y las tendencias identificadas por la metodología de detección de cambios. Aquí se propone la integración de esta metodología para mejorar los procesos de diagnóstico climático y generación de diferentes escenarios futuros que apoyen y mejoren la forma en la que se planea el ordenamiento del territorio.

2.8.1 Aproximación regional, visión urbano-regional y su relación con procesos de detección de cambios

Con base en los resultados obtenidos y trabajados en los proyectos de investigación y en la información recopilada con respecto al ordenamiento territorial en Colombia, se propuso una metodología en la cual se integraban los resultados de detección de cambios en series de precipitación con la línea climatológica de los

POT. A su vez, se ha establecido que el proceso metodológico aporta grandes insumos para la realización de dichos planes teniendo en cuenta que se mejora la calidad de la información presente.

Con el fin de generar una explicación más sencilla del proceso metodológico para los tomadores de decisiones y actores regionales (alcaldías municipales, corporaciones regionales, gobernaciones y otras instituciones), se hace necesario abordar el tema de la visión urbano-regional.

En la visión urbano-regional, se describen sobre todo las proyecciones hacia el futuro de la interrelación del sector rural de los municipios con el área urbana y otras áreas no urbanas con municipios o regiones circundantes. Estas últimas se tienen en cuenta para la formulación de planes, programas y proyectos a futuro, y determinan los actores que intervienen en la creación, el seguimiento y el desarrollo de estas proyecciones. La propuesta metodológica hace especial énfasis en este proceso, ya que el análisis de los efectos de los eventos El Niño y La Niña en el cambio de los promedios históricos de precipitación aporta al desarrollo de lecciones aprendidas como proceso de retroalimentación para generar los programas y proyectos, junto con los objetivos y las estrategias futuras a partir de la información histórica.

Aquí intervienen de manera integral los principales actores que pueden dar información que aporte al desarrollo de lecciones aprendidas y que generen los espacios para la formulación del POT. Los principales actores que pueden intervenir son las alcaldías municipales, las corporaciones autónomas regionales, las oficinas de planeación y las gobernaciones de departamentos presentes, y diferentes estaciones encargadas de regular procesos ambientales y de producción, como los gremios y las organizaciones no gubernamentales presentes en los municipios.

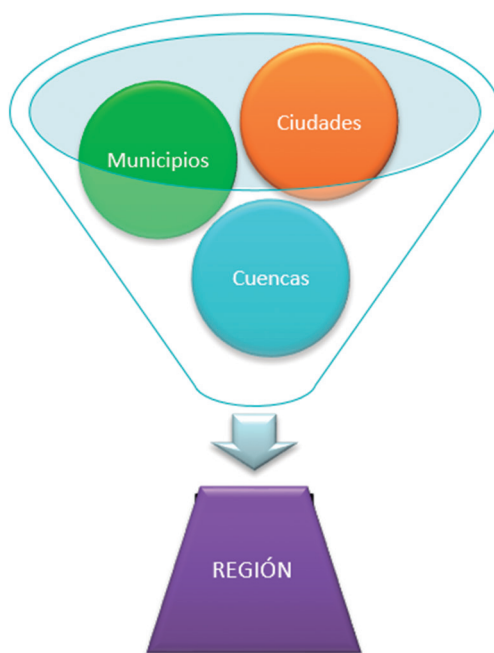
Con base en lo expuesto, cuando un tomador de decisiones aborda el tema de detección de cambios en la precipitación para ordenamiento territorial, debe tener en cuenta las siguientes consideraciones para hacer más accesible el desarrollo de la propuesta metodológica:

- a. *Información de precipitación y detección de cambios:* en un lenguaje sencillo, la precipitación debe entenderse como la cantidad de lluvia que ocurre en un sitio determinado del municipio o la región. Esta información es valiosa para el desarrollo de POT, ya que permite conocer el clima de una zona en particular y cómo se comporta el territorio con respecto a este. La detección de cambios se refiere al punto en el tiempo donde el promedio de esa información de lluvia aumentó o disminuyó hasta el presente, y que

puede ser relacionado con eventos El Niño o La Niña u otro tipo de factores climáticos.

- b. *Escala Regional y Municipal*: debido a que la propuesta metodológica implica la mejora de datos de la línea climatológica en los POT en toda Colombia y aplica en todos los municipios del país, debe entenderse que la forma en que se abarca esta información puede llevarse a la escala regional, es decir, puede ser utilizada de la misma forma para establecer mejoras en los POT en los que se encuentren varios municipios que comparten un territorio o jurisdicción en común, territorios especiales como cuencas hidrográficas, parques naturales, zonas de protección, etc. (Figura 2.9).

Figura 2.10. Visión urbano-regional aplicada a la propuesta metodológica



Fuente: elaboración propia

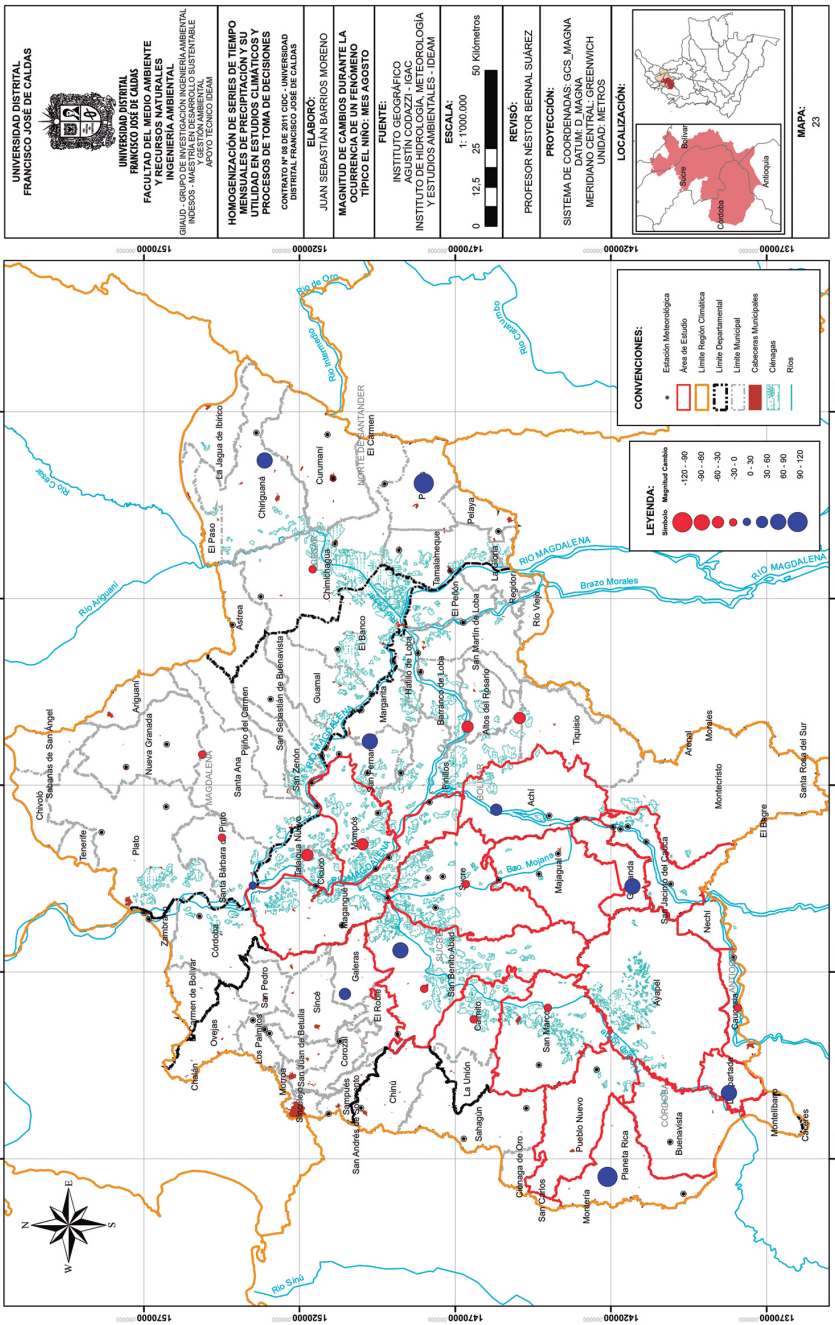
- c. *Proceso Metodológico*: principalmente, el proceso metodológico que se propuso se basa en etapas que se implementan en los POT:
- *Recopilación de información de lluvias (precipitación).*

- *Proceso estadístico de adecuación de las series de lluvias (precipitación)*: esta etapa es realizada por un profesional con conocimientos en estadística, ingeniería ambiental o afines y con conocimientos en Microsoft Excel. La etapa completa es descrita en la propuesta metodológica realizada por Ramos (2013).
- *Identificación de puntos de cambio (dentro de las series de lluvias)*: en esta etapa, se identifican los saltos en los valores de lluvias que se dieron y cambiaron el promedio histórico de estas. Igualmente, las realiza un profesional con los conocimientos mencionados.

Al analizar los resultados, se vio que los meses con mayor frecuencia coincidentes de detección de puntos cambió y que la ocurrencia de eventos El Niño se dio para mayo, agosto y septiembre. Es posible determinar que los puntos de cambio en general para estos tres meses tienen una gran cantidad de estaciones que fueron afectadas por la presencia de eventos El Niño. El punto álgido resulta ser que la causa más probable para estos cambios es la presencia de los fenómenos El Niño y La Niña, por lo tanto se espera que la información de precipitación para los meses que más tengan estaciones cuyos efectos son hasta de cuatro meses sea la más aproximada a la realidad.

Un ejemplo de este proceso de visualizar la magnitud de cambios en los valores promedio de precipitación mensual se presenta en el mapa 2.18 para agosto, en el cual se identifican aquellas estaciones con magnitudes de cambio positivas; es decir, ello indica una evidencia de incremento en los valores de precipitación vinculada con épocas de ocurrencia de eventos El Niño. En contraste se identificaron algunas estaciones que muestran una evidencia de magnitudes de cambio negativas, indicando así disminuciones de los valores promedio de precipitación también relacionadas con la ocurrencia de los eventos El Niño. En síntesis, esta propuesta de detección permite identificar los efectos probables de cambio en la precipitación a nivel local.

Mapa 2.18. Magnitud de cambios durante la ocurrencia del fenómeno típico El Niño para agosto



Fuente: elaboración propia

- *Mejora de información climática y de lluvias:* a partir de la identificación de los puntos en los que cambia la información de lluvias, se define su causa probable según si se presentó un evento El Niño o La Niña en el momento de ocurrencia de ese salto o si se debió a otros factores. Si ocurrió un evento El Niño o La Niña en ese momento, se realiza el registro de esta información, que sirve como insumo para: determinar cuál fue el cambio específico en el clima de la zona en particular, conocer la climatología de la zona cuando ocurren estos eventos, tomar decisiones con respecto a la actividad económica que se presente en ese territorio y que puede continuar siendo afectado por estos fenómenos, y realizar los mapas respectivos dentro del POT de forma más específica y acertada. Esta etapa la realiza un profesional en Ingeniería Ambiental.
 - d. *Manejo de la información y divulgación:* los diferentes actores estarán en la capacidad de tomar decisiones con respecto a actividades económicas, desplazamiento de población, manejo de comunidades, etc., dado que se tendrá información climatológica y de lluvias más precisa, lo que contribuirá a definir mejores planes de emergencia, prevención o incluso de introducción de nuevas actividades económicas que la zona o la región permitan.
- La información que se presenta puede ser de gran beneficio para los actores municipales o regionales que quieran elaborar POT con información de alta calidad y especificidad, teniendo en cuenta que los procesos estadísticos que se realizan, así como la relación que se obtiene entre estos y la dimensión ambiental incluida en la planificación ambiental, tienen un alto grado de correlación y se sostienen como una interacción de información que contribuye a la elaboración de POT con datos reales de las zonas, municipios o regiones y que ofrecen conocimientos específicos de los eventos climáticos que han tenido lugar allí.
- e. *Balance hídrico en los POT:* la precipitación, al jugar un papel muy importante en el desarrollo de los POT, puede verse como uno de los principales insumos para determinar las zonas donde puede haber una problemática ambiental, que no solo incluye aspectos físicos y biológicos, sino también sociales, culturales y económicos.

Al tener la información de precipitación con una calidad superior a los datos suministrados por las entidades territoriales y ambientales encargadas de su recolección, se tiene una base robusta que permite ser los cimientos

de: i) análisis climático e identificación de zonas vulnerables a precipitaciones altas o bajas, y ii) balances hídricos.

- f. *Análisis climático e identificación de zonas vulnerables a precipitaciones altas o bajas*: la información homogenizada, de calidad y completa de los datos de precipitación, de acuerdo con la realidad de las zonas estudiadas, permite que no haya un sesgo muy grande en la identificación de zonas de vulnerabilidad climática y en el análisis climático de zonas de estudio particulares (como suele verse en la mayoría de POT colombianos). Esto se debe a que se puede observar la precipitación más aproximada a un comportamiento real climático y cómo esta afecta históricamente un sitio determinado, siendo la base para definir otro tipo de afectaciones como la diferencia en los usos de suelos y la capacidad de carga de los suelos, así como su vocación económica y biofísica, entre muchos otros aspectos.
- g. *Balances hídricos*: aunque no es el propósito del presente estudio abordar temas como los balances hídricos como insumo para la identificación de zonas con déficit y excesos de agua particulares, sí es necesario aclarar que si bien no es la prioridad, la información de calidad suministrada y la detección de cambios en los promedios de precipitación son la base que permite construir un POT; por consiguiente, son también el insumo principal para realizar un adecuado balance hídrico de la zona de estudio. Sin los datos de precipitación homogenizados y con calidad, no se podría tener una base robusta y acorde con la realidad que permita hacer análisis de precipitaciones, balances hídricos y toma de decisiones e identificación de zonas, vocación de suelos y potencialidades económicas y biofísicas de los suelos en general. Por lo tanto, es claro que la información generada en el presente estudio sirve como insumo fundamental para sustentar la línea climática e hidrológica en los POT, en los que se incluyen todos los aspectos mencionados y los balances hídricos como uno de los elementos más importantes en la construcción de la planificación territorial y ambiental en Colombia.

Cabe señalar que el enfoque que se emplea en esta investigación tiene como objetivo fortalecer el uso de la información climática, empleando la precipitación. En particular, se hace el cálculo de las anomalías climáticas y las alteraciones más probables para periodos de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña; y de esta forma se identifican zonas que históricamente han evidenciado alteraciones de precipitación. Además, se identifican cambios en los valores promedio de precipitación y se identifica la relación

entre dichos cambios y los periodos de ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña.

Por lo anterior, estos insumos se proponen como una herramienta que mejore e incluya este tipo de información en los POT; de tal forma, estas herramientas son complementarias a la visión de los balances hídricos, pues coinciden en la identificación de zonas vulnerables por exceso o déficit de precipitación en la zona de estudio. Se resalta que los balances hídricos hacen énfasis en la descripción climatológica de la zona, mientras que las metodologías de anomalías, alteraciones y detección de cambios enfatizan en detectar cambios en los regímenes de precipitación bajo la influencia de eventos El Niño y La Niña. Por lo tanto, los dos enfoques referidos son complementarios y favorecen al entendimiento regional y municipal de la climatología.

Como síntesis de este capítulo, el propósito del presente estudio es determinar la importancia de la detección de cambios y la homogenización de datos de precipitación como insumo para la toma de decisiones ambientales y económicas, así como la relevancia del desarrollo de POT y la identificación de causas probables de afectación por variabilidad climática de cambios en los regímenes de lluvias. El estudio se ha realizado con los datos observados y registrados de la zona de estudio (zona climática del Bajo Magdalena), al igual que con datos tomados en campo y con investigación del comportamiento de las lluvias con la población de esta zona. Es claro que no se ha querido instar al lector a asumir que la intención de los autores es elaborar un POT para la zona de estudio, por lo cual no es una prioridad querer establecer herramientas para el diagnóstico de zonas de conservación, zonas productivas y, en general, los resultados que pueden obtenerse al final del desarrollo de estos mismos planes.

El presente estudio solo se enfoca en sugerir y sustentar que la información tratada con los procedimientos mencionados en el primer capítulo sirve como insumo para el desarrollo de POT y de procesos de toma de decisiones en diversos ámbitos. Solo se pretende demostrar una propuesta metodológica para la elaboración general de estos planes, como estudio de caso aplicado a la zona del Bajo Magdalena y que puede servir para cualquier zona de estudio de Colombia con las particularidades climatológicas respectivas y en general para cualquier proceso de toma de decisiones y planificación territorial. Se hace énfasis en que los datos obtenidos bajo criterios de calidad constituyen un insumo de trabajo para desarrollar la propuesta metodológica sin ir a profundidad del desarrollo de un POT, pero sí aportando información relevante para este proceso en la zona climatológica del Bajo Magdalena.

Es relevante señalar que estos avances logrados se pueden complementar con estudios previos que se han realizado en la zona de La Mojana, con la participación de instituciones como: Corpoica, la Universidad Nacional de Colombia, el Departamento Nacional de Planeación (DNP y Universidad Nacional, 2011) y Corpomojana, y que constituyen un referente para los retos que se plantean en este capítulo.

Algunos de estos avances reúnen experiencias relacionadas con: i) la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la zona; ii) procesos de zonificación; iii) propuestas de tecnologías apropiadas vinculadas con la producción agropecuaria, lideradas por Corpoica, que se han logrado gracias a las lecciones aprendidas en otras zonas colombianas; iv) estudios vinculados con el análisis del sistema hidráulico y la zona de regulación de caudales y propuestas relacionadas con la formulación de un sistema de alerta temprana, liderados recientemente por la Universidad Nacional de Colombia, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Fondo de Adaptación (<http://fondoadaptacion.gov.co/la-mojana/>); y v) experiencias acumuladas de Corpoica en la zona de estudio.

Al considerar el contexto referido en el párrafo anterior, a continuación se sintetizan algunos aportes en el marco del proyecto titulado “Adaptabilidad de la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la región de La Mojana”, desarrollado por Corpoica y Corpomojana a finales de los años noventa y cuyo objetivo fue: desarrollar un modelo que permitiera entender el comportamiento dinámico del agua como elemento primordial de los ecosistemas de La Mojana para el uso y manejo sostenible de los recursos (Corpoica, 1995). Este proyecto tuvo la coordinación nacional de la investigadora Inés Toro y los siguientes líderes de proyectos: i) en Sistemas de Producción, el investigador Antonio López; ii) en el Programa Nacional de Agroecosistemas, la investigadora Elizabeth Aguilera; y iii) en el Programa Nacional de Estudios Socioeconómicos, la investigadora Irma Baquero. El proyecto en mención se desarrolló según tres líneas metodológicas:

- Investigación de la dinámica de los ecosistemas de La Mojana
- Interrelaciones de los ecosistemas de La Mojana con su entorno (región Andina) y su efecto en la calidad ambiental
- Adaptación de alternativas para el uso y manejo sostenible de los recursos de La Mojana

Los resultados de esta iniciativa de investigación se centran en los siguientes aspectos: i) caracterización de la zona desde el punto de vista climatológico, de suelo

y coberturas vegetales (Terán, 1998); ii) zonificación de la región de La Mojana integrando los avances de la caracterización referida; iii) evaluación agroclimática e impactos asociados a sistemas productivos, y previsión agrícola vinculada con la predicción climática y alteraciones probables derivadas de ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña (Boshell, s. f.); iv) modelación cualitativa y cuantitativa de la dinámica hidrológica de La Mojana (Corpoica y Uniandes, s. f.); v) modelación del contenido de humedad en el sistema lacustre de la zona (Terán et al., 1999).

Considerando los avances en este proyecto, se describen a continuación algunos elementos particulares, que a su vez reconocen los esfuerzos previos para identificar y determinar el uso de los suelos y la capacidad de carga de la zona. Estos son aspectos relevantes en el marco de la planificación ambiental y el ordenamiento territorial integrando aspectos regionales. Por ejemplo, se ha identificado que ha ocurrido un “cambio en el uso de la tierra por el abandono en las áreas dedicadas a la ganadería, debido a que este tipo de cobertura es utilizada en pastoreo” (Terán, 1998). Así mismo, se ha identificado que “el 31,7 % de La Mojana (158.751 ha) obedece a zonas de inundación con mayor ocurrencia, y un poco más de la mitad de la zona (50,8 %), con 254.253 ha ubicada en la zona central y sur de la región” (Terán, 1998).

Con respecto a la identificación de factores económicos y ambientales que han sido de gran importancia para la dinámica territorial de la zona, y en especial para la subzona de La Mojana, existen estudios que demuestran que ha habido tendencias de cambio en el uso del suelo por parte de los pobladores. Por una parte, esta zona “presenta gran diversidad de suelos (inceptisoles, entisoles, oxisoles y vertisoles) y ha sido intervenida desde la época precolombina (cultura Zenú)” (Roveda et al., 1998).

Un claro ejemplo de esta intervención se encuentra en el estudio titulado “Tendencias de cambio en la cobertura vegetal y uso de la tierra mediante procesamiento digital de imágenes satelitales en La Mojana, Colombia”, realizado por Roveda et al. (1998), en el que se compararon imágenes satelitales entre los años 1987 y 1996, y se determinó que hubo un aumento en los cuerpos de agua (12,6 %) y en las praderas arbustivas (23,7 %) del área, y una reducción en la superficie ocupada por la vegetación arbustiva (37,8 %) y las tierras agropecuarias (4,5 %). Por otra parte, “algunas categorías se mantuvieron estables, como las ciénagas (83,1 %), mientras que otras, como el bosque secundario, las praderas herbáceas y la vegetación arbustiva abierta, fueron reemplazadas por otras coberturas” (Roveda et al., 1998). Todo esto ha permitido que en la zona se desarrollen procesos de deforestación y

la dedicación de extensiones mayores de tierra a la ganadería, principal actividad agropecuaria de la región (Roveda et al., 1998).

Un punto de encuentro entre los resultados de investigación logrados por Corpoica e instituciones regionales como Corpomojana en el proyecto en mención y los avances logrados por Barrios (2013) y Ramos (2013), que se describen en este capítulo, permiten señalar que los componentes hidrológico y climático cobran una merecida relevancia. El primero integra los análisis y resultados de la caracterización climática para los sistemas productivos en la zona, y el segundo resalta el uso de la climatología desde el punto de la precipitación y los productos derivados como: i) mapa de precipitación con series de tiempo homogenizadas; ii) mapa de anomalías de precipitación y alteraciones más probables derivadas de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña; y iii) el establecimiento de una propuesta metodológica que permite integrar estos resultados en los procesos de planificación ambiental y ordenamiento territorial.

Referencias bibliográficas

- Acosta, L. (2012). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial Municipio de San Marcos-Sucre*. Alcaldía Municipal de San Marcos.
- Aguilera, M. (2004). *La Mojana: riqueza natural y potencial económico*. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional N.º 48. Centro de Estudios Económicos Regionales (CEER).
- Alcaldía Municipal de Planeta Rica. (2011). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de Planeta Rica*. Alcaldía Municipal de Planeta Rica.
- Alonso, A. (s. f). *Introducción al análisis de series temporales: cálculo de tendencias y estacionalidad*. <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/amalonso/esp/seriestemporales.pdf>
- Arabia, J. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015 de Caucasia-Antioquia*. Alcaldía Municipal de Caucasia.
- Auer, I., et al. (2005). *High Quality Climate Data for the Assessment of Alpine Climate, its Variability and Change on Regional Scale — Collection and Analysis of Historical Climatological Data and Metadata*. ForAlps Alpine Space Program.
- Auditoría General de la República. (2010). *Guía para elaborar el informe sobre la situación de los recursos naturales y el medio ambiente*. Procuraduría General de la Nación.
- Baethgen, W. y Giménez, A. (2004). *La variabilidad climática, el cambio del clima y el sector agropecuario, jornada de clima y restricciones hídricas de pasturas en*

zonas ganaderas, Tacuarembó, Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

- Barblescu, A., Matfei, C. y Bautu, E. (2010). *Modeling the Hydro-meteorological Time Series. Applications to Dobrudja Region*. Lamber Academic Publishing.
- Barber, C. y Zapata, M. (2009). ¿Sostenibilidad o sustentabilidad? [Ponencia]. III Simposio en Investigación Aplicada a los Negocios en Sostenibilidad, México D.F., México, 21 de octubre de 2009.
- Barrero, A. y Sabogal, N. (s. f.). *Curva de dobles masas*. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT).
- Barrios Moreno, J. S. (2013). *Aporte al proceso de toma de decisiones en la planificación ambiental de la región climática del Bajo Magdalena con base en análisis estadístico empleando una metodología para la homogenización de series mensuales de precipitación* [tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional UD.
- Begert, M., Zenklusen, E., Häberli, C. y Appenzeller, C. (2008). An Automated Procedure to Detect Discontinuities; Performance Assessment and Application to a Large European Climate Data Set. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(5), 663-672. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0314>
- Bernal, N., Martínez, J., Rodríguez, N., Pabón, D. y Galindo, G. (2009). *Detección de cambios en el promedio y varianza de una serie de tiempo meteorológica* [ponencia]. VI Encuentro Colombia Venezuela de Estadística y VIII Jornadas de Aplicaciones Matemáticas, Valencia, Venezuela, octubre 26-29 de 2009.
- Bertel, F. (2005). *Esquema de Ordenamiento Territorial revisado del municipio de Buenavista-Córdoba 2004-2012*. Alcaldía de Buenavista.
- Brewer, G. D. y Stern, P. C. (Eds). (2005). *Decision Making for the Environment: Social and Behavioral Science Research*. National Academies Press.
- Brunet, M. (2010). Datos e indicadores para detectar y atribuir eventos al cambio climático: los registros históricos del clima y su problemática. *Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1(1), 19-28.
- Buishand, T. A. (1982). Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology*, 58(1-2), 11-27. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90066-X)
- Cao, L. y Yan, Z. (2012). Progress in Research on Homogenization of Climate Data. *Advances in Climate Change Research*, 3(2), 59-67.
- Cabarcas, C. (2007). *Plan de Desarrollo Municipal de Majagual-Sucre 2008-2011* “¡Majagual es lo primero!”. Alcaldía de Majagual.

- Cadrazo, M., (2008). *Plan de Desarrollo Municipal San Benito Abad-Sucre 2008-2011*. Alcaldía de San Benito Abad.
- Caicedo, J. (2007). *La Ley 388 de 1997. Un repaso a una década. Memorias* [ponencia]. Seminario 10 años de la Ley 388 de 1997: sus aportes al ordenamiento urbano y a la consolidación de políticas de suelo. Salón Elíptico del Congreso de la República, mayo 24-25 de 2007.
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Informe Brundtland: nuestro futuro común*. <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm#I>
- Congreso de la República de Colombia. (1993, 2 de diciembre). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 41.146.
- Congreso de la República de Colombia. (1994, 15 de julio). Ley 152 de 1994. Por la cual se establece la Ley Orgánica del Plan de Desarrollo. Diario Oficial 41.450.
- Congreso de la República de Colombia. (1997, 18 de julio). Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 43.091.
- Comisión de Climatología. (2010). *Decimoquinta Reunión, OMM-Nº 1054*. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, febrero de 2010.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). (1995). *Adaptabilidad de la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la región de La Mojana*. Programa Nacional de Manejo Integrado de Suelos y Aguas.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2011). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014*. DNP.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP) y Universidad Nacional de Colombia. (2011). *Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de La Mojana. Convenio Interadministrativo UN-DNP 336/2011*. Editorial Universidad Nacional de Colombia
- Guarín Giraldo, G. W. (2011). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8111>
- Gómez, V. y Maravall, A. (1994). Estimation, Prediction and Interpolation for Nonstationary Series with Kalman Filter. *Journal of the American Statistical Association*, 89(426), 611-624. <https://doi.org/10.1080/01621459.1994.10476786>

- Herazo, E. (2008). *Proyecto Plan de Desarrollo Municipio de Buenavista-Córdoba 2008-2011*. Alcaldía de Buenavista.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Variabilidad climática y cambio climático en Colombia*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2002). *Perfil del estado de los recursos naturales y del medio ambiente en Colombia*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ideam.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac). (2010). *Caracterización del desarrollo territorial de la región de Montes de María. Proyecto gobernabilidad para el desarrollo local con visión de futuro*. Igac.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac). (2018). *Apoyo del Igac al ordenamiento territorial*. Igac.
- Maderey, L. y Jiménez, A. (2005). Precipitación. En L. Maderey, *Principios de hidrogeografía: estudio del ciclo hidrológico* (pp. 15-42). Editorial Universidad Nacional Autónoma de México.
- Manly, B. F. J. (2009). *Statistics for Environmental Science and Management* (2.a ed.). CPC Press; Taylor & Francis Group.
- Martínez, J., Montealegre, E. y Rangel, E. (1996). *Estimación de observaciones faltantes en una serie de tiempo usando modelos ARIMA* [ponencia]. IV Congreso Colombiano de Meteorología, Ideam, Bogotá, Colombia, marzo 19-23 de 1996.
- Martínez, M. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal de Sucre-Sucre 2012-2015 “De la Mano Con el Pueblo”*. Alcaldía de Sucre.
- Massiris, A. (2004). *Ordenamiento territorial*. Biblioteca Virtual del Banco de la República.
- Mercado, F. (2012). *Plan Desarrollo Municipal de Pueblo Nuevo-Córdoba 2012-2015 “Pueblo Nuevo Para Todos”*. Alcaldía de Pueblo Nuevo.
- Mesa, O., Poveda, G., Carvajal, L. y Salazar, E. (1994). *Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología colombiana. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín* [ponencia]. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica Santiago de Chile, Chile, noviembre 7-11 de 1994.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Orientaciones a las autoridades ambientales para la definición y actualización de las determinantes ambien-*

tales y su incorporación en los planes de ordenamiento territorial municipal y distrital. Dirección General de Ordenamiento Ambiental Territorial y Coordinación del SINA.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Guía metodológica 1. Incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en los procesos de ordenamiento territorial*. Ministerio de Ambiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f). *Instrumentos de planificación regional*. [http://www.minambiente.gov.co//contenido/ contenido.aspx?catID=554&conID=4040](http://www.minambiente.gov.co//contenido/contenido.aspx?catID=554&conID=4040)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004, 20 de abril). Decreto 1200 de 2004. Por el cual se determinan los instrumentos de planificación ambiental y se adoptan otras disposiciones. Diario Oficial 45.526.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Propuesta organizacional del Sistema de Gestión Ambiental Municipal (SIGAM)*. MinAmbiente.
- Montealegre, E. (1990). *Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT).
- Montealegre, E. y Pabón, J. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, (2), 7-21.
- Montealegre, E. (2012). *Determinación de las alteraciones de la precipitación y la temperatura del aire durante los fenómenos El Niño y La Niña, con base en los datos históricos de las estaciones meteorológicas en la Región Capital (Bogotá y Cundinamarca), para actualizar los resultados del modelo del Ideam*. Ideam.
- Nieto, F. H. y Ruiz, F. (2002). About a Prompt Strategy for Estimating Missing Data in Long Time Series. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 26(100), 411-418.
- Organización de las Naciones Unidas. (ONU). (1992). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD)*. Agenda 21. ONU. <http://www.un-documents.net/a21-28.htm>
- Organización Meteorológica Mundial (WMO). (2009). *Hoja informativa N° 6: La información sobre el clima, un instrumento para un medio ambiente saludable* [ponencia]. World Climate Conference, Ginebra, Suiza, agosto 31-septiembre 4 de 2009.

- Orozco Betancurth, J. I. (2009). Problemas de información ambiental para la toma de decisiones: el caso de Risaralda, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, (58), 65-72.
- Pacheco, M. (2009). *Adaptación al cambio climático en la planificación del territorio desde una perspectiva regional*. Centro de Naciones Unidas para el Desarrollo Regional (UNCRD).
- Paternina, F. y Chejne, Y. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal de Ayapel-Córdoba 2012-2015. Acuerdo 006 de 2012*. Alcaldía de Ayapel.
- Paz, K. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal de La Apartada-Córdoba 2012-2015 "Portal de Prosperidad y Desarrollo"*. Alcaldía de La Apartada.
- Poveda, G. y Mesa, O. (1994). *Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South América and Large Scale Oceanic-atmospheric Phenomena*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Presidencia de la República de Colombia. (1998, 13 de mayo). Decreto 879 de 1998. Por el cual se reglamentan las disposiciones referentes al ordenamiento del territorio municipal y distrital y a los planes de ordenamiento territorial. Diario Oficial 43.300.
- Presidencia de la República de Colombia. (2002, 6 de agosto). Decreto 1729 de 2002. Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5 de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 44.893.
- Presidencia de la República. (2019). *Abecé de la Ley de las Regiones*. Presidencia de la República
- Requena, Y. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal de San Jacinto del Cauca-Bolívar 2012-2015*. Alcaldía de San Jacinto del Cauca.
- Rodríguez-Eraso, N., Pabón-Caicedo, J. D., Bernal-Suárez, N. R. y Martínez-Collantes, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Editorial Universidad Nacional de Colombia; Colciencias.
- Roveda, G., Salvatierra, C., Villaneda, E. y Aguilera, E. (1998). Tendencias de cambio en la cobertura vegetal y uso de la tierra mediante procesamiento digital de imágenes satelitales en La Mojana, Colombia. *Revista Corpoica*, 2(2), 27-34.
- Štěpánek, P. (2007). *Anclim: Software for Time Series Analysis*. Masaryk University.
- Szalai, S. (2004). ¿Qué es el tiempo? Definición y diferencias con el clima. http://www.atmosphere.mpg.de/enid/1__Tiempo_y_frentes/-_Tiempo_y_clima_3b1.html

- Terán, C. A. (1998). *Análisis agroclimático de la región de La Mojana*. Corpoica.
- Terán Chaves, C. A., Jiménez, C., González, C. y Villaneda Vivas, E. (1999). Metodología objetiva para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana usando el sistema de información geográfica ARC/INFO. *Revista Corpoica*, 2(2), 19-27.
- Toreti, A., Kuglitsch, F. G., Xoplaki, E., Luterbacher, J. (s. f.). *Homogenization and Analysis of Climatic Series*. University of Bern; Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- Trejo, M. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Nechí-Antioquia*. Alcaldía de Nechí.
- Tamayo, R. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal de Planeta Rica-Córdoba 2012-2015*. Alcaldía de Planeta Rica.
- Vázquez, J. (2006). *Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimientos inmediatos* [ponencia]. I Foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz, Veracruz, México, febrero 9-10 de 2006.
- Vilaro, A. (2000). *Plan de Ordenamiento Territorial de Magangué-Bolívar con Énfasis Subregional*. Alcaldía de Magangué.
- Villacob, H. (2012). *Proyecto de Plan de Desarrollo Municipal de Achí-Bolívar 2012-2015*. Alcaldía de Achí.
- Zúñiga, H. (2000). *Hagamos el ordenamiento territorial del sector rural de nuestro municipio (manual técnico-legal)*. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/docentes/hzunigap/documentos/ot.pdf>
- Zúñiga, H. (2009). *Elaboremos un estudio de impacto ambiental*. http://200.69.103.48/comunidad/docentes/hzunigap/documentos/elaboremos_un_estudio_de_impacto_ambiental.pdf
- Zúñiga, H. (2011). *Memorias del Diplomado en Bienes y Servicios Ambientales en los Instrumentos Básicos de Planificación Municipal*. Convenio Interinstitucional Contraloría de Cundinamarca-Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Capítulo 3. Utilización de series de tiempo de precipitación homogenizadas para la estimación del caudal del río San Jorge

WENDY CAROLINA VELÁSQUEZ MARTÍNEZ

JULIO EDUARDO BELTRÁN VARGAS



Zonas de inundación, municipio de San Marcos

Foto: Carolina Velásquez

3.1 Introducción

La población colombiana se ha visto afectada constantemente por eventos hidrometeorológicos extremos como inundaciones, deslizamientos, granizadas y olas de calor, los cuales han incrementado su frecuencia en los últimos años, incidiendo en las actividades económicas y sobre todo en los ciudadanos que se encuentran en las zonas más sensibles (Correa, 2011; Ideam, 2010; Hoyos y Baquero, 2011).

De igual forma, en Colombia existe una baja capacidad técnica en el ámbito municipal en gestión del riesgo y manejo integral del recurso hídrico, al igual que un reducido conocimiento de las amenazas y vulnerabilidades, lo cual no permite analizar la condición de riesgo frente al recurso hídrico (MAVDT e Ideam, 2010). Así mismo, la gestión del riesgo asociada al recurso hídrico, en materia de avances en el país, ha estado encaminada principalmente a acciones orientadas a darles respuesta a los daños e impactos generados por los eventos hidrometeorológicos, tanto a la población como a la infraestructura, tales como la recuperación, reconstrucción y rehabilitación, mas no a una acción enfocada a la prevención y mitigación del riesgo (MAVDT e Ideam, 2010).

Dado lo anterior, en la actualidad no se cuenta con estaciones en las que se realice la medición de caudal en diferentes puntos de los ríos de Colombia; dichos datos son de gran utilidad para tomar decisiones encaminadas a la prevención y no a la respuesta después de los diferentes eventos hidrometeorológicos que azotan al país, entonces se ve la necesidad de elaborar modelos que estimen el caudal de los ríos a lo largo de las cuencas.

En la actualidad, existen diferentes métodos para calcular el caudal de los ríos, pero estos requieren diversos *software* que no se encuentran en versión libre y solicitan datos específicos como escorrentía, evapotranspiración y tipo del suelo, al igual que imágenes satelitales e imágenes de elevación, entre otras informaciones que no siempre se encuentran a disposición del público. Por tal razón, Abrahamsson y Håkanson (1998) utilizaron un modelo para la estimación del caudal de diferentes ríos de Europa, cuyos principales insumos fueron el área de la cuenca aferente y las series de tiempo de precipitación, con la hipótesis de que el 38 % de la precipitación contribuye a la descarga del río, mediante la siguiente fórmula:

$$Q=0,38 \times A \times P \times \frac{1000}{(60 \times 60 \times 24 \times 365)}$$

En donde Q es el caudal; A es el área de la cuenca aferente en m²; P es las series de tiempo de precipitación en el lugar en mm; y 0,38 es la contribución de la precipitación a la descarga del río.

Dicha ecuación ha sido utilizada en diferentes estudios, como el de Bryhn y Håkanson (2007) y el de Håkanson y Bryhn (2008), quienes la utilizaron dentro de un modelo de balance de masas dinámico para determinar el fósforo en los lagos; también fue insertada en el modelo dinámico de suspensión de partículas en los ríos realizado por Malmaeus y Håkanson en 2003 y por Håkanson en 2006, y en los estudios de caso de la eutrofización en la bahía de Himmerfjärden en el Báltico (Håkanson y Stenström-Khalili, 2010) y en el Golfo de Finlandia (Håkanson, 2011). De igual forma, fue utilizado por Beltrán y Rangel (2013) para realizar la modelación hidrológica del humedal Jaboque en Bogotá.

Por último, en este capítulo se muestran los resultados derivados de la modelación para la estimación del caudal del río San Jorge, teniendo como insumos series de tiempo homogenizadas de precipitación en una escala mensual y el área de la cuenca aferente.

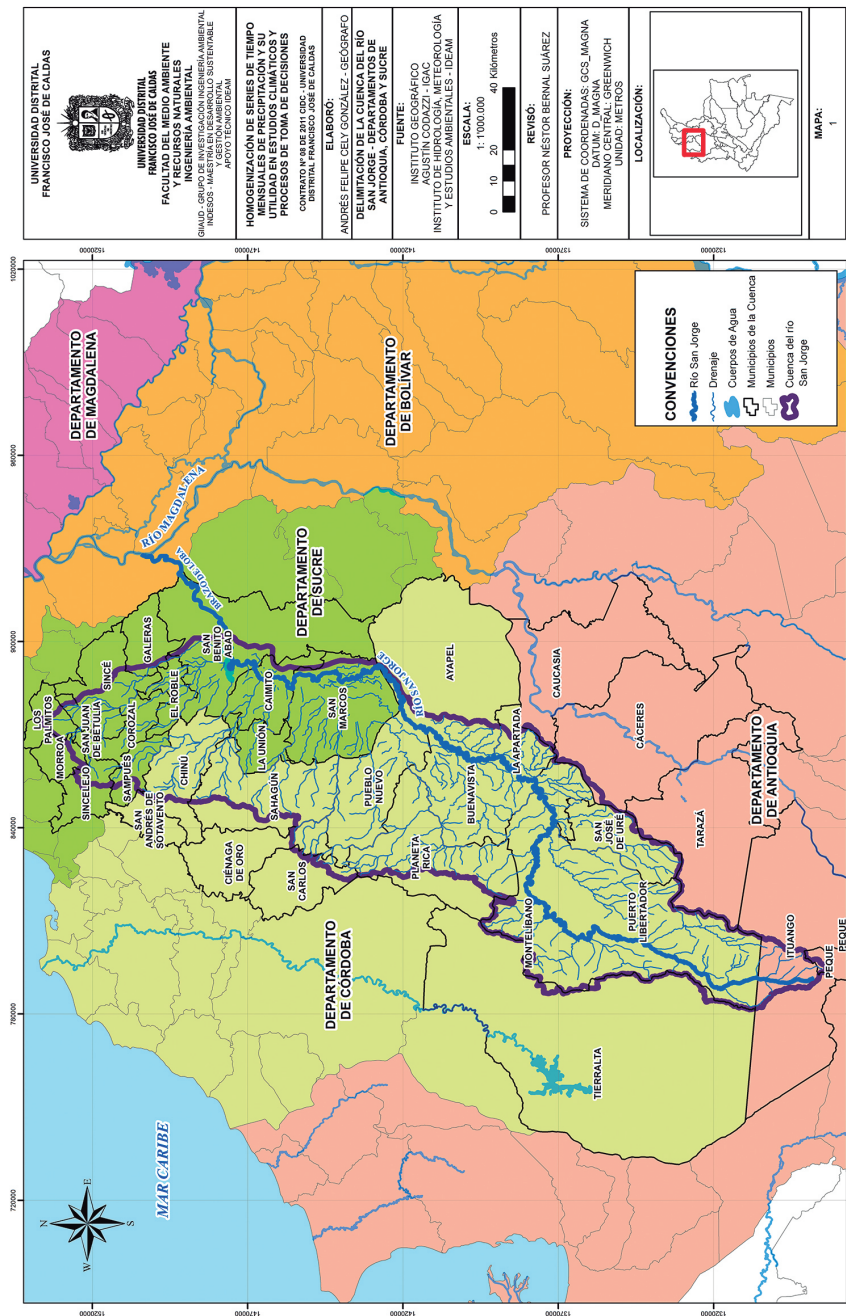
3.2 Zona de estudio

El río San Jorge, como se observa en la mapa 3.1, está ubicado en la costa Caribe de Colombia y su cauce pasa por los departamentos de Antioquia, Córdoba, Bolívar y Sucre. Tiene una longitud de 368 km y una superficie de cuenca de 69 500 km². Su nacimiento se encuentra en el Parque Nacional Natural Paramillo en Antioquia, atraviesa las serranías de San Jerónimo y Ayapel, y desemboca en el Brazo de Loba en el río Magdalena (en Sucre), en la depresión Momposina, la cual es una extensa zona cenagosa e inundable, donde sobresalen las ciénagas San Marcos y Ayapel (CVS, 2008).

El río ha sido dividido en tres cuencas: alta, media y baja. La cuenca alta va desde el nacimiento hasta el caserío de Juan José. La cuenca media se encuentra desde este último caserío hasta Montelíbano, pero de acuerdo con la geomorfología, la cuenca media termina a la altura de Puerto Córdoba, ya que allí aparecen las unidades de basines o “cuencos”. A partir de este último referente, comienza la cuenca baja que se extiende hasta la desembocadura en el Brazo de Loba (CVS, 2008).

Capítulo 3. Utilización de series de tiempo de precipitación homogenizadas para la estimación del caudal del río San Jorge

Mapa 3.1. Cuenca del río San Jorge



Fuente: elaboración propia

Las autoridades ambientales de la cuenca son: la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), la Corporación Autónoma de Sucre (Carsucre), la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB), la Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana), y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN), dado que la cuenca se ubica en el Parque Nacional Natural Paramillo (CVS, 2008).

El río San Jorge atraviesa veintisiete municipios en cuatro departamentos de la siguiente manera: en Antioquia, el municipio de Ituango; en Córdoba, los municipios de Puerto Libertador, Montelíbano, La Apartada, Buena Vista, Ayapel, Planeta Rica y Pueblo Nuevo; en Sucre, los municipios de La Unión, Caimito, San Benito Abad, Majagual, Guaranda, Sucre, Corozal, Galeras, Sincé, Sincelejo, Morroa, Los Palmitos, San Pedro, San Juan de Betulia, Buenavista, Sampués, San Marcos; y en Bolívar, los municipios de Magangué y Achí (CVS, 2008).

3.3 Metodología

3.3.1 Cálculo del área aferente de la cuenca del río San Jorge

Para el cálculo del área de la cuenca, se sobrepusieron las capas de la divisoria de aguas, las curvas de nivel y el drenaje del río mediante el programa ArcGIS. Es de aclarar que no se tomó la parte final que corresponde a una parte nororiental del municipio de San Benito, ya que en este punto es la confluencia del río San Jorge con el Brazo de la Mojana.

Una vez delimitada el área de la cuenca, se procedió a calcular el área correspondiente de los municipios en el río San Jorge mediante el programa ArcGIS.

3.3.2 Estimación del caudal

La estimación del caudal se calculó mediante el programa Stella 9.0.2, teniendo en cuenta la metodología de Beltrán y Rangel (2013), quienes realizaron la modelación hidrológica del humedal Jaboque en Bogotá de la siguiente manera:

Se dividió el área aferente de la cuenca en cuatro secciones:

- Submodelo Cuenca Alta: Ituango, Peque, Puerto Libertador, Montelíbano, San José de Uré y Cáceres.
- Submodelo Cuenca Media 1: La Apartada, Buena Vista, Ayapel y Planeta Rica.
- Submodelo Cuenca Media 2: Pueblo Nuevo, San Marcos, Ayapel, San Carlos, Sahagún y Ciénaga de Oro.

- Submodelo Cuenca Baja: Caimito, San Benito Abad, Sahagún, Chinú, Corozal, El Roble, Galeras, La Unión, Los Palmitos, Morroa, Sampués, San Juan de Betulia, Sincé y Sincelejo.
- El área de Ayapel y Sahagún se dividió en partes iguales para propósitos de la división equitativa para los submodelos.

Para cada submodelo, se tomó la precipitación del municipio con mayor área dentro de la cuenca. Es de tener en cuenta que para el submodelo Cuenca Alta no se encontraron estaciones con datos homogenizados, razón por la cual se tomó la precipitación del submodelo Cuenca Media 1.

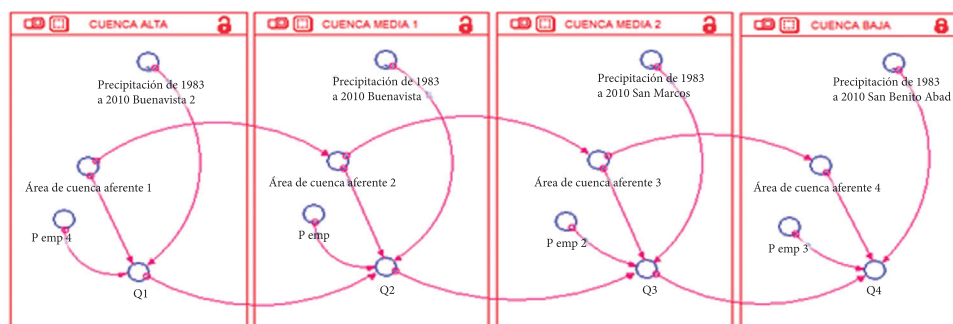
Para el submodelo Cuenca Alta y el submodelo Cuenca Media 1, se utilizaron las series de tiempo mensual de precipitación homogenizados del periodo 1983-2010 de la estación Buenavista, operada por el Ideam, la cual se localiza en cercanías al casco urbano del municipio de Buenavista.

Para el submodelo Cuenca Media 2, se tomaron las series de tiempo mensual de precipitación homogenizados del periodo 1983-2010 de la estación Hacienda el Torno, operada por el Ideam, que se localiza en cercanías al casco urbano del municipio de San Marcos.

Para el submodelo Cuenca Baja se utilizaron las series de tiempo mensual de precipitación homogenizados del periodo 1983-2010 de la estación San Benito Abad, operada por el Ideam, localizada en cercanías al casco urbano del municipio de San Benito Abad.

Por último, se introdujeron los datos de las series de tiempo homogenizadas del periodo 1983-2010 y el área de la cuenca por submodelos en el programa Stella, teniendo en cuenta la fórmula de Abrahamsson y Håkanson (1998) utilizada en la investigación de Beltrán y Rangel (2013). A los submodelos Cuenca Media 1, Cuenca Media 2 y Cuenca Baja se le sumaron el área del submodelo anterior y la estimación del caudal, como se observa en la figura 3.1.

Figura 3.1. Modelo hidrológico de estimación de caudal de
la cuenca alta y la cuenca media del río San Jorge



Fuente: elaboración propia

3.3.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó con la función *Senci Spects*, del programa Stella, en la cual se tomó como variable independiente el área de los submodelos y como variable dependiente los datos estimados de caudal (Beltrán y Rangel, 2013).

3.3.4 Validación del modelo

Para la validación del modelo, se tomaron los datos estimados de caudal en el punto del río San Jorge que pasa por la vereda de Palotal en Ayapel, mediante el sistema River Watch de la Universidad de Colorado (Brakenridge et. al, 2014), el cual estima el caudal de los ríos en forma remota utilizando imágenes de microondas.

Para lo anterior se utilizaron las series de tiempo de caudal de 2002-2010 estimadas del sistema River Watch, y se calculó el error relativo mediante la fórmula:

$$\frac{\text{datos observados}-\text{datos reales}}{\text{datos reales}}$$

Siendo los datos observados el caudal de la Cuenca Alta estimado en el programa Stella y los datos reales los tomados por la estimación del sistema River Watch.

3.4 Resultados

En esta sección, se muestran resultados obtenidos de la estimación del caudal de la cuenca alta y media del río San Jorge, a partir de la modelación de series de tiempo de precipitación homogenizadas y el área de la cuenca.

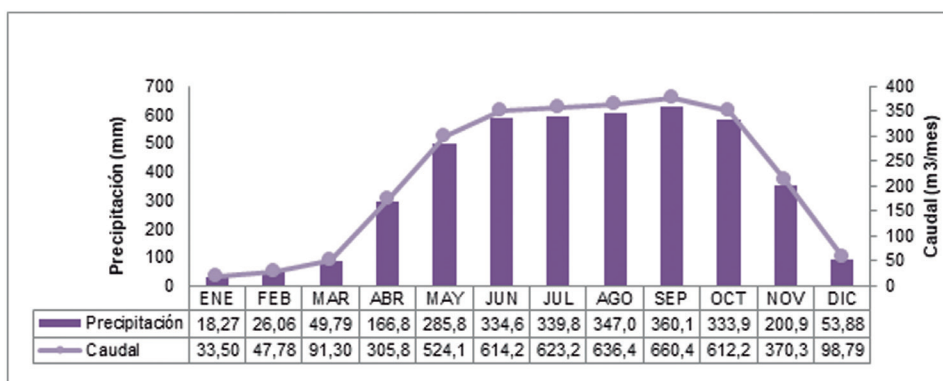
3.4.1 Estimación del caudal

Submodelo Cuenca Alta

- Promedio

Como se observa en la figura 3.2, el caudal promedio tiene un comportamiento similar a la precipitación promedio multianual; los mayores caudales se presentan en agosto con $636,4 \text{ m}^3/\text{mes}$ y septiembre con $660,43 \text{ m}^3/\text{mes}$, mientras que los meses con menor caudal son enero y febrero con $33,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $47,78 \text{ m}^3/\text{mes}$, respectivamente.

Figura 3.2. Precipitación y caudal promedio multianual Cuenca Alta



Fuente: elaboración propia

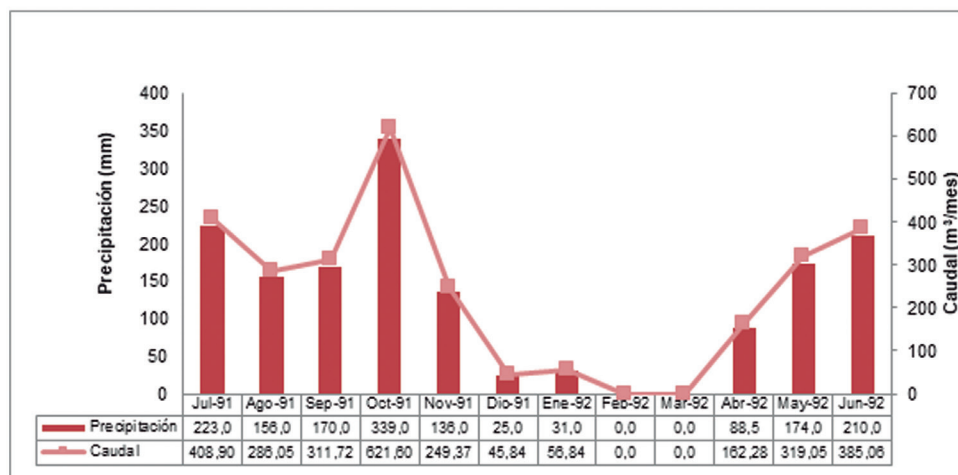
- Evento ENOS Fase Cálida

El caudal en el evento ENOS en su fase cálida (El Niño), entre julio de 1991 y junio de 1992, presentó valores de $0 \text{ m}^3/\text{mes}$ para febrero de 1992 y marzo de 1992, mientras que el mayor caudal se presentó para octubre de 1991 con $621,6 \text{ m}^3/\text{mes}$, como se observa en la figura 3.3.

- Neutro

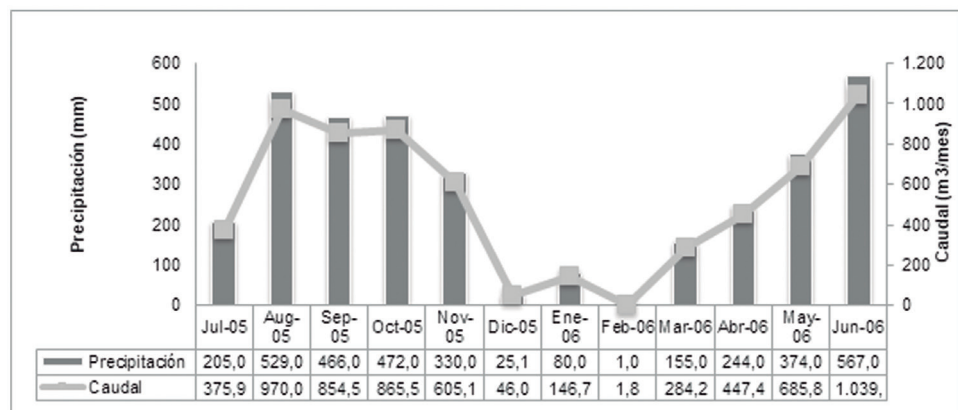
Cuando no se presentó el evento ENOS, en este caso para el periodo comprendido entre julio de 2005 y junio de 2006, el caudal registró para febrero de 2006 valores más bajos con $1,8 \text{ m}^3/\text{mes}$, mientras que los valores más altos los tuvo junio de 2006 con $1039,7 \text{ m}^3/\text{mes}$ (Figura 3.4).

Figura 3.3. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase cálida
(El Niño) para el periodo 1991-1992 en la Cuenca Alta



Fuente: elaboración propia

Figura 3.4. Precipitación y caudal para el periodo 2005-2006 en la Cuenca Alta

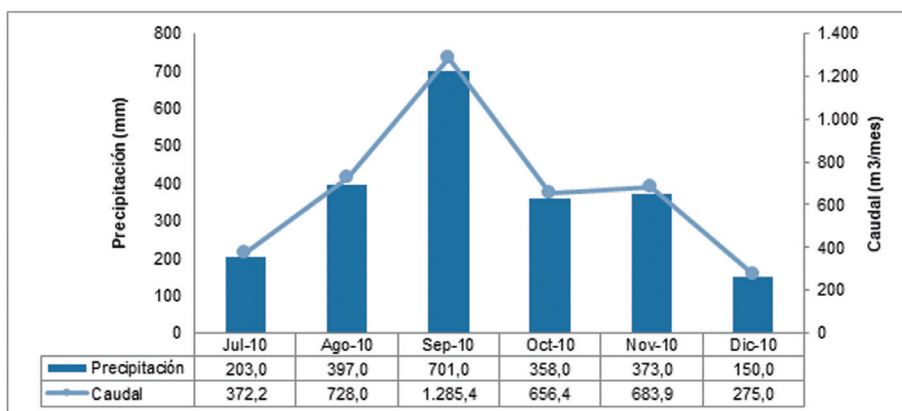


Fuente: elaboración propia

- Evento ENOS Fase Fría

Para el evento ENOS fase fría (La Niña), entre julio y diciembre de 2010, como se observa en la figura 3.5, se presentó un caudal para septiembre de 1285,4 m³/mes, mientras que el menor caudal se presentó para diciembre con 275 m³/mes.

Figura 3.5. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase fría
(La Niña) para el periodo 2010 en la Cuenca Alta



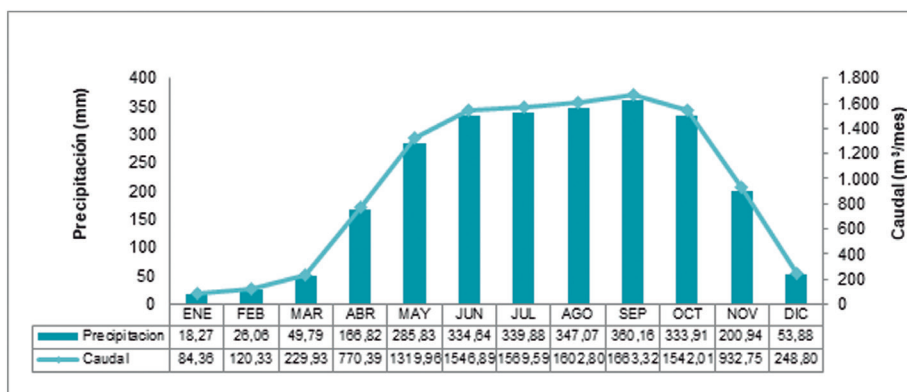
Fuente: elaboración propia

Submodelo Cuenca Media 1

- Promedio

En la figura 3.6, se observa que el caudal promedio en la Cuenca Media 1 tiene un comportamiento similar a la precipitación promedio multianual; se presentan los mayores caudales para agosto con 1602,8 m³/mes y septiembre con 1663,3 m³/mes, mientras que los meses con menor caudal son enero y febrero con 84,36 m³/mes y 120,33 m³/mes, respectivamente.

Figura 3.6. Precipitación y caudal promedio multianual Cuenca Media 1

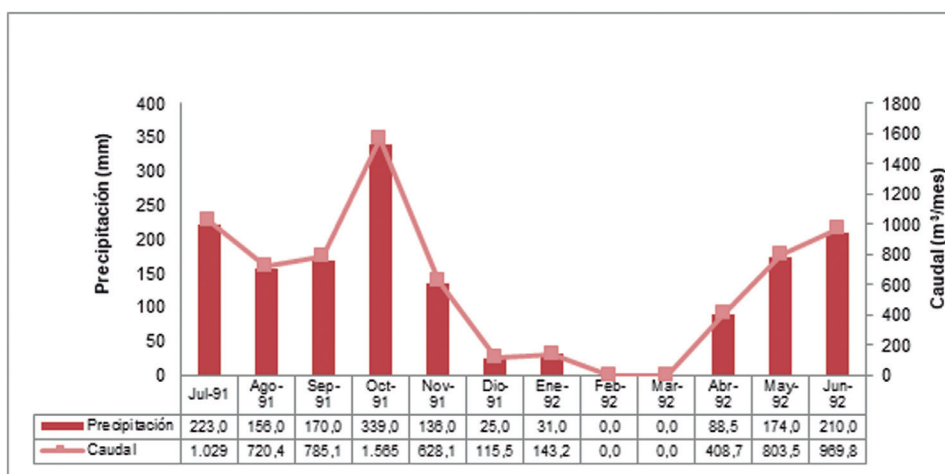


Fuente: elaboración propia

- Evento ENOS Fase Cálida

En la Cuenca Media 1, el caudal en el evento ENOS en su fase cálida (El Niño) entre febrero de 1992 y marzo de 1992 presentó valores de 0 m³/mes, mientras que el mayor caudal se presentó para octubre de 1991 con 1565,5 m³/mes, como se observa en la figura 3.7.

Figura 3.7. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase cálida (El Niño) para el periodo 1991-1992 en la Cuenca Media 1



Fuente: elaboración propia

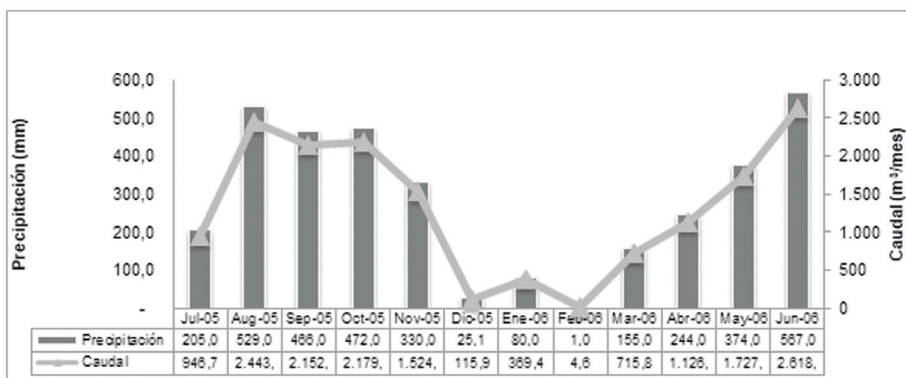
- Neutro

El periodo comprendido entre julio de 2005 y junio de 2006 estuvo enmarcado por la ausencia del evento ENOS. La Cuenca Media 1 presentó para febrero de 2006 valores más bajos con 4,6 m³/mes, mientras que los valores más altos los presentó junio de 2006 con 2618,5 m³/mes (Figura 3.8).

- Evento ENOS Fase Fría

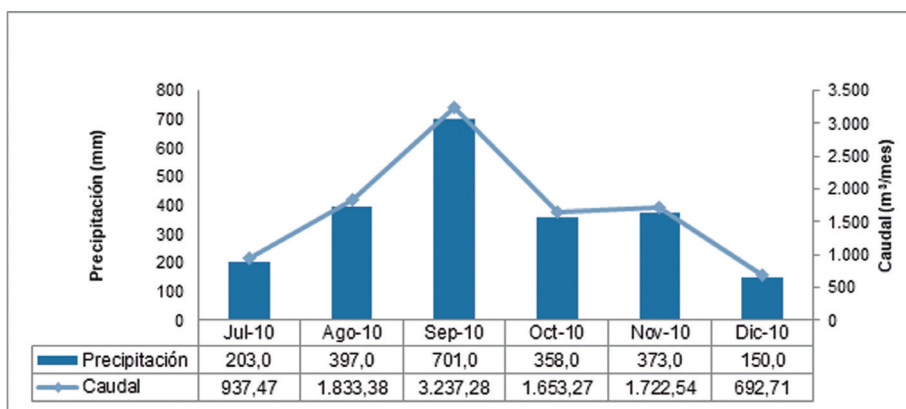
Para el evento ENOS en su fase fría (La Niña), entre julio y diciembre de 2010 el comportamiento del caudal, como se observa en la figura 3.9, se presentó para septiembre con 3237,2 m³/mes, mientras que el menor caudal se presentó para diciembre con 692,7 m³/mes.

Figura 3.8. Precipitación y caudal para el periodo 2005-2006 en la Cuenca Media 1



Fuente: elaboración propia

Figura 3.9. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase fría
(La Niña) para el periodo 2010 en la Cuenca Media 1



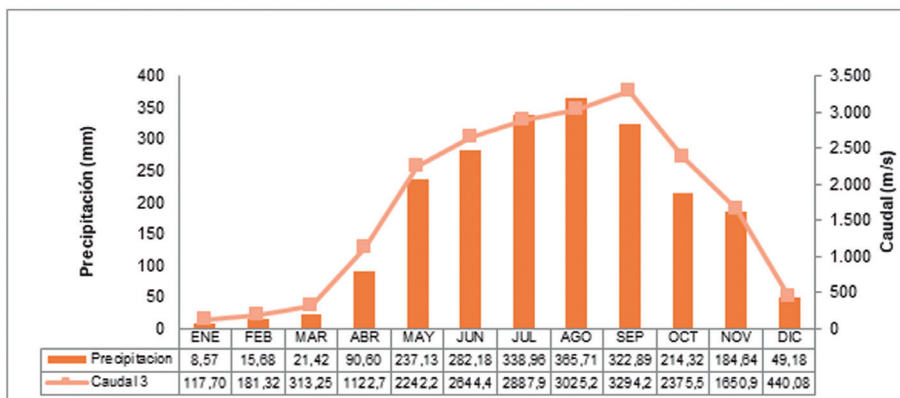
Fuente: elaboración propia

Submodelo Cuenca Media 2

• Promedio

El caudal promedio en la Cuenca Media 2, como se observa en la figura 3.10, tiene un comportamiento similar a la precipitación promedio multianual; se presentan los mayores caudales para agosto 3025,23 m³/mes y septiembre con 3294,2 m³/mes, mientras que los meses con menor caudal son enero y febrero con 117,7 m³/mes y 181,3 m³/mes, respectivamente.

Figura 3.10. Precipitación y caudal promedio multianual Cuenca Media 2

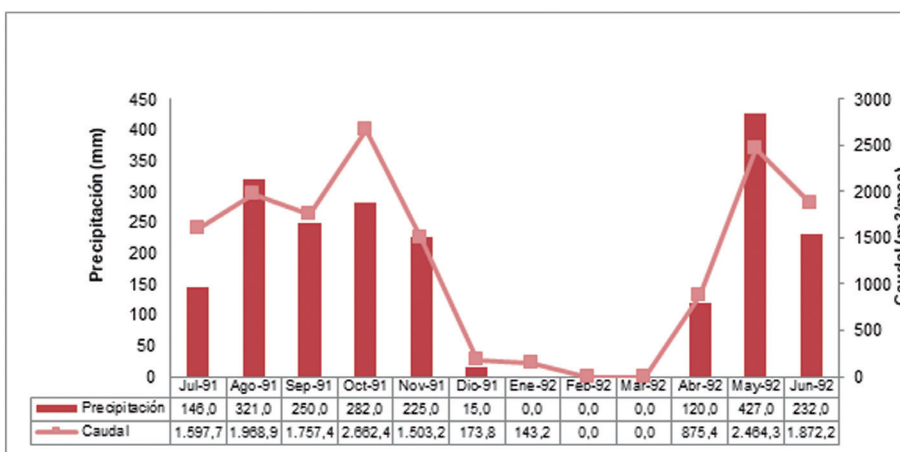


Fuente: elaboración propia

- Evento ENOS Fase Cálida

El caudal en el evento ENOS en su fase cálida (El Niño), entre julio de 1991 y junio de 1992 para la Cuenca Media 2, presentó valores que van desde 0 m³/mes para febrero y marzo de 1992, hasta 2464,3 m³/mes para mayo de 1992, como se observa en la figura 3.11.

Figura 3.11. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase cálida (El Niño) para el periodo 1991-1992 en la Cuenca Media 2

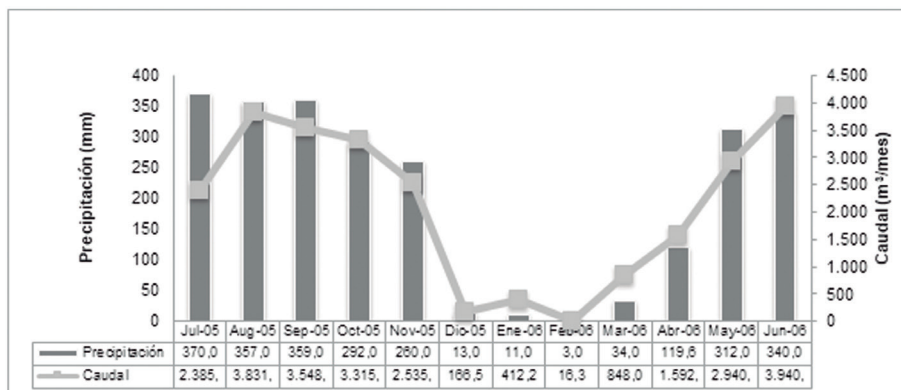


Fuente: elaboración propia

- Neutro

El periodo comprendido entre julio de 2005 y junio de 2006 estuvo enmarcado por la ausencia del evento ENOS. La Cuenca Media 2 presentó para febrero de 2006 valores más bajos con 16,3 m³/mes, mientras que los valores más altos los presentó julio de 2006 con 3940,9 m³/mes (Figura 3.12).

Figura 3.12. Precipitación y caudal para el periodo 2005-2006 en la Cuenca Media 2



Fuente: elaboración propia

- Evento ENOS Fase Fría

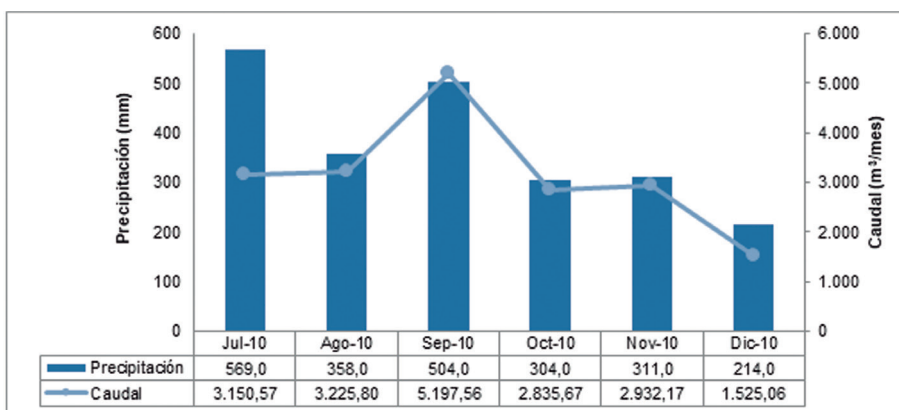
Para el evento ENOS en su fase fría (La Niña), entre julio y diciembre de 2010, el comportamiento del caudal en la Cuenca Media 2, como se observa en la figura 3.13, presentó para septiembre 5197,5 m³/mes, mientras que el menor caudal se presentó para diciembre con 1525 m³/mes.

Submodelo Cuenca Baja

- Promedio

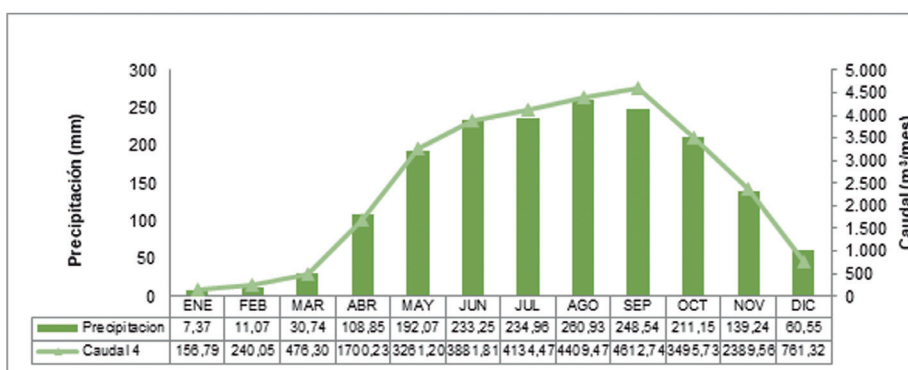
Como se aprecia en la figura 3.14, el caudal promedio observado en la Cuenca Baja tiene un comportamiento similar a la precipitación promedio multianual, y presenta los mayores caudales para agosto con 4409,4 m³/mes y septiembre con 4612,7 m³/mes, mientras que los meses con menor caudal son enero y febrero con 156,7 m³/mes y 240 m³/mes, respectivamente.

Figura 3.13. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase fría
(La Niña) para el periodo 2010 en la Cuenca Media 2



Fuente: elaboración propia

Figura 3.14. Precipitación y caudal promedio multianual Cuenca Baja

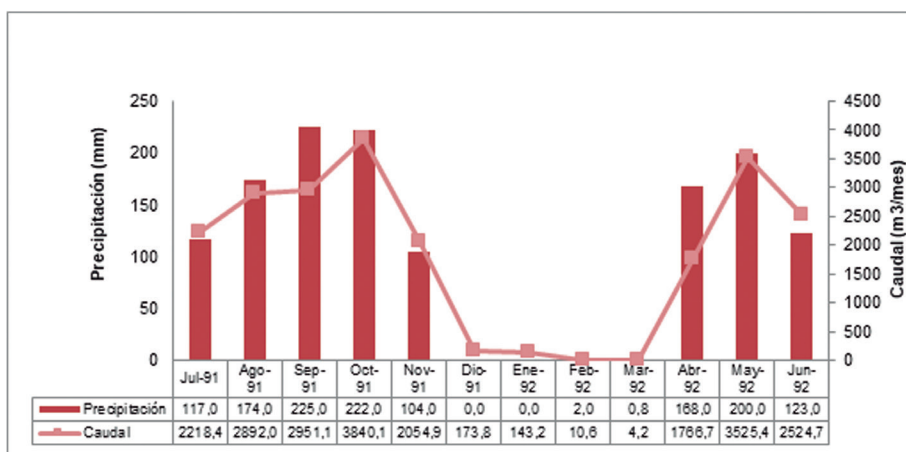


Fuente: elaboración propia

- Evento ENOS Fase Cálida

El caudal en el evento ENOS fase cálida (El Niño), entre julio de 1991 y junio de 1992 presentó un valor mínimo de 4,2 m³/mes para marzo de 1992, mientras que el mayor caudal se presentó para octubre de 1991 con 3840.1 m³/mes, como se observa en la figura 3.15.

Figura 3.15. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase cálida
(El Niño) para el periodo 1991-1992 en la Cuenca Baja

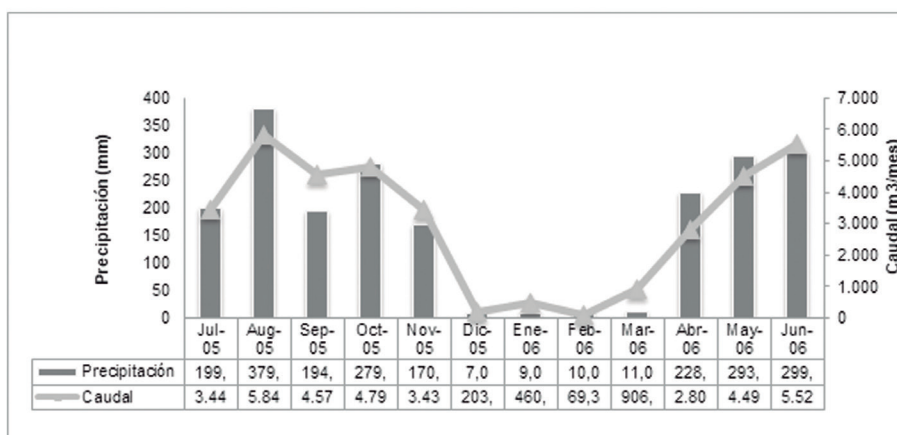


Fuente: elaboración propia

- Neutro

En la Cuenca Baja, cuando no se presenta un evento ENOS, en este caso para el periodo comprendido entre julio de 2005 y junio de 2006, el caudal presentó para febrero de 2006 valores más bajos con 96,3 m³/mes, mientras que los valores más altos los presentó agosto de 2005 con 5842,1 m³/mes, como se observa en la figura 3.16.

Figura 3.16. Precipitación y caudal para el periodo 2005-2006 en la Cuenca Baja

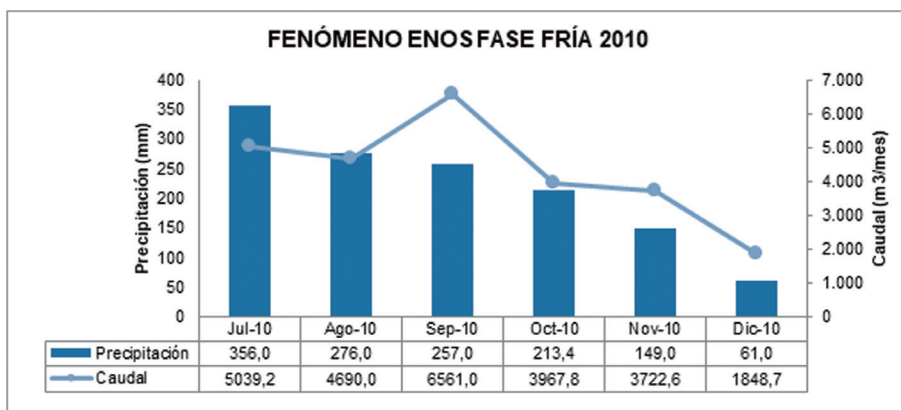


Fuente: elaboración propia

- Evento ENOS Fase Fría

Para el evento ENOS fase fría (La Niña), entre julio y diciembre de 2010, como se observa en la figura 3.17, la Cuenca Baja presentó un caudal para septiembre de 6561 m³/mes, mientras que el menor caudal se presentó para diciembre con 1848,7 m³/mes.

Figura 3.17. Precipitación y caudal en el evento ENOS fase fría (La Niña) para el periodo 2010 en la Cuenca Baja



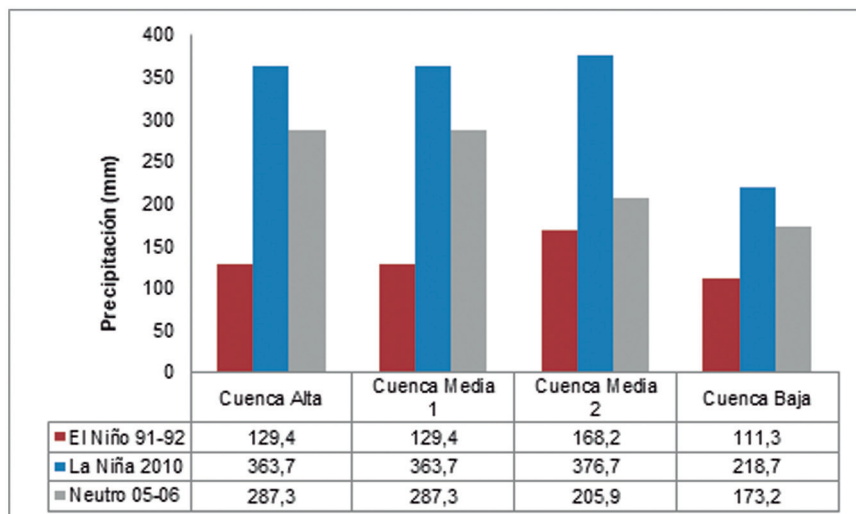
Fuente: elaboración propia

Cuenca río San Jorge

En general, la cuenca del río San Jorge presenta mayores precipitaciones en la Cuenca Alta y a medida que va aguas abajo la precipitación en promedio disminuye, como se puede observar en la figura 3.18. De igual forma, se aprecia que cuando se presenta el fenómeno ENOS en su fase cálida, disminuyen las precipitaciones en promedio hasta 64 % y aumentan en promedio hasta 45 % en la fase fría.

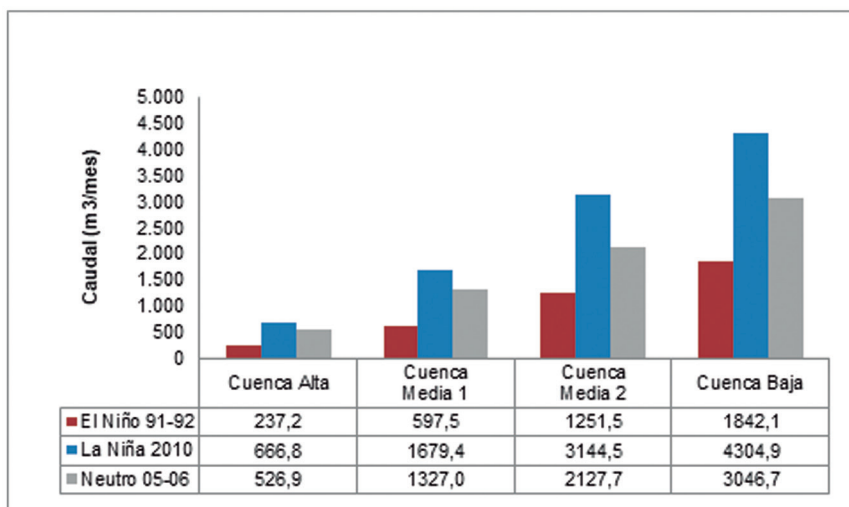
Para el caudal del río San Jorge, se observa que los mayores caudales se presentan aguas abajo y al igual que las precipitaciones, el caudal disminuye hasta 52 % en la fase cálida del fenómeno ENOS y aumenta 39 % para la fase fría, como se observa en la figura 3.19.

Figura 3.18. Precipitación promedio cuenca río San Jorge en el fenómeno ENOS fase fría (La Niña) para el periodo 2010, fase cálida (El Niño) para el periodo 1991-1992 y neutro para el periodo 2005-2006 en la Cuenca Baja



Fuente: elaboración propia

Figura 3.19. Caudal promedio cuenca río San Jorge en el fenómeno ENOS fase fría (La Niña) para el periodo 2010, fase cálida (El Niño) para el periodo 1991-1992 y neutro para el periodo 2005-2005 en la Cuenca Baja



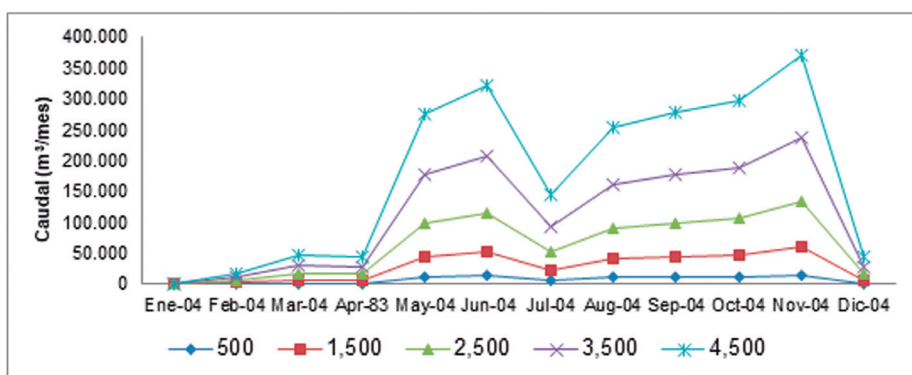
Fuente: elaboración propia

3.4.2 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad, se tomó como variable dependiente el área de la Cuenca Alta (área de la cuenca aferente 1) y como variable dependiente se tomó el caudal en los diferentes submodelos, con el fin de ver el comportamiento del caudal en diferentes áreas de cuenca aferentes.

Para el submodelo Cuenca Alta, en la figura 3.20 se observan los valores del caudal cuando el área va de 500 km² a 4500 km²; se ve que a medida que aumenta el área de cuenca aferente, aumenta el caudal. De igual forma, se observa la concordancia del régimen, siendo de junio a septiembre los meses con mayor caudal.

Figura 3.20. Análisis de sensibilidad Cuenca Alta caudal Q1



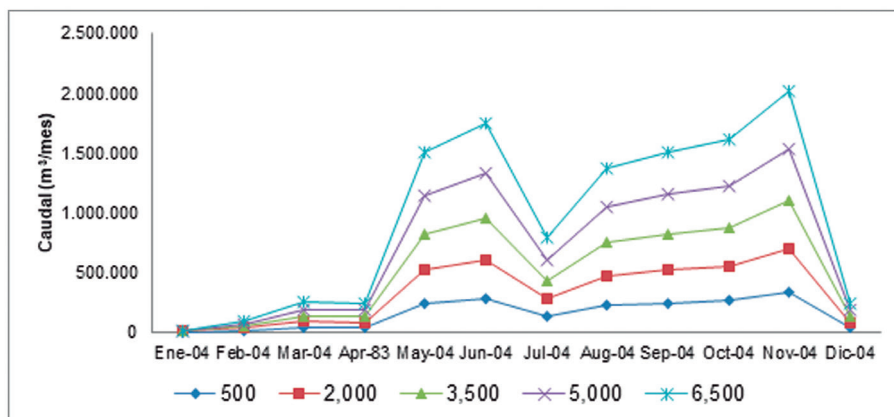
Fuente: elaboración propia

Para el submodelo Cuenca Media 1, se observa en la figura 3.21 que las áreas van de 500 km² a 6500 km²; se encontró un aumento del caudal a medida que aumenta el área de la cuenca aferente.

Para el submodelo Cuenca Media 2, en la figura 3.22 se observan los valores del caudal cuando el área va de 3000 km² a 9000 km²; se ve que a medida que aumenta el área de cuenca aferente, aumenta el caudal. De igual forma, se observa la concordancia del régimen, siendo de junio a septiembre los meses con mayor caudal.

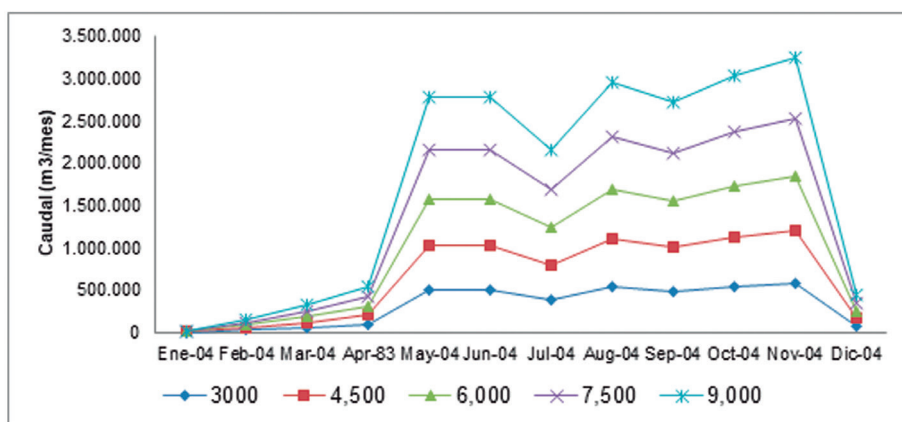
Para el submodelo Cuenca Baja, se observa en la figura 3.23 que las áreas van de 6000 km² a 12 000 km²; se evidenció el aumento del caudal a medida que aumenta el área de la cuenca aferente.

Figura 3.21. Análisis de sensibilidad Cuenca Media 1 caudal Q2



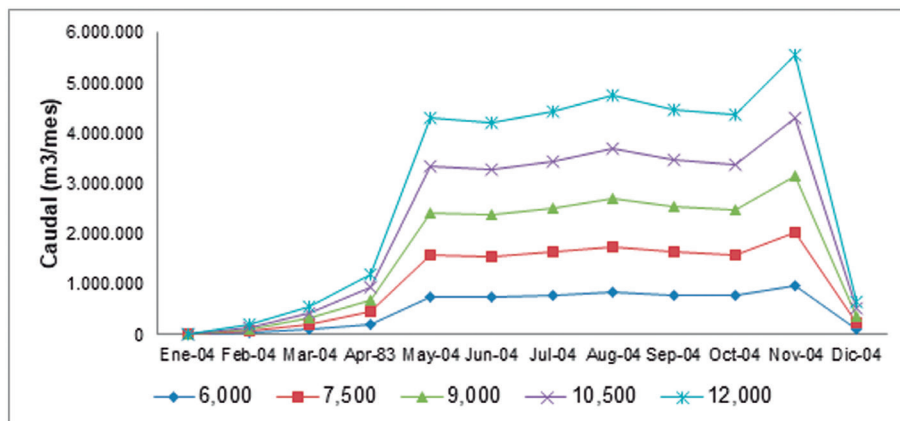
Fuente: elaboración propia

Figura 3.22. Análisis de sensibilidad Cuenca Media 2 caudal Q3



Fuente: elaboración propia

Figura 3.23. Análisis de sensibilidad Cuenca Baja caudal Q4



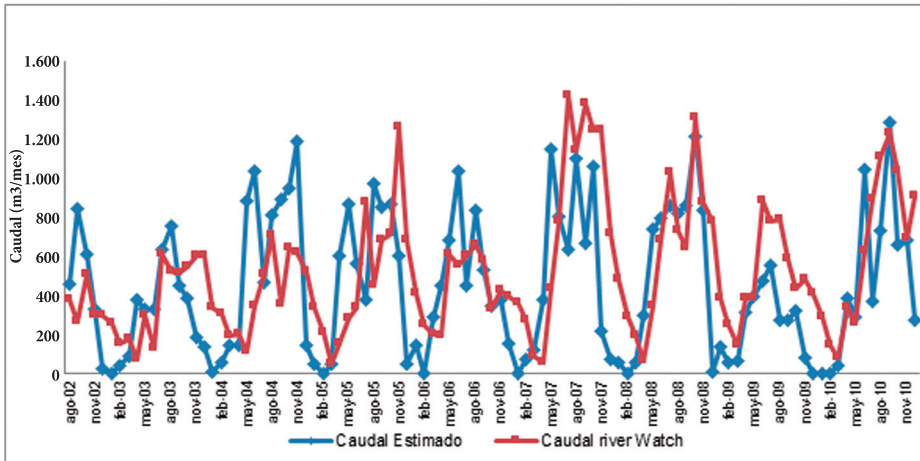
Fuente: elaboración propia

3.4.3 Validación del modelo

Como se observa en la figura 3.24, la tendencia de los dos caudales se mantiene, pues cuando el caudal estimado aumenta o disminuye, sucede lo mismo en los datos de River Watch. Cabe resaltar que el 60 % de los datos obtenidos por el modelo son valores negativos, pero ninguno sobrepasa el valor -1 en el cálculo del error relativo, mientras que el 40 % de los datos son positivos, con cuatro valores extremos (Figura 3.25), tales como: mayo de 2004 con un valor observado de $110,74 \text{ m}^3/\text{mes}$ y un valor estimado de $885,74 \text{ m}^3/\text{mes}$ con un error relativo de 7; abril de 2007 con $375,89 \text{ m}^3/\text{mes}$ para el estimado y $56,63 \text{ m}^3/\text{mes}$ para el observado; abril de 2003 con un valor estimado de $377,73 \text{ m}^3/\text{mes}$ y un valor observado de $66,40 \text{ m}^3/\text{mes}$; y abril de 2008 con $293,38 \text{ m}^3/\text{mes}$ para el valor estimado y $65,17 \text{ m}^3/\text{mes}$ para el valor observado.

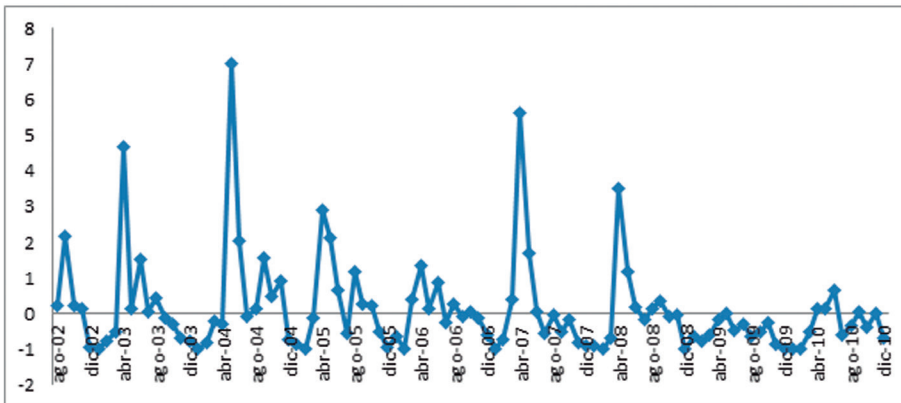
Por último, en cuanto a la regresión lineal, se observa que el coeficiente de determinación (R^2) es de 0,23.

Figura 3.24. Caudal estimado de la modelación versus
caudal estimado por el sistema River Watch



Fuente: elaboración propia

Figura 3.25. Cálculo del error relativo. Datos observados tomados de la
estimación de caudal. Datos reales tomados del sistema River Watch



Fuente: elaboración propia

3.5 Discusión

Se conoce que los efectos en las precipitaciones generadas por el fenómeno ENOS en la región Caribe en su fase cálida (El Niño) producen disminuciones de las lluvias y en su fase fría (La Niña) generan aumentos en las precipitaciones (Pabón et

al., 1998). Esta variación se observa a lo largo del río San Jorge (Figuras 3.19 y 3.20), con una disminución en promedio del 64 % de las precipitaciones y del 52 % del caudal en el evento El Niño 1991-1992, y con un aumento en promedio del 145 % de las precipitaciones y del 136 % del caudal en el evento La Niña 2010. Resultados similares se han observado en el río Dagua por Gutiérrez et al. (2013), estudio en el que se evidenciaron aumentos de hasta el 50 % y reducciones del 40 % en el caudal del río en los dos eventos del fenómeno ENOS. De igual forma, Poveda et al. en 1998 y en 2002 y Poveda en 2004 registraron datos similares para el río Cauca debido a la influencia del fenómeno ENOS en la hidroclimatología de Colombia.

Así mismo, se observó que el patrón del caudal estimado del río San Jorge es similar al patrón de las precipitaciones, como se observa en las figuras 3.3, 3.7, 3.11 y 3.15. Dicho resultado se encontró en el estudio de Beltrán y Rangel (2013) al estimar la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque en Bogotá con el modelo de Abrahamsson y Håkanson (1998), utilizado en este trabajo. También se encontró, en los trabajos de Gutiérrez et al. (2013) y Poveda et al. (2002), que la concordancia del patrón es entre el componente climático, para este caso la precipitación, en la estimación del caudal.

Igualmente, el modelo utilizado para estimar el caudal del río San Jorge no presenta una correlación alta entre los datos estimados y los observados, lo cual puede deberse a que no se tienen datos reales tomados en diferentes puntos del río, como sí los tienen los trabajos de Beltrán y Rangel (2013), de Gutiérrez et al. (2013) y de Poveda et al. (2002), entre otros. Los datos observados fueron tomados de la estimación realizada por la metodología de River Watch.

Sin embargo, los datos estimados sí permiten tener una mirada de la tendencia del caudal a lo largo del río San Jorge, como se aprecia en la figura 3.24, al notar que el caudal estimado y el caudal observado poseen una tendencia similar. Igualmente, se puede evidenciar que el caudal estimado se comporta de manera coherente en los periodos con presencia de ENOS. Dichos resultados se han visto en otros modelos como los presentados por Sánchez y Poveda en 2006 al utilizar el modelo no paramétrico MARS en cuatro ríos de Antioquia.

Por último, es importante resaltar que este modelo para la estimación de caudales, utilizando la precipitación y el área de la cuenca aferente, puede ser de gran ayuda cuando no se tiene una estación que mida el caudal y no se cuente con mucha información sobre el río que se pretende analizar, como es el caso del San Jorge. De igual forma, es importante tener datos confiables que estén homogenizados y completos para estimar la tendencia del caudal cuando se presenten anomalías en las series, con el fin de ayudar a la predicción de inundaciones.

Referencias bibliográficas

- Abrahamsson, O. y Håkanson, L. (1998). Modelling Seasonal Flow Variability of European Rivers. *Ecological Modelling*, 114(1), 49-58.
- Beltrán, J. y Rangel, J. O. (2013). Modelación hidrológica del humedal de Jaboque-Bogotá, D.C. (Colombia). *Caldasia*, 35(1), 81-101.
- Bryhn, A. C. y Håkanson, L. (2007). A Comparison of Predictive Phosphorus Load-concentration Models for Lakes. *Ecosystems*, 10(7), 1084-1099.
- Brakenridge, G. R., Kettner, A., Syvitski, J. y Overeem, I. (2014). *River Watch, Satellite River Discharge and Runoff Measurements: Technical Summary*. University of Colorado. <http://floodobservatory.colorado.edu/AMSR-E%20Gaging%20Reaches/140.htm>
- Correa, E. (Comp.). (2011). *Reasentamiento preventivo de poblaciones en riesgo de desastre: experiencias de América*. Banco Mundial.
- Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS). (2008). *Plan de Gestión Ambiental Regional 2008-2019*. CVS.
- Gutiérrez, S. E., Carvajal, Y. y Ávila, A. J. (2013). Estudio de la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Dagua. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 7(13), 26-33. <http://dx.doi.org/10.31908/19098367589>
- Håkanson, L. (1996). A New, Simple, General Technique to Predict Seasonal Variability of River Discharge and Lake Temperature for Lake Ecosystem Models. *Ecological Modelling*, 88(1-3), 157-181.
- Håkanson, L. (2006). A Dynamic Model for Suspended Particulate Matter (SPM) in Rivers. *Global Ecology and Biogeography*, 15(1), 93-107.
- Håkanson, L. (2011). Reconstruction of the Eutrophication in the Gulf of Finland using a Dynamic Process-based Mass-Balance Model (pp. 301-322). En A. G. Friedman (ed.), *Lagoons: Biology, Management and Environmental Impact*. Nova Science Publishers.
- Håkanson, L. y Bryhn, A. C. (2008). A Dynamic Mass-balance Model for Phosphorus in Lakes with a Focus on Criteria for Applicability and Boundary Conditions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 187(1-4), 119-147.
- Håkanson, L. y Stenström-Khalili, M. I. (2010). How important are Local Nutrient Emissions to Eutrophication in Coastal Areas compared to Fluxes from the Outside Sea? A Case-study using Data from the Himmerfjärden Bay in the Baltic Proper. En A. G. Friedman (ed.), *Lagoons: Biology, Management and Environmental Impact*. Nova Science Publishers.

- Hoyos, I. C. y Baquero, A. (2011). *Evaluación del ciclo hidrológico y del balance de energía en la cuenca vertiente del Caribe colombiano* [ponencia]. IX Congreso Colombiano de Meteorología: “200 años de la meteorología y la climatología en América Latina”, Bogotá, marzo 23-25 de 2011.
- Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (Ideam). (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Ideam.
- Malmaeus, J. M. y Håkanson, L. (2003). A Dynamic Model to Predict Suspended Particulate Matter in Lakes. *Ecological Modelling*, 167(3), 247-262.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) e Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (Ideam). (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Ideam.
- Pabón, J. D., Zea, J., Montealegre, J. E., Hurtado, G. y González O. C. (1998). El medio ambiente en Colombia. En P. Leyva (ed.), *La atmósfera, el tiempo y el clima* (pp. 81-85). Ideam.
- Poveda Jaramillo, G., Vélez Upegui, J. I., Mesa Sánchez, Ó. J., Ceballos Bonilla, L. I., Zuluaga Arias, M. D. y Hoyos Ortiz, C. D. (2002). Estimación de caudales mínimos para Colombia mediante regionalización y aplicación de la curva de recesión de caudales. *Meteorología Colombiana*, (6), 73-80.
- Poveda Jaramillo, G., Vélez Upegui, J. I., Mesa Sánchez, Ó. J. y Hoyos C. D. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, (6), 121-130.
- Poveda Jaramillo, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Sánchez Molina, J. y Poveda Jaramillo, G. (2006). *Predicción de caudales medios mensuales en ríos de Antioquia* [ponencia]. XVII Seminario Nacional Hidráulica e Hidrología: “Conocimiento e ingeniería para la conservación y aprovechamiento del agua”, Popayán, Colombia, septiembre 15-16 de 2006.
- Vilches, O. (s. f.). *Evaluación de la peligrosidad por inundación fluvial en el curso inferior del río Maipo-región de Valparaíso, Chile*.

Capítulo 4. Modelación para la toma de decisiones: el pequeño agricultor y la calidad en los datos de precipitación, una perspectiva para el desarrollo sustentable

YULI CARMENZA IBARRA BURBANO

JULIO EDUARDO BELTRÁN VARGAS



Vegetación finca, municipio de San Marcos, Sucre

Foto: Marcos Ramos

La toma de decisiones es un tipo de comportamiento que viabiliza la forma de actuar frente a una determinada situación; su objetivo es obtener un procedimiento preciso de las decisiones frente al impacto que genere un fenómeno de la realidad, a partir de un conjunto de datos que la describan (Stewart, 1997). Es una actividad que en los diferentes niveles de organización se debe desarrollar a diario; sin embargo, sigue siendo una de las funciones más difíciles de los administradores (Laudon y Laudon, 2004). Más allá de la escala en la que se maneje, cuando se enfrenta a problemas ambientales, la decisión está envuelta en abundante incertidumbre, en conflictos de valores y en malas condiciones institucionales, entre otras; y son los individuos, los grupos y las organizaciones los que están a cargo de la investigación básica sobre los procesos de decisión (Brewer y Stern, 2004).

Entre los fenómenos que se pueden estudiar para estructurarse como un proceso de toma de decisiones está la capacidad de anticipar la variabilidad del clima como estrategia principalmente desarrollada por los sectores económicos (Andonova y Lugon, 2009). La variabilidad climática es uno de los desafíos ambientales que la sociedad enfrenta como consecuencia directa o indirecta de las decisiones que se han tomado sobre el desarrollo de actividades económicas, sociales y políticas (Audsley et al., 2006). Sin embargo, el medio ambiente y los problemas asociados a él reflejan escenarios en los que se siguen requiriendo los procesos de toma de decisiones, esta vez como estrategias de gestión que incidan positiva o negativamente en la calidad ambiental y por ende en la calidad de vida (Brewer y Stern, 2004).

A través de los años, la relación sociedad-naturaleza no se ha desarrollado dentro de los lineamientos de la sustentabilidad. El hombre se ha encargado de sobrepasar la capacidad de carga de los ecosistemas obligando a implementar estrategias de mitigación dado que ya los impactos no pueden revertirse; o necesariamente forzando la adaptación en las nuevas condiciones del ambiente. La variabilidad climática, sea por causas naturales o antropogénicas, está generando esas condiciones ambientales cambiantes que proyectan un futuro desconocido e incierto, en el que gestionar los recursos naturales en un escenario de incertidumbre requerirá un compilado de estrategias a corto y a largo plazo que conformen un conjunto de enfoques que pueden adoptarse para el mejoramiento de la resistencia, la resiliencia y la respuesta de los ecosistemas (Millar et al., 2007).

Desde la publicación del conocido informe Brundtland, el desarrollo sustentable es un término que utilizan y conceptualizan frecuentemente los responsables en la toma de decisiones (Cendrero, 1997). Estos son quienes generalmente tienen la presión de ofrecer soluciones inmediatas a los problemas que se presentan, y de que los efectos de la decisión se vean en lapsos usualmente cortos e independientemente del sector público o privado al que pertenezcan (Baethgen, 2006). La variabilidad climática, pese a los escenarios llenos de incertidumbre, es uno de los problemas de la actualidad que deberá enfrentar el tomador de decisiones; en busca de la concertación de las dimensiones de la sustentabilidad, deberá formular estrategias de gestión bajo las condiciones estrictas de cómo aprovechar el clima como un factor ambiental cambiante, en el progreso social y económico que demandan algunas actividades productivas de comunidades y regiones.

Según lo descrito por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, la sensibilidad que demuestra un sistema para enfrentarse a los efectos adversos provenientes de los cambios en el clima es el grado de vulnerabilidad al que este se expone; y depende básicamente de la forma, la magnitud y el nivel de variabilidad climática, así como de la capacidad de adaptación que tengan dichos sistemas. Ajustarse espontánea y ordenadamente a entornos nuevos o cambiantes es lo que se conoce como capacidad de adaptación, en la que los sistemas humanos y naturales se ajustan a un cambio climático para moderar riesgos potenciales, para aprovechar oportunidades y para enfrentar las consecuencias; y en la medida en que la adaptación se desarrolle apropiadamente, es posible reducir la vulnerabilidad (Gitay et al., 2002).

Bartolomé et al. (2004) señalan que uno de los sectores más castigados por la variabilidad climática es la agricultura. Bajo un enfoque de sustentabilidad, se ha concebido como el resultado del progreso y la interacción de los sistemas sociales, económicos y naturales (Altieri, 2002). Un ecosistema agrario o, en su defecto, un sistema agrario, incluyendo dentro de este las actividades y elementos propios de la agricultura y las comunidades que dependen de ella (Riquelme et al., 2001), han venido evidenciando su fragilidad frente a fenómenos naturales (Ponvert-Delisle et al., 2007); y aunque el concepto de vulnerabilidad es ampliamente utilizado, es posible centrarlo en los impactos negativos de los eventos meteorológicos extremos (Downing et al., 1999), tales como las sequías e inundaciones que afectan particularmente a la agricultura campesina o de pequeños productores (Giger y Hoeggel, 2011). El tomador de decisiones, sea este el agricultor o el representante del nivel local, regional o nacional, en el marco de la sustentabilidad, propende al desarrollo del sector e intenta reducir su vulnerabilidad. Modelos de

gestión que asumen procesos de planificación plantean disminuir las condiciones de riesgo (Ponvert-Delisle et al., 2007).

Con este trabajo, se pretende conocer diferentes métodos de modelación que se hayan utilizado como herramienta para la toma de decisiones en la agricultura, cuyo principal insumo sea la información climática y especialmente datos confiables de precipitación; además, se busca identificar la importancia del uso de dicha información para el sector agrícola, el papel que juega el pequeño agricultor frente a esta era de variabilidad climática y la necesidad de adoptar procesos de toma de decisiones, como estrategias de manejo y gestión de la tierra agrícola.

El fenómeno El Niño, en muchas partes del mundo, es la mayor fuente de variabilidad climática de la escala estacional a interanual (Podestá et al., 2002); es posible afirmar que el manejo de la información climática, especialmente aquella que representa la variabilidad asociada al exceso o el déficit de las lluvias, depende de las fases cálidas o frías de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Sivakumar et al., 2005) y ofrece al agricultor la posibilidad de tomar decisiones en cuanto a mitigar o prevenir los impactos del fenómeno (Bert et al., 2006).

Ahora bien, el agricultor determina el clima de su región y vincula sus decisiones principalmente a un patrón de comportamiento histórico basado en la práctica; no cuenta con información que le ayude a prever las condiciones climáticas de su entorno y básicamente se orienta por el comportamiento de la precipitación y la temperatura a lo largo de su vida (Bartolomé et al., 2004). Esto demuestra la importancia de conocer el comportamiento de las lluvias entre un año y otro (Montes, 2010) con bases de datos robustas y suficientemente válidas que garanticen la calidad de la información (Hidalgo et al., 2002).

Stewart (1997) plantea que al mejorar la calidad de la información climática, se podrían minimizar los efectos adversos del clima y aprovechar sus impactos positivos. Datos de alta calidad podrían obtenerse después de utilizar técnicas de homogenización (Barros López, 2010); esto hace que posibles errores, como los cambios en la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas, los cambios en los instrumentos de medición, los cambios en el observador y el deterioro de los instrumentos de medición, entre otros, puedan depurarse y permitan consolidar esta información en series con coherencia temporal y espacial que representen la variabilidad del clima, ya sea con respecto a la precipitación u otro elemento climatológico.

Datos de alta calidad que puedan suministrarse después de un proceso de homogenización serían de gran apoyo a la planificación y a la toma de decisiones

(Auer et al., 2008). Al usar información climática oportuna y de calidad, el pequeño agricultor podría tomar decisiones sobre el manejo de sus cultivos (Inostroza, 2009); esta información contribuiría, principalmente, a estructurar procesos de planificación agrícola (Pérez et al., 2009) de utilidad para las administraciones locales.

Los administradores se involucran en la solución de los problemas, en la toma de decisiones y en la planificación, dando especial importancia a la herramienta de apoyo que se haya utilizado para decidir (De la Rosa et al., 2004). Mientras en la administración de negocios la información es poder, en la administración de recursos naturales, por la complejidad de los sistemas, la información es imprecisa, fragmentada, las bases de datos no son lo suficientemente robustas (Fallas, 2002). En labores preventivas de eventos de alto impacto, por ejemplo, es prioritario la disponibilidad de información y la eficacia de las herramientas que la manejen (Santana y Escobar, 2011).

La variabilidad climática y sus impactos en los países de Latinoamérica difieren de una región a otra. Analizar la ocurrencia de los cambios en la precipitación (sequía e inundaciones) asociados con el fenómeno de El Niño y La Niña que afectan especialmente a la agricultura, e identificar la reacción de los cultivos al evento adverso, permitiría estudiar dicha variabilidad para adoptar acciones gubernamentales que busquen la mitigación de sus posibles efectos (Sivakumar et al., 2005). La planificación del desarrollo sostenible en estos países deberá integrar la vulnerabilidad, la gestión y la adaptación a los eventos climáticos extremos (Mirza, 2003).

La vulnerabilidad no está dada únicamente por la variación que presenta el clima año tras año, sino también por la dificultad de poder prever dichas variaciones; esto hace que la decisión agrícola sea crítica bajo ciertas condiciones climáticas, dado que tiene que adoptarse mucho antes de que se materialice el impacto de la variabilidad (Hansen, 2002). Para valorar y entender los impactos de aspectos predecibles en los cambios de clima, se requiere la disponibilidad de los registros históricos de la producción (Hansen et al., 2001); comprender cómo las decisiones pueden beneficiarse de los pronósticos del clima requiere la capacidad de anticiparse a los resultados asociados a cada opción de decisión en condiciones de pronóstico diferentes. La producción agrícola no es una función simple de condiciones climáticas promedio que suelen pronosticarse, sino que es una respuesta a las interacciones dinámicas entre el clima, el suelo, el medio ambiente biótico, y la fisiología y fenología del cultivo (Hansen, 2002).

Diversos estudios muestran que los elementos en la toma de decisiones se pueden ilustrar en cuanto al uso de pronósticos del tiempo y el clima en diferentes

escalas geográficas (finca, región, nacional y global), en diferentes escalas de tiempo (días, meses, años) y considerando o conjugando las relaciones dinámicas del sistema agrícola (Coughlan y Huda, 2008). Sin embargo, los escenarios de incertidumbre que plantea la variabilidad del clima desmotivan al agricultor, hacen que prefiera actividades que en promedio sean más rentables y que rechace el riesgo de enfrentar climas extremos con estrategias preventivas; en la medida en que la incertidumbre disminuya, el medio de subsistencia del agricultor mejora y se abre además la posibilidad a la inversión, el mercado y la adopción de tecnologías (Hansen et al., 2009). Además, considerando que la actividad agrícola se caracteriza por la incertidumbre debido a diversos factores ambientales y económicos, la toma de decisiones puede darse a nivel operativo, táctico o estratégico, dependiendo del horizonte temporal en que afecte la decisión (Martín, 2009).

A su vez, la toma de decisiones puede apoyarse en herramientas tecnológicas, que dispongan de bases de datos confiables, modelaciones y de una interface de usuario fácilmente manejable, gráfica e interactiva (Shim et al., 2002). En la actualidad, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha identificado el uso de información climática en herramientas de apoyo para la toma de decisiones en diferentes sectores sociales y económicos (Nyenzi y Malone, 2003). En Colombia, el Ideam desarrolla un informe mensual de predicción climática y sus recomendaciones para el sector agrícola; agremiaciones como Cenicafé, Cenicaña, Fedepalma y Fedearroz también poseen redes meteorológicas a una escala subregional, las cuales permiten monitorear elementos climáticos como la precipitación y la temperatura que les facilitan la planificación de sus cultivos.

Para que un agricultor enfrente el desafío de descifrar las múltiples interacciones entre el conjunto de estrategias viables de decisiones y el rango de variabilidad climática, se pueden caracterizar opciones de decisión de tipo descriptivo u opciones de tipo prescriptivo o normativo (Stern y Easterling, 1999). La primera se fundamenta en la experiencia, en la observación de cómo el tomador de decisiones enfrenta y prevé las condiciones climáticas en el contexto en el que se desarrolle y bajo las limitaciones agroecológicas y socioeconómicas de su entorno, es un escenario de prueba y error (Hansen, 2002; Phillips et al., 2002).

En la segunda opción, se utiliza la modelación, en la que se evalúan las opciones basadas en una norma (maximizar la utilidad esperada) y se refleja la creencia subjetiva de la toma de decisiones, mostrándose como una ventaja cuando la creencia se basa en una prueba o una estimación científica (Seip y Wenstop, 2006); esta opción permite utilizar modelos de simulación de rendimiento de los cultivos u otras variables de respuesta biofísica (Hansen, 2002). Respectivamente, las principales

debilidades son la demanda de información a cargo del conocimiento de los agricultores (Martín y Sherington, 1997) y la tendencia a asumir indiferencia al riesgo; es decir, la maximización del beneficio esperado (Stern y Easterling, 1999).

La modelación se ha implementado con diversos métodos, cada uno con capacidades diferentes y con la posibilidad de mejorar la comprensión de procesos (Lambin et al., 2000). Bontkes y Keulen (2003) señalan que para modelar el comportamiento del agricultor se pueden utilizar tres métodos: el enfoque econométrico, en el que se utiliza estadística de un gran conjunto de datos históricos; la programación matemática, que permite la maximización de recursos; y la modelación utilizando reglas de decisión, en la que la realidad sufre un proceso de simulación cualitativa de los elementos que conforman el sistema.

En la agricultura, la modelación ha tenido gran trayectoria y desarrollo, y existe un gran número de modelos formulados con diversos métodos que apoyan la toma de decisiones en el sector; diferentes ejemplos pueden mencionarse al respecto, en especial, aquellos modelos que han utilizado información meteorológica.

Por ejemplo, Rounsevell et al. (2003) plantean integrar la simulación de procesos de toma de decisiones para la optimización de la actividad agrícola (modelo integrado de explotación SFARMMOD), con la respuesta de los cultivos a su entorno físico (modelo de crecimiento ACCESO), como un enfoque para modelar a nivel regional la distribución espacial del uso de la tierra agrícola; utilizan variables climáticas, topográficas y de suelos, combinadas con información económica. El resultado de la modelación da cuenta de una representación territorial regional, de las tendencias espaciales del uso agrícola del suelo. En este estudio, es de principal interés el reconocimiento del clima como una función básica para modelar el crecimiento de los cultivos; y de los modelos, como medios de representación de procesos de gestión y decisión.

Por otra parte, Audsley et al. (2006) estudian los cambios en el uso de la tierra agrícola, teniendo en cuenta escenarios climáticos y sociotécnico-económicos en función de la rentabilidad. Determinan el uso en intensivo, extensivo o de abandono, e identifican que las decisiones políticas deberán direccionarse más hacia los cambios que generan los escenarios socioeconómicos. Realizan modelación con SFARMMOD y ROIMPEL; particularmente este último utiliza, además de las variables de suelos, datos meteorológicos diarios para determinar el rendimiento de los cultivos.

Podestá et al. (2002) usan la modelación para determinar la vulnerabilidad agrícola a la variabilidad del clima ENOS, utilizan series de tiempo para el componente

agronómico de la simulación, generan la distribución del rendimiento para cada fase del fenómeno climático y analizan la información para el componente financiero. Siguiendo a la modelación, plantean la estructuración de medidas de gestión para enfrentar el riesgo agrícola.

Entre los modelos de simulación de cultivos que utilizan bases de datos climáticas está también el sistema de soporte de decisiones para la transferencia de agrotecnología DSSAT; es una compilación de programas que operan conjuntamente para simular el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de un cultivo, en función de la dinámica suelo-planta-atmósfera. El desarrollo DSSAT exigió que por condiciones de compatibilidad, modelos previos como CERES, PNUTGRO y SOYGRO fueran revisados (Jones et al., 2003).

Está también el modelo matemático de circulación general GCM, un modelo climático global en el que se integran programas para la simulación de la atmósfera y el océano. En el estudio de Hansen et al. (2009), lo utilizan para determinar el riesgo de la pequeña agricultura frente a la previsión; se basan en pronósticos de precipitación estacional y las decisiones para manejar fertilizantes; el rendimiento de cultivos lo analizan con APSIM, modelo de simulación que utiliza variables meteorológicas. Whopper Cropper es otro *software* basado en la modelación con APSIM, que busca explorar estrategias de gestión bajo la predicción estacional del clima (Hammer et al., 2001).

Bert et al. (2005) señalan que la fuente de incertidumbre y riesgo de los sistemas agrícolas es principalmente la variabilidad climática, y considerando que la información climática debe ser relevante para las decisiones de producción (Jones et al., 1999), identifican el uso de esta información en un proceso de toma de decisiones, construyendo un mapa independiente para las principales decisiones que hay que tomar en un cultivo.

La mayor parte de los modelos integran un conjunto de variables que buscan identificar el rendimiento de cultivos utilizando información climática en condiciones de pronóstico; por la demanda de información y complejidad de los modelos mencionados con anterioridad, es posible acondicionar la simulación trabajada por Bert et al. (2005) y vincular en un solo modelo diagramas de influencia específicos que describan las decisiones que pueden ser sensibles a la variación climática (Morgan et al., 2002).

Es necesario tener en cuenta que las condiciones particulares de cada finca (suelo, clima, pendiente) limitan las opciones del agricultor. Esto sumado a la incertidumbre de mercado y de rendimientos hacen que el agricultor, por sus

condiciones económicas propias, elija el cultivo que particularmente es más conveniente; en medio de la situación que enfrenta, busca maximizar sus beneficios (Audsley et al., 2006); la gestión en la agricultura, por tanto, puede optimizarse en términos de rentabilidad (Rounsevell et al., 2003).

El análisis del posible impacto del cambio climático en el ámbito local es cada vez más relevante para la política agrícola, en términos de la definición de nuevas medidas para sostener la adaptación del sector. Al poner atención en una zona agrícola en primer lugar, se puede realizar un análisis de la serie histórica con datos de precipitación previamente homogenizados, identificar tendencias y determinar la influencia estadística utilizando funciones de densidad. Los parámetros de estas funciones permitirán utilizar modelos de programación estocástica para simular la posible reacción del sector agrícola en el área determinada para los diferentes escenarios (correlación-regresión).

Analizando todo el contexto de la modelación para la toma de decisiones del sector agrícola, es posible afirmar que la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática se mitiga y/o reduce cuando el clima se vincula en herramientas de apoyo a la decisión y procesos de planificación; y además, cuando la información resultante se canaliza entre los diferentes actores individuales e institucionales dentro del desarrollo de procesos socioeconómicos (Vázquez et al., 2008).

Los cambios en el clima están comprometiendo el rendimiento de los cultivos, y el impacto directo sobre la productividad afectará principalmente el bienestar de las familias que dependen de la incidencia de las lluvias y subsisten de la agricultura tradicional. Muchos agricultores intentan adaptarse y prepararse para el cambio, y han adoptado técnicas como el uso de especies tolerantes a las sequías, agroforestería, etc.; es necesario, por tanto, que de la adaptación y la resiliencia que ha sufrido la pequeña agricultura, se formulen estrategias de desarrollo sostenible (Altieri y Nicholls, 2008).

El agricultor adopta estrategias de gestión para la explotación de su actividad, y toma decisiones con objetivos y limitaciones sobre el uso de la tierra; y los modelos al respecto sugieren un enfoque centrado en las decisiones tomadas a nivel de finca, considerando las experiencias y preferencias del agricultor, su entorno económico regional y las características físicas del paisaje (suelos, clima) (Rounsevell et al., 2003). Sin embargo, el sistema agrícola requiere una visión más dinámica; las políticas de desarrollo de una agricultura sostenible podrán formularse si se interrelacionan las decisiones tomadas desde la finca con el curso de la actividad a nivel regional (Bontkes y Keulen, 2003). Cabe resaltar que de la suma de las

decisiones que se tomen en las fincas, se obtendrá el uso regional de la tierra agrícola (Rounsevell et al., 2003).

La herramienta utilizada en la gestión del riesgo climático cumple una función importante en la toma de decisiones; su implementación eficaz compromete a las instituciones que suministran la información meteorológica, a las asociaciones gremiales, al directo beneficiario y a los responsables políticos con el conocimiento de la variabilidad climática en la adopción de mejores decisiones en la agricultura (Meinke y Stone, 2005). Una herramienta que soporta una decisión no solamente describe la información producto de datos climáticos, muestra también los mecanismos de cooperación entre actores (Lugon, 2010).

La planificación y la toma de decisiones sobre la tierra en el sector agrícola han usado la información meteorológica basándose en la experiencia, en la intuición y hasta en el desarrollo de herramientas de predicción (Coughlan y Huda, 2008). El agricultor toma sus decisiones con base en una serie de juicios u objetivos conflictivos entre sí, que intenta optimizar conjuntamente y cuyas limitaciones pueden ser de orden agronómico, de disponibilidad de recursos o de orden político (Elfkhi y Feijoo, 2005), a las que bien se les puede llamar barreras técnicas, sociales o económicas. Predecir la respuesta del sistema agrícola a determinadas condiciones se logrará solo si los procesos de toma de decisiones cuentan con suficiente información y se estructuran bajo criterios y objetivos claros (Martín, 2009).

A fin de reducir la vulnerabilidad de las poblaciones rurales a los impactos de las condiciones climáticas extremas, deberán existir políticas y mecanismos para que los pequeños agricultores utilicen la información de pronóstico para gestionar su propio riesgo (Mjelde et al., 1996), llenando el vacío institucional y cultural que existe entre ellos y las entidades de apoyo meteorológico y agrícola.

Referencias bibliográficas

- Altieri, M. A. (2002). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. En S. J. Sarandon (ed.), *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*. Editorial Científicas Americanas.
- Altieri, M. A. y Nicholls, C. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y agricultores tradicionales y sus repuestas adaptativas. *Agroecología*, 3, 7-24. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/95471>
- Andonova, L. y Lugon, R. (2009). *Climate Information for Decision-Making: Institutional Changes for Effective Communication*. Springer.

- Audsley, E., Pearn, K. R., Simota, C., Cojocar, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M. D. A., et al. (2006). What can Scenario Modelling Tell us about Future European Scale Agricultural Land Use, and What Not? *Environmental Science & Policy*, 9, 148-162.
- Auer, I., Jurkovic, A., Orlik, A., Bă-Hm, R., Korus, E. Sulis, A. et al. (2008). *High Quality Climate Data for the Assessment of Alpine Climate, its Variability and Change on Regional Scale-Collection and Analysis of Historical Climatological Data and Metadata*. Technical Report of Wp5, Interreg-Iiib-Alpine Space Project Foralps, I/Iii/3.1/21.
- Baethgen, W. E. (2006). *El cambio climático en la toma de decisiones*. News Letter del Proyecto GOF-UK-CPTEC.
- Barros López, J. G. (2010). *Atlas climatológico del Ecuador*. Editorial Escuela Politécnica Nacional.
- Bartolomé, M., Caputo, M., Celis, A., Herzer, H. y Rodríguez, C. (2004). El clima y otros factores de riesgo productivo en La Pampa húmeda argentina. *Realidad Económica*, (202).
- Bert, F. E., Satorre, E. H., Toranzo, F. R. y Podestà, G. P. (2006). Climatic Information and Decision-Making in Maize Crop Production Systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems*, 88(2-3), 180-204. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.03.007>
- Bontkes, T. S. y Keulen, H. V. (2003). Modelling the Dynamics of Agricultural Development at Farm and Regional Level. *Agricultural Systems* 76(1), 379-396. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00128-2](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00128-2)
- Brewer, G. D. y Stern, P. C. (2004). *Decision Making for the Environment: Social and Behavioral Science Research Priorities*. National Academies Press.
- Cendrero, U. A. (1997). Indicadores de desarrollo sostenible para la toma de decisiones. *Naturzale*, 12, 5-25.
- De La Rosa, D., Mayol F., Díaz-Pereira, E. y Fernández, M. (2004). A Land Evaluation Decision Support System (Microleis Dss) for Agricultural Soil Protection: With Special Reference to the Mediterranean Region. *Environmental Modelling & Software*, 19(10), 929-942. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.10.006>
- Downing, T., Bakker, K. y Wilhite, D. (1999). *Drought Vulnerability: Concepts and Theory*. Routledge.
- Elfkhi, S. y Feijoo, M. (2005). *Toma de decisiones de los agricultores en función de las políticas medioambientales y de los precios del agua*. Universidad de Zaragoza.

- Fallas, J. (2002). Toma de decisiones y sistemas de información geográfica. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre, Universidad Nacional de Heredia, Costa Rica.
- Giger, M. y Hoegel, U. (2011). Agricultura campesina adaptable a las condiciones climáticas.
- Gitay, H., Suárez, A., Watson, R. y Dokken, D. (2002). *Documento Técnico V del IPCC. Cambio climático y biodiversidad*. IPCC.
- González Hidalgo, J. C., De Luis Arrillaga, M., Stepánek, P., Raventós Bonvehí, J. y Cuadrat Prats, J. M. (2002). *Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial*. VII Reunión Nacional de Climatología, Albarracín, España, julio de 2002.
- Hammer, G. L., Hansen, J. W., Phillips, J. G., Mjelde, J. W., Hill, H., Love, A. et al. (2001). Advances in Application of Climate Prediction in Agriculture. *Agricultural Systems*, 70(2-3), 515-553. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00058-0)
- Hansen, J., Jones, J., Irmak, A. y Royce, F. (2001). El Nino-Southern Oscillation Impacts on Crop Production in the Southeast United States. En C. Rosenzweig, K. Boote, S. Hollinger, A. Iglesias y J. Phillips (Eds.). *Impacts of El Niño and Climate Variability on Agriculture* (pp. 56-76). American Society of Agronomy.
- Hansen, J. W. (2002). Realizing the Potential Benefits of Climate Prediction to Agriculture: Issues, Approaches, Challenges. *Agricultural Systems*, 74(3), 309-330. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00043-4)
- Hansen, J. W., Mishra, A., Rao, K. P. C., Indeje, M. y Ngugi, R. K. (2009). Potential Value of GCM-based Seasonal Rainfall Forecasts for Maize Management in Semi-arid Kenya. *Agricultural Systems*, 101, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.03.005>
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., et al. (2003). The DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18(1-4), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Lambin, E. F., Rounsevell, M. D. A. y Geist, H. J. (2000). Are Agricultural Land-use Models able to Predict Changes in Land-use Intensity? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3), 321-331. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00235-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00235-8)
- Laudon, K. C. y Laudon, J. P. (2004). *Sistemas de información gerencial: administración de la empresa digital*. Pearson Educación.
- Lugon, R. (2010). *Climate Information for Decision Making: Lessons Learned from Effective User-provider Communication Schemes*. The Graduate Institute.

- Martín, F. J. V. (2009). *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola*. Mundi-Prensa Libros.
- Meinke, H. y Stone, R. C. (2005). Seasonal and Inter-annual Climate Forecasting: The New Tool for Increasing Preparedness to Climate Variability and Change in Agricultural Planning and Operations. En J. Salinger, M. V. K. Sivakumar y R. P. Motha (eds.), *Increasing Climate Variability and Change: Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry* (pp. 221-253). Springer.
- Millar, C. I., Stephenson, N. L. y Stephens, S. L. (2007). Climate Change and Forests of the Future: Managing in the Face of Uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2145-2151.
- Mirza, M. M. Q. (2003). Climate Change and Extreme Weather Events: Can Developing Countries Adapt? *Climate Policy*, 3(3), 233-248. <https://doi.org/10.3763/cpol.2003.0330>
- Montes, C. (2010). *Posibles impactos del cambio climático en la agricultura chilena*. Tierra Adentro.
- Nyenzi, B. y Malone, S. L. (2003). *Desafíos de la predicción climática y su aplicación en el sector agrícola. Servicios de Información y Predicción del Clima y Aplicaciones*. Organización Meteorológica Mundial.
- Podestá, G., Letson, D., Messina, C., Royce, F., Ferreyra, R. A., Jones, J., et al. (2002). Use Of Enso-related Climate Information in Agricultural Decision Making in Argentina: A Pilot Experience. *Agricultural Systems*, 4(74), 371-392. <http://repositorio.cedes.org/handle/123456789/3059>
- Ponvert-Delisle, D. R., Lau, A. y Balamaseda, C. (2007). La vulnerabilidad del sector agrícola frente a los desastres: reflexiones generales. *Zonas Áridas*, 11(1), 174-194. <http://dx.doi.org/10.21704/za.v11i1.214>
- Riquelme, F. M., De Juan Valero, A., Ramos, A. B. y Pérez, A. C. (2001). Los sistemas agrarios. En *Agricultura y desertificación*. Mundi-Prensa Libros.
- Rounsevell, M. D. A., Annetts, J. E., Audsley, E., Mayr, T. y Reginster, I. (2003). Modelling the Spatial Distribution of Agricultural Land Use at the Regional Scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95(2-3), 465-479. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00217-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00217-7)
- Santana, L. M. y Escobar, F. (2011). *Las bases de datos globales y sig en la toma de decisiones: oportunidades y limitaciones*. Universidad de Alcalá.
- Seip, K. L. y Wenstop, F. (2006). *A Primer on Environmental Decision-making: An Integrative Quantitative Approach*. Kluwer Academic Pub.

- Shim, J., Warkentin, M., Courtney, J. F., Power, D. J., Sharda, R. y Carlsson, C. (2002). Past, Present, and Future of Decision Support Technology. *Decision Support Systems*, 33(2), 111-126. [https://10.1016/S0167-9236\(01\)00139-7](https://10.1016/S0167-9236(01)00139-7)
- Sivakumar, M. V. K., Das, H. P., Brunini, O., Salinger, J. y Motha, R. P. (2005). Impacts Of Present and Future Climate Variability and Change on Agriculture and Forestry in the Arid and Semi-Arid Tropics. En J. Salinger, M. V. K. Sivakumar y R. P. Motha (eds.), *Increasing Climate Variability and Change: Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry*. Springer.
- Stern, P. C. y Easterling, W. E. (1999). *Making Climate Forecasts Matter*. National Academies Press.
- Stewart, T. R. (1997). Descriptive Decision Studies of the Societal Impact of Weather and Climate Information.
- Vázquez, A. J. L., Brunet, M. y Jones, P. D. (2008). Variabilidad natural y detección instrumental del cambio climático. En *Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Editorial Universidad Veracruzana.

Capítulo 5. Perspectivas: propuesta de análisis de valores extremos de precipitación y su utilidad en el contexto de gestión del riesgo, estudio de caso: una zona del medio Magdalena

WALTER IVÁN VELÁSQUEZ MÉNDEZ
NÉSTOR RICARDO BERNAL SUÁREZ



Puente en construcción, municipio de San Marcos, Sucre

Foto: Marcos Ramos

5.1 Introducción

Este capítulo contiene los resultados de un trabajo de grado de pregrado en ingeniería ambiental, el cual se desarrolló después de los proyectos contenidos en los capítulos anteriores de este texto; por tal razón, se definió como una investigación que buscaba aplicar los conceptos desarrollados en dichos trabajos a una temática diferente como es la gestión del riesgo.

Se definió que la zona de estudio sería la región climatológica del Medio Magdalena, debido a que es una región que históricamente ha sufrido de inundaciones por la ocurrencia de eventos climáticos extremos. Además, se quiso aplicar la metodología de homogenización de series de tiempo en una zona diferente al Bajo Magdalena. En el apartado 5.3, se explica ampliamente el procedimiento que se siguió para escoger la zona de estudio.

La gestión del riesgo debe ser una de las prioridades de los entes territoriales, pues de ella depende en gran parte la calidad de vida de los habitantes. Por lo anterior, el Estado ha definido varios mecanismos que permiten la planificación de las acciones a tomar cuando ocurren diferentes eventos de riesgo: los Planes de Gestión del Riesgo (PGR) y los Sistemas de Información para la Gestión del Riesgo (SIGR), a escala nacional, departamental, distrital y municipal, que han sido definidos por la Ley 1523 de 2012.

Precisamente, uno de los procesos fundamentales dentro de la formulación de los PGR es el conocimiento del riesgo (Ideam, 2008). El presente capítulo estará encaminado a dar un aporte dentro de este proceso y también a proponer la inclusión de un análisis de valores extremos como insumo dentro de los SIGR.

Para el caso de este capítulo, la escala de trabajo será departamental y municipal, ya que en estos niveles es posible desarrollar estrategias que permitan avanzar en la gestión del riesgo; en particular, estrategias encaminadas al caso de la ocurrencia de eventos extremos que se derivan de la precipitación.

Todo lo anterior indica que se busca ayudar a los departamentos y a los municipios en la formulación y mejora de sus PGR a través de metodologías para el conocimiento del riesgo de fenómenos hidrometeorológicos generados por cambios en los valores normales de la precipitación.

A continuación, se describen algunos avances de autores que han abordado el tema de la gestión del riesgo y los desastres naturales en el contexto de la variabilidad climática interanual extrema asociada con la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña.

Velásquez y Jiménez (2004) explican la relación existente entre la ocurrencia de fenómenos climáticos como el ENOS y la ocurrencia de desastres naturales, así como la creación de entidades que se encargan de controlar el efecto de dichos fenómenos a través de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial.

Machín et al. (2005) hicieron un análisis de la cabecera de la cuenca del río Arlanza, en el que encontraron el aumento de la ocurrencia y de la variabilidad de caudales extremos a partir del año 1995. Esto es utilizado como base para promover una planificación racional de los recursos hídricos.

Beguiría et al. (2008) utilizaron una metodología basada en la teoría de eventos extremos para obtener cartografías que reflejen la máxima intensidad, magnitud y duración esperada en un periodo de tiempo concreto en La Rioja, España. El estudio se basó en el análisis de series temporales de eventos de precipitación, que se obtuvieron a partir de series pluviométricas diarias correspondientes al periodo 1970-2002.

Vilches et al. analizan la peligrosidad por inundación fluvial en el curso del río Maipo-región Valparaíso, en Chile, integrando en la metodología dos componentes: el hidrológico y el geomorfológico-botánico-histórico. Para el análisis desde el punto de vista hidrológico, emplearon modelos probabilísticos Gumbel y Gamma y análisis de periodos de retorno de caudales máximos instantáneos, e ilustraron la evidencia histórica de ocurrencias de inundación y la identificación de zonas susceptibles.

La Universidad de los Andes en Colombia y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) organizaron el evento “Hidrología de Extremos y Cambio Climático” en 2012, y allí se destacó la importancia del análisis de valores extremos hidrológicos, su vínculo con la gestión de riesgos, la vulnerabilidad de la población, la variabilidad climática extrema y el cambio climático, los modelos climáticos y sus implicaciones en hidrología, y la necesidad de redefinir límites permisibles en el diseño de obras civiles por la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos (Deed, 2012; Poveda, 2012; Ávila, 2012; Ideam, 2012; Stedinger, 2012; Buja, 2012; Camacho y Granados, 2012).

Considerando el contexto anterior, el objetivo de este capítulo es proponer una metodología para la gestión del riesgo por fenómenos meteorológicos empleando

un análisis de valores extremos de precipitación en la región del Medio Magdalena. Para dicho objetivo, los pasos que se desarrollan son: i) describir las características climatológicas de la región del Medio Magdalena; ii) establecer la relación entre los valores extremos de precipitación y los periodos de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña; y iii) proponer el uso de un modelo estadístico de valores extremos para los máximos de precipitación (Coles, 2001) para cada mes, que estacionalmente corresponde a épocas de lluvia y épocas secas. El resultado de este análisis servirá como insumo para la gestión del riesgo, y en particular se presentará un esquema útil para la toma de decisiones que permita reducir la vulnerabilidad de la población ante la ocurrencia de valores extremos de precipitación y que están vinculados con las probables inundaciones en la zona de estudio.

Ramos (2013) desarrolló un trabajo de grado en el que incluyó el proceso de estimación de datos faltantes y de detección de cambios en los valores promedio de precipitación mensual, como una forma de asegurar la calidad de la información que se utiliza en la etapa de diagnóstico climático dentro de la formulación de Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de los municipios en la región del Bajo Magdalena colombiano. También, incluyó a los eventos El Niño y La Niña como factores que ayudan a determinar cómo algunos cambios en las series de tiempo de precipitación se vinculan con la ocurrencia de dichos fenómenos.

Por su parte, Barrios (2012) propuso vincular la información generada luego de un proceso de homogenización de series de tiempo de precipitación con la toma de decisiones en la planificación ambiental de la región climática del Bajo Magdalena. Dicho proceso de homogenización garantiza la calidad de la información climática a través de una metodología de análisis de estaciones vecinas.

Entretanto, Velásquez (2013) planteó utilizar la información de series de tiempo de precipitación homogenizadas para el desarrollo de un modelo de soporte de decisión para la gestión de inundaciones, buscando la reducción de la vulnerabilidad de la población en la región del Bajo Magdalena. Mientras tanto, Ibarra Burbano (2013) estableció un esquema similar, pero aplicado al sector agrícola de una subzona de la región del Bajo Magdalena.

Los autores anteriores basan sus desarrollos en los avances logrados por Bernal et al. (2011), que propusieron una metodología para la homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación en las regiones climatológicas de la Sabana de Bogotá, el río Sogamoso y la región de Catatumbo; teniendo en cuenta que algunas series pueden tener heterogeneidades debido a cambios en los instrumentos de medición, a cambios en su ubicación o a la propia variabilidad climática interanual

de la zona. Esta metodología se desarrolló en tres etapas: i) estimación de datos faltantes utilizando modelos ARIMA; ii) detección de cambios en cada mes de la serie a través de la prueba de Worsley; y iii) ajuste de las series a través de la identificación de estaciones vecinas y el método de dobles masas. También, estos autores evidenciaron que algunos cambios en los promedios mensuales de las series coincidían con ocurrencias de fenómenos de El Niño y La Niña (ENOS).

En cuanto al uso de análisis de valores extremos climáticos para la toma de decisiones, la mayoría de los autores ha avanzado en su vínculo con eventos extremos como los fenómenos de El Niño y La Niña para prevenir riesgos sobre diversos cultivos. Un contexto general de la interrelación de estos elementos es abordado por el Fondo Internacional para el Desarrollo de la Agricultura y el Programa Mundial de Alimentación (2010), que relevan la importancia de los seguros agrícolas e ilustran algunos casos de estudio.

5.2 Conceptos básicos

En este apartado, se desarrollan los conceptos básicos sobre los cuales se basa el presente capítulo. Primero, se definirán los conceptos relacionados con el clima y los eventos El Niño y La Niña, que corresponden a la variabilidad climática interanual extrema, y después se concretarán algunas nociones relacionadas con la gestión del riesgo.

Fenómenos de El Niño y La Niña: el territorio colombiano se ve claramente influenciado por la ocurrencia de estos eventos; durante La Niña, se observa un aumento generalizado y considerable de las precipitaciones y una disminución de la temperatura en las regiones Andina, Caribe y Pacífico. Lo contrario ocurre durante El Niño (Euscátegui y Hurtado, 2011).

La principal herramienta para el seguimiento de estos fenómenos es el indicador oceánico ONI, desarrollado por el Centro de Predicción Climática de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). El ONI expresa cómo la anomalía de la temperatura del océano Pacífico con respecto al promedio es calculada con los promedios móviles de tres meses (Euscátegui y Hurtado, 2011).

Con base en los reportes de desastres entre los años 1950 y 2007 del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroriente Colombiano (OSSO) y de la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres (DGPAD), se estableció que los desastres asociados con la precipitación se han incrementado en 16,1 % en relación con las condiciones normales durante los meses en los que se presenta el fenómeno

de La Niña, mientras que durante el fenómeno de El Niño estos desastres han tenido en promedio una disminución de 33,5 %.

En cuanto a la sequía, los reportes de desastres asociados presentan un incremento del 216 % durante los periodos El Niño y una reducción de 99,6 % durante los periodos La Niña. En general, se puede concluir que históricamente un alto porcentaje de episodios relacionados con bajas precipitaciones, en especial en las regiones Andina, Caribe y Orinoquia, está asociado con el fenómeno cálido del Pacífico (El Niño) y ha impactado de diversas formas la producción agrícola y ganadera, la generación de energía eléctrica, la salud y el abastecimiento de agua a ciudades y comunidades rurales (Ideam, 2010).

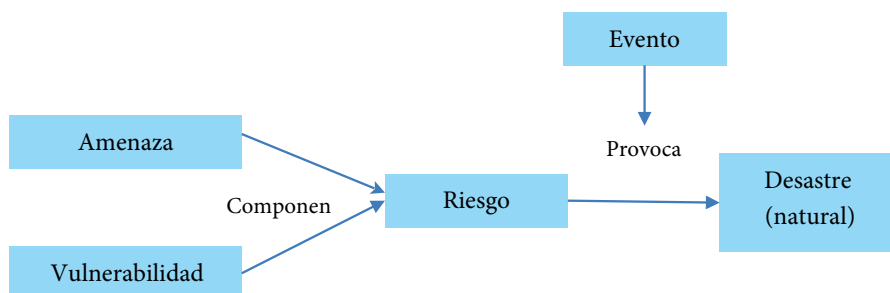
Gestión del riesgo: hace referencia al proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones para el conocimiento del riesgo y la promoción de una mayor conciencia del riesgo, con el fin de prevenir o evitar que se genere, de mitigarlo y controlarlo cuando ya existe, y para la posterior recuperación.

Para esta investigación, se siguieron los lineamientos del enfoque de gestión del riesgo por procesos, el cual consiste en la conducción efectiva de las actividades, interrelaciones y recursos de una organización, haciendo énfasis en el valor agregado para las partes interesadas (Icontec, 2008). El enfoque de procesos para la gestión del riesgo se fundamenta en: i) el conocimiento del riesgo, ii) la reducción del riesgo y iii) el manejo de desastres (UNGRD, 2012).

Riesgo: el riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo causante de daños con una determinada magnitud en un determinado lugar y en un determinado momento. El riesgo se refiere a personas o bienes materiales que están amenazados por determinados fenómenos naturales (GTZ, 2004).

Factores de riesgo: son la amenaza y la vulnerabilidad. Para la ocurrencia de un evento que provoque un desastre, debe confluir una amenaza, que es un fenómeno de distinto origen que ocasiona un daño en un lugar y momento determinado, y unas vulnerabilidades, que son las condiciones desfavorables propias del objeto de estudio (UNGRD, 2012).

Figura 5.1. El riesgo de desastre como resultado de amenaza y vulnerabilidad



Fuente: GTZ (2004)

Amenaza: es el peligro latente de que un evento físico se presente de forma severa ocasionando pérdida de vidas, lesiones o impactos a la salud, y también daños y pérdidas en los bienes, infraestructuras y recursos naturales, entre otros. Se clasifican según su origen en:

Tabla 5.1. Clasificación de amenazas según su origen

Naturales	Socio-naturales	Antrópicas	Tecnológicas
Huracanes, vendavales, amenaza cerámica, heladas, sequías y desertificación, inundaciones, avenidas torrenciales, granizadas, erosión litoral, sismos, actividad volcánica, remoción en masa, tsunamis.	Inundaciones, remoción en masa, incendios forestales, degradación de recursos naturales.	Aglomeración de personas, contaminación.	Derrames, fugas, explosiones, incendios.

Fuente: UNGRD (2012)

Vulnerabilidad: es el factor de riesgo interno (intrínseco) de los bienes expuestos y representa la predisposición a ser afectado, así como la falta de capacidad para la autorrecuperación en caso de ser afectado. Los factores de vulnerabilidad se clasifican de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 5.2. Clasificación de los factores de vulnerabilidad

Físicos	Económicos	Ambientales	Sociales
Antigüedad y calidad de los materiales de construcción y cumplimiento de las normas de sismo-resistencia de la infraestructura vital.	Pobreza y seguridad alimentaria, estratos socioeconómicos, nivel de ingresos, acceso a servicios públicos, acceso al mercado laboral, cubrimiento de las necesidades básicas.	Fuentes de agua, ecosistemas estratégicos, superficies cultivables, biodiversidad, deterioro de los recursos naturales.	Educación y formación, percepción del riesgo, participación, organizaciones comunitarias, equidad de género.

Fuente: UNGRD (2012)

La vulnerabilidad es un concepto asociado al de resiliencia o resistencia como su opuesto, referente a la habilidad para resistir o recuperarse de un daño. Vulnerabilidad y resistencia constituyen un sistema indisoluble, ya que se es vulnerable en la medida en que no se es resistente y viceversa.

Los sistemas naturales disminuyen su vulnerabilidad a través de la diversidad genética, taxonómica y ecosistémica, mediante una gestión ambiental orientada a la prevención de riesgos (probabilidad de daño), y con una participación gubernamental y ciudadana responsable y debidamente informada y sensibilizada sobre las amenazas del cambio climático, lo que se traduce en un vínculo permanente entre la vulnerabilidad de los sistemas naturales y la de los sistemas sociales y económicos (FIODM y Gobierno de Panamá, s. f.).

Análisis del riesgo: consiste en identificar y evaluar los posibles daños y pérdidas ocasionados por el impacto de una amenaza sobre una unidad social en condiciones vulnerables (UNGRD, 2012). La información obtenida al analizar las amenazas y las vulnerabilidades de un área se integra en un análisis de riesgo, que es una estimación de las posibles pérdidas ante un evento natural determinado. Una vez evaluado el riesgo, los planificadores cuentan con las bases necesarias para incorporar medidas de mitigación en el diseño de proyectos de inversión y para comparar los costos y los beneficios obtenidos, con y sin ellos (Saborio, s. f.).

Cálculo del riesgo: corresponde a un análisis y una combinación de datos teóricos y empíricos con respecto a la probabilidad de ocurrencia de la amenaza identificada, es decir, la fuerza e intensidad de ocurrencia, así como al análisis de vulnerabilidad o la capacidad de resistencia de los elementos expuestos al peligro (población, viviendas, infraestructura, etc.) dentro de una determinada área geográfica (GTZ, 2004).

En este punto, es importante mencionar que según el BID y la Cepal (2007), hasta 2007 en Colombia existían pocos estudios de riesgo y los que había eran muy recientes. En general, existían estudios de amenaza, a muchos de los cuales se les denominó estudios de riesgo en forma equivocada, pues solo hacían referencia al fenómeno sin tener en cuenta la vulnerabilidad. La mayoría de los mapas o estudios de amenaza habían sido elaborados sin tener en cuenta el nivel de resolución y alcance compatible con la fase de estimación y cuantificación de la vulnerabilidad. De hecho, prácticamente no existían estudios de riesgo en el país y pocas veces se habían realizado estimaciones de vulnerabilidad.

Sin embargo, en el año 2010 el Ideam publicó un informe denominado “Segunda Comunicación de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático”, en el que se hace un análisis muy extenso de la vulnerabilidad del país ante el cambio climático, siendo de especial interés el capítulo que trata sobre variabilidad climática y eventos hidrometeorológicos extremos.

Otros enfoques que complementan el desarrollo conceptual referido en los párrafos anteriores corresponde al estudio reciente de la CAR y la Universidad Nacional (2018), que presenta un avance del marco conceptual relacionado con la gestión de riesgos, en particular lo referente a riesgo de desastre por fases extremas de variabilidad climática. Allí se refiere que “los términos usados se aplican en el sentido que señala la Ley 1931 del 27 de julio de 2018 en el artículo 3 Definiciones, no obstante se detallan algunos conceptos en cuanto a la diferencia entre los extremos que generan desastres y la modificación gradual del clima”; es decir, precisa los conceptos en concordancia con la “variabilidad climática” y su diferenciación de dichos conceptos en el contexto de “cambio climático”. Avances previos referentes a estas consideraciones conceptuales están descritos por Chavarro et al. (2008), como las definiciones de amenaza, riesgos y vulnerabilidad asociadas al cambio climático, en el marco del Proyecto UNODC-Colombia AD/COL/121 desarrollado por las Naciones Unidas, la Oficina contra la Droga y el Delito, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y el Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia.

- Riesgo (R_{vc}): es el riesgo por fases extremas de variabilidad climática.
- Amenaza (A_{vc}): es la amenaza por la fase extrema de variabilidad climática, la cual se determina por la anomalía climática ($AnCl$) frente a un elemento o sistema del territorio expuesto ante la acción de dicha anomalía (de temperatura media del aire o de precipitación, por ejemplo), denominado exposición (Exp).

- Vulnerabilidad (V_{vc}): es la vulnerabilidad del sistema o del elemento o del aspecto del territorio, la cual consiste en qué tan preparado está el sistema o el elemento del sistema para afrontar fases extremas de la variabilidad climática. La vulnerabilidad está dada por la manera como se equilibran la sensibilidad (s) de estos ante la acción de un cambio extremo en un tiempo corto del clima (anomalía climática) y su capacidad de recibir la acción, asimilarla y recuperarse.
- Exposición (Exp): es la condición de estar en el área de influencia de un fenómeno extremo, de una fase extrema de variabilidad climática.
- Fase extrema de variabilidad climática: periodo de meses o de hasta uno o dos años con anomalía climática extrema (periodo anormalmente cálido o frío o de déficit o exceso de precipitación que conlleva a fenómenos hidroclimáticos extremos como sequía o inundaciones).
- Resiliencia: característica de un sistema o elemento de sistema que muestra su capacidad para amortiguar la acción de un evento externo, asimilarla y recuperarse.
- Sensibilidad: grado de tolerancia que un sistema o elemento del sistema tiene ante la acción de un evento extremo (fenómeno meteorológico extremo o hidroclimático extremo) o un cambio en el medio (cambio climático, por ejemplo).
- Variabilidad climática: fluctuación del clima alrededor de las condiciones normales, la cual ocurre en ciclos de diferente periodo (meses, años, decenios) y puede presentar fases extremas.

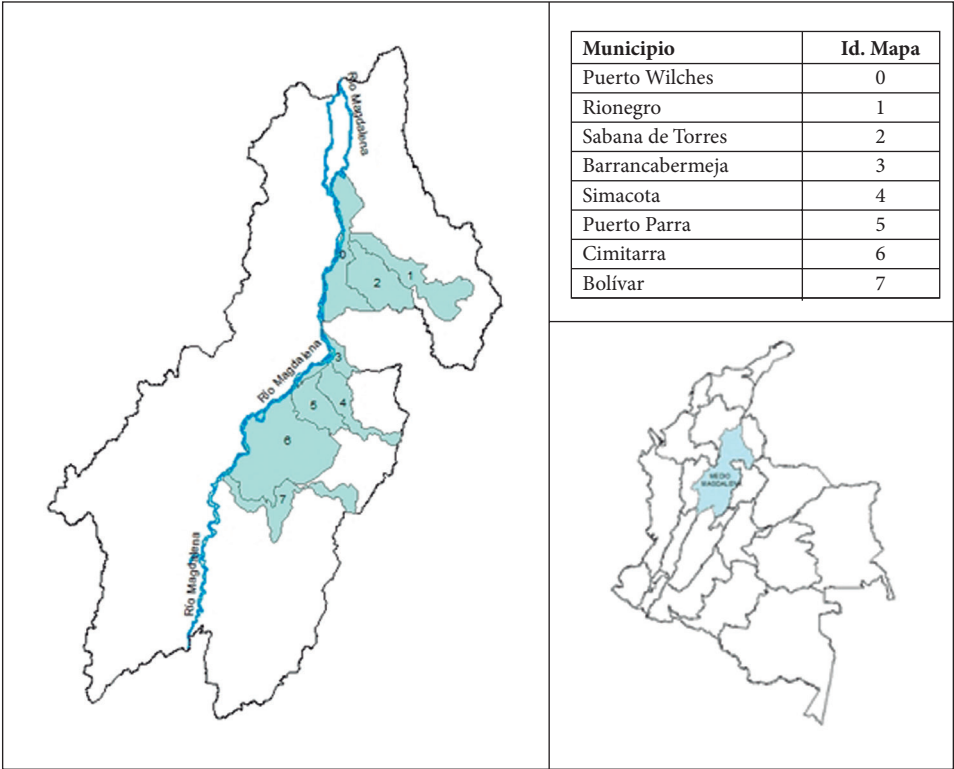
Un estudio del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2018) está relacionado con la construcción de un índice municipal de riesgo de desastres ajustado por capacidades, y su enfoque conceptual y metodológico, describiendo algunos fenómenos amenazantes como inundaciones lentas, flujos torrenciales y movimientos en masa, y hace uso del índice para la priorización de intervenciones. Por lo anterior, esta investigación del DNP tiene puntos de coincidencia con los desarrollos de la CAR y la Universidad Nacional (2018) y de Chavarro et al. (2008).

5.3 Zona de estudio

El Ideam ha dividido el territorio colombiano en veintidós zonas climatológicas para facilitar su estudio. Estas zonas corresponden a algunas cuencas de los ríos y a las regiones más importantes del país. El presente estudio se desarrolla en la región

del Medio Magdalena (mapa 5.1.), que concierne a la parte media de la cuenca del río Magdalena e incluye parte de los departamentos de Antioquia, Santander, Córdoba, Bolívar, Cesar, Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Caldas (Ideam, 2013).

Mapa 5.1. Localización de los municipios de estudio
dentro de la región del Medio Magdalena



Fuente: Ideam (2013)

La región cuenta con 139 estaciones de tipo climático, es decir que tienen registros de la precipitación que cae sobre la zona en un determinado periodo de tiempo. De esas se seleccionaron 36 estaciones teniendo en cuenta el periodo en el cual han estado activas y la cantidad de datos reportados (mapa 5.2.). Para la selección de la zona de estudio de este capítulo, se consideraron varios aspectos a nivel geográfico, climático y político.

Como primera medida, viendo el compromiso pactado ante el Ideam y dando continuidad al trabajo realizado (capítulos anteriores), se establece que la zona de estudio deberá localizarse en la región climática del Medio Magdalena.

Por otro lado, teniendo en cuenta que los planes de gestión del riesgo son formulados a escala municipal y departamental, se establece como unidad de trabajo el municipio. De igual forma, el departamento se incluye como uno de los criterios principales para la delimitación de la zona de estudio.

Una vez establecida la unidad de trabajo, se concibió que los municipios seleccionados deberían estar en las cercanías del río principal que recorre la región y le da su nombre, el río Magdalena. Por lo anterior, se realizó un *buffer* de 10 km a cada lado del cauce y los municipios que se encontraron en esta área *buffer* fueron preseleccionados.

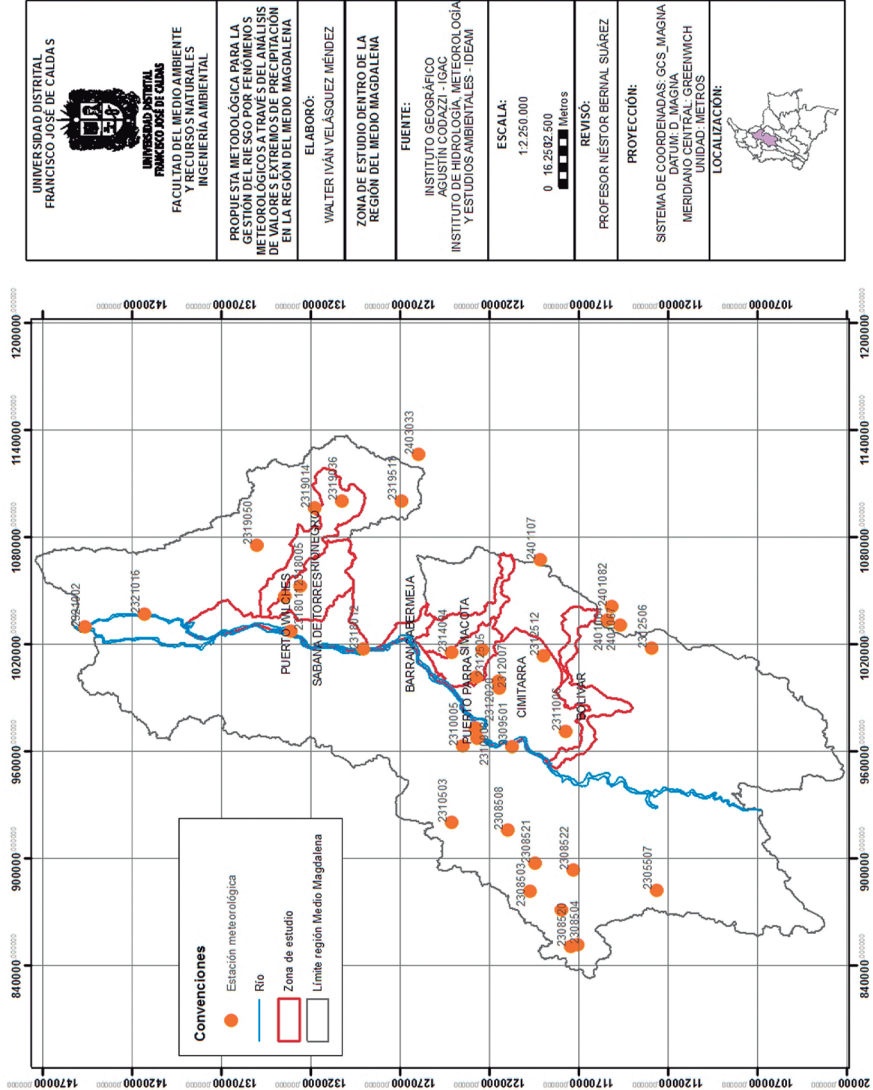
Figura 5.2. Insumos para la selección de la zona de estudio dentro de la región climatológica del Medio Magdalena



Fuente: elaboración propia

Uno de los aspectos más importantes para la selección de la zona de estudio fue la ocurrencia histórica de desastres naturales asociados a eventos climáticos extremos, como lo son las inundaciones. Lo anterior se corroboró con la revisión de notas de prensa que consignaron dichos eventos y con las memorias técnicas de la ola invernal de 2010 y 2011 (Ideam, 2011). De dicho informe también se tomaron los mapas de áreas inundadas durante esas olas invernales y se comprobó que los criterios escogidos correspondieran con esa información. La figura 5.2 resume los insumos que derivaron en la selección de la zona de estudio.

Mapa 5.2. Mapa de estaciones meteorológicas de estudio dentro de la región del Medio Magdalena



5.4 Metodología

Se propone una metodología en cinco fases que van desde la revisión de las series de tiempo de precipitación con la respectiva homogenización, hasta la integración de los análisis de valores extremos dentro de los planes de gestión del riesgo. A continuación, se describe cada una de las fases:

5.4.1 Revisión y ajuste de series de tiempo de precipitación a nivel mensual

Corresponde a la primera fase y consistió en la revisión de la base de datos de las series de tiempo de precipitación mensual de las estaciones de la región del Medio Magdalena. Dichas series de tiempo pasaron por un proceso de estimación de datos faltantes y homogenización acorde con la metodología descrita por Bernal et al. (2011), proceso que fue realizado durante un proyecto previo.

La metodología de Bernal et al. (2011) consiste en estimar los datos faltantes a través de modelos ARIMA utilizando el *software* TSW® (Caporello y Maravall, 2009); luego se detectan los puntos de cambio de las series de tiempo a través de la prueba estadística de Worsley implementada en el *software* Anclim® (Stepanek, 2007) para comprobar si coinciden con periodos de fenómenos de El Niño o La Niña. Además, se establece la hipótesis de que cuando los cambios no son influenciados por la ocurrencia de dichos eventos, estas variaciones se deben principalmente a alteraciones en las condiciones de la estación (reubicación o cambios en los instrumentos de medida) o a errores de lectura o posicionamiento asociados al uso de instrumentos análogos.

Luego de detectar los puntos de cambio y de verificar su coincidencia con la ocurrencia de fenómenos ENOS, se homogenizan las series que no coinciden usando el método de dobles masas. Este se realiza entre estaciones vecinas que se establecen con cuatro criterios: i) las estaciones están en la misma subcuenca hidrográfica, ii) las estaciones están en el mismo rango de precipitación anual, iii) las estaciones están en el mismo rango de altitud, iv) las estaciones tienen un rango de correlación espacial de precipitación significativo.

Durante el proceso de validación de datos, se hizo necesario realizar nuevamente el proceso de homogenización, teniendo en cuenta los avances de Barrios (2013) y Bernal et al. (2012).

5.4.2 Descripción de la climatología de la zona

Una vez hecho el ajuste de series de tiempo, se procede a analizarlas para entender cómo es la climatología de la región del Medio Magdalena, y en especial de los ocho municipios de interés.

Para esto, se grafican los valores de precipitación promedio multianual mensual, lo que permite observar claramente el comportamiento de los datos y establecer el régimen climatológico de la zona (unimodal, bimodal). También, se grafican los valores máximos de las series para después generar los mapas que permiten observar espacialmente los resultados de los procesamiento de datos.

Se generan mapas de isoyetas a nivel mensual y multianual, y los mapas de máximos para la zona de estudio a través del método de interpolación, utilizando el método de distancia inversa (IDW), que asigna pesos a los datos espaciales según la localización de las estaciones meteorológicas en función inversa de la distancia que las separa; se utiliza un valor de peso W de 2.

Otro proceso de importancia en esta segunda fase es la obtención de los valores de las anomalías promedio de precipitación y de las alteraciones más probables, que son de utilidad para describir la variabilidad climática de la zona ante la ocurrencia de fenómenos ENOS. Una vez obtenidos estos valores, se generan los respectivos mapas promediando los datos que correspondan a épocas de El Niño y La Niña (ver Capítulo 1).

5.4.3 Análisis de valores extremos de precipitación mensual

Esta etapa consiste en ajustar los valores máximos de la serie de precipitación mensual previamente completada y homogenizada a una distribución de probabilidad de valores extremos, considerando los valores máximos de precipitación del conjunto de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, con el objetivo de obtener los valores de precipitación correspondientes a los periodos de retorno de 2, 10, 20, 50 y 100. Es importante señalar que el uso de las distribuciones de valores extremos se aplica en el contexto espacial, a fin de determinar probabilidades de ocurrencia de eventos extremos, y es allí donde cobra relevancia el resultado de periodos de retorno que se estiman para cada mes del año; por esta razón, estos valores estimados no se consideran en años.

Primero, se seleccionan los valores máximos de cada serie por cada mes y estos se toman como una nueva serie; luego se toma dicha serie y se procesa con la librería para R (R Core Team, 2014) “extRemes”, desarrollada por Gilleland y Katz, (2011). Se utiliza la opción para el ajuste a una distribución de probabilidad general

de valores extremos y se estiman los periodos de retorno a nivel puntual y por intervalo (nivel de confianza del 95 %).

Se estiman los valores para los parámetros de localización, forma y escala del modelo; además de los criterios de información bayesiano y de Akaike, que permiten determinar el grado de bondad de ajuste de cada uno de los modelos obtenidos para cada mes. También, se obtienen las gráficas de densidad de la distribución, la gráfica de percentiles de los valores simulados y los valores para los periodos de retorno mencionados.

En esta tercera fase, se emplean modelos probabilísticos de valores extremos para el análisis de los valores máximos de precipitación en cuatro periodos: normal, normal climatológico, El Niño y La Niña. Para ello, se utiliza la información de varias estaciones meteorológicas en la región climatológica del Medio Magdalena. En este punto, se establece el supuesto de que no hay correlación espacial entre las estaciones. A continuación, se describen los modelos (Coles, 2001; Wilks, 2006; Storch y Zwiers, 1999).

Teoría de valores extremos: se considera M_n , que representa el máximo del proceso en un intervalo de tiempo de longitud n ; si n es el número de días del año, entonces M_n corresponde al valor máximo anual. El modelo se describe así:

$$M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde X_1, X_2, \dots, X_n corresponde a una sucesión de variables aleatorias independientes que poseen una función de distribución común F . Los X_i representan los valores de un proceso medidos sobre una escala de tiempo regular; por ejemplo, los valores de precipitación en mayo para un periodo de estudio: 1971 a 2000.

Se define M_n^* , que es una transformación de la variable M_n y se define así:

$$M_n^* = \frac{M_n - b_n}{a_n} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Para la sucesión de constantes $\{a_n > 0\}$ y $\{b_n\}$, a_n corresponde a un parámetro de escala y b_n es un parámetro de locación de M_n^* . Dichas constantes permiten estabilizar M_n^* cuando n aumenta, transformación que está relacionada con la aplicación del teorema del límite central.

Teoremas de tipos de distribuciones de extremos: de acuerdo con Coles (2001), se describe el teorema de tipo de extremos así:

Si existen secuencias de constantes $\{a_n > 0\}$ y $\{b_n\}$

Tal que:

$$Pr \left\{ \left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \right) \leq z \right\} \rightarrow G(z), \text{ cuando } n \rightarrow \infty$$

G es una función de distribución no-degenerada, entonces G pertenece a una de las siguientes familias:

$$I: G(z) = \exp\{-\exp[-(\frac{z-b}{a})]\}, -\infty < z < \infty \quad \text{Ecuación 5.3}$$

$$II: G(z) = \begin{cases} 0, & z \leq b \\ \exp\{-(\frac{z-b}{a})^\alpha\}, & z > b \end{cases} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

$$III: G(z) = \begin{cases} \exp\{-(\frac{z-b}{a})^\alpha\}, & z < b \\ 1, & z \geq b \end{cases} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Para los parámetros $a > 0$, b y en los casos de las familias II y III, $\alpha > 0$. El teorema señala que “los máximos muestrales transformados $(M_n - b_n)/a_n$ convergen en distribución a una variable, la cual pertenece a una de las familias señaladas I, II y III”. A esta clase de distribuciones se les denomina “distribuciones de valores extremos, con tipos I, II y III”, conocidas como: *familias Gumbel, Fréchet y Weibull*, respectivamente. Cada familia tiene un parámetro de localización y escala, b y a , respectivamente; además, las familias Fréchet y Weibull tienen un parámetro de forma α .

Para esta etapa, se tendrán en cuenta principalmente las escalas: nacional, regional (Corporación Autónoma Regional y subzonas hidrográficas), departamental, municipal (municipio y subzonas más próximas al río Magdalena por ser vulnerables a inundación) y cuenca.

5.4.4 Comparación de los resultados con series de caudal mensual

En la cuarta fase, con el objetivo de corroborar los resultados obtenidos en las fases anteriores y como un insumo de importancia para la siguiente, se hace un análisis de nueve series de tiempo de caudal de la región de estudio y se compara con lo obtenido luego del análisis de valores extremos de precipitación.

Las series de tiempo de caudal se analizan con la información original suministrada por la Subdirección de Hidrología del Ideam. A estas series no se les realiza el proceso de homogenización, ya que fueron previamente ajustadas.

La comparación se elabora a través de gráficas de los promedios y los máximos de las distintas series; además de realizar las mismas gráficas a nivel regional.

5.4.5 Propuesta de integración del análisis de valores extremos mensuales en los planes de gestión del riesgo

En la quinta fase, se genera una ficha técnica que permite a los planificadores y tomadores de decisiones definir una lista de acciones a tomar cuando se presente un evento de carácter extremo de acuerdo con los valores obtenidos en la fase anterior.

Las acciones se clasifican según el tipo de actor o tipo de actividad económica; y según la magnitud del evento extremo de precipitación mensual, la cual se define con los periodos de retorno 2, 10, 20, 50 y 100; además, se tiene en cuenta el nivel al que se toma la acción, es decir, municipal, departamental y por cuenca. Lo anterior se basa en lo desarrollado por Barrios (2013).

Las acciones son definidas con base en criterios de gestión del riesgo y según el inventario de desastres de magnitudes similares que han ocurrido en la zona de estudio. Esta información se obtuvo de la base de datos del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) tras hacer una consulta por el tipo de evento “inundación” en el departamento de Santander, en el inventario nacional de desastres de Colombia (Fundación OSSO, 2014).

Finalmente, la ficha se genera por cada actor en distintos niveles de acuerdo con la tabla 5.3. Del proceso anterior se obtienen: i) acciones que se recomiendan para los meses lluviosos en la zona de estudio considerando el periodo normal (condiciones climatológicas normales) y ii) acciones para periodos con ocurrencia de eventos de La Niña.

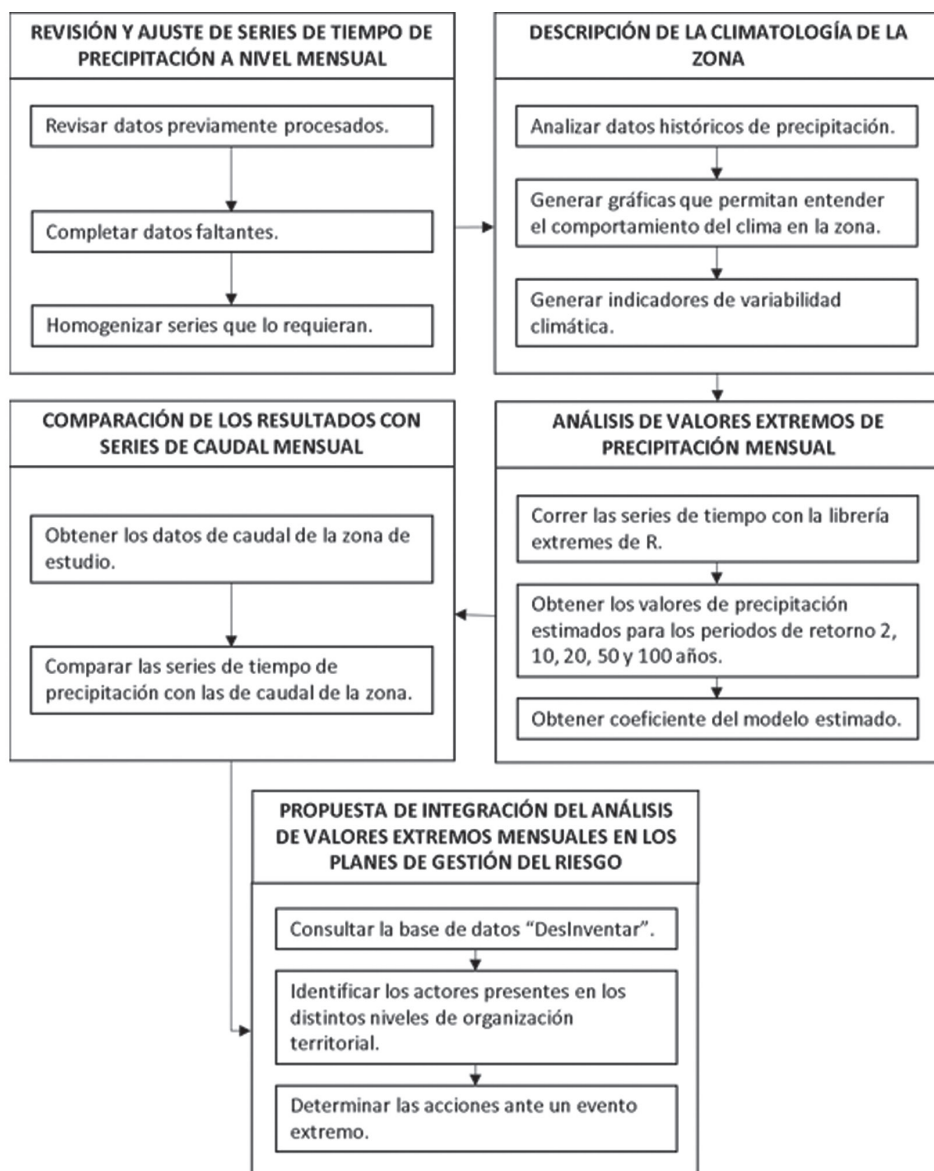
Tabla 5.3. Ficha de acciones para un tipo de actor

Periodo de retorno	Precipitación	Acciones a tomar
2	P_2	Acciones P2
10	P_{10}	Acciones P10
20	P_{20}	Acciones P20
50	P_{50}	Acciones P50
100	P_{100}	Acciones P100

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que resume la metodología (Figura 5.3):

Figura 5.3. Esquema de metodología



Fuente: elaboración propia

5.5 Resultados

5.5.1 Revisión y ajuste de series de tiempo de precipitación a nivel mensual

De este proceso se obtuvieron 35 estaciones con datos confiables para hacer los análisis posteriores. Se incluyó la estación 2403033-El Tope, perteneciente a la región del río Sogamoso, para completar el cuadrante necesario (36 estaciones) y hacer las interpolaciones con las que se obtuvieron los mapas de la siguiente fase. La localización de las estaciones se muestra en el mapa 5.2. El listado de las estaciones empleadas para el posterior análisis se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Lista de estaciones meteorológicas de estudio

Código	Nombre	Altitud	Longitud	Latitud
2305507	Argelia	1669	-75,14	5,731
2308503	Alejandro	2090	-75,14	6,38
2308504	La Selva	835	-75,41	6,13
2308508	EXP EL NUS CP	835	-74,84	6,49
2308511	El Peñol	1956	-75,24	6,21
2308520	Apto J M Córdova	1100	-75,43	6,17
2308521	Las Violetas	1132	-75,00	6,35
2308522	San Carlos	2078	-75,04	6,16
2309501	Apto Pto Berrio	150	-74,41	6,47
2310005	La Bodega	138	-74,41	6,72
2310007	Ramblas	120	-74,37	6,64
2310008	Sta Clara	100	-74,32	6,65
2310503	Vegachi	544	-74,80	6,77
2311006	Padilla	100	-74,33	6,19
2312007	Pto Araujo	160	-74,12	6,53
2312020	Pto Araujo Alertas	159	-74,08	6,53

Código	Nombre	Altitud	Longitud	Latitud
2312504	Campo Capote	180	-73,92	6,62
2312505	Carare	168	-74,06	6,65
2312506	Albania	1690	-73,91	5,76
2312512	Cimitarra	300	-73,95	6,31
2314004	Pte Ferrocarril	95	-73,94	6,77
2318005	El Establo	98	-73,60	7,54
2318011	Paturia	105	-73,83	7,59
2318012	La Coquera	170	-73,92	7,22
2319014	El Playón	500	-73,20	7,46
2319036	Portachuelo	800	-73,17	7,33
2319046	Papayal	100	-73,65	7,62
2319050	San Alberto	134	-73,39	7,76
2319511	Llano Grande	777	-73,17	7,03
2321002	La Gloria	40	-73,80	8,63
2321016	Gamarra	150	-73,74	8,33
2401064	Bolívar	2260	-73,77	5,99
2401067	Sucre	2270	-73,80	5,92
2401082	Guavatá	2018	-73,70	5,96
2401107	El Santuario	1800	-73,47	6,32
2403033	El Tope	150	-73,52	7,13

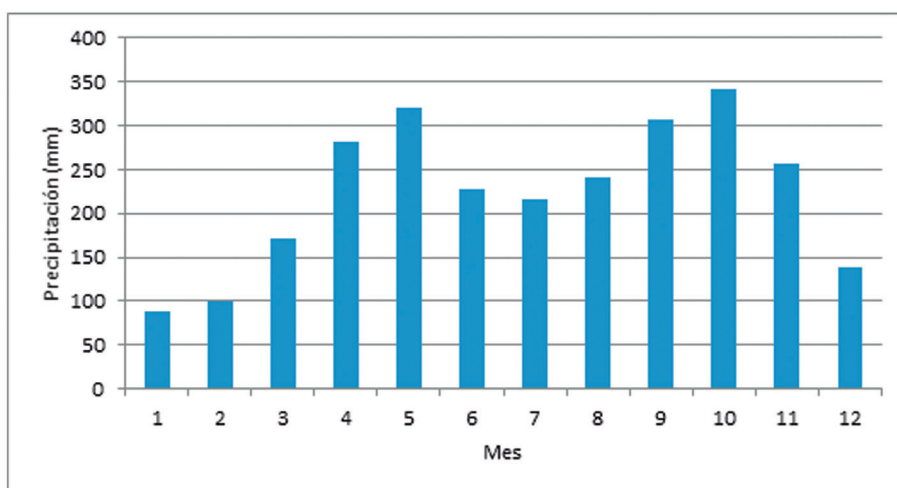
Fuente: elaboración propia

5.5.2 Descripción de la climatología de la zona

A continuación, se presentan cuatro resultados de modelos de valores extremos para mayo y octubre (meses lluviosos), y febrero (mes seco). El primero incluye los valores máximos de precipitación sin ocurrencia de eventos El Niño o La Niña, denominado “periodo normal”; el segundo incluye los valores máximos para todo

el periodo de tiempo disponible para cada estación meteorológica, que es designado como “periodo normal climatológico”; el tercero incluye los valores máximos de precipitación para los meses de mayo con ocurrencia de eventos La Niña, denominado “periodo La Niña”; y el último caso incluye los valores máximos de precipitación para los meses de mayo con ocurrencia de eventos El Niño. Para los tres casos, se empleó como criterio de clasificación el índice ONI y se asignó el nombre de “periodo El Niño”.

Figura 5.4. Precipitación promedio mensual, región Medio Magdalena



Fuente: elaboración propia

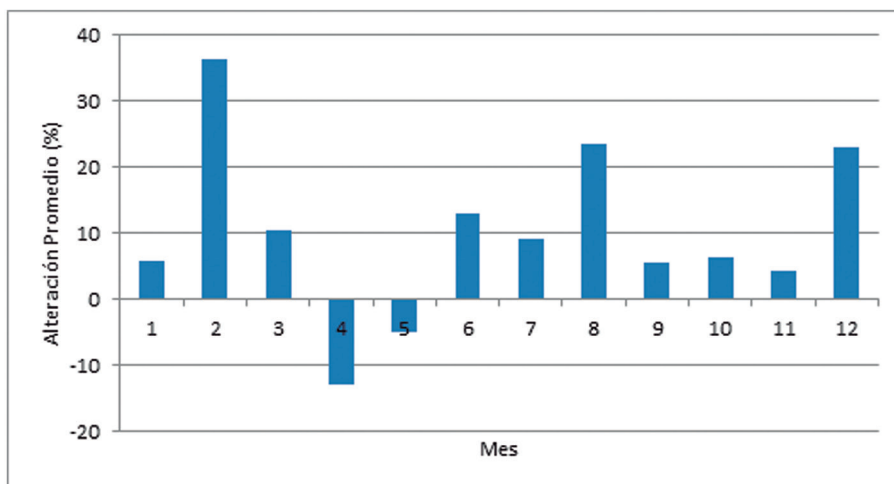
Es importante señalar que para este análisis de valores extremos se consideró el mes de mayo, pues corresponde a la primera temporada de lluvia en la zona de análisis. En este contexto, octubre resulta ser el mes que caracteriza la segunda temporada de lluvia, que es más intensa. En la figura 5.4, se ilustra el promedio mensual de precipitación para toda la zona de estudio. Lo anterior es evidencia de un marcado régimen de precipitación bimodal.

Por otro lado, diciembre, enero y febrero son los meses más secos. Es clave tener en cuenta este trimestre por posibles efectos en los valores de precipitación en periodos de ocurrencia de eventos El Niño. Entre las épocas de lluvia, en los meses de junio, julio y agosto disminuye la precipitación promedio, siendo julio el mes en que más se reducen estos valores.

Se identificó que los meses que evidencian mayor aumento en los valores máximos de precipitación en los meses de ocurrencia de eventos La Niña son: febrero

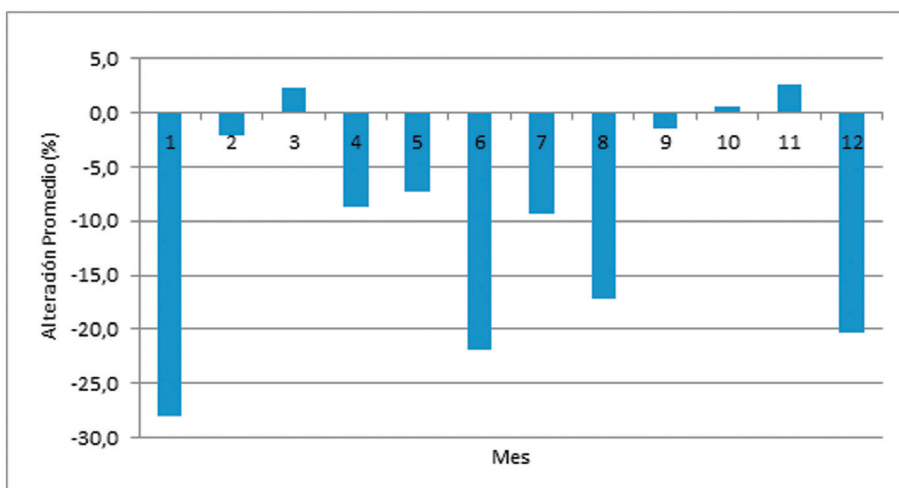
(36,3 %), agosto (23,6 %) y diciembre (23,0 %), resultado que se ilustra en la figura 5.5; estos meses no corresponden climatológicamente a periodos lluviosos.

Figura 5.5. Alteración promedio de precipitación mensual por eventos La Niña, región Medio Magdalena



Fuente: elaboración propia

Figura 5.6. Alteración promedio de precipitación mensual por eventos El Niño, región Medio Magdalena



Fuente: elaboración propia

Lo anterior permite establecer a febrero como un mes de interés para el análisis de valores extremos, ya que la ocurrencia del fenómeno de La Niña en dicho mes puede ocasionar valores elevados de precipitación; y dado el comportamiento climatológico histórico de febrero, los municipios pueden no estar preparados para un evento extremo.

Los meses que evidencian mayor aumento en los valores máximos de precipitación en el periodo de ocurrencia de eventos El Niño son: enero (-28,1 %), junio (-21,9 %) y diciembre (-20,4 %); resultado que se ilustra en la figura 5.6.

A continuación, se describe la variabilidad espacial de la precipitación. Para ello, se presenta el mapa de isoyetas anual de la región, el cual se elaboró usando los promedios multianuales de cada estación. En el mapa 5.3, las tonalidades rojas son los valores más bajos y los colores azules son los valores más altos de precipitación.

Se observa que la zona más lluviosa está hacia la parte suroccidental de la zona de estudio, y el gradiente disminuye claramente hacia la zona nororiental, siendo los puntos más bajos las estaciones 2319511-Llano Grande y 2321016-Gamarra. Una explicación de este comportamiento en el primer caso es la influencia de la cordillera oriental, donde las nubes se concentran en la franja oriental de la cordillera, haciendo que la franja occidental sea una zona de barlovento; y en el segundo caso, son las sabanas del Cesar, que concentran una menor cantidad de nubosidad.

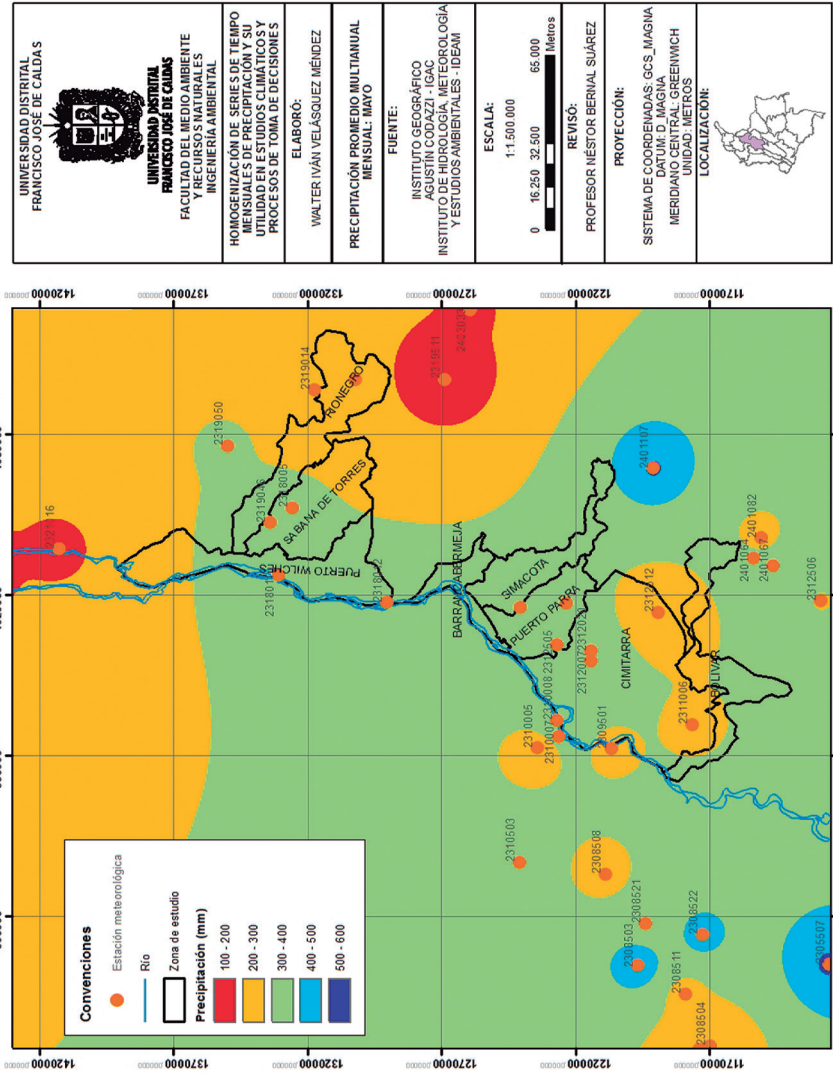
En la zona de interés, se encontró que la totalidad de los ocho municipios tiene unos valores bastante homogéneos, con una precipitación entre 2500 y 3000 mm, excepto en la zona oriente de Rionegro y en la zona norte de Puerto Wilches, que presentan una menor precipitación.

Analicemos ahora los meses de mayo y octubre, que corresponden a las dos temporadas lluviosas, así como enero y febrero son los meses más secos.

Para mayo observamos un comportamiento bastante similar al anual, la zona más seca se encuentra hacia el nororiente, mientras que la zona suroccidental es la más lluviosa. Los ocho municipios están ubicados en una zona bastante homogénea entre los 300 y 400 mm, aunque hay una parte de los municipios de Cimitarra, Bolívar, Rionegro, Sabana de Torres y Puerto Wilches que está en el rango anterior de 200 a 300 mm (Mapa 5.4).

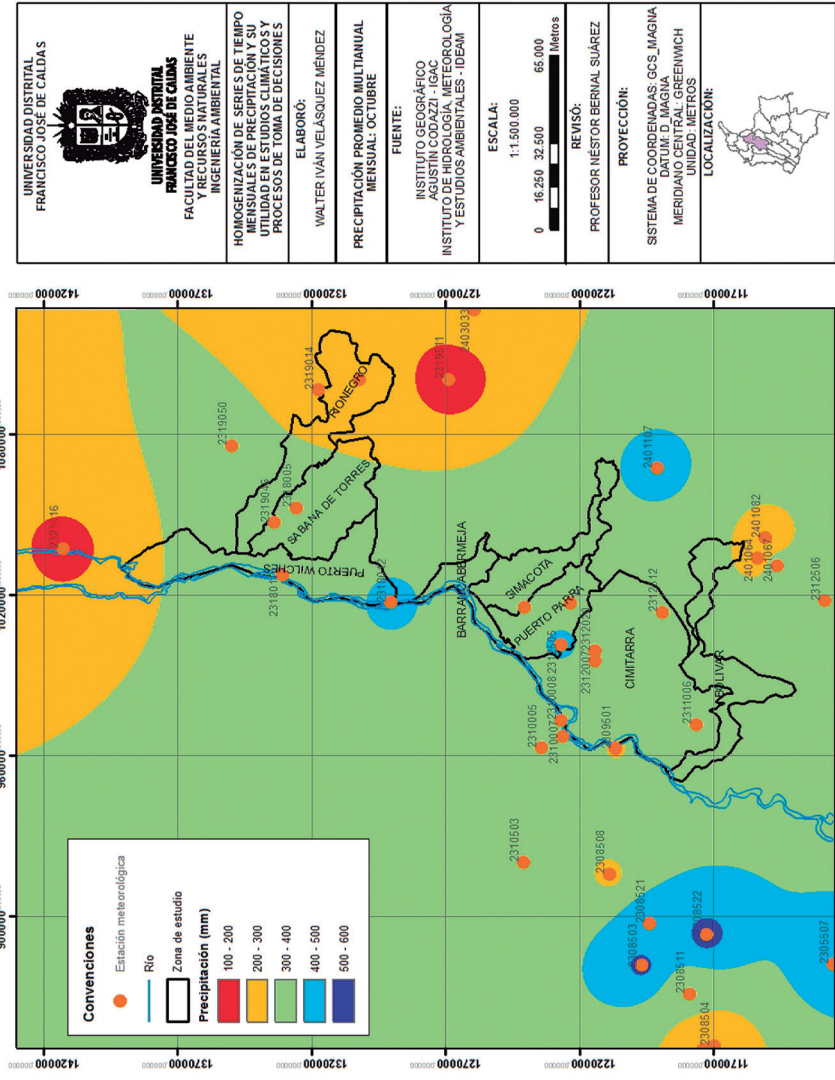


Mapa 5.4. Precipitación promedio multianual mensual: mayo



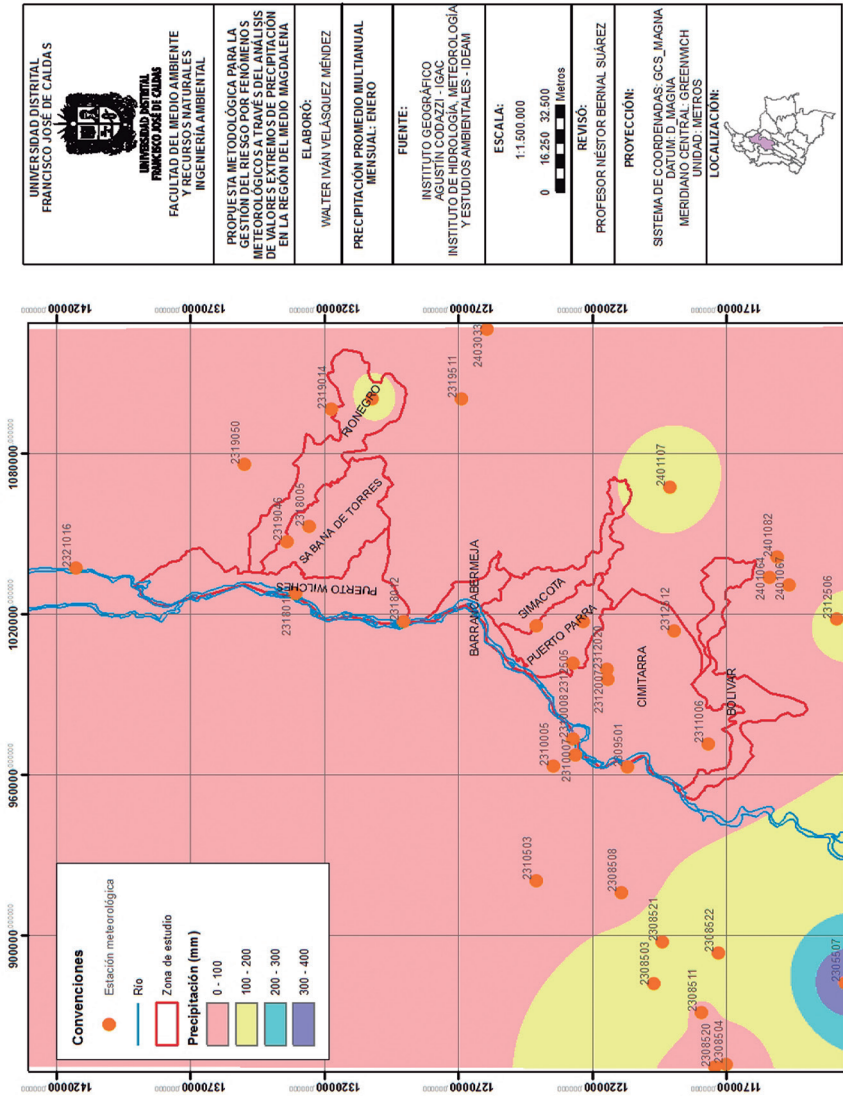
Fuente: elaboración propia

Mapa 5.5. Precipitación promedio multianual mensual: octubre



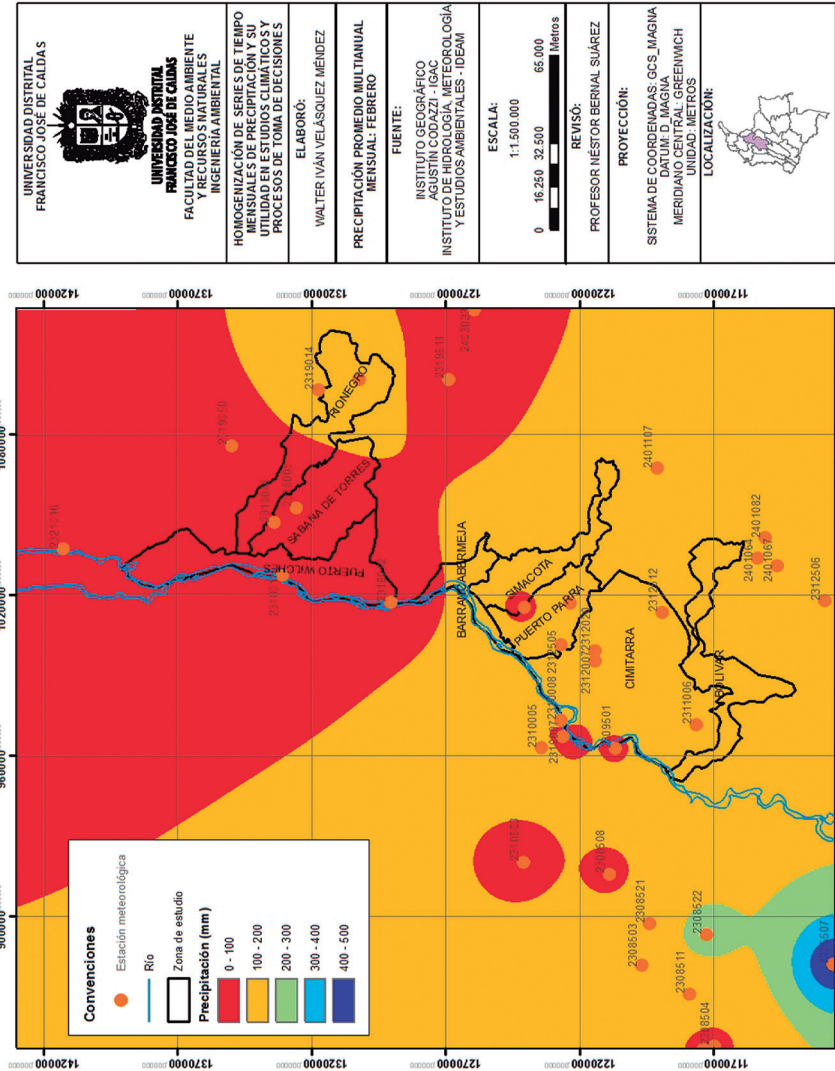
Fuente: elaboración propia

Mapa 5.6. Precipitación promedio multianual mensual: enero



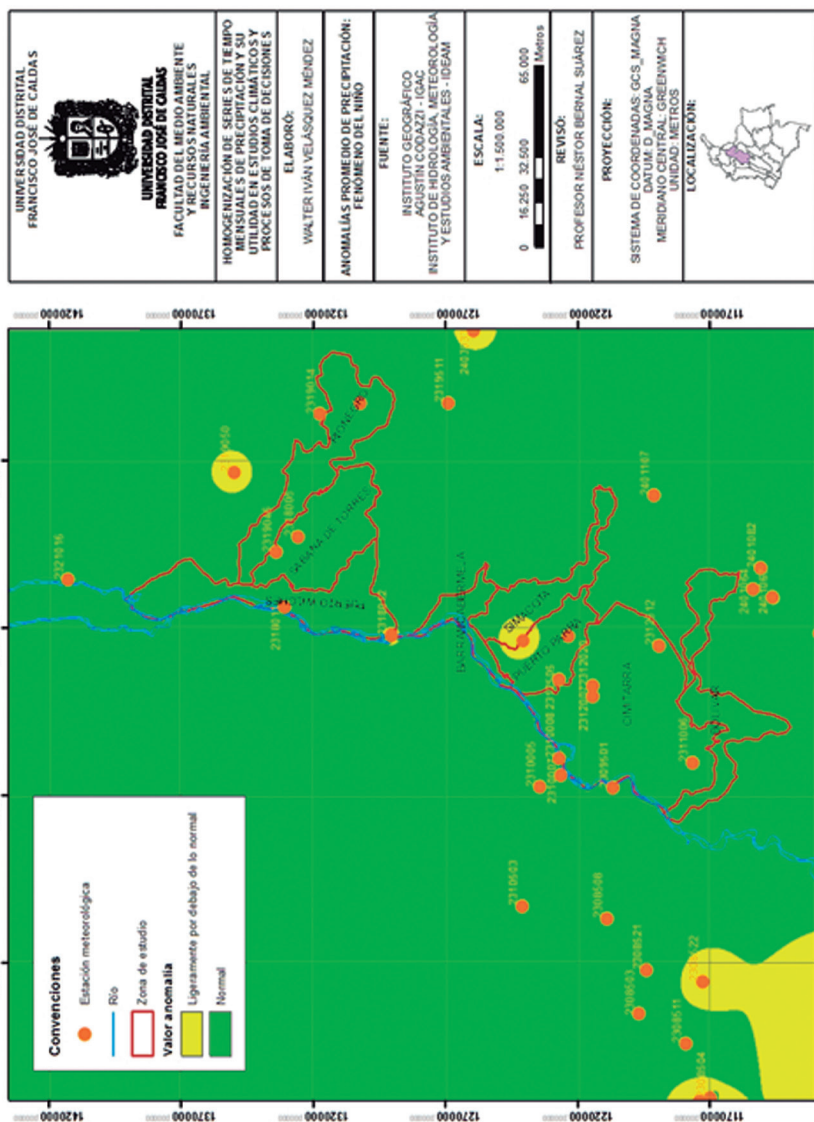
Fuente: elaboración propia

Mapa 5.7. Precipitación promedio multianual mensual: febrero



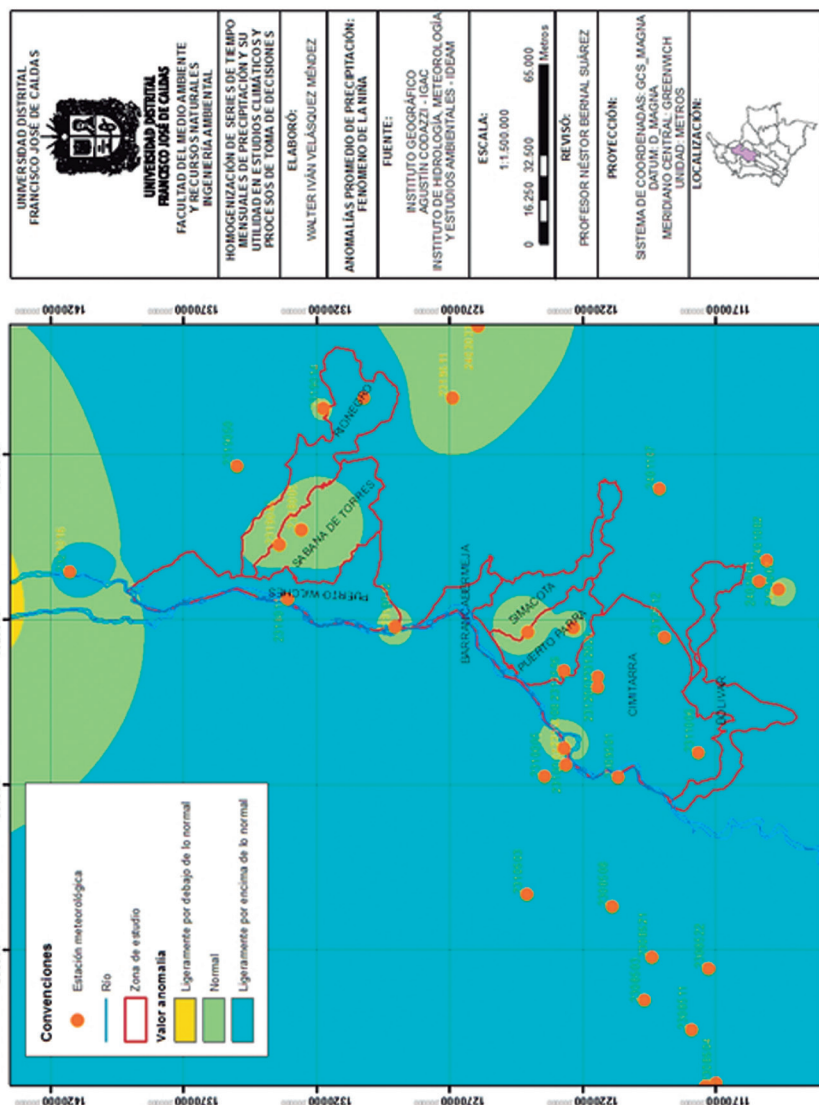
Fuente: elaboración propia

Mapa 5.8. Anomalías promedio de precipitación: fenómeno de El Niño



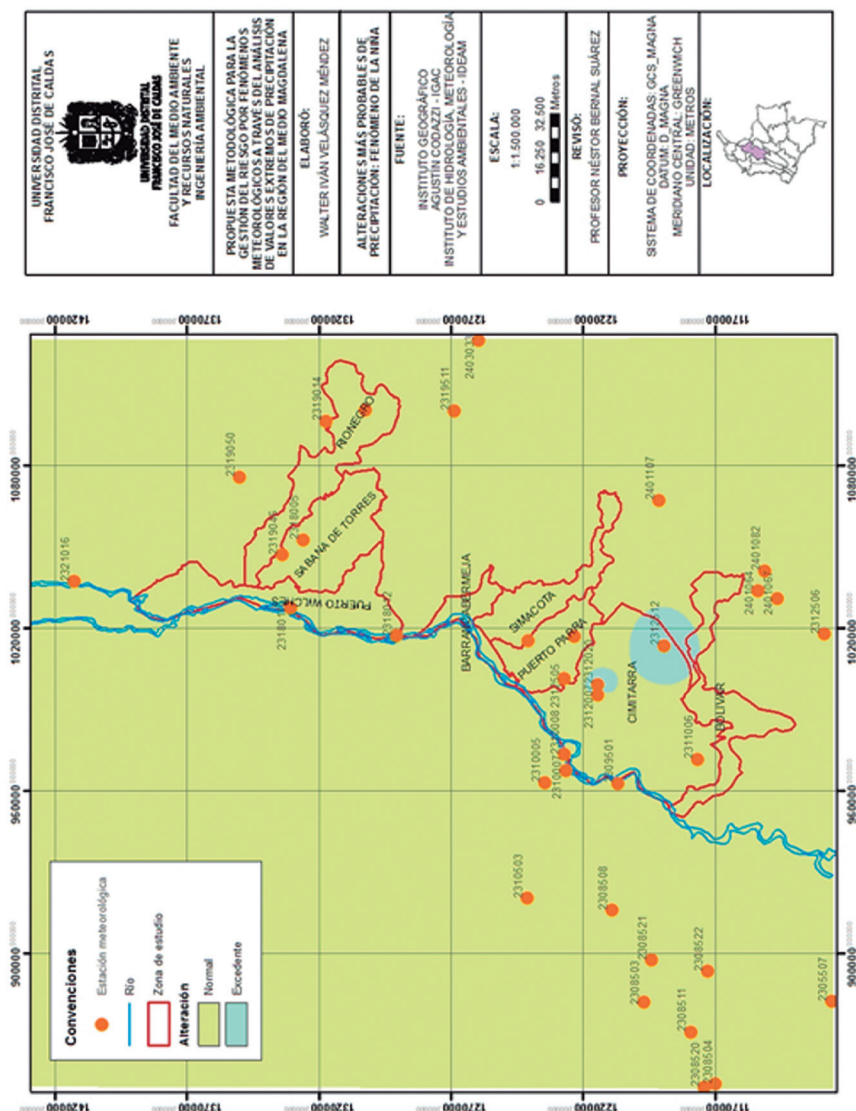
Fuente: elaboración propia

Mapa 5.9. Anomalías promedio de precipitación: fenómeno de La Niña



Fuente: elaboración propia

Mapa 5.10. Alteraciones más probables de precipitación para el fenómeno de La Niña



Fuente: elaboración propia

En octubre se presenta un comportamiento bastante similar al de mayo, aunque la homogeneidad de la zona de estudio es mayor, excepto en una pequeña parte de los tres municipios más al norte (Mapa 5.5).

Cabe destacar que la estación 2318012-La Coquera registra un rango de precipitación mayor al del resto de estaciones cercanas; lo que es de especial interés por su cercanía al punto donde el río Sogamoso se une con el río Magdalena.

Como era de esperarse, las dos temporadas lluviosas registran comportamientos muy similares en cuanto al rango de precipitación en la zona (300 a 400 mm), con la diferencia de que el mes más húmedo (octubre) muestra una mayor similitud en todas las estaciones. Para los dos meses, la zona nororiental es la parte más seca, lo que coincide con lo expuesto por Barrios (2012), dado que la región del Bajo Magdalena tiene un régimen unimodal con pico en agosto y septiembre.

Para enero (Mapa 5.6) se observa que casi la totalidad de la zona de interés se encuentra en el mismo rango de precipitación, de 0 a 100 mm, con excepción de una pequeña parte del municipio de Rionegro. Al igual que en los mapas anteriores, la precipitación muestra un gradiente de aumento hacia la parte suroccidental, por lo que los municipios más al norte deben sufrir de sequías más severas en esta temporada del año.

Este resultado coincide nuevamente con lo consignado para el Bajo Magdalena, que también tiene su temporada más seca en diciembre y enero.

Para febrero se observa un comportamiento interesante, ya que la región de estudio se divide en dos partes claramente separadas luego del río Sogamoso. La parte norte nuevamente es la menos lluviosa, excepto una parte del municipio de Rionegro que evidencia valores más altos, contrario a lo que se había visto en los demás meses (Mapa 5.7).

Anomalías promedio de precipitación

Ahora, presentamos el resultado de las anomalías promedio de precipitación para periodos El Niño y La Niña. Para ambos casos, se muestra el mapa de anomalías regional, elaborado a partir del cálculo de las anomalías por cada mes de cada serie y luego de promediar sus valores en la ocurrencia de cada fenómeno ENOS.

En el caso de eventos El Niño, se encuentra que la zona de estudio tiene un valor de anomalía normal casi en su totalidad. Lo anterior indica que este fenómeno tiene una influencia prácticamente nula sobre los valores de precipitación en la región de estudio. Esto puede explicarse probablemente por la influencia que las cordilleras Oriental y Central tienen sobre la región del valle interandino del Medio

Magdalena, pues resguardan la zona de los efectos que tienen estas variaciones en otras zonas del país, por ejemplo, la región de la Sabana de Bogotá (Mapa 5.8).

Por su parte, las anomalías producto de la ocurrencia del fenómeno de La Niña tienen una influencia mayor pero poco relevante sobre los valores de la precipitación en la región analizada. La mayor parte se encuentra en la categoría de ligeramente por encima de lo normal, lo cual indica que el efecto del fenómeno alcanza a percibirse en el aumento de la lluvia sin que pueda considerarse de preocupación para las comunidades que habitan la zona (Mapa 5.9).

Es de interés el hecho de que la zona al norte de nuestra área de estudio muestra una anomalía negativa ante la ocurrencia de La Niña, es decir que causa un efecto contrario al que se esperaría, aunque esta disminución no parece de gran magnitud.

Alteraciones más probables de precipitación

En cuanto a las alteraciones más probables de precipitación para el fenómeno de La Niña (Mapa 5.10), se encuentra que no hay ninguna alteración para la mayor parte de la zona; con excepción de dos estaciones ubicadas en el municipio de Cimitarra. De acuerdo con esta metodología, toda la zona tiene un comportamiento normal ante la ocurrencia de este fenómeno.

Dicho resultado concuerda con lo obtenido a través de la metodología de anomalías, y reafirma la conclusión de que los fenómenos ENOS no tienen una influencia importante en el aumento o la disminución de la precipitación en la región.

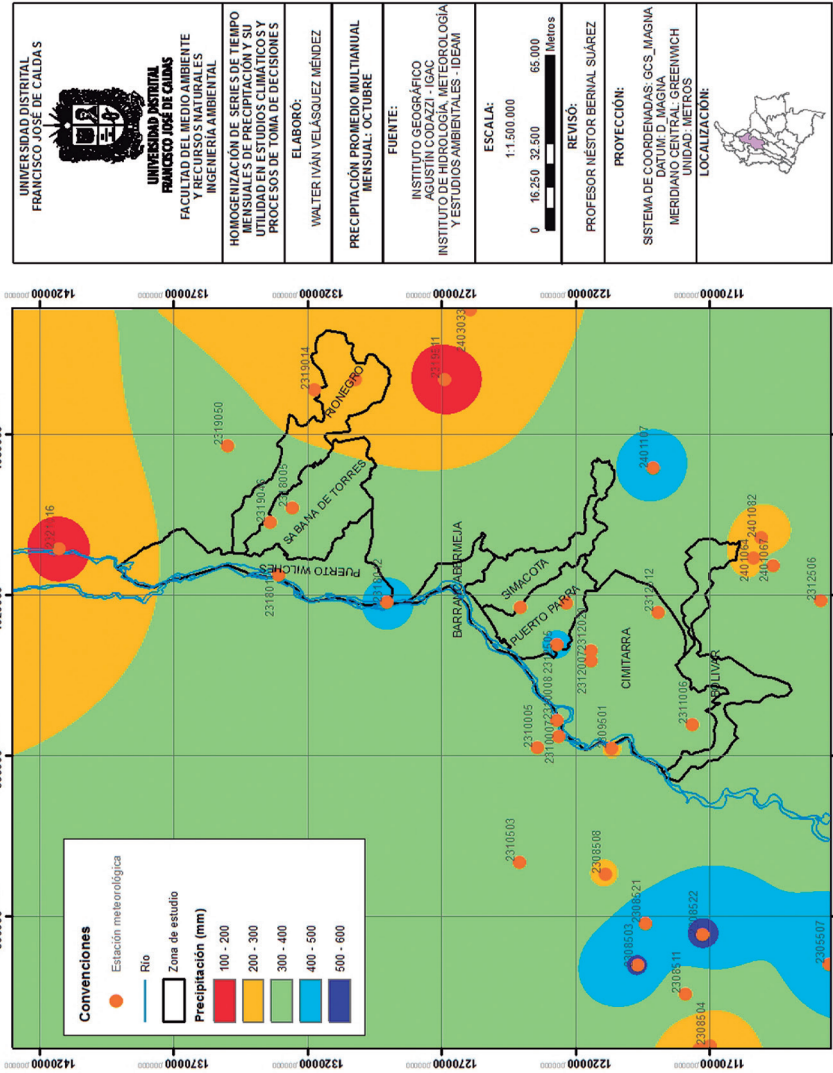
5.5.3 Análisis de valores extremos de precipitación mensual

A continuación, se presenta el mapa de valores máximos de precipitación para febrero y octubre. Los valores corresponden a los máximos de todas las series de cada estación.

Como se observa en el mapa 5.11, febrero muestra un comportamiento muy similar al de los valores promedio, es decir que la zona nororiental tiene los valores más bajos de la región, en especial la estación 2321016-Gamarra; mientras que la zona suroccidental es la que muestra los valores más altos.



Mapa 5.12. Valores máximos de precipitación: octubre



Fuente: elaboración propia

La mayor parte de la zona de estudio presenta valores máximos entre 200 y 300 mm para febrero, que incluye partes de los municipios de Rionegro, Sabana de Torres, Barrancabermeja, Simacota, Puerto Parra y Cimitarra. La otra parte de la zona se encuentra en el rango entre 300 y 400 mm e incluye partes de los municipios de Bolívar, Cimitarra, Sabana de Torres, Simacota, Rionegro y en la unión del río Sogamoso con el Magdalena en Puerto Wilches. Estos municipios son de interés, ya que en un periodo de retorno de 10 el valor de la precipitación estimada para periodos normales fue de 367,91 mm, lo que indica que existe una probabilidad del 10 % de que la precipitación supere este valor en periodos normales.

Dado lo anterior, los municipios que están en el rango entre 300 y 400 mm deben tener precauciones especiales en febrero, en el contexto de la gestión del riesgo. Adicionalmente, es importante señalar que en periodos de ocurrencia de La Niña dicho periodo de retorno de 10 alcanza un valor de 407,4 mm. En el mapa, estos valores se ubican en las proximidades de las estaciones que están por fuera de la zona de estudio: 2308503 (La Alejandría), ubicada en el municipio de Alejandría, Antioquia, y 2319511 (Llano Grande), en el municipio de Girón, Santander.

Por otro lado, para octubre (Mapa 5.12) la mayor parte de la zona se encuentra entre 600 y 700 mm. Los valores más altos se encuentran entre 900 y 1000 mm en la estación 2318011 en el municipio de Puerto Wilches, y en el municipio de Cimitarra en la estación 2312020, la cual posee una precipitación máxima entre 800 y 900 mm. Para estos dos municipios, es muy importante la definición de acciones en los meses de temporada lluviosa ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos vinculados con la ocurrencia de valores altos de precipitación. Esto se debe a que, de acuerdo con lo encontrado en la modelación, para periodos de retorno de 10 en periodos normales climatológicos la precipitación estimada es de 825,07 mm, lo que significa que existe una probabilidad del 10 % de que la precipitación supere dicho valor en cualquier periodo durante octubre.

Ahora, se presentan los resultados de los ajustes a distribuciones de probabilidad generados en el *software* R, utilizando la librería “extRemes” (Guilleland y Katz, 2011), gracias a la cual se obtuvieron los modelos de ajuste, además de los valores de precipitación para los periodos de retorno de 2, 10, 20, 50 y 100. También, se muestran los valores obtenidos para el criterio de información bayesiano (BIC) y para el criterio de información de Akaike (AIC), que nos permiten observar el grado de bondad de ajuste del modelo probabilístico de valores extremos que fue estimado (entre menor sea el valor de estos criterios mejor ajustado está el modelo).

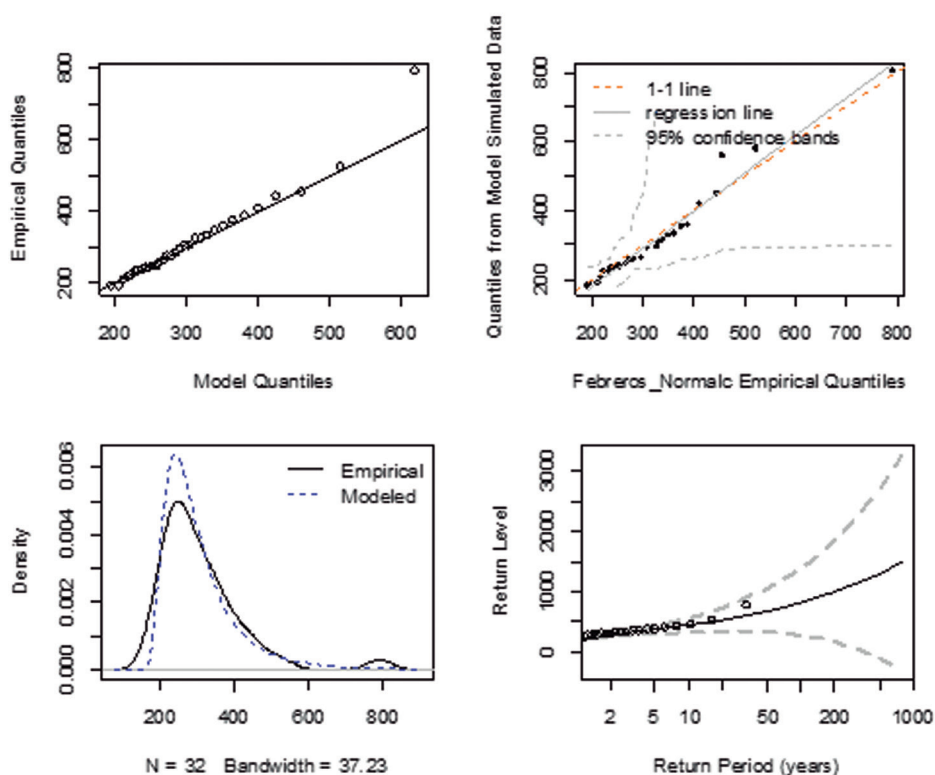
A continuación, se encuentran los resultados para febrero, mayo y octubre en los cuatro periodos definidos: normal climatológico (todos los valores), normal (sin ocurrencia de La Niña o El Niño), La Niña y El Niño.

a. Febrero:

- Periodos normal climatológico:

Figura 5.7. Gráficas modelo para periodos normal climatológico: febrero

`fevd(x = Febreros_Normalc, data = Datos_Febreros)`

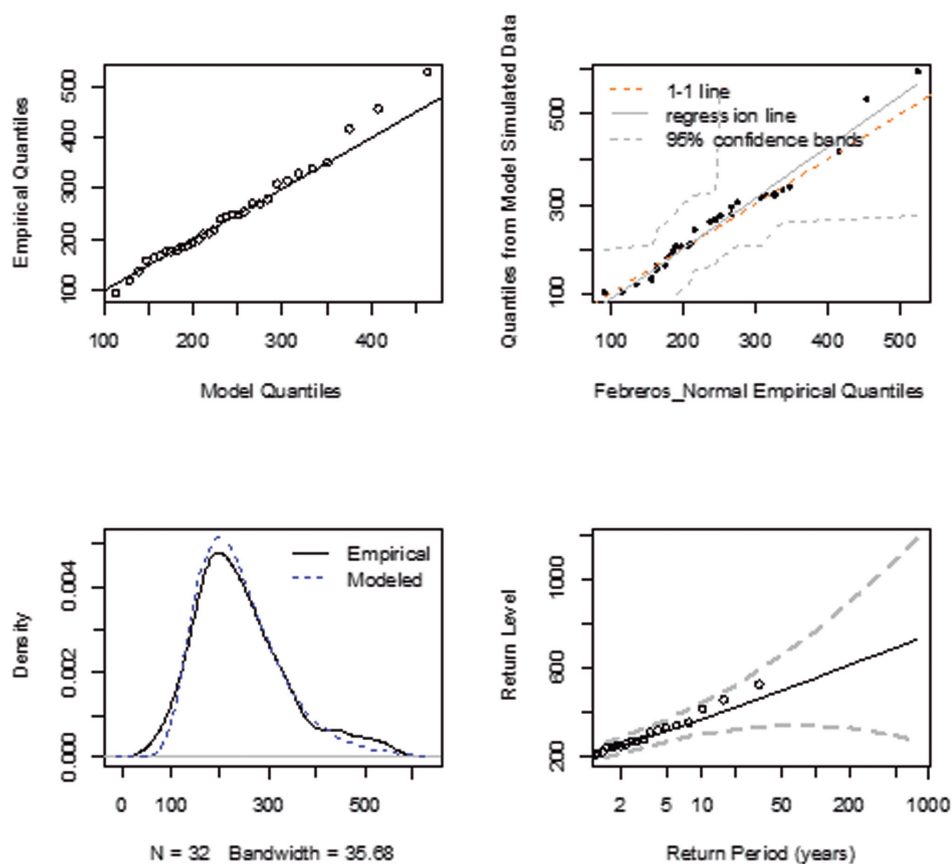


Fuente: elaboración propia

- Periodo normal:

Figura 5.8. Gráficas modelo para periodos normal: febrero

`fevd(x = Febreros_Normal, data = Datos_Febreros)`

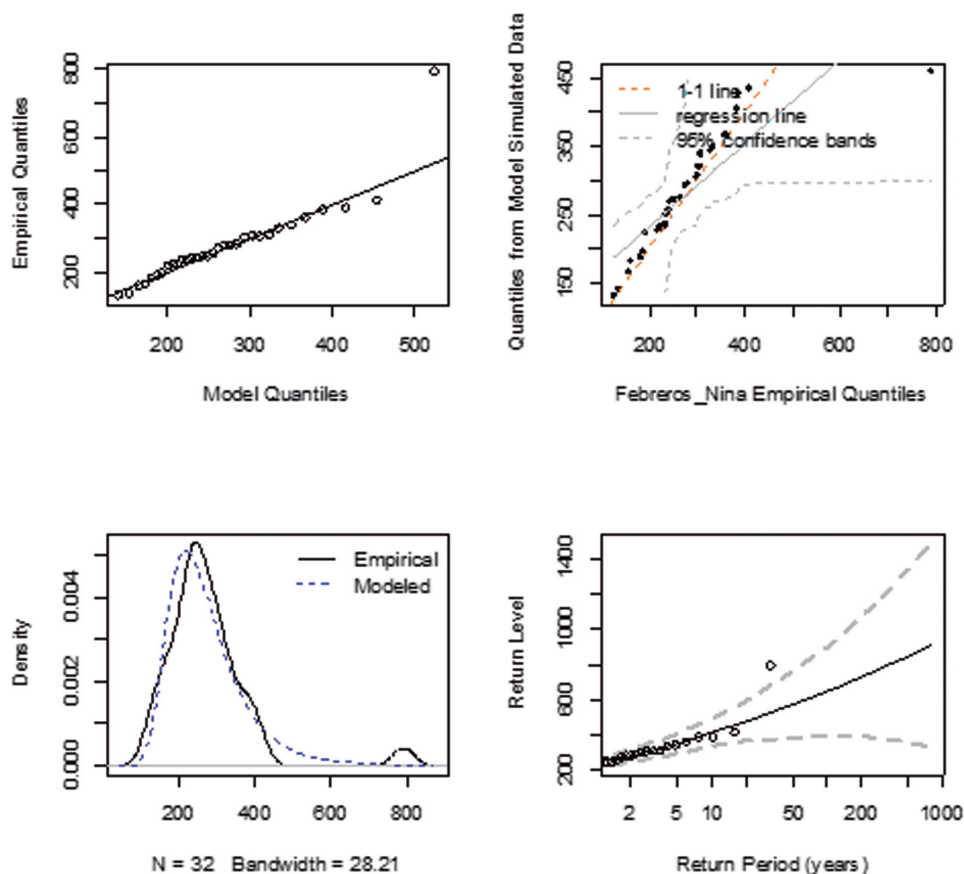


Fuente: elaboración propia

- Periodos La Niña:

Figura 5.9. Gráficas modelo para periodos La Niña: febrero

`fevd(x = Febreros_Nina, data = Datos_Febrero)`

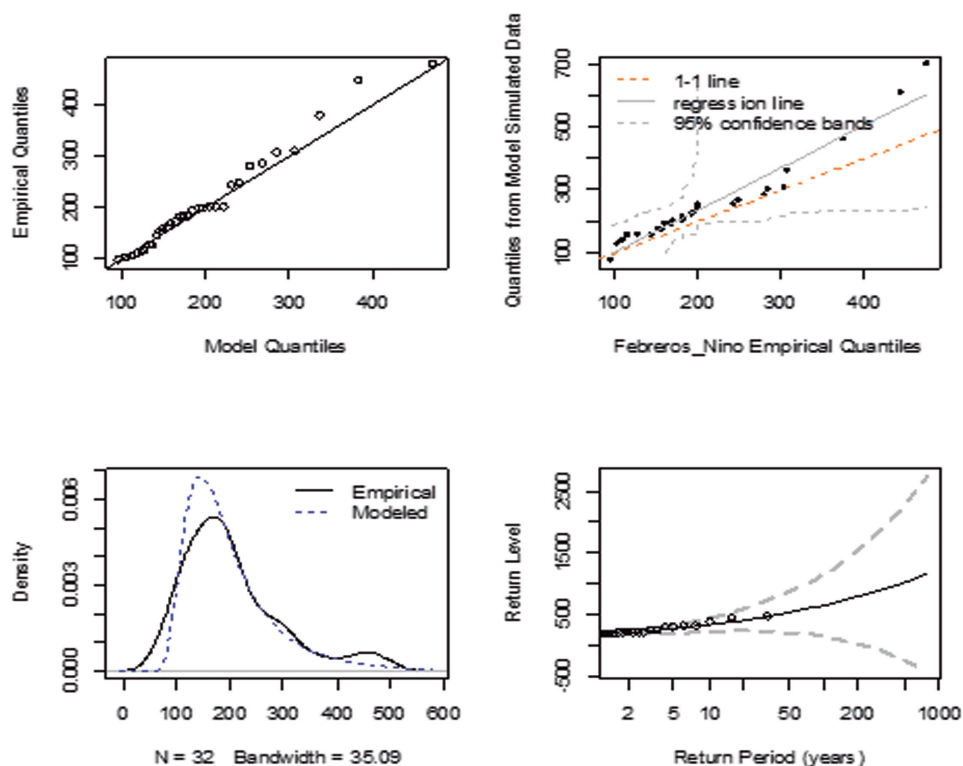


Fuente: elaboración propia

- Periodos El Niño

Figura 5.10. Gráficas modelo para periodos El Niño: febrero

`fevd(x = Febreros_Nino, data = Datos_Febreros)`



Fuente: elaboración propia

Tabla 5.5. Resumen parámetros del modelo: febrero

Periodo	Parámetro de localización	Parámetro de escala	Parámetro de forma	Criterio AIC	Criterio BIC
Normal	201,13	71,48	0,03	381,55	385,94
Normal climatológico	259,19	59,93	0,29	379,40	383,80
La Niña	225,75	71,88	0,10	383,85	388,25
El Niño	156,68	55,72	0,26	373,71	378,11

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.6. Resumen periodos de retorno con intervalo de confianza del 95 %: febrero

Periodo	Periodo de retorno	Valor inferior IC 95 % (mm)	Valor estimado (mm)	Valor superior IC 95 % (mm)
Normal	2	196,2	227,5	258,8
	10	301,0	367,9	434,8
	20	326,4	423,8	521,2
	50	342,9	498,2	653,4
	100	342,7	555,3	767,9
Normal climatológico	2	253,1	282,4	311,7
	10	345,3	449,8	554,2
	20	360,0	542,2	724,4
	50	340,5	694,7	1048,9
	100	282,7	839,4	1396,2
La Niña	2	221,0	252,6	284,2
	10	330,9	407,4	483,9
	20	362,1	474,8	587,4
	50	388,0	569,6	751,2
	100	394,7	646,8	898,9
El Niño	2	150,1	178,1	206,1
	10	234,6	327,1	419,6
	20	242,8	406,3	569,9
	50	212,6	533,5	854,4
	100	147,3	651,2	1155,2

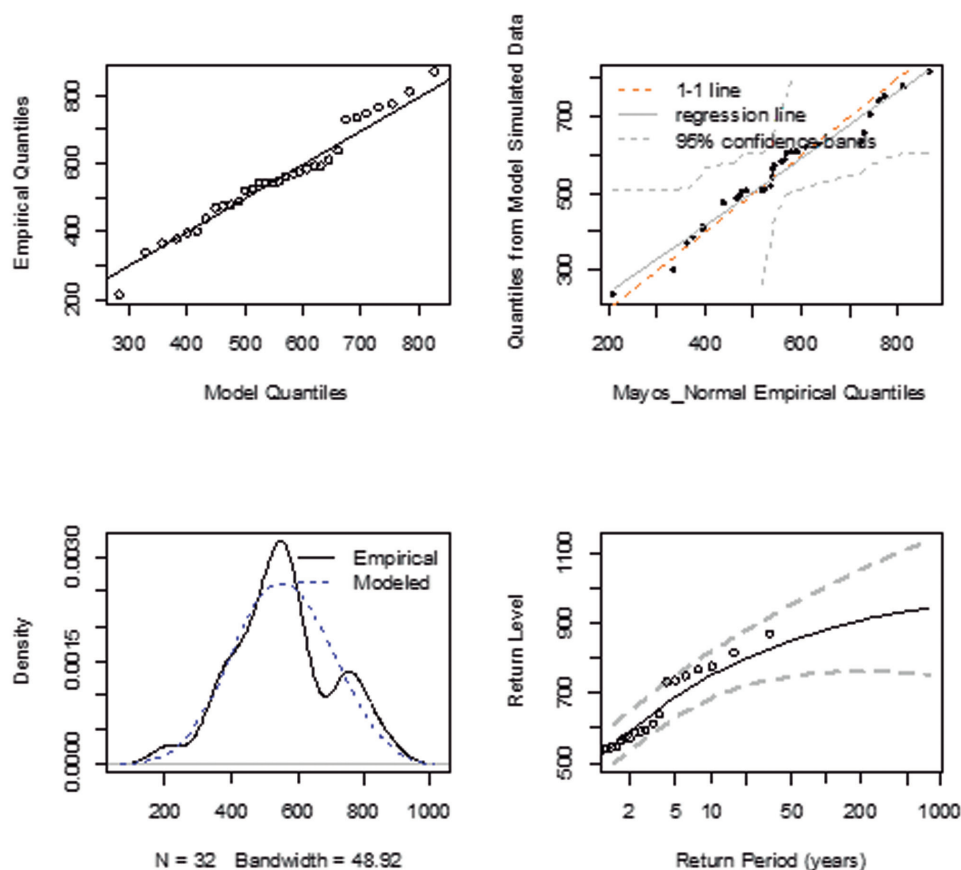
Fuente: elaboración propia

b. Mayo:

- Periodos normal climatológico:

Figura 5.11. Gráficas modelo para periodos normal climatológico: mayo

`fevd(x = Mayos_Normal, data = Datos_mayos1)`

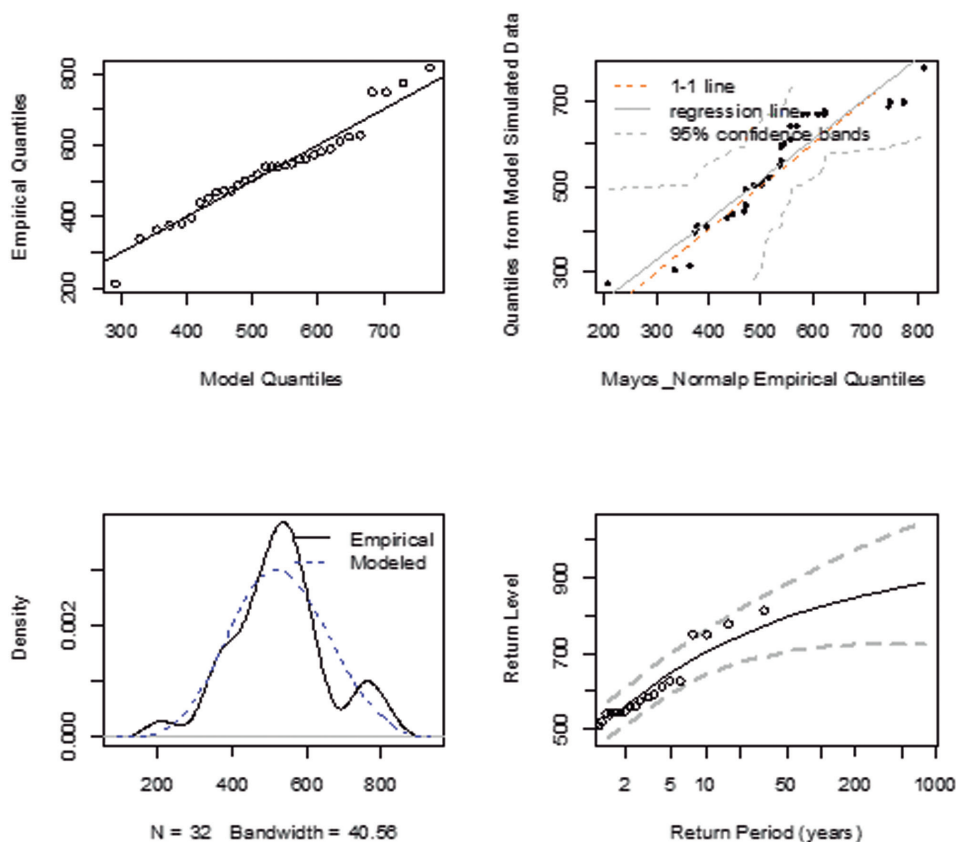


Fuente: elaboración propia

- Periodos normal:

Figura 5.12. Gráficas modelo para periodos normal: mayo

`fevd(x= Mayos_Normalp, data = Datos_mayos_medioM)`

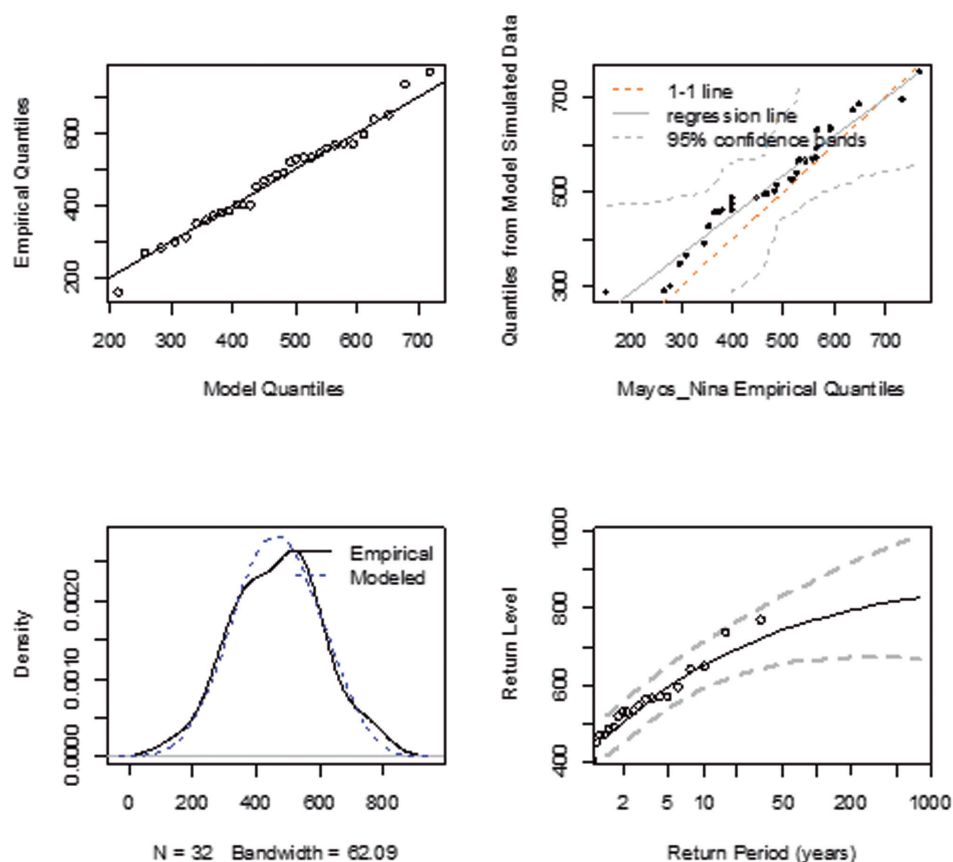


Fuente: elaboración propia

- Periodos La Niña:

Figura 5.13. Gráficas modelo para periodos La Niña: mayo

`fevd(x = Mayos_Nina, data = Datos_mayos_MediM)`

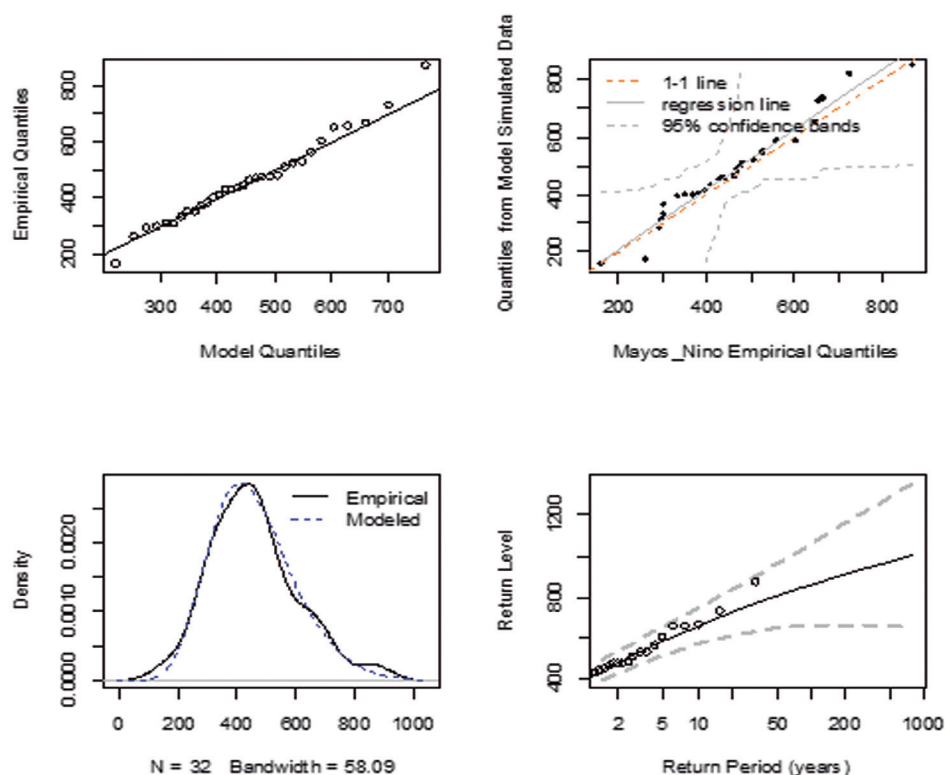


Fuente: elaboración propia

- Periodos El Niño:

Figura 5.14. Gráficas modelo para periodos El Niño: mayo

`fevd(x = Mayos_Nino, data = Datos_mayos2)`



Fuente: elaboración propia

Tabla 5.7. Resumen parámetros del modelo: mayo

Periodo	Parámetro de localización	Parámetro de escala	Parámetro de forma	Criterio AIC	Criterio BIC
Normal	481,08	127,73	-0,26	407,58	411,98
Normal climatológico	503,49	146,17	-0,28	416,00	420,40
La Niña	419,31	135,89	-0,28	410,93	415,33
El Niño	395,34	128,54	-0,11	413,79	418,19

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.8. Resumen periodos de retorno con intervalo de confianza del 95 %: mayo

Periodo	Periodo de retorno	Valor inferior IC 95 % (mm)	Valor estimado (mm)	Valor superior IC 95 % (mm)
Normal	2	476,44	525,73	575,02
	10	639,58	698,35	757,11
	20	676,05	744,86	813,68
	50	704,96	793,43	881,89
	100	716,57	822,80	929,03
Normal climatológico	2	497,16	554,40	611,64
	10	682,32	747,45	812,57
	20	721,24	798,16	875,07
	50	749,00	850,29	951,58
	100	758,04	881,34	1004,63
La Niña	2	413,96	466,63	519,30
	10	586,02	645,67	705,33
	20	623,95	692,58	761,21
	50	653,15	740,73	828,31
	100	664,28	769,36	874,44
El Niño	2	388,74	441,52	494,31
	10	566,79	651,72	736,66
	20	610,78	721,26	831,74
	50	646,68	803,50	960,32
	100	660,13	859,85	1059,57

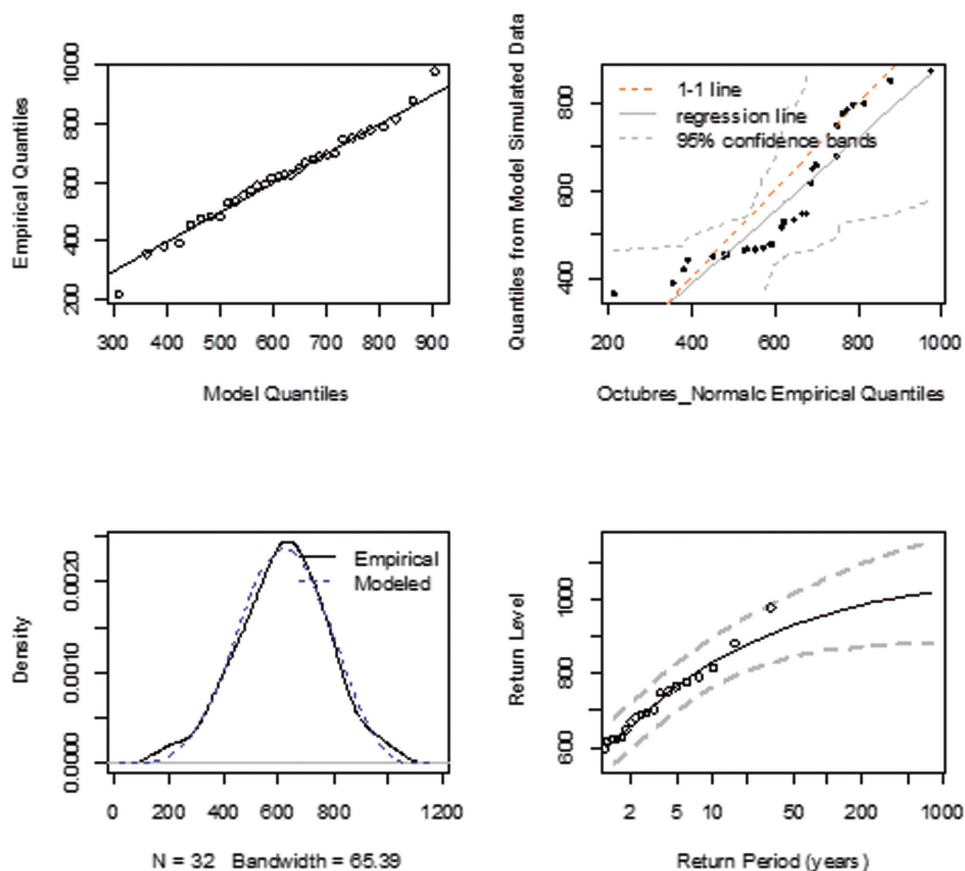
Fuente: elaboración propia

c. Octubre:

- Periodos normal climatológico:

Figura 5.15. Gráficas modelo para periodos normal climatológico: octubre

`fevd(x = Octubre_Normalc, data = Datos_Octubre)`

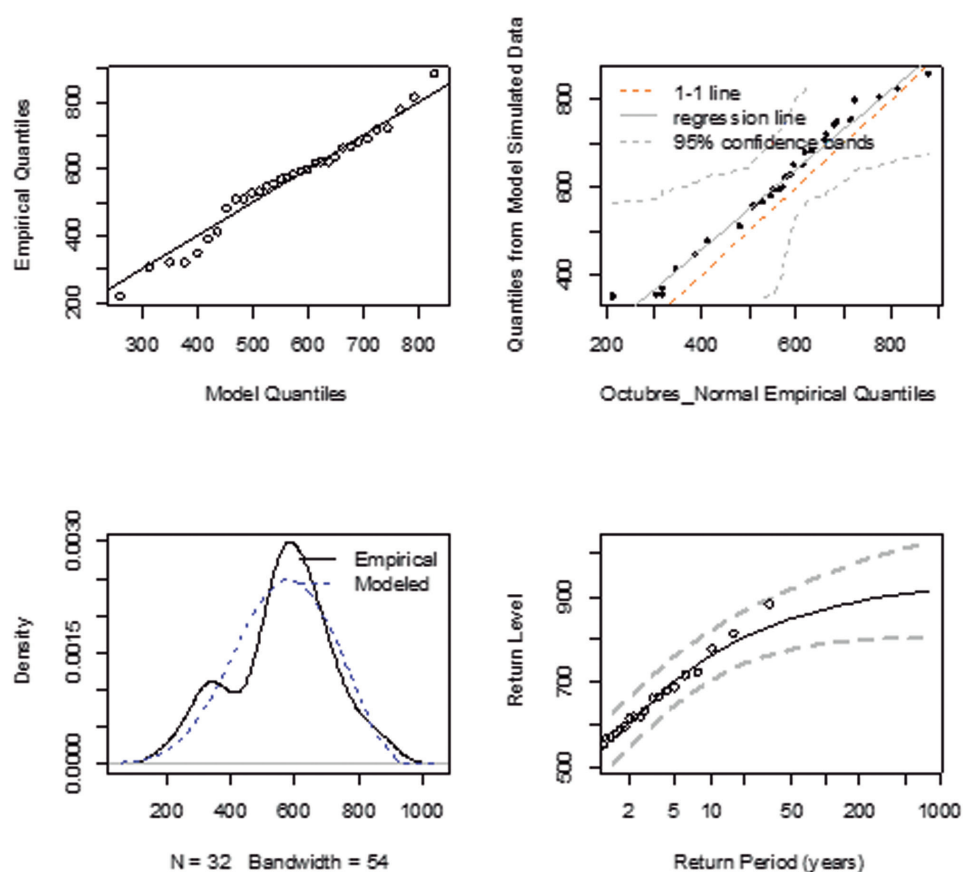


Fuente: elaboración propia

- Periodos normal:

Figura 5.16. Gráficas modelo para periodos normal: octubre

fevd(x = Octubre_Normal, data = Datos_Octubres)

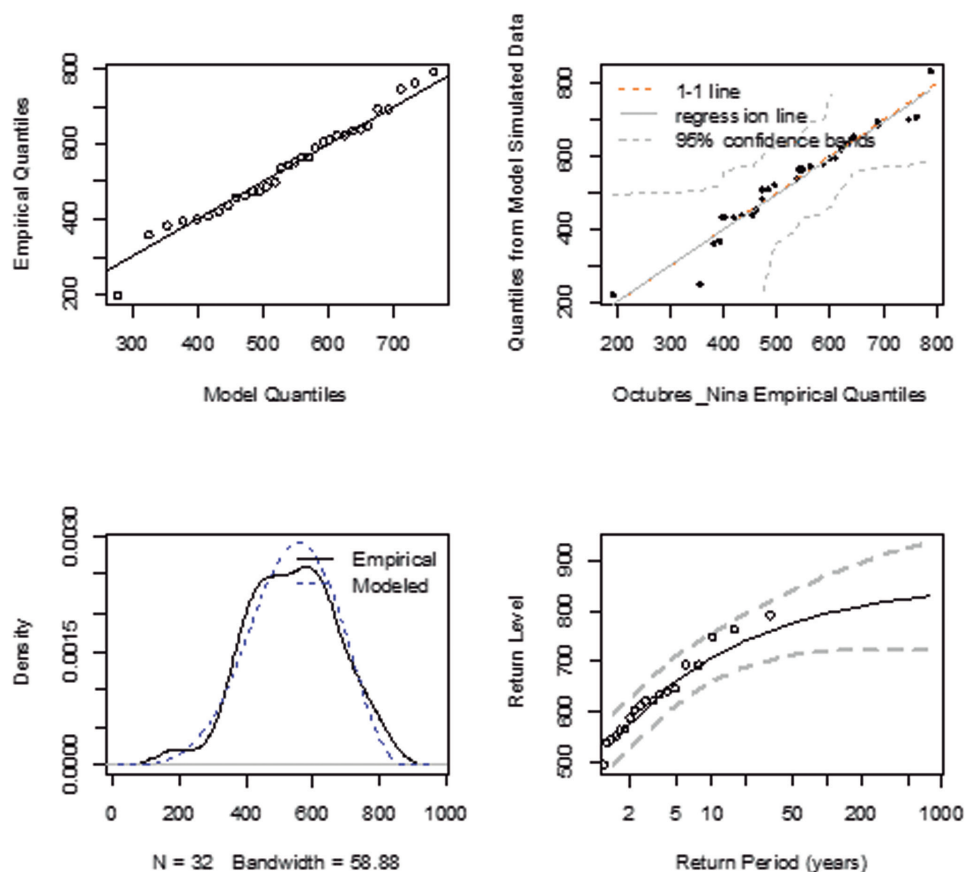


Fuente: elaboración propia

- Periodos La Niña:

Figura 5.17. Gráficas modelo para periodos La Niña: octubre

`fevd(x = Octubre_Nina, data = Datos_Octubres)`

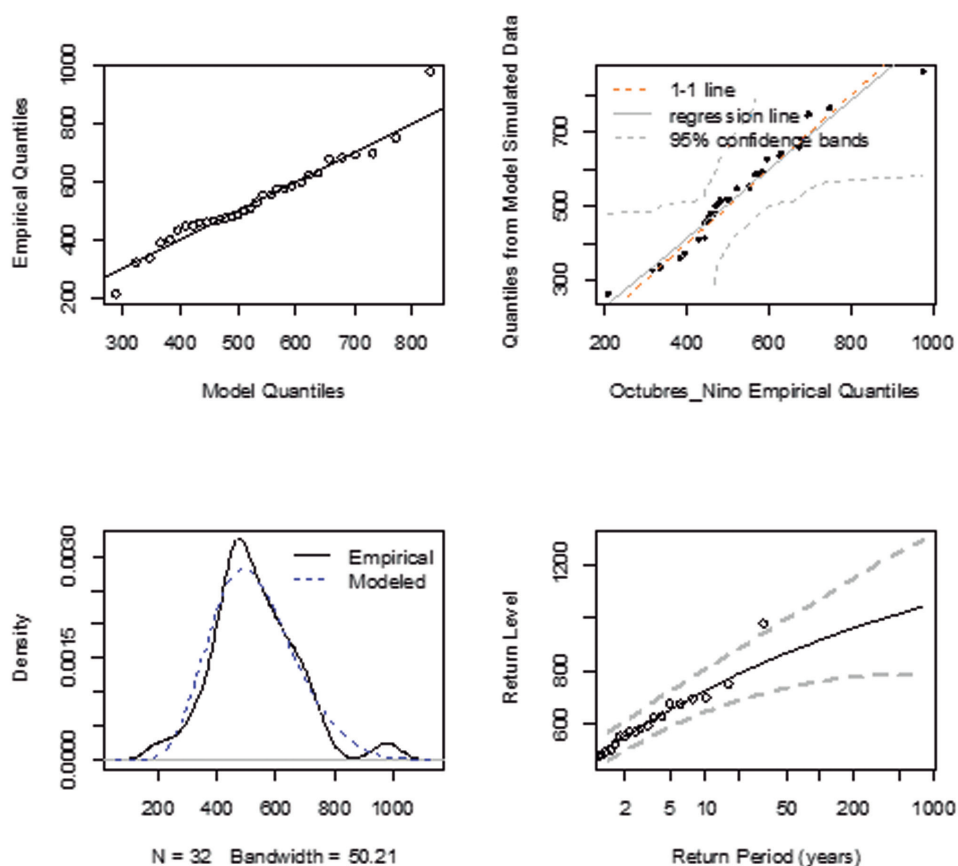


Fuente: elaboración propia

- Periodos El Niño:

Figura 5.18. Gráficas modelo para periodos El Niño: octubre

fevd(x = Octubre_Nino, data = Datos_Octubres)



Fuente: elaboración propia

Tabla 5.9. Resumen parámetros modelo: octubre

Periodo	Parámetro de localización	Parámetro de escala	Parámetro de forma	Criterio AIC	Criterio BIC
Normal	514,16	159,74	-0,36	418,05	422,45
Normal climatológico	561,26	163,55	-0,31	421,36	425,76
La Niña	497,40	136,74	-0,38	407,95	412,34
El Niño	469,54	131,56	-0,14	413,36	417,76

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.10. Resumen periodos de retorno con intervalo de confianza del 95 %: octubre

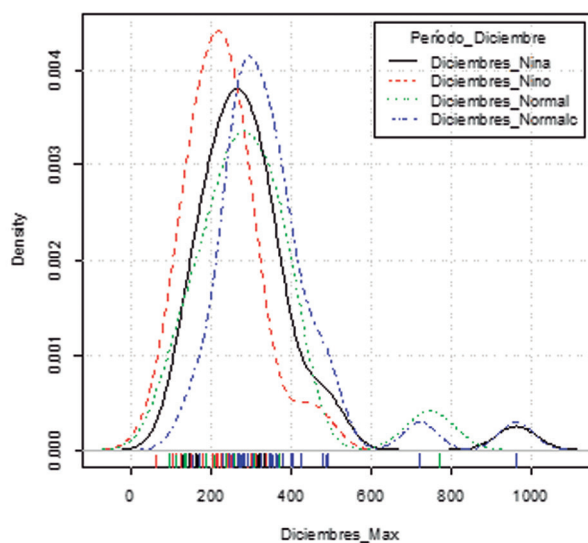
Periodo	Periodo de retorno	Valor inferior IC 95 % (mm)	Valor estimado (mm)	Valor superior IC 95 % (mm)
Normal	2	509,57	568,97	628,36
	10	701,97	759,56	817,14
	20	743,65	804,15	864,64
	50	776,86	846,96	917,06
	100	790,67	870,76	950,85
Normal climatológico	2	556,31	617,87	679,44
	10	759,39	825,07	890,76
	20	805,70	877,01	948,31
	50	844,52	928,94	1013,35
	100	861,80	959,01	1056,22
La Niña	2	492,73	544,19	595,64
	10	656,55	704,41	752,26
	20	689,30	741,11	792,92
	50	712,35	775,92	839,49
	100	720,22	795,03	869,84

Periodo	Periodo de retorno	Valor inferior IC 95 % (mm)	Valor estimado (mm)	Valor superior IC 95 % (mm)
El Niño	2	464,44	516,55	568,66
	10	645,17	723,75	802,33
	20	693,28	789,65	886,03
	50	738,60	865,73	992,86
	100	761,56	916,62	1071,67

Fuente: elaboración propia

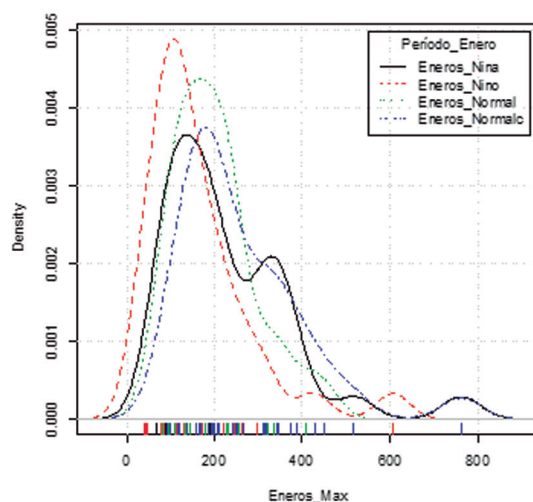
Como síntesis de los resultados de los modelos para valores extremos en diciembre, enero, febrero, mayo y octubre, a continuación se ilustra la comparación de los modelos para periodos: normal, normal climatológico, La Niña y El Niño.

Figura 5.19. Comparaciones de las distribuciones de probabilidad empíricas para los cuatro periodos: i) normal climatológico, ii) normal, iii) La Niña y iv) El Niño, mes diciembre, región Medio Magdalena



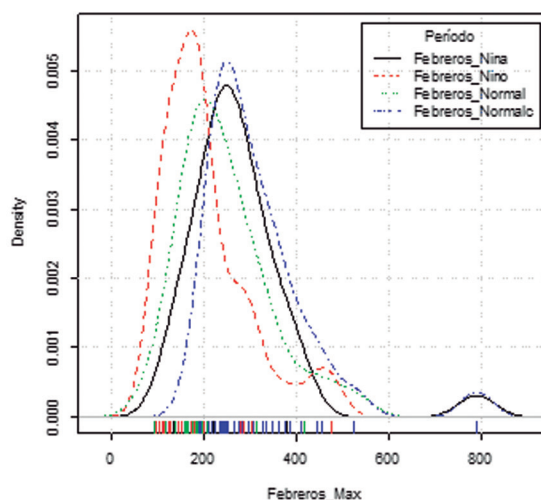
Fuente: elaboración propia

Figura 5.20. Comparaciones de las distribuciones de probabilidad empíricas para los cuatro periodos: i) normal climatológico, ii) normal, iii) La Niña y iv) El Niño, mes enero, región Medio Magdalena



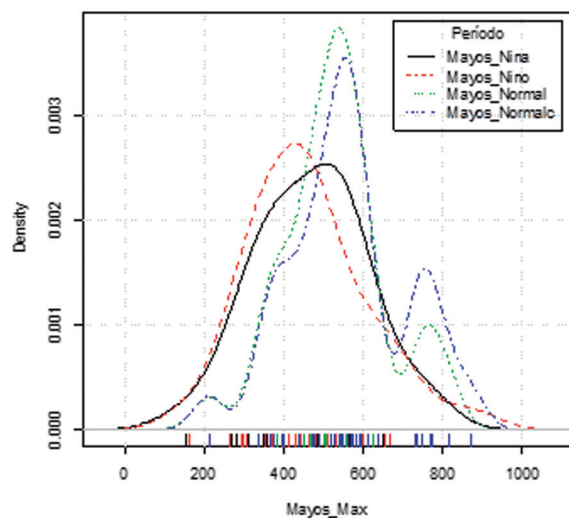
Fuente: elaboración propia

Figura 5.21. Comparaciones de las distribuciones de probabilidad empíricas para los cuatro periodos: i) normal climatológico, ii) normal, iii) La Niña y iv) El Niño, mes febrero, región Medio Magdalena



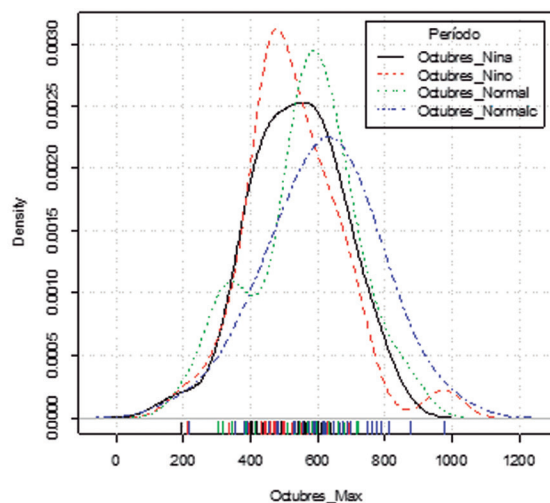
Fuente: elaboración propia

Figura 5.22. Comparaciones de las distribuciones de probabilidad empíricas para los cuatro periodos: i) normal climatológico, ii) normal, iii) La Niña y iv) El Niño, mes mayo, región Medio Magdalena



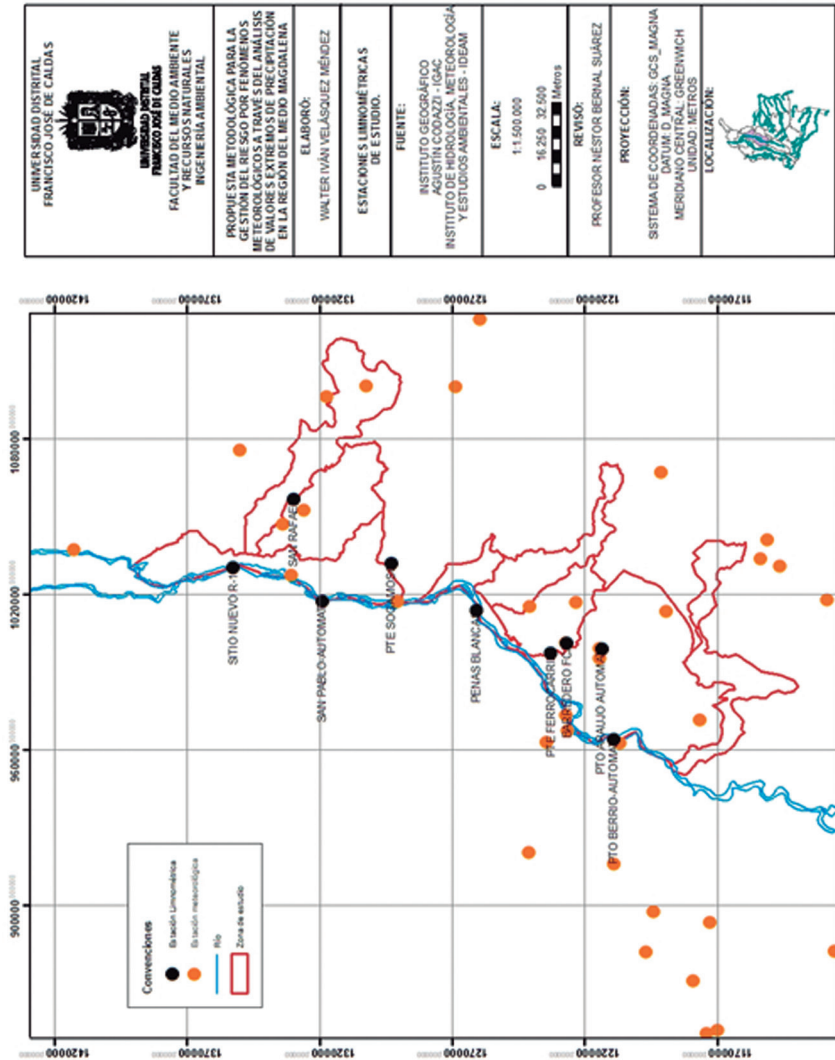
Fuente: elaboración propia

Figura 5.23. Comparaciones de las distribuciones de probabilidad empíricas para los cuatro periodos: i) normal climatológico, ii) normal, iii) La Niña y iv) El Niño, mes octubre, región Medio Magdalena



Fuente: elaboración propia

Mapa 5.13. Estaciones limnimétricas de estudio



Fuente: elaboración propia

Al analizar los cuatro meses, se observa que en febrero se desplaza a la derecha el modelo de valores extremos para los valores máximos de precipitación en el periodo de ocurrencia de La Niña (línea negra) en comparación con el periodo normal (línea verde punteada); y hay evidencia de la presencia de una cola en la distribución, indicando la ocurrencia de valores máximos hasta de 800 mm aproximadamente. En particular para diciembre y enero, aun cuando no se evidencian cambios al comparar los valores máximos entre el periodo La Niña y el periodo normal, las colas de las distribuciones de estos dos meses evidencian valores más altos de máximos para el periodo La Niña (línea negra) en comparación con las condiciones normales (línea verde punteada). Para los meses de temporada lluviosa (mayo y octubre), los valores máximos no evidencian incrementos cuando ocurren los eventos La Niña en comparación con el periodo normal (Figuras 5.20 a 5.24).

5.5.4 Comparación de los resultados con series de caudal mensual

Con el propósito de integrar los resultados del análisis de valores extremos de precipitación, se presenta a continuación un análisis de los caudales en la zona de estudio. Para ello, se escogieron nueve series de tiempo de caudal a nivel mensual (Tabla 5.11).

Tabla 5.11. Lista de estaciones de caudal analizadas

Estación	Nombre	Corriente	Valor máximo serie (m ³ /s)	Fecha de ocurrencia
23127050	Barretero Fca.	Río Carare	761,2	may-81
23127020	Pto. Araujo Automática	Río Carare	896,8	nov-88
23097030	Pto. Berrio-Automática	Río Magdalena	6021	abr-11
23147020	Pte. Ferrocarril	Río Opón	292,2	oct-05
23167010	Penas Blancas	Río Magdalena	5574	nov-84
24067020	Pte. Sogamoso	Río Sogamoso	1406	abr-11
23207040	San Pablo-Automática	Río Magdalena	7718	may-81
23187280	Sitio Nuevo	Río Magdalena	7206	nov-05
23197370	San Rafael	Río Lebrija	320,8	nov-10

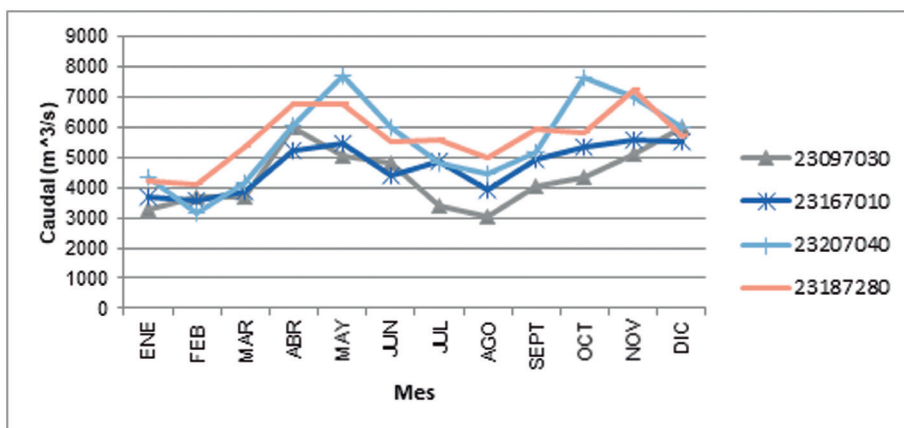
Fuente: elaboración propia

En los nueve casos, la ocurrencia del evento máximo de la serie se dio durante un mes lluvioso de acuerdo con lo establecido para la región, es decir, en abril, mayo, octubre o noviembre.

La figura 5.24 muestra que los caudales máximos tienen un comportamiento similar a la precipitación de la zona, cuyo comportamiento es bimodal con picos en abril, mayo, octubre y noviembre; mientras que los valores más bajos están en enero y febrero.

Dada la magnitud de la corriente del río Magdalena, es importante llevar a cabo un análisis similar con las estaciones que corresponden a otros cauces, los cuales tienen una influencia menor por parte de otras cuencas que se vinculan a la región del Medio Magdalena.

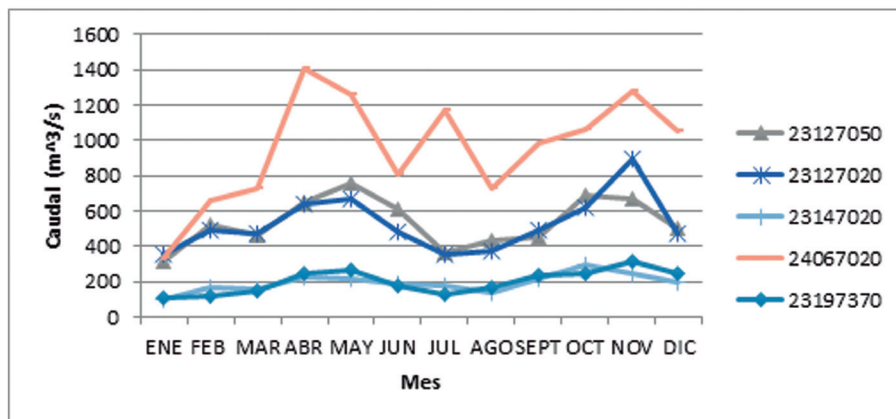
Figura 5.24. Valores máximos de caudal para las estaciones sobre el río Magdalena



Fuente: elaboración propia

Para las demás estaciones (Figura 5.25), se encuentra que tienen un comportamiento similar en la mayoría de casos, con excepción de la estación 24067020-Pte. Sogamoso, la cual tiene un valor muy alto en julio. Esta evidencia requiere mayor conocimiento para determinar si corresponde a un mes particular en el que haya ocurrido una inundación.

Figura 5.25. Valores máximos de caudal para las estaciones sobre otros cauces



Fuente: elaboración propia

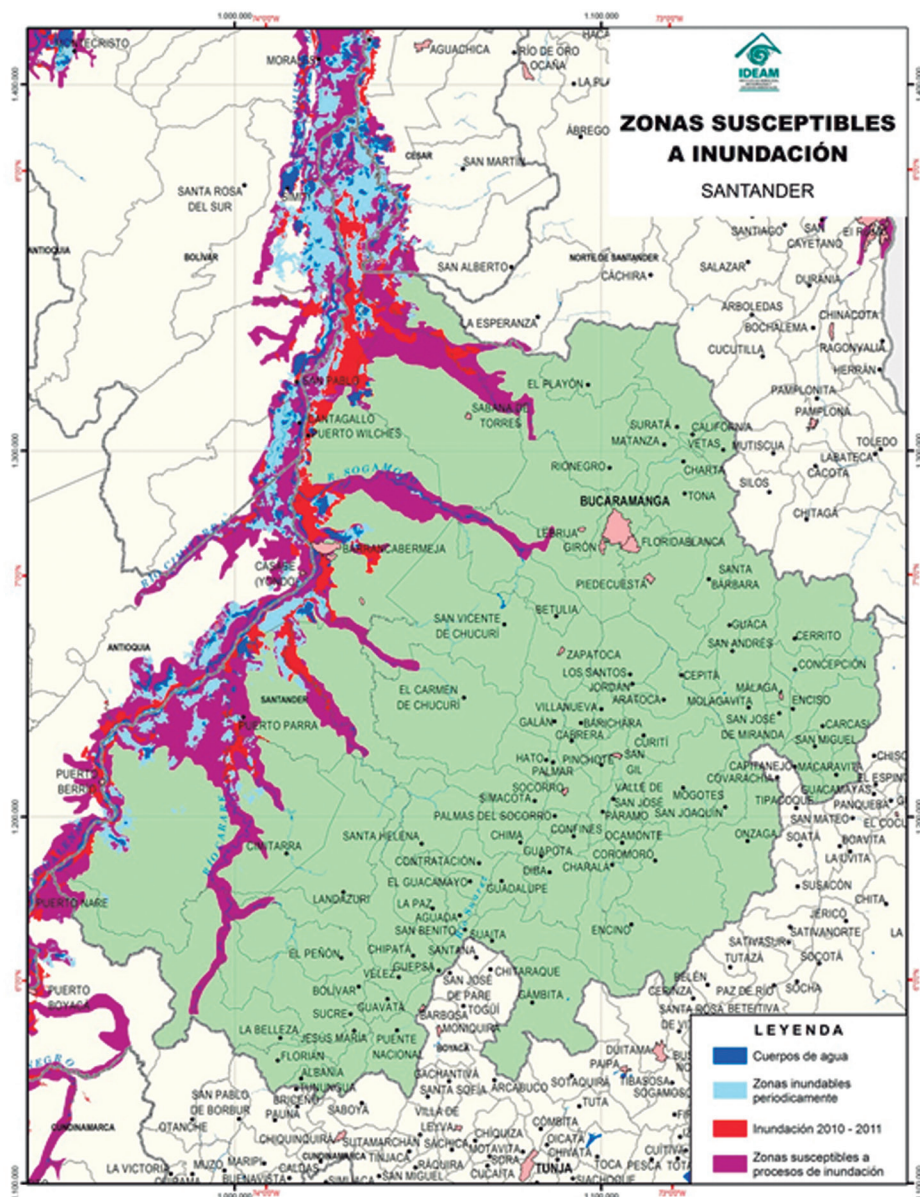
De acuerdo con el mapa de susceptibilidad a procesos de inundación de Santander (Mapa 5.14), generado por el Ideam (2012), los ríos Cararé, Lebrija, Sogamoso y Opón tienen una alta susceptibilidad a desbordarse de sus cauces, así como el cauce principal del río Magdalena en esta zona del Medio Magdalena.

Se escogió el río Cararé para hacer un análisis más detallado de las series de tiempo de su caudal, porque una inundación de esta corriente de agua puede afectar a dos municipios de la zona de estudio: Cimitarra y Puerto Parra; además, se cuenta con los datos de dos estaciones que registran valores sobre su cauce: 23127050-Barredero Fca., ubicada en el municipio de Puerto Parra, y 23127020-Pto. Araujo Automática, localizada en el municipio de Cimitarra, ambas situadas en Santander.

Como se evidenció antes (Tabla 5.11), el valor máximo de la serie 23127020 es de 896,8 m³/s y ocurrió en octubre de 1988; por su parte, el valor máximo de la serie 23127050 es de 761,2 m³/s y corresponde a la fecha de mayo de 1981. Ambos puntos corresponden a los dos meses más lluviosos del año en la región del Medio Magdalena.

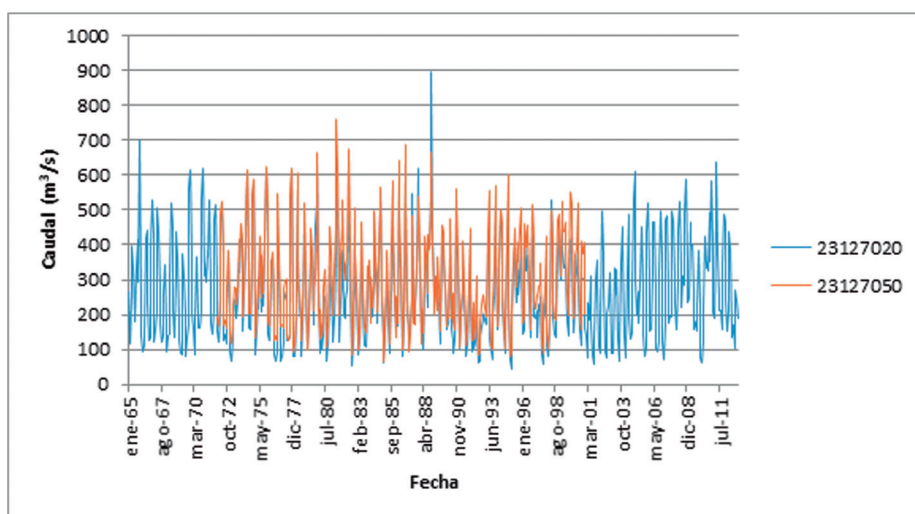
Es importante analizar ahora la influencia que tiene la ocurrencia de eventos ENOS en el aumento o la disminución de la magnitud de los valores de las series. Para esto, presentamos dos gráficos que comparan los valores promedio de cada mes en cada una de las dos estaciones analizadas para los periodos normal, normal climatológico, La Niña y El Niño.

Mapa 5.14. Zonas susceptibles a procesos de inundación. Departamento de Santander



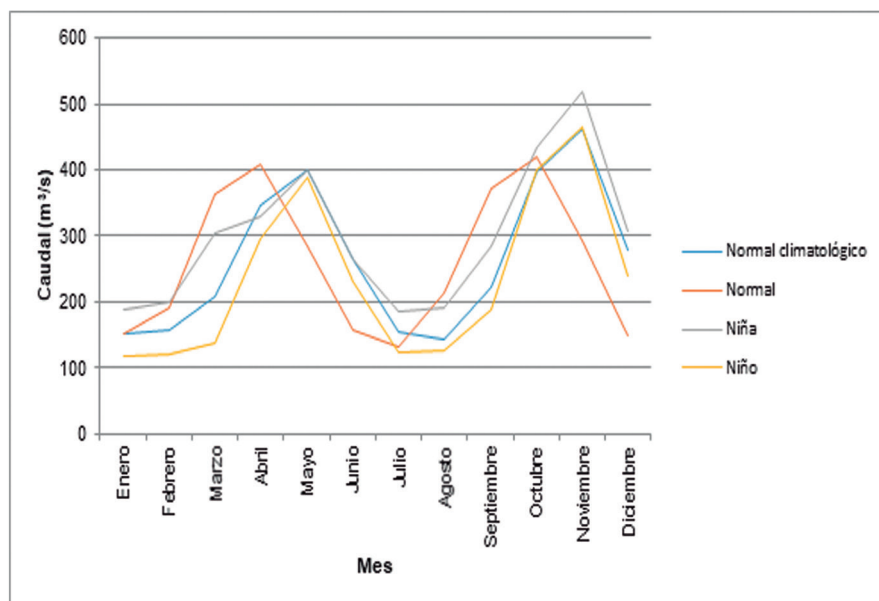
Fuente: Ideam (2012)

Figura 5.26. Series de tiempo de caudales. Estaciones 23127020 y 23127050



Fuente: elaboración propia

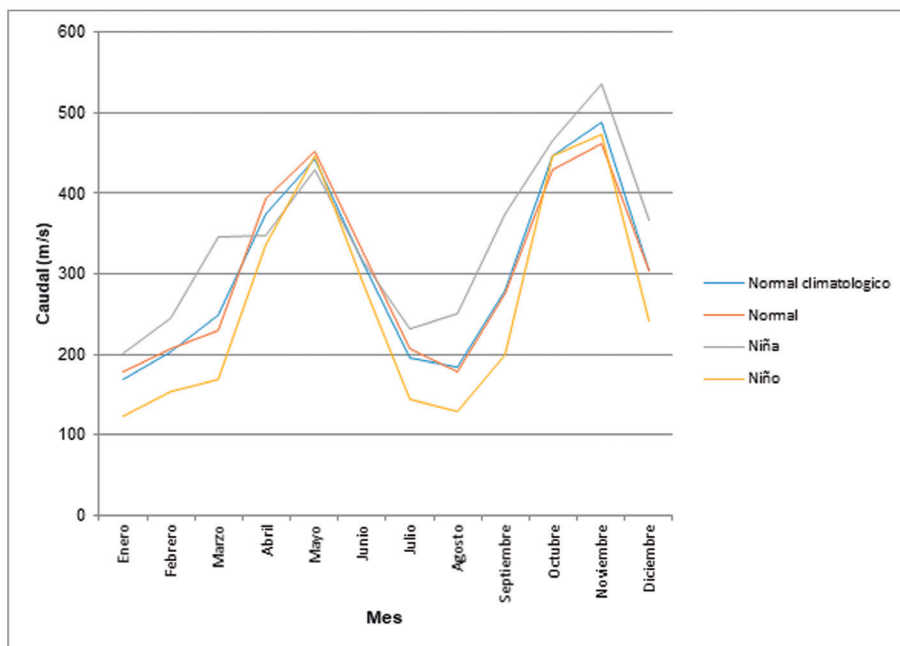
Figura 5.27. Comparación entre valores promedio de caudal por mes para los cuatro periodos analizados. Estación 23127020



Fuente: elaboración propia

Para la estación 23127020, se observa un claro aumento de los valores de caudal en los periodos La Niña con respecto a los periodos normales, en especial en noviembre. Así mismo, los periodos El Niño muestran una disminución importante en los meses secos como enero, febrero, julio y agosto (Figura 5.27).

Figura 5.28. Comparación entre valores promedio de caudal por mes para los cuatro periodos analizados. Estación 23127050

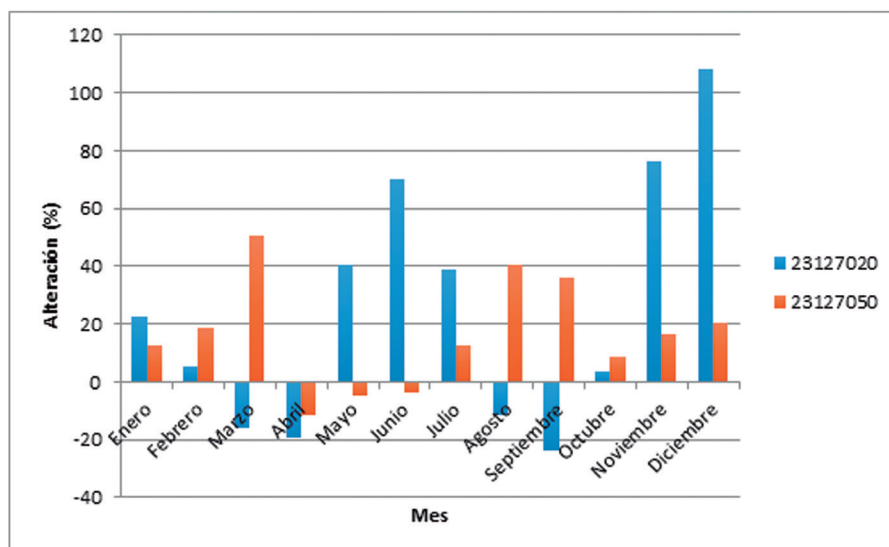


Fuente: elaboración propia

Al igual que en la estación anterior, para la estación 23127050 la ocurrencia de eventos La Niña y El Niño provoca cambios marcados en los valores de caudal con respecto a los periodos normales. Nuevamente, noviembre es el mes que muestra un aumento superior en periodos La Niña, aunque mayo no muestra el mismo comportamiento. Por otro lado, en periodos El Niño los meses que más disminuyen son enero, febrero y agosto (Figura 5.28).

Veamos ahora en valores porcentuales estas diferencias observadas en las gráficas anteriores. Se presentan las figuras 5.29 y 5.30, de alteración porcentual promedio para eventos La Niña y El Niño, respectivamente.

Figura 5.29. Alteración promedio de caudal por fenómenos
La Niña. Estaciones 23127020 y 23127050



Fuente: elaboración propia

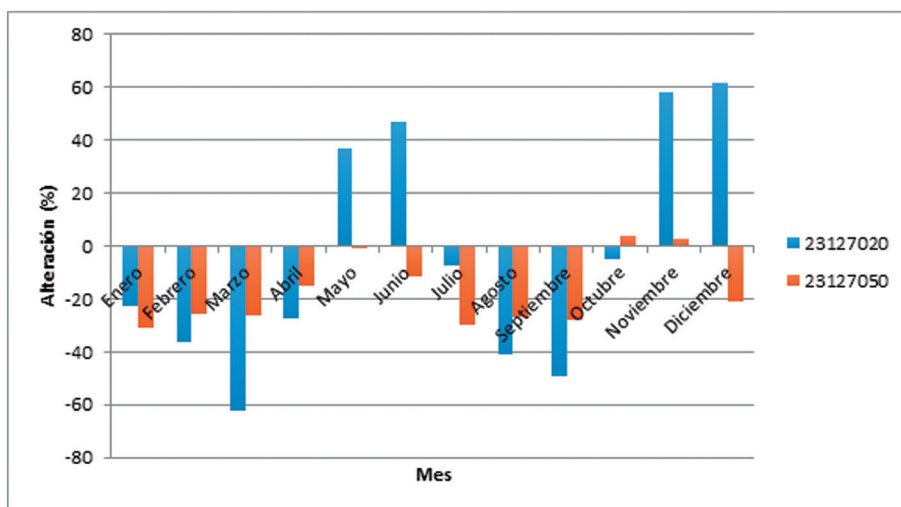
Para el caso de La Niña (Figura 5.29), los meses con mayor alteración son, en su orden, diciembre (+108 %), noviembre (+77 %) y junio (+70 %) para la primera estación. Para la estación 23127050 son marzo (+51 %), agosto (+41 %) y septiembre (+36 %).

Este resultado evidencia que aunque en las series de precipitación la señal del fenómeno de La Niña típica no era muy fuerte a nivel espacial (mapa de anomalías y alteraciones más probables), se debe tener en cuenta la ocurrencia de estos eventos a la hora de formular acciones de prevención y mitigación de riesgos, pues en el mes de diciembre se detectó una alteración porcentual importante en los valores promedio de precipitación (+23 %). Este resultado coincide en que para el mismo mes de diciembre que mostró una alteración en el caudal promedio (+77 %) en esta estación limnimétrica analizada, y aun cuando es un mes seco, en la distribución de probabilidad de valores extremos se evidencian valores altos de 1000 mm aproximadamente, que se visualizan en la cola de la distribución (Figura 5.19).

La diferencia en el comportamiento entre las series de precipitación y caudal puede explicarse por el efecto que tiene la forma, por la extensión y por otras características de la cuenca sobre la generación de caudales a la salida. Este efecto es difícilmente observable en las series de precipitación que se encuentran en la parte

más baja de la cuenca. Esto demuestra que en muchos casos las inundaciones que se dan en las zonas aledañas a los cauces de los ríos no son originadas por las lluvias en dichas áreas, sino que son producto de la precipitación de otras regiones aguas arriba dentro de la cuenca. Adicionalmente, es relevante señalar que, acorde con lo descrito en los mapas de alteraciones más probables y anomalías de precipitación, son más efectos enfatizados en lo local cuando ocurre el evento La Niña, y por ello es probable que las alteraciones en caudal tengan un efecto combinado, que incluye un efecto derivado de la cuenca alta por incrementos de precipitación y un efecto local por alteraciones de precipitación derivadas de la ocurrencia de eventos La Niña.

Figura 5.30. Alteración promedio de caudal por fenómenos El Niño. Estaciones 23127020 y 23127050



Fuente: elaboración propia

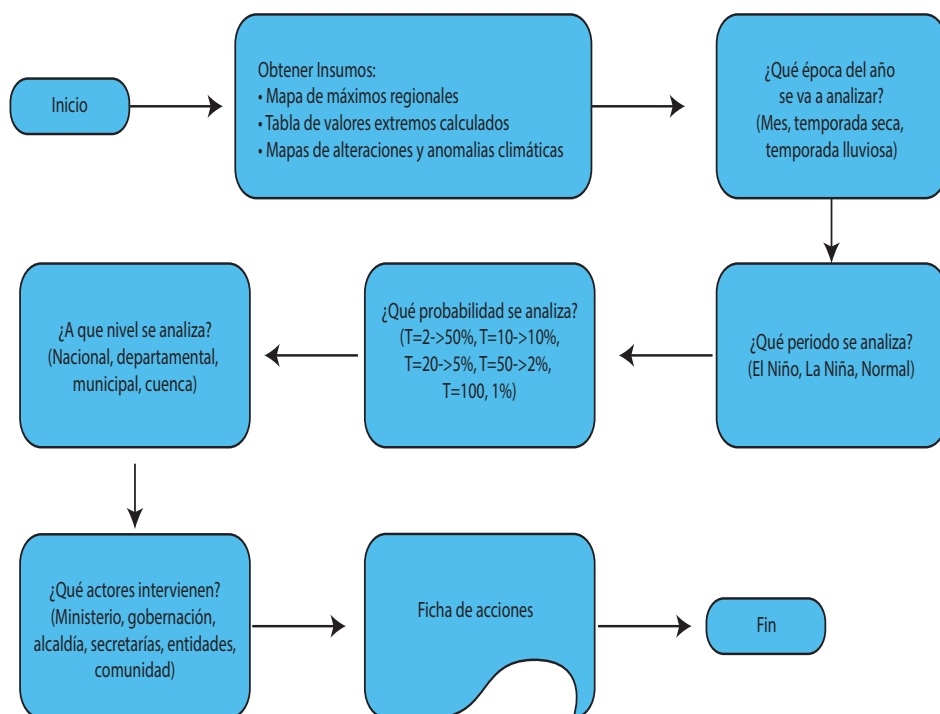
El Niño tiene un efecto difícil de interpretar; en algunos meses el caudal aumenta enormemente con respecto a los periodos normales, como en diciembre (+62 %) y noviembre (+58 %) en el caso de la estación 23127020. Mientras que en otros meses tiene el comportamiento esperado, es decir, disminuye; este es el caso de los meses de enero (-31 %) y agosto (-30 %) para la estación 23127050, y de marzo (-62 %) y octubre (-49 %) para la otra estación (Figura 5.30).

De este resultado se puede concluir que El Niño provoca efectos variables sobre la generación de caudales en la cuenca del río Cararé, siendo de especial interés los meses de mayo, junio, noviembre y diciembre.

5.5.5 Propuesta de integración del análisis de valores extremos mensuales en los planes de gestión del riesgo

Como vimos en las fases anteriores, los meses de mayor interés son febrero, mayo y octubre de acuerdo con las series de precipitación analizadas. Así como los meses de noviembre y diciembre lo son de acuerdo con las series de caudales.

Figura 5.31. Esquema metodológico para la integración del análisis de valores extremos en los PGR



Fuente: elaboración propia

En esta fase, se determinan las acciones a tomar dentro de los PGR si la precipitación supera cierto nivel K dentro de la distribución de probabilidad obtenida en la fase tres. Dichas acciones tendrán en cuenta la ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña, los mapas obtenidos durante la fase dos, los valores de precipitación para distintos periodos de tiempo definidos en la fase 3 y los resultados del análisis de las series de caudal de la fase 4.

Para presentar las acciones a tomar, se emplea la metodología desarrollada por Barrios (2013), en la cual se generan fichas técnicas por actores en distintos niveles: municipal, departamental y por cuenca.

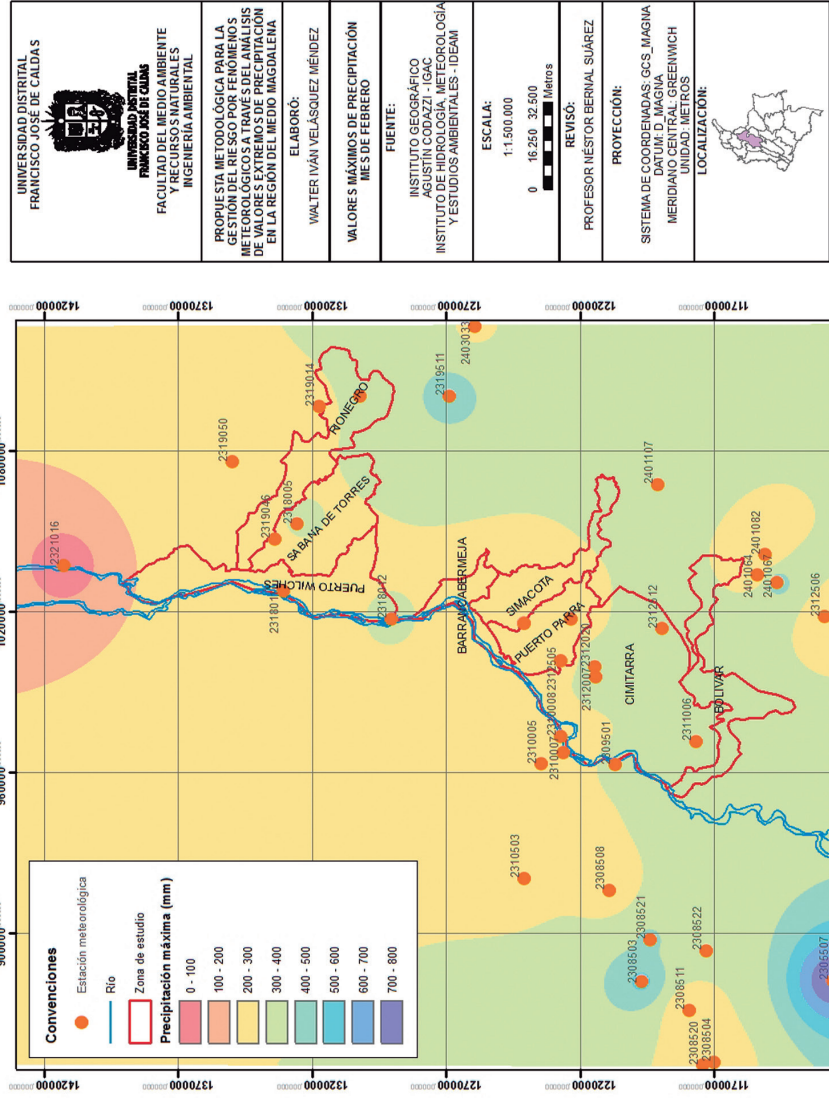
Se pretende definir cuáles deben ser las acciones a tomar dentro de los PGR para los valores asociados a periodos de retorno de 10, en el contexto regional del Medio Magdalena. Dichas acciones también tendrán en cuenta la ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña representando las anomalías y alteraciones más probables de precipitación y considerando el aporte de Hernández (2013), quien propone la necesidad de incorporar el conocimiento local de las comunidades expuestas a condiciones de riesgo y también los elementos ilustrados en el Foro Debilidades y Fortalezas Plan de Ordenamiento Territorial Bogotá D. C., organizado por el Consejo Distrital de Bogotá.

Bernal et al. (2012) describen la urgencia de buscar puntos de encuentro entre la gestión de riesgo y las necesidades actuales de investigación para avanzar en torno al conocimiento del riesgo. En este mismo contexto, se destacan los aportes de Camacho et al. (2014), quienes muestran un estudio de caso para un PGR para el municipio de Vergara, en el departamento de Cundinamarca, incorporando escenarios de cambio climático. Con este mismo enfoque, Hernández y Gómez (2009) ilustran un caso de estudio para el municipio de Manta, en Cundinamarca, en el que proponen incorporar la prevención y la reducción de riesgos en el proceso de ordenamiento territorial ilustrando el uso de un conjunto de índices de vulnerabilidad, caso que sirve de guía para establecer las acciones de la ficha técnica de la tabla 5.12.

En el mapa 5.15, se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta empleando un periodo de retorno $T = 20$, que corresponde a una probabilidad del 5 % para el periodo La Niña en febrero.

La región sombreada se considera la zona que tiene una mayor vulnerabilidad bajo las condiciones escogidas y donde se deben aplicar las acciones contenidas en las fichas.

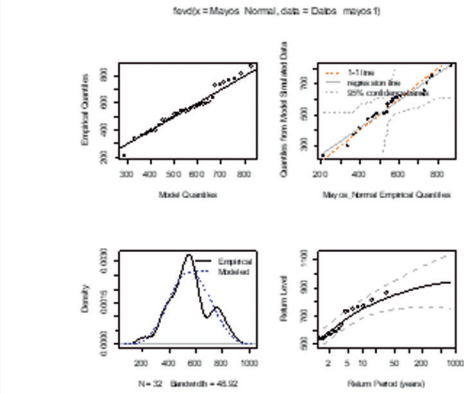
Mapa 5.15. Ejemplo aplicación metodología propuesta. Mes de febrero, T = 20, La Niña



Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan fichas de ejemplo para varios periodos de tipo normal, La Niña y El Niño, con distintos valores de precipitación para distintos periodos de retorno y en distintos niveles de organización territorial.

Tabla 5.12. Ejemplo de ficha técnica de acciones para periodos normales en mayo y octubre

Ficha técnica n.º 1, teniendo en cuenta el contexto general de la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones	
Acciones a tomar en periodos normal en meses de temporadas lluviosas: mayo y octubre y periodos en los cuales se realiza la proyección climática de ocurrencia de un evento La Niña, en particular los meses de temporada seca: diciembre, enero y febrero.	
<p>Producto: mapa de anomalías y alteraciones más probables de eventos típicos El Niño y La Niña, valores máximos de precipitación y periodos de retorno de 10 para periodos normal en meses de temporadas lluviosas: mayo y octubre y periodos en los cuales se realiza la proyección climática de ocurrencia de un evento La Niña, en particular los meses de temporada seca: diciembre, enero y febrero.</p>	
<p>Descripción:</p> <ul style="list-style-type: none">• Mapa de anomalías y alteraciones más probables de eventos típicos El Niño y La Niña; se identifican las subzonas con probables alteraciones a nivel territorial y probables alteraciones a nivel local.• Valores máximos de precipitación y periodos de retorno de 10 para periodos normal en meses de temporadas lluviosas: mayo y octubre; se emplean los mapas de valores máximos para periodos normal y el valor correspondiente al periodo de retorno de 10, y así se identifican las zonas de mayor riesgo y en las cuales es necesario definir acciones prioritarias.• Valores máximos de precipitación y periodos de retorno de 10 para periodos normal en meses de temporada seca: diciembre, enero y febrero; se emplean los mapas de valores máximos para periodo de ocurrencia La Niña y el valor correspondiente al periodo de retorno de 10, y así se identifican las zonas de mayor riesgo y en las cuales es necesario definir acciones prioritarias para esta época de temporada seca.	

Ficha técnica n.º 1, teniendo en cuenta el contexto general de la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones			
Objetivo de la ficha: desarrollar acciones específicas que contribuyan a reducir la vulnerabilidad de la población en los municipios ribereños.			
Nivel	Actor	Instrumento	Acciones
Nacional	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ideam, Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.	Mapas de anomalías y alteraciones más probables y periodos de retorno de 10.	<ul style="list-style-type: none"> – Emitir los informes de proyecciones climáticas en la escala nacional cuando se proyecta la ocurrencia de un evento El Niño o La Niña (es de especial interés este evento por el contexto de este estudio relacionado con la probable ocurrencia de inundaciones). – Presentar los mapas de alteraciones más probables de precipitación para eventos típicos El Niño y La Niña.
Regional	Corporación Autónoma Regional y de Desarrollo Sostenible, Consejos departamentales, distritales y municipales de Gestión del Riesgo de Desastres.	Mapas de anomalías y alteraciones más probables y periodos de retorno de 10.	<ul style="list-style-type: none"> – Identificar las subzonas que evidencian efectos de ocurrencia de eventos La Niña a nivel regional y local. – Emitir dos tipos de alertas de inundación para épocas lluviosas de mayo y octubre. Las alertas se emitirán con anterioridad, se sugiere en la última semana de abril y última semana de septiembre. – Emitir alerta de inundación para los meses secos diciembre, enero y febrero, en particular para este último mes cuando el Ideam emite las proyecciones climáticas que señalan la probable ocurrencia de eventos La Niña.
Departamental	Gobernación de Santander, Consejos departamentales de Gestión del Riesgo de Desastres.	Mapas de anomalías y alteraciones más probables y periodos de retorno de 10.	<ul style="list-style-type: none"> – Activar cuerpos de emergencia municipales. – Verificar acciones municipales. – Coordinar institutos de gestión del riesgo municipales.

Ficha técnica n.º 1, teniendo en cuenta el contexto general de la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones			
Municipal	Alcaldías municipales y Consejos distritales y municipales de Gestión del Riesgo de Desastres. Gestionar y tener en cuenta el conocimiento local de la población que habita en las zonas que históricamente han tenido inundaciones.	Mapas de anomalías y alteraciones más probables y periodos de retorno de 10.	<ul style="list-style-type: none"> – Activar comités de emergencia veredales. – Monitoreo constante de estaciones meteorológicas y limnimétricas. – Informar a la comunidad del municipio para que esté alerta.
Cuenca	Corporaciones autónomas regionales: CDMB, Cormagdalena, Gobernación de Santander, Alcaldías municipales. Considerar el contexto de la Defensa Civil y tener en cuenta el conocimiento local de la población que habita en las zonas que históricamente han tenido inundaciones y el contexto de los Pomcas.	Mapas de anomalías y alteraciones más probables y periodos de retorno de 10.	<ul style="list-style-type: none"> – Monitoreo estaciones meteorológicas y limnimétricas de la cuenca. – Comunicación entre zonas altas y bajas de la cuenca. – Realizar limpiezas en los cauces de los ríos.

Fuente: elaboración propia

Referencias bibliográficas

- Adams, R. M., Houston, L., McCarl, B. A., Tiscareño, M. (2003). The Benefits to Mexican Agriculture of an El Niño-Southern Oscillation (ENSO) Early Warning System. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115(3), 183-194. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00201-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00201-0)
- Ávila, H. (2012). *Perspectivas del manejo de drenaje urbano. Caso de estudio: arroyos de Barranquilla* [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, junio 28 de 2012.
- Barra Burbano, Y. C. (2013). Identificación del uso potencial de la homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación en la implementación de procesos de toma de decisiones en el sector agrícola, estudio de caso para una zona de la región climatológica del Bajo Magdalena. En GIAUD e Indesos, *Informe parcial proyecto de investigación: "Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones"* (pp. 131-143). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Barrios Moreno, J. S. (2012). *Aporte al proceso de toma de decisiones en la planificación ambiental de la región climática del Bajo Magdalena con base en análisis estadístico empleando una metodología para la homogenización de series mensuales de precipitación* [tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
- Beguería Portugués, S., Vicente-Serrano, S. M. y López-Moreno, J. I. (2008). Distribución espacial y estacional de los eventos de precipitación en La Rioja: intensidad, magnitud y duración. *Zubía*, (20), 169-186.
- Bernal, N. R., Alarcón, J. C., Palacios, O. I. y Ramos, M. A. (2012). *Presentación: Reflexiones acerca del POT del Distrito Capital en perspectiva regional desarrollo sostenible; variabilidad y cambio climático; gestión del riesgo* [ponencia]. Foro Debilidades y Fortalezas Plan de Ordenamiento Territorial Bogotá, Concejo de Bogotá, Colombia, mayo 27 de 2012.
- Bernal, N. R., Correa, R. y Rangel, E. (2011). *Homogeneización de series de tiempo mensuales de precipitación* [ponencia]. IX Congreso Colombiano de Meteorología: "200 años de la meteorología y la climatología en América Latina", marzo 23-25 de 2011.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Guía ilustrativa sobre análisis de vulnerabilidad territorial ante el cambio climático. Propuesta metodológica para los entes territoriales de la jurisdicción de la CAR*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

- Bert, F., Satorre, E., Ruiz, F., & Podesta, G. (2006). Climatic Information and Decision-making in Maize Crop Production Systems of the Argentine Pampas. *Agricultural Systems*, 88(1-2), 180-204. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.03.007>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). (2007). *Información para la gestión de riesgo de desastres estudio de caso de cinco países: Colombia*. R. Meli y R. Zapata Martí (coords.). Sede Subregional de la Cepal en México. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25930>
- Buja, L. (2012). *CMIP5 Climate Simulations: Implications for Hydrology*, National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, junio 28 de 2012.
- Camacho, L. A. y Díaz, M. G. (2012). *Valoración de cambios hidrológicos en la cuenca del río Bogotá* [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, junio 28 de 2012.
- Camacho Mora, G. V., Imbrecht Florian, S. J. y Montaña Leal, L. F. (2014). *Apoyo técnico en la formulación del plan municipal para la gestión del riesgo de desastres en el municipio de Vergara, Cundinamarca* [tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/1400>
- Caporello, G. y Maravall, A. (2004). Programa TSW (para Windows). Banco de España.
- Caracol Radio. (2011). *Graves inundaciones se registran en Puerto Berrío, Antioquia por el desbordamiento del río Magdalena*. 16 de abril de 2011. <http://www.caracol.com.co/noticias/actualidad/graves-inundaciones-se-registran-en-puerto-berrio-antioquia-por-el-desbordamiento-del-rio-magdalena/20110416/nota/1456325.aspx>
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer.
- Deed, A. (2012). *Hidrología de extremos y cambio climático* [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, junio 28 de 2012.
- Euscátegui, C. y Hurtado, G. (2011). Análisis del impacto del fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país. En Ideam, *Memorias Segundo Congreso Nacional del Clima*. Ideam.
- Fandamu, P., Duchateau, L., Speybroeck, N., Mulumba, M. y Berkvens, D. (2006). East Coast Fever and Multiple El Niño Southern Oscillation Ranks. *Veterinary Parasitology*, 135(2), 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2005.09.008>

- Fondo para el Logro de los ODM (F-ODM) y Gobierno de Panamá. (s. f.). *Estrategia de gestión integrada para la reducción de la vulnerabilidad, adaptación y mitigación del cambio climático en las cuencas de los ríos Chucunaque y Tabasará*. Programa Conjunto Cambio Climático (PCCC). https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/PAN/00048629_BROCHURE%20PCCC-Final.pdf
- Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (Fopae). (2004). *Protocolo distrital de respuesta a emergencia por inundaciones*. Fopae. <http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/fopae/inundaciones/Protocolo%20Distrital%20Inundaciones.pdf>.
- Garrett, C. y Müller, P. (2008). Extreme Events. *American Meteorological Society*, 89(11), 1733. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2566.2>
- Gilleland, E. y Katz, R. W. (2011). New Software to Analyze How Extremes Change Over Time. *EOS*, 92(2), 13-14.
- GTZ. (2004). *El análisis de riesgo. Una base para la gestión del riesgo de desastres naturales*. Eschborn.
- Hernández Peña, Y. T., (2013). *Análisis de imaginarios y percepciones asociados a fenómenos naturales para una adecuada gestión del riesgo* [tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/49443>
- Hernández López, L. A. y Gómez Montaña, M. F. (2009). *Alternativas para la incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en el proceso de ordenamiento territorial del municipio de Manta-Cundinamarca* [tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. Repositorio institucional UniSalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/8/
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (2008). *El Sistema de Gestión Integrado: la planeación del sistema de gestión con base en la gestión del riesgo*. Icontec.
- International Fund for Agricultural Development (IFAD) y World Food Programme (WFP). (2010). *Potential for Scale and Sustainability in Weather Index Insurance for Agriculture and Rural Livelihoods*. IFAD. <https://www.wfp.org/publications/potential-scale-and-sustainability-weather-index-insurance-agriculture-and-rural-livelihoods>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2008). *Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos 2008*. Ideam.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2011). *Reporte final de áreas afectadas por inundaciones 2010-2011 con información de imágenes de satélite a junio 6 de 2011*. Ideam. http://www.dane.gov.co/files/noticias/Reunidos_presentacion_final_areas.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2012). *Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia* [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, junio 28 de 2012.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2013). *Catálogo Nacional de Estaciones del Ideam*. <https://www.datos.gov.co/widgets/hp9r-jxuu>
- La Vanguardia*. (2010). El Magdalena Medio, bajo la amenaza de inundación. 5 de octubre de 2010. <http://www.vanguardia.com/historico/77757-el-magdalena-medio-bajo-la-amenaza-de-inundacion>
- La Vanguardia*. (2011). Continúan afectadas algunas veredas por las inundaciones. 26 de abril de 2011. <http://www.vanguardia.com/historico/102096-continuan-afectadas-algunas-veredas-por-las-inundaciones>
- Machín Gayarre, J., Navas, A., Domenech Zueco, S. y López-Vicente, M. (2005). El río arlanza en cabecera: evolución reciente y tendencias en condiciones de cambio global. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, (31),77-95. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1975908>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2005). *Incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en los procesos de ordenamiento territorial*. <http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/documentos/GUIAS%20METODOL%C3%93GICAS/introduccion%201-7.pdf>
- Noticias Caracol*. (2011). El Canal Caracol está en Yondó ayudando a los damnificados del invierno. 19 de diciembre de 2011. <http://www.noticiascaracol.com/nacion/video-252986-el-canal-caracol-esta-yondo-ayudando-a-los-damnificados-del-invierno>.
- Poveda, G. (2012). *El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática. Implicaciones para la estimación hidrológica* [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, junio 28 de 2012.

- Ramos, M. (2013). *Proyecto de grado: propuesta metodológica: utilidad de los procesos de detección de cambios históricos en el promedio de series de precipitación en planes de ordenamiento territorial para la región climatológica del Bajo Magdalena* [tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
- Saborio, J. (2009). Metodología para la gestión de cuencas hidrográficas siguiendo el enfoque del riesgo integral. El cambio climático y la adaptación. *Revista Geográfica de América Central*, (43), 25-35. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/215>
- Stedinger, J. R. (2012). Statistical Methods for Assessing Flood Risk and the Climate Change Challenge [ponencia]. Foro Internacional Hidrología de Extremos y Cambio Climático, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, junio 28 de 2012.
- Storch, H. y Zwiers, F. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.
- Spiegel, M., Schiller, J. y Srinivasan, A. (2003). *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. McGraw-Hill.
- Stepanek, P. (2006). *Anclim: Software for Time Series Analysis*. Masaryk University.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2012). *Guía metodológica para la elaboración de Planes Departamentales para la Gestión del Riesgo*. UNGRD.
- Velásquez Martínez, W. C. (2013). Desarrollo del modelo de soporte de decisión para la gestión de las inundaciones a partir de series de tiempo de precipitación homogenizadas como insumo para la reducción de la vulnerabilidad de la población a inundaciones en una región del Bajo Magdalena. En GIIAUD e Indesos, *Informe parcial proyecto de investigación: "Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones"* (pp. 108-121). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Velásquez, A. y Jiménez, N. (2004). *La gestión de riesgos en el ordenamiento territorial: inundaciones en cali, la CVC y el fenómeno ENSO* [ponencia]. Seminario Internacional Ambiental CVC 50 años, Santiago de Cali, Colombia.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier.
- Zinyegere, N., Mizha, T., Mashonjowa, E., Chipindu, B. (2011). Using Seasonal Climate Forecasts to Improve Maize Production Decision Support in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1972-1999. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.015>

Autores

Néstor Ricardo Bernal Suárez

Docente de Ingeniería Ambiental de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Estadístico. Maestría en Meteorología y candidato a doctor en Geografía de la Universidad Nacional de Colombia.

Juan Sebastián Barrios Moreno

Ingeniero ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Marcos Andrés Ramos Castañeda

Ingeniero ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialización en Higiene, Seguridad y Salud en el Trabajo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Wendy Carolina Velásquez Martínez

Bióloga de la Universidad Militar Nueva Granada. Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Julio Eduardo Beltrán Vargas

Docente de Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctor en Ciencias-Biología de la Universidad Nacional de Colombia. Biólogo Marino. Maestría en Eco-auditorías y Planificación Empresarial del Instituto de Investigaciones Ecológicas. Maestría en Planificación y Administración del Desarrollo Regional de la Universidad de los Andes.

Yuli Carmenza Ibarra Burbano

Ingeniera sanitaria y ambiental. Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Walter Iván Velásquez Méndez

Ingeniero Ambiental. Auxiliar de investigación de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Colaboradores

Ruth Leonor Correa Amaya

Ingeniera Meteoróloga de la Universidad Estatal Hidrometeorológica de San Petersburgo, Rusia. Maestría en Meteorología. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de Meteorología.

Lorena Lombana González

Ingeniera Ambiental. Auxiliar de investigación. Adscrita al grupo de investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Maestría en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos, Universidad de Alcalá de Henares.

Juan David Oidor Márquez

Ingeniero Ambiental. Auxiliar de investigación. Adscrito al grupo de investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Rubén Darío Mateus Sanabria

Ingeniero Catastral y Geodesta. Especialización en Sistemas de Información Geográfica (SIG) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Apoyo en SIG.

Gloria Edith Triana de Bustos

Organización de textos.

Citación sugerida

Libro

Bernal, N., Barrios, J., Ramos, M., Velásquez, W. C., Beltrán, J., Ibarra, Y. y Velásquez, W. I. (2021). *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones*. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Capítulos

Bernal, N., Barrios, J. y Ramos, M. (2021). Homogenización de series mensuales de precipitación. En N. Bernal et al., *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones* (pp. 19-94). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Barrios, J., Ramos, M. y Bernal, N. (2021). Planificación ambiental, ordenamiento territorial y su relación con la precipitación: estudio de caso región climática Bajo Magdalena. En N. Bernal et al., *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones* (pp. 95-166). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Velásquez, W. C. y Beltrán, J. (2021). Utilización de series de tiempo de precipitación homogenizadas para la estimación del caudal del río San Jorge. En N. Bernal et al., *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones* (pp. 167-192). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Ibarra, Y. y Beltrán, J. (2021). Modelación para la toma de decisiones: el pequeño agricultor y la calidad en los datos de precipitación, una perspectiva para el desarrollo sustentable. En N. Bernal et al., *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones* (pp. 193-207). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Velásquez, W. I. y Bernal, N. (2021). Perspectivas: propuesta de análisis de valores extremos de precipitación y su utilidad en el contexto de gestión del riesgo, estudio de caso: una zona del medio Magdalena. En N. Bernal et al., *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de decisiones* (pp. 209-284). Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Este libro se
terminó de imprimir
en mayo del 2021 en los
talleres de
En Alianza S. A. S.
Bogotá, Colombia