



**LA INFLUENCIA DEL EMBALSE EI PEÑOL-GUATAPÉ, ANTIOQUIA EN
LOS PATRONES CLIMÁTICOS Y METEOROLÓGICOS A ESCALA LOCAL
Y REGIONAL**

Diego Alejandro Marín Martínez

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá, 2018

LA INFLUENCIA DEL EMBALSE EL PEÑOL-GUATAPÉ, ANTIOQUIA EN LOS PATRONES CLIMÁTICOS Y METEOROLÓGICOS A ESCALA LOCAL Y REGIONAL

Diego Alejandro Marín Martínez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:

MSc. David Felipe Beltrán Gómez

Tutores:

MSc. Luis Clemente López Bravo
Ph.D. Ernesto Dos Santos Caetano Neto

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Línea de Investigación:

Ingeniería para la sostenibilidad de sistemas naturales – Gestión para el desarrollo urbano y rural y mejoramiento de la calidad de vida

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

“La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico al Dios sublime de poder y grandeza, quien desde que inicie mis estudios, me prometió grandes bendiciones y su respaldo en conocimiento para prepararme como Ingeniero Ambiental. También dedico este trabajo a mis padres por el apoyo que me dieron para poder cursar mis estudios, a mi abuela quien me fortalecía con sus consejos y a cada uno de mis familiares que contribuyeron en el proceso de mi formación académica.

*“Clama a mí, y yo te responderé, y te enseñaré cosas grandes y ocultas que tú no conoces” **Jeremías 33:3***

*“Dios es nuestro amparo y fortaleza, nuestro pronto auxilio en las tribulaciones. Por tanto, no temeremos, aunque la tierra sea removida, y se traspasen los montes al corazón del mar; Aunque bramen y se turben sus aguas, y tiemblen los montes a causa de su braveza” **Salmo 46:1-3***

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a:

Mi director, el Ingeniero David Felipe Beltrán Gómez por sus asesorías, enseñanza e interés para el desarrollo del proyecto.

Mis tutores, el Doctor Ernesto Dos Santos Caetano Neto y Luis Clemente López Bravo, investigadores expertos en dinámica atmosférica, asociados a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); A quienes quiero hacer un agradecimiento especial, porque desde el momento en el que les presente el proyecto me apoyaron de forma cordial y desinteresada. Ellos me brindaron un acompañamiento incondicional desde México y aportaron su conocimiento y experiencia en el tema durante varios meses, facilitando herramientas necesarias para la investigación y contribuyendo a mi crecimiento profesional.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y a la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE) por brindarme información necesaria para los correspondientes análisis del trabajo.

La Universidad El Bosque y especialmente a la dirección del programa de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, bajo la dirección de Kenneth Ochoa, por brindarme el espacio y las herramientas para formarme como profesional.

A los docentes que aportaron su conocimiento a lo largo de la carrera.

CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Planteamiento Del Problema.....	3
1.2 Justificación	5
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	6
3. OBJETIVOS	6
3.1 General.....	6
3.2 Específicos	6
4. MARCO DE REFERENCIA	7
4.1 Perspectiva Teórica	7
4.1.1 Estado del Arte.....	7
4.1.2 Marco Teórico – Conceptual.....	11
4.2 Marco Geográfico	18
4.2.1 Caracterización de la zona	18
4.2.2 Condiciones Físicas.....	18
4.2.3 Condiciones Sociodemográficas	21
4.3 Marco Histórico – Contextual.....	22
4.3.1 Sector Hidroeléctrico en Colombia.....	22
4.3.2 Central Hidroeléctrica Guatapé – Embalse El Peñol Guatapé.....	23
4.4 Marco Normativo.....	25
5. DISEÑO METODOLÓGICO	26
5.1 Enfoque y Alcance	26
5.2 Unidad de Análisis	26
5.3 Diseño de la Investigación	26
5.4 Técnicas e instrumentos de recolección, organización y sistematización de datos.	28
6. DATOS Y METODOLOGÍA	30
6.1 Fuentes de Información.....	30
6.1.1 Datos de Estaciones Meteorológicas.....	30
6.1.2 Datos de bases de información Climática Global y Regional en Sistema Gaussiano de Cuadrícula	32
6.1.3 Reanálisis Japonés 55-años (Japanese 55-years Reanalysis (JRA-55), por sus siglas en inglés).....	32
6.2 Metodología General.....	34

6.2.1	Construcción de bases de datos.....	34
7.	RESULTADOS	38
7.1	Embalse El Peñol-Guatapé 1973-2017	38
7.1.1	Comportamiento climático histórico interanual.....	38
7.1.2	Comportamiento climático histórico mensual	44
7.2	Análisis de series mensuales multianuales del modelo climático global y regional Reanálisis Japonés (JRA-55).....	47
7.2.1	Precipitación.....	47
7.2.2	Temperatura	55
7.2.3	Humedad Específica	60
7.3	Razón de Calentamiento Convectivo.....	64
8.	ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS.....	65
9.	CONCLUSIONES	69
10.	RECOMENDACIONES	70
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
12.	ANEXOS.....	80
12.1	Anexo Digital 1. Base de datos (Precipitación, número de días con lluvia, temperatura y humedad relativa) IDEAM, estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.	80
12.1.1	<i>Comandos para presentación de series meteorológicas (1973-2017).</i>	80
12.2	Anexo Digital 2. Comportamiento mensual de variables meteorológicas periodo (1970-1981 y 1982-2013), Reanálisis Japonés (JRA-55).....	80
12.2.1	<i>Series de Precipitación 1970-2013</i>	80
12.2.1.1	<i>Frecuencias de convección 1970-2013</i>	80
12.2.2	<i>Series de Temperatura 1970-2013</i>	80
12.2.3	<i>Series de Humedad Específica 1970-2013</i>	80
12.2.4	<i>Razón de Calentamiento Convectivo</i>	80
12.3	Anexo Digital 3. Gráficas BOXPLOT 1970-2013.....	80
12.3.1	<i>Precipitación</i>	80
12.3.2	<i>Temperatura</i>	80
12.3.3	<i>Humedad Específica</i>	80

LISTADO DE DIAGRAMAS

Diagrama 1.	Diseño de la investigación.	27
Diagrama 2.	Metodología General.	34

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Investigaciones seleccionadas para el desarrollo del estado del arte.	7
Tabla 2. Proyecciones de población en municipios limitantes al embalse El Peñol-Guatapé.	22
Tabla 3. Centrales hidroeléctricas representativas y/o principales de Colombia.	23
Tabla 4. Normatividad aplicada al proyecto.	25
Tabla 5. Técnicas e instrumentos de recolección, organización y sistematización de datos.	29
Tabla 6. Estaciones meteorológicas seleccionadas para análisis.	30
Tabla 7. Presentación de disponibilidad de datos por estaciones meteorológicas seleccionadas.	31
Tabla 8. Características de la información tomada de las bases del modelo.	33
Tabla 9. Selección de periodos previos y posteriores a la construcción del embalse, según fuente.	35

LISTADO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento de precipitación total por estación meteorológica, periodo 1973-2017 y 1959-1993 estación Tejar.	38
Gráfica 2. Estación El Peñol, periodo 1973-2017. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.	39
Gráfica 3. Estación El Peñol, periodo 1973-2017. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.	39
Gráfica 4. Estación Corrientes, periodo 1975-2017. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.	40
Gráfica 5. Estación Corrientes, periodo 1975-2017. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.	40
Gráfica 6. Estación Alejandría, periodo 1973-2017. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.	41
Gráfica 7. Estación Alejandría, periodo 1973-2017. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.	42
Gráfica 8. Estación Tejar, periodo 1959-1993. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.	42
Gráfica 9. Estación Violetas, periodo 1982-2011. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.	43
Gráfica 10. Estación Violetas, periodo 1982-2011. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.	44
Gráfica 11. Promedio histórico de precipitación mensual por estación meteorológica; Izquierda, Precipitación media mensual periodo 1973-1981. Derecha, Precipitación media mensual periodo 1981-2017.	45
Gráfica 12. Boxplot Promedio de precipitación comparativa entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).	51
Gráfica 13. Diferencia de precipitación convectiva y estratiforme entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).	52
Gráfica 14. Diferencia de precipitación convectiva y estratiforme entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).	53
Gráfica 15. Boxplot Promedio de temperatura comparativa entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).	59

Gráfica 16. Boxplot Promedio de humedad específica comparativa entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).	63
--	-----------

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esferas de teorías constructivas.....	11
Figura 2. Representación de la circulación de vientos por el centro de Antioquia.....	15
Figura 3. ENSO; a la izquierda fases El Niño-La Niña y a la derecha comparación de anomalía de la altura de la superficie del mar (mm) entre octubre 5, 1997 y octubre 4, 2015.	17
Figura 4. Explicación gráfica del efecto Foehn.	17
Figura 5. Ubicación del embalse El Peñol – Guatapé.....	18
Figura 6. Topografía en el embalse El Peñol – Guatapé.....	19
Figura 7. Clasificación Climática Caldas-Lang en el embalse El Peñol – Guatapé.	20
Figura 8. Codificación hidrográfica en región del embalse El Peñol – Guatapé; Escala 1:500.000. ...	20
Figura 9. Cobertura del suelo en la región del embalse El Peñol – Guatapé; Escala 1:25.000.	21
Figura 10. Distribución de generación de energía nacional.....	22
Figura 11. Cadena de generación de energía (centrales hidroeléctricas) – Guatapé, Playas y San Carlos.	24
Figura 12. Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas analizadas.	31
Figura 13. Medidas de distribución en un Boxplot.....	36
Figura 14. Climogramas de estaciones meteorológicas.....	46
Figura 15. Promedio mensual de precipitación en estación seca (diciembre, enero y febrero).....	48
Figura 16. Diferencia del promedio mensual de precipitación en estación seca (1982-2013) - (1970-1981).	48
Figura 17. Promedio mensual de precipitación en estación húmeda (abril–noviembre).....	49
Figura 18. Diferencia del promedio mensual de precipitación en estación húmeda (1982-2013) - (1970-1981).	49
Figura 19. Patrón compuesto de precipitación asociada a El Niño, periodo base (1981-2010).	50
Figura 20. Patrón compuesto de precipitación asociada a La Niña, periodo base (1981-2010).....	51
Figura 21. Frecuencia de convección profunda (%), diferencia (1981-2011) – (1970-1981). Izquierda, mes de enero. Derecha, mes de julio.....	54
Figura 22. Frecuencia de convección profunda (%), diferencia (1981-2011) – (1970-1981), mes de octubre.....	54
Figura 23. Frecuencia de convección somera (%), diferencia (1981-2011) – (1970-1981). Izquierda, mes de enero. Derecha, mes de noviembre.	55
Figura 24. Promedio mensual de temperatura en estación seca (diciembre, enero y febrero).	56
Figura 25. Diferencia del promedio mensual de temperatura en estación seca (1982-2013) - (1970-1981).	56
Figura 26. Promedio mensual de temperatura en estación húmeda (abril-noviembre).	57
Figura 27. Diferencia del promedio mensual de temperatura en estación húmeda (1982-2013)-(1970-1981).	57
Figura 28. Patrón compuesto de temperatura asociada a El Niño, periodo base (1981-2010).	58
Figura 29. Patrón compuesto de temperatura asociada a La Niña, periodo base (1981-2010).....	59
Figura 30. Promedio mensual de humedad específica en estación seca (diciembre, enero y febrero). .	60
Figura 31. Diferencia del promedio mensual de humedad específica en estación seca (1982-2013) - (1970-1981).....	61

Figura 32. Promedio mensual de humedad específica en estación húmeda (abril-noviembre).....	61
Figura 33. Diferencia del promedio mensual de humedad específica en estación húmeda (1982-2013) - (1970-1981).....	62
Figura 34. Patrón compuesto de humedad específica asociada a El Niño, periodo base (1981-2010).	62
Figura 35. Patrón compuesto de humedad específica asociada a La Niña, periodo base (1981-2010).	63
Figura 36. Corte zonal (Lat. 6.288°, Lon. 84W°-64W°), diferencia mes enero (K/día), periodo (1982-2013) – (1970-1981).	64
Figura 37. Corte zonal (Lat. 6.288°, Lon. 84W°-64W°), diferencia mes noviembre (K/día), periodo (1982-2013) – (1970-1981).....	65
Figura 38. Corte este- oeste del perfil de elevación orográfica de la zona de estudio.....	67
Figura 39. Ilustración espacial de la zona de estudio.....	68

SIGLAS DE INTERÉS

CAPE: Por sus siglas en inglés, Energía Potencial Convectiva Disponible.

CORNARE: Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare.

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio).

EIA: Estudio de Impacto Ambiental.

ENOS: El Niño –Oscilación del Sur.

EPM: Empresas Públicas de Medellín.

GHCN: Global Historical Climatology Network (Red Global del Clima Histórico).

GrADS: The Grid Analysis and Display System (Sistema de análisis y visualización de grillas).

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

JMA: Japan Meteorological Agency (Agencia Meteorológica de Japón).

JRA-55: Japanese Reanalysis 55-years (Reanálisis Japonés 55-años).

MME: Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

NARR: North American Regional Reanalysis (Reanálisis Regional de América del Norte).

NCAR: National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional de Investigación Atmosférica).

NCEP: National Centers for Environmental Prediction (Centros Nacionales de Predicción Ambiental).

NCDC: National Climate Data Centre (Centro Nacional de Datos Climáticos).

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica).

ONI: Oceanic Niño Index (Índice Oceánico El Niño).

OMJ: Oscilación Madden-Julian.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

PMA: Planes de Manejo Ambiental.

RAMS: Sistema Regional de Modelado Atmosférico.

REN21: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (Red de políticas de energía renovable para el siglo XXI).

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

SIN: Sistemas de Interconexión Nacional.

STN: Sistemas de Transmisión Nacional.

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission (Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales).

UCA: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética.

WCD: World Commission on Dams (Comisión Mundial de Presas).

ZCIT: Zona de Conversión Intertropical.

Resumen

El clima y su variabilidad representan un factor imprescindible en los procesos de regulación y almacenamiento del recurso hídrico en los embalses, incidiendo directamente en el desarrollo de la industria hidroeléctrica de Colombia. Es por esta razón que el propósito de este estudio de caso, es analizar el papel del embalse El Peñol-Guatapé, Antioquia en posibles cambios del clima local circundante y los patrones meteorológicos locales y regionales para el periodo de 1970-2017.

En primer lugar para caracterizar el clima de inmediaciones al embalse, se hizo uso de información local de la red de estaciones meteorológicas del IDEAM, en el periodo 1973-2017, con datos mensuales y multianuales de las variables de precipitación, número de días con lluvia, temperatura y humedad relativa. Así mismo, se utilizaron datos de climatología global y regional del Reanálisis Japonés (JRA-55), en el periodo 1970-2013 para las variables de precipitación, precipitación convectiva, precipitación estratiforme, frecuencia de convección profunda y somera, temperatura, humedad específica y razón de calentamiento convectivo, con una frecuencia de datos trihorarios integrados a datos mensuales y se establecieron las estaciones seca y húmeda, junto a la influencia de ENOS en la precipitación, la temperatura y la humedad específica de forma comparativa. Los periodos se toman en referencia a los años previos y posteriores a la culminación e inicio de operación del embalse para evidenciar las variaciones del comportamiento climático.

La metodología del estudio es basada en estadísticas descriptivas y normales climatológicas de cada una de las variables meteorológicas mencionadas, facilitando la detección de patrones de tendencias decrecientes, estables y/o crecientes, adicional a las diferencias temporales que evidencian el aumento de la temperatura sobre el embalse y activación de la precipitación convectiva al oeste de la zona, para el periodo de análisis más actual (1982-2013). En este contexto, se concluye que la intensificación de las variables en aumento se debe a procesos mayormente locales o de mesoescala, influenciados fuertemente por la topografía y dinámica atmosférica del embalse El Peñol-Guatapé. La contribución del trabajo radica en que se presenta la base técnico – científica que fundamenta la importancia y utilidad de vincular estudios climáticos al sector hidroenergético, como media de prevención y contingencia frente a su operación.

Palabras clave: *Clima, patrón meteorológico, dinámica atmosférica, embalse El Peñol-Guatapé, convección.*

Abstract

The climate and its variability represent an essential factor in the processes of regulation and the storage of water resources in reservoirs, directly affecting the development of the Colombian hydroelectric industry. For this reason the purpose of this base case study is to analyze the role of the El Peñol-Guatapé reservoir, Antioquia in possible changes of the surrounding local climate and the local regional meteorological patterns for the period between 1970 and 2017.

First of all, to characterize the climate surrounding the reservoir, local information was used from the network of IDEAM's meteorological station, in the period of 1973-2017, with monthly and multi-year data on the variables of precipitation, number of days with rain, temperature and relative humidity. Likewise, data from global and regional climatology of the Japanese Reanalysis (JRA-55) were used in the period of 1970-2013 for the variables of precipitation, convective precipitation, stratiform precipitation, frequency of deep and shallow convection, temperature, specific humidity and convective heating rate, with a frequency of three-hour data integrated into monthly data and the dry and wet seasons were established, together with the influence of ENSO on rainfall, temperature and specific humidity in a comparative manner. The periods are taken in reference to the years before and after the completion and start of operation of the reservoir to show variations in climate behavior.

The methodology of the study is based on descriptive and normal climatological statistics of each of the meteorological variables mentioned, facilitating the detection of patterns of decreasing, stable and / or increasing trends, in addition to the temporary differences that show the increase in temperature over the reservoir and activation of convective precipitation west of the zone, for the most current analysis period (1982-2013). In this context, it is concluded that the intensification of the increasing variables is due to mostly local or mesoscale processes, strongly influenced by the topography and atmospheric dynamics of the El Peñol-Guatapé reservoir. The contribution of the work lies in the fact that the technical - scientific base is presented, which bases the importance and usefulness of linking climate studies to the hydropower sector, as a measure of prevention and contingency against its operation.

Keywords: *Climate, weather pattern, atmospheric dynamics, El Peñol-Guatapé reservoir, convection.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento Del Problema

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es cada vez mayor en el mundo. Según Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21, por sus siglas en inglés), se estima que el 80.8% de la energía consumida en el planeta, proviene de fuentes fósiles¹, mientras que el 19,2% de fuentes renovables². Dentro del porcentaje relacionado a fuentes renovables, se encuentra la energía eólica, la biomasa, la geotérmica y la hidráulica; Siendo esta última la más utilizada y con la mayor capacidad de instalación en diversos países como China (27,9%), Brasil (8,6%), Estados Unidos (7,5%), Canadá (7,4%), Rusia (4,5%), India (4,4%) y otros lugares (39,7%), dentro de los cuales se encuentra Colombia en Sur América. Para el año 2015 se alcanzó una capacidad total global de 1.064 GW (REN21, 2016).

Actualmente, en Colombia el 69,9% de la energía eléctrica consumida proviene de fuentes renovables y el 30.1% restante procede de fuentes fósiles (Macías Parra & Andrade, 2013), un porcentaje sobresaliente al mundial y altamente significativo en el país, pues el total de energía que se consume en este, se debe gracias a los Sistemas de Interconexión Nacional (SIN) (UPME, 2015). Lo anterior se atribuye a los más de 18 proyectos hidráulicos o hidroeléctricos ubicados en toda la extensión del territorio, especialmente sobre la región Andina (Palacios Sierra, 2013), siendo el departamento de Antioquia una de las primeras regiones del país en desarrollar la capacidad de instalación y generación de energía (MME & UPME, 2017). Estos proyectos de hidroenergía cuentan con espacios de almacenamiento de recurso hídrico proveniente de fuentes cercanas y las áreas de almacenamiento dependen de la capacidad de generación de energía, estas áreas son llamadas embalses, cuyo papel es fundamental y necesario dentro de todos los procesos hidráulicos (UCA, 2000); como el caso del embalse El Peñol-Guatapé, ubicado en el oriente de Antioquia y caracterizado por ser el de mayor regulador hídrico del país (MME & UPME, 2017).

Sin embargo, pese a todas las cifras que favorecen no solamente al sector económico, sino también, hacia la prestación del servicio eléctrico, con fines de garantizar una mejor calidad de vida, este tipo de proyectos han sido controvertidos a lo largo de los años por generar una serie de impactos sociales y ecológicos (Goldsmith & Hildyard , 1984). Ello no es una situación alejada en el país, y es precisamente ahí donde se encuentra el problema de este trabajo de investigación, ya que los impactos ambientales directos e indirectos usualmente trascienden en aspectos intrínsecamente relacionados al desarrollo social en escenarios de educación, infraestructura, comunicación, empleo, prestación de servicios, etc., que en general subyace en la búsqueda de un progreso íntegro de la sociedad, muchas veces fracasado por la sobreposición económica en medio de la vulnerabilidad social (Úsuga Montolla, 2014); Todo esto es representado en un trasfondo, por los indicadores de crecimiento o decrecimiento poblacional; y es entonces en donde se tienen que desarrollar alternativas de prevención o remediación, que permitan que los proyectos hidroeléctricos no se conviertan en un costo social, económico y ecológico para el territorio, sino un beneficio integral mancomunado (Iglesias Carvajal, 2011). Motivo

¹ Las fuentes fósiles son aquellas provenientes de la descomposición y la transformación de materia orgánica durante periodos de tiempo significativos, hasta la generación de compuestos energéticos como el petróleo, el gas natural y el carbón.

² Las fuentes renovables provienen de entornos naturales, al igual que las fuentes fósiles, pero con la diferencia de tener capacidades de regeneración en periodos constantes y cortos.

por el cual se tomó como objeto de estudio el embalse El Peñol-Guatapé, por su importante papel en Colombia y la región, como se mencionó anteriormente.

Por consiguiente, el presente se desarrolla bajo la hipótesis de que los embalses pertenecientes a hidroeléctricas generan alteraciones en los patrones meteorológicos y climatológicos locales y regionales, pues es un tema poco investigado en toda esta industria (Hossain, Jeyachandran, & Pielke Sr., 2010) y uno de los principales factores es la falta de políticas que permitan establecer lineamientos de evaluación de impacto ambiental, con lo cual coinciden diversos expertos (World Commission on Dams, 2000). Por ejemplo, en Colombia la norma encargada de los proyectos de generación de energía hidroeléctrica es la Resolución 1519 de 2017 (MinAmbiente, 2017), en ella se establecen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental (EIA), los cuales son requeridos para el trámite de la licencia ambiental en los proyectos de construcción, operación y se toman otras determinaciones. En los EIA las componentes climáticas – meteorológicas son caracterizadas, diagnosticadas y evaluadas a la par de muchos otros factores y aspectos que se solicitan en los requerimientos (MinAmbiente, 2017). Sin embargo, una vez estando el proyecto en la fase de operación, no se vuelve a conocer a fondo las implicaciones que pueden llegar a ejercer en este caso, los embalses o hidroeléctricas sobre los componentes específicamente mencionados, inclusive la norma no puntualiza de forma explícita la realización de análisis o evaluaciones aplicadas de la dinámica atmosférica dentro de la formulación de los Planes de Manejo Ambiental (PMA), planes de seguimiento y monitoreo y planes de gestión del riesgo (Capítulos 8.2 y 10 de la norma) (MinAmbiente, 2017). No obstante, la mayoría de los otros aspectos como: aire, agua, suelo, flora, fauna, paisaje y economía, principalmente, si son evaluados posteriormente como medida de beneficio, contingencia e investigación (MinAmbiente, 2017). De manera que los programas que se establecen en los planes emitidos, deben estar para mitigar, prevenir y compensar todo tipo de impacto, establecido o no establecido y ofrecer garantías a las poblaciones aledañas (Úsuga Montolla, 2014).

La caracterización de los impactos ambientales que pueden generar los proyectos hidroeléctricos está determinada por las condiciones físicas y geográficas de cada zona, lo cual representa un reto el establecer una cuantificación de estos impactos a escalas ecológicas, sociales y económicas (Úsuga Montolla, 2014). Este es el fundamento por el cual se toma como objeto de estudio al embalse El Peñol-Guatapé, en donde se tiene evidencia de los impactos, consecuencia del desarrollo del proyecto hidroeléctrico iniciado en el año 1971, cuando el municipio El Peñol fue intervenido y desplazado por el proyecto de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) (EPM, 2017), provocando modificación de uso y cobertura del suelo, en efecto cambios en la biodiversidad a escala local, cambios de la actividad económica tradicional por la recreación acuática, cambios culturales, cambios en el cauce de afluentes, alteraciones en el clima, etc. (Delaurbe, 2015). Por tal razón, es importante estudiar si existe algún tipo de alteración climática local y regional, teniendo en cuenta la dinámica atmosférica, como se indicó en el IX Congreso Colombiano de Meteorología del 2011: “Los ecosistemas y el sistema socioeconómico nacional se han adaptado a los patrones climáticos reinantes en el territorio y son afectados por los fenómenos meteorológicos propios de cada región. Eventualmente, tales patrones son alterados por eventos extremos de variabilidad climática (El Niño - La Niña), los cuales alteran de manera importante el funcionamiento de los ecosistemas y los procesos socioeconómicos con impactos, generalmente negativos, de magnitud considerable (...)” (IX Congreso Colombiano de Meteorología, 2011); ratificando que el clima sirve como un instrumento y/o herramienta indispensable para afrontar los efectos y reducir los impactos negativos del embalse, la región y el país en el contexto de la planificación ambiental.

1.2 Justificación

Con la aprobación de la Ley 164 de 1994 (IDEAM, 1994), Colombia se suma formalmente a lo acordado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizada el año 1992 en Nueva York. A partir de esta fecha, los entes gubernamentales asociados han empezado a desarrollar e implementar acciones y programas con el objetivo de implementar medidas para la mitigación y adaptación a la variabilidad climática y el cambio climático. Esto último, representa un riesgo dentro del esquema de desarrollo sostenible y hace necesaria la puesta en marcha de estrategias en todo el territorio nacional. Esta realidad ha generado el interés no solamente en los entes autónomos del gobierno, sino también, en los organismos internacionales, centros de investigación e instituciones educativas, y el resultado de algunas investigaciones concluye que los fenómenos relacionados con la atmósfera, el tiempo y el clima influyen en el desarrollo y resultado de las actividades humanas (IX Congreso Colombiano de Meteorología, 2011), siendo un postulado coherente con la definición dada en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que es definido como: “El cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (MinAmbiente, 2018).

De manera que el clima es un factor imprescindible para el desarrollo global; este determina muchas de las actividades y/o procesos económicos, sociales, políticos, tecnológicos y ecológicos, por lo que cualquier alteración en el mismo, implica un desequilibrio íntegro y complejo en cada uno de los sistemas asociados (Carrizosa Umaña , 2014). Por tal motivo, es importante tener procedimientos y herramientas que permitan y faciliten el análisis y toma de decisiones tanto en los sectores económicos influyentes, como también, en medio de los diversos escenarios de planeación y organización territorial desde una perspectiva de gestión del riesgo (Avellaneda Cusarúa, 2015).

El estudio de la variabilidad climática local es importante porque permite la determinación del estado del tiempo atmosférico y la confluencia en distintas actividades en periodos de tiempo largo y corto, útiles en la prevención y toma de decisiones (Montealegre Bocanegra, 2009). Ello es una realidad que interesa a distintos sectores de la economía y uno de los sectores con mayor interés es el hidroenergético, el cual depende directamente de los factores meteorológicos y por tanto es una de las desventajas en contra dentro de sus procesos de producción de energía. En Colombia este sector de la economía representa el 2.2% del Producto Interno Bruto (PIB), con una tasa de crecimiento del 4.1% para el año 2014, que se ha mantenido dentro de sus márgenes hasta la actualidad (Findeter, 2015), y esto es el resultado de la creación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), consolidado como el conjunto de centrales hidroeléctricas en el Sistema de Transmisión Nacional (STN), que proveen un aproximado del 98.2% del consumo total de la energía en el territorio nacional (UPME, 2015); esto es con el objetivo de garantizar a la población el acceso al servicio de energía eléctrica. Lo anterior, además de representar un beneficio en la economía y en la prestación de servicios, significa también un problema en materia ambiental, pues la construcción de centrales hidroeléctricas implica la reconversión de la cobertura vegetal del suelo, el desplazamiento de comunidades, desviación de cauces, cambios en el ciclo hidrológico, entre otros problemas que alteran de forma inminente las condiciones naturales de un lugar (Leal Castillo, 2007). Para este trabajo de investigación, el embalse El Peñol-Guatapé ubicado en el departamento de Antioquia es el objeto de estudio.

Es esa la razón por la cual se propone analizar el papel del embalse El Peñol-Guatapé y su influencia en el clima local, pues este espacio es estratégico para la economía de la región y las afectaciones que

se presenten allí pueden afectar la calidad de vida de las comunidades próximas como los municipios Alejandría, El Peñol, Concepción, Guatapé y San Rafael (Alcaldía de Guatapé, Antioquia, 2014). Así mismo, esta propuesta de investigación se consolida como una iniciativa innovadora y base para futuros aportes en el campo de las ciencias atmosféricas, específicamente en contribución a dimensiones de impacto ambiental aún no contempladas dentro de la normatividad y como aporte al vacío de información en un contexto global (Hossain, Jeyachandran, & Pielke Sr., 2010), para que así se tomen decisiones y medidas de prevención de riesgo en el sector energético.

En definitiva, es importante destacar con base a todo lo anterior, que la labor del Ingeniero Ambiental de la Universidad El Bosque está en función de afrontar y resolver las exigencias en materia ambiental que la sociedad plantea, teniendo la capacidad de diseñar propuestas creativas de investigación y desarrollo para la implementación de alternativas que contribuyan a la mitigación y adaptación en el marco de la variabilidad climática y el cambio climático dentro de diversos contextos; reafirmando que esta investigación indica interés en generar conocimiento base para Colombia dentro de un campo poco explorado y necesario, como fue afirmado en la Conferencia de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas Rio+20, con el objetivo trece de desarrollo titulado *acción por el clima* (PNUD, 2012).

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la influencia del embalse El Peñol-Guatapé, Antioquia en el clima local y regional; y probables efectos sobre los patrones de precipitación y temperatura?

3. OBJETIVOS

3.1 General

Analizar el papel del embalse El Peñol-Guatapé, Antioquia en posibles cambios del clima local circundante y los patrones meteorológicos locales y regionales para el periodo de 1970-2017.

3.2 Específicos

- Hacer la caracterización climática de inmediaciones del embalse El Peñol-Guatapé a partir de datos de la red de estaciones meteorológicas del IDEAM.
- Realizar la aproximación de variabilidad climática en regiones del embalse El Peñol-Guatapé y alrededores, con base en el análisis de bases de datos de Japanese Reanalysis (JRA-55).
- Caracterizar la razón de calentamiento convectivo en la región zonal sobre el embalse El Peñol-Guatapé.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 Perspectiva Teórica

4.1.1 Estado del Arte

En la actualidad, el tema de estudio es aún materia a investigar alrededor de los lugares donde se genera energía eléctrica a partir de sistemas hidráulicos a nivel global, puesto que dentro de la limitada información, se concluye mayormente en que existe un vacío o falta de investigación en el tema (Tabla 1).

Con respecto a lo anterior, se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas, principalmente revistas de publicación indexada y se encontró información en países como: Australia, China, Estados Unidos y Turquía con metodologías aplicadas al estudio directo de los embalses o presas y sus relaciones con el clima local, incluyendo indicadores de cambios de cobertura de suelo. Por otro lado, en: Colombia, España e Inglaterra se encontraron bases teóricas que consolidan el comportamiento y alteraciones del clima como uno de los impactos ambientales en sistemas energéticos bajo características de sistemas atmosféricos en condiciones determinadas.

Tras no conocerse estudios aplicados que puedan servir de referencia en el territorio colombiano, se asume la información teórica como antecedentes teóricos y los estudios internacionales aplicados como pilares para el desarrollo metodológico, con base a contenidos afines al objetivo principal del presente trabajo (Tabla 1).

De acuerdo a lo anterior, las investigaciones referentes del trabajo fueron las siguientes:

Tabla 1. Investigaciones seleccionadas para el desarrollo del estado del arte.

Tema	País	Título del trabajo o artículo	Cita de Autor
Clima y Variabilidad Climática	Colombia	La variabilidad climática de precipitación, temperatura, radiación solar y nubosidad y su incidencia en los caudales medios del río Fonce en San Gil, Santander	(Montoya Giraldo, 2015)
		El Clima de Antioquia	(Poveda Jaramillo, 2006)
Alteraciones Climáticas (microclimas)	Colombia	Efectos Ambientales Generados Por la Construcción y Operación de un Embalse	(Bustante Fernández, 2008)
	España	El Impacto climático de los embalses cantábricos	(García Codrón, 1994)
		Posibles cambios climáticos debidos a los embalses construidos en las cabeceras de los ríos de montaña	(Astorga González, 1994)

Continuación en la siguiente página...

Tema	País	Título del trabajo o artículo	Cita de Autor
Alteraciones Climáticas (microclimas)	Inglaterra	Biophysical, socioeconomic and geopolitical impacts assessments of large dams: an overview	(Régis , Edwards , & Mark , 2010)
Influencia de embalses y/o presas en el clima local (mesoescala)	China	Perspectives on the Saliency and Magnitude of Dam Impacts for Hydro Development Scenarios in China	(Tullos D. et al., 2010)
	Estados Unidos	The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns.	(Degu et al., 2011)
	Estados Unidos	Evaluation of surface properties and atmospheric disturbances caused by post-dam alterations of land use/land cover	(Woldemichael, Hossain, & Pielke Sr., 2014)
	Estados Unidos	Dam safety effects due to human alteration of extreme precipitation	(Hossain, Jeyachandran, & Pielke Sr., 2010)
	Estados Unidos/Australia	Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence	(Pielke Sr. et al., 2011)
	Turquía	The Influence of Dams on Surrounding Climate: The Case of Keban Dam - Barajların Çevre İklim Etkisi: Keban Barajı Örneği	(Kum, Gülşen, 2016)

Fuente: Autor del documento, 2018.

4.1.1.1 Clima y variabilidad climática

El clima y su variabilidad, han sido características en el estudio de Poveda Jaramillo (2006); se presenta un análisis del clima regional del departamento de Antioquia, en el cual se muestra evidencia del comportamiento general de las principales variables meteorológicas en escala de tiempo multianual con un periodo de análisis de 25 años. Además, muestra las metodologías empleadas en el desarrollo, la organización y la compilación de las bases de datos. Adicionalmente, las variables son analizadas bajo el forzante de la temperatura de la superficie del mar (TSM) del Océano Pacífico ecuatorial en la fase cálida El Niño y la fase fría La Niña, fenómeno conocido como El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT); el estudio concluye que el departamento está sufriendo una variación en el clima a causa de la actividad antrópica y por tanto ello traería graves efectos sobre la economía en general.

Por otra parte, el trabajo de Montoya Giraldo, (2015), examina la influencia del cambio climático en el río Fonce. La metodología se basó en el análisis de variables climáticas las cuales fueron procesadas mediante el software CLIMDEX, desarrollado por Byron Gleason (2001) del National Climate Data Centre (NCDC, por sus siglas en inglés) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés). De la misma forma que el estudio de Poveda Jaramillo (2006), se

correlaciona con los posibles y futuros escenarios de cambio climático a los que se pueden asociar a la actividad humana.

En general, en ambos estudios se concluye con evidencia de variaciones climáticas. En primera instancia, Poveda Jaramillo (2006), muestra que se experimentan aumentos y disminuciones de la temperatura y la precipitación a lo largo de los años (1981-2005), condicionado especialmente por la topografía del territorio; En contraste a Montoya Giraldo (2015), donde se determinan incrementos en la temperatura y la precipitación al transcurrir los años, teniendo en cuenta que el análisis es realizado en dos contextos diferentes en cuanto a todas las características territoriales (Departamentos de Antioquia y Santander), pero con metodologías de desarrollo direccionadas hacia un objetivo en común.

4.1.1.2 Alteraciones Climáticas (microclimas)

La determinación y definición de la existencia de impactos climáticos a causa del establecimiento y operación de embalses y/o presas es uno de los principales referentes que justifica la necesidad de efectuar análisis que permitan argumentar los postulados teóricos con resultados descriptibles y asociativos (Bustamante Fernández, 2008). Bustamante Fernández (2008) plantea que la construcción y operación de los embalses genera efectos ambientales, comprendiendo este término como la complejidad entre lo social, lo ecológico y lo económico, siendo este último el más favorecido. La componente climática se encuentra en el apartado ecológico que de manera general debe ser considerada un factor de interés en la evaluación de impactos en la etapa de operación de embalses, por tratarse de un aspecto posiblemente crítico con efectos de modificación y/o alteración. Todo lo anterior es dicho con base a proyectos energéticos de Colombia.

En este mismo sentido, García Codrón (1994), Astorga González (1994) y Regis, Edwards, & Mark, (2010) plantean explícitamente una posible incidencia directa de los embalses en las variaciones climáticas y se plantea como ejemplo específico en los embalses cantábricos y en embalses construidos en las cabeceras de los ríos de montaña en España.

4.1.1.3 Influencia de embalses y/o presas en el clima local (mesoescala)

Los estudios referenciados de mesoescala, definido ello como una escala que puede ir de 2-2000 km, dependiendo de la subclasificación de escala horizontal (meso- α , meso- β y meso- γ de 200- 2000 km, 20-200 km y 2-20 km, respectivamente), superior a una microescala e inferior a la escala sinóptica (Orlanski, 1975); concede pues, el desarrollo de investigaciones, teniendo como objetivo los embalses en los Estados Unidos, en donde se han realizado una serie de investigaciones importantes y directamente relacionadas a la influencia de las presas o embalses con grandes extensiones de recurso hídrico en el clima local y regional, teniendo en cuenta algunas variables meteorológicas e indicadores como la humedad del suelo para la identificación y correlación con los cambio en su cobertura.

Tullos D. et al. (2010) presenta un análisis de 21 impactos biofísicos, geopolíticos y socioeconómicos, teniendo en cuenta las prioridades de la Comisión Mundial de Represas (WCD, por sus siglas en inglés) en el que se evalúan escenarios de impactos utilizando un modelo de evaluación integrativa con indicadores en China. Uno de los indicadores que se incluye en el análisis es la alteración de los patrones de temperatura estacional atmosférica y en los cuerpos de agua.

Degu et al. (2011) busca comprender la influencia ejercida por las grandes presas sobre el clima local y los cambios de patrones de precipitación en las cuencas hidrográficas retenidas o reposadas. Para ello, se usa un registro de 30 años de datos de North American Regional Reanalysis (NARR, por sus siglas en inglés) (Mesinger et al., 2006) en 92 presas de América del Norte basado en una clasificación climática de Köppen-Geiger (Köppen, 1884) para determinar regionalmente los mayores cambios en los gradientes espaciales de energía potencial convectiva disponible (CAPE, por sus siglas en inglés), humedad específica y evaporación superficial alrededor de tres bandas establecidas desde la orilla de la presa hasta 100 km alrededor de las mismas. El estudio concluye que las presas influyen más en climas de tipo mediterráneo y semiárido, mientras que para climas húmedos la influencia es menos evidente; Además, la zona local en lagos de Carolina del sur y Minnesota han sido factor importante para el cambio del tipo de clima a escala local y adicionalmente, han alterado los patrones y régimen de precipitación.

Para Woldelmichael, Hossain, & Pielke Sr., (2014) se establece un análisis de la cobertura del suelo y uso del suelo y las interacciones con la atmosfera, teniendo como objeto dos regiones limitantes y contribuyentes de recurso hídrico a los embalses Folsom y Owyhee. La regiones objeto de análisis fueron la cuenca del río Americano y la cuenca del río Owyhee, ubicadas en los estados de California y Oregón, respectivamente. Para esto, se tuvieron en cuenta los registros posteriores a la operación de los embalses, específicamente a partir del año 2003, con énfasis en el episodio de inundación presentado entre 1996 y 1997. Todo lo anterior, se consolido en El Sistema Regional de Modelado Atmosférico en versión 6.0 (RAMS, por sus siglas en inglés), el cual permitió determinar que los flujos de energía y de humedad de las cuencas objeto son influenciadas por los cambios inducidos por el embalse en el uso del suelo y cobertura del suelo, debido la urbanización y desarrollo de actividad agrícola desencadenada luego de la construcción de las presas. El estudio concluye que hay una relación entre las circulaciones atmosféricas y los cambios de uso y cobertura del suelo, pues en la zona las variaciones de flujo de viento de bajo nivel permiten que la circulación de alta humedad y esto condiciona el aumento de transporte advectivo y la precipitación extrema y prolongada durante los periodos analizados.

Hossain, Jeyachandran, & Pielke Sr., (2010) desarrolla un análisis del impacto de las presas en las precipitaciones extremas en 633 grandes presas alrededor del mundo, en donde identificaron registros de 92 estaciones de precipitación para un periodo desde 1900 hasta el año 2008. Esto se realizó con la ayuda de bases de datos meteorológicos diarios de la Red Global del Clima Histórico (*Global Historical Climate Network*, (GHCN, por sus siglas en inglés)). El análisis se realiza por multianual por estación y teniendo como consideración dos dominios de tiempo; uno previo a la fecha en la cual se da apertura de las presas y otro posterior a la apertura de las presas. Todo esto se unifica en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y arroja escenarios de precipitación extrema para periodos posteriores en el sur de Europa y África, en contraste con las regiones del medio este y oeste de los Estados Unidos, en donde la tendencia de precipitación extrema no es evidente. Este estudio concluye que el impacto de las grandes presas en la precipitación extrema está en función de condiciones de circulación atmosférica de gran escala, escala sinóptica y mesoescala y además, es un problema que afecta a poblaciones aledañas a estas zonas, por lo que se expresa la necesidad de investigar con más detalle los mecanismos físicos de la alteración de la precipitación por presas en el mundo.

Por otro lado, Pielke Sr. Et al., (2011) resume los cambios en la estructura del paisaje debido a la gestión en los últimos siglos y el uso de datos observados y modelados; documenta cómo estos cambios han alterado los flujos de superficie en las escalas locales y de mesoescala. La investigación

contempla desde el siglo 1500 hasta el siglo 2000 para Asia, Norte América, América Latina, África, Australia y Europa. El artículo discute como los cambios en el paisaje alteran a gran escala patrones de circulación atmosférica, pero, específicamente en Asia, el análisis se enfoca en las presas y el clima. La información proviene del Departamento Meteorológico de la India y la más reciente estimativas satelitales de precipitación de la Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales (TRMM, por sus siglas en inglés) del año 1998 al 2009, correspondiente al período previo y posterior a la Presa de las Tres Gargantas en China y encuentran que la precipitación moderada se reduce considerablemente en las proximidades del embalse, mientras que se mejora en ambos lados del embalse, en contraste a lo que concluyen Degu et al., (2011) y Hossain, Jeyachandran, & Pielke Sr., (2010), con aumentos significativos de precipitación local.

Finalmente, Kum, Gülşen, (2006) analiza si el embalse Keban crea diferencias en los parámetros climáticos como espaciales y temporales en su entorno. Para este propósito, se utilizan dos métodos no paramétricos (prueba de correlación de rangos Mann-Kendall y estimación de la pendiente de Sen) para detectar las tendencias de las variables meteorológicas de tres estaciones próximas al embalse, comparando el periodo previo a la operación del embalse (1964-1980) y después de su construcción (1980-2012). Las variables evaluadas son precipitación, temperatura y humedad relativa, generando que los resultados de ambas pruebas estadísticas, Mann-Kendall y la estimación Sen Slope, fueron coherentes entre sí, debido a que la cantidad de cambio en la tasa de elementos climáticos, especialmente la humedad, se vuelve más pequeña a medida que aumentaba la distancia desde el embalse. De acuerdo con el análisis de temperatura, el promedio aumenta significativamente, especialmente durante la temporada de calor después de construcción del embalse y con respecto a los valores de precipitación, aunque la dirección de la tendencia varió de mes a mes en todas las estaciones, los cambios observados no fueron significativos. En general, aunque se detectó un cambio de tendencia significativo para todos parámetros en el período posterior a la construcción, no fue tan significativo al período previo, entonces se concluye que si la humedad relativa continúa aumentando en el futuro, se pueden observar cambios significativos en las diferencias de temperatura, lo que podría revelar diferencias en el microclima de la región aún más claramente.

4.1.2 Marco Teórico – Conceptual

Figura 1. Esferas de teorías constructivas.



Teoría General: Variabilidad Climática
Teoría Sustantiva 1: Variables Meteorológicas y Climatológicas
Teoría Sustantiva 2: Circulación de la atmósfera

Fuente: Autor del documento, 2018.

La variabilidad climática es un factor importante y predominante a nivel mundial, pues representa una circunstancia que puede trascender en todos los procesos de un territorio y por ello, su complejidad está en la generación de alternativas adaptativas direccionadas hacia la gestión del riesgo (United Nations, 1992). De modo que las variaciones o fluctuaciones en el clima durante periodos de tiempo: estacionales, intraestacionales, interanuales e interdecadales repercuten en anomalías climáticas que pueden tener origen debido a procesos naturales internos o procesos externos, inducidos y/o forzados por la actividad antrópica (IDEAM, 2016).

Para entender la variación del clima, es necesario conocer los diversos procesos de circulación que se generan en la atmósfera y además, las variables meteorológicas y climatológicas implicadas a escalas espaciales y temporales determinadas (IDEAM, 2016). Todo esto es posible con la aplicación de la climatología y la meteorología, que se definen como ciencias encargadas del estudio y descripción de fenómenos atmosféricos, sin embargo, los lapsos de tiempo de estudio varían entre ellas. La climatología permite establecer análisis del tiempo a largo plazo y la meteorología se ocupa de fenómenos a corto plazo; por lo que la unión de estas, genera una herramienta potencial de monitoreo, para determinar las condiciones climáticas sucedidas y por suceder, teniendo como referencia la evolución del sistema climático y las implicaciones extremas de los episodios pasados (Montealegre & Pabón, 2000).

Por otro lado, es importante mencionar que el estudio del clima conlleva a analizar procesos naturales como el del ciclo hidrológico, que se define como el proceso de circulación de agua en la hidrósfera que interactúa a su vez con el dinamismo hídrico superficial y subsuperficial, dando paso al movimiento del agua sobre la biósfera y su transformación atmosférica en forma de flujo que alimenta las aguas subterráneas y superficiales, a partir de procesos de escurrimiento o escorrentía y filtración en suelos, en donde la transpiración y evaporación da lugar a la continuación del ciclo consecutivo y repetitivo sobre ríos, mares, lagos, glaciares, embalses, depósitos de agua, etc., Así que las alteraciones en el comportamiento del clima, inciden de forma directa al sistema hidrológico, condicionando a su vez, las modificaciones de patrones meteorológicos y climatológicos (Chow et al, 1994).

4.1.2.1 Descripción de Variables Meteorológicas y Climatológicas

Los estudios meteorológicos y climatológicos deben comprender el análisis de periodos de tiempo largos, dependiendo su finalidad (Escobar García, 2011). Para ello es sustancial cada una de las variables meteorológicas y climatológicas, las cuales permiten la descripción del comportamiento del clima, bajo la influencia de fenómenos atmosféricos (FECYT, 2004). Las principales variables son:

- **Precipitación:** Es el fenómeno producto de la condensación o agua meteórica³ sobre la superficie, el cual se hace manifiesto mediante lluvia, llovizna, aguacero, granizo, etc., y en casos más prolongados, con nieve (Universidad de Murcia, 2000). La forma como se manifiesta la precipitación, depende de factores como la configuración orográfica, corrientes de aire y en general, la circulación atmosférica; Por lo que esta variable podría clasificarse como: precipitación ciclónica o estratiforme, precipitación convectiva y precipitación orográfica (Barry & Chorley, 1985).

³ Meteoro hace referencia a los fenómenos que ocurren entre la superficie terrestre y la troposfera.

La precipitación ciclónica o estratiforme, se desarrolla por el ascenso de aire caliente en sistemas sinópticos o de gran escala, donde este converge con masas de aire en zonas de baja presión y da lugar a lluvias frontales ligeras, comúnmente llamadas como frentes fríos o cálidos, dependiendo de las condiciones geográficas (Segerer & Villodas, 2006)

Por otro lado, la precipitación convectiva se origina por el calentamiento del aire en la superficie, permitiendo que este se dilate y sea menos denso, para así ascender, retener vapor de agua que luego se condensa y generar nubosidad de tipo cumulus congestus⁴ y cumulonimbus⁴. Todo esto, puede ocasionar fuertes precipitaciones con duraciones relativamente cortas (Sarochar, Ciappesoni, & Ruiz, 2005). La convección por su parte, se puede caracterizar de forma general como profunda y somera. La convección profunda hace referencia al intercambio de calor y vapor de agua vertical entre la troposfera baja y la tropopausa o troposfera alta, usualmente el fenómeno es denominado “deep convective”. Por otro lado, la convección somera es fenómeno en escala sinóptica que ocurre por la turbulencia⁵ en la capa límite de la troposfera cuando la cantidad de vapor de agua no es suficiente para condensarse y generar precipitación; este es denominado “shallow convective” (Hagos, Feng, Landu, & Long, 2014).

Finalmente, la precipitación orográfica es la más común en zonas de alto relieve, en donde las masas de aire húmedo chocan en las montañas y se genera el ascenso de aire pesado que se condensa y precipita (Ver explicación detallada en sección 4.1.2.2.1, efecto foehn).

- **Humedad:** Es una medida que relaciona la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y se clasifica en: humedad absoluta, humedad específica y humedad relativa; La diferencia entre estas, radica en las unidades de medida. La humedad absoluta mide la cantidad de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire (g/m^3), la humedad específica mide la relación entre la cantidad de vapor de agua en masa, con la masa de aire húmedo (g/kg) y la humedad relativa hace referencia al porcentaje de vapor de agua contenido en el aire (%) (FECYT, 2004). La medida más utilizada es la humedad relativa, por la facilidad de interpretación.
- **Temperatura:** Es una magnitud referente al grado de calor en el aire con origen generalmente por la emisión de rayos solares, encargados del comportamiento térmico en determinados espacios físico - geográficos. Esta es una de las principales variables en la meteorología y su análisis se basa en máximos, mínimos y medios (FECYT, 2004).

4.1.2.2 Descripción de Circulación General de la Atmósfera en Colombia

Colombia es un país donde se desarrollan diversos procesos atmosféricos que desencadenan en fenómenos meteorológicos y climatológicos significativos (Hoyos Rincón, 2017). Algunos de estos fenómenos afectan de forma directa a todo el territorio (Sinóptica), más otros se ven influenciados por condiciones y factores específicos a escalas menores. Por tal razón, se presenta una breve descripción de los fenómenos de gran escala, escala sinóptica y mesoescala o regional dentro del área de estudio a diferentes escalas de variabilidad (Intraestacional, estacional, interanual e interdecadal):

⁴ Cumulus congestus y cumulonimbus son nubes de categoría cumuliformes que se generan en formas alargadas y verticales por convección.

⁵ La turbulencia es la dinámica o movimiento desorganizado de un fluido como el aire.

4.1.2.2.1 Fenómenos meteorológicos influyentes en el clima gran escala, escala sinóptica y mesoescala en Colombia

- **Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT):** Hace referencia a una zona ubicada sobre la franja ecuatorial que provoca una activa actividad de circulación atmosférica con la convergencia entre el aire del hemisferio norte y el hemisferio sur. A razón de ello de que la convección y la precipitación se concentra alrededor de conglomerados de nubosidad, la ZCIT es la región de mayor nubosidad y lluvias. Aquí también, los vientos alisios del noreste se encuentran con los vientos alisios del sureste, originados por los anticiclones de Atlántico Norte y Pacífico y Atlántico Sur, respectivamente (Guzmán, Ruíz, & Cadena, 2014).

La Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) se mueve latitudinalmente con base al desplazamiento del Sol; de tal manera que sobre Colombia y áreas contiguas, entre enero y febrero el segmento del Océano Pacífico oriental alcanza la posición extrema meridional en los 2 grados de latitud norte, sin embargo, durante eventos de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS), la latitud puede ser de 5 grados sur. Entre marzo y mayo el segmento del Pacífico se alcanza una posición entre 2 y 7 grados de latitud norte, en marzo y abril la rama continental se conecta con el segmento del Océano Atlántico y alcanza 5 grados de latitud sur y 1 grado de latitud norte al oriente de Colombia (penetra la Región Andina); Entre junio y agosto el segmento del Pacífico alcanza 8 grados de latitud norte de forma inicial y 10 grados de latitud norte al finalizar el periodo (penetra la Región Caribe) y además el segmento continental se inclina de manera Suroeste-Noreste sobre el Oriente del país. Entre septiembre y noviembre el segmento del Pacífico se desplaza paulatinamente hacia el sur y se alcanzan de 11 a 7 grados latitud norte y finalmente en diciembre, la latitud se ubica más al norte, evidenciándose lentamente la inclinación hasta tener un acercamiento con las líneas de los paralelos (CIOH, 2010; Ruíz Guzmán & Cadena M., 2014).

- **Vientos:** Geográficamente, Colombia se encuentra entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, por lo que su sometimiento a los vientos alisios es directo, pues estos soplan en el hemisferio norte y sur del noreste al sureste, respectivamente. En este punto, la compleja orografía del territorio (altas elevaciones) se convierte en el factor incidente del desplazamiento y velocidad del viento (FECYT, 2004). Adicionalmente, la confluencia de los dos océanos y el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante el año, cumplen un papel fundamental en el comportamiento del viento (dirección y velocidad); en otras palabras, la latitud determina la variación a lo largo del año y los patrones de circulación atmosférica dominantes (IDEAM, 2005).

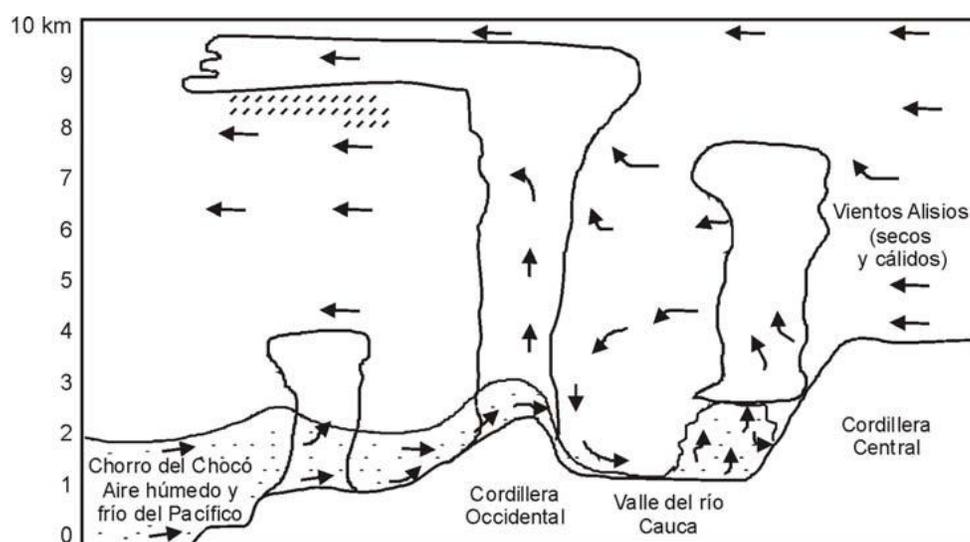
Existen diversos tipos de viento, pero en el país la circulación del aire se realiza mayormente tipo brisa valle-montaña, debido a su configuración compleja de elevación con la cordillera de los Andes, no dejando de lado que la turbulencia en el terreno depende de las formas y orientaciones topográficas. Así que el comportamiento del viento no solamente depende de todos los factores y condiciones mencionadas, sino también, de la radicación solar que intensifica los procesos de movimiento de aire, ya que el aire húmedo o cálido asciende y el aire seco desciende y se genera una especie de oscilación en magnitud a lo largo del día (IDEAM, 2005).

- **Corrientes en chorro y chorro de Choco:** Las corrientes en chorro son corredores de viento con velocidades imponentes que fluyen en dirección hacia el este, como el caso del chorro polar y

subtropical, los cuales se desarrollan en inmediaciones de la tropopausa y sus intensificaciones dependen de los gradientes de la temperatura horizontal (Antico & Berri , 2004).

En Colombia, una de las corrientes en chorro que confluye con el territorio, es el chorro de Choco, el cual ingresa a los bajos niveles de la atmosfera que permiten que el viento tome velocidades considerables por los efectos topográficos. Todo esto conlleva también a que la corriente en el Choco sea la responsable de la significativa advección de humedad desde el Océano Pacifico (Occidente de Colombia) hacia el interior del país (Poveda G., 2004); Estos vientos superficiales provenientes del occidente del país, interactúan con los vientos alisios del este sobre la cordillera central y occidental de Colombia (Figura 2), sumado con el efecto del calentamiento superficial del aire y el ascenso orográfico del mismo genera un perfil atmosférico, favoreciendo por otro lado la convección profunda; y es esa la razón por la cual no solamente gran parte del aire húmedo del país proviene de este fenómeno, sino también, esto tiene correlación con las altas cantidades de condensación y precipitación en el occidente y centro de Colombia (Poveda & Mesa, 1999; Poveda Jaramillo, 2012).

Figura 2. Representación de la circulación de vientos por el centro de Antioquia.



Fuente: Rescatado de: Poveda Jaramillo, (2006); Autor: López y Howell, (1967).

- **Sistemas de Alta presión:** En Colombia, los anticiclones subtropicales no influyen de manera directa, sin embargo, los anticiclones del Pacífico norte y sur experimentan su intensificación con la generación de lluvias y el direccionamiento de las ondas de viento, contrario a los anticiclones de Atlántico norte y sur, las cuales condicionan el comportamiento de la ZCIT, pues la posición y trayectoria varían en diversos estados de tiempo. De otro lado, el anticiclón de la Alta Boliviana transporta la humedad desde el Amazonas, debido a que su formación se le atribuye a la liberación de calor, por lo que la generación de precipitaciones y nubosidad toman rumbo hacia áreas de convección intensa (Ruíz Guzmán & Cadena M., 2014).
- **Vaguadas de latitudes medias:** Generalmente estas se encuentran sobre el eje de áreas de bajas presiones y se genera convergencia y divergencia en los niveles bajos y altos, respectivamente. La intercepción de las vaguadas puede ser perturbada por los anticiclones subtropicales y alcanzar

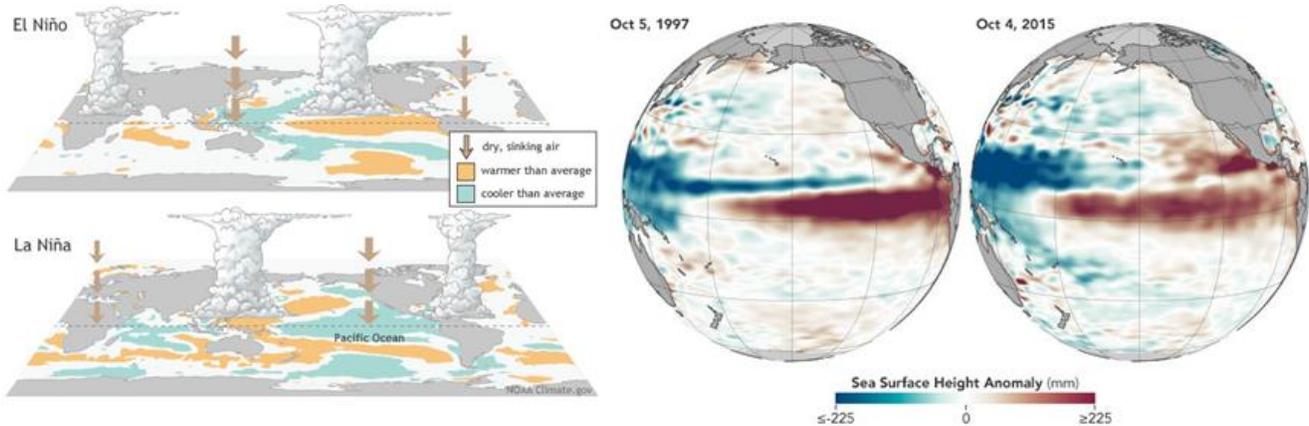
latitudes tropicales. Cuando las vaguadas interactúan con la ZCIT u ondas del caribe es impulsado la alteración del comportamiento meteorológico (CIOH, 2010; Ruíz Guzmán & Cadena M., 2014).

- **Onda del este en el Caribe:** Son perturbaciones de tipo ondulatorio en la profunda corriente del este tropical, que en términos generales detrás del eje de la onda se despliegan vientos de convergencia traducido en la formación de nubes convectivas y delante del eje el viento de divergencia y la presencia de buen tiempo. Todo esto depende de las condiciones atmosféricas de la trayectoria, pues mayoritariamente se presenta curvatura ciclónica y deformación el campo de presión. Este tipo de onda se evidencia con la frecuencia de temporada lluviosa del norte del país y consigo las alteraciones en el estado del tiempo (Vásquez A., 2017).
- **Oscilación Madden-Julian (OMJ):** Es una oscilación intraestacional de los patrones de precipitación tropical bajo un ciclo de un periodo entre 30 a 60 días. El aumento en la temperatura del mar es la causa directa del comportamiento de precipitación entre 40°E y 120°W a través de células de convección (Trickey, M. et al., 2010)
- **El Niño - Oscilación del Sur (ENOS):** Es un fenómeno de variación interanual del campo de presión atmosférica asociado al cambio de regímenes de viento cerca de la superficie, en la región del Océano Pacífico centro-occidental (Monealegre Bocanegra, 2014). Esta circulación superficial, se manifiesta con las anomalías en el océano y la atmósfera, consiste en la interacción del enfriamiento o el calentamiento anómalo (diferente al valor promedio) del océano Pacífico tropical con la atmósfera circundante (Hoyos Rincón, 2017). ENOS altera la circulación de la celda de Walker (este a oeste) (Walker & Bliss, 1932) El fenómeno cambia irregularmente entre sus dos fases cada dos a siete años (Hanley D. et al., 2003) y por tanto, cada una de las mismas, desencadena interrupciones predecibles de la temperatura, la precipitación y los vientos. Estos cambios y/o alteraciones interceptan los movimientos de aire a gran escala en los trópicos, generando una serie de efectos secundarios globales y regionales, que son identificados gracias a los análisis de índices (<https://www.weather.gov/fwd/indices>) del fenómeno, para evidenciar la alteración en las diversas variables meteorológicas (Kousky V. E. et al., 2007).

En cuanto a las fases de ENOS, El Niño acontece y se fortalece cuando se presenta una alta presión superficial y subsidencia en el Pacífico Tropical (Región occidental), una baja presión superficial con el aumento de la convección profunda en el Pacífico Tropical (Región centro-oriental) y los vientos superficiales del este se debilitan; generando así, un aumento en la temperatura superficial del mar (TSM) y estableciendo a la fase como cálida o seca y La Niña es todo lo opuesto a El Niño, se desarrolla cuando los vientos alisios se fortalecen desde el oeste, concibiendo la disminución de la temperatura e instaurando la fase como un periodo frío y húmedo (Larkin & Harrison, 2002).

En el contexto nacional, el fenómeno en la fase húmeda se manifiesta con inundaciones, por el aumento en la precipitación, contrario a la fase cálida donde la temperatura promedio aumenta y por ende se prolonga una temporada de sequía. Ambas fases significan factores de riesgo en el país, por su intensificación (Poveda, G., 2004; Montealegre Bocanegra, 2014), (Figura 3).

Figura 3. ENSO; a la izquierda fases El Niño-La Niña y a la derecha comparación de anomalía de la altura de la superficie del mar (mm) entre octubre 5, 1997 y octubre 4, 2015.



Fuente: Derecha; <https://www.climate.gov/enso>; NOAA data Geo-polar SST o TSM, izquierda; <https://climate.nasa.gov/news/2319/el-nino-conditions-are-growing-stronger/>; NASA JPL Ocean Surface Topography from Space (2015).

- **Efecto Foehn o Föhn:** Este efecto se genera por las condiciones orográficas que sirven como obstáculo a las corrientes de aire. Las corrientes de viento chocan sobre las paredes montañosas y ascienden, haciendo que la masa de aire se enfríe de forma adiabática y, si contiene suficiente humedad o el ambiente presenta alta cantidad de humedad, el vapor de agua en el ambiente puede llegar a condensarse y formar nubosidad de desarrollo vertical. Este proceso forzado, por lo general termina en una condensación o sublimación inversa traducida en precipitaciones en el barlovento; además, durante la formación de nube, el calor latente liberado es cedido al aire que asciende y con la precipitación el aire queda más seco que al inicio del efecto. Al igual que el descenso por sotavento, donde el aire se recalienta por compresión adiabática, y al llegar al llano la temperatura aumenta en la montaña (Armenta Porras, 2013). (Figura 4).

Figura 4. Explicación gráfica del efecto Foehn.



Fuente: Fotoseimágenes, 2015.

4.2 Marco Geográfico

4.2.1 Caracterización de la zona

El embalse El Peñol–Guatapé se encuentra ubicado al oriente del departamento de Antioquia ($6^{\circ}13'20''\text{N}$ y $75^{\circ}10'11''\text{O}$), a una altura aproximada 2.000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) en toda su extensión. El proyecto hidroeléctrico limita de sur a norte con los municipios El Peñol, Guatapé y Concepción. De este a oeste con Alejandría, El Peñol y San Rafael, con variaciones de altura de 1.000 (m.s.n.m) a 2.000 (m.s.n.m) (Alcaldía de Guatapé, Antioquia, 2014; Alcaldía de El Peñol, Antioquia, 2017). Así mismo, todas las características biofísicas de la zona le conceden al embalse, poder tener una capacidad de almacenamiento de 1.071,7 millones de metros cúbicos en un área total de 6240 hectáreas (ha), con dimensiones aproximadas de 7.25 kilómetros (Km) de longitud y 5 kilómetros (Km) de ancho y un tiempo de retención hidráulica estimado de 285 días, equivalente a 2576,8 gigavatios por hora (GWh) (Figura 5) (EPM, 2017).

Figura 5. Ubicación del embalse El Peñol – Guatapé.

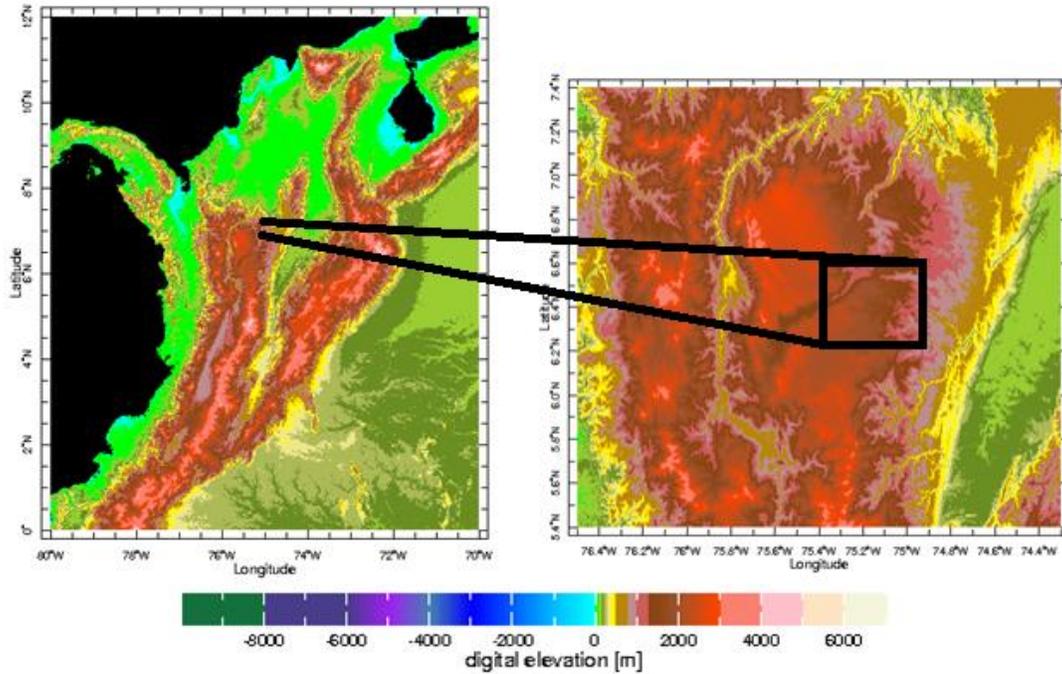


Fuente: Coordenada ($6^{\circ}13'20''\text{N}$ y $75^{\circ}10'11''\text{O}$); Adaptado de Alcaldía de Guatapé en QGIS, 2018.

4.2.2 Condiciones Físicas

- **Geología y Topografía:** La zona está situada sobre derivaciones montañosas de la Cordillera Central de los Andes; La zona hace parte de la formación geológica el batolito antioqueño, de composiciones plutónicas y roca ígnea, de la era cretácea (CORNARE, 2006). Geomorfológicamente, predominan pendientes de 12 a 35 %, con rangos máximos y mínimos de 75 y 5%, respectivamente, en alturas que van desde 900 hasta 2.100 m.s.n.m. (Figura 6), Finalmente, la superficie de erosión se extiende a lo largo y ancho del embalse, con mayor influencia entre los municipios El Peñol-Guatapé (CORNARE, 2011).

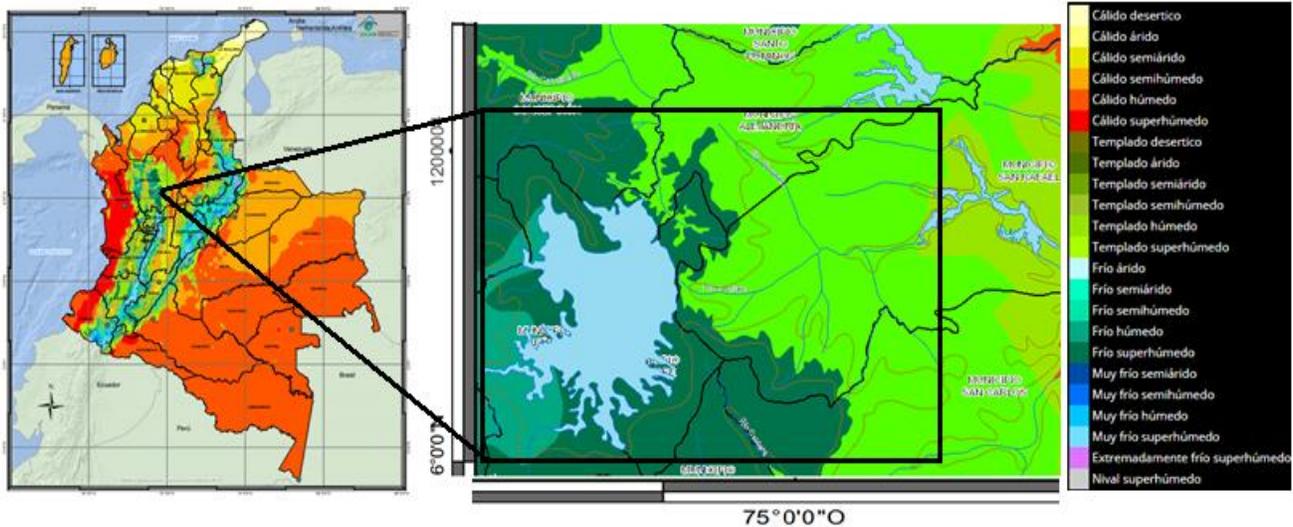
Figura 6. Topografía en el embalse El Peñol – Guatapé.



Fuente: Adaptado de Shuttle Radar Topography Mission 90m Digital Elevation (CIAT CSI SRTM) Versión 4 (SRTM, 2015).

- **Zonificación Climática:** El clima del oriente antioqueño en general es frío y húmedo. La temperatura varía entre 16 °C y 20 °C, sin embargo, estas llegan en temporada de humedad hasta 5°C y en temporada seca hasta 34°C. Adicionalmente, se presenta un régimen bimodal de precipitación (conocido como sequía de verano), con dos temporadas secas entre enero-marzo y julio-septiembre y dos temporadas de lluvias en abril-mayo y octubre-noviembre. Estas precipitaciones oscilan entre 1.000 y 4.000 milímetros (mm) por año (CORNARE, 2011). Según la clasificación climática Caldas-Lang del IDEAM, la zona del embalse El Peñol-Guatapé es clasificada de oeste a este como zona fría húmeda, fría superhúmeda y templada superhúmeda (Figura 7) (IDEAM, 2011).

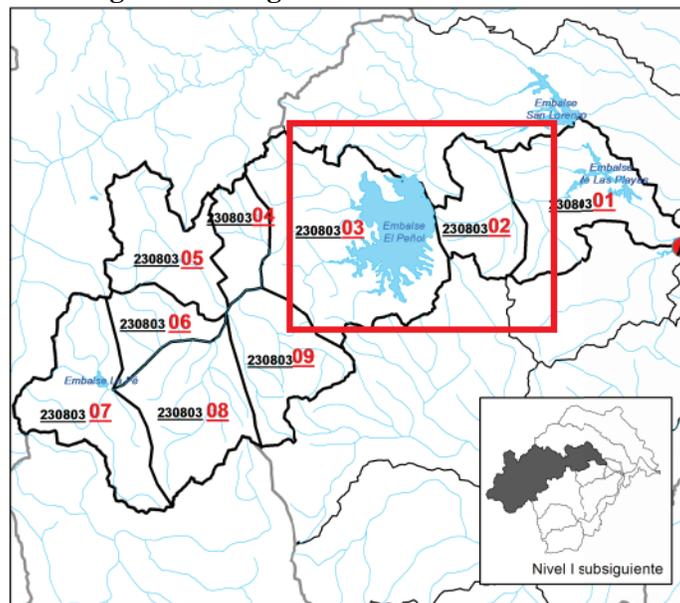
Figura 7. Clasificación Climática Caldas-Lang en el embalse El Peñol – Guatapé.



Fuente: Adaptado de Atlas Climatológico de Colombia 1981-2010, IDEAM.

- Hidrología:** La central hidroeléctrica Guatapé se encuentra entre la cuenca del río Magdalena (Oriente del embalse) y la cuenca del río Cauca (Occidente del embalse); presenta como principal tributario el río Nare y durante su curso se desvía hacia el río Guatapé, depositándose en el embalse. Adicionalmente, tributan a este, quebradas como la quebrada Magdalena, San Rafael, San Lorenzo, Cucurucho, La Culebra, Santa Marina, San Pedro, La Candelaria y la quebrada Peñolcito, lo cual representa un área tributaria con extensión de 1.210 kilómetros cuadrados (Km²), es decir recorre casi en su totalidad el oriente Antioqueño (Figura 8) (Aguirre Ramírez, Palacio Baena, & Ramírez Restrepo, 2007).

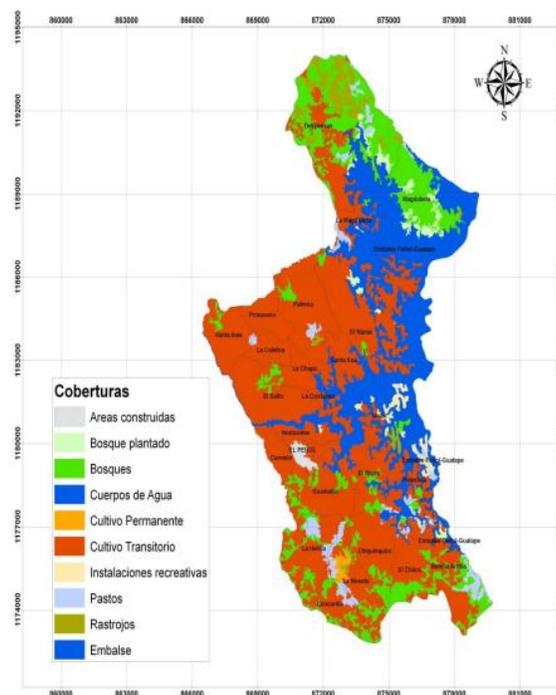
Figura 8. Codificación hidrográfica en región del embalse El Peñol – Guatapé; Escala 1:500.000.



Fuente: Adaptado de: IDEAM, 2013.

- Cobertura de suelo:** En inmediaciones del embalse El Peñol-Guatapé prevalecen las coberturas: áreas construidas, bosques plantados, bosques, cultivos transitorios y permanentes, pastos y rastrojos. Esta estratificación no está especificada por tramos, más la estimación de todo el oriente antioqueño, resulta en que la cobertura que prima es la boscosa con cerca de 319.000 hectáreas, esto al norte del embalse. Los pastos y cultivos representan 274.864 y 179.868 hectáreas, respectivamente, las cuales están distribuidas en toda la extensión del embalse y son factor común. Finalmente, las coberturas con menor área son las áreas construidas con 5.878 hectáreas y el suelo desnudo y rastrojos con 1.527 hectáreas (Figura 9) (CORNARE, 2011).

Figura 9. Cobertura del suelo en la región del embalse El Peñol – Guatapé; Escala 1:25.000.



Fuente: CORNARE, 2011.

4.2.3 Condiciones Sociodemográficas

- Indicadores de Población:** Según el DANE, para el año 2020 el departamento de Antioquia tendrá 6.845,057 habitantes en total y actualmente cuenta con 6.690,977 habitantes, lo que significa un decrecimiento de la población. Lo mismo sucede con el número de habitantes de los municipios en jurisdicción al embalse El Peñol-Guatapé, donde la mayor disminución se podría presentar en el municipio de Concepción con el decrecimiento de casi 55 habitantes por año y el de menor decrecimiento sería el municipio de El Peñol con alrededor 39 habitantes por año (Tabla 2) (DANE, 2005).

Tabla 2. Proyecciones de población en municipios limitantes al embalse El Peñol-Guatapé.

Municipio	Población 2018	Población 2020	Porcentaje de Decrecimiento (%)
San Rafael	12.819	12.704	0,89
El Peñol	15.746	15.629	0,74
Guatapé	5.097	4.993	2,04
Alejandro	3.361	3.278	2,47
Concepción	3.194	3.030	5,13

Fuente: Adaptado de: DANE, 2005.

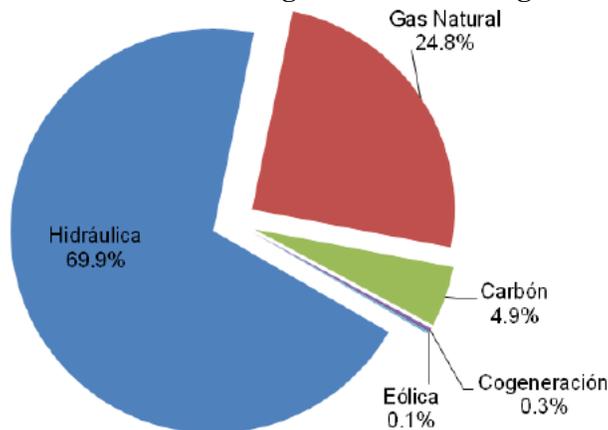
- Actividades Socioeconómicas:** Desde la apertura del embalse en la zona, el principal eje de la economía gira entorno a la generación de energía, el turismo, el comercio y la recreación, en orden prioritario. A pesar de esto, la agricultura, la piscicultura y la ganadería todavía sobresalen, pero no como en periodos previos al año 1970. Por lo tanto, los indicadores poblacionales demuestran que al transcurrir los años, la población rural migra a otras zonas que ofrezcan las condiciones laborales adecuadas en el contexto de agricultura. De manera que más del 70% de la población de los municipio próximos al área de estudio no laboran y el 30% restante están dedicados a la actividad independiente mencionada, esto con base a cifras del SISBEN (CORNARE, 2006).

4.3 Marco Histórico – Contextual

4.3.1 Sector Hidroeléctrico en Colombia

Colombia es uno de los países latinoamericanos que se caracteriza por ser generador de energía eléctrica, esta es producida principalmente mediante hidroeléctricas o también llamada energía hidráulica. El desarrollo de este tipo de generación de energía no convencional inicio en el país aproximadamente desde la década de 1970 y al pasar los años fue tomando mayor fuerza. Según la UPME, para el año 2012 Colombia generó 59.370,1 gigavatios por hora (GWh) y para el año 2020 se estiman más de 80.000 gigavatios por hora (GWh), lo cual representa un crecimiento promedio de 3,1% para los años 2012-2020 (Macías Parra & Andrade, 2013).

Figura 10. Distribución de generación de energía nacional.



Fuente: UMPE, 2013.

Por otro lado, en cuanto a cifras nacionales de generación de energía, la energía hidroeléctrica o hidráulica no es la única, pero si la más significativa en la actualidad. Este tipo de energía representa en el país el 69,9% seguido del gas natural (como fuente) con 24,8%, el carbón (como fuente) con el 4,9%, la cogeneración energética con el 0,3% y finalmente la energía eólica con el 0,1% (Figura 10). De manera que la topografía y características orográficas del territorio, condicionan el comportamiento y papel de las fuentes hídricas dentro de la construcción de proyectos promotores de energía basada en el recurso hídrico (Macías Parra & Andrade, 2013).

Tabla 3. Centrales hidroeléctricas representativas y/o principales de Colombia.

Proyecto	Ubicación	Capacidad Instalada (MW)	Área de embalse (Ha)	Inicio de operación neta
Central Hidroeléctrica San Carlos	Antioquia	1240	350	1984-1987
Hidroeléctrica Del Guavio	Cundinamarca	1200	1344	1992
Central Hidroeléctrica De Chivor	Boyacá	1000	1280	1976-1982
Central Hidroeléctrico Porce III	Antioquia	660	514	2012
Central Hidroeléctrica Guatapé	Antioquia	560	6870	1971- 1980
Central Hidroeléctrica De Betania	Huila	540	7400	1987
Complejo Hidroeléctrico Guadalupe	Antioquia	512	469	1962-1965-1966-1985
Central Hidroeléctrica La Miel I	Caldas	396	1220	2002
Central Hidroeléctrica Del Alto Anchicayá	Valle del Cauca	365	140	1955
Hidroeléctrica Urrá	Córdoba	340	7400	2000
Central Hidroeléctrica La Tasajera	Antioquia	306	1210	1993-1994
Central Hidroeléctrica Salvajina	Cauca	285	2031	1985
Central Hidroeléctrica De Jaguas	Antioquia	170	1030	1988
Central Hidroeléctrica Calima	Valle del Cauca	132	1934	1966
Central Hidroeléctrica Calderas	Antioquia	26	-	1988-2006

Fuente: Adaptado de Hernández Torres, 2011.

Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), la región con mayor capacidad instalada de generación de energía eléctrica corresponde al departamento de Antioquia, más específicamente el oriente de esta jurisdicción; teniendo este una capacidad total hidráulica de 5.585 megavatios (MW) y por tanto, catalogándose como el departamento donde se concentra el 56% este tipo de generación de energía del país (Macías Parra & Andrade, 2013).

Dentro de las cifras anteriores, se encuentran incluidas todas las centrales hidroeléctricas de Antioquia (Tabla 3).

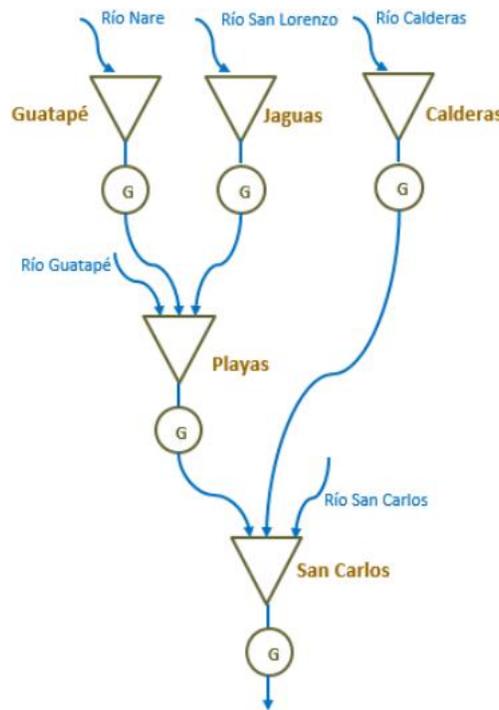
4.3.2 Central Hidroeléctrica Guatapé – Embalse El Peñol Guatapé

El embalse El Peñol-Guatapé es el espacio con mayor regulación hidráulica de las centrales de energía hidroeléctrica de Antioquia, incluso una de las mayores de Colombia, por tratarse de las proporciones de almacenamiento y amortiguación del recurso hídrico. Este proyecto desde sus inicios ha sido operado por las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y se instauró en dos etapas de desarrollo; la primera etapa del proyecto se desarrolló en el transcurso de los años 1970 y 1971, el cuál constaba de instalar una capacidad de 280 megavatios (MW) con cuatro unidades de 70 megavatios (MW) cada una. En el año 1972 se inició operación de la primera etapa y es entonces que a partir de ese momento, el oriente del departamento se convierte en un potencial energético del país, con la proyección de un

sistema complejo de hidroeléctricas, que permitieran abastecer de energía no solo a la región, sino también, a parte del país y aun poder exportar energía a países vecinos en un futuro. Todo lo anterior se fue materializando a finales de la década de 1970 e inicios de 1980, con la construcción de la segunda etapa del embalse en el año 1979, que también consto de cuatro unidades de 70 megavatios (MW) cada una, al igual que la primera etapa, para un total actual de 560 megavatios (MW). La segunda etapa inicio su operación entre 1980 y 1981 y desde allí el embalse opera de forma continua (Empresas Públicas de Medellín, 2017) (Gallego Blandón, 2016).

Adicional a ello, se construyeron cuatro centrales hidroeléctricas más, convirtiéndose el embalse El Peñol Guatapé en un espacio estratégico para la producción energética y la ingeniería hidráulica. Las centrales hidroeléctricas se constituyen en la central Guatapé, central Playas, central San Carlos, central Jaguas y central Calderas. Sus capacidades de generación de energía instaladas en cada una, son diversificadas, siendo la central Guatapé y San Carlos las mayores aportadoras al sistema energético con 560 megavatios (MW) y 1240 megavatios (MW), respectivamente (Figura 11).

Figura 11. Cadena de generación de energía (centrales hidroeléctricas) – Guatapé, Playas y San Carlos.



Fuente: Adaptado de Macías Parra & Andrade, 2013.

Finalmente, el sistema de hidroeléctricas del oriente Antioqueño cuenta con una capacidad total de generación de energía aproximada de 2.397 megavatios (MW) (puede variar dependiendo de las condiciones climáticas), lo que representa un aporte de casi un 70% de la energía del departamento y más del 25% de la energía del país (XM filial de ISA, 2015).

4.4 Marco Normativo

Dentro del trabajo de investigación es pertinente contemplar la normatividad legal vigente de Colombia, aplicable al proyecto, en relación a la dinámica del manejo adecuado de los recursos naturales, siendo el recurso hídrico uno de ellos. Esto, además es la base, junto con la identificación y análisis meteorológico y climatológico, para la toma de decisiones y fortalecimiento de criterios técnicos-legales (Tabla 4).

Tabla 4. Normatividad aplicada al proyecto.

Normatividad	Descripción
Constitución Política de 1991	Define los derechos colectivos y del ambiente, teniendo así como referente el derecho a gozar de un ambiente sano (Art. 79) y la planificación del manejo de los recursos con los fines de prevención y control de factores de deterioro ambiental (Art. 80).
Decreto – Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
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 y se dictan otras disposiciones.
Ley 164 de 1994	Por la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", en Nueva York el 9 de mayo de 1992.
Ley 143 de 1994	Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.
CONPES 3700 de 2011	Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia.
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.
Ley 1715 de 2014	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.
Decreto 298 de 2016	Por el cual se establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático en Colombia.
Resolución 0093 de 2016	Referente al Plan de Manejo Ambiental del proyecto hidroeléctrico Guatapé-Playas y todas las medidas y modificaciones del mismo desde los inicios de operación.
Resolución 1519 de 2017	Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos hidroeléctricos y se toman otras determinaciones.
Decreto 50 de 2018 / Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Uso energético)/otras disposiciones y modificaciones.

Fuente: Autor de documento, 2018.

Por lo que la normatividad actual, se destaca como la más relevante dentro del tema del marco de la investigación, sin dejar a lado la normativa más antigua, la cual es base de todas las leyes, decretos, resoluciones, acuerdos, convenios, etc., en materia ambiental del país, además de ser la carta de navegación de la ingeniería.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 Enfoque y Alcance

El proyecto de “La influencia del embalse El Peñol-Guatapé, Antioquia en los patrones climáticos y meteorológicos a escala local y regional” tiene un enfoque cuantitativo, ya que se basó en el análisis del comportamiento del clima regional por medio de información de bases de datos nacionales e internacionales, para el periodo de tiempo de 1970 a 2017. En cuanto al alcance, el estudio realizado fue de tipo exploratorio, pues no se conoce que haya sido abordado en Colombia, mientras que en países como Estados Unidos y Turquía, se han realizado estudios en los cuales se aborda la temática y además fueron la referencia y orientación del presente. Adicionalmente, es pertinente y necesario un análisis descriptivo, ya que las variables analizadas corresponden a precipitación, número de días con lluvia, temperatura y humedad relativa, principalmente; ello es la base fundamental para entender las posibles variaciones del clima regional y local.

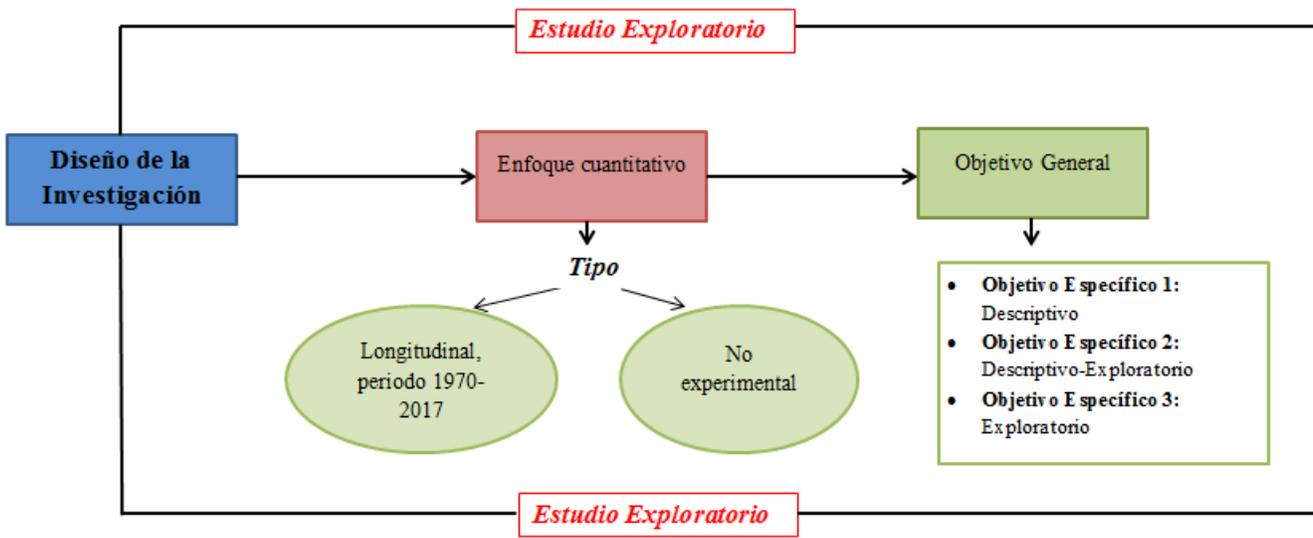
5.2 Unidad de Análisis

Se concentrará en el análisis de los posibles cambios de la dinámica climática local y regional en las proximidades del embalse El Peñol-Guatapé, por medio del entendimiento de los patrones y posibles cambios de las variables meteorológicas y climatológicas.

5.3 Diseño de la Investigación

Este estudio contempló una serie de elementos de la investigación, para que de esta manera se desarrollara y presentara de forma coherente y aceptable en la comunidad científica. En efecto, los objetivos se plantearon alineadamente, teniendo en cuenta la naturaleza de un alcance exploratorio y un enfoque cuantitativo de tipo longitudinal, por tratarse de un estudio del periodo 1970 al 2017 y adicionalmente no experimental, ya que los datos con los que se ejecutan los análisis respectivos, corresponden a bases de datos procesadas y validadas (Diagrama 1).

Diagrama 1. Diseño de la investigación.



Fuente: Autor del documento, 2018.

De manera que para dar cumplimiento a los objetivos se realizó:

- **Objetivo Específico 1:** Con fines de entender el comportamiento comparativo del clima, se seleccionaron las estaciones meteorológicas más cercanas con información disponible, para así caracterizar descriptivamente el clima local de la zona de estudio. En general, el periodo caracterizado fue del año 1973 al 2017 de las variables precipitación, número de días con lluvia, temperatura y humedad relativa. Se establecieron gráficos compuestos mensuales y representaciones multianuales de cada variable y estación, que permitieron evidenciar y analizar la tendencia y patrones de las variables meteorológicas para el periodo previo y posterior a la construcción del embalse El Peñol-Guatapé.
- **Objetivo Específico 2:** Para dar cumplimiento a este objetivo se hizo necesaria la utilización de bases de datos de modelos de clima global y regional. Para esto se descargaron series mensuales y multianuales del Reanálisis Japonés (JRA-55), para el periodo 1970-2013, a fin de recolectar datos de las variables de precipitación total, precipitación convectiva, precipitación estratiforme (no convectiva), frecuencia convectiva profunda y somera, temperatura y humedad específica. Una vez recolectada la información se procede a construir representaciones en mapas y gráficas mediante los softwares GrADS - OpenGrADS y RStudio, lo cual permitió la realización de los respectivos análisis de cada variable.
- **Objetivo Específico 3:** De acuerdo a lo desarrollado en el objetivo 1 y 2, se determinó la necesidad de ejecutar cálculos pertinentes a la razón de calentamiento convectivo, para así determinar los posibles escenarios de alteración del clima local y regional, y sus incidencias dentro del contexto ambiental, siendo la base para futuras formulaciones de iniciativas o para articular este tipo de análisis en los estudios de impacto ambiental y proyectos energéticos en general. Finalmente, se reunieron los resultados y se elaboró el informe final.

5.4 Técnicas e instrumentos de recolección, organización y sistematización de datos.

Las técnicas e instrumentos para llevar a cabo la “La influencia del embalse El Peñol-Guatapé, Antioquia en los patrones climáticos y meteorológicos a escala local y regional” se abordaron así (Tabla 5):

Tabla 5. Técnicas e instrumentos de recolección, organización y sistematización de datos.

Objetivo General	Objetivo Específico	Actividades	Técnicas	Instrumentos	Resultados esperados
Analizar el papel del embalse El Peñol-Guatapé, Antioquia en posibles cambios del clima local circundante y los patrones meteorológicos locales y regionales para el periodo de 1970-2017.	Hacer la caracterización climática de inmediaciones del embalse El Peñol-Guatapé a partir de datos de la red de estaciones meteorológicas del IDEAM.	Revisión bibliográfica	Análisis documental	Artículos científicos, informes, trabajos de grado, tesis de magister y doctorados	Gráficas de las variables precipitación, número de días con lluvia, temperatura y humedad relativa para los periodos previos y posteriores a la construcción del embalse.
		Recolección de datos necesarios	Análisis de datos meteorológicos y climatológicos	Reportes meteorológicos y bases de datos del IDEAM	
		Representación gráfica de datos	Análisis estadístico	Software estadístico (RStudio)	
		Interpretación de datos e información	Comparación teórica con los resultados	Artículos científicos, informes, trabajos de grado, tesis de magister y doctorados	
	Realizar la aproximación de variabilidad climática en regiones del embalse El Peñol-Guatapé y alrededores, con base en el análisis de bases de datos de Japanese Reanalysis (JRA-55).	Revisión bibliográfica	Análisis documental	Manuales, artículos científicos, informes, trabajos de grado, tesis de postgrados y doctorados	Mapas y gráficas representativas del comportamiento del clima en la zona de estudio a determinadas resoluciones temporales y espaciales.
		Descarga de sets de datos	Análisis de set de datos	Sistemas de bases de datos de clima global y regional (Reanálisis JRA-55)	
		Establecimiento de parámetros de entrada y salida	Análisis de set de datos	Software de acceso a datos científicos (Grads - OpenGrADS)	
		Interpretación de datos e información	Análisis de variables	Artículos científicos, informes, trabajos de grado, manuales y guías	
	Caracterizar la razón de calentamiento convectivo en la región zonal sobre el embalse El Peñol-Guatapé.	Revisión bibliográfica	Análisis documental	Artículos científicos, informes, trabajos de grado, tesis de magister y doctorados	Mapas representativos de la caracterización convectiva en la zona de estudio a determinadas resoluciones temporales y espaciales.
		Ejecución de datos	Análisis de set de datos	Software de acceso a datos científicos (Grads - OpenGADS)	

Fuente: Autor de documento, 2018.

6. DATOS Y METODOLOGÍA

6.1 Fuentes de Información

El desarrollo del análisis del proyecto de investigación, contó con dos fuentes de información. Por un lado, información meteorológica proveniente de estaciones de la zona de estudio, manejadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de otro lado, información de la base de información climática global y regional del Reanálisis Japonés (JRA-55).

6.1.1 Datos de Estaciones Meteorológicas

Para el estudio se realizó un reconocimiento e identificación de las estaciones meteorológicas operadas por el IDEAM; funcionales en el análisis del comportamiento del clima local. Se revisaron las bases de información disponible, de calidad y además con series de tiempo mayor a los 30 años, para poder evidenciar un mejor acercamiento en la variación del clima y con fin de efectuar lo que propone la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruiz, 2012).

La información fue solicitada mediante dos derechos de petición con los números de radicado: **20179050097532** y **20189050014712** en los meses de diciembre de 2017 y febrero de 2018, respectivamente (Tabla 6).

Tabla 6. Estaciones meteorológicas seleccionadas para análisis.

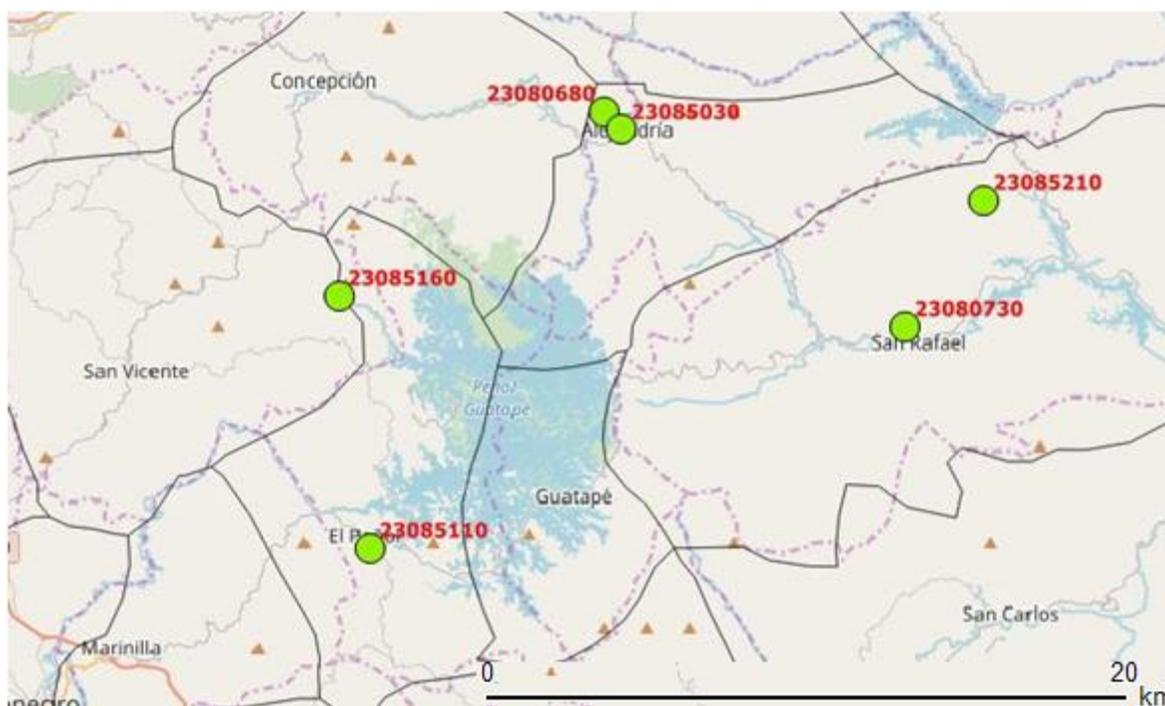
Código Estación	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Distancia mínima (Embalse-estación) (Km)
23085110	El Peñol	Peñol	6.2142	-75.2413	2.047	1,3
23085160	Corrientes	San Vicente	6.3119	-75.2535	1.965	3
23080680	Alejandria	Alejandria	6.3833	-75.1500	1.712	7,4
23085030	Alejandria	Alejandria	6.3762	-75.1433	1.700	7,4
23080730	Tejar	San Rafael	6.3000	-75.0333	1.020	12,9
23085210	Violetas Las	San Rafael	6.3488	-75.0027	1.016	17,4

Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

Las seis estaciones meteorológicas fueron selectas estratégicamente bajo las siguientes condiciones (Tabla 6):

- Estar en una ubicación circundante o próxima al embalse El Peñol-Guatapé (Figura 12).
- La fecha de inicio de toma de datos estuviera posiblemente antes de la primera mitad de la década de 1970 (Tabla 7).
- Tener información mínimo de las variables precipitación, temperatura y humedad relativa.
- Porcentaje de datos vacíos o faltantes inferior al 10% del total de datos.

Figura 12. Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas analizadas.



Fuente: Elaborado en QGIS 2.18 por Autor de documento, 2018.

Sin embargo, pese a estas condiciones, la estación “Tejar” no cumple en su totalidad con lo propuesto, pero se toma como referente asociada entre sí con la estación “Violetas”, por la similitud de características como la ubicación, altura y posibles datos complementarios. La estación “Tejar” fue la primera que comenzó operación dentro de las seleccionadas (series de datos más antigua) y una de las más antiguas en la zona, aunque solo cuenta con medición de la variable precipitación y por ende, número de días con lluvia. Por lo tanto, las variables restantes fueron relacionadas con las mediciones de la estación “Violetas” (Tabla 7).

Tabla 7. Presentación de disponibilidad de datos por estaciones meteorológicas seleccionadas.

Nombre Estación	Fecha de Instalación	Fecha de Suspensión	Disponibilidad de Datos			
			Precipitación	Número de días con lluvia	Temperatura	Humedad Relativa
El Peñol	1973	-	SI	SI	SI	SI
Corrientes	1975	-	SI	SI	SI	SI
Alejandria	1973	1988	SI	SI	SI	SI
Alejandria	1988	-	SI	SI	SI	SI
Tejar	1959	1993	SI	SI	NO	NO
Violetas Las	1982	2011	SI	SI	SI	SI

Fuente: Autor de documento, 2018.

6.1.2 Datos de bases de información Climática Global y Regional en Sistema Gaussiano de Cuadrícula

Los datos concernientes a las bases de información climática global y regional se obtuvieron del esquema sistemático de Reanálisis meteorológico; el cual consiste en la incorporación de sistemas observacionales en modelos numéricos de asimilación de datos con prolongaciones históricas. Esto es una herramienta técnica trascendental e imponente en medio de los estudios meteorológicos y climatológicos, ya que ofrece acercamientos importantes en la estimación y estado del tiempo, teniendo en cuenta que los modelos determinan un estado inicial estándar y ello puede contribuir en posibles errores o sesgos en los datos dentro de los modelos; por lo que los análisis casi nunca son considerados estados perfectos del clima, pero si aproximaciones a los sistemas dinámicos atmosféricos reales (Dee et al, 2016). Algunos de los proyectos de reanálisis más conocidos y usados en el mundo son:

- El **Reanálisis de NCEP/NCAR**, manejado por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) y Centro Nacional de la Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA)) de los Estados Unidos (Kalnay, E. et al., 1996).
- El **Reanálisis ECMWF**, a cargo de El Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)) (Balmaseda, M. A. et al., 2013).
- El **Reanálisis Japonés 55-años (JRA-55, por sus siglas en inglés)**, elaborado por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA, por sus siglas en inglés) (Kobayashi S. et al., 2015).

Este último, corresponde a la base de información de la cual se obtuvieron los datos analizados en este trabajo de investigación. El suministro de la información fue posible, gracias al permiso de acceso a información otorgado de por el sistema a los tutores del trabajo, adscritos al Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

6.1.3 Reanálisis Japonés 55-años (Japanese 55-years Reanalysis (JRA-55), por sus siglas en inglés)

El JRA-55 es un proyecto realizado entre los años 2010 y 2013 por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA, por sus siglas en inglés), en el cual mejoran sustancialmente algunos defectos que se presentaron en el proyecto previo, denominado Reanálisis Japonés 25-años (Japanese 25-years Reanalysis (JRA-25), por sus siglas en inglés). Las reformas radican en el mejoramiento del sistema gaussiano de cuadrícula (TL319L60) bajo un sistema de asimilación de datos más sofisticado frente al JRA-25 y otra serie de mejoras, principalmente en la reducción de sesgos con el fortalecimiento de fuentes de datos satelitales y observacionales, aportando así a una resolución aumentada mejorada (Ebita et al., 2011).

A razón de lo anterior, la resolución horizontal del modelo está disponible en cuadrícula gaussiana reducida de latitud-longitud regular entre 0,5625 y 1.25 grados en 320 latitudes por 640 longitudes; Una resolución espacial desde 1957-12-31 a 2018-01-01, con datos diarios, medias y variaciones

mensuales en una cobertura global (180W - 180E y 90S - 90N) y con datos bidimensionales y tridimensionales (no disponibles en campos de superficie terrestre) (JMA, 2014). JRA-55 ofrece más de 80 variables meteorológicas, climatológicas e hidroclimatológicas en niveles verticales clasificados en: 60 niveles híbridos, 21 niveles isoentrópicos, 37 posibles superficies isobáricas, nivel medio del mar, altura especificada sobre el suelo (2 y 10 metros), nivel nominal superior a la atmósfera, capa subterránea de modelo de superficie terrestre, parte inferior del modelo de superficie terrestre, la atmósfera completa y la superficie del suelo o del agua. La cantidad de niveles verticales posibles a analizar, depende de la variable especificada a evaluar (JMA, 2013). Las salidas de productos puede ser descargada en: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds628.1/#!access>, para ser procesada y analizada.

Ahora pues, para la resolución temporal del trabajo de investigación fue pertinente tomar como unidad de análisis el periodo entre el año 1970 y 2013 con datos trihorarios (cada tres horas) y la integración de datos mensuales, estacionales y multianuales., pues los datos previos a la fecha representarían una fuente de incertidumbre, debido a que no se garantiza la calidad y cantidad de los datos y además, la cantidad de los mismos en la resolución temporal seleccionada es suficiente para realizar el análisis. Adicionalmente, los datos corresponden a una resolución de cuadrícula de 0.5 x 0.5 grados latitud – longitud (aproximadamente 50 kilómetros).

Las variables utilizadas en el análisis fueron (Tabla 8):

Tabla 8. Características de la información tomada de las bases del modelo.

Fuente de Información	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Frecuencia de toma de datos	Niveles verticales	Variables de análisis
Reanálisis Japonés (JRA-55)	0.5 x 0.5 grados (latitud – longitud)	1970 - 1981 y 1982 -2013	Trihorarios integados a datos mensuales	Superficie del suelo o agua (1000 hPa ⁶)	Precipitación Total
					Precipitación Convectiva
					Precipitación Estratiforme (no convectiva)
					Frecuencia de convección profunda
					Frecuencia de convección superficial
				Nivel híbrido 9 (919 hPa ⁶ ≈ 1 km)	Razón de calentamiento convectivo
				2 metros de la superficie	Temperatura del aire
Humedad Específica					

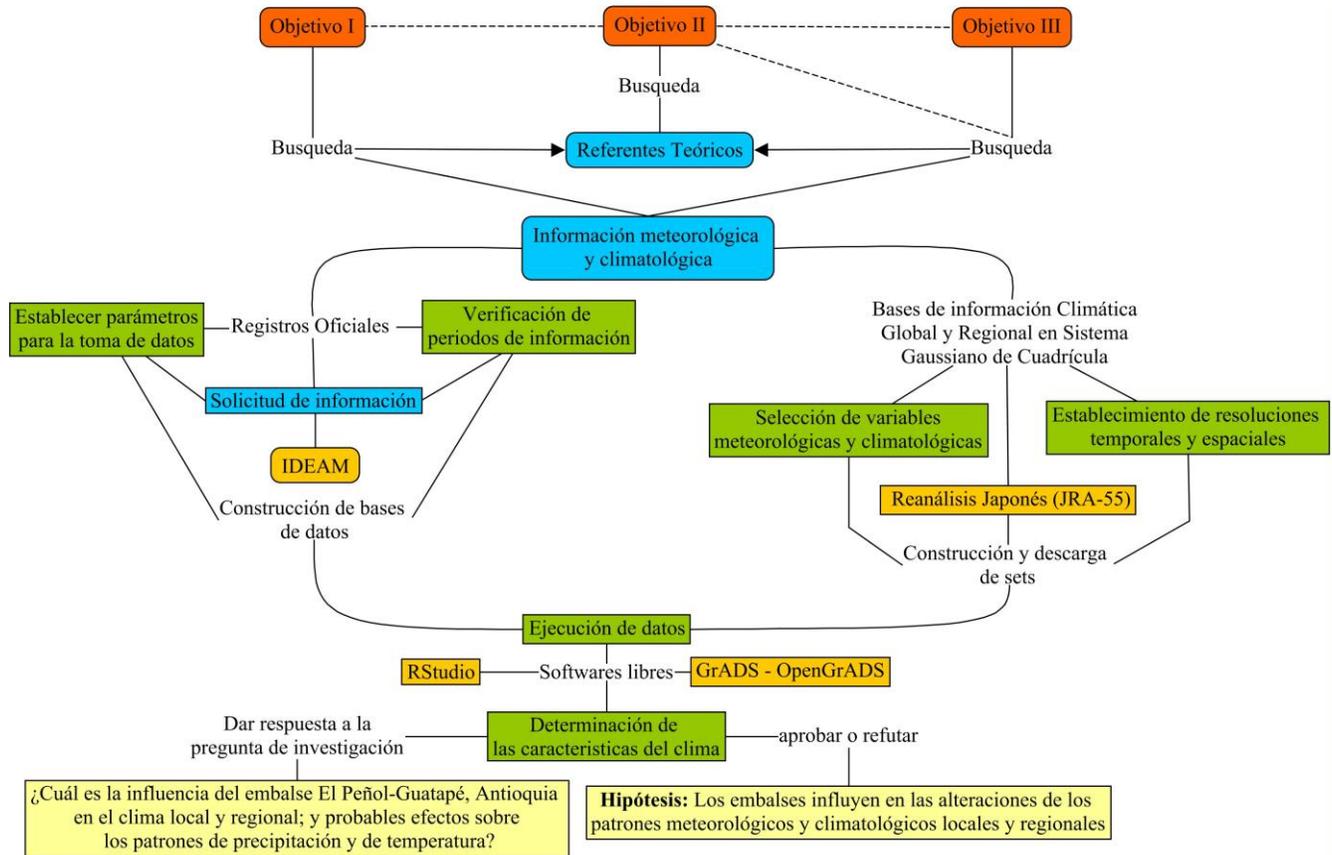
Fuente: Autor de documento, 2018.

⁶ hPa: Hectopascales, unidades de presión.

6.2 Metodología General

En el presente trabajo de investigación, realizó una metodología progresiva por objetivos como se muestra en el siguiente diagrama (Diagrama 2):

Diagrama 2. Metodología General.



Fuente: Autor del documento, 2018.

6.2.1 Construcción de bases de datos

De acuerdo a los años de finalización de cada etapa del embalse El Peñol-Guatapé, 1972 (primera etapa) y 1980 (segunda etapa), se estableció realizar un análisis comparativo entre el periodo previo y posterior a la construcción del mismo. Adicionalmente, los periodos fueron seleccionados, teniendo en cuenta la disponibilidad y calidad de datos de las dos fuentes de información referenciadas en la descripción de los datos; por lo que los periodos evaluados en las estaciones meteorológicas del IDEAM no son uniformes, debido a que las fechas de instalación y suspensión son distintas (Tabla 7), a diferencia de los datos del Reanálisis Japonés (JRA-55), los cuales se clasificaron desde el año 1970 hasta el año 2013, representados en mapas (COLA, 2017) y diagramas de caja o Boxplot (R Core Team, 2017). Luego del año 2013, los datos representan una fuente alta de incertidumbre y pueden afectar el resultado de los productos (Tabla 9).

Tabla 9. Selección de periodos previos y posteriores a la construcción del embalse, según fuente.

Fuente de Información	Nombre de Estación	Periodo Previo a la Construcción (años)	Periodo Posterior a la Construcción (años)
Reanálisis Japonés (JRA-55)		1970-1981	1982-2013
Estaciones Meteorológicas IDEAM	El Peñol	1973-1981	1982-2017
	Corrientes	1975-1981	1982-2017
	Aleandría	1973-1981	1982-2017
	Tejar	1959-1981	1982-1993
	Violetas Las	No reporta Información	1982-2011

Fuente: Autor de documento, 2018.

Para la representación y análisis de la información se utilizaron elementos básicos de la estadística descriptiva, con el fin de explicar la climatología en términos de las variables de precipitación (convectiva y estratiforme), temperatura y humedad relativa y específica. La conformación de todas las series se realizó con la aplicación de la media aritmética, soportado en la ecuación (1), para estimar los valores característicos o promedios mensuales y multianuales.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N} \quad (1)$$

Dónde:

\bar{X} = Promedio o media aritmética.

i = Año inicial de los datos.

n = Año final de los datos.

X_i = Datos mensuales o multianuales de la variable a evaluar.

N = Total de datos de cada variable.

También se realizaron diferencias de la media aritmética entre periodos, para cada variable evaluada, con el fin de evidenciar cambios positivos o negativos de un periodo a otro entre meses y temporadas seca y húmeda, mediante la ecuación (2). Esto permite la representación de los datos en mapas y gráficos (Objetivo 2 y 3).

$$\text{Diferencia} = \sum_{i=1}^N (\bar{X}_f - \bar{X}_i) \quad (2)$$

Dónde:

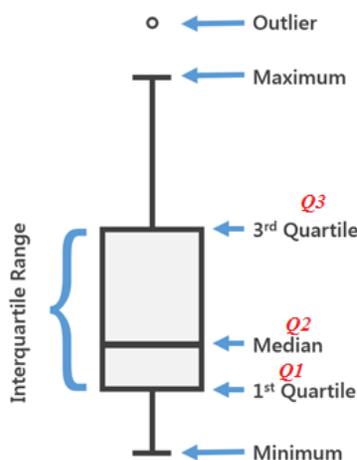
\bar{X}_f = Promedio o media aritmética del periodo posterior a la construcción del embalse.

\bar{X}_i = Promedio o media aritmética del periodo previo a la construcción del embalse.

Asimismo, la información se representa también en diagramas de caja o Boxplot, lo cual es un método estandarizado de representación gráfica semejante a la distribución normal, en el que se puede presentar la dispersión y extremo de los datos; estos se distribuyen en medidas de percentiles y cuartiles (Quiñones Olaya, 2015). Los percentiles (P) son los valores correspondientes a la división de datos en 100 partes iguales, aunque, en este estudio todos los diagramas están en un rango percentil entre 5 y 95 partes. Ahora pues, los cuartiles (Q) son una medida menor a los percentiles, cuya distribución está dada en cuatro partes iguales, por lo que estas son las equivalencias (Figura 13) (Escobar García, 2011):

- $P_{25} = Q_1$, así que en el cuartil 1 se encuentran los valores iguales o menores al 25% de los datos disponibles.
- $P_{50} = Q_2$, luego que en el cuartil 2 representa la mediana, es decir, el 50% de los datos son iguales o menores a este.
- $P_{75} = Q_3$, en efecto, el cuartil 3 son los valores iguales o menores al 75% de los datos.
- $Q_3 - Q_1$ es igual a la diferencia o distancia entre el cuartil 3 y 1 es denominado el rango intercuartil, así que el 50% central de los datos es comprendido en esta medida.

Figura 13. Medidas de distribución en un Boxplot.



Fuente: Adaptado de ArcGIS Pro, 2017.

Del mismo modo, los Boxplots exponen los valores extremos o atípicos, encontrados en el límite exterior superior e inferior como valor máximo y mínimo, respectivamente (Quiñones Olaya, 2015) (R Core Team, 2017).

Finalmente, se recurrió al uso de la metodología del patrón compuesto para la determinación de la influencia de ENOS, considerando la estación o temporada seca y húmeda sobre la región. Para ello, se tomó como periodo base desde el año 1981 al año 2010, pues es el periodo estándar de 30 años, establecido para estudios climatológicos (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruiz, 2012), además, a partir del año 1981 el embalse El Peñol-Guatapé inició su operación. Esta metodología consiste en determinar los promedios de las anomalías por periodos y estaciones del año. Para realizar este cálculo, es necesario tener la referencia de los años atípicos o anómalos en influencia de El Niño y La Niña, por tanto, se considera la información del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) en la región Niño 3.4 de la NOAA, contenidos en:

http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

La estación seca se desarrolla en los meses de diciembre, enero y febrero, y la estación húmeda entre el mes de abril y noviembre. Los años por estación fueron tomados relacionando a la estación seca con la fase de El Niño y la estación húmeda con la fase de La Niña y por ende se seleccionaron los siguientes:

Fase El Niño

- **Estación seca:** 1959, 1966, 1969, 1972, 1977, 1980, 1987, 1988, 1992, 1998, 2003, 2005 y 2010.
- **Estación húmeda:** 1958, 1965, 1972, 1982, 1987, 1997, 2002 y 2009.

Fase La Niña

- **Estación seca:** 1971, 1974, 1975, 1976, 1985, 1989, 1996, 1999 y 2000.
- **Estación húmeda:** 1964, 1971, 1973, 1974, 1975, 1988, 1998, 1999, 2000 y 2010.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el cálculo se realizó para las variables de precipitación, temperatura y humedad específica, mediante la aplicación de la ecuación (3).

$$\bar{Z} = \frac{\sum_j^n X_i}{N} - \frac{\sum_i^m W_i}{M} \quad (3)$$

Dónde:

\bar{Z} = Patrón compuesto de anomalías acumulado para cada año seleccionado por estación.

La primer parte de la ecuación es el promedio de anomalías según temporada para cada año.

j = Año inicial de los datos (Desde el año 1959 para estación seca y desde el año 1958 para estación húmeda).

n = Año final de los datos (El año 2010 para estación seca y el año 2009 para estación húmeda).

X_i = Datos estacionales de cada año seleccionado (seca con diciembre, enero y febrero, y húmeda de abril a noviembre).

N = Total de datos de cada variable (13 años para estación seca y 8 años para estación húmeda).

Esta segunda parte de la ecuación es el promedio de acumulado anual según temporada.

i = Año inicial de los datos (1981).

m = Año final de los datos (2010).

W_i = Datos estacionales de la variable a evaluar (seca con diciembre, enero y febrero, y húmeda de abril a noviembre).

M = Total de datos de cada variable (30 años).

7. RESULTADOS

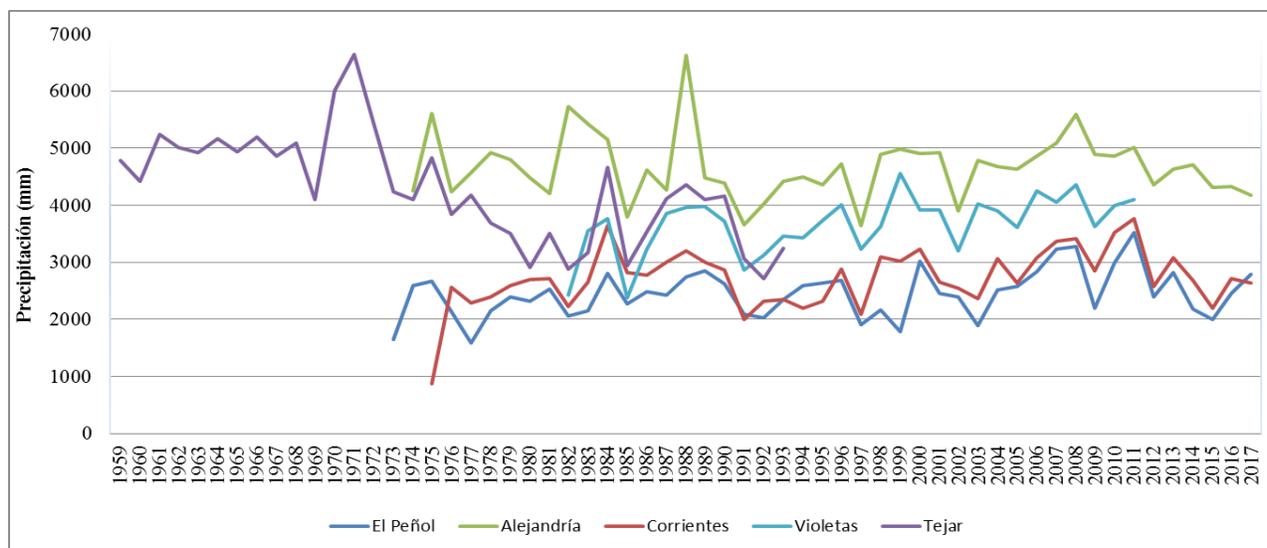
En este tipo de estudios, usualmente se consideran series muy extensas de datos de estaciones meteorológicas (1973-2017) y de bases climáticas globales y regionales (1970-2013) que abarquen los periodos previos y posteriores de la presencia del embalse (Degu et al., 2011). Por ende, es pertinente un análisis local y regional para la construcción de escenarios de impacto, utilizando modelación atmosférica de alta resolución contenida en sistemas de Reanálisis, en consideración de procesos en superficie con y sin la presencia de cuerpos de agua (Pielke Sr. et al., 2011). Este tipo de análisis requiere recursos computacionales de alto desempeño, para poder realizar las respectivas ejecuciones de los datos. De manera que los resultados se presentan en contextos local y regional, respectivamente:

7.1 Embalse El Peñol-Guatapé 1973-2017

7.1.1 Comportamiento climático histórico interanual

De acuerdo a la información de las estaciones meteorológicas del IDEAM, se caracteriza el comportamiento interanual de precipitación total, representativa de la zona de estudio; Permittedose evidenciar una distribución temporal, respecto al año y estación. En términos generales, los registros con mayor precipitación son: 6.645 (mm) en la estación Tejar para el año 1971, 6.622 (mm) en la estación Alejandría para el año 1988, 4.562 (mm) en la estación Violetas para el año 1999, 3.769 (mm) en la estación Corrientes para el año 2011 y 3.517 (mm) en la estación El Peñol para el año 2011. Ahora, los registros más bajos de precipitación son: 877 (mm) en la estación Corrientes para el año 1975, 1.586 (mm) en la estación El Peñol para el año 1977, 2.383 (mm) en la estación Violeta para el año 1985, 2.716 (mm) en la estación Tejar para el año 1992 y 3.646 (mm) en la estación Alejandría para el año 1997. Todo esto, respecto a los periodos 1959-1993 (Tejar) y 1973-2017 (Gráfica 1).

Gráfica 1. Comportamiento de precipitación total por estación meteorológica, periodo 1973-2017 y 1959-1993 estación Tejar.

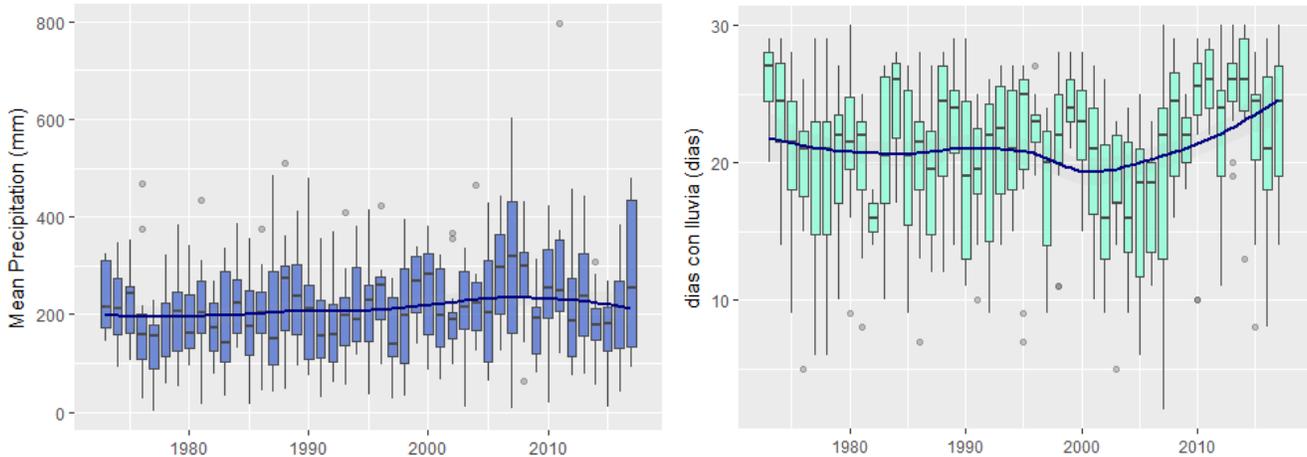


Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

Para poder constatar tendencias más detalladas, fue pertinente presentar la información de cada variable (Tabla 7) para periodos variables en cada estación meteorológica (Tabla 9).

- Estación El Peñol

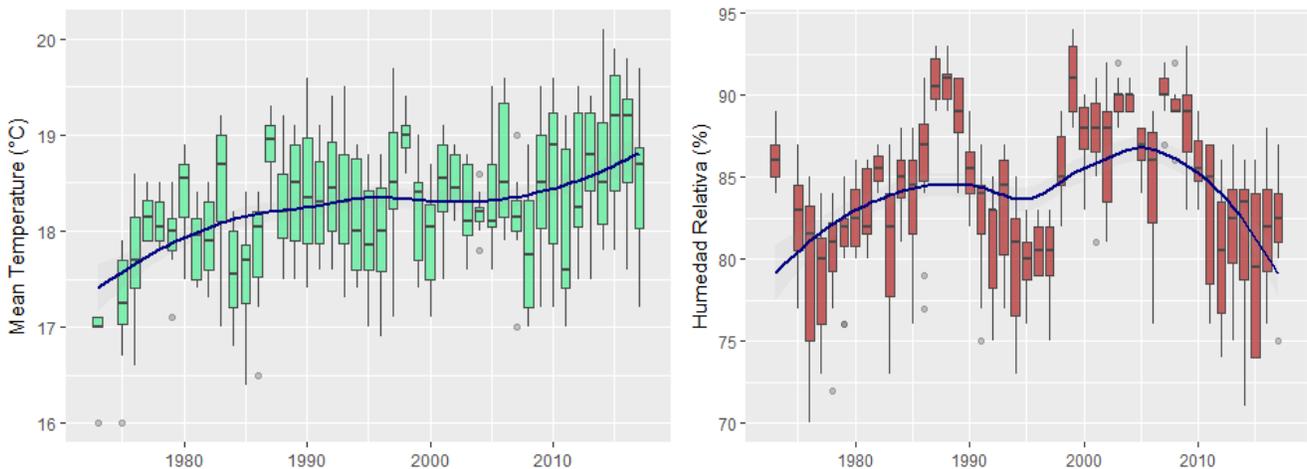
Gráfica 2. Estación El Peñol, periodo 1973-2017. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.



Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

La estación El Peñol presenta un comportamiento de precipitación media de 213 milímetros, con una tendencia de estabilidad desde el año 1973 hasta el 2017, no demostrando evidencia de cambios significativos, sin embargo, a partir del año 2000 la variable aumenta levemente, sin sobrepasar los valores medios (Gráfica 2, derecha). Respecto al número de días con lluvia, la gráfica 2, izquierda; refleja un comportamiento cuasi estable con una media de 21 días, pese a un crecimiento de casi 5 días desde el año 1995 hasta el 2017. Por lo que se infiere en este punto de embalse existe una mayor frecuencia de precipitación, más la cantidad de la misma sigue siendo estable (Gráfica 2).

Gráfica 3. Estación El Peñol, periodo 1973-2017. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.



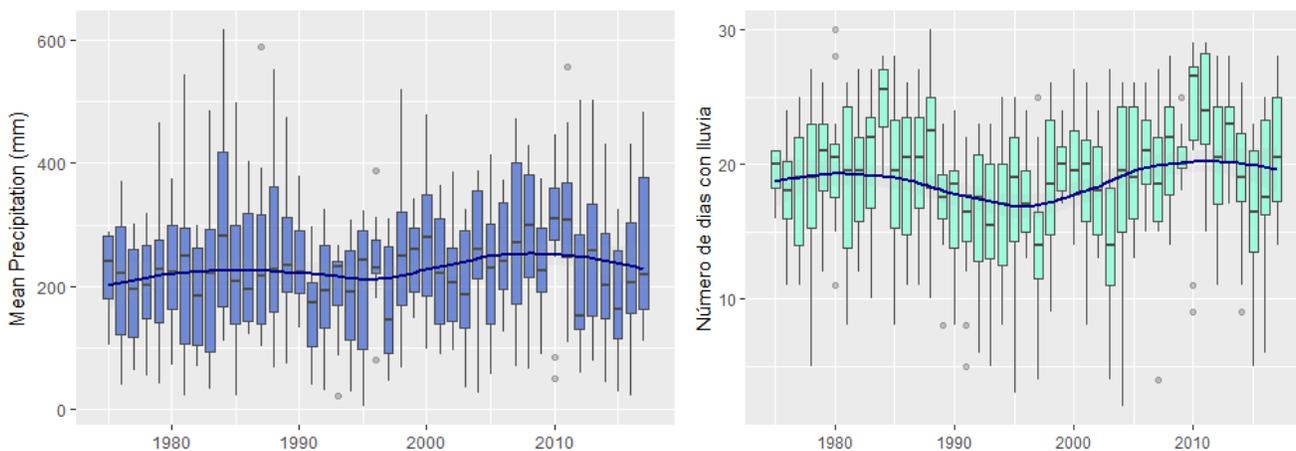
Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

La temperatura de la estación El Peñol, es la variable con más cambios significativos, cuyo crecimiento es de 1,3 °C desde el año 1973 hasta el año 2017, un valor revelador de la predominancia de parcelas

de aire caliente en el punto, favorecido aun, por la estabilidad de la variable precipitación (Gráfica 1). Contario a la humedad relativa, ya que esta muestra un crecimiento del 78% al 84% de humedad entre 1973 y 1985, seguido de una estilización con leve decrecimiento hasta el año 1996, para luego crecer hasta el 86% en el año 2005, que termina en un decrecimiento al 78% en el año 2017 (Gráfica 3).

- Estación Corrientes

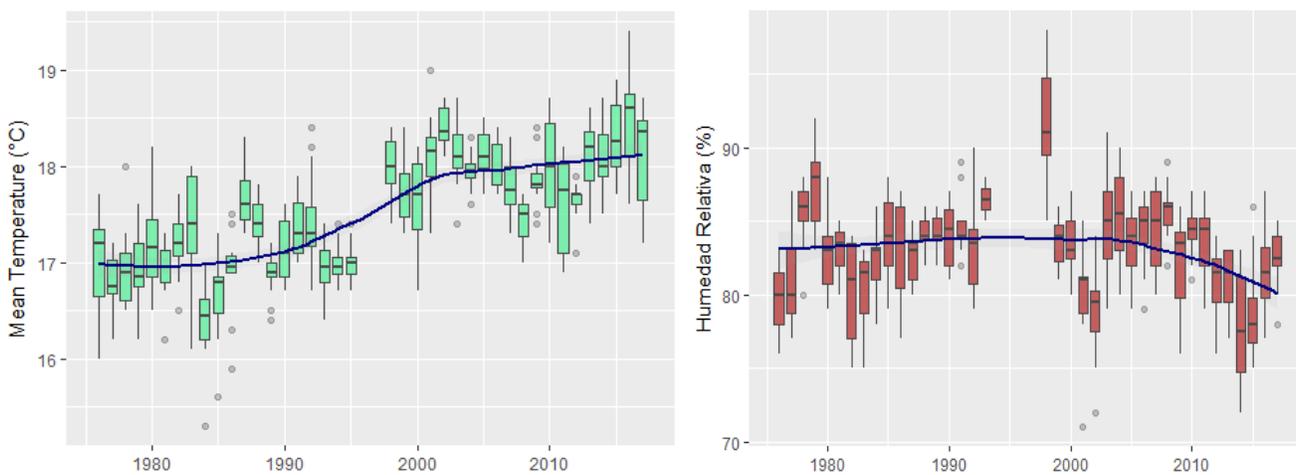
Gráfica 4. Estación Corrientes, periodo 1975-2017. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.



Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

La estación Corrientes muestra una tendencia similar en las variables de precipitación media y número de días con lluvia, pues la línea tendencial refleja en ambas, una disminución leve del año 1985 al año 2005. La precipitación media en general es de 231 milímetros y la media de número de días con lluvia es de 19 días para el periodo 1975-2017; reflejando la proporción entre cantidad y frecuencia de precipitación (Gráfica 4).

Gráfica 5. Estación Corrientes, periodo 1975-2017. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.

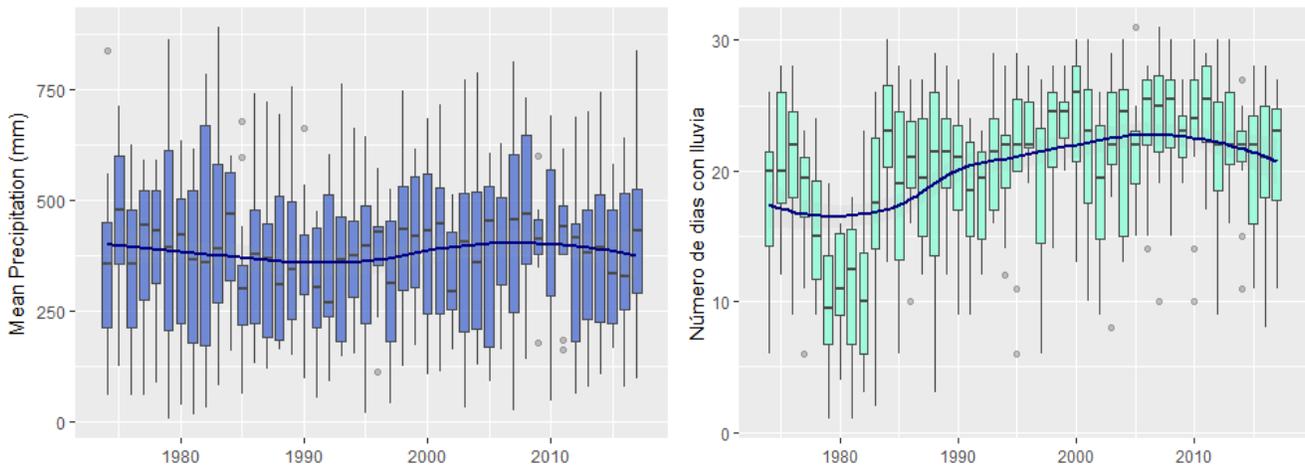


Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

En tanto la variable temperatura de esta estación, evidencia un incremento de casi 1°C, de 17°C a 18°C desde el año 1975 al 2017, con dos secciones de estabilidad entre el año 1975 a 1990 y 2001 a 2017. Presentando entonces un patrón similar al de la estación El Peñol. De otro lado, la humedad relativa comprende una evolución de estabilidad en un valor promedio de 84% desde el año 1975 hasta el año 2000, en donde decrece de este valor y se desplaza hacia una humedad relativa promedio del 80% en el año 2017 (Gráfica 5).

- **Estación Alejandría**

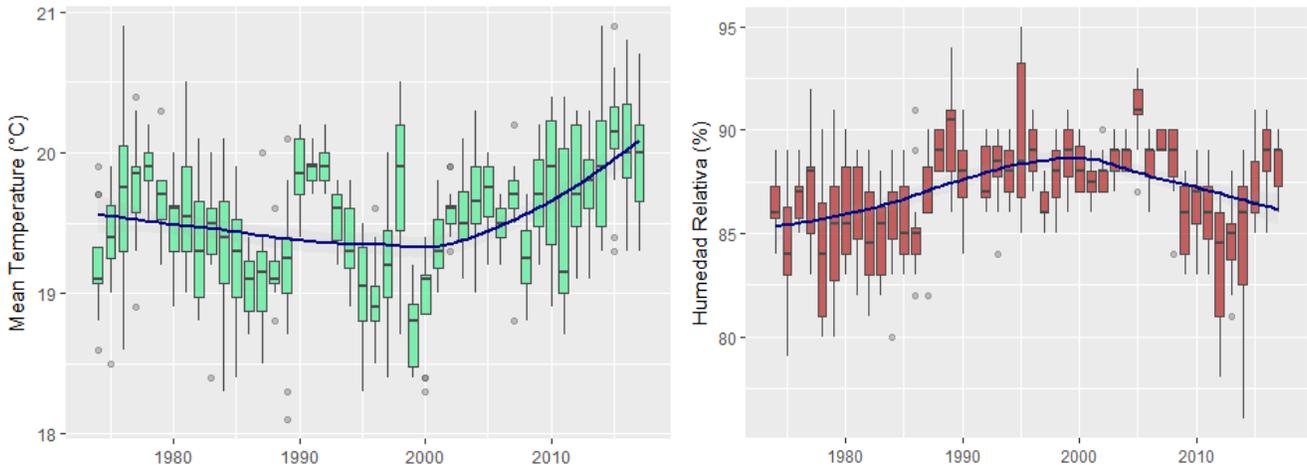
Gráfica 6. Estación Alejandría, periodo 1973-2017. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.



Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

En cuanto a la estación Alejandría, se evidencia un patrón de comportamiento de precipitación, similar al de la estación Corrientes, solo que el valor medio aumenta a 384 milímetros con tendencia leve a decrecer del año 1973 al año 1995 y a partir de este, un crecimiento ligero hasta el año 2017. No obstante, la variable de número de días con lluvia, muestra un comportamiento distinto, en el que la cantidad media de días con precipitación aumenta sutilmente del año 1973 al año 1985 y luego presenta un crecimiento que representa un valor medio de 20 días hasta el año 2017 (Gráfica 6).

Gráfica 7. Estación Alejandría, periodo 1973-2017. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.

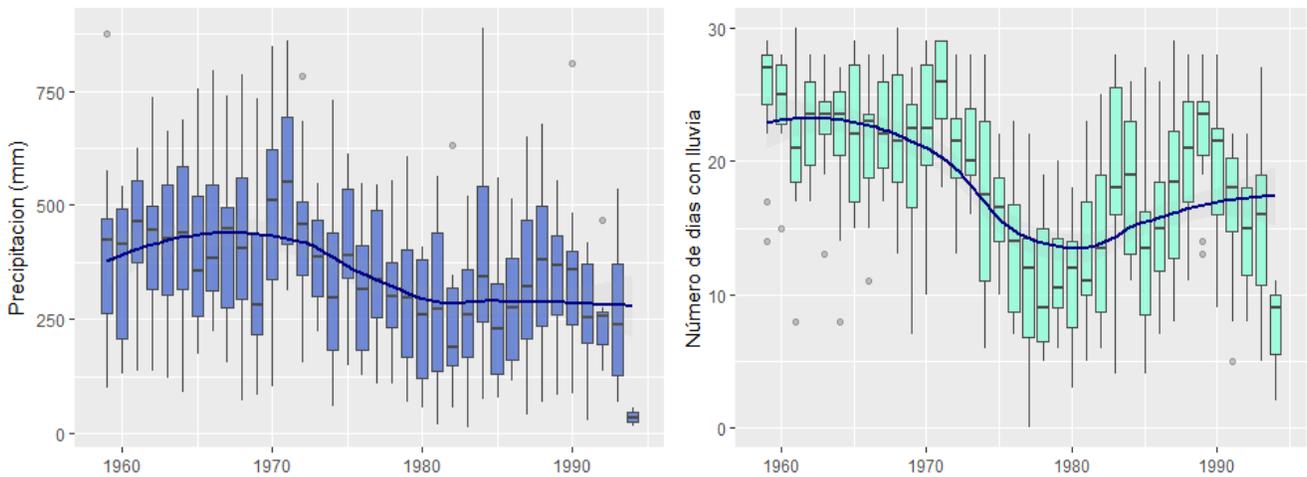


Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

La temperatura en la estación Alejandría, en contraste a las otras estaciones, muestra la disminución de temperatura de 19,6 °C a 19,4 °C del año 1973 al año 2002 y después empieza a tener un incremento sustancial de 19,4 °C a 20,1 °C hasta el año 2017, algo significativo y comparativo respecto a las otras estaciones meteorológicas y periodos evaluados. Adicionalmente, la variable humedad relativa se prolonga desde el año 1973 a 1999 de forma creciente hasta un valor medio de 88% y luego decrece a un valor de 86% en el año 2017, como en el año 1973 (Gráfica 7).

- **Estación Tejar**

Gráfica 8. Estación Tejar, periodo 1959-1993. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.



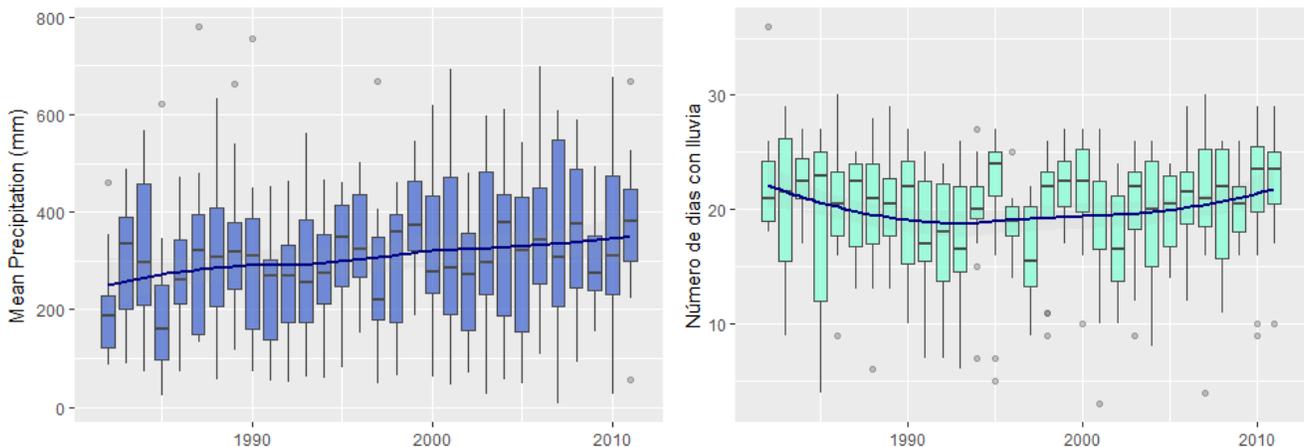
Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

La estación Tejar solo contaba con datos disponibles de las variables precipitación y número de días con lluvia para el periodo 1959-1993 (Tabla 7); en tanto que el comportamiento de esta se asocia al

comportamiento anticipado de la estación Violetas, por comprender características de ubicación y distancia similares. Por consiguiente, la precipitación media en este punto se presenta con una tendencia de crecimiento leve del año 1959 al año 1968 hasta llegar a un valor medio de 380 milímetros, luego este valor decrece hasta 260 milímetros para posteriormente entrar en una estabilización hasta el año 1993. En el caso del número de días de lluvia se despliega en una transformación similar a la de la variable precipitación, pues decrece de 23 días a 14 días entre los años 1959 y 1977, posteriormente se estabiliza hasta el año 1984, para luego crecer a un valor medio de 18 días hasta el año 1993 (Gráfica 8).

- **Estación Violetas**

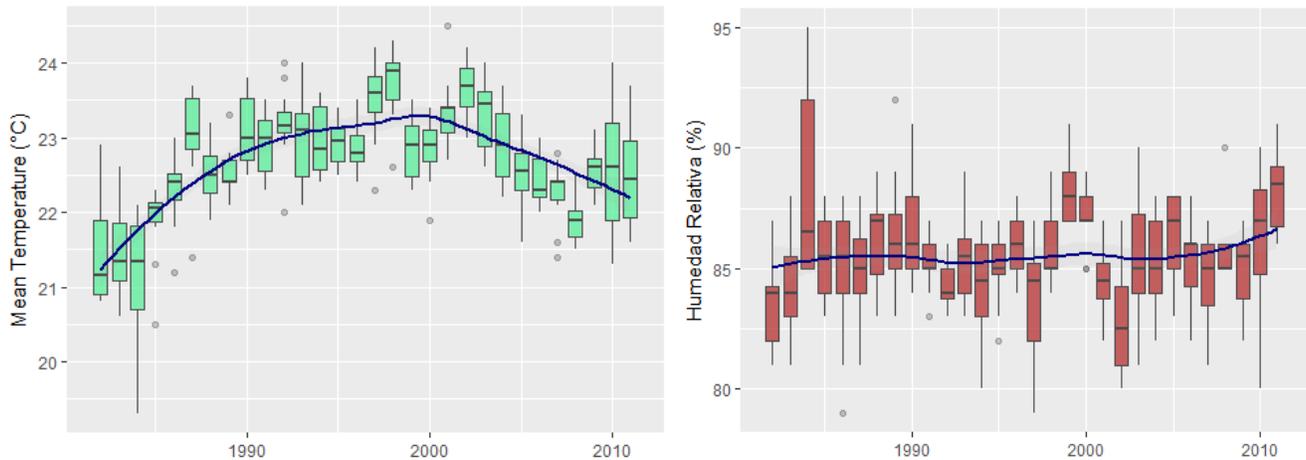
Gráfica 9. Estación Violetas, periodo 1982-2011. Izquierda, Precipitación media. Derecha, Media de días con lluvia.



Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

La estación Violetas es la única estación, dentro de las analizadas, que presenta una tendencia positiva de crecimiento paulatino de precipitación a lo largo de los años, con un valor medio de 306 milímetros, que en diferencia a la estación Tejar, existe un valor medio mayor entre los años de intercepto de datos (1982-1993) entre las estaciones. Lo mismo sucede con el número de días con lluvia, cuyo valor entre los años de intercepto es mayor 5 veces, pues la estación Violetas comprende un valor medio casi estable de 20 días con leves incrementos a 21 días para el año 2010, diferente a la estación Tejar (Gráfica 9).

Gráfica 10. Estación Violetas, periodo 1982-2011. Izquierda, Temperatura media. Derecha, Humedad relativa media.



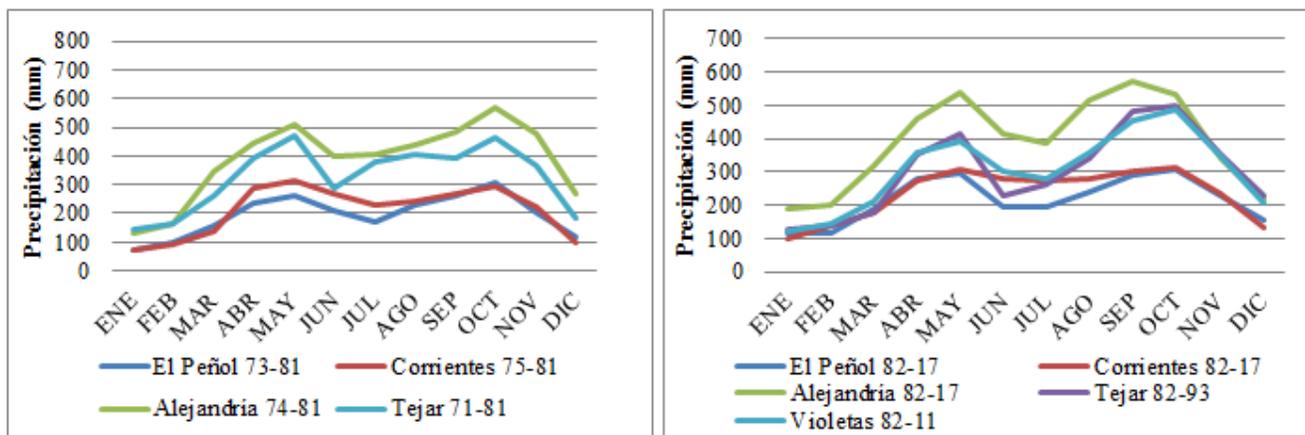
Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

Finalmente, se presentan las variables temperatura media y humedad relativa con particularidades diferentes al resto de las estaciones; debido a que la temperatura muestra un crecimiento del año 1982 al año 2000 con un valor medio de 21,2 °C a 24,3 °C y en el año 2000 este valor decrece a casi 22°C hasta el año 2011, diferente a lo que se muestra en estaciones como Alejandría, en la que a partir del año 2000 la temperatura aumenta. Esto puede estar influenciado por el aumento de precipitación, que condiciona a la presencia de corrientes más frías que cálidas hacia el este. La humedad relativa evidencia un comportamiento estable de 1982 al 2005 con un valor medio de 85% y entre los años 2005 y 2011 existe un cambio muy leve que tiende al crecimiento, condicionado de igual forma, por el aumento de precipitación (Gráfica 10).

7.1.2 Comportamiento climático histórico mensual

El régimen de precipitación en el embalse El Peñol-Guatapé y alrededores, tiene una distribución mensual entre 70 y 569 mm en el periodo de 1973 a 1982 y entre 70.6 y 572 mm en el periodo de 1982 a 2017, con variaciones en cada estación. De igual manera, se evidencia un régimen bimodal con periodos húmedos en los meses de abril–mayo y septiembre–octubre y periodos secos en los meses de diciembre–febrero y junio–agosto (Gráfica 11). Sin embargo, se observa una leve intensificación de precipitación en los periodos secos y húmedos entre 1982-2017, lo cual no representa un crecimiento significativo, por no sobrepasar los 26 mm de diferencia entre los dos periodos de años analizados, en ninguna de las estaciones (Figura 14).

Gráfica 11. Promedio histórico de precipitación mensual por estación meteorológica; Izquierda, Precipitación media mensual periodo 1973-1981. Derecha, Precipitación media mensual periodo 1981-2017.

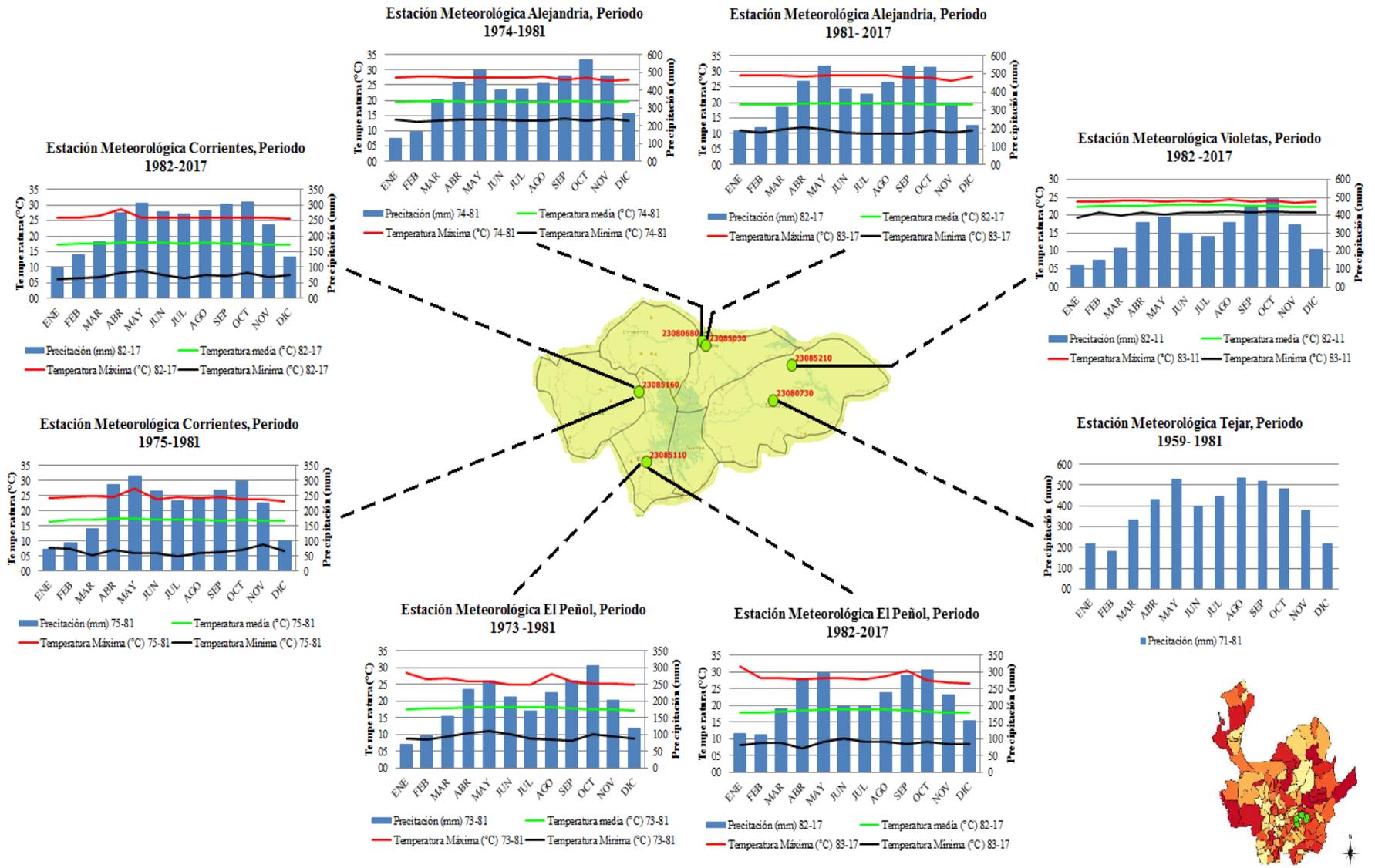


Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

Respecto al comportamiento de la temperatura, se observa que existe un patrón de crecimiento en el valor medio (Gráficas 3, 5, 7 y 10) y adicionalmente, la temperatura mínima, cada vez tiene registros más bajos y la temperatura máxima registros más altos (Figura 14), en referencia a los dos periodos de análisis. En general, esta zona de estudio presenta temperaturas altas, respecto a la altura a la cual se encuentra, pues el rangos medios superan los 17°C en alturas no inferiores a 1.700 (m.s.n.m) y casi 23°C para alturas inferiores a 1.000 (m.s.n.m). Esto ratifica el desplazamiento de una corriente cálida y seca del este al oeste, que condiciona el aumento de la temperatura (CORNARE, 2006).

De otro lado, pese a que la estación Violetas es la que se encuentra ubicada más hacia el este; esta también demuestra que allí la temperatura no ha aumentado hasta la fecha (Gráfica 10), por el contrario, ha disminuido, a diferencia de la precipitación que aumenta paulatinamente a lo largo de los años (Gráfica 9). Aunque en contraste, esta estación presenta la temperatura más alta entre todas las estaciones, solo que su temperatura, teóricamente es comparable a la altitud.

Figura 14. Climogramas de estaciones meteorológicas.



Fuente: Adaptado de información emitida por el IDEAM, 2018.

7.2 Análisis de series mensuales multianuales del modelo climático global y regional Reanálisis Japonés (JRA-55)

7.2.1 Precipitación

La precipitación es una de las principales variables meteorológicas. En Colombia, los valores de esta variable varían notablemente de norte a sur y de este a oeste, por tratarse de una región ubicada en la zona Ecuatorial en confluencia con la ZCIT, y condicionada por factores de forzamiento que favorecen el desarrollo de precipitación en toda la extensión del territorio, específicamente sobre la región Pacífica y Andina, donde se presentan los mayores regímenes de precipitación anual. Algunos de los factores que favorecen en las características climáticas del país son las variaciones de radiación solar sobre la superficie, la configuración orográfica y en general la circulación atmosférica (Ruíz Guzmán & Cadena M., 2014).

El departamento de Antioquia se encuentra sobre la región Andina y es una zona caracterizada por presentar importantes diferencias en los valores de precipitación, pues esto puede fluctuar entre 2.000 mm y 2.500 mm anuales en el Norte y 3.500 mm hasta más de 4.000 mm anuales hacia el este; algo altamente significativo y en relación directa con los vientos alisios del noreste y sureste que convergen sobre el territorio y desplazan consigo corrientes cálidas y húmedas (Pabón, Eslava, & Gómez, 2001). Adicionalmente, este departamento se ubica al este de la región pacífica, una zona con los registros de precipitación, entre los más altos del mundo, debido a la confluencia de corrientes de chorro, como el chorro del Choco, que facilita un proceso de advección de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior del país (de oeste a este), además de la interacción con el sistema montañoso, entre la cordillera occidental y central (Poveda G., 2004). Todos estos factores explican en términos generales, que la precipitación en Antioquia es generada por procesos de forzamiento orográfico, influenciados por perfiles de migración atmosférica (Poveda & Mesa, 1999; Poveda Jaramillo, 2012).

Por tanto, en función de evidenciar la variabilidad climática en términos de precipitación, se analiza la variable de forma estacional, multianual y en influencia a ENOS:

7.2.1.1 Análisis Estacional

Con base en la descripción meteorológica local de las estaciones próximas al embalse El Peñol-Guatapé, se determina que el régimen de precipitación en la zona de estudio es bimodal, es decir, sucesiones entre estaciones secas y húmedas, considerándose la estación seca entre los meses de diciembre, enero y febrero, con los registros más bajos de precipitación en el año (Figura 15). En breve, se establece la estacionalidad para los periodos 1970-1981 y 1982-2013.

Figura 15. Promedio mensual de precipitación en estación seca (diciembre, enero y febrero).

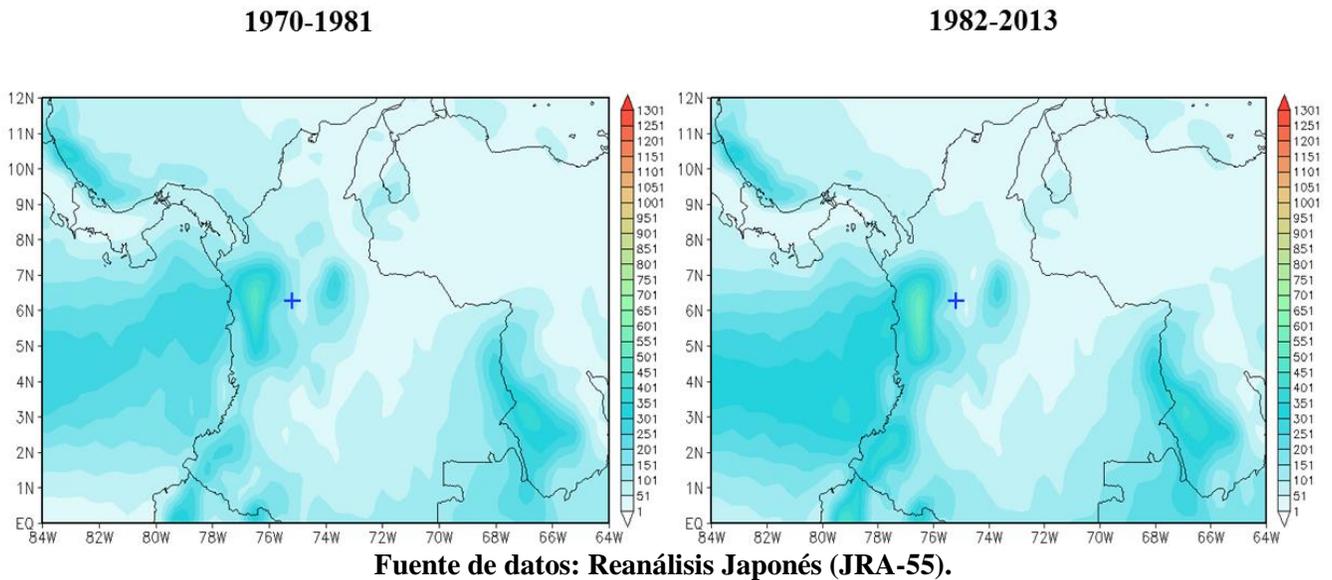
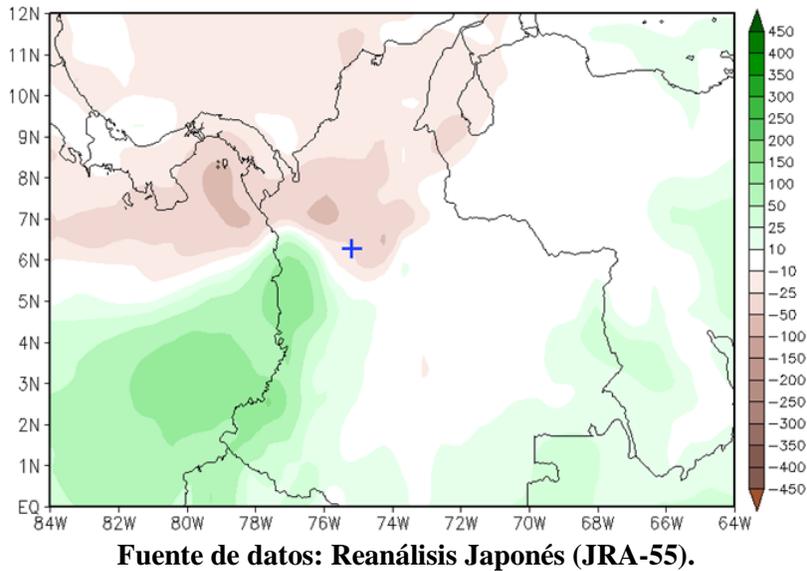


Figura 16. Diferencia del promedio mensual de precipitación en estación seca (1982-2013) - (1970-1981).



La diferencia de la estación seca para los periodos 1970-1981 y 1982-2013, refleja que los valores medios de precipitación han disminuido entre 50 y 25 mm sobre el embalse para periodo actual, es decir, una variación entre 100 y 150 mm. Sin embargo, estos valores no son alarmantes, aunque si reflejan la variación en patrones de precipitación a nivel regional (Figura 16),

Ahora, en consideración a la estación húmeda, esta se presenta usualmente entre los meses de abril y noviembre, siendo abril la transición o inicio de la temporada de lluvias, que se desarrolla completamente en el mes de mayo y retoma en el mes de agosto, casi hasta noviembre (Figura 17).

Figura 17. Promedio mensual de precipitación en estación húmeda (abril–noviembre).

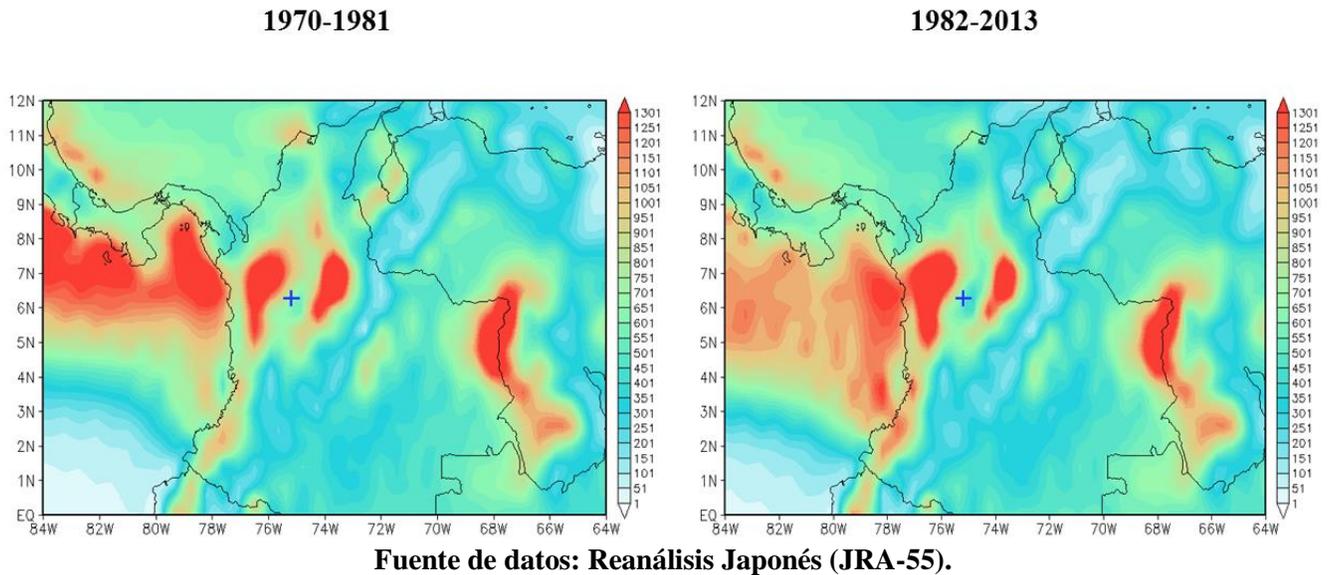
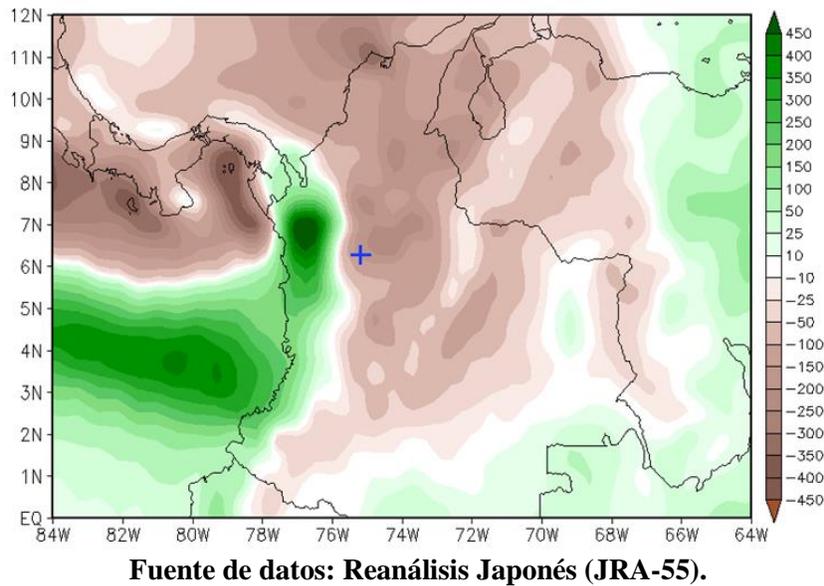


Figura 18. Diferencia del promedio mensual de precipitación en estación húmeda (1982-2013) - (1970-1981).

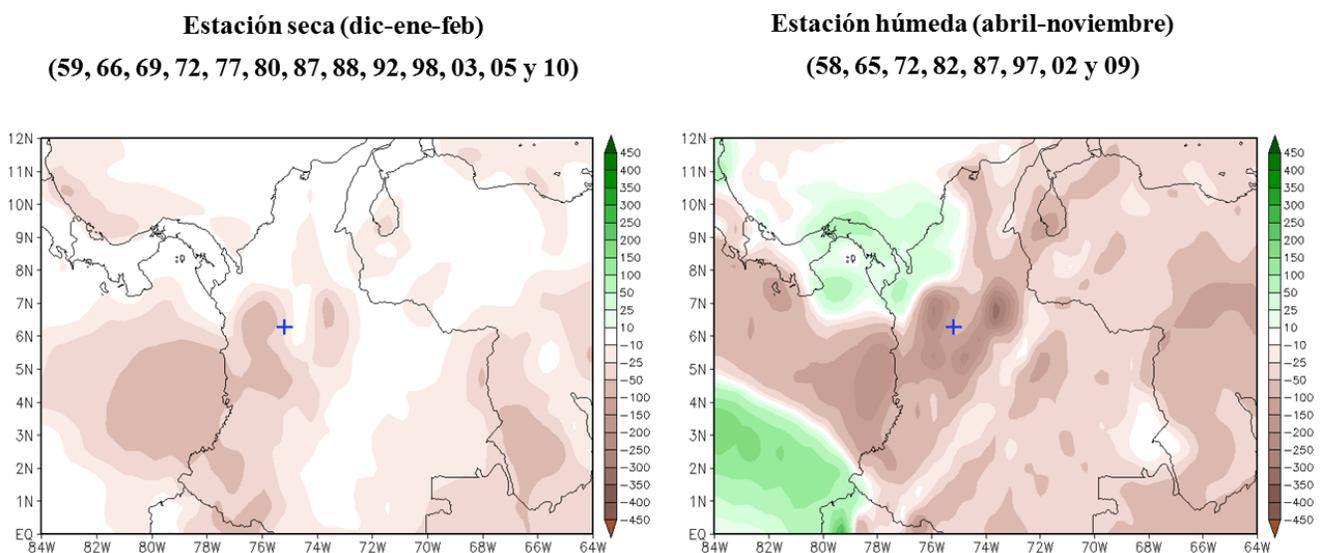


La estación húmeda en relación a la precipitación; muestra que los valores medios de precipitación han disminuido al igual que en la estación seca, entre 100 y 150 mm para el periodo más actual (Figura 18). En tanto, los datos de Reanálisis Japonés (JRA-55), muestran que la precipitación en este punto ha disminuido parcialmente, algo que es evidenciado de igual forma en la información de las estaciones del IDEAM (Sección 7.1).

7.2.1.2 Influencia de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en la Precipitación

El fenómeno ENOS es un aspecto importante para establecer las anomalías a nivel global y regional. Este fenómeno se manifiesta con la fase El Niño (periodo seco) y fase La Niña (periodo húmedo), lo cual determina una serie de implicaciones traducidas en la intensificación de estaciones secas y húmedas mayor o menor cantidad de lluvia. El patrón compuesto de la fase de El Niño en el periodo base 1981-2010, muestra que tanto en la estación húmeda, como en la estación seca, se evidencia una anomalía promedio decreciente que radica en la disminución de precipitación a causa del fenómeno. En la estación seca de esta fase, la precipitación disminuye entre 25 y 50 mm, mientras que en la estación húmeda la anomalía decrece un poco más con valores promedios entre -50 y -150 mm; una proporción similar a la que se muestra en las figuras 15 y 17 de estacionalidad (Figura 19).

Figura 19. Patrón compuesto de precipitación asociada a El Niño, periodo base (1981-2010).



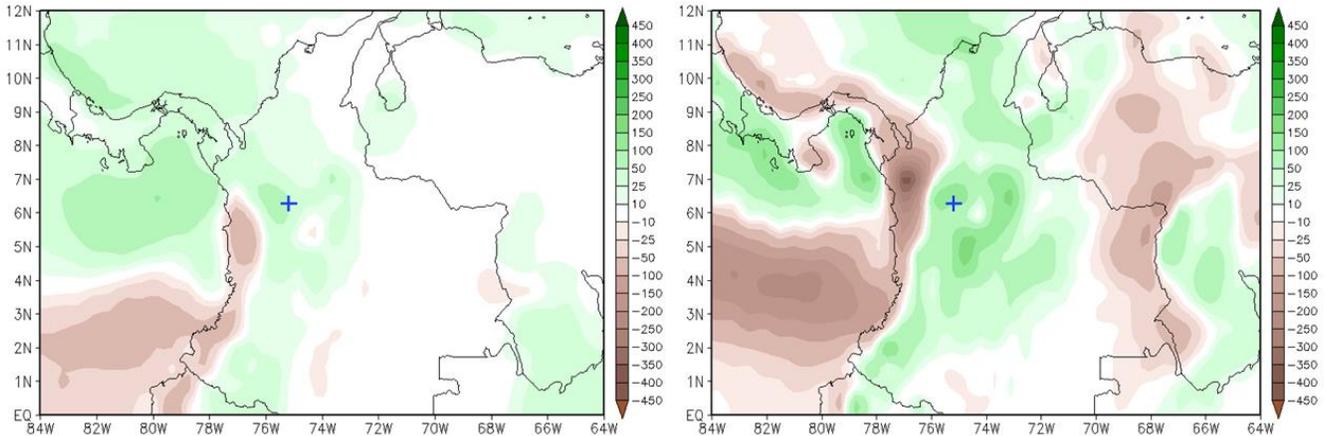
Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

De otro lado, el patrón compuesto de la fase La Niña para el mismo periodo umbral de la fase El Niño, refleja la intensificación de lluvias sobre la estación seca y húmeda, presentándose en la estación húmeda una mayor prolongación de humedad sobre toda la región, pero en esencia los rangos de anomalía se encuentran entre -25 y -50 mm para la estación seca y entre -50 y -150 mm para la estación húmeda; un patrón de precipitación, proporcional al presentado en la fase El Niño. La estación húmeda en ambas fases tiende a una intensificación menor y mayor, respectivamente (Figura 20). En tanto, la estabilización y disminución de patrones de precipitación sobre el embalse tiene influenciada leve con la fase El Niño y La Niña, por lo que el comportamiento del clima está asociado en mayor medida a condiciones de mesoescala, según la información del Reanálisis Japonés (JRA-55).

Figura 20. Patrón compuesto de precipitación asociada a La Niña, periodo base (1981-2010).

Estación seca (dic-ene-feb)
(71, 74, 75, 76, 85, 89, 96, 99 y 00)

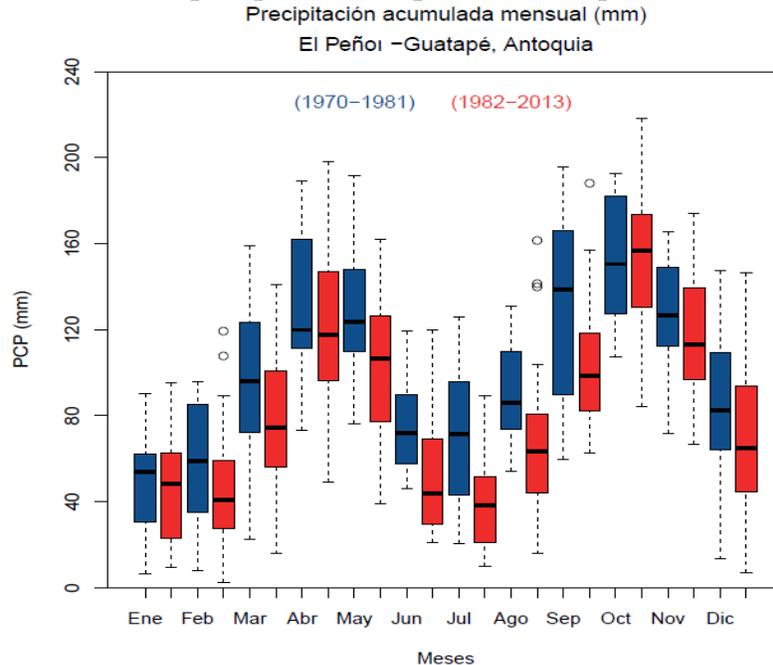
Estación húmeda (abril-noviembre)
(64, 71, 73, 74, 75, 88, 98, 99, 00 y 10)



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

En resumen, la precipitación sobre este punto en el embalse El Peñol-Guatapé (Lat. 6.288 N°, Lon. 75.188 W°), presenta una disminución de valores medios entre 1970-1981 y 1982-2013, a excepción del mes de octubre, en donde existe un aumento insignificante en el periodo 1982-2013 (Gráfica 12). Esto ratifica que el uso de datos de Reanálisis Japonés (JRA-55), son confiables, al validar la información de patrones de estabilidad y decrecimiento leve evidenciados en cada una de las estaciones (Sección 7.1).

Gráfica 12. Boxplot Promedio de precipitación comparativa entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).



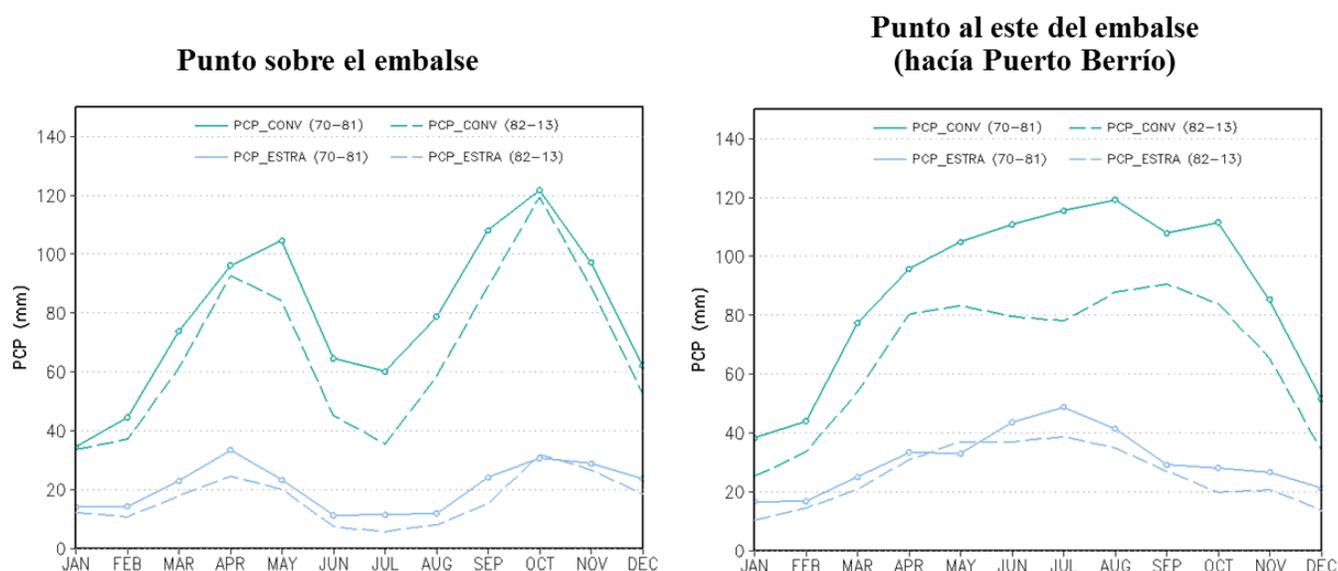
Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

7.2.1.3 Precipitación Convectiva y Estratiforme

La precipitación convectiva es un proceso asociado a mesoescala que permite determinar la actividad de convección regional en el marco de El embalse El Peñol-Guatapé. Así mismo, se analizó la precipitación estratiforme (no convectiva), la cual está asociada a procesos de gran escala o escala sinóptica; La suma de estas, representa la precipitación total (Houze, 1997).

En tanto, estas fueron determinadas en tres puntos. Un punto sobre el embalse, otro hacia el este en dirección a Puerto Berrío (aproximadamente 30 km) y finalmente un punto hacia el oeste en dirección a Medellín (aproximadamente 20 km), para los periodos 1970-1981 y 1982-2013. Los resultados evidencian una disminución en la precipitación convectiva y estratiforme para el periodo 1982-2013, respecto a 1970-1981, en los puntos hacia el este y en el punto sobre el embalse, con una mayor marcación de régimen bimodal sobre el embalse y régimen monomodal hacia el este (Gráfica 13).

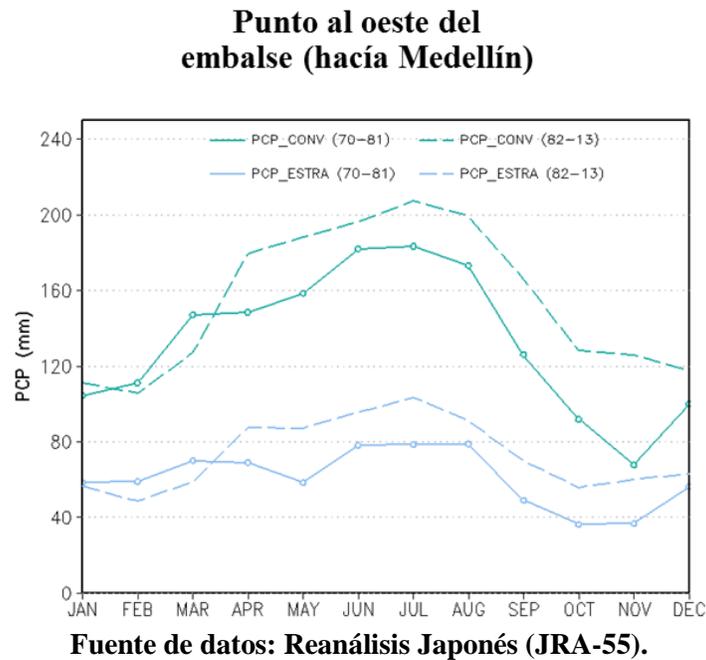
Gráfica 13. Diferencia de precipitación convectiva y estratiforme entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

En cuanto al punto hacia el oeste, mostró un patrón inverso a los otros puntos, pues en este la precipitación convectiva aumenta en el periodo de 1982-2013, respecto a 1970-1981 (Gráfica 14). Esto significa que posiblemente existe una migración de corrientes de aire caliente y húmedo, efecto del calentamiento del aire en la superficie y contribuciones de otras corrientes inducidas por forzamiento orográfico proveniente del este. Al presentarse un calentamiento del aire, este disminuye su densidad, favoreciendo el ascenso y la dilatación que permite la retención de grandes cantidades de vapor de agua en el aire, para luego condensarse y generar nubes de tipo cumulonimbus. Este tipo de nubes por lo general tienen una forma vertical y generan fuertes precipitaciones (Sarochar, Ciappesoni, & Ruiz, 2005). Esto es un factor importante que puede incurrir en el proceso de escorrentía superficial a los cuerpos hídricos circundantes sobre la región montañosa del oeste. Favoreciendo entonces los niveles del recurso hídrico en el embalse El Peñol-Guatapé y compensando la disminución parcial de precipitación (evidente en las estaciones del IDEAM), a causa de del forzamiento orográfico en el este, que lleva a que la zona del embalse presencia aumentos en la temperatura del aire.

Gráfica 14. Diferencia de precipitación convectiva y estratiforme entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).



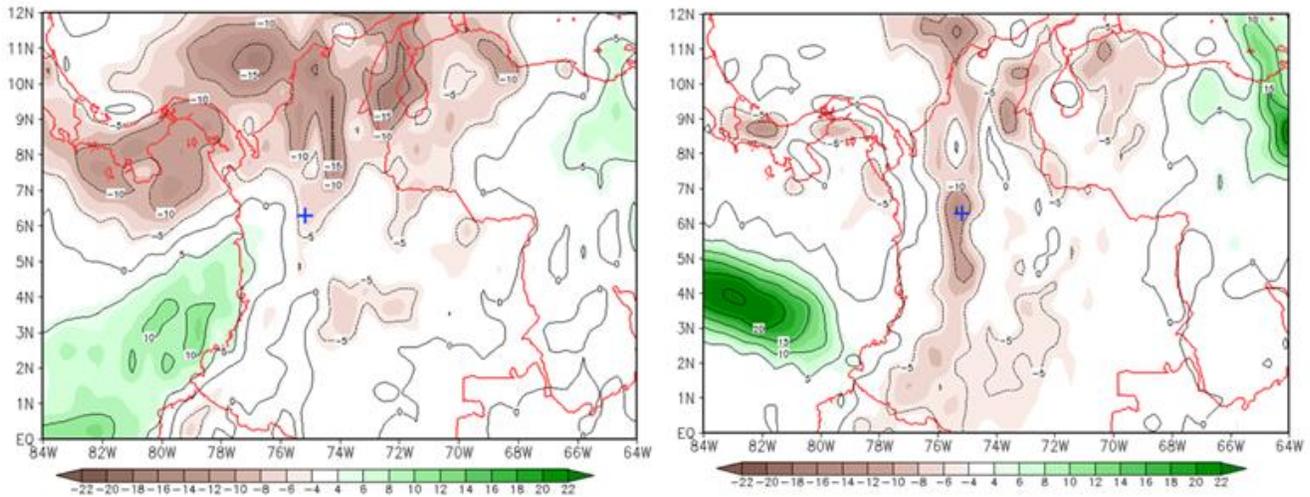
7.2.1.4 Frecuencia de Convección Profunda (%)

Al evidenciar un aumento en la precipitación convectiva hacia el oeste del embalse, se estableció necesario entender la frecuencia de los episodios de convección. Para esto fue pertinente comprender la frecuencia de convección profunda y somera.

La frecuencia de convección profunda demuestra sistemáticamente, que existe una menor activación de la convección profunda durante la época o estación seca y evidencia un déficit desde el norte de Colombia para el periodo actual (1982-2013) y este patrón se extiende aproximadamente hasta la latitud de 5 N°, en donde se encuentra la región de estudio (Figura 21, Derecha).

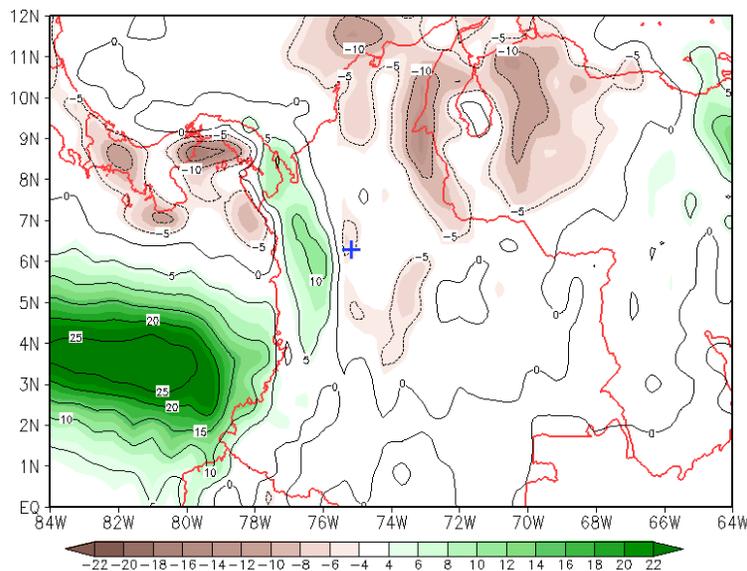
Para la segunda época o estación seca del año, el déficit toma una distribución espacial diferente, prácticamente meridional siguiendo más o menos la orografía de la región (Figura 21, Izquierda). Sin embargo, para los meses de la estación húmeda de abril, mayo, agosto, septiembre, octubre y noviembre (Figura 22), en la región oeste respecto al embalse (hacia Medellín) se activa la convección entre un 5% y 10% para el periodo actual (1982-2013); ese patrón es consistente en las diferencias de precipitación convectiva y precipitación total.

Figura 21. Frecuencia de convección profunda (%), diferencia (1981-2011) – (1970-1981). Izquierda, mes de enero. Derecha, mes de julio.



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

Figura 22. Frecuencia de convección profunda (%), diferencia (1981-2011) – (1970-1981), mes de noviembre.

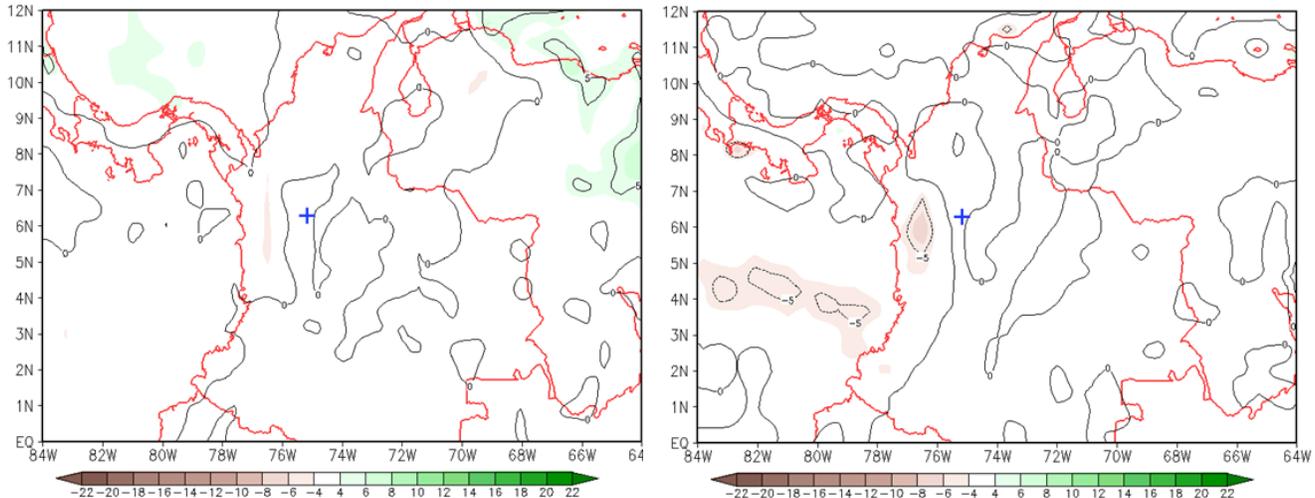


Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

7.2.1.5 Frecuencia de Convección Somera

La frecuencia de convección somera, indicador de la continuidad de convección a escala sinóptica sobre la superficie. En general no se presenta diferencias en cuanto a frecuencias de activación sobre la zona, en ninguno de los meses del año. En noviembre hacia el occidente del país se presenta un déficit de 5%, pero en sí, la convección somera no es protagonista en la zona de estudio, diferente a la convección profunda, asociada a procesos atmosféricos de mesoescala (Figura 23).

Figura 23. Frecuencia de convección somera (%), diferencia (1981-2011) – (1970-1981). Izquierda, mes de enero. Derecha, mes de noviembre.



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

7.2.2 Temperatura

La temperatura es otra de las principales variables meteorológicas, con trascendencias en fenómenos atmosféricos naturales o inducidos, así como sucede con la precipitación. Esta variable comprende un comportamiento variable a lo largo del territorio nacional, debido a su oscilación seca y húmeda durante todo el año. En Colombia la temperatura tiene una correlación importante con la altura a nivel del mar, pues teóricamente, a mayor altura menor temperatura e inversa, pero existen zonas del país en donde esta correlación no es lineal por la ubicación geográfica y configuración orográfica del mismo; y por ello es importante profundizar en los patrones de variabilidad a escalas regionales, para tener acercamientos del clima (Poveda Jaramillo, 2006).

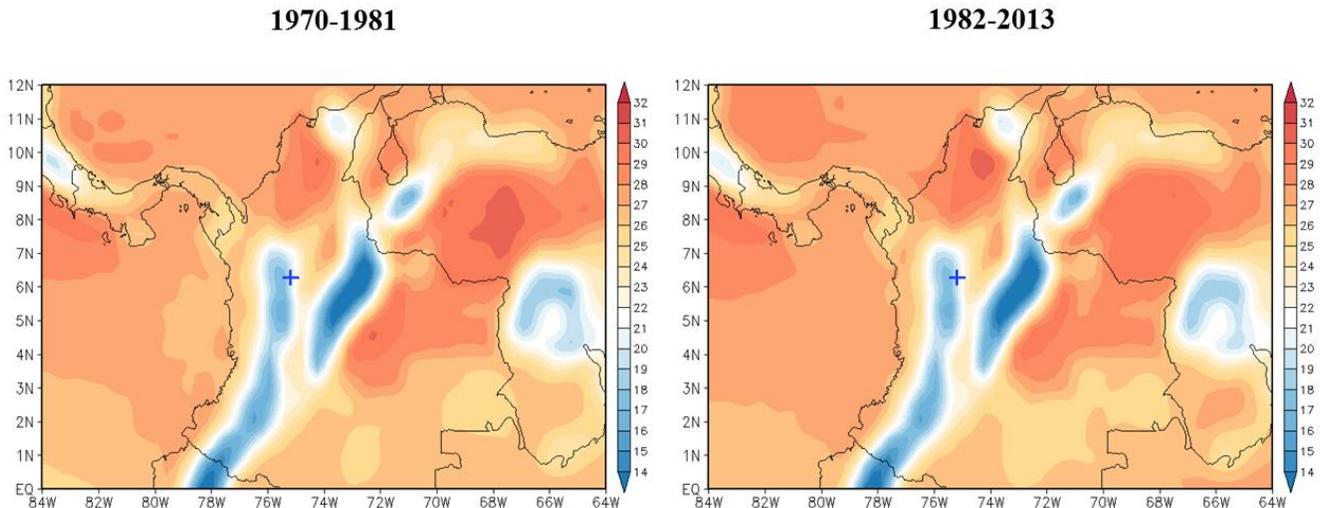
El departamento de Antioquia cuenta con un diferencial de temperatura de norte a sur y de este a oeste, que varían básicamente por su condición de estas entre la cordillera occidental y central, además de la importante cercanía a la región Pacífica, en donde los procesos de variación y circulación climática se tornan más complejos (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruiz, 2012).

Por tanto, en función de evidenciar la variabilidad climática en términos de temperatura, se analiza la variable de forma estacional, multianual y en influencia a ENOS:

7.2.2.1 Análisis Estacional

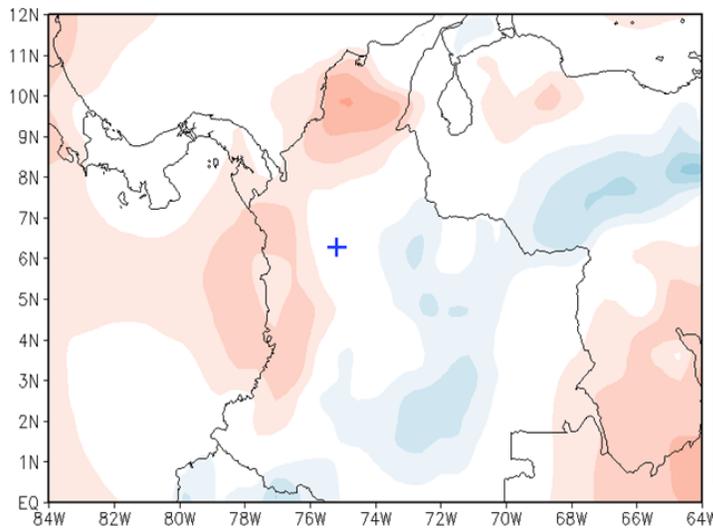
La estacionalidad es una manera de evidenciar la variación en el clima y esa es la razón de realizar estimaciones comparativas entre los años 1970-1981 y 1982-2013. Al igual que la variable precipitación, se analizó la diferencia de temperatura promedio de los periodos de análisis en la estación seca (diciembre, enero y febrero) y en la estación húmeda (abril-noviembre).

Figura 24. Promedio mensual de temperatura en estación seca (diciembre, enero y febrero).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

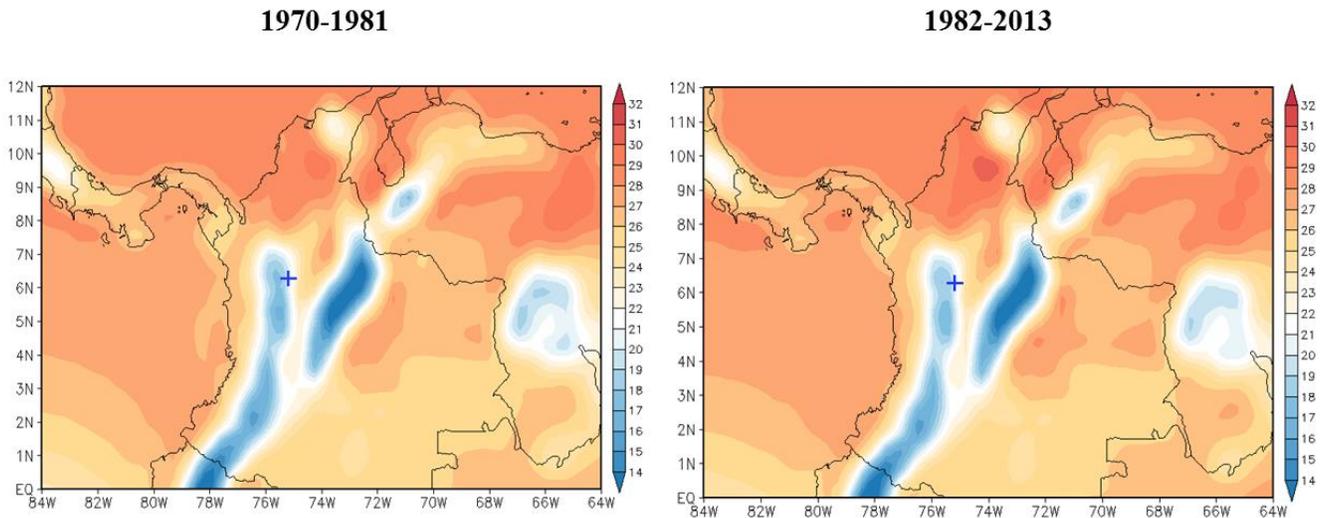
Figura 25. Diferencia del promedio mensual de temperatura en estación seca (1982-2013) - (1970-1981).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

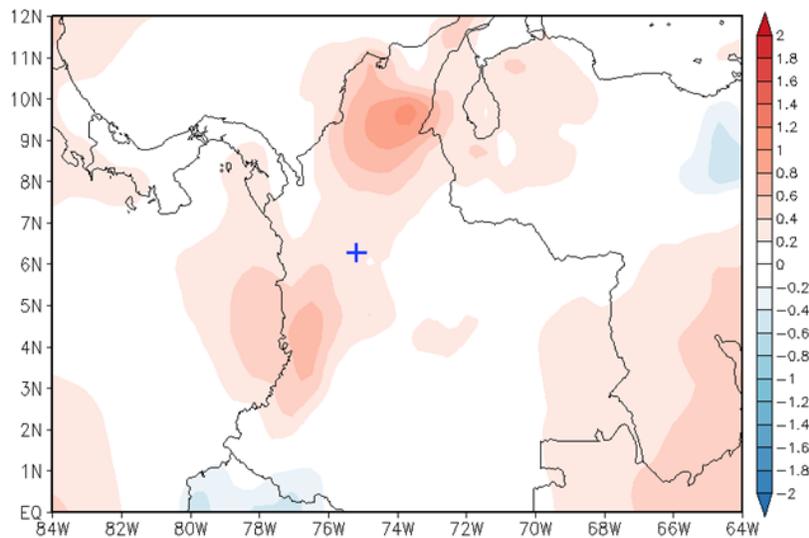
La temperatura en la estación seca, mostró aumento de variaciones entre periodos, de 0 a 0.2 °C en el punto del embalse (Lat. 6.288 N°, Lon. 75.188 W°) (Figura 24 y 25). Un valor importante para el entendimiento de los patrones de crecimiento presentados en las estaciones meteorológicas. Además, comparable en la explicación de la precipitación en la misma estacionalidad (Figura 16).

Figura 26. Promedio mensual de temperatura en estación húmeda (abril-noviembre).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

Figura 27. Diferencia del promedio mensual de temperatura en estación húmeda (1982-2013)-(1970-1981).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

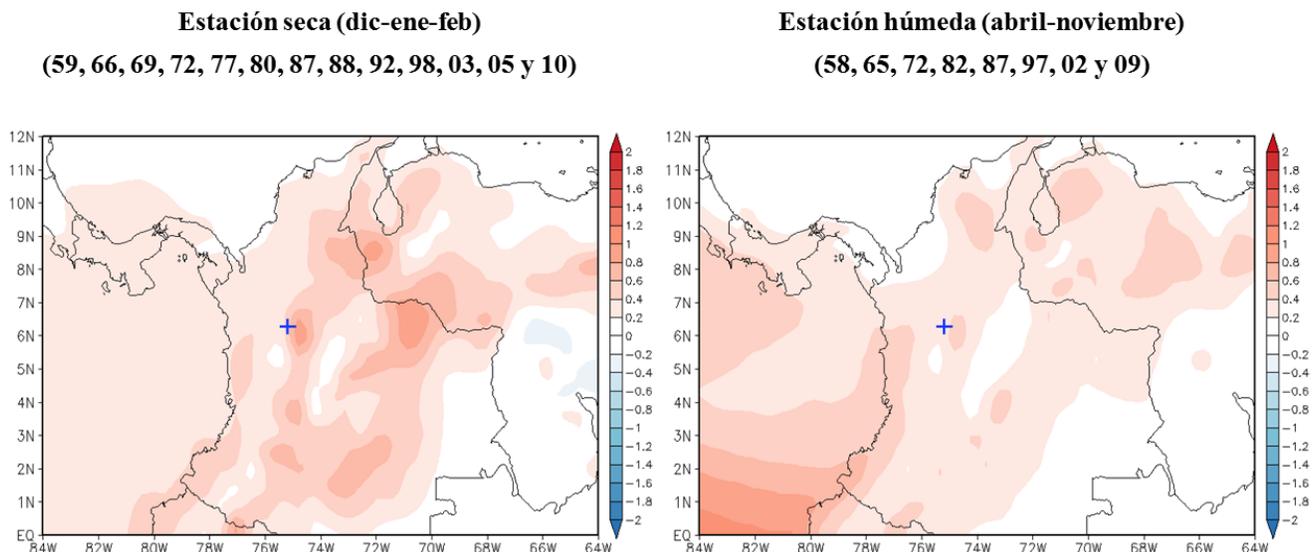
Por otro lado, en la estación húmeda la temperatura demuestra un aumento mayor al de la estación seca (Figura 27), cuya variación es dada entre 0,2 y 0,4 °C, es decir 0,2 °C de diferencia entre una estación y otra. Este incremento de temperatura en temporada de lluvia es un factor explicativo en la formación de precipitación convectiva (Gráfica 14), asociado a las mismas corrientes de chorro y comportamiento de vientos inducidos en la convergencia de la ZCIT.

7.2.2.2 Influencia de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en la temperatura

La influencia de ENOS en la temperatura, al igual que en la variable precipitación, se analizó en un patrón compuesto de El Niño y otro de La Niña en un periodo umbral de 1981 a 2013.

El patrón compuesto de la fase El Niño refleja que la anomalía de temperatura promedio en la estación seca, aumenta entre 0,4 y 0,6 °C y se prolonga hacia el este de la región; diferente a la estación, donde la variación es entre 0,2 y 0,4 °C (Figura 28); esto indica que la temperatura en influencia a El Niño, es comparable la precipitación en la misma fase, pues si existen menores anomalías promedio de precipitación, las anomalías en temperatura son mayores, e inversa como lo indican las figuras 19 y 27 en la estacionalidad seca y húmeda (Figura 28).

Figura 28. Patrón compuesto de temperatura asociada a El Niño, periodo base (1981-2010).



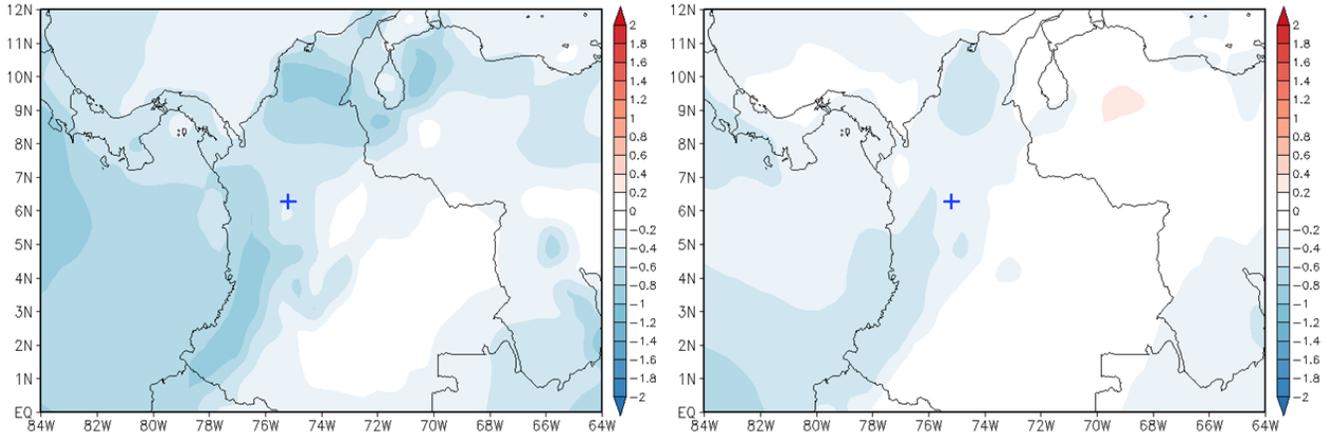
Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

Por otra parte, el patrón compuesto asociado a la fase La Niña en términos de temperatura, evidencia la disminución de la variable en ambas estaciones, seca y húmeda, con la presencia de anomalías negativas entre -0,4 y -0,6 °C para la estación seca y entre -0,2 y 0,4 °C en la estación húmeda. Esto es un comportamiento que ha de esperarse, al presentarse la intensificación de precipitación en la misma fase. Sin embargo, en la estación seca la temperatura es menor a la temperatura en la estación húmeda; una anomalía que se explica al aumentar la precipitación en la fase La Niña (Figura 29).

Figura 29. Patrón compuesto de temperatura asociada a La Niña, periodo base (1981-2010).

Estación seca (dic-ene-feb)
(71, 74, 75, 76, 85, 89, 96, 99 y 00)

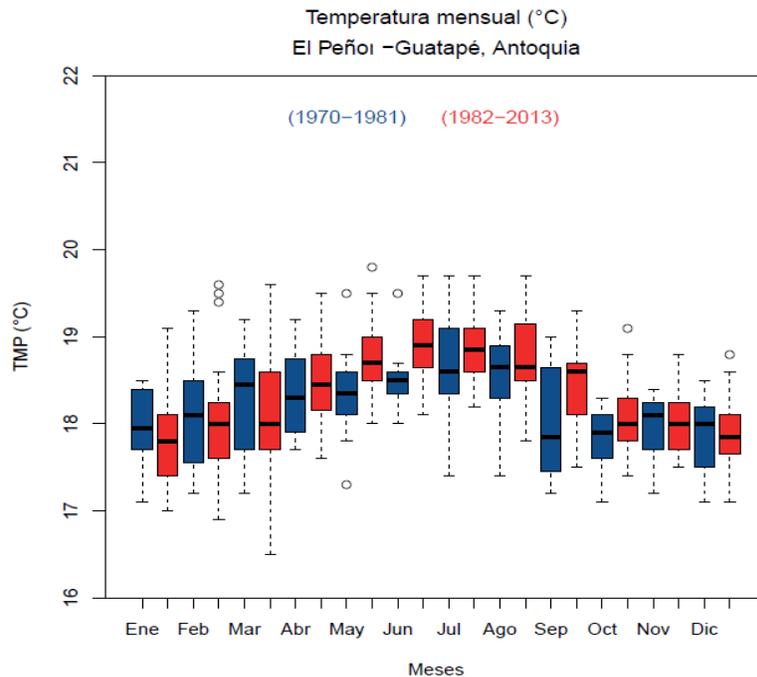
Estación húmeda (abril-noviembre)
(64, 71, 73, 74, 75, 88, 98, 99, 00 y 10)



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

La diferencia promedio de temperatura en el aire, constata un aumento en el periodo 1982-2013, respecto a 1970-1981, que se refleja en los resultados estacionales e interanuales, mostrados con anterioridad. Los meses donde se presenta la intensificación son de abril hasta octubre, confirmando el incremento de temperatura, presentado en las estaciones meteorológicas del IDEAM (Gráfico 15) y también el diferencial de precipitación convectiva y estratiforme (Gráfica 13 y 14).

Gráfica 15. Boxplot Promedio de temperatura comparativa entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).



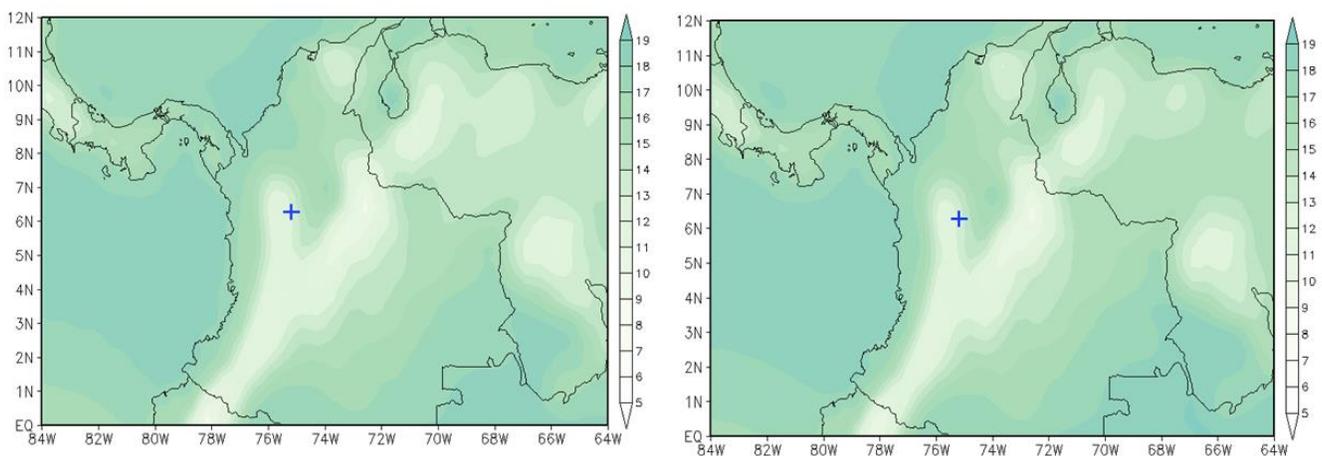
Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

7.2.3 Humedad Específica

7.2.3.1 Análisis Estacional

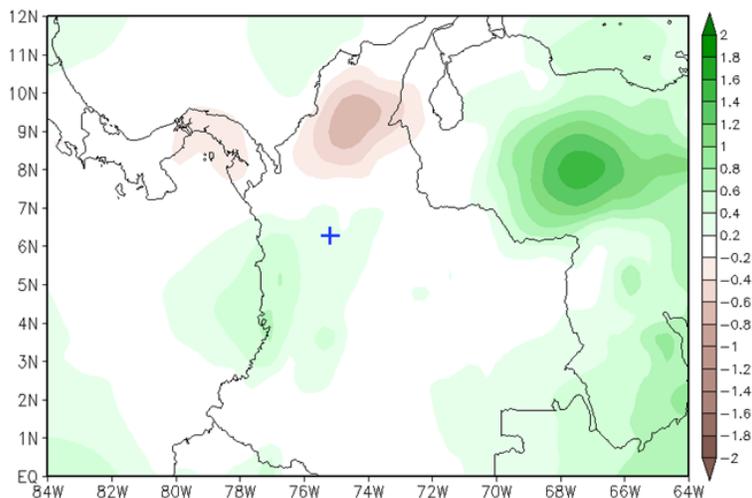
Al igual que la variable precipitación y temperatura, se analizó la estacionalidad en la variable de humedad específica en la estación seca y húmeda para los periodos 1970-1981 y 1982-2013. La humedad específica es una variable de disidencia directa de la cantidad de vapor de agua en masa en relación a la masa de aire húmedo (g/kg). La zona de estudio comprende una humedad en el aire significativamente alta y ello es un factor relacionado a la estancia del embalse, el cual proporciona y contribuye al transporte de humedad. Ello puede ser cuantificado de forma explícita mediante la relación entre las variables humedad y evaporación, pero por la insuficiencia de datos en evaporación no fue posible establecer ese valor. Sin embargo, la cualificación es explicada en las diferencias de temperatura que calientan el espectro del embalse y generan el transporte de humedad embalse-atmósfera que converge con las corrientes de chorro, implicadas en la zona. La humedad específica sobre el embalse (Lat. 6.288 N°, Lon. 75.188 W°) es de aproximadamente 13 (g/kg), expresado en humedad relativa, superior al 80% (Figura 30).

Figura 30. Promedio mensual de humedad específica en estación seca (diciembre, enero y febrero).
1970-1981 1982-2013



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

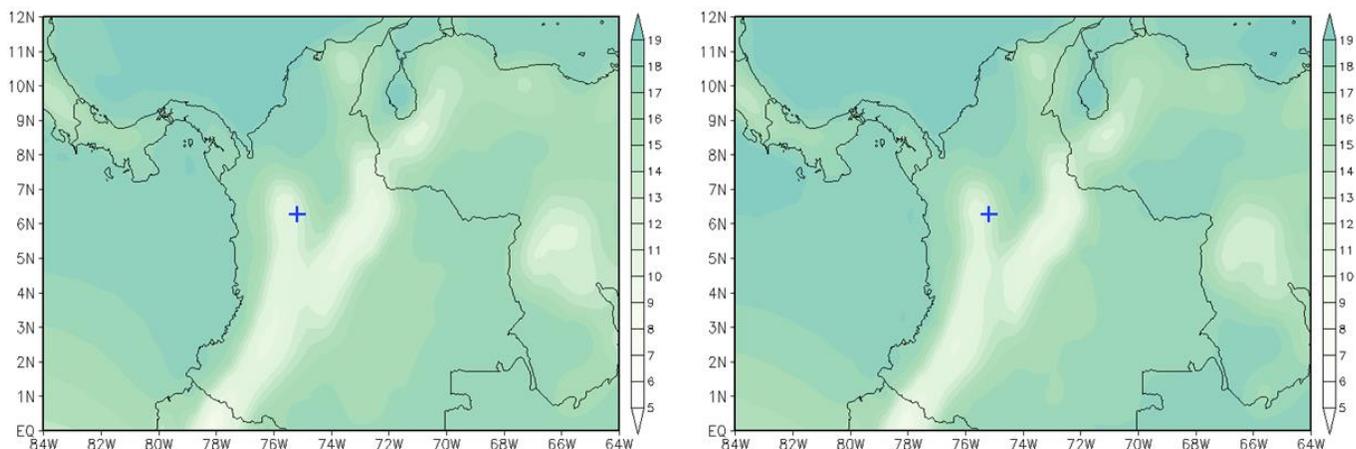
Figura 31. Diferencia del promedio mensual de humedad específica en estación seca (1982-2013) - (1970-1981).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

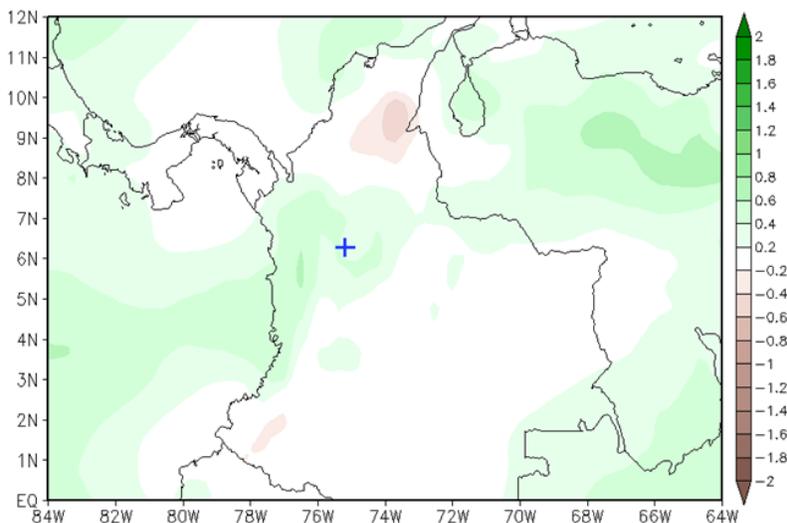
En la estación seca, la humedad específica se presenta con un aumento de 0,2 a 0,4 (g/kg) para el periodo más actual (1982-2013), es decir, la variable ha aumentado considerablemente los valores medios de un periodo a otro; y ello es un indicio relacionado a la humedad que puede aportar el embalse El Peñol-Guatapé, desde los inicios de su operación (Figura 31).

Figura 32. Promedio mensual de humedad específica en estación húmeda (abril-noviembre).
1970-1981 **1982-2013**



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

Figura 33. Diferencia del promedio mensual de humedad específica en estación húmeda (1982-2013) - (1970-1981).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

La humedad específica en la estación húmeda presentó un crecimiento entre 0,4 y 0,6 (g/kg) para el periodo más actual (1982-2013), indicando un aumento de la variable y permitiendo así consolidarse como un factor climático afectado e influenciado por los patrones de temperatura y precipitación, presentados hasta la actualidad (Figura 33).

7.2.3.2 Influencia de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en la Humedad específica

El fenómeno ENOS y su incidencia en la humedad específica, no presenta cambios significativos sobre el punto del embalse (Lat. 6.288 N°, Lon. 75.188 W°) en ninguna de las fases de desarrollo (El Niño y La Niña) (Figura 34 y 35) y en tanto, ello indica que el aumento de la variable (Figura 34), está asociada a factores de introducción de humedad locales o regionales implícitos de la zona.

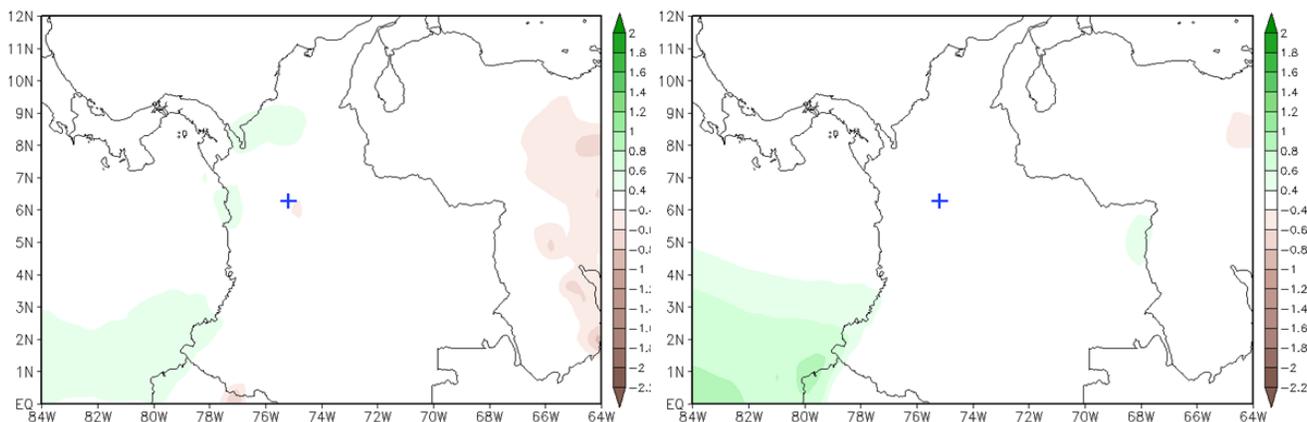
Figura 34. Patrón compuesto de humedad específica asociada a El Niño, periodo base (1981-2010).

Estación seca (dic-ene-feb)

Estación húmeda (abril-noviembre)

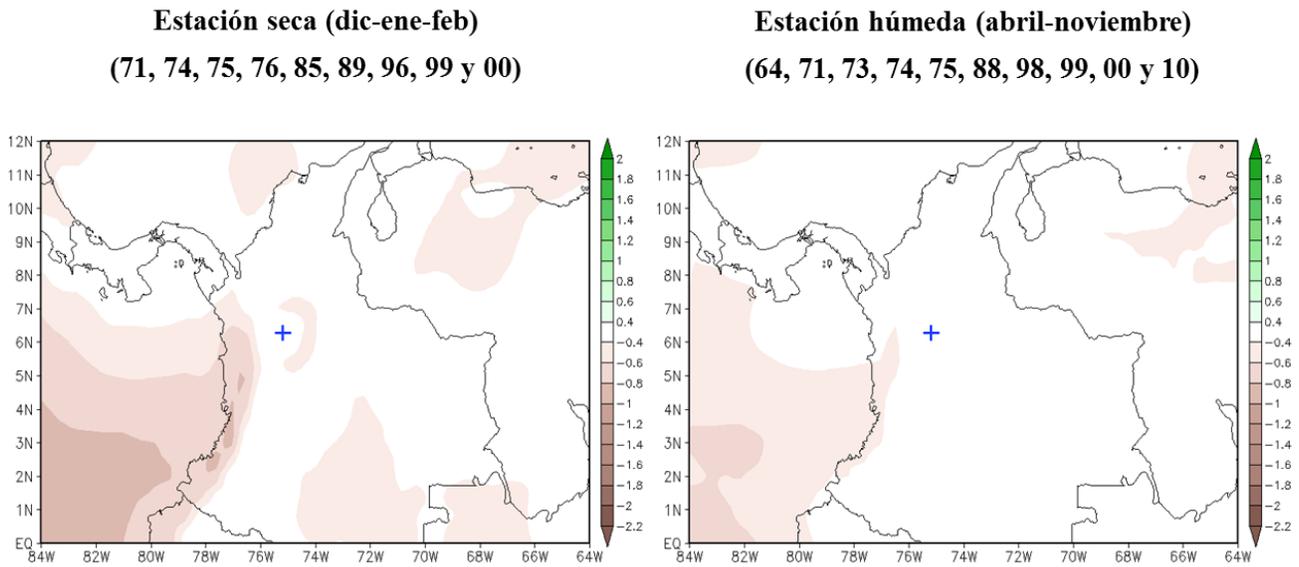
(59, 66, 69, 72, 77, 80, 87, 88, 92, 98, 03, 05 y 10)

(58, 65, 72, 82, 87, 97, 02 y 09)



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

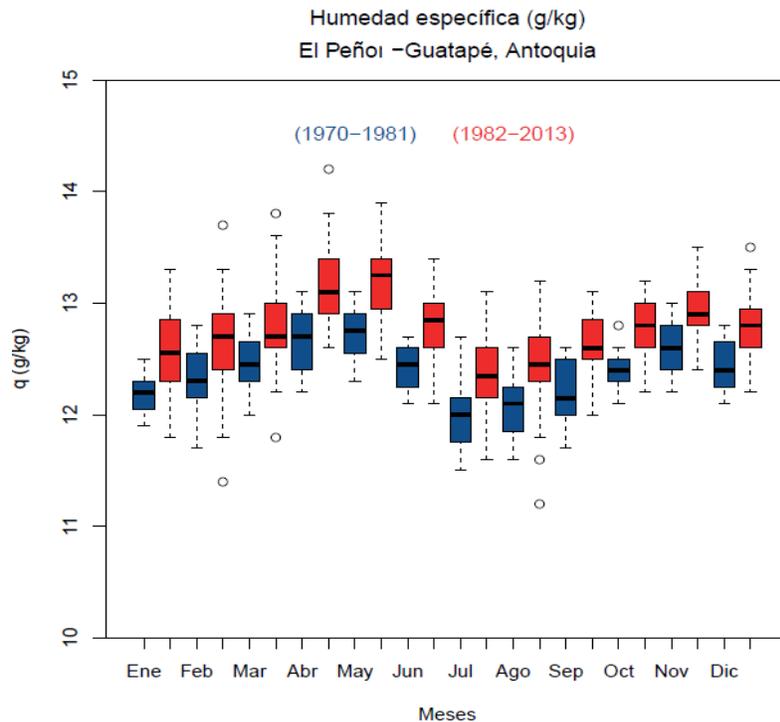
Figura 35. Patrón compuesto de humedad específica asociada a La Niña, periodo base (1981-2010).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

La gráfica 16 presenta brevemente las diferencias entre periodos de la humedad específica y es evidente el crecimiento de la variable en el periodo 1982-2013 respecto a 1970-1981 (Gráfica 16). Esto entonces confirma la interrelación que se presenta entre la intensificación de la temperatura y la precipitación mesoescala de convección.

Gráfica 16. Boxplot Promedio de humedad específica comparativa entre periodo (1970-1981) y (1982-2013).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

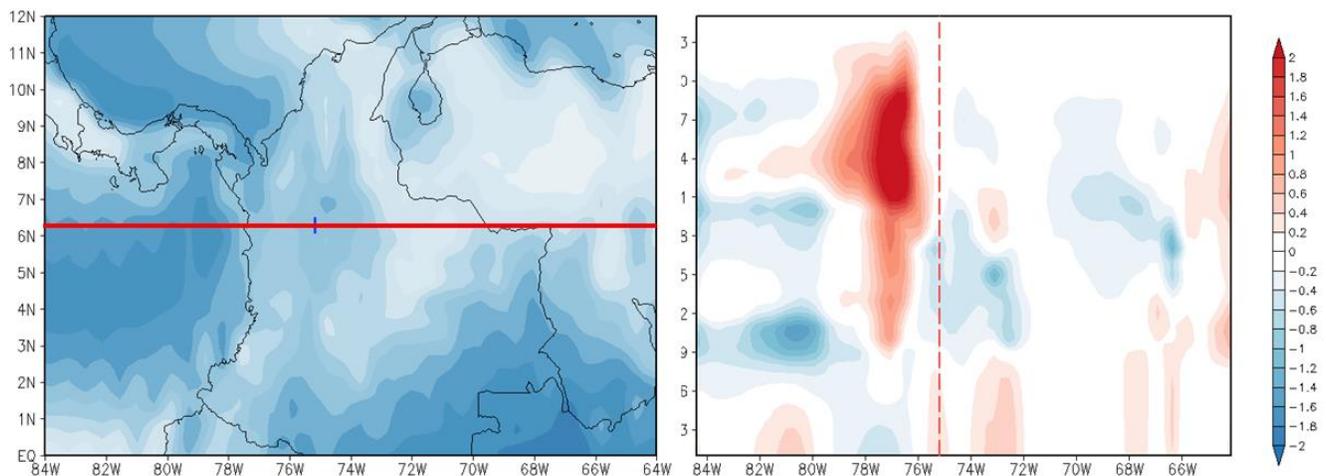
7.3 Razón de Calentamiento Convectivo

La convección es un proceso físico de transferencia de calor entre un sólido y un fluido en movimiento dentro de un sistema, por lo que la naturaleza del calentamiento convectivo depende de las condiciones térmicas de los mismo (Kahan, 2002). Para que se genere una transmisión de calor convectivo, primero se deben presentar mecanismos de radiación y conducción de calor por movimiento, lo cual condiciona físicamente en diferencias de temperatura del fluido, que repercute en el cambio de las densidades. Cuando el fluido es influenciado por la fuerza boyante (diferencia en densidades), se le conoce como convección natural, pero cuando el fluido es afectado por una fuerza externa al sistema, se denomina convección forzada (Erdogdu, Uyar, & Palazoglu, 2010). Todos estos procesos físicos, tienen una trascendencia importante en el contexto climático, ya que son una herramienta útil para evidenciar variaciones diferenciales de temperatura, lo cual puede influenciar no solamente en la formación de precipitación convectiva, sino también en la inestabilidad de sistemas de producción agrícola, industrial, etc.; con la afectación a escalas temporales y espaciales prolongadas.

Por lo anterior, se optó establecer la razón de calentamiento convectivo en la zona del embalse El Peñol-Guatapé; teniendo al aire como fluido y a la superficie como sólido. Esto es un procedimiento que permite evidenciar la diferencia de la temperatura en el territorio y aun verificar la relación entre el calentamiento convectivo con el aumento de la precipitación convectiva presentado hacia el oeste del embalse (Gráfica 14).

Para dar coherencia a la explicación de la disminución de la precipitación convectiva y estratiforme en el punto sobre el embalse, fue necesario analizar la razón de calentamiento convectivo en un corte zonal (Norte-Sur, $5N^{\circ} - 7N^{\circ}$), paralelo al embalse. Este corte facilita la explicación de la migración del régimen húmedo al oeste y seco al este en la zona de estudio (Latitud 6.288° , Longitud $84W^{\circ}-64W^{\circ}$). Todo esto, es comparable y consistente con el exceso de precipitación convectiva al oeste, resultado de las diferencias por periodos (Gráfica 13 y 14).

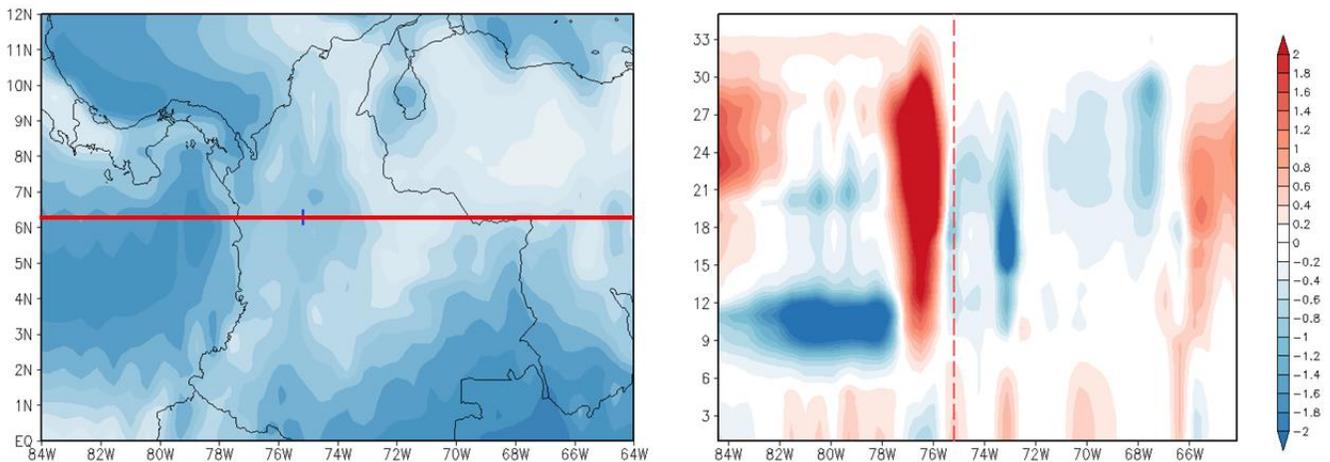
Figura 36. Corte zonal (Lat. 6.288° , Lon. $84W^{\circ}-64W^{\circ}$), diferencia mes enero (K/día), periodo (1982-2013) – (1970-1981).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

La razón de calentamiento convectivo se realiza para todos los meses del año, expresada como la diferencia entre periodos establecidos para el análisis, sin embargo, se toman como referentes los meses de enero y noviembre, por tratarse de los meses donde se presenta respectivamente la menor y mayor diferencia de precipitación convectiva para el periodo más actual (1982-2013). En el mes de enero, se presenta una transferencia de calor negativa sobre el embalse, la cual varía entre -0.2 y -0.6 kelvin por día (K/día); Al lado oeste, en donde la diferencia de transferencia de calor se presenta entre 1.6 y 2 (K/día), evidenciando el potencial de transferencia de energía al oeste. En cuanto al lado este, se ratifica como una zona que no tiene influencia de convección (Figura 36).

Figura 37. Corte zonal (Lat. 6.288°, Lon. 84W°-64W°), diferencia mes noviembre (K/día), periodo (1982-2013) – (1970-1981).



Fuente de datos: Reanálisis Japonés (JRA-55).

En el mes de noviembre, se presenta la mayor diferencia entre periodos de precipitación convectiva (Gráfica 14) y esto es una característica del mes de noviembre donde se presenta la transición de la estación húmeda a seca. En tanto, la intensificación de lluvias convectivas está relacionada con los procesos de transferencia de calor convectivo en la zona. En el costado izquierdo u oeste de la figura 36, la mancha roja representa una elongación extensa de calor sobre todo el oeste del embalse, llegando a un valor de 2 (K/día) (Figura 37). Esto es un indicador crucial en la explicación del papel del embalse El Peñol-Guatapé en el contexto climático, debido a las interacciones tierra-atmósfera que se presentan a lo largo de este territorio.

8. ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS

Con base a los resultados presentados anteriormente, es necesario y pertinente analizar la información de forma íntegra y concisa, dada la cantidad considerable de la misma. Los resultados de los tres objetivos tienen una correlación importante, que permite tener un acercamiento al papel que tiene el embalse El Peñol-Guatapé en el clima local circundante. Los primeros resultados, derivan de las estaciones meteorológicas del IDEAM, las cuales permitieron realizar una caracterización del clima sobre el embalse, sin embargo la deficiencia de información de variables meteorológicas, condujo a realizar un análisis más preciso con las variables de precipitación, número de días con lluvia, temperatura y humedad relativa, para un periodo de 1973 a 2017; este periodo abarca más de 30 años y fue elegido con el fin de evidenciar la variación del clima entre el periodo previo a la operación neta

del embalse (1973-1981) y el periodo posterior a la construcción del embalse (1982-2017), bajo la metodología científica utilizada por referentes teóricos (Tabla 1). Todo esto, es útil para entender de forma detallada como ha sido el comportamiento del clima a lo largo de los años en esta zona, por lo que se identificaron patrones y tendencias de crecimiento y/o decrecimiento; y se evidenció un patrón de tendencia de decrecimiento leve en la precipitación y un patrón de crecimiento prolongado en temperatura en cuatro de las cinco estaciones analizadas, de un periodo a otro (1973-1981 y 1982-2017). La estación Violetas es la estación que presenta un patrón de comportamiento inverso a las otras estaciones, es decir, tendencia al aumento de la precipitación y disminución de temperatura en ese punto. Para poder comprender este comportamiento, es importante mencionar que la altura en esta zona disminuye de oeste a este (2200 (m.s.n.m) y 900 (m.s.n.m)), siendo entonces la estación Tejar y Violetas las más bajas en altura a nivel del mar en el este, y El Peñol y Corrientes las más altas en el oeste (Tabla 6) (Figura 38); esto es algo que permite inferir en el desplazamiento de una corriente de aire con los vientos alisios del noreste, que ejercen una importante interacción con la configuración orográfica, en la activación del forzamiento orográfico, que básicamente consiste en el ascenso de corrientes cálidas y húmedas sobre los frentes montañosos (Barlovento), condicionando a que el aire cálido se enfríe en la altura, retenga el vapor de agua presente en el aire, se condense y genere precipitación en este caso hacia el lado este (Poveda Jaramillo, 2006). Al lado oeste, la corriente de viento desciende cálido y seco (Sotavento), por lo que se esperaría una temperatura superior a la del lado este; y es precisamente esta interacción la que se presenta en inmediaciones del embalse El Peñol-Guatapé (Gráficas 3, 5, 7 y 10, Izquierda). Por esta razón, los patrones de crecimiento de temperatura y patrones estables de precipitación evidenciados en las estaciones El Peñol, Corrientes y Alejandría tienen una reacción intrínseca con las interacciones orográficas y factores de circulación atmosférica. Adicionalmente, a este fenómeno aumento de temperatura del aire por lluvia orográfica, se suma el calor que irradia el embalse de forma vertical y horizontal (CORNARE, 2006), facilitando aumentos de temperatura de hasta 1.3 °C entre 1973 y 2017 (Gráfica 3) y por ende incidiendo en procesos termodinámicos de transporte de alta humedad (Chow et al, 1994).

Algunos de los estudios realizados en zonas de embalses concluyen en que la variabilidad climática presentada, radica en la intensificación de precipitaciones extremas (Degu et al., 2011), más otros autores indican que la variable con mayor sometimiento a la alteración es la temperatura. Por ejemplo, Kum, Gülşen, 2016, muestra en su estudio el aumento de la temperatura y afirma que esto se debe principalmente a factores geográficos locales, es decir, un problema que tiene trasfondos en contextos de mesoescala (20 a 100 km). Los resultados que arroja la distribución de datos en las estaciones El Peñol, Corrientes y Alejandría concuerdan a esta premisa y es bajo este fundamento que se determina realizar un análisis bajo la modelación atmosférica del Reanálisis Japonés (JRA-55), con fin de aproximar de una variable que permita evidenciar procesos a escala regional y local. En este mismo sentido, se evaluó la precipitación, la temperatura y la humedad específica desde la estacionalidad, influencia con ENOS y multianual. En términos generales se evidenció que un comportamiento similar, al que muestran los datos de las estaciones meteorológicas, permitiendo se evidenciar que la precipitación se comporta relativamente normal en la estación seca, estación húmeda y con influencia a ENOS, lo que explica en una variación del clima asociada a procesos locales. Inclusive, las anomalías en la estación seca tienden a ser menores que en la estación húmeda, indicando entonces que la ocurrencia de precipitación en esta época respecto a la época húmeda no tiene cambios significativos. Por otra parte, la estacionalidad húmeda en términos de temperatura, ratifica la ocurrencia del fenómeno de forzamiento orográfico, pues el aumento de la variable en la estación húmeda y el comportamiento normal en la estación seca, indica que la precipitación proveniente del lado este del embalse (estación Violetas), condicionando entonces el flujo descendiente de corrientes cálidas y secas que interfieren en el calentamiento de la atmosfera en zonas altas (proximidades al embalse) (Hoyos

Rincón, 2017). El mismo comportamiento que se presenta con la temperatura, se evidencia en la humedad específica, es decir, existe una correlación importante. El perfil de elevación ilustrado en la figura 38 refleja lo explicado con anterioridad (mayor altura al oeste, menor altura al este) (Figura 38).

Figura 38. Corte este- oeste del perfil de elevación orográfica de la zona de estudio.



Fuente: Google Earth, 2018.

Al demostrar el aumento de la precipitación al este y la estabilidad con tendencia de disminución sobre el embalse, se evalúan las variables de precipitación convectiva y estratiforme, que en su suma representan la precipitación total. Aquí se encuentra un comportamiento particular, el cual permite explicar no solamente las lazas de temperatura sobre el embalse, sino también, la dinámica climática en orden local. Estas variables fueron evaluadas en tres puntos, hacia el este (dirección Puerto Berrío), sobre el embalse y hacia el oeste (dirección hacia Medellín). El único punto que mostro cambios altamente significativos en cuanto a precipitación convectiva y estratiforme, para el periodo actual (1982-2013) fue el punto hacia el oeste (dirección hacia Medellín), en tanto que la convección proviene del este (Gráfica 14). La convección se genera por el calentamiento de masas de aire en la superficie, ya sea por radiación u otros factores; Esta condición física facilita a que el aire caliente se dilate y sea menos denso que el aire frío, para así ascender desde la troposfera baja hasta la tropopausa y allí se sature de vapor de agua y contenga grandes cantidades de humedad que terminan en lo denominado precipitación convectiva. Todo esto tiene influencia con la circulación atmosférica, con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), caracterizada por la provisión de corrientes de chorros fríos y cálidos que entran al territorio nacional por el Pacífico. Adicionalmente, la dirección de los vientos alisios, la configuración orográfica y las condiciones locales conducen al favorecimiento de la

convección al oeste del embalse y al establecimiento del clima general del departamento de Antioquia (CIOH, 2010). La evidencia del aumento de precipitación convectiva, lleva a deducir que hay un desplazamiento de corriente de aire húmedo resultado de la interacción embalse- atmósfera, con el transporte de masas de agua evaporada hacia el oeste del embalse, en tanto que la humedad atmosférica está seriamente ligada con la temperatura del aire (figura 39). Estas dinámicas presentadas en la zona, podría considerarse como la formación de un microclima regional (CORNARE, 2011). Así mismo, la frecuencia de convección profunda (Figura 21 y 22) y la razón de calentamiento convectivo (Figura 36 y 37), demuestran la transferencia y/o transporte de calor sobre el lado oeste del embalse, con una activación superior de convección en la estación húmeda, respecto a la estación seca.

Figura 39. Ilustración espacial de la zona de estudio.



Fuente: Adaptado de OpenStreetMap, 2017.

Las características de la precipitación convectiva resultante en el presente estudio, puede representar un impacto positivo en las regiones montañosas que favorecen de los procesos de escorrentía a los ríos que desembocan en el embalse, como es el caso del río Nare, ubicado en el suroeste del embalse (Figura 39). Esto radicaría en el aseguramiento energético, gracias al represamiento de agua en el embalse, pero en general, la compleja dinámica atmosférica que se presenta en la zona puede repercutir negativamente sobre el territorio; acrecentando episodios de riesgo como movimiento de masas, inundaciones o crecientes potenciales, además de todos los procesos de producción agrícola y ganadera, principalmente. Entonces el papel del embalse El Peñol-Guatapé tiene dos perspectivas a analizar. Una de estas, direccionada a que el mismo embalse es contribuyente de los fenómenos atmosféricos como la convección y aumento de temperatura local y por otro lado, desde la perspectiva de regulación del posible exceso de recurso hídrico, derivado de las altas precipitaciones en el oeste. El acercamiento al comportamiento del clima circundante del embalse conduce a una base importante para la continuación de otros estudios relacionados al tema y para generar estrategias de adaptación a la variabilidad climática presentada.

9. CONCLUSIONES

En esta última parte del documento se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del presente estudio; proporcionando una base de información importante para futuras investigaciones referentes a las variaciones del clima en zonas de embalse en el país.

El análisis climatológico realizado en el embalse El Peñol-Guatapé para el periodo 1973-2017, permitió conocer el comportamiento de las variables precipitación, número de días con lluvia, temperatura media y humedad relativa, evidenciándose que en la zona el patrón con mayor predominancia es la temperatura, al mostrar incrementos de hasta 1.3°C hacia el oeste que posiblemente están relacionados a un efecto orográfico forzamiento, cuyo significado radica en corrientes de aire frío y húmedo al este (mayor precipitación) y el flujos de aire caliente en el oeste. En tanto, a excepción de la temperatura, las otras variables presentan patrones de estabilidad y decrecimiento leve que no es significativo.

La aproximación de la variabilidad climática, indica al igual que la información del análisis climatológico, un comportamiento no representativo en términos de diferencias entre el periodo 1970-1981 y 1982-2013. Se presentan diferencias de decrecimiento sustancial, tanto en la estación seca como en la estación húmeda, así como se evidencia con la asociación a ENOS en las fases de La Niña y El Niño, cuya representación indica que estos fenómenos afectan la variación del clima en la zona, pero no de forma potencial, por lo que se concluye en que las variaciones del clima sobre la zona de estudio, se debe a procesos más específicos de mesoescala a nivel local.

Lo anterior se corrobora con la determinación de la precipitación convectiva y la razón de calentamiento convectiva, que prueban la activación a mesoescala de un fenómeno alimentado por el aumento de la temperatura, la radiación solar sobre el embalse e inducido implícitamente por las corrientes de aire cálidas y secas del este, producto del fenómeno de forzamiento orográfico, mencionado anteriormente. Por lo que el aumento de temperatura en la estación húmeda, tiene una relación importante en el aporte de humedad (transporte de masas húmedas) que realiza el embalse y en la formación de precipitación convectiva (al oeste del embalse), intensificándose en esta estación.

Se podría inferir en que la precipitación convectiva (al oeste del embalse) genera un efecto o impacto positivo en contribución de recurso hídrico al embalse, lo que puede ser un garante de seguridad energética; Pero de otro lado, puede afectar en sistemas agropecuarios y en general, ser un factor de riesgo por la posibilidad de intensificación en episodios de inundación y movimientos de masa, principalmente.

El conocimiento de la compleja dinámica atmosférica de inmediaciones al embalse El Peñol-Guatapé es una herramienta que contribuye a las bases de posibles escenarios de variabilidad climática local y la incorporación en estudios de impacto ambiental, planes de manejo ambiental y en la gestión ambiental territorial desde el contexto de desarrollo sostenible y mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del territorio.

10. RECOMENDACIONES

Es importante resaltar que si bien las variables precipitación, temperatura y humedad, son determinantes para los análisis meteorológicos y climatológicos; también existen otro tipo de variables que facilitan el desarrollo de las investigaciones con mayores alcances y límites. Dado a que la información disponible en la red de monitoreo del IDEAM no es suficiente, lo recomendable es buscar información de bases de datos climáticas globales y regionales, con las respectivas validaciones en la información, para así evitar sesgos en los resultados y generar las mejores aproximaciones científico – académicas.

Los resultados de este proyecto podrían tener un mejor acercamiento si se garantizara la calidad de los datos, la cantidad de variables meteorológicas y su medición bajo lineamientos estándares de forma constante a lo largo de los años en las estaciones meteorológicas. Ello podría contribuir a una mejor descripción del comportamiento del clima local.

En tanto, se recomienda realizar una profundización en el tema por parte de las instituciones de investigación públicas y privadas interesadas en tema, para que se pueda conocer ampliamente la influencia de los embalses en los impactos asociados al clima circundante, con el fin de generar estrategias en la planeación y gestión del riesgo de las posibles regiones influenciadas.

Para futuros estudios en el tema, es pertinente incorporar la información diaria de Reanálisis en cada variable; a un modelo numérico de simulación atmosférica como “Weather Research and Forecasting” o Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF, por sus siglas en inglés), incluyendo análisis de trayectoria de vientos confluentes sobre el embalse, frecuencias y cantidades de precipitación, características de la circulación atmosférica en Colombia y la configuración topográfica de la zona de estudio.

En el sector hidroenergético, podrían ser vinculados los estudios climáticos junto a estudios hidroclimáticos en los planes de manejo ambiental y en procesos internos de la industria, como herramienta preventiva de impactos e indicadores de la proyección de volumen de flujos hídricos o afluentes en términos de abundancia o escasez, para la realización de estimaciones de tiempo de vida útil de los embalses.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astorga González, A. F. (1994). POSIBLES CAMBIOS CLIMÁTICOS DEBIDOS A LOS EMBALSES CONSTRUIDOS EN LAS CABECERAS DE LOS RÍOS DE MONTAÑA. Serie Geográfica, Universidad de León, 45-54.
- Aguirre Ramírez, N. J., Palacio Baena, J., & Ramírez Restrepo, J. J. (2007). CARACTERÍSTICAS LIMNOLÓGICAS DEL EMBALSE EL PEÑOL-GUATAPÉ, COLOMBIA. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 1-2.
- Alcaldía de Guatapé, Antioquia. (04 de Marzo de 2014). Nuestro municipio, Información General. Obtenido de http://www.guatape-antioquia.gov.co/informacion_general.shtml#geografia
- Alcaldía de El Peñol, Antioquia. (2017). *Información General*. Obtenido de http://www.elpenol-antioquia.gov.co/informacion_general.shtml
- Antico, P. L., & Berri , G. J. (2004). La Corriente en Chorro Subtropical media mensual en América del Sur. *Journal Scielo Vol. 29* , 37-45 . Obtenido de Observatorio Atmosférico de Izaña, INM: https://www.researchgate.net/profile/Emilio_Cuevas/publication/267253370_CHARACTERIZACION_DEL_CHORRO_SUBTROPICAL/links/549d72ed0cf2b803713a76ba/CARACTERIZACION-DEL-CHORRO-SUBTROPICAL.pdf
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán , D., & Ruiz, J. F. (Diciembre de 2012). *CAMBIO CLIMÁTICO MÁS PROBABLE PARA COLOMBIA A LO LARGO DEL SIGLO XXI RESPECTO AL CLIMA PRESENTE*. Obtenido de Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático; Subdirección de Meteorología – IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Escenarios+Cambio+Climatico+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/fe5d64fb-3a82-4909-a861-7b783d0691cb>
- ArcGIS Pro. (2017). *Box Plot*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geoprocessing/charts/box-plot.htm>
- Armenta Porras, G. E. (2013). *Análisis detallado del efecto foehn generado por la cordillera Oriental en el alto Magdalena (Huila y Tolima)*. Bogotá D.C. : Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.
- Avellaneda Cusarúa, A. (2015). *Gestión ambiental y planificación del desarrollo*. Obtenido de ECOE EDICIONES: <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2015/04/Gesti%C3%B3n-ambiental-y-planificaci%C3%B3n-del-desarrollo-3ra-Edici%C3%B3n.pdf>
- Balmaseda, M. A. et al. (2013). Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol 139*, Pag 1132–1161.
- Barry, R. G., & Chorley, R. T. (1985). *Atmosphere, weather and climate*. London y Nueva York: Routledge.

- Bustamante Fernández, C. A. (2008). *Efectos ambientales generados por la construcción y operación de un embalse*. Sincelejo: Universidad de Sucre, Facultad de Ingeniería.
- Carrizosa Umaña, J. (2014). *Colombia Compleja*. Bogotá D.C.: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.
- CIOH. (2010). *CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA EN COLOMBIA*. Colombia.
- COLA. (2017). *The Grid Analysis and Display System (GrADS)*. Obtenido de Version 2.2.0: <http://cola.gmu.edu/aboutcola.php>
- CORNARE. (Febrero de 2006). *Actualización del Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Pozo, Municipios de El Peñol y Marinilla, Antioquia*. Obtenido de <https://www.cornare.gov.co/POMCAS/Documentos/El-Pozo.pdf>
- CORNARE. (2011). *EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE RIESGOS Y DIMENSIONAMIENTO DE PROCESOS EROSIVOS EN LOS 26 MUNICIPIOS DE LA JURISDICCIÓN DE CORNARE*. Obtenido de <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/EL-PENOL/Informe-Final-El-Penol.pdf>
- Chow, V., Maidment, R., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGrawHill.
- DANE. (2005). *Colombia, Proyecciones de Población Municipal por Área 2005-2020*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/.../poblacion/...20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls
- Dee et. al. (12 de Diciembre de 2016). *The Climate Data Guide: Atmospheric Reanalysis: Overview & Comparison Tables*. Obtenido de National Center for Atmospheric Research Staff: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>.
- Degu et al. (2011). The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. *Geophysical Research Letters*, 38, L04405, doi:10.1029/2010GL046482.
- Delaurbe. (10 de Agosto de 2015). Guatapé, un pueblo sumergido entre los recuerdos. delaurbe, Periodismo universitario para la ciudad de la Universidad de Antioquia.
- Ebita et al. (2011). The Japanese 55-year Reanalysis “JRA-55”: An Interim Report. *SOLA*, Vol. 7, 149–152.
- Erdogdu, F., Uyar, R., & Palazoglu, T. K. (2010). Experimental Comparison of Natural Convection and Conduction Heat Transfer. *Journal of Food Process Engineering*, Vol 33, 85-100.
- EPM. (17 de 02 de 2017). Sistema de generación de energía de Empresas Públicas de Medellín. Obtenido de: <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>

- Escobar García, O. F. (2011). *Proyección de la variación de la temperatura y la precipitación ante Cambio Climático para Bogotá*. Obtenido de Universidad Santo Tomas, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental:
<http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2629/Escobaromar2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Findeter. (25 de Marzo de 2015). *Análisis Sectorial 2014-2015*. Obtenido de <https://www.findeter.gov.co/descargar.php?idFile=217780>.
- FECYT. (2004). *Meteorología y Climatología-Semana de la Ciencia y la Tecnología*. Obtenido de Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, Centro de Astrobiología: <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) . (2004). *Meteorología y Climatología-Semana de la Ciencia y la Tecnología*. Obtenido de Centro de Astrobiología : <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Fotoseimagenes. (2015). *Efecto-fohn*. Obtenido de <http://www.fotoseimagenes.net/efecto-fohn>
- Gallego Blandón, G. E. (2016). *EL PEÑOL. TRES MOMENTOS: Fundación, inundación y reconstrucción*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Humanas y Económicas, Maestría en Historia.
- García Codrón, J. C. (1994). EL IMPACTO CLIMÁTICO DE LOS EMBALSES CANTÁBRICOS. Serie Geográfica, Universidad de León, 33-42.
- Goldsmith, E., & Hildyard , N. (1984). *The social and environmental effects of large dams*. Camelford, Cornwall: Wadebridge Ecological Centre.
- HERNANDEZ TORRES, C. A. (2011). *ANALISIS AMBIENTAL DE LAS GRANDES CENTRALES HIDROELECTRICAS DE COLOMBIA APLICANDO METODOLOGIA MULTIOBJETIVO*. Bogotá D.C.: UNIVERSIDAD DE LA SALLE, PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA.
- Hagos, S., Feng, Z., Landu, K., & Long, C. N. (2014). Advection, moistening, and shallow-to-deep convection transitions during the initiation and propagation of Madden-Julian Oscillation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol 6., 938–949.
- Hanley D. et al. (2003). A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *Journal Climate*, Vol 16., 1249-1258.
- Houze, R. A. (1997). Stratiform precipitation in regions of convection. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol 78., 2179-95.
- Hossain, F., Jeyachandran, I., & Pielke Sr., R. (2010). Dam safety effects due to human alteration of extreme precipitation. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 46 , W03301, doi:10.1029/2009WR007704.

- Hoyos Rincón, I. C. (2017). *Transporte de humedad atmosférica en Colombia: origen, variabilidad y acople con fenómenos climáticos globales*. Medellín: Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Doctorado Ingeniería Ambiental.
- IDEAM. (27 de Octubre de 1994). *LEY 164 DE 1994*. Obtenido de "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/26915/C_Users_JGomez_Documents_LEY+164+DE+1994.pdf/85833e1c-6ceb-4554-bce5-21e433329019
- IDEAM. (2005). *Definición y clasificación de vientos en la atmósfera*. Obtenido de Anéxo 1: http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/Anexos_1.pdf
- IDEAM. (2011). *Clasificaciones Climáticas Colombia*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/climas+%5BModo+de+compatibilidad%5D.pdf/d8c85704-a07a-4290-ba65-f2042ce99ff9>
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de uniades hidrográficas e hidrogeológicas*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- IDEAM. (2016). *Conocer: El primer paso para adaptarse. Guía básica de conceptos sobre el cambio climático*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023631/ABC.pdf>
- Iglesias Carvajal, S. (2011). *Guía de Impacto Ambiental Para Centrales Hidroeléctricas*. Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2314/3337932I24.pdf;jsessionid=F2029B5631750D535EBB673F32390CF3?sequence=1>
- IX Congreso Colombiano de Meteorología. (23 de Marzo de 2011). Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de Conferencia Internacional "200 años de la meteorología y de la climatología en América Latina": http://www.humanas.unal.edu.co/congreso_meteorologia/introduccion/
- JMA. (2013). *JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis, Monthly Means and Variances*. Obtenido de Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory: https://rda.ucar.edu/datasets/ds628.1/#metadata/detailed.html?_do=y&view=level
- JMA. (Marzo de 2014). *JRA-55 Product Users Handbook - Model grid data*. Obtenido de Climate Prediction Division; Global Environment and Marine Department: https://rda.ucar.edu/datasets/ds628.0/docs/JRA-55.handbook_TL319_en.pdf
- Kahan, S. (2002). *Módulo: Transferencia de Calor*. Obtenido de Instituto de Física – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República: <https://www.fing.edu.uy/~skahan/tranferenciocalor.pdf>

- Kalnay, E. et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, Issue 3, pp.437-472.
- Kobayashi S. et al. (2015). The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, Vol,93*, Pages 5-48.
- Köppen, W. (1884). Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet. *Meteorol. Z.*, 1, 215-226.
- Kousky V. E. et al. (2007). An Alert Classification System for Monitoring and Assessing the ENSO Cycle. *Weather and Forecasting*, Vol 222, 353-371. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-niño-index>
- Kum, Gülşen. (2016). The Influence of Dams on Surrounding Climate: The Case of Keban Dam - Barajların Çevre İklim Etkisi: Keban Barajı Örneği. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, 15(1):193-204.
- Larkin, N. K., & Harrison, D. E. (2002). ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries and implications. *Journal of Climate*, Vol 15, 1118-1140. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Compendio+sobre+fen%C3%B3menos+meteorol%C3%B3gicos>
- Leal Castillo, A. P. (2007). *Conflictos Socio-Ambientales en la Generación de Energía: El caso de la Hidroeléctrica El Quimbo*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21300/LealCastilloAndreaPaola2017.pdf?sequence=1>
- López, M., & Howell, W. (1967). Katabatic Winds in the Equatorial Andes. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol 24., 29-35.
- Macías Parra, A. M., & Andrade, J. (2013). *ESTUDIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BAJO ESCENARIO DE CAMBIO CLIMATICO*. Bogotá D.C.: Unidad de Planeación Minero Energética & Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).
- Mesinger et al. (2006). North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 87, 343–360, doi:10.1175/BAMS-87-3-343.
- MinAmbiente. (26 de Julio de 2017). *Resolución 1519 del 2017*. Obtenido de Términos de referencia EIA: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/39-RES%201519%20de%202017.pdf>

- MinAmbiente. (2018). *Cambio Climático*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico/que-es-cambio-climatico/que-es-el-cambio-climatico>
- MME & UPME. (2017). *Registro de Proyectos de Generación Inscripción según requisitos de las Resoluciones UPME No. 0520, No. 0638 de 2007 y No. 0143 de 2016*. Obtenido de http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2017/Registro_Proyectos_Generacion_Mayo_2017.pdf
- Montealegre, J., & 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. *Meteorol. Colomb. Vol 2*, 7-21. Obtenido de http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero02/02_02.pdf
- Montealegre Bocanegra, J. E. (10 de Diciembre de 2009). *ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS OCEANICOS Y ATMOSFÉRICOS DE MESO Y GRAN ESCALA*. Obtenido de INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM - Subdirección de Meteorología: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+clim%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>
- Monealegre Bocanegra, J. E. (20 de Agosto de 2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos. El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas. Climatológico*. Obtenido de INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM - Subdirección de Meteorología: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
- Montoya Giraldo, C. (Julio De 2015). “Análisis De Variabilidad Climática De Precipitación, Temperatura, Radiación Solar Y Nubosidad Y Su Incidencia En Los Caudales Medios Del Río Fonce En San Gil (Santander)”. Trabajo De Grado. Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada, Facultad De Ingeniería, Programa De Ingeniería Civil.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), 527-530.
- Pabón, J. D., Eslava, J. A., & Gómez, R. E. (Octubre de 2001). *Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia*. Obtenido de Revista meteorológica colombiana, 47-59.: http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero04/04_05.pdf
- Palacios Sierra, R. A. (2013). *Inventario Documentado de Represas en Colombia*. Obtenido de Repositorio Universidad Militar Nueva Granada:

<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11360/1/PalaciosSierraRicardoAndres2013.pdf>

- Pielke Sr. et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change*, 2: 828-850.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1999). La Corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del CHOCÓ”) y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y Variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*. Vol23. , 517-528.
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la Escala Inter-Decadal Hasta la Escala Diurna. *Academia Colombiana de Ciencias de la Tierra*, 201-222. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/German_Poveda/publication/284691636_La_hidroclimatologia_de_Colombia_Una_sintesis_desde_la_escalainterdecadal_hasta_la_escaladiurna/links/565f063908ae1ef92984676c.pdf
- Poveda Jaramillo, G. (2006). El Clima de Antioquia. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 1-17.
- Poveda Jaramillo, G. (2012). *La Hidroclimatología de Colombia en Distintas Escalas de Tiempo & ENSO*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín .
- PNUD. (2012). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Quiñones Olaya, J. L. (2015). *Elaboración de una Cartografía Isopletica de Anomalía de Bouguer en el Suroccidente Colombiano*. Obtenido de Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co:8080/bitstream/10893/7776/1/anomalia%20de%20bouguer.pdf>
- R Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Obtenido de R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.: <https://www.R-project.org/>.
- Régis , G., Edwards , S., & Mark , M. (2010). Biophysical, socioeconomic and geopolitical impacts assessments of large dams: an overview. *UCL, a Aon Benfield UCL Hazard Centre, Institute for Risk and Disaster Reduction and Department of Earth Sciences, Department of Geography, University College London & Rezatec*, 1-16.
- REN21. (2016). *Renewables 2016 Global Status Report*. Obtenido de http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf
- Ruíz Guzmán , D., & Cadena M., J. (2014). *REGIONALIZACIÓN DE COLOMBIA SEGÚN LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL, A TRAVÉS ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)*. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático - Subdirección de Meteorología IDEAM.

- Sarochar, R. H., Ciappesoni, H. H., & Ruiz, N. E. (2005). Precipitaciones convectivas y estratiformes en la Pampa Húmeda: una aproximación a su separación y aspectos climatológicos de ambas. *Meteorológica Vol. 30* , 77-88 .
- Segeber, C. D., & Villodas, R. (2006). *Hidrología I - Precipitaciones*. Obtenido de Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Civil : <http://www.conosur-rih.net/ADVF/documentos/hidro1.pdf>
- SRTM. (2015). *CIAT CSI SRTM version4p1 SRTM: digital elevation data*. Obtenido de <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.CIAT/.CSI/.SRTM/.version4p1/X/-80.0/-70.0/RANGEEDGES/Y/0/12/RANGEEDGES/.SRTM/>
- Ruíz Guzmán , D., & Cadena M., J. (2014). *REGIONALIZACIÓN DE COLOMBIA SEGÚN LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL, A TRAVÉS ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)*. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático - Subdirección de Meteorología IDEAM.
- Trickey, M. et al. (2010). Evaluación de la oscilación Madden-Julian en la predicción de niveles de precipitación de la costa ecuatoriana. *Aqua-LAC - Vol. 2 - N° 1*, pp. 37- 44.
- Tullos D. et al. (2010). Perspectives on the Salience and Magnitude of Dam Impacts for Hydro Development Scenarios in China. *Water Alternatives*, 3(2): 71-90.
- UCA. (2000). *Centrales Hidroeléctricas* . Obtenido de Universidad Centroamericana José Simeón Cañas: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m200018/doc1.pdf>
- Universidad de Murcia. (2000). *Definición de Climatología. Elementos y factores climáticos. Problemas de método*. Obtenido de Geografía y Clima: <http://www.um.es/geograf/clima/tema01.html#sec02>
- United Nations. 1992. Agenda 21: The Rio Declaration on Environment and Development. New York. United Nations.
- UPME. (2015). *Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia*. Obtenido de http://www1.upme.gov.co/Documents/Atlas/Atlas_p25-36.pdf
- UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- Úsuga Montolla, E. (2014). *Impactos sociales y económicos de la hidroeléctrica en Ituango*. Obtenido de Univesridad de Medellín, Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables: http://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/2154/TG_AE_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vásquez A., H. J. (2017). *Ondas Tropicáles*. Venezuela: INAMEH.

- Vidal Daza, J. S. (2009). Investigación Sobre Estudios de Impacto Ambiental Para Proyectos de Embalse de Agua (Tesis de Pregrado). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería civil.
- Walker, G. T., & Bliss, E. F. (1932). World weather V. . *Memoirs of rhe Royal Meteorological Society*, 53-84.
- Woldemichael, A., Hossain, F., & Pielke Sr., R. (2014). Evaluation of surface properties and atmospheric disturbances caused by post-dam alterations of land use/land cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3711–3732.
- World Commission on Dams. (2000). *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. London and Sterling, VA: Earthscan Publications Ltd. Obtenido de https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world_commission_on_dams_final_report.pdf