



# Universidad **Mariana**

Variabilidad espacio temporal de precipitaciones mensuales durante 1987 – 2023 en el Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG), usando datos satelitales CHIRPS.

Lesly Andrea Molina Castro  
Camilo Andres Obando Villota

Universidad Mariana  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Ambiental  
San Juan de Pasto  
2024

Variabilidad espacio temporal de precipitaciones mensuales durante 1987 – 2023 en el Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG), usando datos satelitales CHIRPS.

Lesly Andrea Molina Castro  
Camilo Andres Obando Villota

Informe de investigación para optar al título de:  
Ingenieros Ambientales

Asesora  
Dra. Teresita del Rocio Canchala Nastar

Universidad Mariana  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Ambiental  
San Juan de Pasto  
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007  
Universidad Mariana

## **Agradecimientos**

Al culminar esta etapa tan significativa, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que me han acompañado y apoyado en este proceso. En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar este objetivo. Quiero agradecerle a la Universidad Mariana que, mediante becas me han brindado apoyo para mi formación académica. Su respaldo ha sido crucial para el logro de esta meta y oportunidad que me han brindado para continuar y culminar mis estudios. Agradezco también a mis profesores, quienes compartieron conmigo su conocimiento y experiencia, guiándome con paciencia y dedicación a lo largo de mi formación académica. Un agradecimiento especial a mi asesora, la Dra, Teresita Canchala, por su compromiso, paciencia y valiosa orientación, que han sido pilares fundamentales en el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este proyecto, ya sea brindando su tiempo, su conocimiento o su apoyo emocional. Sin su ayuda, este logro no habría sido posible.

A todos, ¡gracias!

Lesly Andrea Molina

Quiero brindar mi profundo agradecimiento a la Universidad Mariana, en especial al programa de Ingeniería Ambiental, a mis profesores de quienes he aprendido mucho acerca de esta bella carrera y quienes me han formado para la vida en el ser y el hacer. A nuestros jurados de tesis quienes con sus observaciones nos llevaron a mejorar y aprender aún más.

Finalmente, pero no menos importante, quiero expresar el más sincero agradecimiento y resaltar la labor, paciencia y profesionalismo de mi asesora la Dra, Teresita Canchala quien creyó en nosotros desde el primer momento y nos impulsa a ser cada día mejores e ir más allá de lo que creemos podemos dar, gracias por sembrar esa semilla que poco a poco va dejando sus frutos y a través de este proyecto crecer como profesional.

A todos ellos por su dedicación y amistad, gracias totales.

Camilo Andres Obando

## **Dedicatoria**

Quiero dedicarle este proyecto a Dios, cuya guía y fortaleza ha sido quien ha iluminado mi camino durante este proceso académico. Su sabiduría y bendiciones me han sostenido en los momentos difíciles y me han inspirado a perseverar en cada desafío. Este logro es un testimonio de su infinita bondad y apoyo constante. Este trabajo de tesis ha sido una gran bendición en todo sentido y le agradezco por esta meta cumplida.

A mi madre Janeth, cuyo amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido el motor para cumplir este anhelo del corazón, Su sacrificio, dedicación y fe en mí han sido el cimiento sólido sobre el que he construido mi éxito. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles y mi mayor animadora en cada logro

Dedico este trabajo a mi querido Camilo, quien ha sido mi compañero de vida incondicional en la realización de esta tesis. Su apoyo constante, compromiso y dedicación han sido fundamentales en cada paso de este proceso. Juntos, hemos enfrentado desafíos y celebrado logros, su amor y colaboración han hecho de este camino una experiencia inolvidable. Gracias por estar a mi lado, por compartir tanto las dificultades como los éxitos, y por ser una fuente constante de motivación e inspiración. Este logro es tanto tuyo como mío, y no podría haberlo alcanzado sin tu apoyo y esfuerzo compartido. A ti, que has sido mi compañero en esta aventura, te dedico este trabajo con todo mi corazón.

A mis dos amigos Ye y Andre, quiero expresar mi más sincero agradecimiento. Su compañía y el tiempo compartido durante los momentos de estudio han sido invaluable. Aprecio profundamente su constante apoyo, tanto en los momentos difíciles con palabras de aliento como en los logros alcanzados a lo largo de esta carrera. Su presencia ha hecho este camino mucho más llevadero y enriquecedor.

Lesly Andrea Molina Castro

Este trabajo de grado está dedicado a Dios, quien me ha dado la fortaleza y ha sido mi refugio y aliado más grande durante este camino, a mis padres Jhon e Ingrid quienes siempre han sido mi más grande ejemplo de superación, valentía y admiración; sus constantes esfuerzos y apoyo me permiten cumplir mis sueños. A mi hermana Mafe y mi sobrina Isabella, aquellas que siempre tuvieron una palabra de aliento y celebraban mis triunfos como si fuesen los de ellas.

Para Andrea, mi niña, mi compañera de vida y de trabajo de grado, a ti que fuiste esencial en este proceso, quién nunca me dejó desfallecer, y pese a las adversidades ahí estuviste dándome tu apoyo incondicional, llevándome cada día a crecer como persona y profesional. A mis amigos Yeiner y Andrea D. quienes fueron luz en este proceso, donde dejamos miles de anécdotas, pero sobre todo una amistad de esas que ya casi no se encuentran, una real e incondicional y me siento muy feliz de haber podido coincidir con seres humanos así de maravillosos.

Camilo Andres Obando

## Contenido

1. Resumen del proyecto .....	12
1.1 Introducción .....	14
1.2 Antecedentes .....	15
1.3 Justificación y Planteamiento del problema.....	17
1.3.1 Justificación .....	17
1.3.2 Planteamiento del problema .....	19
1.3.3 Hipótesis .....	21
1.4 Objetivos .....	21
1.4.1 Objetivo general .....	21
1.4.2 Objetivos específicos .....	21
1.5 Materiales y Métodos .....	21
1.5.1 Área de estudio .....	21
1.5.2 Descripción de metodologías .....	22
1.6 Diseño experimental o análisis estadístico .....	26
1.6.1 Análisis estadístico Descriptivo.....	26
1.6.2 Definición de ciclo anual de precipitaciones .....	26
1.6.3 Análisis de Tendencias .....	27
1.6.4 Test de pettitt .....	27
1.6.5 Pendiente de sen .....	28
1.6.6 Análisis de correlación.....	28
1.6.7 Análisis de Componentes Principales.....	29
1.6.8 Construcción de isoyetas .....	29
1.6.9 Índice ONI. ....	30
1.6.10 Estimación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) .....	30
1.6.11 Análisis de tendencias extremas.....	30
1.7 Resultados esperados .....	31
1.8 Línea de investigación y área temática.....	33

2	Resultados y discusión .....	33
2.1	<i>Análisis y discusión del primer objetivo.</i> .....	33
2.1.1	Estaciones derivadas a los pixeles. ....	33
2.1.2	Definición del ciclo anual en el SFFG. ....	35
2.1.3	Análisis espaciotemporal de la precipitación .....	36
2.1.4	Análisis de Tendencia .....	37
2.1.5	Análisis de correlación .....	39
2.1.6	Análisis de componentes principales .....	40
2.1.7	Índice ONI.....	42
2.2	<i>Análisis y discusión del segundo objetivo.</i> .....	47
2.2.1	Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación a escala Mensual, trimestral, semestral y Anual .....	47
2.2.2	Análisis de tendencias de SPI en las escalas seleccionadas.....	47
2.2.3	Identificación de eventos.....	49
2.3	<i>Análisis y discusión del Tercer objetivo.</i> .....	53
2.3.1	Espacialización de SPI en las escalas seleccionadas .....	53
2.3.2	Comparación con los eventos ENSO.....	59
2.3.3	Porcentaje de área afectada para los eventos extremos .....	62
3	Conclusiones .....	66
4	Recomendaciones.....	69
5	Referencias bibliográficas .....	70

## **Índice de Tablas**

<b>Tabla 1</b> Resultados de la investigación.....	31
<b>Tabla 2</b> Nombre de las 9 estaciones del SFFG .....	34
<b>Tabla 3</b> Análisis de tendencia .....	37
<b>Tabla 4</b> Análisis de correlación de Pearson.....	39
<b>Tabla 5</b> Resultado del análisis de componentes principales.....	40
<b>Tabla 6</b> Identificación de eventos a escala trimestral sequia.....	50
<b>Tabla 7</b> Identificación de eventos a escala trimestral humedad .....	51
<b>Tabla 8</b> Identificación de eventos a escala anua sequia.....	52
<b>Tabla 9</b> Identificación de eventos a escala anual humedad .....	53
<b>Tabla 10</b> Afectación por trimestre .....	62
<b>Tabla 11</b> Afectación anual .....	64

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Localización geográfica del santuario de Flora y Fauna Galeras .....	22
<b>Figura 2</b> Zona de estudio y pixeles CHIRPS.....	34
<b>Figura 3</b> Histograma y definición del ciclo anual .....	35
<b>Figura 4</b> Mapa de isoyetas estacionales SFFG.....	36
<b>Figura 5</b> Análisis de tendencia TAN .....	38
<b>Figura 6</b> Grafica de correlación de Pearson .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Figura 7</b> Comparación del promedio de las estaciones y el ACP .....	41
<b>Figura 8</b> Índice ONI .....	43
<b>Figura 9</b> Índice estandarizado de precipitaciones Trimestral .....	48
<b>Figura 10</b> Índice estandarizado de precipitaciones Anual.....	49
<b>Figura 11</b> Evolución temporal de los eventos extremos trimestral .....	54
<b>Figura 12</b> Evolución temporal de los eventos extremos anual .....	57
<b>Figura 13</b> SPI Trimestral Vs ONI.....	60
<b>Figura 14</b> SPI Anual Vs ONI .....	61

## **1. Resumen del proyecto**

Esta investigación documenta el estudio de la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones mensuales en el Santuario de Flora y Fauna Galeras, localizada en Nariño en el suroeste de Colombia; utilizando datos satelitales procedentes de Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (CHIRPS), los cuales proporcionan registros precisos y continuos de precipitaciones a nivel global con una alta resolución temporal y espacial (Funk et al., 2015). Metodológicamente, se realizó un estudio detallado de la variabilidad climática en el Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG) aplicando análisis estadístico descriptivo, Análisis de componentes principales (ACP), Análisis del índice Oceánico El Niño (ONI), Índice Estandarizado de precipitación (SPI) y Análisis de tendencia mediante el Test Mann-Kendall. Los resultados de estos análisis mostraron que el ciclo anual de las precipitaciones en el SFFG es bimodal con dos trimestres secos (Dic-Ene-Feb y Jun-Jul-Ago) y dos trimestres lluviosos (Mar-Abr-May y Sep-Oct-Nov), siendo el trimestre más seco y lluvioso Jun-Jul-Ago y Sep-Oct-Nov, respectivamente.

Por su parte, el ACP permitió identificar un modelo principal de las precipitaciones (CP1) el cual represento el 93.93% de la variabilidad de las precipitaciones mensuales y permite identificar los eventos extremos de precipitación de toda el área de estudio. Respecto al análisis del Índice ONI, se encontró que la mayoría de los eventos extremos negativos (disminución de precipitaciones) coinciden con eventos El Niño y los eventos positivos (incremento de precipitaciones) coinciden con eventos La Niña.

Por otro lado, el Análisis de Tendencia permite realizar el estudio de los cambios que pueden surgir a largo plazo en los patrones de precipitación se logró observar que las estaciones Florida (Flo), Pasto 1 (Pas 1), Nariño (Nar), Sandoná (San), Consacá 1 (Csc 1), Consacá 2 (Csc 2) y Yacuanquer (Yaq) no presentan una tendencia significativa, es decir, que las fluctuaciones podrían deberse a la variabilidad natural, donde los ciclos climáticos naturales dominan los registros de datos en ciertos periodos. A su vez, pese a encontrar valores negativos al aplicar el test de la pendiente de sen's, en dichas estaciones, se evidencia una leve disminución en las precipitaciones, sin embargo, no es consistente ni lo suficientemente marcada para establecer una tendencia.

Por otro lado, las estaciones Pasto 2 (Pas 2) y Tangua (Tan), quienes, si presentaron una tendencia negativa con un punto de cambio en el año 1998, la disminución de precipitaciones en estas zonas, en comparación con las otras se debe a una combinación de factores geográficos, como la sombra orográfica, y fenómenos climáticos globales. La posición de las estaciones en una zona de sotavento, protegida por el Galeras, limita la llegada de sistemas nubosos desde el Pacífico, reduciendo las lluvias en la región, que al sumarse a la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) desde finales de los 90, ha intensificado la reducción de lluvias en estas regiones.

Finalmente, para analizar en mayor detalle estos resultados se estimó Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) a escala trimestral entre Diciembre de 2015 y Febrero de 2016, con una severidad de 11.85, y el exceso de precipitaciones identificado a escala anual entre Junio y Diciembre de 2022, con una severidad de 22.12.

## **1.1 Introducción**

La variabilidad climática de las precipitaciones es un tema crucial en el contexto del cambio climático, que representa un desafío global significativo para la gestión de recursos naturales (IPCC, 2021). Por su parte, Colombia es un país que, al estar rodeado por los océanos Pacífico y Atlántico, presenta un clima influenciado en gran medida por las temperaturas superficiales del mar y los fenómenos vinculados al acoplamiento atmósfera-océano a gran escala, tales como El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual está vinculado a peligros hidrometeorológicos como fuertes lluvias, inundaciones y sequías (OMM 2023). A su vez, las precipitaciones pueden impactar a diversas regiones y ecosistemas como el SFFG- Nariño ubicada en el suroeste de Colombia y atravesada por la Cordillera de los Andes (Mora, 2021). Sin embargo, la falta de estaciones meteorológicas locales en esta región dificulta la recopilación de datos climáticos precisos, cruciales para la gestión del recurso hídrico y la toma de decisiones.

En este estudio, se llevó a cabo una evaluación espaciotemporal de las precipitaciones en el SFFG-Nariño durante el periodo 1987-2023, utilizando datos satelitales procedentes de Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (CHIRPS), los cuales ofrecen una ventaja significativa en la investigación climática, ya que proporciona registros precisos y continuos de precipitaciones a nivel global con una alta resolución temporal y espacial (Funk et al., 2015). Esta metodología permite obtener información detallada sobre los patrones de precipitación en áreas donde la disponibilidad de datos de estaciones meteorológicas locales puede ser limitada, información que es fundamental, ya que juega un papel crucial en la gestión del recurso hídrico y la capacidad de adaptación de las comunidades frente a condiciones climáticas extremas. Identificar patrones y fluctuaciones en la precipitación es esencial para diseñar políticas y estrategias que promuevan una mejor adaptación al cambio climático, aumentando así la resiliencia de las comunidades susceptibles de afectar (USGS, 2014). Esto permitirá tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático. Adicionalmente el uso de datos satelitales CHIRPS proporcionará información detallada y actualizada que complementará la falta de estaciones meteorológicas locales en la región, fortaleciendo así la capacidad de monitoreo y gestión de los recursos naturales en el santuario.

## **1.2 Antecedentes**

A nivel mundial, se pueden constatar las repercusiones del cambio climático, que abarcan el incremento de la temperatura media, la disminución de la extensión del hielo marino y la disminución de los niveles de oxígeno en los océanos (OMM, 2019). Esto ha generado que incidentes climáticos tales como episodios de inundaciones y tormentas, estén experimentando un incremento en su frecuencia (CRED et al., 2021). Razón por la cual la Organización Meteorológica Mundial, define al cambio climático como una modificación estadística de las condiciones climáticas que se mantiene durante un período de al menos varias décadas, como resultado de influencias tanto naturales como de origen humano, lo que, para Pomo et al., (2019) permitía que haya un incremento en la frecuencia y la magnitud de los incidentes climáticos.

Para Yates et al., (2013) América Latina debido a su diversidad geográfica y climática, ha emergido como una de las regiones más impactadas por los efectos del cambio climático. Ecuador, situado en América del Sur, es particularmente propenso debido a su ubicación geográfica y características geológicas, enfrenta amenazas hidrometeorológicas, tales como precipitaciones extremas, sequías e inundaciones (FAO, 2008). Los Andes ecuatorianos, fuentes hídricas críticas se ven impactadas por la disminución de los glaciares y el incremento de las temperaturas (FAO, 2014). Cabe resaltar también que estudios dados a conocer por (Rau et al., 2011) han demostrado que la variabilidad de la lluvia está relacionada con El Niño, proporcionando información valiosa para la administración de los recursos hídricos y la reducción a la exposición a peligros.

Lo anterior se puede contrastar en Colombia ya que, para Poveda et al., (1998) en el país se destaca la influencia de estos fenómenos climáticos en la variabilidad de las precipitaciones y los caudales de los ríos, ya que se determina que, durante los eventos de El Niño, hay una disminución en las precipitaciones y los caudales de los ríos, mientras que, durante los eventos de La Niña, hay un aumento en las precipitaciones y los caudales de los ríos. Además, se encuentra una relación entre la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la variabilidad de las precipitaciones en la región del Caribe Colombiano, aunque es importante destacar que la influencia de la NAO en Colombia no es tan predecible ni uniforme como en otras regiones más cercanas al Atlántico Norte. El clima y su variabilidad está influenciado por múltiples factores

como los fenómenos ya mencionados anteriormente, que pueden superponerse o contrarrestar los efectos de la NAO.

Al tiempo y en la ampliación de estudios y nuevas tecnologías Poveda et al., (2002) encontraron correlaciones significativas entre los índices de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y los caudales de los ríos, así como correlaciones negativas con la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) También se observaron correlaciones positivas entre el Índice de Oscilación del Sur (SOI) y los caudales en Colombia, así como entre el Índice Multivariado de El Niño (MEI) y la temperatura del mar en el Pacífico tropical. Se encontraron ciclos anuales y semianuales en la hidrología de Colombia. Estos hallazgos son importantes para comprender la dinámica microclimática de Colombia y los trópicos americanos, y tienen aplicaciones en la predicción hidrológica y en el ámbito social y ambiental.

En Nariño también se genera preocupación por comprender los diferentes eventos, es por esto que la regionalización de las precipitaciones mensuales en el suroeste de Colombia se realiza utilizando técnicas estadísticas como el análisis de componentes principales no lineales y los mapas autoorganizados. Los resultados mostraron la identificación de dos regiones principales con diferentes regímenes de lluvia: la Región Andina con un régimen bimodal y la Región del Pacífico con un régimen unimodal. Estos hallazgos son relevantes para la gestión de los recursos hídricos en la región. Además, se destaca la importancia de considerar factores geográficos y bioclimáticos para comprender los patrones de lluvia y resaltar la eficacia de los enfoques no lineales en la regionalización de las precipitaciones (Canchala et al., 2022). Una de las características más importantes del estudio es comprender que la Zona Andina presenta precariedad con respecto a las estaciones meteorológicas, es por esto mismo que (Ocampo et al., 2021) también proponen una alternativa donde se evalúa la precisión del conjunto de datos de precipitación CHIRPS en el suroeste de Colombia. Se utilizan métricas estadísticas y análisis de componentes principales para comparar los datos de CHIRPS con los datos de precipitación observados en las estaciones existentes. Los resultados muestran que CHIRPS subestima la precipitación en regiones de alta precipitación y sobreestima la precipitación en regiones de baja precipitación. El desempeño de CHIRPS es mejor en la región Andina que en la región del Pacífico. Además, el estudio revela que

CHIRPS tiene una correlación aceptable con la precipitación observada, con un mejor desempeño en la temporada de lluvias.

En este contexto, los datos provenientes de CHIRPS se rigen como una fuente fiable de datos para la Región bajo estudio, caracterizada por su elevada resolución espacio-temporal. Su aplicación y seguimiento no solo facilitan una comprensión más profunda de los ciclos hídricos regionales, sino que también aportan valiosos insumos para la implementación de prácticas sostenibles de gestión del agua. Este enfoque de investigación encuentra respaldo en la obra de Funk et al., (2015) quienes enfatizan la importancia de registros ambientales, como los proporcionados por CHIRPS, para el monitoreo de eventos climáticos extremos. Además, el estudio de Morales et al., (2020) habla sobre la caracterización hidrológica en el SFFG y se centran en el análisis de las características del recurso hídrico en esta área protegida abordando temas como la calidad del agua, los caudales de los ríos y quebradas, la distribución de los ecosistemas acuáticos y su relación con el clima y la vegetación de la región. Los resultados de estos estudios son importantes para la conservación y manejo sostenible del santuario, proporcionando información clave para la protección de la biodiversidad y la regulación del agua en la zona, la necesidad de comprender la variabilidad climática en esta región, consolidando así la relevancia de la investigación.

### **1.3 Justificación y Planteamiento del problema**

#### **1.3.1 Justificación**

Este trabajo de grado generará a las entidades de carácter público y privado del departamento de Nariño a través de datos satelitales un instrumento para el análisis de la variabilidad espacio temporal de precipitaciones; y, como actualmente no cuenta la zona con estaciones meteorológicas, puede ser relevante para comprender y monitorear el cambio climático a nivel local, lo que es crucial para la agricultura, la gestión de los recursos naturales, del recurso hídrico y la toma de decisiones en la zona de estudio.

La obtención de datos ayudará a analizar y comprender el clima, identificar patrones y tendencias a largo plazo, teniendo en cuenta los eventos extremos que pueden tener una severidad

variable, dependiendo de factores como la intensidad y duración del fenómeno. Adicionalmente, el estudio de las precipitaciones puede proporcionar información crucial sobre la cantidad, distribución y variabilidad de las lluvias en una determinada región. Esto es especialmente importante para la agricultura, ya que permite una mejor planificación de los cultivos, gestión del riesgo y previsión de sequías o inundaciones. Además, los estudios de precipitación son fundamentales para el monitoreo del clima, la predicción del tiempo y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

En este contexto, en el marco legal asociado con la Variabilidad climática en Colombia, como la ley 1931 de 2018 establece medidas para la adaptación y mitigación del cambio climático. Esta ley busca proteger los ecosistemas y la biodiversidad, así como garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar de la población frente a los efectos del cambio climático. Otras normativas que aplican para la variabilidad climática en Colombia son el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, donde aborda la implementación de medidas que buscan fortalecer la capacidad de respuesta y adaptación del país ante eventos extremos como sequías o inundaciones, y promueven acciones de monitoreo, alerta temprana y gestión de riesgos para reducir los impactos negativos en las comunidades y el medio ambiente, se enfoca en promover la sostenibilidad ambiental, la adaptación al cambio climático y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Busca fortalecer la resiliencia de los sectores productivos, impulsar acciones de conservación y uso sostenible de los recursos naturales, así como promover la educación y conciencia ambiental en la sociedad. Por su parte, el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, busca reducir la vulnerabilidad de las comunidades frente a eventos extremos, a través de la implementación de medidas de prevención, preparación y respuesta. Promueve la coordinación entre instituciones, la educación en gestión del riesgo y la implementación de sistemas de alerta temprana para proteger la vida y los medios de subsistencia de las personas.

Es esencial tener en cuenta que, para la adopción de medidas de prevención por parte de los consejos para la gestión del riesgo con el fin de mitigar impactos negativos a la población y al medio ambiente. Por último, el CONPES 3700 de 2011, donde es una estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia. Estos instrumentos buscan fortalecer la resiliencia ante los impactos del cambio climático y promover

acciones de adaptación y mitigación lo que pusieron en evidencia que Colombia es un país altamente vulnerable a los efectos de la variabilidad del clima y del cambio climático, lo cual pone en riesgo la sostenibilidad del desarrollo y hace necesaria la elaboración de una estrategia coordinada para la adaptación a los impactos que tendrán estos fenómenos sobre la población, el medio ambiente y la economía del país.

### **1.3.2 Planteamiento del problema**

El cambio climático ha sido reconocido como un desafío para el desarrollo de los países y el bienestar de ecosistemas y sociedades, el cual consiste en variaciones que suelen ser graduales, permanentes en el tiempo y se mantienen durante varias décadas, lo que va cambiando, de forma lenta las condiciones predominantes y de variabilidad del sistema climático. Mann, (1998) ha argumentado que el cambio climático está provocando cambios en los patrones de precipitación, aumentando la frecuencia y la intensidad de los eventos climáticos extremos, y provocando la pérdida de biodiversidad, lo que contrasta precisamente con Oreskes, (2010) argumenta que los intereses corporativos han financiado campañas de desinformación para sembrar dudas sobre la realidad del cambio climático y retrasar la acción climática y de esta manera no ver comprometidos sus distintos procesos y la forma como actualmente se ejecutan. Hansen, (2012) quien afirmó y complemento a Mann al referir que estos impactos pueden ser atribuidos con una alta confianza a la actividad humana, uno de sus agravantes corresponde a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) los cuales producen el aumento de la temperatura media a nivel global, y altera el sistema climático. Es importante resaltar que los cambios en los eventos climáticos individuales contribuirán sustancialmente a los cambios en la variabilidad climática (IPCC,2021, CIIFEN 2022). En su último informe, el IPCC afirmó que el cambio climático está afectando los sistemas naturales y humanos en todo el mundo, y que se espera que los impactos se intensifiquen en las próximas décadas (IPCC, 2021). Uno de los aspectos que influye en estos impactos, es la variabilidad climática, se refiere a cambios temporales originados por la interacción de los factores que determinan el clima. Estos cambios son periódicos y normales, ya que se presentan cuando hay fluctuaciones en la radiación del sol, la temperatura oceánica, el viento, entre otros factores, y se pueden presentar en escalas temporales que van desde unos cuantos días hasta varios meses y años. Los eventos El Niño y La Niña, por ejemplo, son fenómenos de variabilidad climática que

perturban las condiciones predominantes del clima en el planeta, ocasionando principalmente alteraciones en los patrones interanuales de precipitación (IDEAM, 2017).

Por lo anterior, la variabilidad climática en Colombia es notable debido a su ubicación geográfica y diversidad topográfica. El país experimenta una alternancia estacional entre temporadas de lluvia y sequía, influenciada por fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Durante los eventos de El Niño (EN), en la mayor parte del territorio nacional se observa un aumento de condiciones secas, mientras que durante La Niña (LN) se registra un aumento de las lluvias. Estos eventos pueden tener impactos significativos en la agricultura, los recursos hídricos y el medio ambiente.

Las estaciones meteorológicas son herramientas esenciales para comprender el cambio climático a nivel local ya que proporcionan datos precisos para analizar patrones climáticos a largo plazo y evaluar el impacto del cambio climático en una región específica. La revista *Climate Research* (2016) destaca la importancia de las estaciones meteorológicas en la medición de cambios en temperatura y precipitación. Además, un informe de la Organización Meteorológica Mundial (2018) subraya la necesidad de expandir la red de estaciones meteorológicas para mejorar la comprensión del cambio climático y fortalecer la capacidad de adaptación y mitigación.

El SFFG en la región Andina de Nariño es vital para la biodiversidad, pero carece de estaciones meteorológicas locales para monitorear variables hidroclimatológicas cruciales. La ausencia de estas estaciones afecta la recopilación de datos climáticos precisos, esenciales para la gestión del recurso hídrico y la toma de decisiones (Mora, 2021). Ante la escasez de datos in situ, se utilizan estimaciones satelitales, como las proporcionadas por CHIRPS, que ofrece registros de precipitaciones con resolución temporal y espacial (USGS, 2014). Este enfoque permite identificar patrones espacio-temporales en el SFFG.

Teniendo en cuenta lo anterior mencionado se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo han variado en los últimos 37 años la duración, intensidad y severidad de eventos extremos de precipitaciones, como eventos secos y húmedos en el SFFG-Nariño? Esta pregunta no solo

delinea el enfoque del estudio, sino que también orienta la aplicación de la metodología apropiada para el análisis en la región.

### ***1.3.3 Hipótesis***

En los últimos 37 años los eventos extremos de precipitación en el SFFG registran cambios en la duración, intensidad y severidad.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Evaluar la variabilidad espacio-temporal de eventos extremos de precipitaciones en el Santuario de Flora y Fauna Galeras -Nariño.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Caracterizar espacio-temporalmente las precipitaciones en el Santuario de Flora y Fauna Galeras-Nariño.
- Analizar espacio-temporalmente los eventos extremos de precipitaciones en términos de intensidad, duración y severidad.
- Determinar la influencia de la variabilidad climática sobre la severidad de los eventos extremos de precipitaciones en el SFFG.

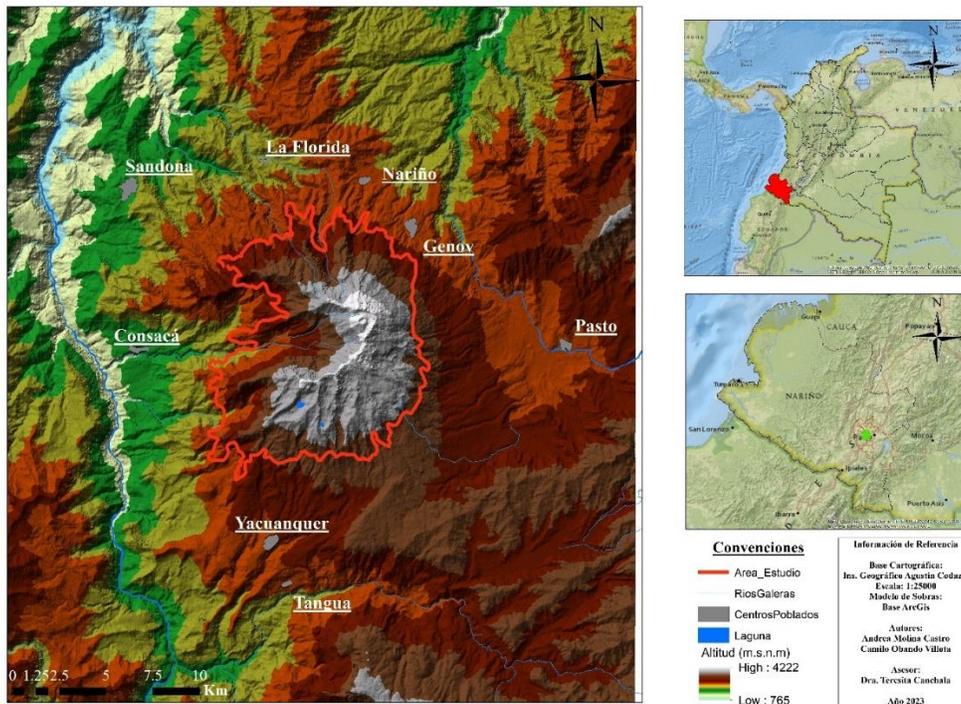
## **1.5 Materiales y Métodos**

### ***1.5.1 Área de estudio***

El área de estudio corresponde al Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG), el cual se encuentra en el suroeste de Colombia, Nariño como se aprecia en la Figura 1. El SFFG corresponde a un área protegida que abarca aproximadamente 75 Km<sup>2</sup>, tiene jurisdicción en los municipios de Pasto, Tangua, Yacuanquer, Consaca, Sandomá, La Florida y Nariño, cuyas poblaciones se benefician de los servicios ambientales que ofrece el santuario, el cual conforma un hermoso complejo lagunar que da vida a frailejones, pajonales y páramos que alberga una gran diversidad faunística y florística en los ecosistemas de páramo, bosque alto andino y andino. Gran parte del Santuario está en Zona de Amenaza Volcánica Alta -ZAVA del Complejo Volcánico Galeras (Parques Nacionales Naturales de Colombia., 2023).

**Figura 1**

*Localización geográfica del santuario de Flora y Fauna Galeras*



### 1.5.2 Descripción de metodologías

Los datos satelitales CHIRPS, procedentes de la Universidad de California de Santa Bárbara, ofrecen una visión detallada de los patrones mensuales de precipitación en el Santuario de Flora y

Fauna de Galeras (SFFG). CHIRPS fue seleccionado por su alta resolución espacio-temporal y precisión validada para la región de Nariño. Como señalan Ocampo et al. (2022), el conjunto de datos CHIRPS es fundamental para analizar la variabilidad de la precipitación en el suroeste de Colombia y permite diferenciar los patrones de precipitación incluso en regiones. Este estudio comienza con la recopilación de datos de precipitación provenientes de 9 estaciones utilizando el conjunto de datos CHIRPS. Estas estaciones fueron geolocalizadas con ArcGIS, permitiendo la identificación de los píxeles de CHIRPS asociados a cada una.

A continuación, se lleva a cabo un análisis estadístico descriptivo de estos datos, organizando la información por estación. Este enfoque facilita la comprensión de las características específicas de las precipitaciones en cada ubicación. Posteriormente, se procede con el análisis estadístico descriptivo y la definición del ciclo anual de precipitaciones. Para abordar de manera más específica las tendencias, se aplica el análisis de Mann-Kendall. Este método estadístico permite evaluar la presencia de tendencias significativas a lo largo del tiempo, ofreciendo una perspectiva más detallada sobre los cambios observados en las series temporales de precipitación para cada estación (Mann, 1945; Kendall, 1975). Adicionalmente se empleó el cálculo de la pendiente de (Sen) como una herramienta adicional para analizar las tendencias temporales de las precipitaciones. Este enfoque no paramétrico resulta útil para detectar cambios en la magnitud y dirección de la tendencia a lo largo del tiempo (Hirsch et al., 1982).

Igualmente se llevó cabo el análisis de Test de Pettitt, un método estadístico no paramétrico utilizado para detectar cambios abruptos en las series temporales donde La hipótesis nula ( $H_0$ ) del test establece que no hay cambio abrupto en la serie de datos. La hipótesis alterna ( $H_1$ ) plantea que existe un cambio abrupto en la serie de datos. Este test se aplica con el objetivo de identificar posibles cambios significativos en el patrón de precipitación a lo largo de los años (Pettitte, 1979), conectado con el análisis de tendencias mediante el Test de Mann-Kendall.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de correlación utilizando el coeficiente de Pearson. Este enfoque permite explorar las relaciones lineales entre las variables, en este caso, las precipitaciones en diferentes estaciones, así como la correlación entre series temporales de precipitación (Pearson, 1901).

Seguidamente se empleó un análisis de Componentes Principales (ACP). Este método multivariante facilita la identificación de patrones dominantes y la reducción de la dimensionalidad de los datos, permitiendo una comprensión más clara de las variaciones espaciales en las precipitaciones entre las estaciones (Abdi & Williams, 2010).

Por otro lado, El Índice oceánico El Niño (ONI) se calcula como el promedio de las anomalías de temperatura superficial del mar durante un período de 3 meses (trimestre móvil), que generalmente corresponde a la temporada cálida (diciembre a febrero) y la temporada fría (junio a agosto). Un ONI positivo indica condiciones cálidas asociadas con El Niño, mientras que un ONI negativo señala condiciones frías relacionadas con La Niña (Trenberth, 2005).

Este índice, utilizado ampliamente para monitorear y predecir los eventos de El Niño y La Niña, así como para evaluar su impacto en el clima global, proporcionan una valiosa perspectiva sobre cómo las variaciones en las condiciones del Océano Pacífico pueden influir en los patrones de precipitación en el SFFG (Trenberth, 2005).

Para realizar la especialización de las precipitaciones, se recopilaron mediciones de precipitación de múltiples estaciones meteorológicas distribuidas en la región de interés (Smith et al., 2010). Estos datos se analizan para comprender la variabilidad de las precipitaciones a lo largo del tiempo y el espacio. En esta fase del estudio se realizó la espacialización de los datos generados trimestralmente, los cuales están vinculados al ciclo anual bimodal de precipitaciones. Este proceso implica la identificación de patrones estacionales en los datos, seguido por la creación de un mapa de isoyetas. Esto permitió obtener una representación continua y coherente de la distribución espacial de las precipitaciones en el SFFG.

El propósito primordial de este mapa de isoyetas es comprender las variaciones en la distribución de las precipitaciones a lo largo del año y discernir posibles tendencias climáticas. Esto puede ser crucial para la planificación y la toma de decisiones en áreas como la gestión del agua, la agricultura y la mitigación de riesgos naturales, ya que proporciona información valiosa sobre la disponibilidad y la distribución de recursos hídricos en la región (Liang et al., 2018).

Posteriormente, se estimó del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), es una medida ampliamente utilizada para evaluar condiciones de sequía y humedad (Hayes et al., 1999). El SPI se calcula para diferentes escalas de tiempo, permite identificar eventos extremos, así como eventos húmedos y secos con alta precisión. Una vez calculado el SPI, se procede a la identificación de los eventos más intensos, tanto húmedos como secos, en función de los valores extremos del índice. Esto permite caracterizar los eventos más significativos y comprender su impacto en el sistema climático (Wilhite & Glantz, 1985). Además, se identifican los eventos de mayor duración, para comprender la persistencia de las condiciones climáticas a lo largo del tiempo. Esta caracterización temporal es fundamental para evaluar la severidad y la duración de los eventos extremos (Wilhite y Glantz, 1985).

Posteriormente, se realizó un análisis de tendencias extremas en las series temporales del índice SPI, utilizando técnicas estadísticas como el test de Mann-Kendall., este análisis permite identificar cambios significativos en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos a lo largo del tiempo (Mann, 1945; Kendall, 1975). Se lleva a cabo un monitoreo y evaluación de sequía, utilizando el SPI como indicador principal. Este enfoque permito identificar y caracterizar períodos de sequía, evaluando su severidad, duración e intensidad (Wu et al., 2007). El cálculo del SPI se realiza aplicando una transformación probabilística de los datos de precipitación, ajustando estos a una distribución gamma, lo que permite estandarizar los valores y compararlos entre distintas regiones y escalas temporales (McKee et al., 1993).

Finalmente, se desarrolló un capítulo que contiene la identificación de patrones climáticos, con una comparación de umbrales históricos. Este análisis se basó en la identificación de eventos climáticos significativos y su comparación con umbrales predefinidos, permitiendo una comprensión más profunda de la variabilidad climática a lo largo del tiempo (Wilhite y Glantz, 1985).

Se llevó a cabo una comparación detallada de los eventos severos identificados mediante SPI con umbrales históricos. Este análisis permitió contextualizar y evaluar la magnitud de los eventos en relación con las condiciones climáticas previas, igualmente se aplicaron técnicas estadísticas

avanzadas para realizar un análisis detallado de tendencias climáticas. El uso de pruebas estadísticas, como el Test de Mann-Kendall, permitió identificar patrones de cambio significativos en las series temporales de precipitación. (Mann Kendall, 1975), Igualmente se creó una base de datos que contenía información detallada sobre los eventos severos de precipitación identificados. Esta base de datos sirve como un recurso fundamental para la caracterización y documentación de eventos extremos, facilitando un análisis más profundo.

Se elaboro un capítulo específico a estrategias de mitigación ante eventos climáticos extremos. Este segmento exploró enfoques y propuso estrategias efectivas para reducir la vulnerabilidad y mitigar los impactos de eventos severos de precipitación. Finalmente se tuvo en cuenta un capítulo centrado en la generación de información beneficiosa para la población y las entidades competentes. Este segmento proporciona conocimientos clave derivados del análisis, contribuyendo a la toma de decisiones informada en gestión de riesgos y planificación urbana.

## ***1.6 Diseño experimental o análisis estadístico***

### ***1.6.1 Análisis estadístico Descriptivo***

En el procesamiento de datos descargados, se empleó código en la plataforma R Studio, utilizando una escala mensual y obteniendo los datos en formato TIF, Posteriormente, en la organización de los datos en Excel, se estructuran de manera tabular clasificándolos por año y mes, permitiendo un análisis estadístico descriptivo (Promedio, Máximos, Mínimos, desviación estándar).

### ***1.6.2 Definición de ciclo anual de precipitaciones***

Se recopilan datos históricos de precipitación mensual de las 9 estaciones meteorológicas representativas, luego se calcula la precipitación promedio mensual mediante el promediado de los datos de cada mes a lo largo de los años (McKee et al., 1993). Finalmente, se representa gráficamente el ciclo anual, permitiendo identificar patrones de lluvia y sequía, claves para la gestión de recursos hídricos (Hayes et al., 2011; Wu et al., 2007).

$$P_{promedio\ mensual} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Donde  $P_{promedio\ mensual}$  es el promedio mensual de precipitaciones  $P_i$  es la precipitación mensual para el  $i$ -ésimo mes; y,  $n$  es el número total de meses. Utilizando las fórmulas estadísticas mencionadas anteriormente, se puede cuantificar la variabilidad y la intensidad de los ciclos bimodales o monomodales a lo largo de los años. (García et al., 2018).

### 1.6.3 Análisis de Tendencias

Con el fin de identificar tendencias significativas en las series temporales de precipitación, se aplicó el Test de Mann-Kendall, un análisis no paramétrico que revela cambios a lo largo del tiempo, contribuyendo a la comprensión de patrones ascendentes o descendentes (Gómez et al., 2022).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i)$$

Donde  $n$  es el número de observaciones,  $x_j$  y  $x_i$  son los valores de la serie temporal en los tiempos  $j$  e  $i$ , y  $\text{sign}$  es la función signo, se define como  $\text{Sign}(x) = 1$  si  $x > 0$ ,  $\text{sign}(x) = 0$  si  $x = 0$ , y  $\text{sign}(x) = -1$  si  $x < 0$ . Se utiliza para calcular el estadístico de prueba de Mann-Kendall, que se compara con la distribución de probabilidad para determinar la significancia (Gómez et al., 2022).

### 1.6.4 Test de Pettitt

Es una prueba no paramétrica que evalúa la existencia de cambios abruptos en series temporales, evalúa la hipótesis nula de que no hay cambio significativo en la serie temporal. el test ayuda a identificar años en los que se producen cambios de lluvia (Gómez et al., 2018).

$$U = \text{MAX} \left( \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^t \text{Sign}(X_j - X_i), \sum_{j=i+1}^n \text{Sign}(X_j - X_i) \right)$$

Donde  $n$  es el número total de observaciones,  $X_i$  y  $X_j$  son los valores de la serie temporal en los tiempos  $i$  y  $j$ , respectivamente, y  $\text{sign}$  es la función signo (García et al., 2021).

### 1.6.5 Pendiente de sen

Evalúa la significancia estadística de la pendiente de Sen utilizando pruebas de hipótesis o intervalos de confianza para determinar si la tendencia observada es estadísticamente significativa.

Un valor positivo de la pendiente de Sen indica una tendencia positiva en los datos a lo largo del tiempo, Un valor negativo indica una tendencia negativa y un valor cercano a cero sugiere la ausencia de una tendencia significativa.

$$\text{Sen's Slope} = \frac{\text{mediana}(Y_j - Y_i)}{\text{mediana}(X_j - X_i)}$$

Donde,  $i$  y  $j$  son índices que representan dos puntos distintos en la serie temporal (por ejemplo, en años consecutivos), y “mediana” denota la mediana de los valores dentro de los paréntesis. Esta fórmula evalúa la variación mediana de las diferencias entre las observaciones en  $Y$  (la variable dependiente) dividida por la variación mediana de las diferencias en  $X$  (la variable independiente).

### 1.6.6 Análisis de correlación

Posteriormente, se evalúan las relaciones temporales entre las variables mediante la aplicación del Análisis de Correlación de Pearson. Los coeficientes de correlación cercanos a 1 indican una correlación positiva fuerte, mientras que aquellos cercanos a -1 señalan una correlación negativa fuerte, y aquellos cercanos a 0 sugieren una relación débil o nula (Bonett, 2000).

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2] [n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Donde  $n$  es el número de observaciones,  $\sum xy$  es la suma de los productos de los pares de valores  $x$  e  $y$ ,  $\sum x)(\sum y)$  son las sumas de los valores de  $x$  e  $y$ , respectivamente, y  $\sum y^2 - (\sum y)^2$  son las sumas de los cuadrados de los valores de  $x$  e  $y$ , respectivamente (Martínez et al., 2021).

### **1.6.7 Análisis de Componentes Principales**

Para explorar patrones de variabilidad espacial, se realiza un Análisis de Componentes Principales (ACP), este método estadístico es una técnica estadística multivariada que transforma las variables originales en un conjunto nuevo, permite identificar las principales fuentes de variación en los datos, contribuyendo a la comprensión de patrones geoespaciales de las precipitaciones en el SFFG (Díaz et al., 2023).

$$PC_i = \sum_{j=1}^p v_{ij} X_j$$

Donde,  $PC_i$  es el componente principal  $i$ -ésimo, y  $X_j$  es el elemento  $j$ -ésimo del autovector,  $i$ -ésimo, y  $X_j$  es el valor de la variable  $j$ -ésima (Díaz et al., 2023)

### **1.6.8 Construcción de isoyetas**

Se obtiene un conjunto de datos de precipitaciones para el SFFG, estos datos proceden de las 9 estaciones, donde se determina la altitud y la ubicación de las estaciones de precipitación para identificar cómo cambia la precipitación con la altitud, posteriormente se trazan los valores de precipitación frente a la altitud y se genera una línea de tendencia. Se analiza la distribución de la precipitación por elevación en la zona de estudio (Melesse, 2019)

Por último, se crean líneas de igual precipitación, o isoyetas, trazando la distribución de los valores de precipitación en un mapa, normalmente utilizando un sistema de información geográfica (Mize et al., 2021).

### **1.6.9 Índice ONI.**

Utilizando técnicas estadísticas como el coeficiente de correlación de Pearson, se calcula la correlación entre la serie temporal de precipitación del SFFG y la serie temporal del Índice Oceánico El Niño (ONI). El coeficiente de correlación de Pearson proporciona una medida de la relación lineal entre ambas variables (IPC, 2014).

Después de calcular la correlación, se analizan los resultados obtenidos. Un coeficiente de correlación cercano a 1 indica una correlación positiva (aumento conjunto) entre la precipitación y el Índice de Oscilación del Sur, mientras que un valor cercano a -1 indica una correlación negativa (disminución conjunta). Un valor cercano a 0 sugiere una correlación débil o inexistente.

### **1.6.10 Estimación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)**

Se empleo el software "SPI\_SL\_6.exe", siguiendo las indicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012), para calcular el SPI en cada una de las 9 series de precipitación mensual.

El software aplica un procedimiento de cálculo que implica acumular la precipitación mediante una suma móvil que es de 3 y 12 meses para las escalas mensual y anual, respectivamente. Luego, se ajusta cada serie acumulada a una función de distribución gamma y se estandariza a una distribución normal con una media de 0 y una varianza de 1. De esta manera, el SPI indica cuántas desviaciones estándar se aleja el valor de precipitación acumulada de la media (McKee et al., 1993)

### **1.6.11 Análisis de tendencias extremas**

El análisis de tendencias extremas de precipitaciones es empleada para detectar la presencia de fenómenos climáticos extremos, tales como inundaciones o sequías en el SFFG está análisis se fundamenta en el estudio de registros históricos de precipitaciones, los cuales se utilizan para

identificar alteraciones significativas en la frecuencia y magnitud de dichos eventos extremos (IPCC, 2014).

### 1.7 Resultados esperados

Los Resultados esperados de la investigación se relacionan en la Tabla 1

**Tabla 1**

*Resultados de la investigación*

Objetivos Específicos	Actividades	Producto Esperado
<p><b>Caracterizar espacio-temporalmente las precipitaciones en el Santuario de Flora y Fauna Galeras-Nariño.</b></p>	<p>Recopilación de datos históricos desde la plataforma CHIRPS</p>	<p>*Base de Datos de 1986 – 2022 de precipitación organizada</p>
	<p>Establecimiento de estaciones meteorológicas</p>	<p>* Estaciones derivadas a los pixeles.</p>
	<p>Análisis estadístico descriptivo</p>	<p>*Resultados Promedio, Máximos, Mínimos, desviación estándar.</p>
	<p>Definición del ciclo anual de las precipitaciones en el SFFG</p>	<p>*Histograma y definición del ciclo anual * Mapa de isoyetas * Análisis Test de Man Kendall</p>
	<p>Análisis estadístico</p>	<p>*Análisis Test de Pettitt</p>
	<p>Medida de tendencia lineal</p>	<p>*Análisis de correlación de Pearson</p>
	<p>Especialización Bimodal trimestral</p>	<p>*Análisis de componentes principales *Pendiente de Sen</p>
	<p>Identificación de años extremos (El Niño y La Niña)</p>	<p>*Correlación entre series temporales de precipitación y el índice ONI *Divulgación de resultados</p>

Objetivos Específicos	Actividades	Producto Esperado
<p><b>Analizar los eventos extremos de precipitaciones en términos de intensidad, duración y severidad.</b></p>	<p>Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación a escala Mensual, trimestral, semestral y Anual</p>	<p>* Base de datos con la estimación del índice estandarizado de precipitación</p>
	<p>Selección de escalas SPI</p>	<p>*Capítulo que contiene los resultados y análisis de tendencias extremas.</p>
	<p>Análisis de tendencias de SPI en las escalas seleccionadas</p>	<p>*Monitoreo y evaluación de sequía.</p>
	<p>Identificación de eventos severos</p>	<p>* Identificación de cambios climáticos extremos. *Capítulo que contiene identificación de patrones climáticos *Divulgación de resultados</p>
<p><b>Determinar la influencia de la Variabilidad Climática sobre la severidad de los eventos extremos de precipitaciones en el SFFG.</b></p>	<p>Especialización de SPI en las escalas seleccionadas</p>	<p>*Base de datos e informe que contiene el análisis de tendencias climáticas</p>
	<p>Comparación con los eventos ENSO</p>	<p>*Capítulo con información que permita mejorar la preparación y la resiliencia ante estos eventos climáticos.</p>
	<p>Porcentaje de área afectada para los eventos extremos</p>	<p>*Base de datos que contiene los eventos severos de precipitación identificados</p>
	<p>Generación de conclusiones</p>	<p>*Capítulo con estrategias de mitigación a los eventos extremos.</p>
	<p>Elaboración de informe</p>	<p>*Capítulo con información que beneficie a la población y que contribuyan a las entidades competentes en la toma de decisiones *Divulgación en congresos y publicaciones</p>
<p>Resultados.</p>		

### ***1.8 Línea de investigación y área temática***

La investigación corresponde a Gestión Ambiental que es crucial para abordar la variabilidad climática, que engloba fluctuaciones naturales en el clima. Los cambios climáticos impactan los ecosistemas, la disponibilidad de recursos naturales y la calidad de vida de las comunidades, generando fenómenos extremos como el Niño o La Niña (Jones y Smith, 2020). Por lo tanto, entender y adaptarse a la variabilidad climática es fundamental para minimizar sus efectos negativos.

La aplicación de datos satelitales como CHIRPS en esta investigación es esencial, ya que proporciona información detallada sobre la precipitación tomadas a una escala mensual, permitiendo identificar tendencias climáticas, analizar riesgos y vulnerabilidades, y diseñar estrategias de adaptación (Fernández et al., 2021). Estos datos contribuyen significativamente a la toma de decisiones, fortaleciendo la capacidad de monitoreo y análisis para enfrentar los desafíos ambientales y sociales asociados con la variabilidad climática en el SFFG.

## **2 Resultados y discusión**

### ***2.1 Análisis y discusión del primer objetivo.***

#### ***2.1.1 Estaciones derivadas a los píxeles.***

Tras la recopilación y análisis de datos, se determinó que el área de estudio del SFFG requiere del análisis de 9 estaciones o píxeles, como se ilustra en la Figura 2, para abarcar de manera efectiva la extensión del área. Esto se debe a que la información satelital disponible posee una resolución espacial de aproximadamente 5,5 km y 0,05° de latitud/longitud, según los datos proporcionados por la página web de CHIRPS de la Universidad de California, Santa Bárbara. En la Tabla 2 se detallan las siglas que se utilizarán en adelante para identificar cada una de estas estaciones.

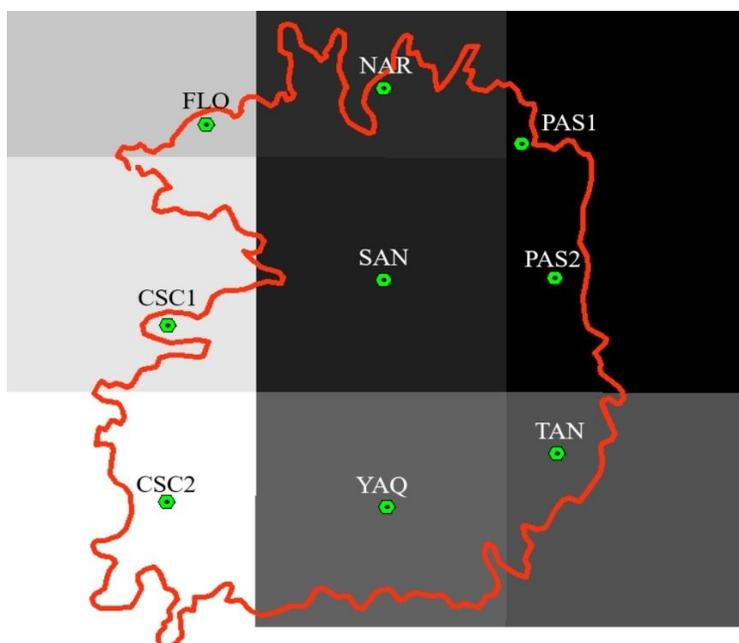
**Tabla 2**

*Nombre de las 9 estaciones del SFFG*

<b>Nombre de las estaciones</b>	<b>Siglas</b>
Florida	FLO
Nariño	NAR
Pasto 1	PAS 1
Pasto 2	PAS 2
Consacá 1	CSC 1
Consacá 2	CSC 2
Sandoná	SAN
Yacuanquer	YAQ
Tangua	TAN

**Figura 2**

*Zona de estudio y pixeles CHIRPS.*

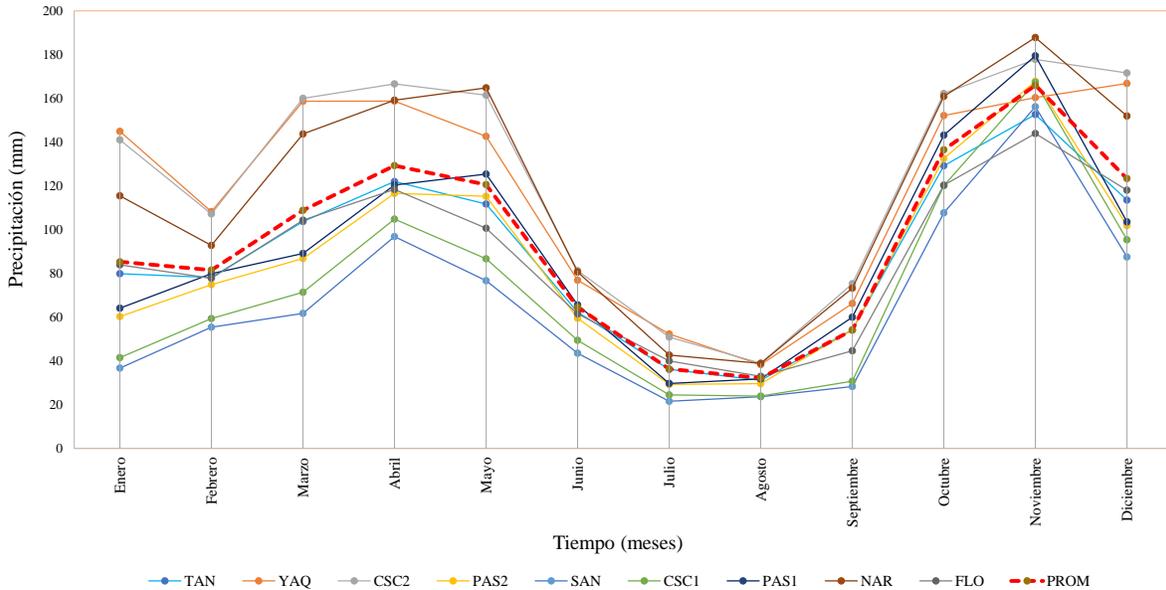


### 2.1.2 Definición del ciclo anual en el SFFG.

Con la información obtenida del área de estudio se dividió los datos por estaciones y se generó el histograma para cada una de ellas como se indica en la Figura 3 y a través de este método se definió el ciclo anual de la zona.

**Figura 3**

*Histograma y definición del ciclo anual*



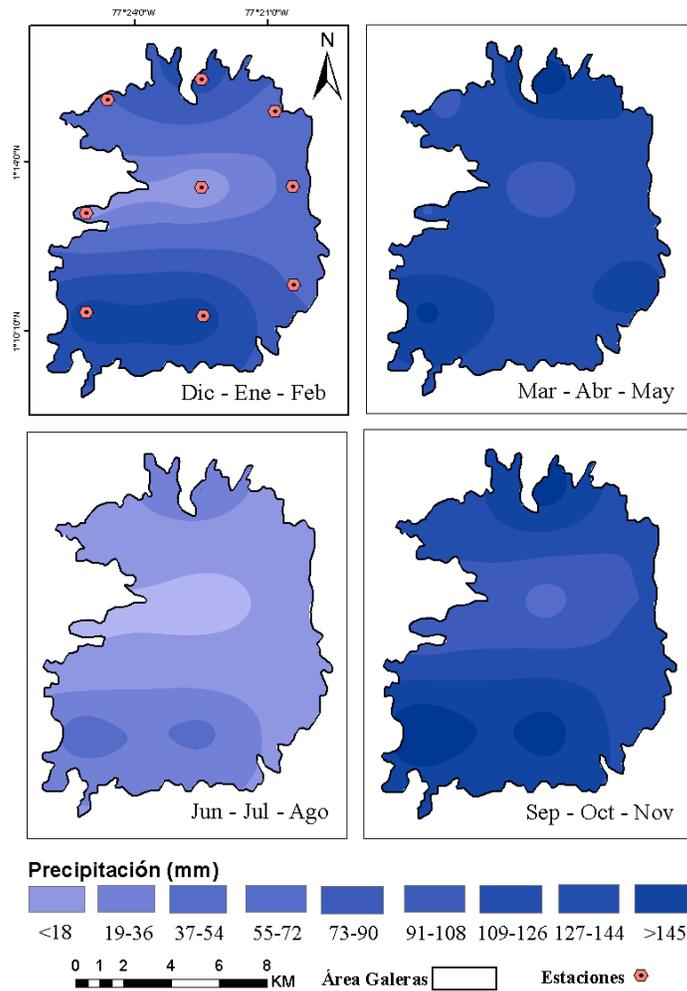
A partir de este punto se puede observar que para el SFFG el ciclo anual es bimodal debido a la forma del histograma, lo cual se puede contrastar donde Bradley et al., (2009) describen el ciclo bimodal de lluvias en Nariño y lo atribuyen a que la zona de convergencia intertropical (ZCIT) se desplaza hacia el norte y hacia el sur a través del ecuador dos veces al año. Considerando los períodos lluviosos y secos Diciembre-Enero – Febrero (DEF), Marzo a Mayo (MAM) o, Junio a Agosto (JJA) y Septiembre a Noviembre (SON). Estos períodos se definieron con base en el ciclo anual de precipitación.

### 2.1.3 Análisis espaciotemporal de la precipitación

Se elaboraron isoyetas estacionales trimestrales (Figura 4) con el propósito de complementar el análisis temporal previo, proporcionando así una descripción detallada del comportamiento espaciotemporal de la precipitación en el SFFG.

**Figura 4**

*Mapa de isoyetas estacionales SFFG*



### 2.1.4 Análisis de Tendencia

Se aplica el test como se observa en la Tabla 3, con el fin de evaluar la tendencia en la serie de los datos, aplicando 2 hipótesis, la  $H_0$ : donde los datos no presentan tendencia y la  $H_a$ : donde si presentan tendencia + o -, con un p-valor 0.05 para aceptar o descartar la misma para cada estación. Seguido se aplica la pendiente de Sen's la cual confirma si la tendencia es creciente o decreciente y por último el test de Pettit el cual puede indicar si existe un punto de cambio específico en la serie de datos o si las variables no presentan cambios, de igual manera aplicando las 2 hipótesis con el mismo p-valor de 0.05 para su respectivo análisis.

Para las 9 estaciones analizadas mediante el test de Mann-Kendall, se identificó que los píxeles (Pas2) y (Tan) presentan una tendencia significativa. Al aplicar la pendiente de Sen, se determinó que ambas estaciones muestran una tendencia negativa o decreciente. Sin embargo, al realizar el test de Pettitt, solo en el píxel (Tan) se detecta un punto de cambio específico, como se observa en la Figura 5, donde el comportamiento de la serie temporal evidencia un cambio abrupto en un momento determinado. En contraste, el píxel (Pas2) no presenta un cambio específico en su tendencia, manteniendo una distribución estable con un parámetro de ubicación constante.

**Tabla 3**

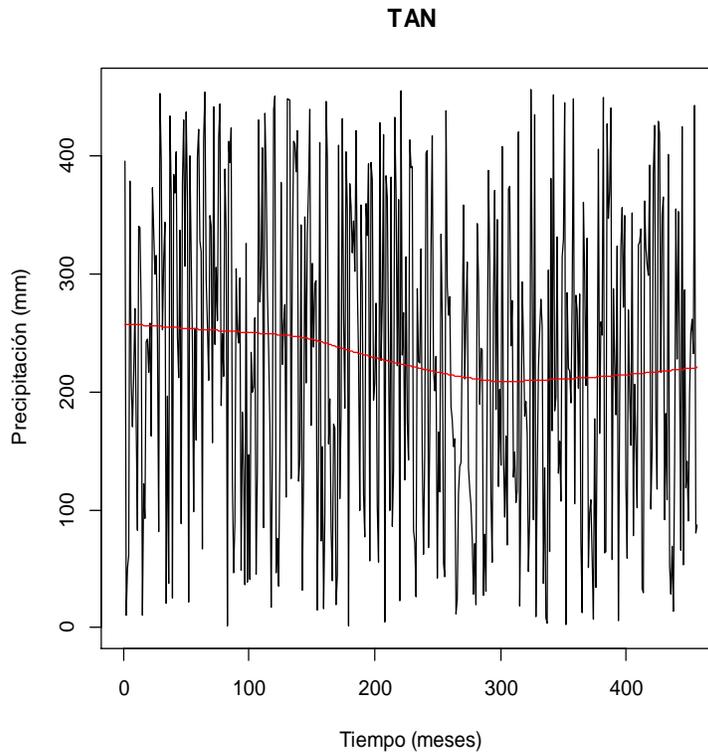
*Análisis de tendencia*

Test Mann Kendall							
Estación	P Valor	H0	Ha	Pend. Sen's	Pettitt	H0	Ha
<b>Flo</b>	0.2251	X		-0.0631	0.1077	X	
<b>Nar</b>	0.8938	X		-0.09	0.7393	X	
<b>Pas1</b>	0.05801	X		-0.094	0.1333	X	
<b>Csc1</b>	0.3866	X		-0.045	0.6848	X	
<b>SAN</b>	0.2316	X		-0.061	0.08466	X	
<b>PAS2</b>	0.02496		X	-0.113	0.05144	X	
<b>CSC2</b>	0.9845	X		-0.0033	0.9306	X	
<b>YAQ</b>	0.9953	X		-0.0029	1	X	
<b>TAN</b>	0.01561		X	-0.119	0.005416		X

En la Figura 5, se representa la precipitación en milímetros (mm) a lo largo del tiempo, donde abarca 400 meses equivalentes a los 36 años del periodo de estudio, la línea roja representa la tendencia a lo largo del tiempo e incluida a través de la pendiente de Sen's. Se toma como referencia la estación de Tangua (Tan) ya que al aplicar las pruebas estadísticas de la Tabla 3 solo esta presenta un punto de cambio en el mes de Julio del año 1998 luego de realizar Pettit, lo anterior se debe a que las precipitaciones anteriores a la fecha eran mayores a 100 mm mes y a partir de la fecha hubo una caída a 36 mm mes y se mantuvo durante 5 meses en valores similares, únicamente se registra este evento en Tan debido a que por el sector donde se ubica la estación y según Rojas y Mancillo, (2019) mencionan que el municipio de Tangua para el año 1998 sufrió una fuerte sequía que condujo a la pérdida de cultivos y al incremento en un 25% de incendios forestales.

**Figura 5**

*Análisis de tendencia TAN*



### 2.1.5 Análisis de correlación

Con lo anterior también se procede a realizar los análisis de correlación por el método de Pearson como se indica en la Tabla 5 con el fin de evaluar el comportamiento de los datos.

**Tabla 4**

*Análisis de correlación de Pearson*

	<i>FDA</i>	<i>NAR</i>	<i>PAS1</i>	<i>CSC1</i>	<i>SAN</i>	<i>PAS2</i>	<i>CSC2</i>	<i>YAQ</i>	<i>TAN</i>	<i>PROM</i>
<i>FDA</i>	1,00	0,96	0,93	0,92	0,92	0,95	0,96	0,96	0,99	0,98
<i>NAR</i>	0,96	1,00	0,95	0,91	0,88	0,95	0,98	0,95	0,97	0,98
<i>PAS1</i>	0,93	0,95	1,00	0,97	0,96	0,99	0,89	0,85	0,96	0,97
<i>CSC1</i>	0,92	0,91	0,97	1,00	0,99	0,97	0,84	0,81	0,94	0,95
<i>SAN</i>	0,92	0,88	0,96	0,99	1,00	0,97	0,84	0,80	0,94	0,94
<i>PAS2</i>	0,95	0,95	0,99	0,97	0,97	1,00	0,91	0,87	0,98	0,98
<i>CSC2</i>	0,96	0,98	0,89	0,84	0,84	0,91	1,00	0,99	0,96	0,97
<i>YAQ</i>	0,96	0,95	0,85	0,81	0,80	0,87	0,99	1,00	0,95	0,94
<i>TAN</i>	0,99	0,97	0,96	0,94	0,94	0,98	0,96	0,95	1,00	0,99
<i>PROM</i>	0,98	0,98	0,97	0,95	0,94	0,98	0,97	0,94	0,99	1,00

El análisis se realizó entre cada una de las estaciones teniendo resultados de una correlación positiva siendo todas cercanas a 1, de esta manera entre más oscuro sea el color verde en la tabla, mayor correlación existe entre las variables, los colores más claros como en el caso de las estaciones SAN y YAQ su correlación sigue siendo positiva pero como se aprecia en la Tabla 4 son puntos que cuentan con una mayor dispersión entre los puntos de la media como se aprecia en la Figura 6 y hace que su correlación sea inferior.

Para Banerjee et al., (2015) en una zona pequeña, es plausible que los datos de correlación obtenidos mediante el método de correlación de Pearson sean similares y cercanos a 1. Esto se debe a que es probable que una zona pequeña tenga un entorno relativamente uniforme, lo que puede dar lugar a una fuerte correlación entre las variables medioambientales. Del mismo modo Glenn-Lewin et al., (1982) los autores hallaron fuertes correlaciones positivas entre las variables en zonas de Humedales Pequeñas, sin embargo, también observaron que en otras zonas más extensas las correlaciones eran más débiles debido a la mayor variabilidad de los factores ambientales.

### ***2.1.6 Análisis de componentes principales***

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es un modelo estadístico utilizado para reducir la dimensionalidad de los datos manteniendo la mayor parte de la variabilidad. Hotelling (2016) destaca cómo el ACP permite simplificar los cálculos mediante la identificación de las observaciones más significativas. En este análisis, se implementó un código en R para generar el ACP, obteniendo la Tabla 5, la cual muestra los valores propios y la varianza explicada y a través de los resultados seleccionar el número de componentes principales a analizar.

**Tabla 5**

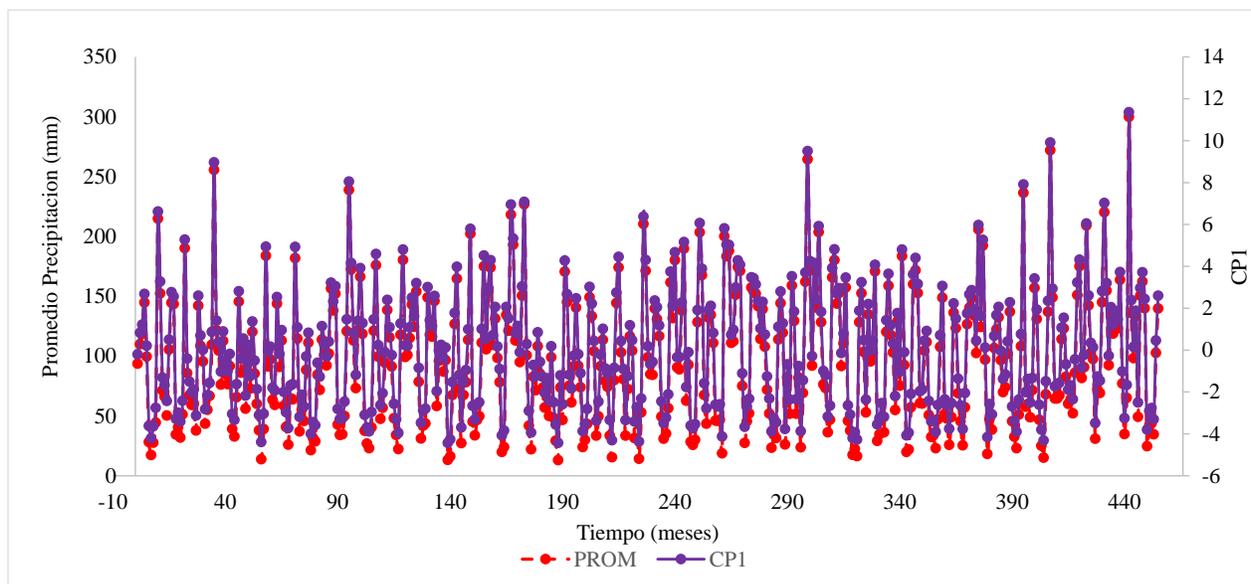
*Resultado del análisis de componentes principales*

<b>Valores Propios</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>	<b>CP5</b>
	8.45413	0.41488	0.07714	0.02407	0.01638

Varianza Explicada	Invertida (%)				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	93.93	4.60	0.85	0.26	0.18

Como se aprecia en la anterior tabla el ACP arroja que se puede sintetizar la información de las 9 estaciones en un único factor, el cual representa el 93.93% de la varianza que indica que casi la totalidad de la información relevante en los datos originales se concentra en esta única componente principal. Por lo tanto, la mayor parte de las variaciones y patrones en el conjunto de datos puede ser descrita por esa componente, lo que es ideal para aplicar sin perder mucha información. Según Jolliffe, (2002) si una componente principal explica más del 80-90% de la varianza, se considera que esa componente captura de manera adecuada las estructuras subyacentes de los datos. Además, en la figura 6 se puede apreciar como el ACP se adapta perfectamente al promedio de las precipitaciones.

**Figura 6**  
**Comparación del promedio de las estaciones y el ACP**



Cómo se evidencia en la Figura 6 el Componente principal 1 (CP1) es igual al promedio obtenido de todas las estaciones por lo cual se trabajará en adelante únicamente con la información del promedio de todas las estaciones ya que esta se ajusta al modelo del ACP

### **2.1.7 Índice ONI**

El monitoreo del Índice (ONI) en un área protegida es importante porque puede ayudar a predecir las variaciones climáticas que afectan la flora y fauna de la zona protegida, García et al., (2013) los autores han demostrado que el ONI puede ser utilizado como un indicador para predecir la variabilidad de la lluvia y la temperatura en zonas del santuario, lo que puede ayudar a tomar medidas preventivas para proteger las especies y hábitats en la región. Además, el monitoreo del ONI también puede ser útil en la predicción de eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones, y la toma de decisiones adecuadas para minimizar el impacto de estos eventos en el lugar de estudio.

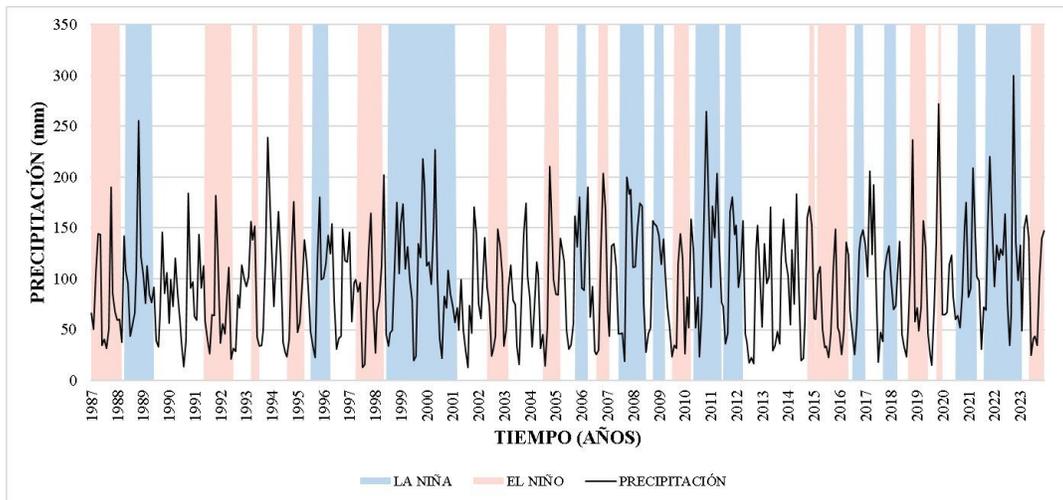
En la Figura 7 se presentan datos de precipitación en milímetros, desde 1987 hasta 2023. La línea del gráfico muestra fluctuaciones, con picos que representan años de alta precipitación y valles indicando años con menos precipitación. Durante los períodos de 1987-1988, 1991-1992, 1993, 1997-1998, y 2023, se registraron prolongadas fases de El Niño en la región de Nariño, específicamente en el Santuario de Flora Galeras. Asimismo, durante los periodos comprendidos entre 1988-1989, 1996, 1999-2001, 2006, 2008-2009, 2011-2012, 2017-2018, y 2021-2023, uno de los periodos a destacar donde se demostró una prolongada fase de El Niño fue durante los años 2015-2016, donde se evidenció un periodo extenso de este fenómeno.

Además, uno de los periodos entre 1999-2001 es uno de los más extensos en los que se han registrado eventos de la fase La Niña en el departamento de Nariño. En un informe de la época de la oficina de gestión del riesgo de Nariño, se mencionó que, en 2000 el sector Circunvalar Galeras experimentó intensas lluvias que causaron deslizamientos de tierra y daños significativos a las vías de acceso, afectando la movilidad de las comunidades de Pasto y otras áreas circunvecinas, las

inundaciones llevaron a evacuaciones en varias aldeas aledañas (Instituto de Gestión del Riesgo de Nariño, 2001). La Niña se caracteriza por tener una temperatura del agua más fría, la cual puede influir en los patrones climáticos globales (Palacio-Prieto et al., 2019). Esto puede provocar cambios en la distribución de las temperaturas, los patrones de viento y los niveles de precipitación en diferentes regiones. En el caso de Nariño, se tradujo en una reducción significativa en las precipitaciones y un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como inundaciones y deslizamientos de tierra.

**Figura 7**

*Índice ONI*



Tanto el fenómeno de El Niño como el de La Niña pueden tener impactos tanto positivos como negativos en la flora y fauna del SFFG. En particular, se ha demostrado que el evento climático de El Niño puede tener impactos negativos en la avifauna del bosque del SFFG, según un estudio realizado por Velásquez et al., (2015). Durante un evento de El Niño, la disponibilidad de alimento para las aves puede reducirse debido a la disminución de la producción de frutos y semillas. Además, la sequía durante este evento también puede afectar la calidad de los cuerpos de agua y los suelos del SFFG.

El fenómeno de El Niño, que se caracteriza por el calentamiento anómalo de las aguas del océano Pacífico, tuvo un impacto significativo en Colombia y, en particular, en el departamento de Nariño durante el periodo de 1992-1993. Durante este tiempo, las condiciones de sequía y el impacto en la agricultura, la disponibilidad de agua y los ecosistemas fueron notorias los municipios de pasto se experimentó reducción en las lluvias, lo que afectó las fuentes de agua y la agricultura local. La falta de agua tuvo repercusiones en la producción de cultivos como maíz, arveja y frijol (El Tiempo 1993)

El fenómeno de El Niño de 2004-2005 tuvo un efecto notable en el departamento de Nariño, especialmente en Pasto la capital del departamento sufrió desabastecimiento de agua y problemas en la agricultura debido a la falta de lluvias (IDEAM, 2005). En la Florida la falta de agua afectó los cultivos y el suministro local, llevando a preocupaciones sobre la seguridad alimentaria (González, M., et al., 2005).

En el año 2023, el fenómeno de El Niño tuvo un impacto notable, uno de los impactos más significativos fue la sequía agrícola. La falta de lluvias afectó los cultivos fundamentales en Nariño, incluyendo café, maíz y hortalizas, lo que resultó en la disminución de la producción agrícola y, por ende, en la reducción de ingresos para los agricultores locales. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (2023), las sequías derivadas del fenómeno de El Niño representaron un riesgo considerable para la seguridad alimentaria en varios municipios de Nariño. Además, el fenómeno también provocó un desabastecimiento de agua en diversas comunidades. La disminución en las precipitaciones llevó a una crisis en el suministro de agua potable, afectando principalmente a áreas rurales donde la infraestructura es limitada (IDEAM, 2023) reportó que las condiciones de sequía han generado tensiones significativas en el acceso al agua en varias regiones del país. En el ámbito de la salud pública, las condiciones adversas han propiciado el aumento de enfermedades relacionadas con la falta de agua y la calidad del aire (Universidad Nacional de Colombia., 2023)

En cuanto al impacto del fenómeno de La Niña, un estudio de Guerrero-López et al., (2017) encontró que La Niña puede tener efectos positivos en la diversidad y la abundancia de anfibios en el SFFG. Durante este evento climático, la disponibilidad de agua y la calidad de los cuerpos de

agua mejora, lo que beneficia a la fauna acuática, por lo tanto, también beneficia a los anfibios. Durante La Niña, las precipitaciones pueden aumentar en algunas áreas, lo que podría provocar inundaciones y deslizamientos de tierra en la región. Además, el aumento de la cantidad de agua en los ríos y arroyos puede tener un impacto negativo, lo que puede afectar la biodiversidad del SFFG.

Entre 1999 y 2001, Nariño experimentó una serie de eventos climáticos conocidos como la triple Niña, que se caracterizó por condiciones adversas en el clima, afectando especialmente la agricultura, la infraestructura y la seguridad alimentaria en municipios como los de la Circunvalar Galeras. Durante este periodo, se registraron lluvias excesivas que provocaron deslizamientos de tierra e inundaciones, afectando severamente a las comunidades locales.

En particular, los municipios de la Circunvalar Galeras, situados en zonas montañosas y vulnerables, sufrieron pérdidas significativas en la producción agrícola y daños en la infraestructura vial. Según el IDEAM, los efectos de estos fenómenos fueron notables en los sectores agrarios, que ya sufrían de variabilidad climática (IDEAM, 2001).

La triple Niña también llevó a un incremento en las enfermedades relacionadas con el clima y afectó la salud pública en Nariño. Investigaciones han documentado que la variabilidad climática no sólo impacta el ambiente físico, sino que también tiene implicaciones directas en la salud de la población (Ramírez, 2003).

Entre 1999 y 2001, varios municipios en el departamento de Nariño se vieron severamente afectados por las intensas lluvias, deslizamientos de tierra e inundaciones. Algunos de los municipios más impactados fue Nariño, el cual, al estar ubicado en una región montañosa y biodiversa, sufrió un incremento significativo en las precipitaciones. Estos episodios de lluvia intensa, provocados por La Niña, llevaron a inundaciones y deslizamientos de tierra que afectaron varias comunidades (IDEAM, 2001). Las inundaciones en la capital del departamento causaron daños significativos en la infraestructura vial y en algunas viviendas (IDEAM, 2001).

En Consacá y Sandoná las fuertes lluvias generaron problemas en la agricultura, pues muchos cultivos sufrieron de enfermedades y pérdidas significativas. Los cultivos de café, maíz y frijoles,

que son fundamentales para la economía local, se vieron comprometidos, lo cual exacerbó la inseguridad alimentaria en la región (Ramírez, 2003). La situación llevó a la implementación de medidas de emergencia por parte del gobierno local y nacional, buscando mitigar los efectos del fenómeno. Sin embargo, la respuesta fue limitada por la magnitud de los daños y la cantidad de áreas afectadas (Cruz Roja Colombiana, 2002).

Según (IDEAM, 2012) el fenómeno de La Niña entre 2011-2012 generó un incremento en la precipitación de entre el 20% y el 50% en comparación con el promedio histórico durante varios meses (IDEAM, 2012). Estos eventos provocaron el desbordamiento de ríos y perjudicaron a miles de familias, dañando viviendas y cultivos, lo que llevó a la declaración de la calamidad pública en varios municipios (Cruz Roja Colombiana, 2011). La capital de Nariño experimentó inundaciones significativas que afectaron tanto la infraestructura urbana como las áreas rurales circundantes. En la Florida experimentaron deslizamientos de tierra que afectaron la movilidad y la seguridad de las familias en la zona. Estos eventos climáticos generaron la declaración de calamidad pública en varios de estos municipios, y los daños materiales, así como la pérdida de vidas, tuvieron un considerable impacto en la región durante ese período (IDEAM, 2012). Según un estudio de Romero et al. (2019), durante La Niña en los periodos 2011-2012, hubo un aumento en la turbidez del agua en algunos arroyos del SFFG debido a las fuertes lluvias y al arrastre de sedimentos, esta situación generó un impacto negativo en la comunidad que se beneficia del recurso hídrico.

Para los años 2020-2023 Según el IDEAM, algunas zonas de Nariño registraron aumentos de hasta un 200% en comparación con el promedio histórico durante los episodios de La Niña, varios municipios de Nariño experimentaron efectos significativos debido a este fenómeno, principalmente en términos de lluvias intensas, deslizamientos de tierra y problemas en la agricultura.

## **2.2 Análisis y discusión del segundo objetivo**

### **2.2.1 Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación a escala Mensual, trimestral, semestral y Anual**

El software "SPI\_SL\_6.exe" se utilizó para calcular el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en cada uno de los 9 píxeles, siguiendo las indicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012). Se empleó el promedio de la precipitación mensual, y se seleccionaron las series trimestral y anual para evaluar el comportamiento a corto y largo plazo, con el objetivo de observar variaciones y evidenciar los diferentes impactos de los fenómenos ENSO a lo largo del periodo de estudio.

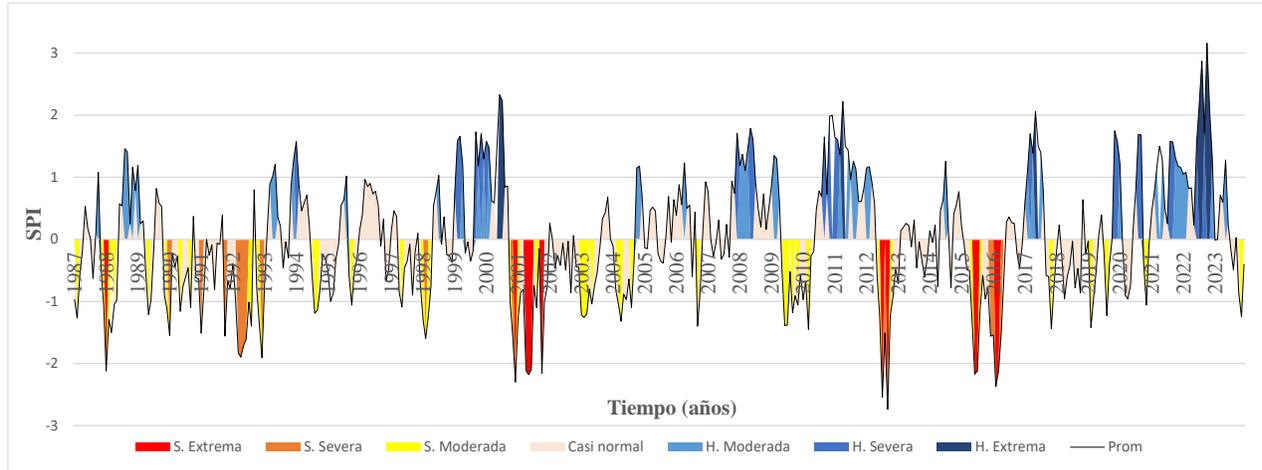
### **2.2.2 Análisis de tendencias de SPI en las escalas seleccionadas**

Para el análisis de SPI se tomaron datos a escalas trimestrales y anuales, ya que los estudios trimestrales pueden ayudar a identificar patrones estacionales en la cantidad y distribución de la lluvia, lo que es crucial para la planificación agrícola, la gestión del agua y la preparación para eventos climáticos extremos (Hulme, 2003), mientras que los anuales pueden revelar tendencias climáticas significativas que afecten la sostenibilidad y la resiliencia de la región indicando si hay una tendencia hacia una predominación de las precipitaciones o de la sequía, lo que puede conllevar a importantes implicaciones para la gestión de recursos y la planificación del desarrollo (Schneider et al., 2010).

En las Figuras 8 y 9 se puede observar una representación gráfica a escala trimestral y anual donde se muestra el comportamiento Trimestral (SPI) desde 1987 hasta 2023, evidenciando fluctuaciones entre periodos de sequía y exceso de humedad. Los valores positivos indican periodos húmedos, mientras que los negativos representan sequías. Los eventos más extremos se observan en los años 1991, 2001, 2009 y 2016 para las sequías, y en 2000, 2011 y 2022 para los excesos de precipitación. Este tipo de fluctuaciones suele estar relacionado con fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña, que afectan directamente los patrones de precipitación de muchas regiones del mundo (Schneider et al., 2010).

**Figura 8**

*Índice estandarizado de precipitaciones Trimestral*



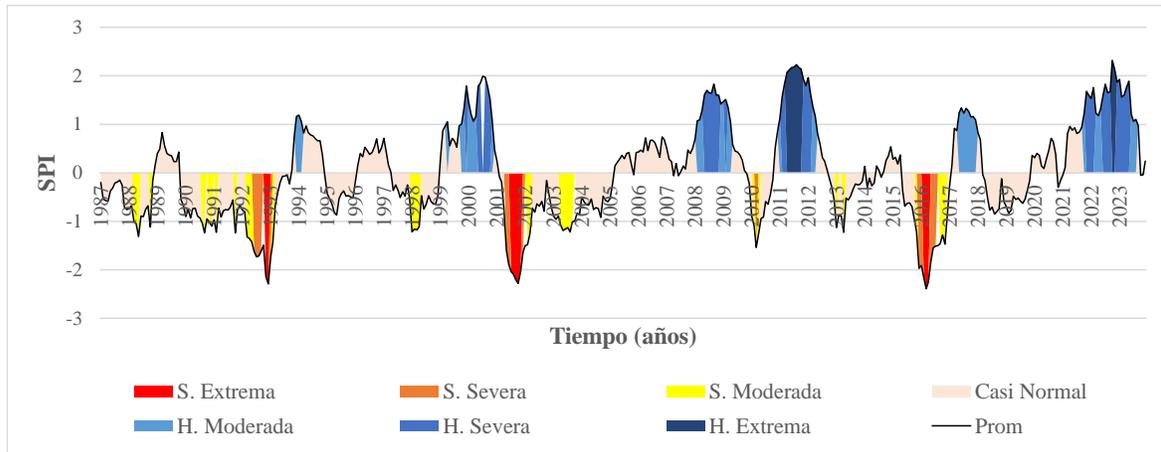
Los eventos de El Niño de intensidad muy fuerte observados trimestral y anual, en los que se generó un calentamiento de la superficie del océano Pacífico tropical mayor a 2 °C, presentados en los años 2001-2002 y 2015-2016 están relacionados con los eventos de sequía de mayor intensidad y magnitud crítica.

Por otro lado, los eventos de La Niña para el año 2011, cuando las intensas lluvias causaron inundaciones y deslizamientos de tierra en varios municipios de Nariño, incluyendo Pasto y Túquerres IDEAM (2015), se registraron cerca de 50 muertes y 57 personas desaparecidas, así como cientos de afectados y miles de viviendas dañadas, según informes de la (UNGRD y la Cruz Roja Colombiana, 2011).

A su vez en la Figura 9, otro evento de alta magnitud se registró durante el año 2018, cuando intensas lluvias provocaron desbordamientos de ríos y deslizamientos de tierra en todos los municipios de la zona de estudio. De nuevo, cientos de viviendas resultaron afectadas y se reportaron varios heridos, según reportes de la UNGRD y el Centro de Información de las Naciones Unidas para Colombia (CINU, 2017).

**Figura 9**

*Índice estandarizado de precipitaciones Anual*



Se resalta de las Figuras 10 y 11 a evolución temporal de los eventos extremos a escala trimestral y anual donde se representan los eventos de sequía y precipitaciones. Durante los últimos 10 años, Nariño ha experimentado eventos climáticos extremos, incluyendo inundaciones y deslizamientos de tierra, así como periodos de sequía en algunos sectores, según informes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), el departamento de Nariño experimentó fuertes precipitaciones en el año 2018, lo que generó deslizamientos de tierra e inundaciones en varias zonas (IDEAM, 2018).

Sin embargo, en algunos sectores de la región también se han experimentado sequías en los últimos años, los municipios de Túquerres y La Florida se presentaron sequías en el año 2016 en los meses de Mayo a Octubre lo que afectó duramente a los sectores agrícolas y ganaderos (El Tiempo, 2016).

### **2.2.3 Identificación de eventos.**

La determinación de la frecuencia relativa de la intensidad y de la severidad de la sequía meteorológica se consiguió a partir del procesamiento en Excel de las series de SPI a escala

trimestral y anual. Por su parte, la intensidad de la sequía se obtuvo identificando en cada estación la cantidad de registros mensuales en los cuales el SPI mostrara valores indicativos de sequía  $\leq -1$ .

Con la Tabla 6 y Tabla 7, se determinó los eventos de mayor magnitud para su posterior especialización y de esta manera tener un mayor detalle del comportamiento de la sequía y la humedad, además se toma un lapso de tiempo antes y después de iniciar los eventos con el fin de apreciar los cambios pre y post evento.

**Tabla 6**

*Identificación de eventos a escala trimestral sequia*

N°	Inicio	Fin	Duración	Mes pico		Severidad
				Mes	Magnitud	
1	dic-87	abr-88	5	ene-88	2.12	10.6
2	dic-89	ene-90	2	ene-90	1.55	3.1
3	mar-92	ago-92	6	abr-92	1.9	11.4
4	nov-92	dic-92	2	dic-92	1.91	3.82
5	ene-98	mar-98	3	feb-98	1.6	4.8
6	oct-00	ene-01	4	dic-00	2.3	9.2
7	abr-01	jun-01	3	may-01	2.8	8.4
8	ago-01	ago-01	1	ago-01	1.1	1.1
9	oct-01	nov-01	2	oct-01	2.16	4.32
10	ene-03	mar-03	3	feb-03	1.26	3.78
11	may-03	may-03	1	may-03	1.04	1.04
12	mar-04	abr-04	2	abr-04	1.32	2.64
13	ago-04	ago-04	1	ago-04	1.1	1.1
14	jun-12	oct-12	5	sep-12	2.74	13.7
15	may-15	ago-15	4	jun-15	2.17	8.68
16	dic-15	abr-16	5	feb-16	2.37	11.85

La Tabla 6 indica los eventos de sequía a escala trimestral (SPI ) que ocurrieron en el área de estudio desde diciembre de 1987 hasta diciembre de 2015, destacando la duración, magnitud, mes pico y severidad de cada evento. El evento de mayor severidad ocurrió entre diciembre de 2015 y

febrero de 2016, con una severidad de 11.85, mientras que el evento más prolongado duró seis meses, entre marzo de 1992 y agosto de 1992, con una magnitud de 1.9.

Los eventos de sequía tienden a repetirse en intervalos irregulares, y algunos coinciden con los eventos de El Niño, como lo documentan estudios previos (Poveda, 2004; Loaiza Cerón et al., 2020). El evento de enero de 1998, que coincide con uno fuerte Niño, lo que presentó una magnitud de 2.38 y una severidad considerable de 9.2. Según Poveda., (2004) los eventos de El Niño intensifican las condiciones de sequía en diversas partes de Colombia, lo que coincide con los picos de severidad observados en la tabla.

**Tabla 7**

*Identificación de eventos a escala trimestral humedad*

N°	Inicio	Fin	Duración	Mes pico		Severidad
				Mes	Magnitud	
1	feb-99	abr-99	3	mar-99	1.66	4.98
2	sep-99	feb-00	6	sep-99	1.73	10.38
3	may-00	jul-00	3	jun-00	2.33	6.99
4	dic-07	jun-08	7	may-08	1.79	12.53
5	feb-09	mar-09	2	feb-09	1.35	2.7
6	nov-10	ago-11	10	abr-11	2.22	22.2
7	feb-17	jul-17	6	may-17	2.6	15.6
8	nov-19	ene-20	3	nov-19	1.75	5.25
9	mar-21	may-21	3	abr-21	1.5	4.5
10	ago-21	feb-22	7	ago-21	1.58	11.06
11	jun-22	dic-22	7	oct-22	3.16	22.12

La Tabla 7 muestra eventos de humedad a escala trimestral (SPI), donde se observa que el evento más severo ocurrió entre junio y diciembre de 2022, con una severidad de 22.12, mientras que el evento más prolongado duró siete meses. Estos eventos coinciden con episodios de La Niña, que suelen asociarse a excesos de precipitación, tal como se documenta en estudios de Poveda (2004) y Loaiza Cerón et al. (2020).

Igualmente se refleja un patrón de eventos de humedad con variaciones en magnitud y duración, siendo el evento de marzo a mayo de 2017 uno de los más severos con un SPI de 15.6. Este comportamiento está alineado con lo observado por el IDEAM y UNAL (2018), que han señalado que los fenómenos de La Niña provocan periodos prolongados de alta precipitación en diversas regiones de Colombia, lo que puede generar impactos significativos en los sistemas hídricos.

**Tabla 8**

*Identificación de eventos a escala anual sequia*

N°	Inicio	Fin	Duración	Mes pico		Severidad
				Mes	Magnitud	
<b>1</b>	mar-88	may-88	3	may-88	1.31	3.93
<b>2</b>	oct-88	oct-88	1	oct-88	1.12	1.12
<b>3</b>	ago-90	sep-91	2	sep-91	1.24	2.48
<b>4</b>	nov-90	dic-90	2	dic-90	1.10	2.2
<b>5</b>	feb-91	feb-91	1	feb-91	1.23	1.23
<b>6</b>	mar-92	feb-93	12	dic-92	2.29	27.48
<b>7</b>	ene-98	abr-98	4	ene-98	1.22	4.88
<b>8</b>	may-01	mar-02	11	oct-01	2.28	25.08
<b>9</b>	abr-03	sep-03	6	ago-03	1.22	7.32
<b>10</b>	feb-10	abr-10	3	mar-10	1.54	4.62
<b>11</b>	nov-15	nov-16	13	mar-16	2.39	31.07

La Tabla 8 indica eventos de sequía a escala anual utilizando el SPI a escala anual y se puede observar la prolongada sequía de marzo de 1992 a febrero de 1993, con una duración de 12 meses, una magnitud de 2.29 y una severidad extremadamente alta de 27.48, siendo el evento más severo registrado. Esta situación contrasta con eventos más breves, como el de octubre de 1988, que duró solo un mes y presentó una magnitud y severidad mucho menor.

**Tabla 9**

*Identificación de eventos a escala anual humedad*

N°	Inicio	Fin	Duración	Mes pico		Severidad
				Mes	Magnitud	
1	oc-99	nov-00	14	jul-00	1.99	27.86
2	feb-08	abr-09	15	sep-08	1.83	27.45
3	ene-11	abr-12	16	ago-11	2.23	35.68
4	may-17	dic-17	8	jun-17	1.34	10.72
5	oct-21	ago-23	23	oct-22	2.32	53.36

En la Tabla 9 se presenta eventos de humedad a escala anual, destacando los eventos más significativos en términos de magnitud y severidad en el SFFG. El evento más notable es el que comenzó en octubre de 2021 y finalizó en agosto de 2023, con una magnitud de 2.32 y una severidad máxima de 53.36, lo que indica un periodo extremadamente húmedo, posiblemente con importantes impactos en la saturación de los suelos y el exceso de agua superficial. Este evento contrasta con otros periodos menos severos, como el registrado entre mayo y diciembre de 2017, con una magnitud y severidad considerablemente menores 1.34 y 10.72.

Según Lloyd-Hughes y Saunders., (2002), quienes destacan que el SPI es una herramienta confiable para cuantificar tanto los eventos de sequía como de humedad. Según estos autores, los eventos húmedos prolongados y severos, como el de 2021-2023, pueden generar problemas como inundaciones y daños a la infraestructura, lo que resalta la importancia de monitorear no solo los periodos de sequía, sino también aquellos de exceso hídrico.

## 2.3 Análisis y discusión del Tercer objetivo

### 2.3.1 Espacialización de SPI en las escalas seleccionadas

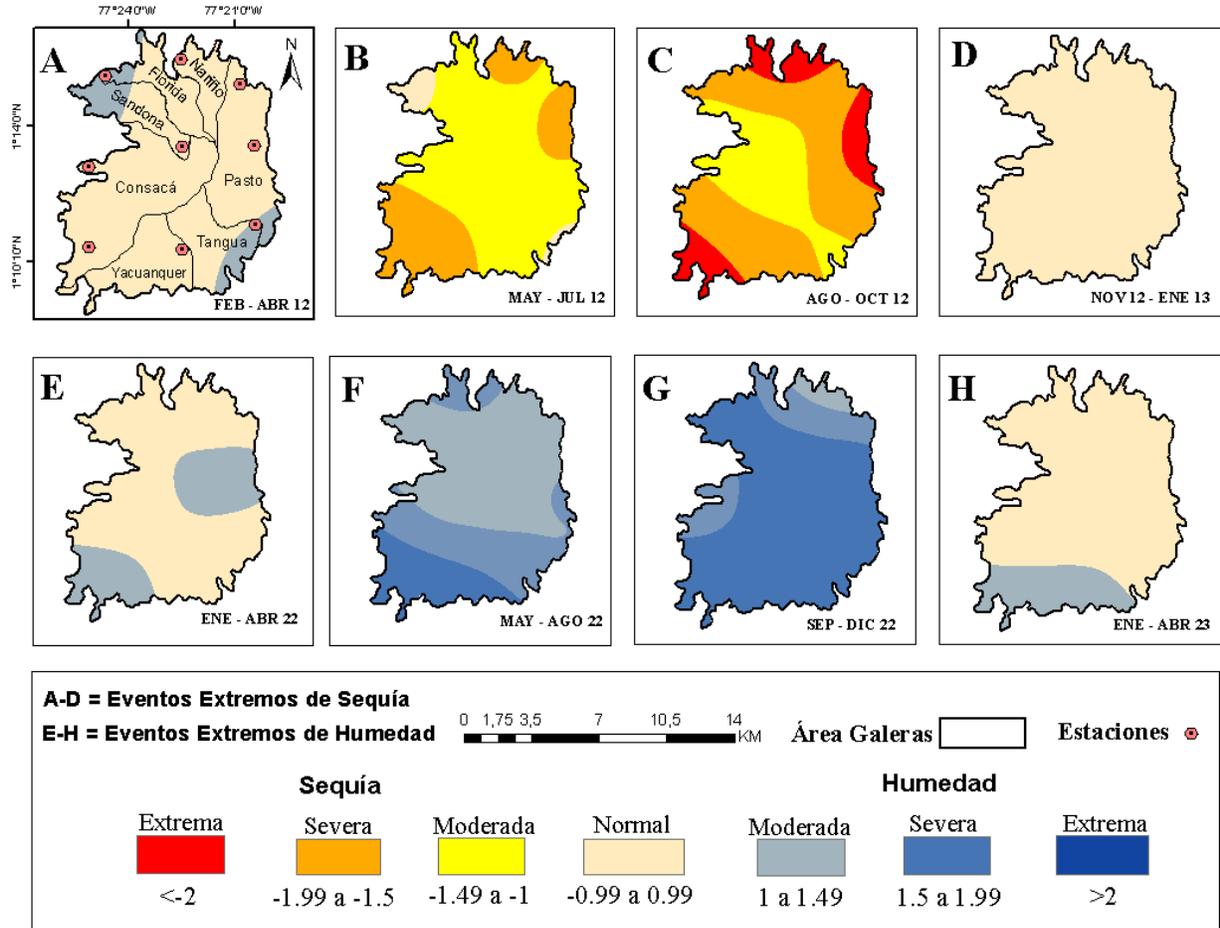
La espacialización del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) mediante el programa ArcGIS genera representaciones fundamentales para la planificación y gestión de recursos hídricos, ya que

proporciona información geoespacial que ayuda a tomar decisiones y a implementar medidas específicas en áreas vulnerables (Schneider et al., 2010). Además, estas herramientas permiten un seguimiento continuo de las condiciones climáticas extremas, ayudando a predecir y mitigar los impactos de fenómenos como las sequías prolongadas o los periodos de lluvias intensas (Hulme, 2003).

En la Figura 10 se observa que, durante los meses de mayo a octubre, según Evolución temporal de los eventos extremos trimestral, se evidencia una marcada sequía en el SFFG. Los tonos rojos oscuros denotan una sequía extrema, mientras que los amarillos indican una sequía severa. Esta situación podría tener un impacto negativo en diversos aspectos como la agricultura, los recursos hídricos y la vegetación local, dado que las cosechas podrían verse afectadas y los embalses disminuidos, sin embargo, es importante destacar que también se observa variabilidad en la humedad durante esos mismos meses en la región estudiada (IDEAM, 2015). Los tonos azules oscuros reflejan una humedad extrema, mientras que los blancos indican una humedad moderada. La humedad juega un papel vital en aspectos como la salud de la vegetación, la recarga de los acuíferos y la calidad del suelo (IPCC, 2014).

**Figura 10**

*Evolución temporal de los eventos extremos trimestral*



La sequía puede afectar significativamente la calidad del agua y la biodiversidad en el SFFG, una de las zonas más afectadas es la ciudad de Pasto representada en el mapa B considerado como sequía extrema y severa en los meses de Enero a Mayo del año 2016. Según un estudio de Vergara-Valencia et al., (2018), la ciudad de Pasto y sus alrededores experimentaron una sequía severa en ese año con un evento muy extenso. Durante este periodo, muchos cuerpos de agua en la región se secaron, lo que redujo la disponibilidad de agua dulce para los ecosistemas acuáticos y los seres humanos.

La reducción de la disponibilidad de agua puede tener un impacto significativo en la biodiversidad de la región un estudio de Cuartas et al., (2018) encontró que la sequía prolongada puede reducir la abundancia de diversas especies de anfibios, reptiles y aves. A demás, Velásquez

et al., (2018) encontró que la sequía afectó la calidad del agua en algunos arroyos del SFFG, donde se registraron niveles más bajos de oxígeno disuelto y un aumento en la presencia de sustancias tóxicas en el agua. De la misma manera también se presentan impactos negativos en la agricultura y la ganadería en la región de Nariño. Durante la sequía, la disponibilidad de agua para el riego y para el consumo animal puede verse reducida, lo que afecta la producción y la calidad de los cultivos y el ganado.

Por otra parte, en la evolución temporal, la humedad también puede tener un impacto significativo en el SFFG como en los municipios de Pasto, Tangua y Yacuanquer, ya que estos representan niveles de humedad severa y moderada. Una alta humedad puede favorecer el crecimiento de la vegetación y la supervivencia de la fauna silvestre en la región. Sin embargo, un estudio de Galindo et al., (2020) encontró que durante el período representado en el mapa H con una humedad normal, a comparación de los demás periodos hubo una disminución lo que puede afectar a la calidad del aire y la salud humana, ya que aumentan los niveles de partículas contaminantes en el aire. Según Erazo et al., (2013), la humedad afecta la diversidad y abundancia de especies de aves por lo que se ven afectadas debido a que esta condición deteriora la calidad de los frutos de los árboles y arbustos, que son una fuente importante de alimento para ellas.

La Figura 11, proporciona la muestra de la severidad de la sequía en una región geográfica a lo largo de diferentes períodos de tiempo. El Mapa A (AGO - DIC 15) muestra áreas con sequía extrema y severa, siendo las zonas afectadas las que experimentan condiciones de sequía más significativa. El Mapa B (ENE - MAY 16) continúa mostrando áreas con sequía extrema y severa, y la intensidad de la sequía parece persistir. El Mapa C (JUN - OCT 16) aún observa áreas con sequía, pero la intensidad parece estar disminuyendo. Por último, el Mapa D (NOV16 - MAR 17) indica que la sequía sigue presente, pero algunas áreas muestran una ligera mejora.

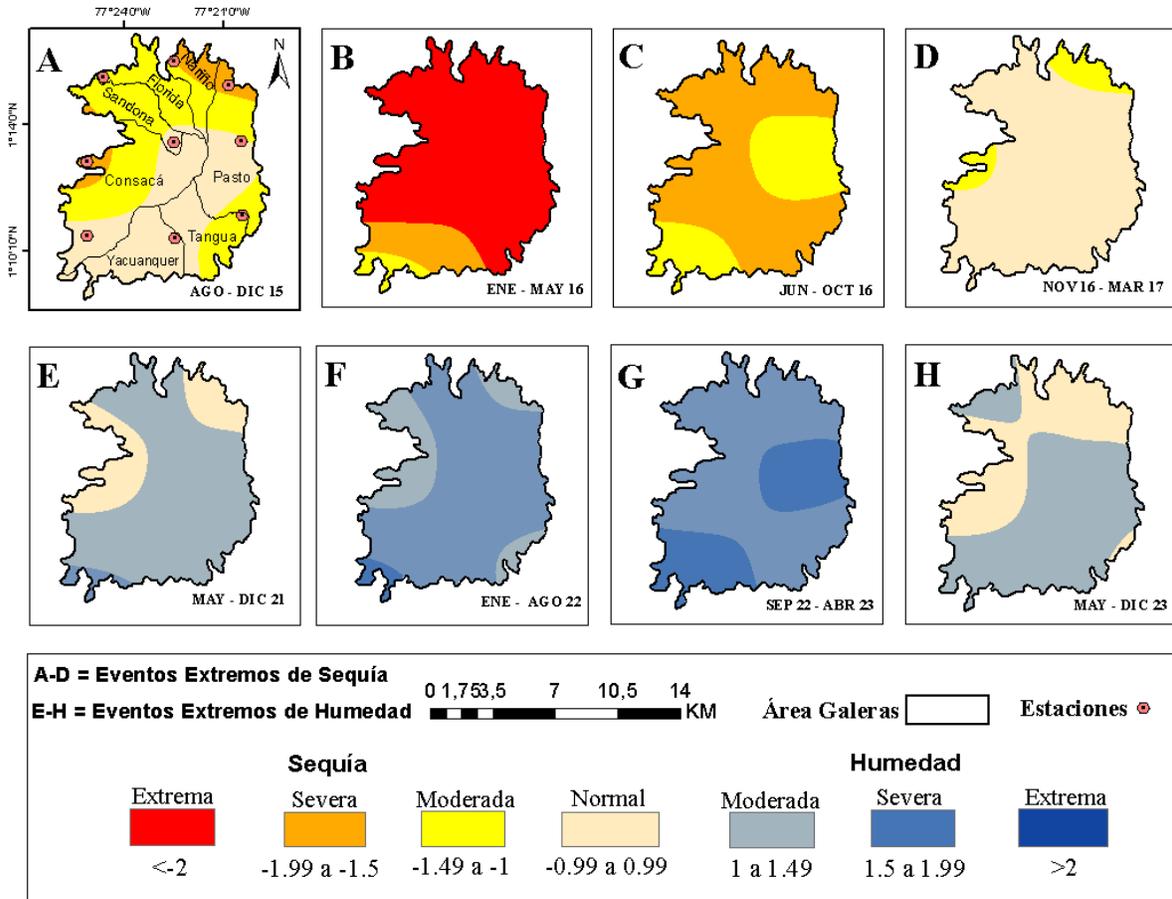
Por otro lado, el mapa también presenta eventos extremos de humedad en el SFFG durante diferentes períodos de tiempo, donde se observa que en el Mapa E (MAY - DIC 21) hay áreas con humedad extrema y severa, indicando condiciones de alta humedad. En el Mapa F (ENE - AGO 22) persisten estas áreas, sugiriendo continuidad en las condiciones de alta humedad. El Mapa G (SEP 22 - ABR 23) muestra variabilidad en la humedad a lo largo del tiempo manteniendo áreas

con humedad extrema y severa. Finalmente, en el Mapa H (MAY - DIC 23) se nota una ligera disminución en algunas áreas, aunque la humedad persiste.

Es importante destacar que estos eventos extremos de humedad pueden tener efectos significativos según un artículo publicado en la revista "Ornitología Colombiana" en 2011, la humedad excesiva puede provocar cambios en los patrones de migración de las aves, alterar la biología reproductiva de las especies y reducir la diversidad de aves forestales. Además, según otro estudio publicado en la revista Central European Forestry Journal en 2018, la humedad excesiva puede contribuir a la erosión del suelo, disminuir la calidad de los suelos y reducir la diversidad de especies vegetales. Por lo tanto, se debe monitorear constantemente el impacto de estos eventos en el Santuario de Fauna y Flora Galeras para prevenir efectos significativos en la biodiversidad y la salud del ecosistema.

### **Figura 11**

*Evolución temporal de los eventos extremos anual*



La sequía observada a una escala anual en la evolución temporal, puede tener un fuerte impacto en el Santuario de Flora y Fauna Galeras y en los municipios de Pasto, Sandoná, Consacá y La Florida en la región de Nariño, Colombia. Según un estudio de Vergara-Valencia et al., (2018), la sequía que afectó a esta región en 2015-2016 fue una de las peores en los últimos 100 años identificados en el Mapa B con sequias extremas, y moderada.

Durante este evento, los ríos y arroyos se secaron, lo que redujo la disponibilidad de agua dulce para los ecosistemas acuáticos y los seres humanos (Ocampo et al., 2018). Además, la sequía afectó la calidad del agua en algunos cuerpos de agua de la región, con niveles bajos de oxígeno disuelto y la presencia de sustancias tóxicas (Velásquez et al., 2018).

La sequía también afecta la agricultura en la región, con una disminución en la producción de cultivos como la caña de azúcar y el café (Ocampo et al., 2018). Además, la reducción en la

disponibilidad de forraje afectó la producción de ganado. En contraste con la humedad en la zona de estudio para los municipios en la región de Nariño puede tener un impacto significativo en la diversidad y abundancia de especies de aves. Según un estudio de Erazo et al., (2013), las aves pueden ser afectadas debido a que esta condición puede afectar la calidad de los frutos de los árboles y arbustos que son una fuente importante de alimento para las aves. En este sentido, las especies que dependen mucho de la fructificación de los árboles y arbustos, y que por lo tanto se alimentan principalmente de frutos, podrían ser las más afectadas.

En cuanto a la Flora, un ambiente húmedo puede favorecer el crecimiento de la vegetación en general, pero no todas las especies pueden adaptarse a esta condición ambiental. Por ejemplo, la presencia excesiva de humedad puede favorecer el crecimiento de algunas especies de plantas que a la vez pueden ser susceptibles a enfermedades, como es el caso del mildiu que afecta a las plantas de papa (*Solanum tuberosum*) en condiciones de alta humedad relativa (González, 2018). Según informes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la región de Nariño es altamente susceptible a diferentes eventos climáticos extremos como sequías e inundaciones debido a su ubicación geográfica y topografía.

En general, los eventos climáticos extremos pueden tener un impacto significativo en la disponibilidad de agua y la biodiversidad en diferentes municipios como Pasto, Sandoná, Consacá, La Florida y otros. Por lo tanto, es importante tomar medidas adecuadas tanto para prevenir como para mitigar los impactos de estos eventos en la región.

### ***2.3.2 Comparación con los eventos ENSO***

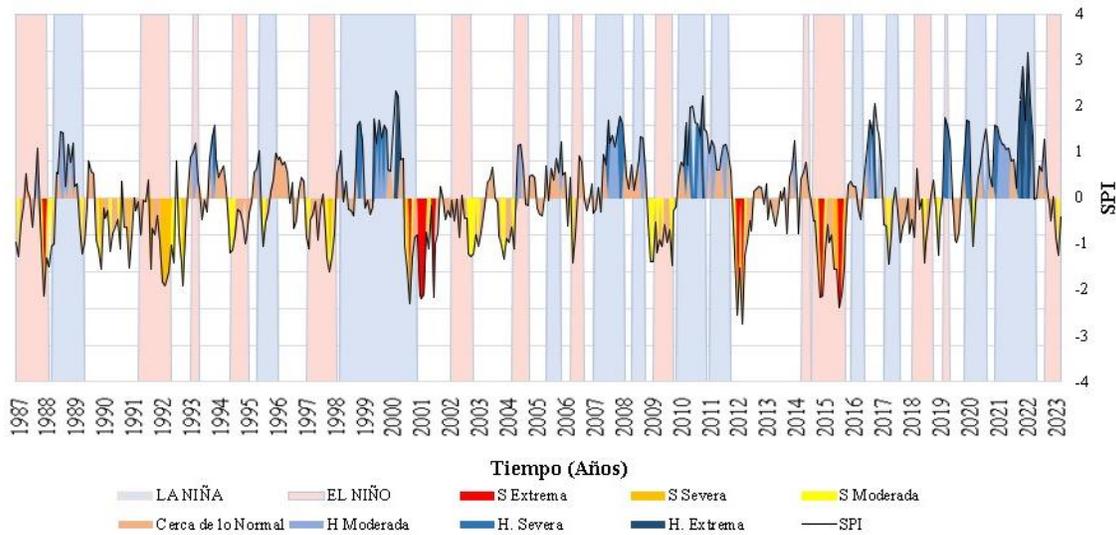
La comparación entre el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice Oceánico de El Niño (ONI) es fundamental para comprender la relación entre patrones climáticos globales y sus impactos locales en la precipitación.

Teniendo en cuenta la información plasmada en las Tablas 8,9,10,11 que se encuentran en las diferentes escalas se realiza una comparación como se indica en la Figura 13 entre la representación

de los datos obtenidos con lo descrito por los autores McPhaden et al., (2006) y Trenberth, (1997), quienes han explorado ampliamente cómo las anomalías en la temperatura del océano (ONI) se relacionan con la variabilidad en las precipitaciones y eventos extremos, lo que subraya la importancia de utilizar ambos índices para estudios climáticos y de gestión de recursos hídricos.

**Figura 12**

*SPI Trimestral Vs ONI*



De la Figura 12 se pueden destacar los eventos de sequía de los años 1987 a 1988, para Pabón y Caicedo., (1999) este periodo coincidió con un fuerte evento de El Niño. La falta de lluvias durante varios trimestres afectó la disponibilidad de agua para el riego, el abastecimiento de agua potable, y provocó la disminución de la productividad agrícola en municipios como Pasto, Consacá, Sandoná, Nariño y Yacuanquer. Los cultivos, especialmente los de papa y maíz, sufrieron pérdidas significativas. Además, la disminución de la cobertura vegetal aumentó el riesgo de erosión en áreas y vulnerables debido a la cercanía con el volcán.

Para el 2015 y 2016 el IDEAM, (2017) publicó un informe documentando la reducción de las precipitaciones trimestrales y los efectos en sectores clave como la agricultura y el suministro de agua en la región de Nariño.

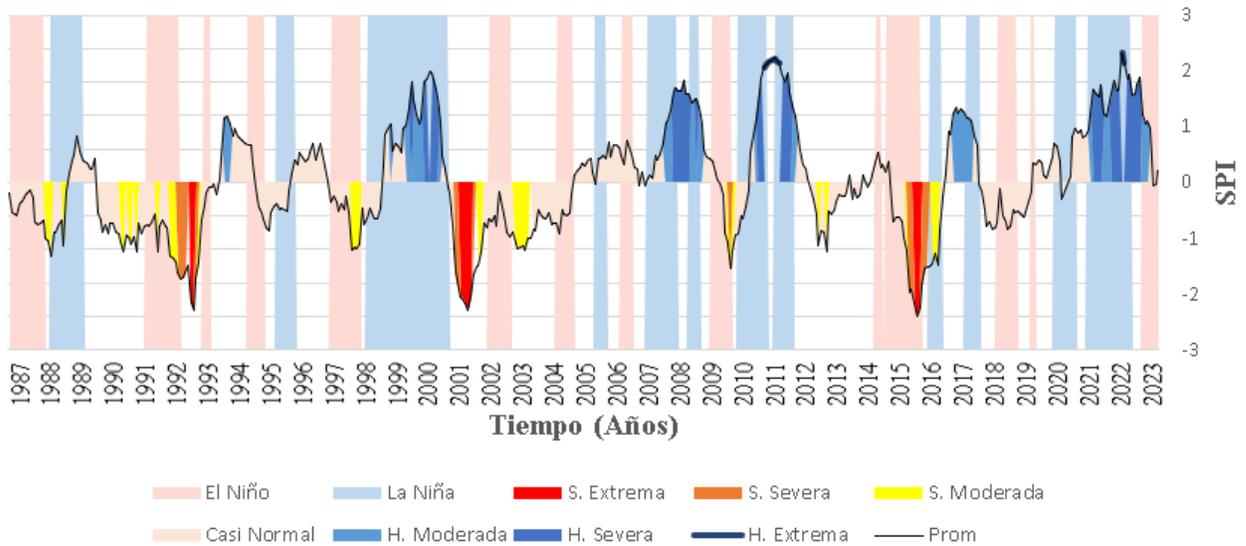
En ambos periodos, la sequía impactó los ciclos estacionales de precipitación, lo que provocó una reducción en la recarga de acuíferos y afectó las prácticas agrícolas que dependen de lluvias

estacionales regulares. La acumulación de déficits hídricos trimestre tras trimestre agravó las condiciones de sequía, dificultando la recuperación de los ecosistemas y las actividades productivas incluso después del fin de los eventos de El Niño (Pabón, 2016).

En la Figura 13 se puede analizar como las lluvias juegan un rol importante en la comparación de ambos índices, pero a escala anual destacando los periodos de 2011-2012 y 2021-2023.

**Figura 13**

*SPI Anual Vs ONI*



Se precisa en la Figura 13 como los eventos ONI son directamente proporcionales a los eventos del SPI, durante los años 2011-2012, las constantes precipitaciones provocaron varios efectos en la región. Por un lado, las tierras agrícolas se saturaron, lo que dificultó las labores de siembra y afectó la productividad de cultivos que son esenciales para la economía de la región. Además, el exceso de humedad favoreció la proliferación de plagas y enfermedades en los cultivos, incrementando las pérdidas económicas para los agricultores locales (Pabón, 2013).

En el periodo 2021-2023, la región de la circunvalar del Volcán Galeras enfrentó un nuevo desafío en términos de humedad y el más severo, la primera triple NIÑA del siglo. Para Vergara et al., (2024) durante estos años, los municipios cercanos al Galeras experimentaron fluctuaciones en

la humedad, con periodos de lluvias intensas seguidos de episodios más secos. Esta variabilidad dificultó la planificación agrícola, ya que los agricultores tuvieron que adaptarse a condiciones climáticas impredecibles. En algunas zonas, la humedad elevada contribuyó al deterioro de infraestructuras rurales y a problemas en la red de drenaje, afectando tanto las zonas urbanas como las rurales. El IDEAM, (2023) aseguró que la combinación de variabilidad climática y cambios en los patrones de humedad exacerbó los problemas de gestión hídrica en los municipios y en el manejo de aguas superficiales.

### 2.3.3 Porcentaje de área afectada para los eventos extremos

Se procedió, además, con la identificación de los eventos de sequía y humedad para calcular el porcentaje de área afectada tanto a escala trimestral como anual. Este análisis es fundamental para comprender no solo la severidad y duración de los eventos, sino también su extensión geográfica y el impacto en las áreas afectadas. A escala trimestral, se observan fluctuaciones más marcadas debido a la variabilidad estacional, mientras que a escala anual los eventos tienden a ser más prolongados y afectan áreas más extensas, lo que genera mayores repercusiones para los ecosistemas y las actividades humanas (McKee et al., 1993).

**Tabla 10**

*Porcentaje de afectación por trimestre*

<b>Sequía</b>				
<b>Trimestre</b>	<b>Municipios</b>	<b>Área Afectada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Categoría</b>
<b>A</b> <b>Feb-Abr</b>	Sandoná Florida, Tangua	7	%	Moderada
	Yacuanquer Cosaca 2 Pasto 1 Nariño	18	%	Severa
<b>B</b> <b>May-Jul</b>	Florida Sandoná Consacá 1 Pasto 2	76	%	Moderada

<b>C</b> <b>Ago-Oct</b>	Yacuanquer , Consacá 2	14	%	Extrema
	Tangua, Consacá 1, Pasto 2, Florida y Nariño	24	%	Severa
	Sandoná, Consacá 1 y Tangua	62	%	Moderada
<b>D</b> <b>Nov-Ene</b>		100	%	Normal
<b>Humedad</b>				
<b>Trimestre</b>		<b>Área Afectada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Categoría</b>
<b>E</b> <b>Ene-Abr</b>	Yacuanquer , Consacá 2, Pasto 2	12	%	Moderada
	Yacuanquer , Consacá 2	16	%	Extrema
<b>F</b> <b>May-Ago.</b>	Tangua, Yacuanquer , Consaca 1	30	%	Severa
	Pasto, Sandona, Florida y Nariño	54	%	Moderada
	Sandoná, Consacá, Yacuanquer , Tangua y Pasto	84	%	Extrema
<b>G</b> <b>Sep.-Dic</b>	Consacá 1, Pasto 1 y Florida	12	%	Severa
	Pasto 1 y Nariño	4	%	Moderada
<b>H</b> <b>Ene-Abr</b>	Tangua, Yacuanquer y Consacá 2	18	%	Moderada

**Tabla 11**

*Porcentaje de afectación anual*

<b>Sequía</b>				
<b>Anual</b>	<b>Municipios</b>	<b>Área Afectada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Categoría</b>
<b>A</b> <b>Ago.-Dic</b>	Consacá 1 Sandoná Florida, Nariño Pasto y Tangua	47	%	Moderada
	Tangua, Pasto, Consacá 1, Florida y Nariño	87	%	Extrema
<b>B</b> <b>Ene-May</b>	Tangua, Yacuanquer y Consacá 2	9	%	Severa
	Yacuanquer	4	%	Moderada
<b>C</b> <b>Jun-Oct</b>	Nariño, Florida, Sandoná, Consacá 1 y Tangua	74	%	Severa
	Yacuanquer, Consacá 2, Pasto	26	%	Moderada
<b>D</b> <b>Nov-Mar</b>	Consacá 1 y Pasto 1	13	%	Moderada
<b>Humedad</b>				
<b>Anual</b>		<b>Área Afectada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Categoría</b>
<b>E</b> <b>May-Dic</b>	Nariño, Florida, SandonáConsacá 1, Yacuanquer, Tangua, Pasto 2	82	%	Moderada
	Yacuanquer y Consacá 2	3	%	Severa
<b>F</b> <b>Ene-Ago.</b>	Yacuanquer y Consacá 2	3	%	Extrema
	Nariño, Florida, SandonáConsacá 1, Yacuanquer, Tangua, Pasto 2	19	%	Severa
	Sandoná, Consacá 1, Pasto 1 y Tangua	78	%	Moderada

<b>G</b> <b>Sep-Abr</b>	Yacuanquer, Consacá 2 y Pasto 2	17	%	Extrema
	Pasto 1, Nariño, Florida, Sandoná, Consaca 1y Tangua	83	%	Severa
<b>H</b> <b>May-Abr</b>	Sandoná, Florida, Pasto 2, Tangua, Yacuanquer y Consacá 1	74	%	Moderada

La Tabla 11 en el Mapa de Sequía Anual, el área B destaca por su alta afectación, con un 87% en categoría de sequía extrema y un 9% en sequía severa. Asimismo, el área C muestra un desafío significativo, con el 74% en categoría de sequía severa, mientras que el área D presenta la menor afectación, con solo el 13% en categoría de sequía moderada.

En cuanto al Mapa de Humedad Anual, el área E se destaca como la más afectada por humedad moderada, con un 82%. Sin embargo, áreas como F y C muestran una combinación de condiciones extremas y severas de humedad. En contraste, el área D tiene una situación más favorable, con un 74% en categoría de humedad moderada.

Estos datos resaltan la importancia de gestionar adecuadamente el recurso hídrico y de implementar medidas para mitigar los efectos de la sequía, especialmente en las áreas más afectadas por sequía extrema y severa.

### **3 Conclusiones**

En el Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG) en Nariño, se ha identificado un patrón bimodal de lluvias en trimestres que son considerados los períodos lluviosos Marzo a Mayo (MAM), Septiembre a Noviembre (SON) y secos Diciembre-Enero – Febrero (DEF), y Junio a Agosto (JJA). Estos períodos se definieron con base en el ciclo anual de precipitación, lo cual es típico de muchas regiones tropicales influenciadas por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La ZCIT, al desplazarse hacia el norte y el sur a lo largo del año, provoca dos estaciones lluviosas y dos secas en el Santuario. Además, la variabilidad en estos ciclos está influenciada por fenómenos como El Niño y La Niña, que alteran la intensidad y distribución de las precipitaciones. Este patrón refleja la distribución de la precipitación y muestra cómo los fenómenos climáticos, como El Niño y La Niña identificados mediante el Índice ONI, pueden impactar en esta distribución de lluvias. Estos eventos extremos pueden generar periodos de lluvias fuertes, propiciando inundaciones, así como periodos de sequía, cambios que se evidencian claramente en los mapas anuales y trimestrales del SFFG.

El comportamiento negativo de las tendencias en las estaciones (Pas2) y (Tan) destaca la vulnerabilidad climática de la región, con un evidente impacto en la reducción de precipitaciones. Estos resultados subrayan la importancia de implementar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, especialmente en áreas como Tangua, que han experimentado sequías extremas y cambios bruscos en los patrones de precipitación. Las estaciones de monitoreo deben seguir funcionando para detectar y anticipar estos eventos, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos hídricos y la prevención de desastres naturales. Además, el análisis de componentes principales (ACP) destaca que solo CPI tiene un valor superior a 1, representando casi el 94% de la variabilidad de los datos.

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) evidencia que el Santuario de Flora y Fauna Galeras (SFFG) ha experimentado eventos climáticos extremos, tanto de sequía como de exceso de precipitaciones. Sequías como las de 1991, 2001, 2009 y 2016, así como excesos de precipitación en 2000, 2011 y 2022 destacan la vulnerabilidad del ecosistema a las fluctuaciones

climáticas, además tienen un impacto significativo en la región, afectando tanto al recurso hídrico como los ecosistemas del SFFG.

Los eventos extremos de precipitación, identificados con el (SPI), revela fluctuaciones significativas entre sequías y excesos de lluvia en el (SFFG). Estos eventos están estrechamente relacionados con fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña. Los eventos más severos incluyen la sequía a escala trimestral entre Diciembre de 2015 y Febrero de 2016, con una severidad de 11.85, y el exceso de precipitaciones identificado a escala anual entre Junio y Diciembre de 2022, con una severidad de 22.12. Además, se observó que las sequías más prolongadas se extendieron por hasta seis meses en 1992, mientras que los eventos húmedos más largos duraron siete meses, coincidiendo con episodios de La Niña. La identificación de estos eventos extremos en el SFFG subraya la vulnerabilidad climática de la región frente a fluctuaciones asociadas con los fenómenos de El Niño y La Niña. Estos patrones sugieren la necesidad de fortalecer las estrategias de manejo de recursos hídricos, mitigación de riesgos y planificación para mejorar la resiliencia del área frente a eventos climáticos extremos.

Además, la comparación entre los eventos extremos de precipitación en el (SFFG) y los fenómenos ENSO muestra una relación directa y significativa, para eventos de El Niño los periodos como los de 1997-1998 y 2015-2016, coinciden con fuertes sequías en la región para los municipios como Tangua, Pasto y Consacá. Durante estos eventos, el SPI mostró valores negativos extremos, lo que indica una reducción significativa en las precipitaciones. En particular, el periodo 2015-2016 destacó por la severidad de la sequía, lo que generó impactos adversos sobre la agricultura, el suministro de agua y los ecosistemas locales. Estos eventos de sequía prolongada reflejan el aumento de las temperaturas y la disminución de la humedad en la región, típicos de los años de El Niño.

Para los eventos de La Niña Durante los episodios como en 2010-2011 y 2022, el SPI presentó valores positivos extremos, reflejando un exceso de precipitaciones. Estos eventos están asociados con inundaciones y deslizamientos de tierra en las áreas circundantes del SFFG. En el año 2022, por ejemplo, el exceso de lluvias llevó a una saturación de los suelos y a la alteración de los ecosistemas locales, causando daños significativos en los municipios Yacuanquer, Consacá, Pasto

y comunidades cercanas. Este análisis subraya la importancia de monitorear los ciclos ENSO para predecir eventos extremos y adaptar las estrategias de gestión de recursos, con el fin de reducir los riesgos asociados a estos cambios climáticos recurrentes.

#### **4 Recomendaciones**

Es importante tener estaciones institucionales activas en el área de estudio, especialmente en el Santuario de Flora y Fauna Galeras en Nariño, para garantizar la verificación constante de la información que se está utilizando a través de datos satelitales CHIRPS. Las estaciones pueden proporcionar datos complementarios a los datos satelitales, lo que ayuda a mejorar la exactitud y la precisión de los análisis climáticos. Además, contar con estaciones institucionales activas permite realizar un monitoreo constante de las condiciones climáticas lo cual es esencial para prever y responder a eventos climáticos extremos que pueden afectar negativamente a la biodiversidad y a la población local, incluyendo inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra.

## 5 Referencias bibliográficas

Galtung, E. A. (2001). *La paz positiva y negativa. Una construcción de diversas perspectivas de paces*. Editorial Planeta.

Ministerio del Interior - Colombia. (s.f.). Plan Integral de Gestión del Riesgo: Volcán Galeras

Departamento Nacional de Planeación. (Octubre de 2013). Hoja de ruta para la elaboración de los planes de adaptación dentro del plan nacional de adaptación al cambio climático, Colombia.

Manrique Monroy, G., & González Aljach, D. (2018). Formulación de medidas de adaptación para el departamento de Nariño frente a la variabilidad y cambio climático bajo el escenario (2011-2040) a partir de un análisis espacial implementando la metodología de infraestructura verde. *Ciencia Unisalle, Ingeniería Ambiental y Sanitaria Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá*.

Poveda, G., & Álvarez, D. M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería, (36), 65-76*.

Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., ... & Verdin, A. P. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *US Geological Survey data series, 832(4), 1-12*.

Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Cerón, W. L., Carvajal-Escobar, Y., & Caicedo-Bravo, E. (2020). Teleconnections between monthly rainfall variability and large-scale climate indices in Southwestern Colombia. *Water, 12(7), 1863*.

Ocampo-Marulanda, C., Fernández-Álvarez, C., Cerón, W. L., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Alfonso-Morales, W. (2022). A spatiotemporal assessment of the high-resolution

CHIRPS rainfall dataset in southwestern Colombia using combined principal component analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101739.

Bocanegra, J. E. M., Edgar, J., & Caicedo, J. D. P. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2, 7-21.

Funk CC, Peterson PJ, Landsfeld MF, Pedreros DH, Verdin JP, Rowland JD, et al. A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring. *US Geol Surv Data Ser* 2014;832:1–12. <https://doi.org/http://dx.doi.org/110.3133/ds832>.

Canchala, T., Ocampo-Marulanda, C., Alfonso-Morales, W., Carvajal-Escobar, Y., Ceron, W. L., & Caicedo-Bravo, E. (2022). Techniques for monthly rainfall regionalization in southwestern Colombia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94.

Cerón, W. L., Kayano, M. T., Andreoli, R. V., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Alfonso-Morales, W. (2021). Rainfall variability in southwestern Colombia: changes in ENSO-related features. *Pure and Applied Geophysics*, 178(3), 1087-1103.

García, M. C., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64.

W., Wang, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., . . . Guilyardi, E. (Enero de 2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature climate change*, 1-6. Doi:10.1038/nclimate2492

Ideam; pnud; mads; dnp; cancillería. (2017). Tercera comunicación nacional de cambio Climático de colombia. Bogotá, colombia.

Riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al

Cambio climático. En i. P. Change, climate change 2014: impacts, adaptation and Vulnerability. Cambridge, united kingdom and new york, usa.: cambridge university Press.

Castaño, A., et al. (2020). "Variabilidad Climática en el Santuario de Fauna y Flora Galeras: Un Estudio de Caso en la Región de Nariño". *Revista de Climatología*, 15(2), 45-60.

Instituto de Investigaciones Meteorológicas de Colombia. (Año). "Datos Climáticos Históricos de Estaciones Meteorológicas en Nariño".

García, J. M., et al. (2018). "Análisis Estadístico de las Precipitaciones en Zonas de Reserva Natural: Caso del SFFG en Nariño". *Revista de Ecología Aplicada*, 25(3), 112-128.

Gómez, J., et al. (2022). Climate trends in the SFFG of Nariño: An analysis using the Mann-Kendall test. *Journal of Climate Change Research*, 10(2), 87-105.

Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777.

Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns

Romero, C., Mejía, A., & Córdoba, G. (2019). Impactos del cambio climático en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en Colombia: una revisión. *Revista Científica de Ingeniería*, 38(1), 49-62.

Cuartas, C. A., López-Guerrero, A. M., & Delgado, M. P. (2018). Effects of climate variation related to ENSO on bird populations in an Andean dense montane forest. *Ornithology Research*, 26(1), 13-25.

Vergara-Valencia, J., Giraldo-Osorio, J. D., Guzmán-Bustamante, I. C., & López-Pinzón, H. N. (2018). Characterization of the ENSO drought 2015–2016 in the basins of the river Catambuco and the town of Pasto-Colombia. *Earth Systems and Environment*, 2(1), 1-13.

Velásquez, J. F., Gómez, Y. M., & García, A. M. (2018). Evaluation of the impact of a severe drought event on small stream water quality in a tropical mountain region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 587.

Hulme, M. (2003). Abrupt climate change: Can society cope? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1810), 2001-2021. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1224>

Schneider, S. H., Semenov, S., Patwardhan, A., Burton, I., Magadza, C. H., Oppenheimer, M., ... & Yohe, G. W. (2010). Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 779-810). Cambridge University Press.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184).