

**Comparación entre Datos de programas satelitales CHIRPS, ERA 5
y del IDEAM para generar información climatológica.**

Caso de estudio Boyacá y Casanare

Laura Tatiana Sánchez Niño

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Titulación de Especialista en Sistemas de Información Geográficos

Director (a):

Ph.D., M.Sc. Alberto Boada

Codirector (a):

M.Sc. Sergio Torres

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Programa Académico

Manizales, Año 2024.

Agradecimientos

A mi familia por ser un pilar y apoyo incondicional en mi vida y cumplimiento de mis metas, principalmente a mi hija Juana Valentina por ser mi motor de vida, a mi mamá por ser mi apoyo incondicional y mi papá.

A mi compañero de vida Cristian Avendaño por su ayuda, apoyo y creer siempre en mí.

A Sergio Torres por su guía, acompañamiento y sabiduría.

A mi asesor de Tesis Alberto Boada por su ayuda y conocimiento.

Y finalmente a Terra Boyacá S.A.S. por su colaboración en el desarrollo de la investigación.

Resumen

En el presente estudio se llevó a cabo la comparación de la información climatológica que se genera en las estaciones meteorológicas pertenecientes al IDEAM existentes en los departamentos de Boyacá y Casanare con los programas satelitales CHIRPS y ERA 5. Esto con el fin de establecer áreas en donde sea posible el uso de información satelital. Adicionalmente, establecer una base de datos y generar representaciones gráficas que proporcionen información detallada entre los datos recopilados para las variables de precipitación, temperatura Máxima y Mínima en el ámbito del análisis climatológico y meteorológico.

Respecto a la información meteorológica en Colombia, cabe destacar que el IDEAM ofrece plataformas de libre acceso que permiten la descarga de datos actualizados e históricos a nivel nacional. Sin embargo, surge un problema cuando las estaciones meteorológicas pasan a ser jurisdicción de entidades privadas, como empresas o corporaciones autónomas regionales. En estos casos, el proceso de obtención de información se torna más complejo, requiriendo solicitudes formales y demás trámites. Además, existe una limitación en el acceso a la información debido a la distribución geográfica de las estaciones meteorológicas en Boyacá y Casanare, donde las estaciones se encuentran a grandes distancias entre sí y muchas de ellas están en proceso de suspensión o mantenimiento, lo que genera vacíos en la información disponible.

Esta investigación adopta un enfoque descriptivo, utilizando variables cuantitativas, con el propósito de analizar la precisión de los satélites (CHIRPS y ERA5) en diversas condiciones topográficas de Boyacá y Casanare. Las fuentes primarias incluyen los datos meteorológicos proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), así como la información satelital de acceso libre y gratuito (CHIRPS Y ERA5).

Para la recolección de información, se implementará una codificación en Python y uso de Google Earth Engine con el fin de facilitar el proceso de recopilación de datos.

Palabras clave: Precipitación, Temperatura, Programas satelitales.

Abstract

In the present study, a comparison was carried out of the climatological information generated in the meteorological stations belonging to the IDEAM existing in the departments of Boyacá and Casanare with the satellite programs CHIRPS and ERA 5. This in order to establish areas where the use of satellite information is possible. Additionally, establish a database and generate graphic representations that provide detailed information among the data collected for the variables of precipitation, Maximum and Minimum temperature in the field of climatological and meteorological analysis.

Regarding meteorological information in Colombia, it should be noted that IDEAM offers free access platforms that allow the download of updated and historical data at the national level. However, a problem arises when weather stations become the jurisdiction of private entities, such as companies or regional autonomous corporations. In these cases, the process of obtaining information becomes more complex, requiring formal requests and other procedures. In addition, there is a limitation in access to information due to the geographical distribution of the meteorological stations in Boyacá and Casanare, where the stations are located at great distances from each other and many of them are in the process of suspension or maintenance, which generates gaps in the available information.

This research adopts a descriptive approach, using quantitative variables, with the purpose of analyzing the precision of satellites (CHIRPS and ERA5) in various topographic conditions of Boyacá and Casanare. Primary sources include meteorological data provided by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), as well as freely available satellite information (CHIRPS AND ERA5).

For the collection of information, coding in Python and use of Google Earth Engine will be implemented in order to facilitate the data collection process.

Keywords: Precipitation, Temperature, Satellite programs.

Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación.....	19
1.1. Descripción del área problemática	20
1.2. Formulación del problema	21
1.3. Justificación.....	23
2. Objetivos.....	25
2.1. Objetivo general	25
2.2. Objetivos específicos.....	25
3. Antecedentes.....	26
4. Referente normativo y legal	38
5. Referente teórico.....	42
5.1. Estación Meteorológica:.....	42
5.2. Satélites	46
5.3. Geoestadística.....	52
5.4. Interpolaciones por medio de métodos SIG	53
6. Metodología.....	55

6.1.	Descripción de la zona de estudio	60
6.2.	Enfoque metodológico	62
6.3.	Procedimiento.....	63
6.3.1.	Fase 1. Recopilación y Análisis Información Local IDEAM.....	63
6.3.2.	Fase 2. Recopilación y Análisis Información SATELITAL CHIRPS.....	67
6.3.3.	Fase 3. Fase de Extracción, Descarga y Análisis de Información Satelital de Temperatura por medio del paquete satelital de ERA 5	68
6.3.4.	Fase 4. Cruce de información para análisis final	68
7.	Resultados.....	69
7.1.	Evaluación estadística de la información recopilada	69
7.1.1.	Recopilación de la información de las estaciones locales	69
7.1.2.	Recopilación de la información de la información de programas satelitales.....	71
7.1.3.	Evaluación estadística de la variable de precipitación.....	74
7.1.4.	Evaluación estadística de la variable de Temperatura mínima.....	91
7.1.5.	Evaluación estadística de la variable de Temperatura máxima	100
7.2.	Integración de la información climatológica.....	108
7.2.1.	Metodología empleada.....	108
7.2.2.	Precipitación	110
7.2.3.	Temperatura mínima.....	116

7.2.4.	ERA 5 Daily Aggregates	116
7.2.5.	Temperatura máxima	122
7.2.6.	ERA 5 Daily Aggregates	122
7.3.	Comparación entre los datos locales y la información de fuentes satelitales.....	128
7.3.1.	Precipitación	130
7.3.2.	Temperatura máxima	134
7.3.3.	Temperatura mínima.....	138
8.	Conclusiones.....	142
9.	Recomendaciones	145
10.	Referencias.....	147

Lista de figuras

Figura 1. Metodología.....	56
Figura 2.	77
Figura 3.	81
Figura 4.	82
Figura 5. Promedio Precipitación Mínima Anual Para análisis IDEAM.....	83
Figura 6.	85
Figura 7.	92
Figura 8.	95
Figura 9.	97
Figura 10.	98
Figura 11.	99
Figura 12.	100
Figura 13.	102
Figura 14.	104
Figura 15.	105
Figura 16.	107
Figura 17.	111
Figura 18.	111
Figura 19.	114
Figura 20.	114
Figura 21.	117

Figura 22.	117
Figura 23.	119
Figura 24.	120
Figura 25.	123
Figura 26.	123
Figura 27.	126
Figura 28.	126

Lista de mapas

Mapa 1.....	60
Mapa 2.....	76
Mapa 3.....	80
Mapa 4.....	91
Mapa 5.....	94
Mapa 6.....	112
Mapa 7.....	115
Mapa 8.....	118
Mapa 9.....	121
Mapa 10.....	124
Mapa 11.....	127
Mapa 12.....	131
Mapa 13.....	133
Mapa 14.....	135

Lista de tablas

Tabla 1.	38
----------------------	-----------

Lista de símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>GEE</i>	Google Earth Engine
<i>KO</i>	Kriging Ordinario
<i>EIA</i>	Estudio de Impacto Ambiental

1.Planteamiento del problema de investigación y su justificación

La toma de decisiones acertada en proyectos, obras, actividades y estudios de impacto ambiental (EIA) exige un análisis profundo del clima y la atmósfera de las zonas involucradas. Esto debido a la importancia de comprender las condiciones climáticas existentes. Lo anterior, si se tiene en cuenta que el clima de una región define los patrones de temperatura, precipitación, humedad, viento y otros factores ambientales que pueden afectar significativamente la viabilidad y el impacto ambiental de un proyecto (M. González-Mejía, 2020).

Por tal razón, se hace indispensable un análisis detallado del clima, que permita establecer e identificar las zonas de condiciones extremas o sensibles, las áreas propensas a inundaciones, las sequías o los deslizamientos de tierra. Igualmente, se pueden establecer otros parámetros, como la calidad del aire, la disponibilidad de agua, la biodiversidad y los ecosistemas frágiles, circunstancias que resultan fundamentales para minimizar los riesgos ambientales y garantizar la sostenibilidad de un proyecto. (J. Vásquez-Quiroz, 2018).

Por otro lado, las regulaciones ambientales en Colombia, particularmente en Boyacá y Casanare, establecen la obligatoriedad de realizar estudios de impacto ambiental (EIA) que incluyan un análisis detallado del clima y la atmósfera. El cumplimiento de estas normativas es esencial para obtener las autorizaciones necesarias para la ejecución de proyectos y asegurar su viabilidad legal.

Adicionalmente, y teniendo en cuenta la complejidad topográfica de estos departamentos, como lo es, la variabilidad topográfica de Boyacá y la relativa homogeneidad de Casanare, plantea desafíos adicionales por sus circunstancias particulares. Pues dado que, en la actualidad obtener información local del IDEAM para el desarrollo de este tipo de estudios en ejecución de

proyectos tiene varias limitantes. Por un lado, la falta de cobertura de estaciones meteorológicas de libre acceso y, por otra parte, las largas distancias entre cada una de las estaciones, aspectos que aumentan el error en el momento del uso de la información.

Es por tales motivos, que se propone el uso de información satelital junto con herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y empleando métodos de interpolación para análisis de datos punto a punto como Kirging la cual es una técnica estadística avanzada que considera la distancia entre puntos de datos, la correlación espacial y la variabilidad local para estimar valores en puntos sin datos, es ideal para zonas con patrones espaciales complejos y datos no homogéneos y emplear métodos estadísticos como la regresión lineal o modelos de redes neuronales artificiales para estimar la relación entre variables climáticas (precipitación, temperatura), de esta manera es posible obtener una alternativa viable para superar la dependencia de estaciones meteorológicas físicas, permitiendo analizar áreas con poca infraestructura de medición y centrándose en adquirir datos climáticos y atmosféricos precisos en áreas con información escasa o distancias considerables entre estaciones.

1.1. Descripción del área problemática

El presente estudio se desarrolla en los departamentos de Boyacá y Casanare, abarcando todas las zonas donde se encuentran instaladas las estaciones meteorológicas.

El análisis climatológico constituye una herramienta fundamental para comprender el comportamiento del clima y tomar decisiones acertadas en ámbitos como la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y la prevención de desastres, Sin embargo, la precisión de estos

análisis se ve limitada por la escasez de datos meteorológicos en zonas específicas correspondientes a áreas de proyectos.

En Colombia, numerosas estaciones meteorológicas se encuentran inactivas o no cuentan con información actualizada. Esta situación se debe a diversos factores, entre ellos la falta de recursos para el mantenimiento y operación de las estaciones, la desidia por parte de las autoridades y la falta de conciencia sobre la importancia de los datos meteorológicos.

La ausencia de datos meteorológicos precisos tiene una serie de consecuencias negativas. En primer lugar, dificulta la comprensión de los patrones climáticos y la identificación de tendencias. En segundo lugar, limita la capacidad para predecir el clima futuro. En tercer lugar, dificulta la toma de decisiones informadas relacionadas con la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y la prevención de desastres.

La precisión de los análisis climatológicos y la toma de decisiones acertadas en diversos ámbitos dependen en gran medida de la disponibilidad de datos meteorológicos precisos. Es fundamental abordar la problemática de las estaciones meteorológicas inactivas o desactualizadas para garantizar la obtención de información climática confiable y relevante.

1.2. Formulación del problema

La realización de estudios climatológicos es fundamental en diversos proyectos ambientales. Estos estudios permiten un análisis detallado de los patrones meteorológicos en las áreas de proyecto, con una resolución nacional, y son cruciales para identificar posibles riesgos climáticos e implementar medidas efectivas de mitigación.

Los riesgos climáticos pueden abarcar desde inundaciones que causan daños a la infraestructura hasta sequías que reducen la disponibilidad de agua, vientos fuertes que afectan

las estructuras y tornados con amenazas catastróficas. Además, las olas de calor pueden generar estrés en los trabajadores y los desplazamientos en masa dependen de la precipitación y la capacidad de infiltración del agua.

Un análisis climatológico integral facilita la identificación temprana de estos riesgos, permitiendo medidas proactivas. Por ejemplo, proyectos en zonas propensas a inundaciones pueden incorporar medidas de protección, y aquellos en áreas secas pueden implementar acciones para garantizar el suministro de agua.

Los análisis climatológicos también proporcionan información sobre las condiciones climáticas que afectan la viabilidad del proyecto, orientando medidas adaptadas, como calefacción en inviernos fríos o estrategias de enfriamiento en veranos calurosos, para asegurar condiciones óptimas de trabajo.

En los departamentos de Boyacá y Casanare, el desarrollo de productos de análisis meteorológicos y climatológicos enfrenta una dificultad significativa debido a la limitada disponibilidad de información meteorológica en las estaciones de monitoreo, las cuales suelen estar distantes de las áreas específicas de estudio. Por esta razón, se recurre a la utilización de información satelital que proporciona datos basados en coordenadas del área.

Sin embargo, surge la preocupación acerca de la certeza y exactitud de estos datos, motivando la necesidad de llevar a cabo una comparación estadística entre los valores satelitales y los valores de las estaciones para validar cuál satélite es más óptimo en función de las variables específicas de la zona.

A nivel mundial, la topografía de las áreas de estudio dificulta el acceso a información necesaria para los estudios climatológicos. Por lo tanto, es imperativo establecer una relación de exactitud entre los satélites de libre acceso climatológico que se emplean para determinar los

valores de precipitación, temperaturas y días de lluvia en lugares donde las estaciones meteorológicas están inactivas o las condiciones topográficas no permiten una medición precisa por sensores de alta resolución de los satélites.

Este problema de vacíos y sesgos en la información es una preocupación a nivel mundial y nacional, evidenciando que, en los estudios climatológicos, la información de monitoreo continuo proporcionada por el IDEAM a nivel nacional es insuficiente. Además, existen zonas donde las estaciones meteorológicas están ubicadas a distancias considerablemente grandes, afectando la representatividad de los análisis realizados.

El enfoque principal de este estudio radica en llevar a cabo un análisis estadístico espacial punto a punto tomando como base las estaciones meteorológicas del IDEAM y su ubicación geográfica, que establezca la precisión entre los valores obtenidos localmente por las estaciones meteorológicas y los valores proporcionados por paquetes satélites de alta resolución (CHIRPS Y ERA 5) en una escala Anual. A través de la implementación de esta herramienta SIG, se busca responder a la siguiente pregunta de investigación: Que tan preciso es el uso de información de paquetes satelitales CHIRPS Y ERA5 en zonas sin cobertura o datos cercanos de datos meteorológica del IDEAM.

1.3. Justificación

La comparación estadística entre valores SATELITALES y valores de estaciones LOCALES es importante para validar que tan preciso es el uso de información satelital de los paquetes de CHIRPS Y ERA 5 en las zonas de estudio y de acuerdo a las variables del área de estudio referentes a topografía y altitudes. La información meteorológica es esencial para el desarrollo de productos de análisis meteorológicos y climatológicos, y la falta de información

meteorológica precisa en las zonas de estudio puede limitar la calidad de estos productos. La comparación estadística puede ayudar a resolver este problema al proporcionar información sobre la certeza y exactitud de la información satelital (CHIRPS Y ERA 5). Además, la comparación estadística puede ayudar a identificar los factores que afectan la precisión de la información satelital y las variables meteorológicas que son más difíciles de estimar con la información satelital (CHIRPS Y ERA 5). Esta información puede ser utilizada para mejorar los algoritmos de estimación de la información satelital y la selección de las variables a estimar con la información satelital.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Comparar los datos de Temperaturas Máximas, Mínimas y Precipitaciones de los programas satelitales CHIRPS Daily, ERA5 Daily Aggregates con información presente en las estaciones operadas por el IDEAM, para identificar el satélite más óptimo a usar en zonas sin información local a una escala Anual.

2.2. Objetivos específicos

1. Evaluar estadísticamente de forma correlacional los datos que generan los programas satelitales CHIRPS Daily, ERA5 Daily Aggregates e IDEAM.
2. Desarrollar algoritmos para integrar datos climatológicos generados por los programas satelitales CHIRPS Daily, ERA5 Daily Aggregates e IDEAM.
3. Comparar los productos obtenidos con los programas satelitales CHIRPS Daily, ERA5 Aggregates e IDEAM para las variables de temperaturas Máximas, Mínimas y Precipitaciones Daily por medio de métodos de visualización (Mapas).

3. Antecedentes

La revisión sistemática de las investigaciones realizadas respecto al tema de investigación, arroja, grandes resultados los cuales fueron revisados a nivel mundial y analizados en orden de aporte e importancia para el desarrollo de la investigación, cabe resaltar que en Colombia los estudios que se han realizado respecto a este tema son escasos y es por esta razón que se tomó información de estudios realizados en otros países o en su defecto cercanos a este.

En primer lugar, se tiene en cuenta el estudio estructurado por (Camici, s. et al., 2018), el cual narra como en la actualidad, los productos de teledetección por satélite ofrecen un gran potencial para suplir las deficiencias en la obtención de datos pluviométricos, especialmente en regiones con escasez de estaciones meteorológicas convencionales. Estos productos, como los derivados de la misión Global Precipitation Measurement (GPM) y su producto Integrated Multi-satellitE Retrievals (IMERG), proporcionan estimaciones diarias y subdiarias de la lluvia con una resolución espacial de hasta una décima de grado, dentro de los resultados obtenidos en dicho estudio se resalta como los satélites permiten obtener datos de lluvia en áreas extensas, incluso en zonas remotas o con difícil acceso, donde la instalación de pluviómetros convencionales es costosa o impracticable, de igual forma dichos productos de teledetección por satélite ofrecen estimaciones de la lluvia con gran detalle espacial y temporal, permitiendo un análisis más preciso de la distribución de la precipitación, puesto que estos mismos proporcionan datos de forma ininterrumpida, independientemente de las condiciones climáticas o la accesibilidad del terreno, lo que garantiza un flujo constante de información. Dicho estudio tiene diferentes aplicaciones en la hidrología, pues se han convertido en una herramienta valiosa para

forzar modelos hidrológicos, especialmente en países en desarrollo o regiones con escasa infraestructura de medición.

El estudio de Camici et al. (2018) destaca la viabilidad de los sensores satelitales como alternativa para medir la precipitación con alta resolución espacial y temporal en amplias regiones del planeta. Esta metodología se presenta como una solución complementaria a los pluviómetros tradicionales, especialmente en zonas con escasa cobertura de estaciones meteorológicas, resaltando de igual forma que desde el lanzamiento de la Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales (TRMM) en 1997, un esfuerzo conjunto de la NASA y JAXA, se ha observado un rápido avance en el desarrollo de sistemas y productos de recuperación de precipitaciones por satélite. Estos avances tecnológicos han permitido obtener datos más precisos y detallados sobre la distribución espacial y temporal de la lluvia.

El estudio titulado "From TRMM to GPM, how do improvements of post/near-real-time satellite precipitation estimates manifest?", realizado por Zhehui Shen en 2022, se centra en la comparación de dos algoritmos de estimación de lluvia por satélite: IMERG (de la misión GPM) y TMPA (de la misión TRMM). El objetivo principal del estudio es evaluar el rendimiento de IMERG en comparación con TMPA, identificando sus fortalezas y debilidades. El análisis realizado por Shen revela que IMERG presenta un avance significativo en la precisión de las estimaciones de lluvia en comparación con TMPA. Esta mejora se observa en diversos aspectos, incluyendo la reducción del error absoluto medio en el cual, IMERG, muestra un menor error absoluto medio en la estimación de la precipitación total, lo que indica una mayor concordancia con las mediciones reales, de igual forma muestra un mejoramiento en la captura de eventos de lluvia extremos, puesto que, presenta una mejor capacidad para detectar y cuantificar eventos de

lluvia intensa, eventos que TMPA solía subestimar o incluso no detectar. Tiene una mayor cobertura espacial, incluyendo áreas con escasa o nula presencia de estaciones pluviométricas, donde TMPA tenía limitaciones. Este estudio realizado por Shen es de gran importancia para el avance en la medición de la lluvia por satélite, pues se reforzó la posición de IMERG como un algoritmo de estimación de lluvia por satélite más preciso y confiable que su predecesor, TMPA. Señalan las áreas en las que IMERG aún presenta limitaciones, lo que permite enfocar esfuerzos futuros en el desarrollo de algoritmos aún más precisos, validan el potencial de los datos satelitales para la estimación precisa de la precipitación, especialmente en áreas con escasa infraestructura de medición terrestre.

Por otro lado, encaminados a la lectura de antecedentes, se resalta la importancia de conocer la calidad de las estimaciones de precipitación basadas en satélites mediante una evaluación exhaustiva. Las propiedades de los errores dictan cómo se pueden utilizar adecuadamente los datos en aplicaciones hidrológicas. Además, el conocimiento de las propiedades del error es útil en el desarrollo futuro de algoritmos de recuperación (Zhe Li, 2013), dentro del desarrollo de este estudio, se realiza una evaluación exhaustiva de la calidad de las estimaciones de precipitación satelital para zonas específicas de Colombia. Se emplean tanto errores relativos como absolutos para analizar la precisión de los datos. De esta manera es importante destacar que investigar la cuestión de la transferibilidad de los resultados de las evaluaciones regionales a áreas diferentes pero similares tiene implicaciones en términos de mejorar el desempeño del uso de información Satelital en regiones del mundo, donde no hay observaciones terrestres disponibles y teniendo en cuenta que aún son necesarias investigaciones

del componente principal del sesgo total (el componente que produce los mayores errores sistemáticos) (Hanqing Chen, 2021).

El paquete satelital de libre acceso CHIRPS ha sido objeto de diversas investigaciones a nivel mundial. Un estudio relevante se llevó a cabo en Marruecos subsahariano, donde se evaluó la eficacia de CHIRPS a escala mensual para evaluar el cambio climático en la región de Chtouka Aït Baha (Rachdane, M. et al., 2022). En el estudio mencionado, se compararon diferentes datos satelitales disponibles para la región de Chtouka Aït Baha. Los resultados indicaron que CHIRPS no solo permite identificar los productos satelitales más adecuados para esta área de estudio, sino que también es útil para aplicaciones específicas como la gestión de recursos hídricos o el monitoreo y predicción de eventos extremos, además, se concluyó, que la capacidad de CHIRPS para identificar productos satelitales óptimos y su aplicabilidad en tareas específicas lo convierten en un recurso valioso para investigadores y profesionales que trabajan en regiones con datos limitados.

Las observaciones satelitales se han convertido en una herramienta invaluable para el estudio de la precipitación a nivel global. Su capacidad para brindar información espacial y temporalmente detallada las convierte en una alternativa superior a los métodos tradicionales de medición, como los pluviómetros terrestres, El artículo de Kidd y Huffman (2011) ofrece una revisión exhaustiva de la estimación de la precipitación global utilizando satélites. El artículo abarca diferentes aspectos como lo son las mediciones convencionales, en las cuales se describe la metodología tradicional de medición de la precipitación mediante pluviómetros terrestres, destacando sus limitaciones, Los sistemas satelitales que presentan una descripción detallada de los principales sistemas satelitales utilizados para la observación de la precipitación, explicando

sus principios de funcionamiento y capacidades, se analiza la generación, disponibilidad y validación de los productos derivados de la precipitación obtenidos a partir de los datos satelitales, se discuten las misiones satelitales de precipitación previstas para el futuro, destacando sus avances tecnológicos y potencial para mejorar la precisión y la cobertura de los datos.

Resaltando literatura redactada por el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM escrito por (Alexander Martínez Pedraza, 2018) en el cual se presenta una validación de las estimaciones de precipitación en Colombia utilizando datos del “Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)” y las estimaciones corregidas basadas en CHIRPS, conocidas como IRE. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la calidad de estas estimaciones comparándolas con datos observados de estaciones meteorológicas. Se utilizan pruebas estadísticas como el coeficiente de correlación de Spearman, la prueba de comparaciones de distribución y la prueba de diferencias de medianas para validar las estimaciones. Los resultados muestran que las estimaciones CHIRPS e IRE tienen una alta correlación con las observaciones, pero se evidencian diferencias significativas en la mediana y distribución de los datos, Se concluye que las estimaciones IRE muestran un mejor desempeño que las estimaciones CHIRPS, particularmente en términos de eficiencia y bondad de ajuste. Se recomienda el uso de las estimaciones IRE y se sugiere la construcción de un protocolo documentado para el uso de estas estimaciones.

(Getachew Tesfaye Ayehu, 2018) en su artículo titulado Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia, se centró en la validación de nuevos productos de lluvia satelital sobre la cuenca del Alto Nilo Azul en Etiopía. Se evaluó el Climate

Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS), Tropical Applications of Meteorology using SATellite and ground-based observations (TAMSAT 3), TAMSAT 2 y el producto African Rainfall Climatology version 2 (ARC 2). La comparación se realizó a nivel de dekadal (cada 10 días) y mensual, así como en diferentes elevaciones dentro de la cuenca, obteniendo como conclusión que CHIRPS mostró un mejor rendimiento en comparación con TAMSAT y ARC 2. En la escala de dekadal, CHIRPS exhibió el mejor rendimiento en la detección de eventos de lluvia, con una probabilidad de detección (POD) y un índice de éxito crítico (CSI) más altos en comparación con TAMSAT 3 y ARC 2. También mostró una menor tasa de falsas alarmas y una mayor concordancia con las observaciones de pluviómetro en términos de coeficiente de correlación (r), sesgo y error cuadrático medio (RMSE). A pesar de sobreestimar la frecuencia de eventos de lluvia, CHIRPS demostró una buena capacidad para detectar la cantidad de lluvia volumétrica.

Uno de los artículos de revista tenidos en cuenta es Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over easternAfrica escrito por (Tufa Dinku, 2018), en dicho artículo se resalta que los datos de precipitaciones provenientes de las observaciones de las estaciones son inadecuados en muchas partes del mundo debido a redes de observación escasas o inexistentes, o a informes limitados de observaciones de pluviómetros. Como resultado, las estimaciones de precipitaciones por medio de observaciones satelitales se han utilizado como alternativa o complemento a las observaciones de las estaciones. Sin embargo, muchos productos de lluvia basados en satélites con series temporales largas adolecen de resoluciones espaciales y temporales toscas y de faltas de homogeneidad causadas por variaciones en las entradas de los satélites. Hay algunos productos de lluvia identificados por medio de observaciones satelitales

con series temporales razonablemente consistentes, pero a menudo se limitan a áreas geográficas específicas. El Grupo de Precipitación Infrarroja de Riesgos Climáticos (CHIRP) y el CHIRP combinado con observaciones de estaciones (CHIRPS) son productos de lluvia basados en satélites producidos recientemente con resoluciones espaciales y temporales relativamente altas y una cobertura casi global. En este estudio, se evaluaron CHIRP y CHIRPS en África Oriental en escalas de tiempo diarias, decadales (10 días) y mensuales. La evaluación se realizó comparando los productos satelitales con datos pluviómetros de unas 1.200 estaciones. Los productos CHIRP y CHIRPS también se compararon con dos productos de lluvia satelitales operativos similares: la versión 2 de African Rainfall Climatology (ARC2) y las Aplicaciones tropicales de meteorología utilizando datos satelitales (TAMSAT). Los resultados muestran que tanto los productos CHIRP como CHIRPS son significativamente mejores que ARC2 con mayor habilidad y bajo o ningún sesgo.

Para hacer un énfasis en la revisión de antecedentes de investigaciones realizadas en Colombia se hace énfasis en un artículo titulado “Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes escrito por (Guzmán, 2014)”, en el cual se tiene en cuenta el objetivo principal de regionalizar a Colombia en zonas homogéneas respecto al régimen de lluvias según la estacionalidad en la cual se tiene en cuenta todo el territorio nacional como área de estudio con series de datos mensuales en la cual se tuvieron en cuenta 408 estaciones meteorológicas y obteniendo así diecisiete regiones homogéneas y subregiones, las cuales concuerdan con el régimen de precipitación en Colombia, de este artículo se tuvo en cuenta el análisis climatológico y los análisis estadísticos realizados a lo largo del país.

“Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil” es un artículo escrito por (Franklin J. Paredes-Trejo, 2017), es un estudio el cual analiza la precisión de las estimaciones de precipitación satelital para el Nordeste de Brasil (NEB), una región con escasa cobertura de estaciones terrestres de medición. El estudio compara las estimaciones satelitales del producto CHIRPS v.2 con datos de 21 estaciones terrestres durante el período 1981-2013. En dicha investigación se utilizaron métricas estadísticas como la correlación de Pearson (r), el sesgo porcentual (PBIAS), el error cuadrático medio de raíz (RMSE) y la probabilidad de detección (POD), la tasa de falsas alarmas (FAR) y el índice de éxito (TS) para evaluar el desempeño de CHIRPS en la estimación de la cantidad de lluvia y la detección de eventos de lluvia, como resultados se pudo extraer que CHIRPS presentó una buena correlación con las observaciones de las estaciones terrestres ($r > 0.7$ en la mayoría de las estaciones), indicando una relación lineal positiva entre las estimaciones satelitales y las mediciones reales. El sesgo porcentual (PBIAS) fue generalmente bajo (menor del 10% en la mayoría de las estaciones), lo que indica que CHIRPS no subestima ni sobreestima significativamente la precipitación. El RMSE fue variable entre las estaciones, con valores promedio entre 10 y 20 mm/mes, en segundo lugar, CHIRPS mostró una buena capacidad para detectar eventos de lluvia, con valores de POD superiores al 50% en la mayoría de las estaciones. Sin embargo, también presentó una tasa de falsas alarmas (FAR) moderada (alrededor del 30% en promedio), lo que significa que CHIRPS a veces indicó lluvia cuando no la hubo. El índice de éxito (TS) fue variable entre las estaciones, con valores promedio entre 0.4 y 0.6, concluyendo así que CHIRPS es una herramienta útil para estimar la precipitación en el NEB, especialmente en regiones con escasa cobertura de estaciones terrestres. Sin embargo, es importante tener en cuenta las

limitaciones del producto, como la posible subestimación de eventos de precipitación ligera y la presencia de falsas alarmas.

Consecuente con lo que respecta al análisis del uso de CHIRPS a nivel mundial, se toma como referencia el artículo titulado “Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela”, el cual es una investigación elaborada por (Franklin Javier Paredes Trejo, 2016), en el cual se resalta como Venezuela es susceptible a eventos climáticos extremos por esta razón se necesita comprender las capacidades de los productos de lluvia por medio de observaciones satelitales para la gestión del agua. Este estudio evalúa el producto CHIRPS v.2, comparándolo con datos medidos entre 1981-2007. Se analizan las fortalezas y debilidades de CHIRPS v.2 en diferentes categorías de lluvia, estaciones y regiones, obteniendo como resultados que CHIRPS v.2 tiende a sobreestimar la lluvia baja y subestimar la lluvia alta. Concluyendo que en general, el rendimiento de CHIRPS v.2 es bueno, con mejor desempeño en la temporada de lluvias (abril-septiembre). CHIRPS v.2 funciona mejor en regiones planas y abiertas como Los Llanos, concluyendo que CHIRPS v.2 es una herramienta útil para la planificación del agua en Venezuela, con algunas limitaciones que deben ser consideradas.

El desarrollo de este proyecto se basa en la aplicación de métricas estadísticas como el Krigeage Ordinario Simple, una técnica de interpolación espacial que permite estimar valores en puntos sin datos a partir de información conocida en puntos cercanos. Esta metodología se fundamenta en el artículo titulado "Kriging and Local Polynomial Methods for Blending Satellite-Derived and Gauge Precipitation Estimates to Support Hydrologic Early Warning Systems" (Verdin, Funk, Rajagopalan, & Kleiber, 2016). El artículo citado destaca la

importancia de la medición precisa de la precipitación para el manejo sostenible de los recursos naturales y la protección contra eventos climáticos extremos. Esta precisión es especialmente crucial en regiones con infraestructuras en desarrollo y propensas a eventos de gran magnitud. Los resultados del estudio mencionado demuestran que la combinación de datos satelitales y mediciones de estaciones pluviométricas mejora significativamente la precisión de las estimaciones de lluvia, especialmente en eventos de gran intensidad. Esta combinación permite aprovechar las ventajas de ambas fuentes de datos, compensando las limitaciones de cada una y obteniendo estimaciones más precisas y confiables de la precipitación.

“Document details - Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin”, es un artículo escrito por (Su, 2008) en el cual se evaluó, la precisión de las estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del Plata, una región de América del Sur con pocas estaciones meteorológicas. Los investigadores compararon las estimaciones de lluvia por satélite con datos de estaciones meteorológicas y con un modelo hidrológico. Los resultados muestran que, las estimaciones de lluvia por satélite son precisas a escala mensual, pero menos precisas a escala diaria. Esto significa que las estimaciones de lluvia por satélite se pueden usar para pronosticar el comportamiento del agua a largo plazo, pero no son tan confiables para pronosticar eventos de lluvia individuales, este estudio encontró que las estimaciones de lluvia por satélite tienen potencial para pronosticar el comportamiento del agua en la cuenca del Plata.

Por otro lado, se realizó el análisis del artículo titulado “Estimating Uncertainties in High-Resolution Satellite Precipitation Products: ¿Systematic or Random Error? (Viviana Maggioni, 2016)”, en el cual presenta un método para medir la precisión de las estimaciones de

lluvia por satélite, el método se aplica a tres productos de la misión TRMM en Estados Unidos. Los resultados muestran que el producto TMPA 3B42V7 es más preciso que el producto en tiempo real 3B42RT, el error principal en ambos productos es aleatorio, y se reduce mediante el ajuste de sesgo, el error depende de la intensidad de la lluvia, lo que se debe tener en cuenta al ajustar el sesgo, las estimaciones de error son útiles para mejorar la aplicación de los datos de lluvia por satélite.

“Comparison and Bias Correction of TMPA Precipitation Products over the Lower Part of Red–Thai Binh River Basin of Vietnam” es un artículo escrito por (Le, Sutton, Bui, & Bolten, 2018). El estudio evalúa la precisión de dos productos de estimación de lluvia por satélite (TMPA 3B42V7 y 3B42RT) en la cuenca del río Red-Thai Binh, los resultados muestran que ambos productos tienen una precisión limitada a escala diaria, pero son más precisos a escala mensual. Los productos TMPA subestiman la lluvia en la estación seca y la sobreestiman en la estación húmeda, Se desarrolló un método para corregir el sesgo de los productos TMPA utilizando información climática y topográfica, el método de corrección mejora la precisión de los productos TMPA, especialmente en la estación seca.

“Intercomparison of Rain Gauge, Radar, and Satellite-Based Precipitation Estimates with Emphasis on Hydrologic Forecasting” es un artículo escrito por (Koray K. Yilmaz, 2005). Este estudio compara tres métodos para estimar la lluvia en el sureste de Estados Unidos: Red de pluviómetros (MAPG), Radar/medidor (MAPX), Satélite (MAPS), los resultados muestran que la precisión de los métodos varía según la cuenca y el momento del año. MAPS se compara con MAPG para pronosticar el flujo de agua usando un modelo hidrológico. El rendimiento de MAPS depende del tamaño de la cuenca y del sesgo en las estimaciones de lluvia. La calibración

de los parámetros del modelo mejora el rendimiento de MAPS, Los resultados pueden ayudar a los gestores del agua a elegir el mejor método para estimar la lluvia en una cuenca particular.

“Microwave remote sensing of soil moisture: evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia escrito por (James Cashion, 2005)”, el cual analiza la capacidad de los sensores satelitales para medir la humedad del suelo. Los sensores de microondas pasivos son una herramienta eficaz para observar la humedad del suelo en grandes áreas, el estudio compara las mediciones de humedad del suelo tomadas en el campo con datos de los sensores TMI y MODIS, los resultados muestran que los sensores TMI pueden observar la humedad del suelo cuando la vegetación es baja. La combinación de datos de TMI, MODIS y sensores in situ mejora la precisión de la medición de la humedad del suelo. Los sensores satelitales, junto con otras herramientas, pueden ser un método efectivo para monitorizar la humedad del suelo a gran escala.

4. Referente normativo y legal

Con base a la normativa colombiana establecida en marco de los recursos naturales y medio ambiente es importante tener en cuenta la siguiente normativa ambiental que se refiere a la elaboración de estudios ambientales y el uso de datos meteorológicos y climatológicos en sus capítulos, que hace parte de la jerarquía legislativa de Colombia la cual se puede apreciar en la tabla a continuación:

Tabla 1.

Normativa Colombiana Vigente y referente normativo

Documento	Tipo de Documento	Norma	Descripción
Establecimiento del SINA	Decreto / Ley	Ley 2811 de 1974	Establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y crea el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El IDEAM es la entidad gubernamental encargada de la gestión del clima en Colombia
Fundamentos de la política ambiental colombiana	Ley	Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental,

			SINA, y se dictan otras disposiciones.
Reglamentación del SINA	Decreto	Decreto 291 de 2004	Reglamenta el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece las funciones del IDEAM en materia de meteorología.
Manual de Evaluación de Estudios Ambientales, criterios y procedimientos	Resolución	Resolución 1552 de 2005	Establecer procedimientos unificados, que fueron condensados en el Manual de evaluación de estudios ambientales: Criterios y procedimientos y el Manual de seguimiento ambiental de proyectos: Criterios y procedimientos, que ponemos a disposición de usuarios, técnicos y demás interesados
Lineamientos de operación y mantenimiento estaciones meteorológicas.	Resolución	Resolución 1282 de 2012	Establece los lineamientos para la instalación, operación y mantenimiento de las estaciones meteorológicas en Colombia.
Reglamentación general del sector Ambiente	Decreto	Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector

			ambiente y desarrollo sostenible.
Modelo de almacenamiento geográfico de datos GDB	Resolución	Resolución 2182, 23 de diciembre del 2016	Por el cual se modifica y consolida el Modelo de Almacenamiento geográfico contenido en la metodología general de estudios ambientales y en el manual de seguimiento ambiental de proyectos.
Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales (MGEPEA)	Resolución 1402 de 2018	Resolución 1402 de 2018	Corresponde a un conjunto de instrucciones ordenadas y jerarquizadas que facilitan a quien está interesado en desarrollar un proyecto, obra o actividad sujeto de licenciamiento ambiental, el proceso de elaboración y presentación de los estudios ambientales que exige la normativa; estas orientaciones metodológicas, que se complementan con los requisitos establecidos en los términos de referencia, asegura que los estudios ambientales contengan la información suficiente y necesaria para que las autoridades ambientales tomen decisiones frente al desarrollo de los proyectos

con total transparencia,
eficiencia y objetividad.

Fuente: Autor, 2024.

5. Referente teórico

Este apartado profundiza en los fundamentos teóricos que sustentan el problema de investigación del presente proyecto. Nuestro objetivo es delinear con precisión los límites y el marco conceptual que guiarán la comparación de datos climáticos entre los programas satelitales CHIRPS y ERA5, y la información proporcionada por el IDEAM. Esta comparación se enfocará en los departamentos de Boyacá y Casanare, brindando información climatológica relevante para la región. A continuación, se abordarán conceptos claves que se deben tener en cuenta en el desarrollo del proyecto.

5.1. Estación Meteorológica:

Conocer el significado de estación meteorológica es de gran fundamento para el cumplimiento del objetivo general, según el (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2023) Una estación meteorológica es una instalación que se utiliza para medir y registrar los parámetros meteorológicos, como la temperatura, la presión atmosférica, la precipitación, la humedad relativa, la velocidad y dirección del viento, la radiación solar, etc. Estos datos se utilizan para estudiar el clima, la predicción meteorológica, la agricultura, la planificación urbana, etc.

Bajo esta definición se hace énfasis en las categorías de las estaciones meteorológicas que se dividen en 12 según el (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Agrometeorológica (AM): En esta estación se realizan observaciones meteorológicas y otras observaciones que ayudan a determinar las relaciones entre el clima, por una parte y la vida de las plantas y los animales por la otra. Incluye el mismo programa de

observaciones de la estación climatológica principal, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo). (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Climatológica Ordinaria (CO): Es aquella en la cual se hacen observaciones de precipitación, temperatura del aire, temperaturas máxima y mínima a 2 metros y humedad primordialmente. Poseen muy poco instrumental registrador. Algunas llevan instrumentos adicionales tales como tanque de evaporación, heliógrafo y anemómetro. (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Climatológica Principal (CP): Es aquella en la cual se hacen observaciones de precipitación, temperatura del aire, temperaturas máxima y mínima a 2 metros, humedad, viento, radiación, brillo solar, evaporación, temperaturas extremas del tanque de evaporación, cantidad de nubes y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores. (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Limnigráfica (LG): Estación donde se mide el nivel de una corriente hídrica mediante un aparato registrador de nivel y que grafica una curva llamada limnigrama. (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Limnimétrica (LM): Estación donde se mide el nivel de una corriente hídrica mediante un aparato (mira dividida en centímetros) que mide altura del agua, sin registrarla. Una persona toma el dato y lo registra en una libreta. (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Mareo gráfica (MM): Estaciones para observación del estado del mar. Mide nivel, temperatura y salinidad de las aguas marinas. (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación meteorológica especial (ME): Estación instalada para realizar seguimiento a un fenómeno o un fin específico, por ejemplo, las heladas. (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Pluviográfica (PG): Es aquella que registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia. Actualmente se utilizan los pluviógrafos de registro diario (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Pluviométrica (PM): Es una estación meteorológica dotada de un pluviómetro o recipiente que permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas. (Instituto De Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Radio Sonda: La estación de radiosonda tiene por finalidad la medición directa de parámetros atmosféricos tales como temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa y dirección y velocidad del viento en las capas altas de la atmósfera (tropósfera y baja estratósfera), mediante el rastreo, por medios electrónicos, de la trayectoria de un globo meteorológico que asciende libremente y que lleva un dispositivo con los sensores que miden y transmiten la señal con los datos. (Instituto De Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Sinóptica Principal: En este tipo de estación se efectúan observaciones de los principales elementos meteorológicos en horas convenidas internacionalmente. Los datos se

toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, características de humedad, precipitación, temperaturas extremas, capas significativas de nubes, recorrido del viento y secuencia de los fenómenos atmosféricos. (Instituto De Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Estación Sinóptica Secundaria: Al igual que en la estación anterior, las observaciones se realizan a horas convenidas internacionalmente y los datos corresponden comúnmente a visibilidad, fenómenos especiales, tiempo atmosférico, nubosidad, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad del aire, presión y viento. (Instituto De Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

De igual manera se hace referencia al estado de la estación:

Activa: Estación que se encuentra en operación y registra datos automáticos o tomados por un observador.

En mantenimiento: Estación que se encuentra en operación pero que temporalmente no registra datos automáticos o tomados por un observador por problemas en los equipos o como consecuencia de un siniestro.

Suspendida: Estación que se encuentra fuera de servicio de manera definitiva y no registra datos automáticos o tomados por un observador. Solo se puede consultar datos históricos en estas estaciones. (Instituto De Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

Por último, se tuvo en cuenta el tipo de Tecnología de la estación que según él (Instituto De Hidrología, meteorologías y Estudios Ambientales, 2019) en Colombia existen 3 tipos de estaciones con tecnologías diferentes:

Estaciones Convencionales: Estaciones donde la toma del dato la efectúa un observador y la registra en una libreta para luego enviarla a los técnicos para que se capture y procesen estos datos, las estaciones

Automáticas con telemetría: Estaciones que obtienen los datos de manera automática mediante sensores de diferente tipo y que tiene la capacidad de enviarlos de manera automática al centro de recepción por diferentes medios de transmisión (satelital, radiofrecuencia, GPRS, etc.).

Automáticas sin telemetría: Estaciones que obtienen los datos de manera automática mediante sensores de diferente tipo y que tiene la capacidad de almacenarlos en un dispositivo dentro de la misma estación. No puede enviar los datos de manera automática. Los datos deben ser obtenidos por una persona que se conecta al sitio donde la estación almacena los datos.

5.2. Satélites

Un satélite es cualquier objeto, ya sea natural o artificial, que gira alrededor de un cuerpo celeste y que puede tener diferentes funciones de acuerdo a su procedencia. (Bonilla, INSTITUTO ESPACIAL DE TECNICA AEROESPACIAL, SF) La palabra satélite proviene del latín “satelles” que significa “lo que está alrededor de algo”. Un satélite natural es un cuerpo celeste que órbita alrededor de otro de mayor masa, ambos vinculados entre sí por fuerzas de gravedad recíprocas. Un satélite artificial es un dispositivo construido por el hombre, tripulado o no, que se pone en órbita y se hace girar alrededor de un cuerpo celeste con un fin específico.

Es de resaltar que este concepto es uno de los primordiales en el desarrollo del cumplimiento del objetivo general ya que se usa información satelital en el desarrollo de la

misma, según (Bonilla, INSTITUTO ESPACIAL DE TECNICA AEROESPACIAL, SF) En astronomía, un satélite es un objeto que órbita alrededor de otro objeto de mayor tamaño. Existen dos tipos de satélites, los naturales y los artificiales.

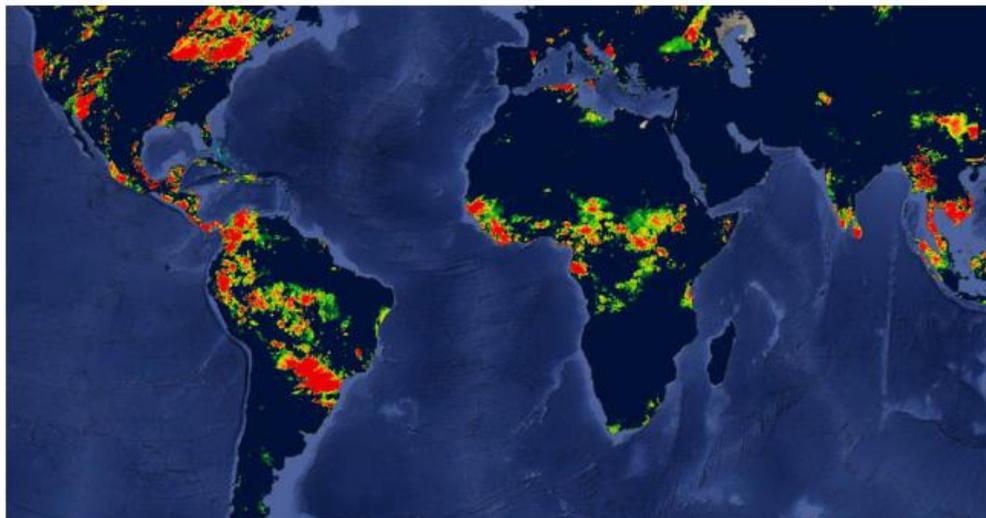
Con respecto a los naturales, solo en nuestro Sistema Solar hay varios cientos de satélites naturales. Para nosotros, el más conocido es la Luna, pero Saturno tiene al menos 53 satélites naturales y, además, entre los años 2004 y 2017 Estuvo orbitando un satélite artificial, la sonda Cassini, que estuvo explorando tanto el planeta como sus lunas.

En el desarrollo de la investigación se usó información satelital de CHIRPS Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations, el cual ofrece datos de precipitación global a escala diaria y ERA 5 Fifth European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis, que proporciona información climática global reanalizada, incluyendo variables como temperatura, presión y viento.

Para abordar completamente cual es el funcionamiento de CHIRPS se toma como referencia la universidad de California, Santa bárbara en el cual habla de CHIRPS y las estimaciones de lluvia a partir de pluviómetros y observaciones satelitales se habla que los datos de precipitación infrarroja con estación del Climate Hazards Group (CHIRPS), son un conjunto de datos de precipitación casi global de más de 35 años. CHIRPS, que abarca 50°S-50°N (y todas las longitudes) y abarca desde 1981 hasta el presente, incorpora nuestra climatología interna, CHPclim, imágenes satelitales de resolución de 0,05° y datos de estaciones in situ para crear series temporales de precipitaciones cuadrículadas. para análisis de tendencias y seguimiento de sequías estacionales. (University of California, 2024).

Ilustración 1.

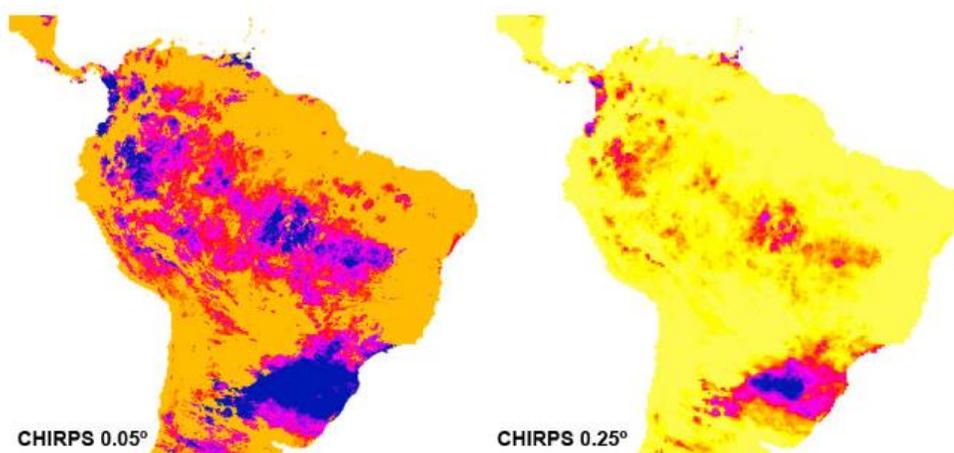
Precipitación CHIRPS GEE



Fuente: (Funk, 2015.)

Ilustración 2.

CHIRPS 0.05°, CHIRPS 0.25°

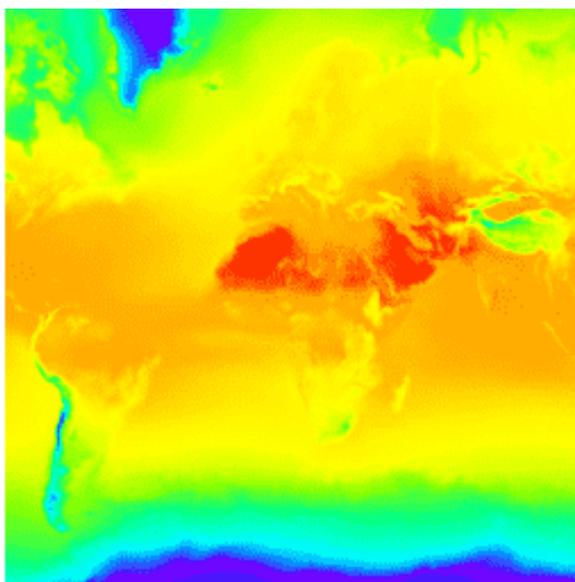


Fuente: (Funk, 2015.)

Por otro lado, ERA 5 es reanálisis atmosférica del clima global del ECMWF de quinta generación que abarca el período comprendido entre enero de 1940 y el presente. ERA5 es producido por el Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S) en ECMWF.

Ilustración 3.

CHIRPS 0.05°, CHIRPS 0.25°



Fuente: (Copernicus Climate Change Service (C3S), s.f.)

ERA5 proporciona estimaciones horarias de un gran número de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 31 kilómetros y resuelven la atmósfera utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 kilómetros. ERA5 incluye información sobre las incertidumbres de todas las variables con resoluciones espaciales y temporales reducidas. (Servicio de Cambio Climático de Copérnico, 2024).

Por último, es de anotar que toda la información satelital se descargara por medio de Google Earth Engine, esta plataforma de análisis, permite procesar información geoespacial en la

nube sin necesidad de ocupar la memoria de la computadora del usuario. Al mismo tiempo, GEE está ligado directamente a varios programas satelitales que permiten integrar en las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas. GEE es, por lo tanto, una solución innovadora para el manejo de los datos masivos (“Big Data”), que permite afrontar problemas globales, dando resultados velozmente. De esta manera, permite proponer y actuar en soluciones para dichos problemas de forma ágil (Gorelick et al., 2017). (Gabriel Alejandro Perilla, 2020).

A partir de lo anteriormente descrito se resalta que cada uno de los satélites a analizar cuentan con un sensoramiento remoto, que hace referencia a la teledetección o percepción remota que es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos a distancia, sin contacto físico con el mismo.

Los sensores remotos se utilizan para recopilar datos sobre la superficie terrestre, la atmósfera, el océano y el espacio. Estos datos se utilizan para una variedad de aplicaciones, incluyendo:

- Estudio del clima: la teledetección se utiliza para estudiar los patrones climáticos, las tendencias climáticas y los eventos climáticos extremos.
- Predicción meteorológica: la teledetección se utiliza para mejorar la precisión de las predicciones meteorológicas.
- Agricultura: la teledetección se utiliza para monitorizar las condiciones meteorológicas y agrícolas, y para ayudar a los agricultores a tomar decisiones sobre la gestión de sus cultivos.
- Medio ambiente: la teledetección se utiliza para monitorizar la contaminación, la deforestación y otros problemas ambientales.

- Planificación urbana: la teledetección se utiliza para planificar el desarrollo urbano y para mitigar los efectos del cambio climático.

Los sensores remotos pueden clasificarse según el medio a través del cual recopilan datos:

- Sensores ópticos: utilizan la luz visible, el infrarrojo cercano o el infrarrojo térmico para recopilar datos.
- Sensores de microondas: utilizan las microondas para recopilar datos.
- Sensores de radar: utilizan las ondas de radio para recopilar datos.
- Sensores electromagnéticos: utilizan una variedad de frecuencias de radiación electromagnética para recopilar datos.

Los sensores remotos pueden clasificarse también según su ubicación:

- Sensores aéreos: se encuentran en aviones o helicópteros.
- Sensores satelitales: se encuentran en satélites.
- Sensores terrestres: se encuentran en la superficie terrestre.

La teledetección es una herramienta poderosa que se utiliza en una variedad de aplicaciones. Los sensores remotos proporcionan datos que son esenciales para comprender el medio ambiente y para tomar decisiones informadas sobre el uso de los recursos naturales.

Dentro del concepto satelital otro de los temas a abordar es el de Pixel que se refiere a la unidad básica de información de una imagen digital. Representa un punto de color en una pantalla o en un archivo de imagen.

5.3. Geoestadística

Se centra en el estudio de variables espaciales que cambian de manera continua dentro de la región de estudio. Para abordar este tipo de problemas se tienen, normalmente, observaciones de las variables de interés en unas pocas localizaciones del espacio. A partir de estas observaciones es posible estimar el valor de la variable de interés en cualquier punto de la región de estudio. (BEIO, 2022).

Los primeros métodos geoestadísticos se desarrollaron dentro del contexto de la minería en la década de 1960, por el ingeniero sudafricano D. G. Krige, con el objetivo de estimar las reservas mineras. Estas ideas fueron formalizadas por G. Matheron en lo que se conoce comúnmente como kriging ((Chilès and Desassis 2018)).

El concepto de la Muestra es uno de los ejes de desarrollo del presente informe resaltando que la mayoría de los estudios estadísticos, se realizan no sobre la población, sino sobre un subconjunto o una parte de ella, llamado muestra, partiendo del supuesto de que este subconjunto presenta el mismo comportamiento y características que la población. En general el tamaño de la muestra es mucho menor al tamaño de la población.

Los valores o índices que se concluyen de una muestra se llaman estadígrafos y estos mediante métodos inferenciales o probabilísticos, se aproximan a los parámetros poblacionales de muestras homogéneas mediante métodos no determinísticos de interpolación por medio del estadígrafo, en el presente estudio se hará uso de métodos probabilísticos para análisis de las variables descargadas obtenidas (PRECIPITACION Y TEMPERATURAS MAXIMAS, MINIMAS).

5.4. Interpolaciones por medio de métodos SIG

Las interpolaciones son procesos que permiten estimar valores en puntos sin datos a partir de información conocida en puntos cercanos. Esta técnica se utiliza para crear superficies continuas a partir de datos discretos, como puntos de muestreo o mediciones en estaciones meteorológicas. ArcGIS proporciona diversas herramientas de interpolación que se adaptan a diferentes tipos de datos y necesidades. Dentro del desarrollo del presente estudio se llevó a cabo un análisis por medio de KRIGING, el cual es un método que utiliza un modelo estadístico para estimar los valores en puntos sin datos. Puede producir superficies más precisas y realistas.

Kriging Ordinario: "El Kriging ordinario es un método de interpolación espacial que estima el valor desconocido en una ubicación concreta a partir de los valores conocidos en ubicaciones circundantes. El método se basa en la suposición de que la variable de interés está correlacionada espacialmente, es decir, que los valores cercanos entre sí son más similares que los valores alejados. La correlación espacial se mide mediante una función de variograma, que describe cómo la correlación entre los valores disminuye la distancia.

Características del Kriging ordinario:

Considera la correlación espacial: A diferencia de otros métodos de interpolación simples, como el vecino más cercano o la interpolación por distancia inverso, el Kriging ordinario toma en cuenta la correlación espacial entre los puntos de datos. Esto permite obtener estimaciones más precisas y realistas de la superficie interpolada.

Utiliza un modelo estadístico: El Kriging ordinario se basa en un modelo estadístico que describe la distribución espacial de la variable de interés. Este modelo permite ajustar la interpolación a las características específicas de los datos.

Minimiza el error de estimación: El objetivo del Kriging ordinario es minimizar el error cuadrático medio de las estimaciones. Esto significa que busca la solución que produce el menor error promedio entre los valores estimados y los valores reales.

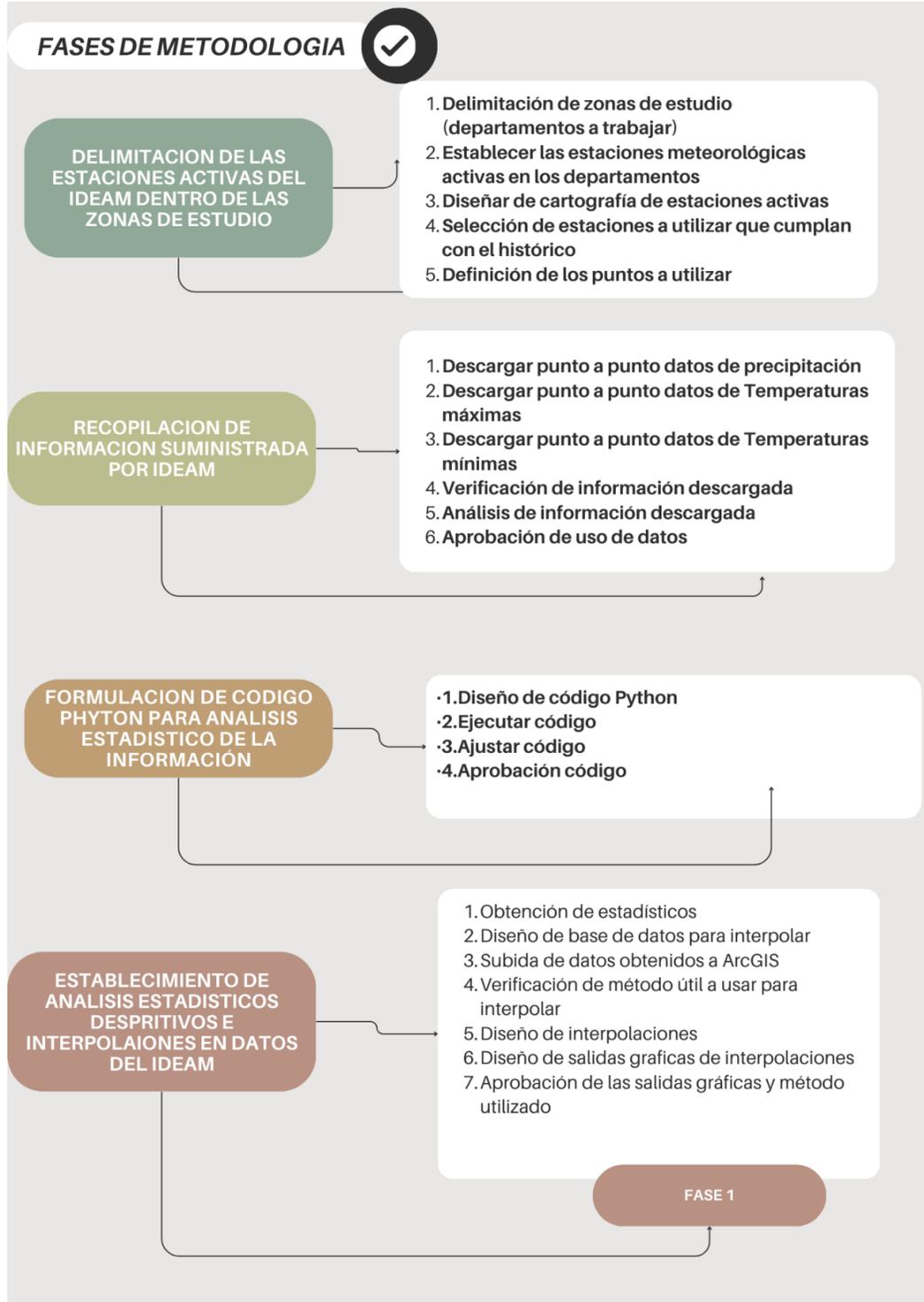
Consideración de la incertidumbre: El Kriging ordinario proporciona una estimación del error de estimación para cada punto interpolado, lo que permite evaluar la incertidumbre de los resultados.

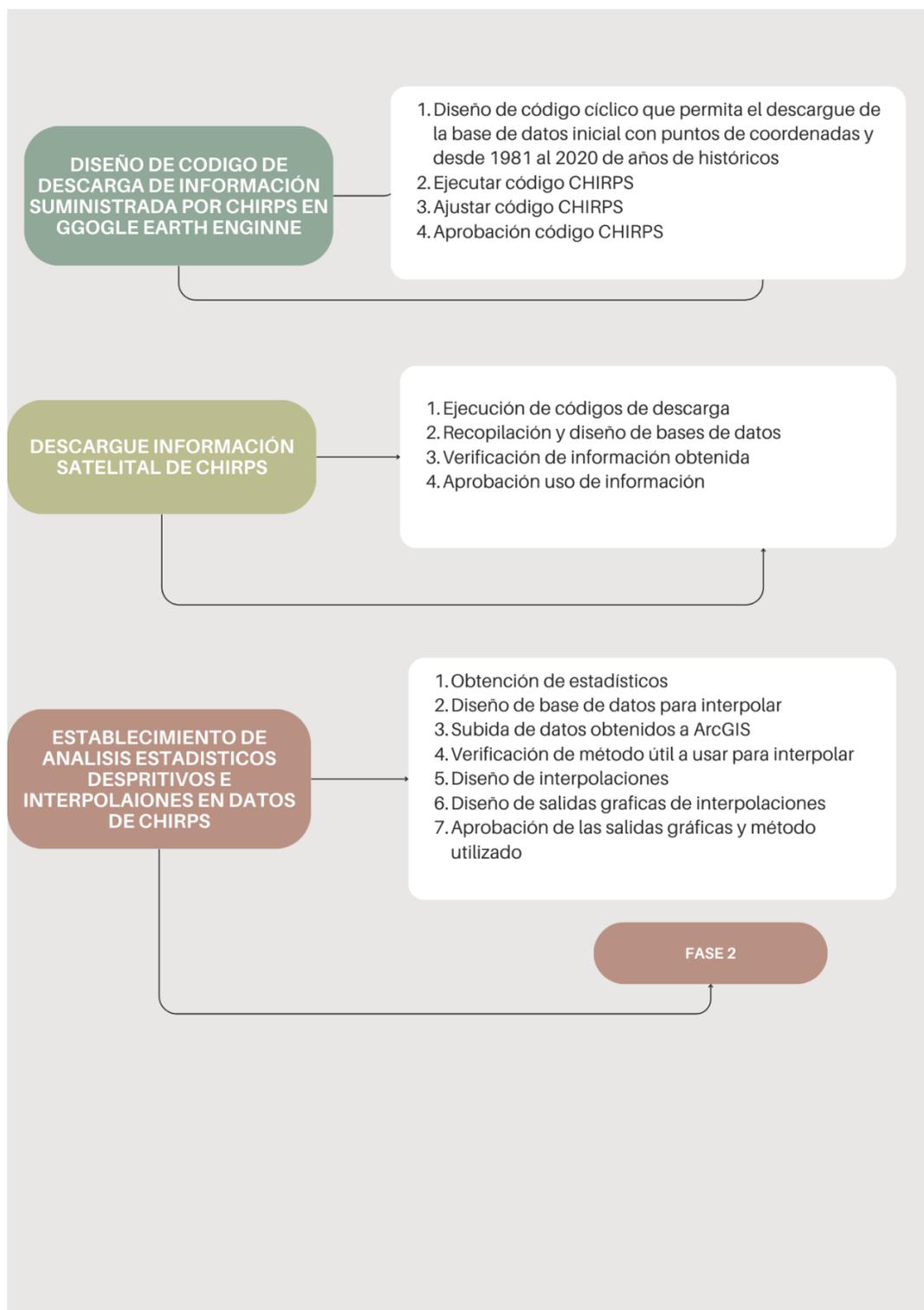
6. Metodología

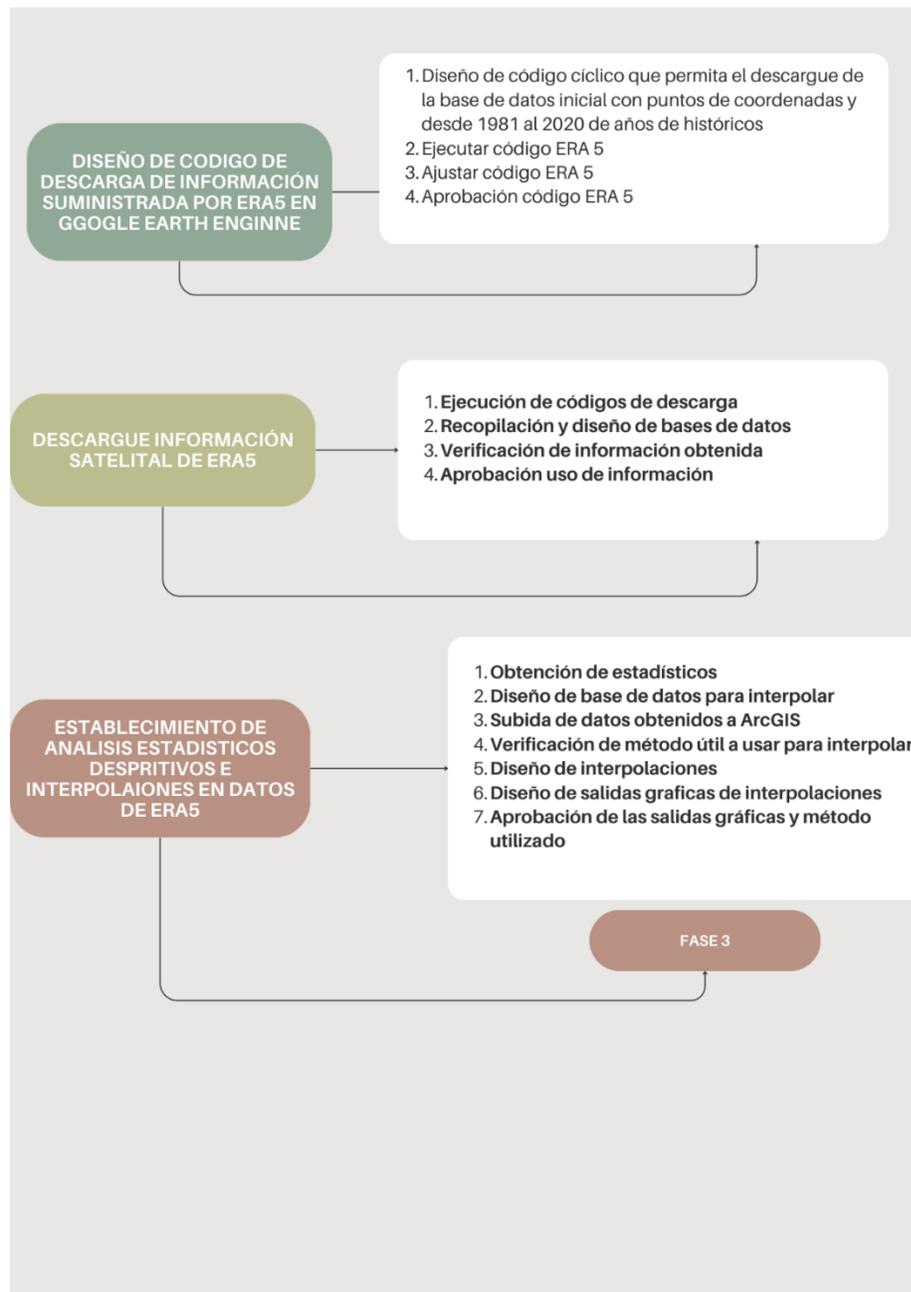
La metodología propuesta el desarrollo del análisis estadístico de comparación de los productos satelitales CHIRPS y ERA 5 con información Local IDEAM, se divide en Cuatro fases, cada una de las cuales engloba diversas actividades conducentes a alcanzar el objetivo general (ver figura 1.) Estas fases abarcan desde la revisión bibliográfica y la recopilación de información, creación de códigos escritos en el lenguaje de programación de Python para el análisis espacial y descarga de información usando la plataforma de Google Earth Engine, hasta el análisis estadístico espacial, la creación de salidas gráficas y, finalmente, la publicación de la información final. Este último tiene como finalidad respaldar la toma de decisiones encaminadas a estudios de impacto ambiental, obras y ejecución de proyectos en los departamentos de Casanare y Boyacá, como se ilustra en la figura 1.

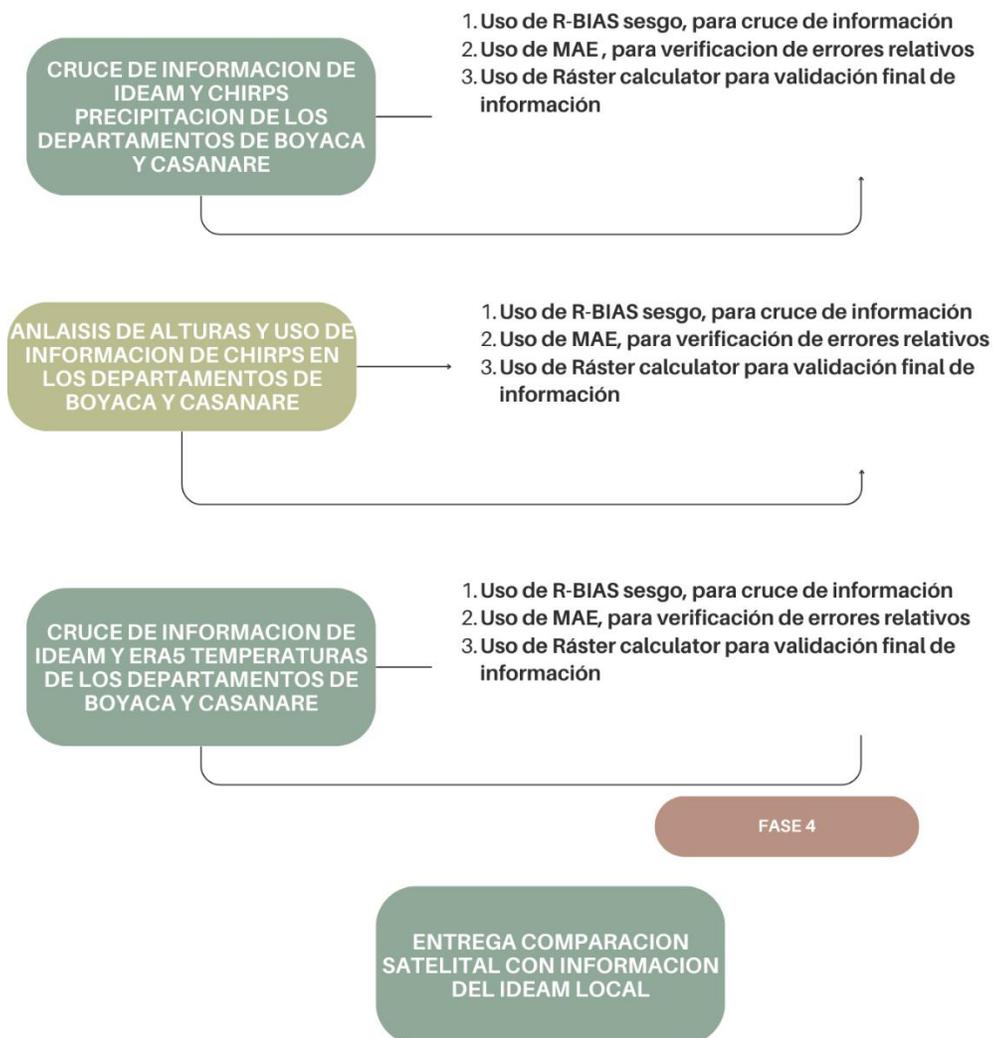
Figura 1.

Metodología









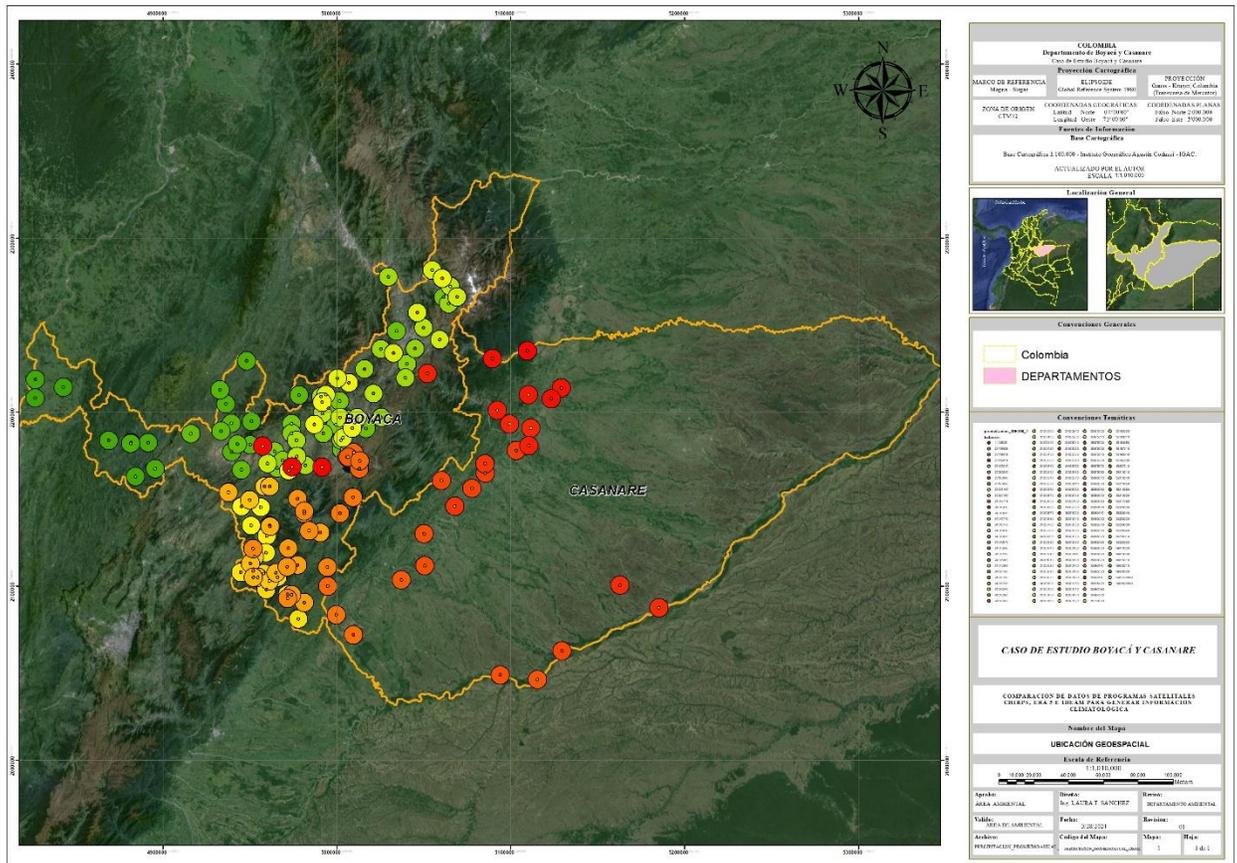
Fuente: Autor, 2024.

6.1. Descripción de la zona de estudio

El estudio se llevó a cabo en los departamentos de Boyacá y Casanare, Colombia, en coordenadas específicas de estaciones en tierra instaladas por el IDEAM (Mapa 1.)

Mapa 1.

Delimitación zona de estudio



Fuente: Autor, 2024.

Boyacá se caracteriza por una topografía diversa, con altitudes que van desde los 200 metros sobre el nivel del mar en la región del Piedemonte hasta los 5.410 metros en el Pico de Ritacuba, el más alto del departamento. Las principales zonas topográficas de Boyacá son la cordillera Oriental, la cual atraviesa el departamento de norte a sur, con picos como el Páramo de

Guachaneque, el Alto de San Miguel y el Nevado del Cocuy, la cordillera Central que se encuentra en la zona occidental del departamento, con picos como el Páramo de Tota y el Alto de la Virgen, el altiplano cundiboyacense que se encuentra en la zona central del departamento, con una altitud promedio de 2.500 metros sobre el nivel del mar.

Boyacá es un departamento de gran importancia para el IDEAM por su riqueza hídrica, ya que este es el departamento con mayor número de páramos de Colombia, lo que lo convierte en una fuente importante de agua para el país. El IDEAM monitorea la cantidad y calidad del agua en los páramos de Boyacá para asegurar su sostenibilidad, de igual manera por su diversidad biológica, ya que Boyacá, alberga una gran variedad de ecosistemas y especies animales y vegetales. El IDEAM cuenta con una red de estaciones meteorológicas que le permiten recopilar información sobre el clima del departamento. Esta información es utilizada para pronosticar el tiempo, evaluar el riesgo de desastres naturales y estudiar el cambio climático.

Por otro lado como área de estudio se delimito de igual manera el departamento de Casanare, este, se caracteriza por una topografía variada, con tres zonas principales, las cuales son Piedemonte el cual se encuentra al occidente del departamento, con altitudes que van desde los 500 hasta los 2.000 metros sobre el nivel del mar, esta zona se caracteriza por lomas y colinas, la Llanura que ocupa la mayor parte del departamento, con altitudes que van desde los 100 hasta los 500 metros sobre el nivel del mar, es una región plana con algunos esteros y caños y Serranía de la Macarena la cual se encuentra al oriente del departamento, con altitudes que superan los 2.000 metros sobre el nivel del mar. La serranía es una formación montañosa con bosques húmedos y páramos.

Casanare está ubicado en la región Oriental de Colombia, se caracteriza por su rica diversidad geográfica, cultural y ecológica. Su territorio abarca desde imponentes cordilleras, hasta vastas llanuras, albergando una gran variedad de ecosistemas y especies únicas. La altitud, la topografía y la biodiversidad de Casanare lo convierten en un escenario ideal para estudios ambientales realizados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

Casanare de igual forma cuenta con importantes ríos como el Meta, el Casanare y el Cravo Norte, este departamento se presenta una topografía variada, con altitudes que oscilan entre los 100 y los 3.500 metros sobre el nivel del mar (msnm). La Cordillera Oriental atraviesa el departamento por su parte occidental, alcanzando alturas superiores a los 3.000 msnm, mientras que las extensas llanuras del Orinoco se extienden hacia el este, con altitudes inferiores a los 300 msnm. Esta diversidad altitudinal crea una variedad de microclimas y ecosistemas únicos.

6.2. Enfoque metodológico

La metodología utilizada en el presente trabajo es de tipo cuantitativa, la cual, permitió la correlación de diferentes variables, criterios y estándares, con el fin de identificar áreas en las cuales es posible el uso de información satelital (CHIRPS, ERA5) las mismas que tienen ausencia de información local IDEAM, estaciones presentes en mantenimiento, suspendidas o de índole privada en los departamentos de Boyacá y Casanare, resaltando así que por medio de una investigación cuantitativa con variables estadísticas y procesamiento de imágenes, fue posible la determinación de áreas con potencial uso de información satelital de libre acceso, y la generación

de salidas cartográficas disponibles, convirtiéndose en una herramienta para facilitar la planificación y toma de decisiones en proyectos de evaluación de impacto ambiental, ejecución de obras, proyectos y actividades, identificación de áreas críticas en gestión del riesgo y demás actividades relacionadas a la información climática y climatológica.

Se emplean métodos cuantitativos, con el objetivo de minimizar la incertidumbre y la inconsistencia de los resultados, como señalan (Chávez González, González Guillén y Hernández de la Rosa, 2014). Este enfoque se fundamenta en la revisión exhaustiva de metodologías y experiencias previas de investigadores en el campo, lo que posibilita la definición de criterios para el correcto uso y correlación de información satelital con error bajo y la información satelital.

Los códigos de descarga diseñados para el uso de Google Earth Engine se encuentran en el presente estudio como ANEXO y escribieron mediante el lenguaje de programación de Python, empleando las librerías que permiten la conexión con la API permitiendo la descarga y análisis de datos relacionados con temperaturas históricas y precipitaciones en las coordenadas específicas que se necesiten analizar, en cualquier parte del territorio colombiano o del mundo. Estas funcionalidades están diseñadas para estar accesibles a la comunidad en general, con el propósito de promover la comprensión del acceso a información satelital gratuita y respaldar la planificación y ejecución de proyectos, obras y actividades.

6.3. Procedimiento

6.3.1. Fase 1. Recopilación y Análisis Información Local IDEAM

En este punto se delimito la zona de estudio, y, se realizó la identificación de las estaciones meteorológicas a analizar, por medio de la ejecución de diferentes actividades

encaminadas a la comparación estadística de los datos de programas satelitales con información local, iniciando con el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales IDEAM por medio de las actividades descritas a continuación.

1. Delimitación de Zonas de Estudio:

Para la determinación de las zonas de estudio se puso en consideración los siguientes aspectos:

- **Importancia de las zonas:** Se priorizaron las zonas donde la empresa ha desarrollado una mayor cantidad de estudios de impacto ambiental, en este caso, Boyacá y Casanare.
- **Cambio topográfico:** Se tomó en cuenta la variabilidad topográfica entre Boyacá y Casanare, lo que impacta en la disponibilidad de información local y la necesidad de utilizar datos satelitales.
- **Ausencia de información local:** Se consideró, la falta de información local en el departamento de Casanare, lo que refuerza la importancia de los datos satelitales.

2. Consulta de Información del IDEAM:

En este apartado se realizó la Consulta de información proporcionada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), sobre las estaciones meteorológicas, ubicadas en los departamentos de Boyacá y Casanare. La información que se obtendrá debe incluir:

- **Ubicación:** Coordenadas geográficas de cada estación.
- **Tipo:** Categoría de la estación (automática, manual, etc.).

-
- **Datos históricos:** Registros históricos de variables como precipitación y temperatura (máximas, mínimas).

3. **Identificación de Estaciones Meteorológicas Activas y cartografía de puntos a delimitar:**

- **Consulta de la plataforma DHIME del IDEAM:** Verificación punto a punto de cada estación meteorológica en Boyacá y Casanare, para confirmar su estado activo y la disponibilidad de datos históricos de precipitación y temperatura (máximas, mínimas) durante un período de 1981-2020, 30 años.

- **Pertenencia al IDEAM:** Verificación de estaciones meteorológicas operadas por el IDEAM.

- **Estado activo:** Verificación de funcionamiento y registro actual de datos.

- **Histórico de datos:** Verificación de registro histórico de 1981-2020, 30 años.

Para las variables de precipitación y temperatura (máximas, mínimas).

- **Límite de suspensión:** Se excluyeron estaciones que estuvieran suspendidas o en mantenimiento a partir del año 2018.

- **Cartografía de estaciones activas:** Creación de mapas que muestran la ubicación de las estaciones meteorológicas activas identificadas.

Una vez delimitados estrictamente y minuciosamente los puntos que se utilizarían en el proceso de descargue de información procedente del IDEAM, se procedió a él descargue de las variables de PRECIPITACION, TEMPERATURAS (MAXIMAS Y MININAS) por medio de la ejecución de diferentes actividades enunciadas a continuación:

1. Descargar punto a punto datos de precipitación: Para este proceso de obtención de datos, es importante destacar que acceder a las bases de datos completas suministradas por el IDEAM es posible de forma gratuita, pero para conocer los datos de estaciones meteorológicas pertenecientes o en custodia a corporaciones autónomas regionales o empresas privadas, el proceso de obtención de datos tiene mayor dificultad, Por esta razón, para el proceso de descarga de información coordinada a coordinada se hará uso de la plataforma AQUARIUS WEB PORTAL del IDEAM, la cual forma parte de la plataforma pública de la entidad y permite la descarga gratuita de la información solicitada, por último, es necesario que se realice una verificación de la información obtenida para su posterior aprobación y uso.

La fase final de la etapa 1 consistió, en la creación de un código Python, para el análisis estadístico y la interpolación de datos locales de las variables en estudio, el cual permitirá la obtención de estadísticos descriptivos, se calcularán medidas de resumen como la media, la mediana, el rango y los cuartiles para cada variable (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima) de la información local. En función de las características de los datos y los objetivos del estudio, se seleccionó la técnica de interpolación más adecuada para cada variable.

Una vez seleccionada la técnica de interpolación, se aplicó a los datos locales, para generar valores estimados en las áreas donde no hay datos disponibles.

Los datos interpolados se integraron con los datos locales originales para realizar un análisis completo de las variables en estudio. Este análisis permitió identificar patrones, tendencias y relaciones entre las variables, lo que brinda información valiosa para la toma de decisiones.

6.3.2. Fase 2. Recopilación y Análisis Información SATELITAL CHIRPS

En esta fase se llevó a cabo la extracción, descarga y análisis de información satelital utilizando la plataforma de libre acceso Google Earth Engine (GEE) y el conjunto de datos satelitales CHIRPS el cual proporciona información de precipitación. GEE proporciona un código de descarga predeterminado que solo permite la descarga de información global y con un historial de 5 años. Para superar esta limitación y acceder a datos históricos más extensos, se implementaron la puesta en marcha de las siguientes subactividades:

1. Desarrollo de código de descarga personalizado:

Se hará uso de Anaconda y Jupyter Notebook en Python para crear un código de descarga personalizado. Este código permitirá acceder a información histórica de todos los datos almacenados por el satélite desde 1981 hasta la fecha cada estación meteorológica ubicada por medio de coordenadas y descargar simultáneamente toda la información con promedios anuales por estación.

2. Ejecución del código final y obtención de estadísticos descriptivos

Una vez desarrollado el código final, se ejecutó para descargar la información satelital requerida. Es importante destacar que para utilizar GEE correctamente, se requiere una cuenta activa en la plataforma la cual de libre acceso para descargue de precipitación.

Tras la selección de la técnica de interpolación adecuada, esta se aplicará a los datos satelitales de precipitación para estimar valores en las áreas con datos ausentes. Posteriormente, los datos interpolados se integrarán con los datos locales originales, permitiendo un análisis completo de las variables de estudio. Este análisis integral posibilitará la identificación de patrones, tendencias y relaciones entre las variables, brindando información valiosa para la toma de decisiones.

6.3.3. Fase 3. Fase de Extracción, Descarga y Análisis de Información Satelital de Temperatura por medio del paquete satelital de ERA 5

En esta etapa se realizó la extracción, descarga y análisis de información satelital de temperatura utilizando la plataforma gratuita Google Earth Engine (GEE) y el conjunto de datos satelitales ERA5, el cual provee información de temperaturas máximas y mínimas. GEE ofrece un código de descarga predeterminado que solo permite la descarga de información global y con un historial de 5 años. Para el descargue de la información satelital suministrada por ERA 5, se realizó el mismo procedimiento nombrado en el numeral 4.3.2. y de esta manera obtener los datos específicos para el proceso de interpolación KRIGING ORDINARIO.

3. Interpolación y análisis de datos satelitales de temperatura:

Tras la selección de la técnica de interpolación adecuada, esta se aplicó a los datos satelitales de temperatura para estimar valores en las áreas con datos ausentes. Posteriormente, los datos interpolados se integraron con los datos locales originales, permitiendo un análisis completo de las variables de estudio. Este análisis integral posibilitó la identificación de patrones, tendencias y relaciones entre las variables, brindando información valiosa para la toma de decisiones.

6.3.4. Fase 4. Cruce de información para análisis final

Se empleo el uso de herramientas SIG, ARCGIS, ARCTOLBOX, y métodos de cálculo de errores como MAE Y BIAS.

7. Resultados

7.1. Evaluación estadística de la información recopilada

La evaluación estadística desempeña un papel fundamental para comparar los datos de los programas satelitales CHIRPS Daily y ERA5 Daily Aggregates con la información registrada en las estaciones operadas por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en los departamentos de Boyacá y Casanare.

7.1.1. *Recopilación de la información de las estaciones locales*

En el desarrollo del estudio como primera medida se procede a la elección de los departamentos de Boyacá y Casanare como zonas de estudio y esta decisión se basó en varios criterios:

- Cantidad de Estudios de Impacto Ambiental: Se consideró la alta concentración de estudios de impacto ambiental realizados por la empresa que avala el presente estudio en estas regiones, lo que implica una mayor demanda de información ambiental precisa.
- Variabilidad Topográfica: Se tomó en cuenta la notable variabilidad topográfica entre Boyacá y Casanare, lo que genera patrones climáticos diversos que requieren un análisis detallado.
- Disponibilidad de Información Local: Se evidenció la escasez de información local confiable en el departamento del Casanare, lo que resalta la importancia de utilizar datos satelitales como fuente complementaria.

En segunda medida se procede a la identificación de Estaciones Meteorológicas Activas instaladas en tierra a lo largo y ancho de los departamentos de Boyacá y Casanare, en este ámbito se aplicaron diferentes procesos, enmarcando como primera medida la realización de un inventario y revisión cartográfica exhaustiva de las estaciones meteorológicas existentes en

Boyacá y Casanare, en el cual se hizo uso de la plataforma DHIME del IDEAM, a continuación se presenta el link de verificación y descarga (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>) de libre acceso la cual sirvió como herramienta para verificar el estado de cada estación, priorizando aquellas pertenecientes al IDEAM.

En tercer lugar, se diseñó y elaboró la cartografía de las Estaciones Activas. Para ello, se consideró la información proporcionada por el IDEAM sobre las estaciones meteorológicas activas, estableciendo un límite máximo de 2018 para estaciones suspendidas o en mantenimiento. Este proceso permitió identificar un total de 150 estaciones distribuidas en los departamentos de Boyacá y Casanare, las cuales constituyeron la base fundamental para el desarrollo del presente proyecto.

El **Anexo 1** presenta la base de datos en formato Excel (XLSX), correspondiente a las estaciones meteorológicas utilizadas en la presente investigación. Esta base de datos incluye información detallada sobre cada estación, como su coordenada geográfica, código de identificación, clase, familia y pertenencia institucional.

En la cuarta etapa de la recopilación de información de las estaciones meteorológicas del IDEAM, se procedió a descargar la información satelital correspondiente a cada una de las 150 estaciones meteorológicas identificadas previamente.

1. Descarga de Información

La información satelital descargada para cada estación meteorológica incluyó las siguientes variables:

- ✓ Precipitación (PTPM_CON)
- ✓ Temperatura máxima (TMX_CON)

✓ Temperatura mínima (TMN_CON)

La descarga se realizó punto a punto con base en las coordenadas de las estaciones instaladas en tierra por el IDEAM previamente seleccionadas, generando una base de datos individual para cada estación y las tres variables a analizar en el estudio por medio de Acuaris Web Portal, A Continuación, se presenta el link de la plataforma de libre acceso ([Data - AQUARIUS WebPortal \(ideam.gov.co\)](#)) Toda la información obtenida, con un histórico de 30 años para cada estación, se guardó comprimida para su posterior uso, resaltando que la plataforma entrega las bases de datos en formato CSV.

2. Verificación y Aprobación de Uso de la Información

Una vez descargada la información, se procedió a su verificación para garantizar su integridad y consistencia. Se aplicaron diversos filtros y controles de calidad para detectar y eliminar posibles errores o inconsistencias en los datos. Tras la verificación, se obtuvo la aprobación formal para el uso de la información en el presente estudio.

En el **Anexo 2**. Se presenta el total de carpetas correspondientes a la información descargada de las variables trabajadas (PRECIPITACION, TEMPERATURAS MAXIMAS Y MINIMAS) en formato .ZIP.

7.1.2. Recopilación de la información de la información de programas satelitales

La recopilación y descarga de información satelital para el presente estudio se llevó a cabo utilizando Google Earth Engine (GEE). GEE es una plataforma de código abierto basada en la nube que permite procesar y analizar grandes conjuntos de datos geoespaciales. Entre sus funciones más destacadas se encuentra la posibilidad de descargar información satelital de

diversas fuentes, incluyendo los paquetes CHIRPS y ERA5, los cuales fueron utilizados en el desarrollo de la investigación.

Paquetes Satelitales Utilizados

✓ CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations): Es un conjunto de datos de precipitación global que combina datos satelitales con observaciones en estaciones meteorológicas. Ofrece información de precipitación diaria a una resolución espacial de 5 kilómetros, desde el año 1981 hasta la actualidad.

✓ ERA5 (Fifth Generation of European Reanalysis): Es un conjunto de datos de reanálisis atmosférico global desarrollado por el Centro Europeo para Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF). Proporciona información sobre diversas variables atmosféricas, como temperatura, presión, viento, humedad y radiación solar, a una resolución espacial de 31 kilómetros, desde el año 1979 hasta la actualidad. Para este estudio, se utilizaron únicamente las variables de temperatura máxima y mínima.

Selección de Datos y Descarga

En el desarrollo de esta fase se encontró una limitación significativa relacionada con la descarga de datos a gran escala, utilizando los códigos genéricos de Google Earth Engine (GEE). Estos códigos permiten la descarga de información puntual al hacer clic en el mapa, pero limitan la cantidad de datos a un máximo de 5 años. Debido a la necesidad de obtener todos los datos históricos disponibles para las coordenadas específicas predefinidas, debido a esto, se diseñó una solución alternativa utilizando la API Python de Earth Engine.

La API Python de Earth Engine ofrece una interfaz poderosa para interactuar con la plataforma GEE desde un entorno de programación Python. Esta herramienta permitió establecer

una conexión directa, entre Python y GEE, posibilitando el diseño de un código personalizado para la descarga de datos a gran escala. Por medio de La API Python se elimina la restricción de 5 años impuesta por los códigos genéricos, permitiendo descargar conjuntos de datos completos para las coordenadas preestablecidas, facilita la automatización de tareas repetitivas, como la descarga de datos para múltiples ubicaciones o períodos de tiempo y ofrece un mayor grado de flexibilidad y control sobre el proceso de descarga de datos, permitiendo adaptar el código a necesidades específicas.

El **Anexo 3** contiene el código diseñado para la descarga de datos a gran escala utilizando la API Python de Earth Engine. El código se presenta en formato PDF y ejecutable para su posterior verificación y uso, el formato PDF proporciona una representación legible y detallada del código, permitiendo una fácil comprensión y análisis de la estructura y lógica del programa, el formato ejecutable facilita la ejecución del código sin necesidad de instalar Python o las bibliotecas necesarias.

A continuación, se puede observar parte del código diseñado para descargue de información satelital con GEE.

Ilustración 4.

Código de descarga de Información Satelital por medio de GEE

```
#Se coloca el dataset y la banda correspondiente
dataset = ee.ImageCollection('ECMWF/ERAS/DAILY').select('minimum_2m_air_temperature')
añosInfo = 16 #número de años para extraer la información
añoIni = 2004

x_coor = df_coord.longitud.values
y_coor = df_coord.latitud.values

x_est,y_est = [],[]
fecha_lista = []
prec_lista = []
for coor in range(0,len(x_coor)):
    x,y = x_coor[coor],y_coor[coor]
    print(f'***** Estación {coor+1}, Longitud: {x}, Latitud: {y} *****')
    roi = ee.Geometry.Point(x,y)
    #Se corre el código cada año para evitar que colapse
    for periodo in range(0,añosInfo):
        # Definir el rango de fechas
        start_date = datetime.datetime(añoIni + periodo, 1, 1)
        end_date = datetime.datetime(añoIni + periodo, 12, 31)
        print(f'***** Año: {añoIni + periodo} *****')
        # Filtrar la colección por fechas y ubicación
        filtered_collection = dataset.filterBounds(roi).filterDate(start_date, end_date).mean()
        prec_suma = filtered_collection.reduceRegion(reducer=ee.Reducer.first(), geometry=roi, scale=5000).get('minimum_2m_air_temperature').getInfo()
        #Se anexan las coordenadas, las fechas y los valores extraídos
        x_est.append(x)
        y_est.append(y)
        fecha_lista.append(start_date.strftime('%d/%m/%Y'))
        prec_lista.append(prec_suma)
```

Fuente: Autor, 2024.

7.1.3. Evaluación estadística de la variable de precipitación

En este estudio, se realizó una evaluación estadística exhaustiva de la precipitación, incluyendo medidas descriptivas, análisis de distribuciones y comparación de medias.

Las medidas descriptivas proporcionan una visión general de la distribución de la variable de precipitación. En este caso, se calcularon los siguientes estadísticos:

- ✓ Media: Representa el valor promedio de la precipitación durante el período de estudio.
- ✓ Rango: Representa la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la precipitación.

✓ Cuartiles: Dividen el conjunto de datos en cuatro partes iguales. Los cuartiles Q1, Q2 y Q3 corresponden al 25%, 50% y 75% de los datos, respectivamente.

Los resultados de la evaluación estadística de la precipitación proporcionarán información valiosa sobre el comportamiento y la distribución de esta variable en el área de estudio, la cual brinda una identificación de patrones y tendencias en la precipitación, analiza la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, evalúa el impacto del cambio climático en la precipitación y es posible el desarrollo de modelos de predicción de la precipitación.

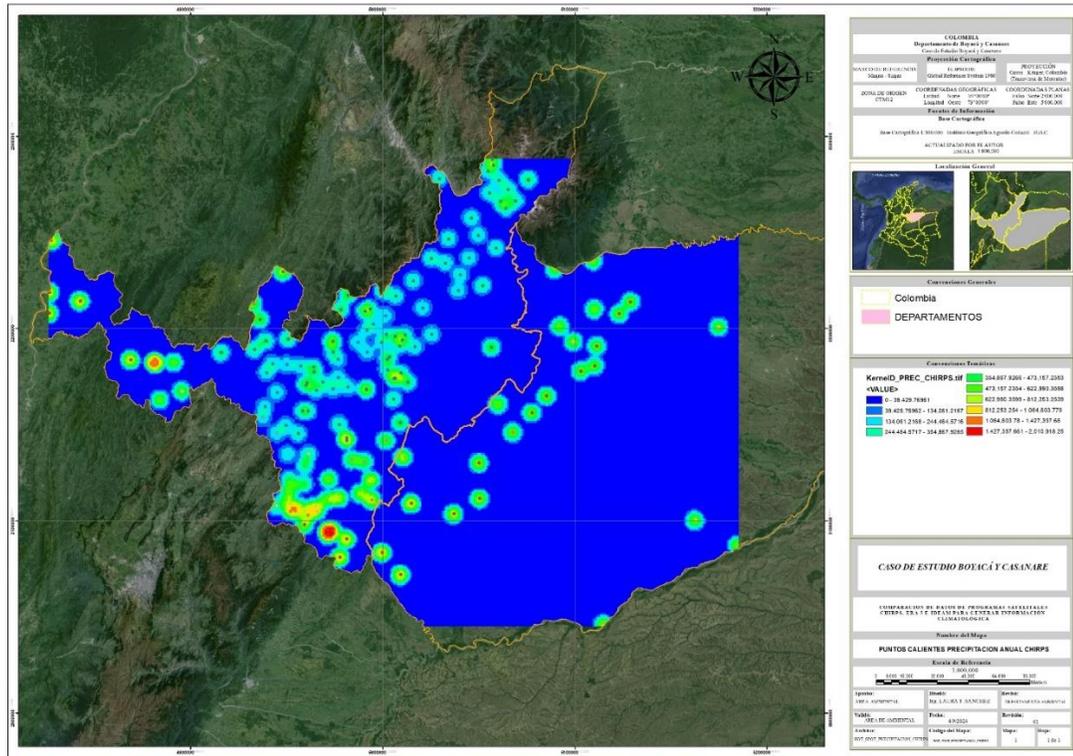
7.1.3.1. CHIRPS Daily

La precipitación es un componente esencial del ciclo hidrológico y juega un papel crucial en diversos aspectos ambientales, sociales y económicos. En este contexto, el análisis estadístico de la precipitación permite comprender patrones espaciales y temporales, identificar tendencias y evaluar la influencia de factores como la variabilidad climática y el cambio climático.

Para el análisis de la precipitación en Boyacá y Casanare, se descargaron datos del producto satelital CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations).

Mapa 2.

HOT SPOT precipitación Anual CHIRPS



Fuente: Autor, 2024.

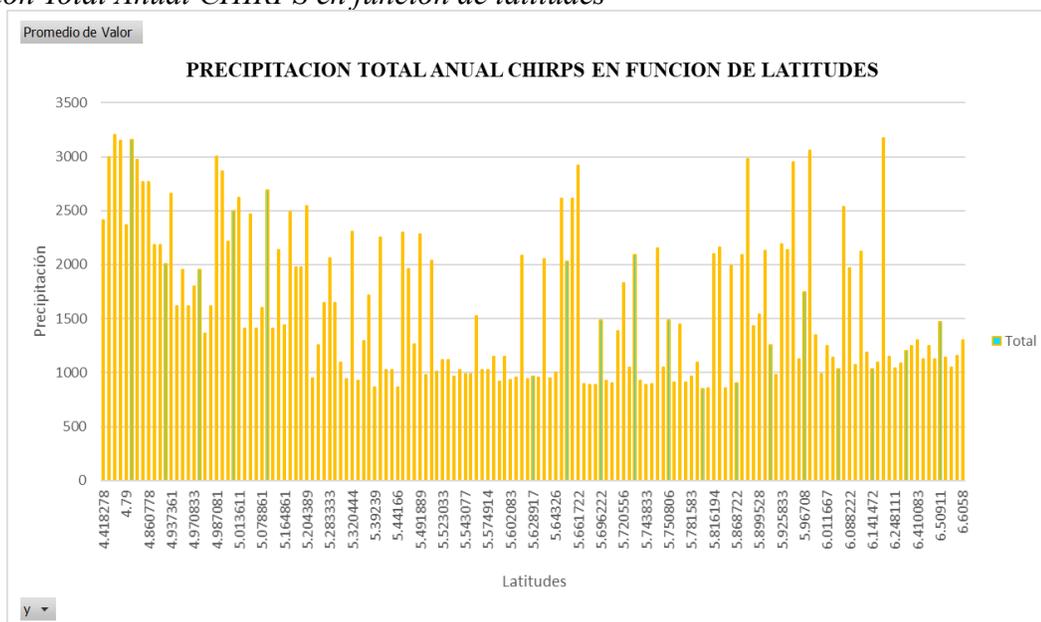
El anterior mapa enfocado en la identificación de puntos calientes para la variable precipitación promedio anual, reveló patrones espaciales y temporales significativos. En la zona central de Boyacá, se observan predominantemente puntos fríos, lo que indica una alta variabilidad y cambios sustanciales en los valores de precipitación en estas áreas. En contraste, el sur de Boyacá presenta patrones de precipitación caracterizados por valores continuos en diferentes puntos de las estaciones meteorológicas, lo que sugiere una mayor estabilidad y predictibilidad en la región, Esta zona es coincida con la región montañosa de la Cordillera Oriental. La elevada altitud y la influencia de los vientos húmedos provenientes del Amazonas

contribuyen a la mayor precipitación en estas áreas, las zonas identificadas con Precipitación Baja se observan principalmente en el departamento de Casanare, correspondiente a la región de las llanuras del Orinoco. La menor altitud, la influencia del anticiclón amazónico y la baja humedad relativa favorecen la menor precipitación en estas zonas.

Para complementar el análisis descriptivo, se calcularon medidas estadísticas como cuantiles, media, mediana, rango, máximos y mínimos para la variable de precipitación en cada coordenada correspondiente a la estación meteorológica del IDEAM. Estas medidas estadísticamente resumen la distribución de la precipitación, revelando aspectos como la variabilidad estacional, la frecuencia de eventos extremos y la posible influencia del cambio climático.

Figura 2.

Precipitación Total Anual CHIRPS en función de latitudes



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de la distribución espacial de la precipitación en los departamentos colombianos de Boyacá y Casanare revela una estrecha relación entre la latitud y la variación de las precipitaciones totales históricas. La latitud, como coordenada geográfica que define la posición norte-sur de un lugar, influye significativamente en los patrones climáticos y la distribución de la precipitación.

El estudio de las precipitaciones totales históricas en Boyacá y Casanare demuestra que existe una clara tendencia a la disminución de la precipitación, a medida que se avanza hacia el norte, es decir, a latitudes más altas. Esta tendencia se explica por diversos factores relacionados con la latitud como la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) una banda de baja presión atmosférica que se caracteriza por alta nubosidad y precipitación, se desplaza estacionalmente de norte a sur, siguiendo el movimiento del Sol. En Boyacá, ubicado en latitudes más altas, la ZCIT tiene menor influencia, lo que se traduce en menor precipitación.

La circulación general de la atmósfera, con predominio de vientos alisios en las latitudes tropicales y vientos del oeste en latitudes templadas, influye en la distribución de la humedad y la formación de nubes, afectando la precipitación. En Boyacá, la influencia de los vientos del oeste, más secos, contribuye a la menor precipitación.

La topografía montañosa de Boyacá, especialmente en la Cordillera Oriental, favorece la formación de nubes orográficas y el aumento de la precipitación en zonas elevadas. Sin embargo, a medida que se avanza hacia el norte, la altitud disminuye, lo que reduce la influencia de este factor.

La variación de la precipitación con la latitud tiene implicaciones significativas para la región, la distribución desigual de la precipitación afecta la disponibilidad de recursos hídricos,

con mayor escasez en las zonas con menor precipitación, influye de igual manera en la producción agrícola, requiriendo prácticas de adaptación en las zonas con menor precipitación, y contribuye a la configuración de diferentes ecosistemas, con mayor diversidad en zonas con mayor precipitación.

La latitud 5.891639 presenta la mayor precipitación máxima anual, superando a otras latitudes dentro del departamento de Boyacá. Esta concentración de precipitación en esta latitud específica se debe a la confluencia de diversos factores geográficos y climáticos, en primera medida la Cordillera Oriental, que atraviesa el departamento de Boyacá de sur a norte, actúa como una barrera orográfica que eleva la humedad proveniente del Amazonas, intensificando la precipitación en la zona central del departamento.

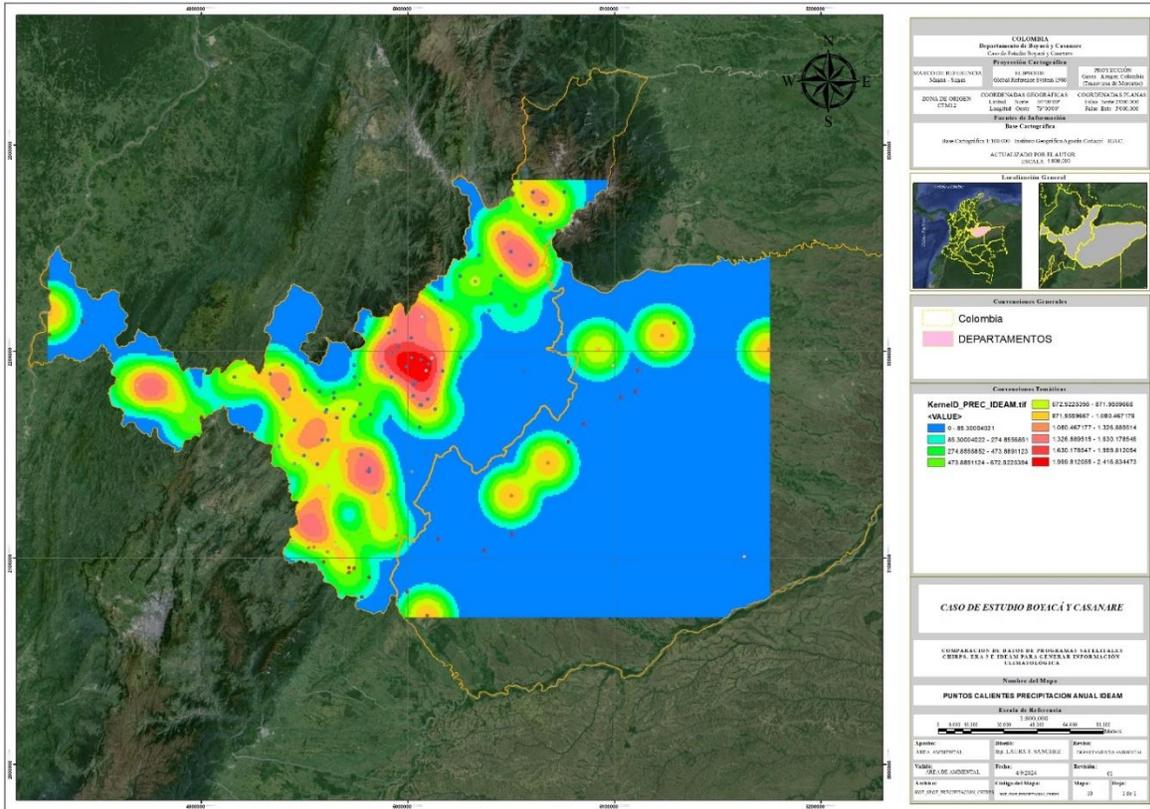
7.1.3.2. Estaciones climatológicas – IDEAM

Para el análisis descriptivo de la información se puede identificar que las zonas con precipitaciones más altas corresponden a la zona central del departamento de Boyacá y las zonas con precipitaciones más bajas hacen referencia al departamento del Casanare.

El **Anexo 4** contiene la base de datos en formato Excel (XLSX), que recopila los valores de estadística descriptiva para las variables de precipitación, Temperatura máxima y mínima, en cada una de las estaciones meteorológicas del IDEAM incluidas en el estudio.

Mapa 3.

HOT SPOT Precipitación Promedio Anual IDEAM

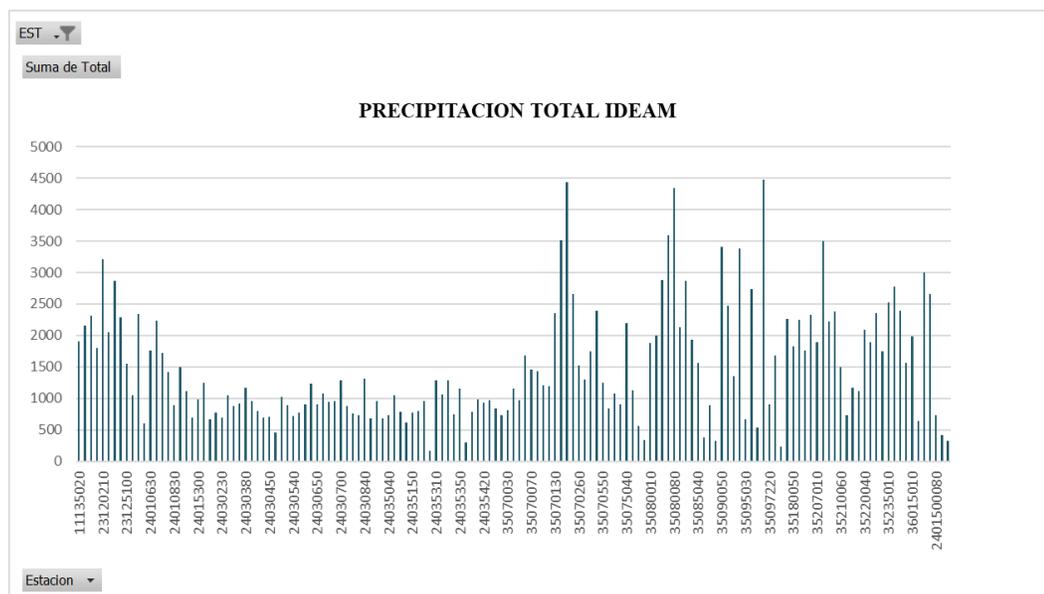


Fuente: Autor, 2024.

Al comparar el análisis de puntos calientes para la variable precipitación en estaciones locales del IDEAM con información local, se observa una notable diferencia, en los cambios evidenciados. En la información del IDEAM, los valores de precipitación en la zona central de Boyacá, presentan puntos calientes con una alta homogeneidad, en contraste con las zonas de los Llanos Orientales, donde se identifican puntos fríos más pronunciados.

Figura 3.

Promedio Precipitación Anual Para análisis IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

La gráfica que se presenta proporciona información valiosa sobre las zonas con precipitaciones históricamente bajas y altas en los departamentos de Boyacá y Casanare.

Zonas con Precipitación Baja:

La gráfica revela que la estación ANDALUCIA [24035350] registra una de las precipitaciones más bajas en todo el conjunto de datos históricos para Casanare. Este patrón se observa en la zona donde se encuentra ubicada la estación, caracterizada por condiciones climáticas áridas y semiáridas.

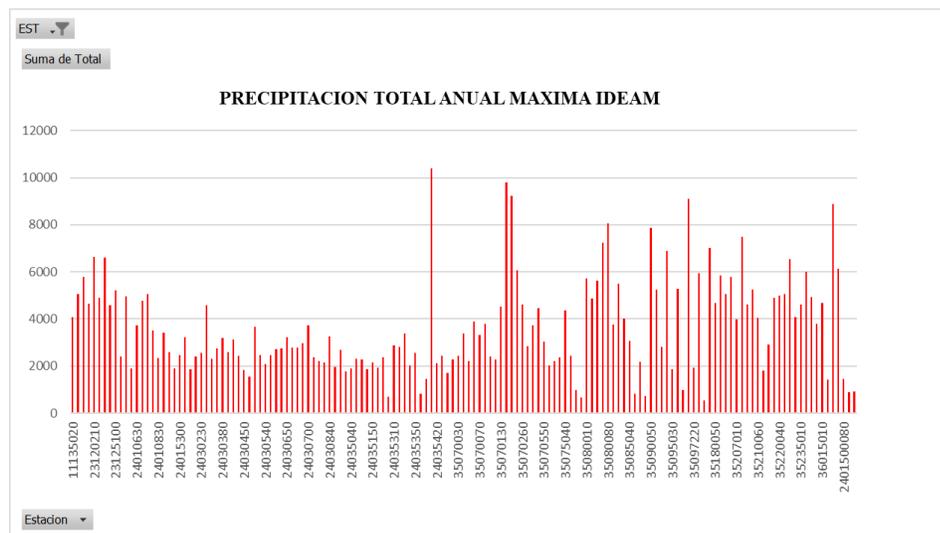
De igual manera, la estación PUENTE FORERO [35080100] también presenta históricamente promedios anuales de precipitación bajos. Esta situación se relaciona con factores como la altitud y la topografía de la zona, que influyen en la recepción de humedad atmosférica.

Zonas con Precipitación Alta:

La gráfica destaca tres puntos o picos que corresponden a las estaciones AQUITANIA [35097220], PIEDRA CAMPANA [35080080] y QUEBRADA HONDA [35070130]. Estas estaciones, ubicadas en zonas montañosas y con mayor influencia de corrientes húmedas, históricamente reportan las precipitaciones más altas en Boyacá.

Figura 4.

Promedio Precipitación Máxima Anual Para análisis IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de la anterior grafica revela una clara concentración de zonas con temperaturas máximas elevadas en las regiones montañosas de Boyacá. Este patrón se explica por factores como la altitud, que influye en la disminución de la temperatura con la altura, y la menor presencia de nubes, que permite una mayor incidencia de la radiación solar.

La estación CERINZA [240354200], presenta el Pico Máximo, se destaca como el punto con las temperaturas máximas promedios anuales históricas más altas en Boyacá, superando los

Estas zonas, ubicadas en regiones con características climáticas áridas y semiáridas, registran precipitaciones promedio anuales mínimas históricas de menos de 100 mm.

ENCANTO EL [24030450]:

La estación ENCANTO EL, situada en el municipio de Villanueva en Casanare, también presenta una precipitación mínima promedio anual histórica baja. Esta situación se relaciona con factores como la topografía plana y la influencia de corrientes de aire seco, que limitan la llegada de humedad a la región.

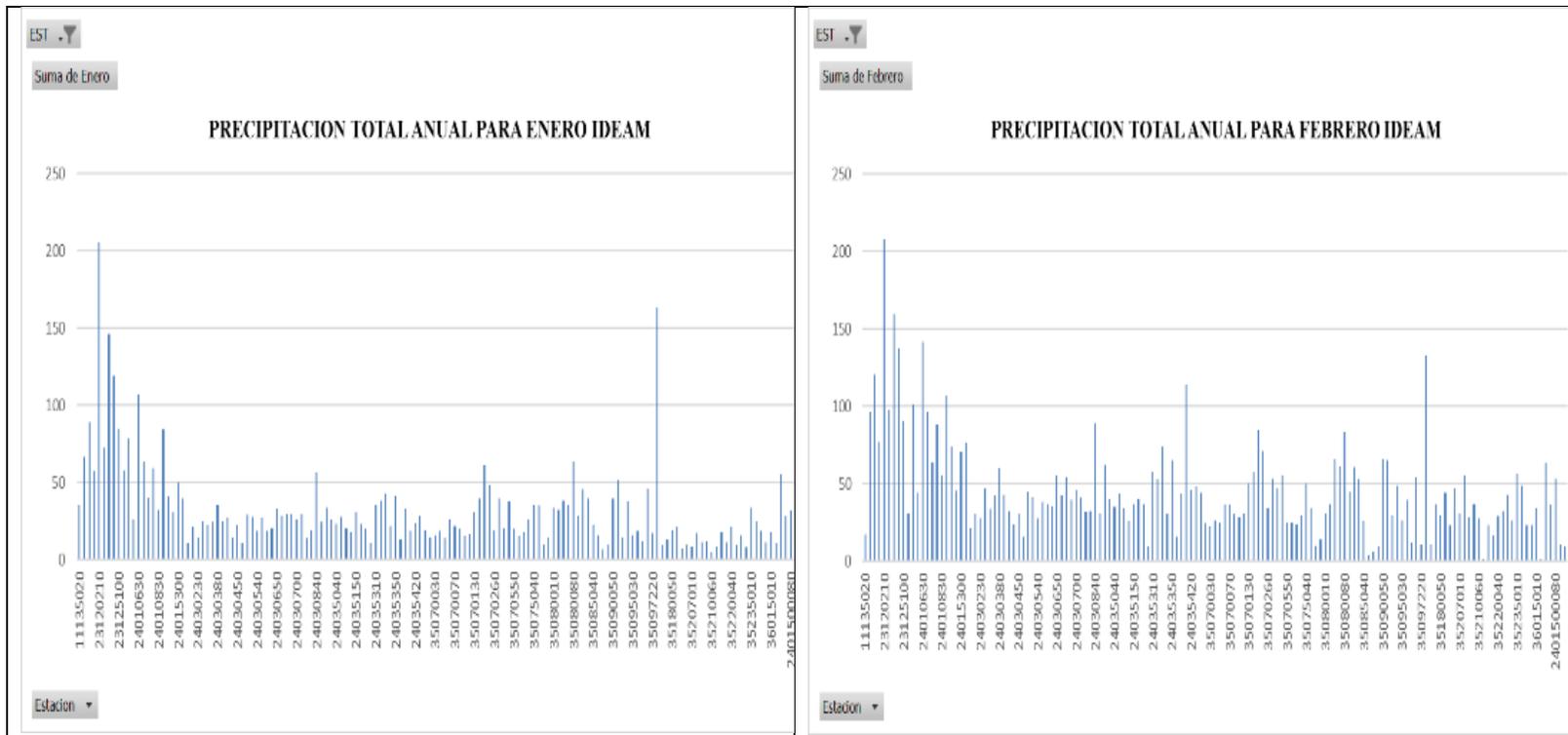
BUENAVISTA [23125100]:

La estación BUENAVISTA, ubicada en el municipio de Monquirá en Boyacá, representa otro punto con precipitación mínima promedio anual histórica baja. Este patrón se asocia a la altitud de la zona y a la influencia de la Cordillera Oriental, que dificulta la llegada de humedad atmosférica. hídrica para garantizar el acceso a este recurso vital.

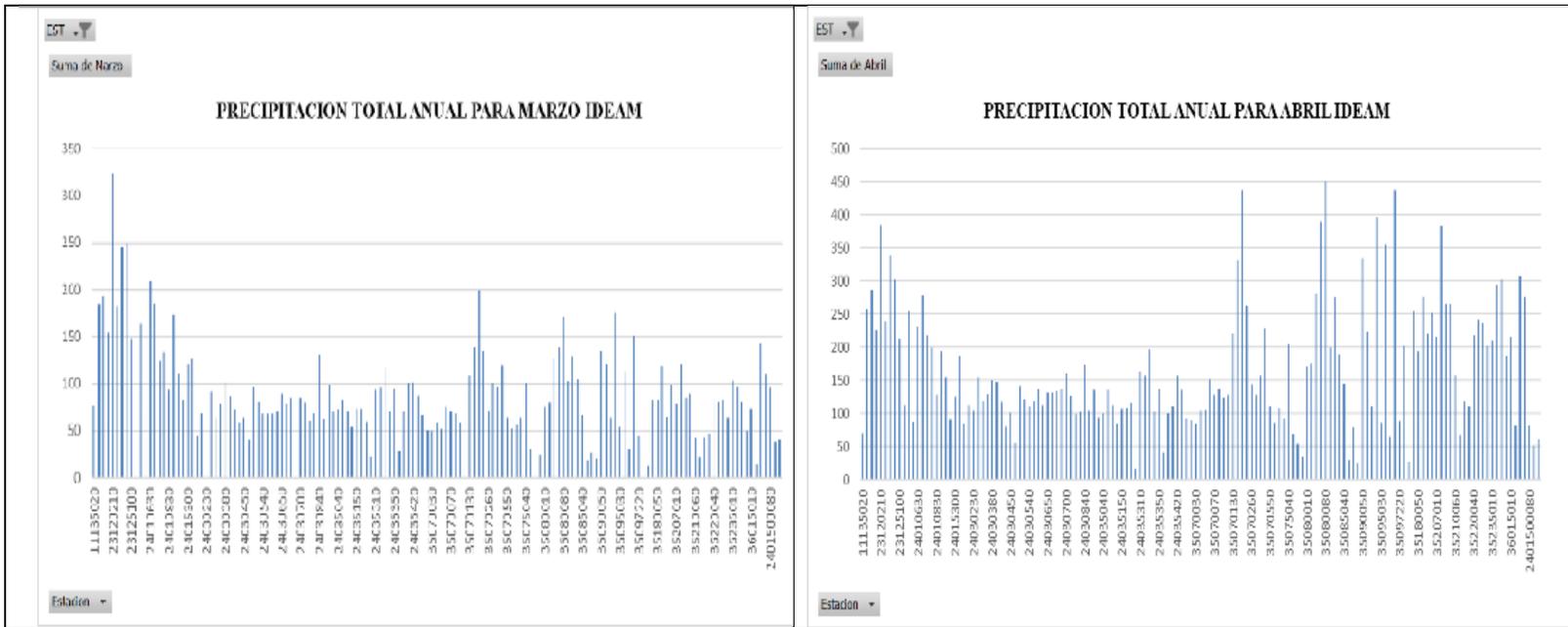
A continuación, se presenta un análisis estadístico mensual multianual de los puntos identificados:

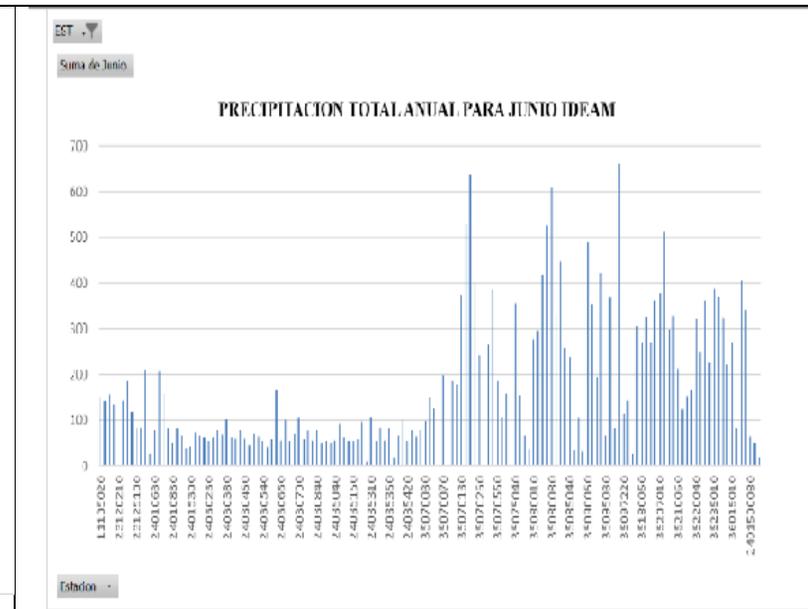
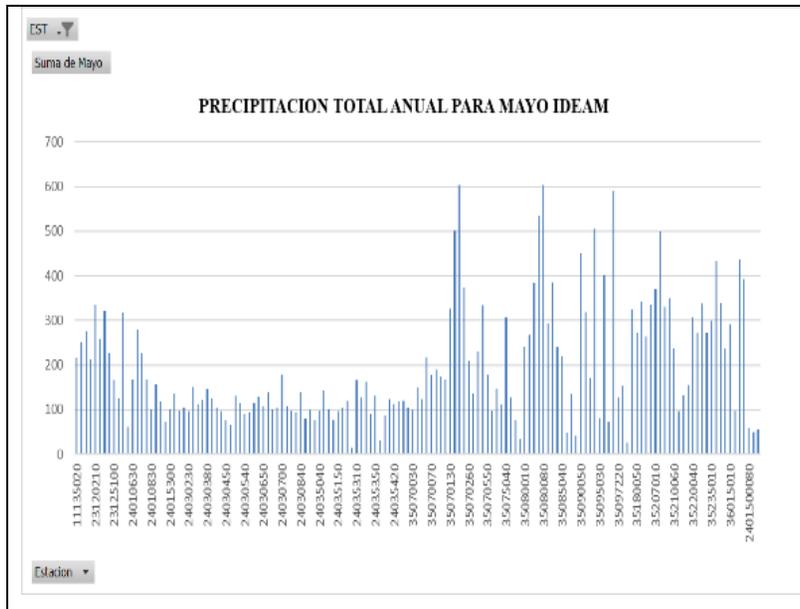
Figura 6.

Precipitación Promedio Mensual IDEAM

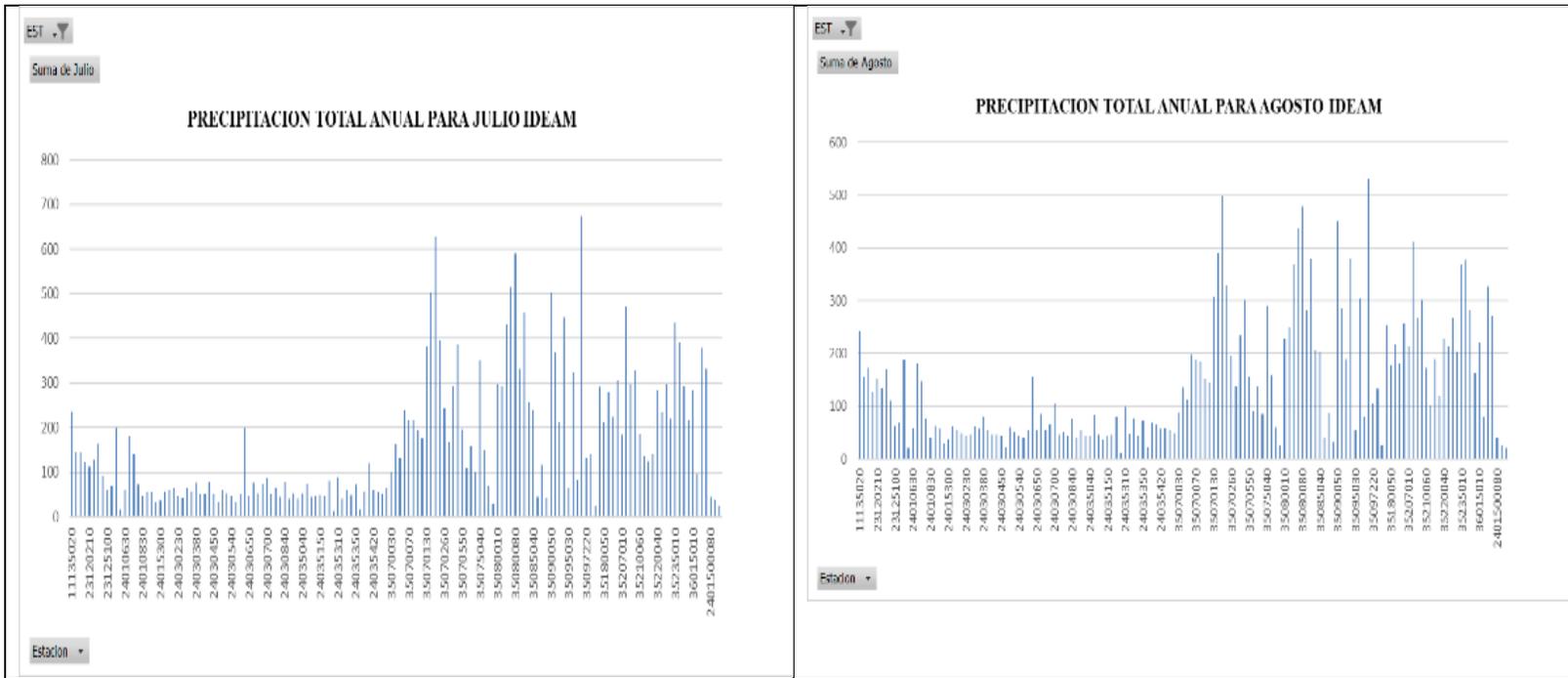


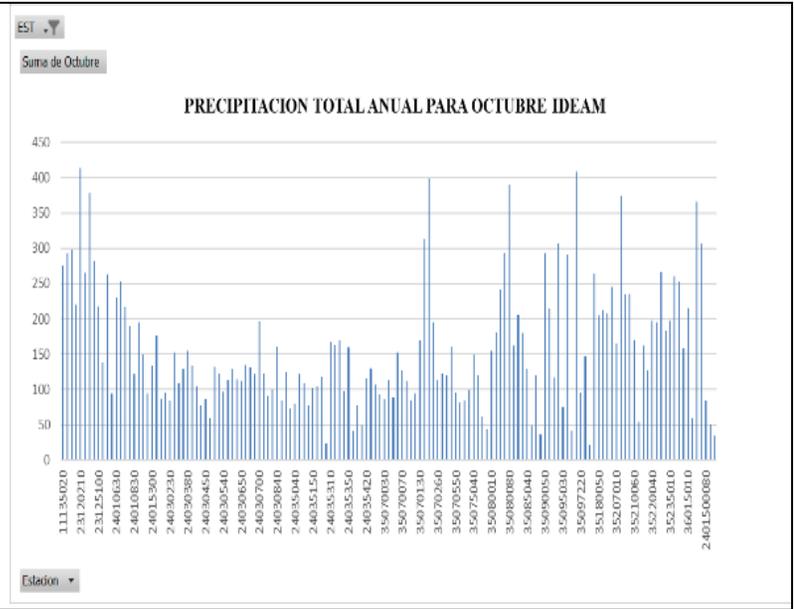
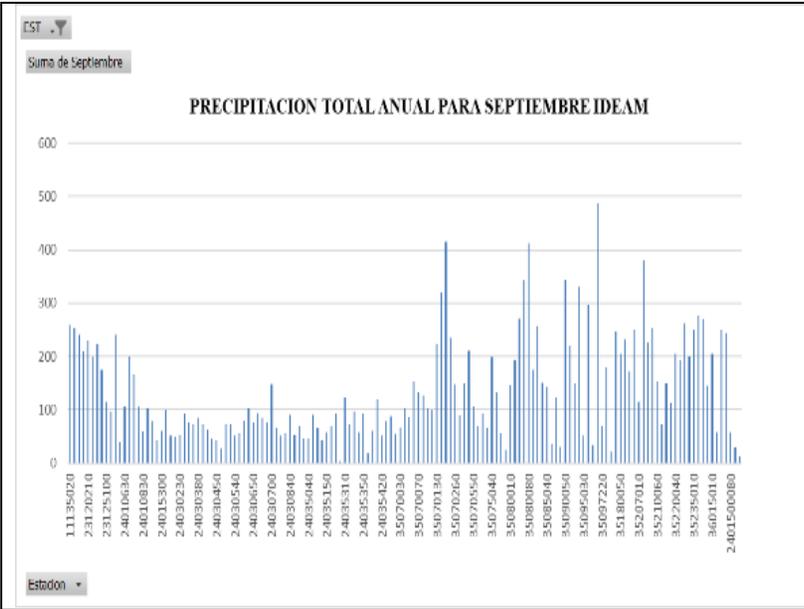
86 Comparación entre datos de programas satelitales CHIRPS, ERA 5 y del IDEAM para generar información climatológica. Caso de estudio Boyacá y Casanare.



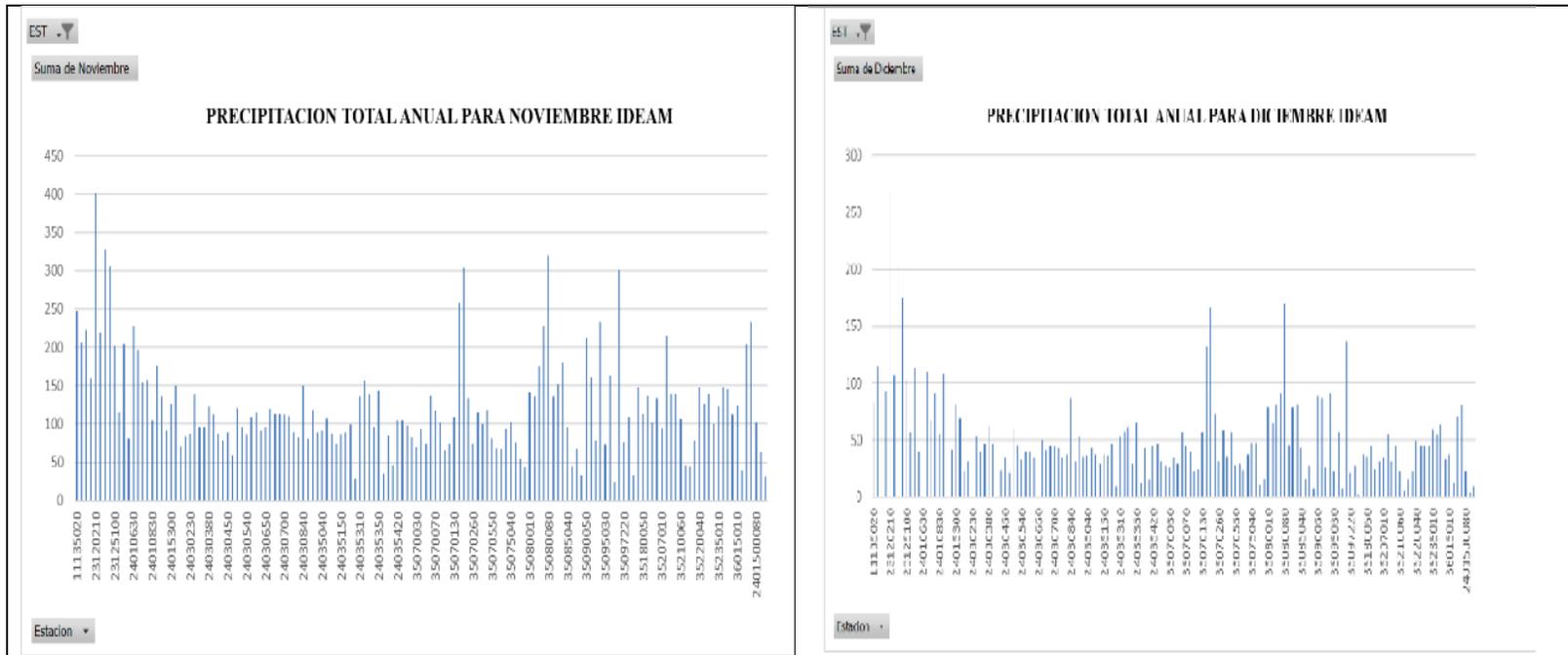


88 Comparación entre datos de programas satelitales CHIRPS, ERA 5 y del IDEAM para generar información climatológica. Caso de estudio Boyacá y Casanare.





90 Comparación entre datos de programas satelitales CHIRPS, ERA 5 y del IDEAM para generar información climatológica. Caso de estudio Boyacá y Casanare.



Fuente: Autor, 2024.

Según el análisis de comportamiento de datos históricos para todos los meses del año, es posible describir que los meses de abril y diciembre son los más atípicos con respecto al comportamiento de la variable, es decir que la presentación de precipitación obedece a un régimen bimodal.

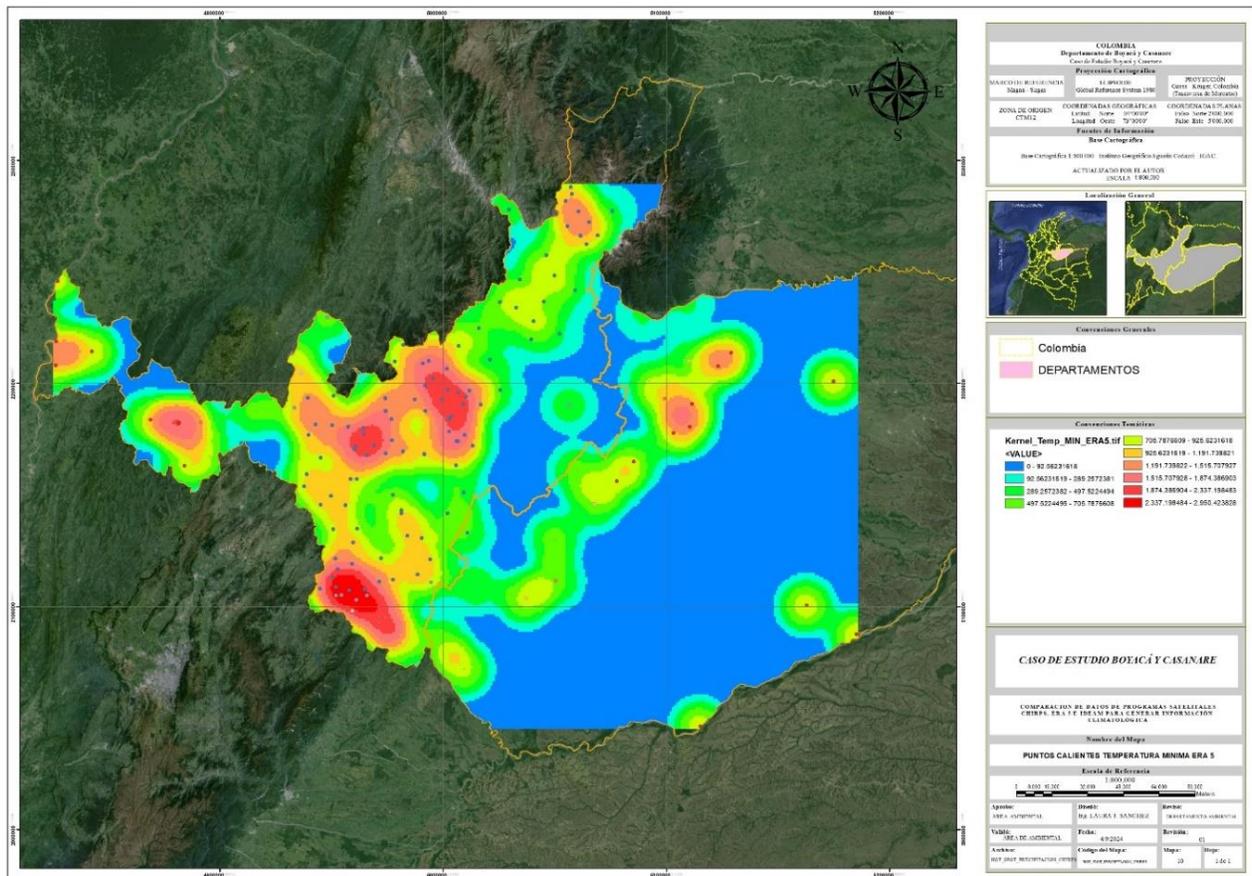
7.1.4. Evaluación estadística de la variable de Temperatura mínima

La evaluación de cuantiles, media, mediana, rango y mínimos permite identificar patrones y tendencias en la variación de la temperatura, revelando aspectos como la variabilidad estacional, la frecuencia de eventos extremos y la posible influencia del cambio climático.

7.1.4.1. ERA 5 Daily Aggregates

Mapa 4.

HOT SPOT Temperatura Mínima ERA 5

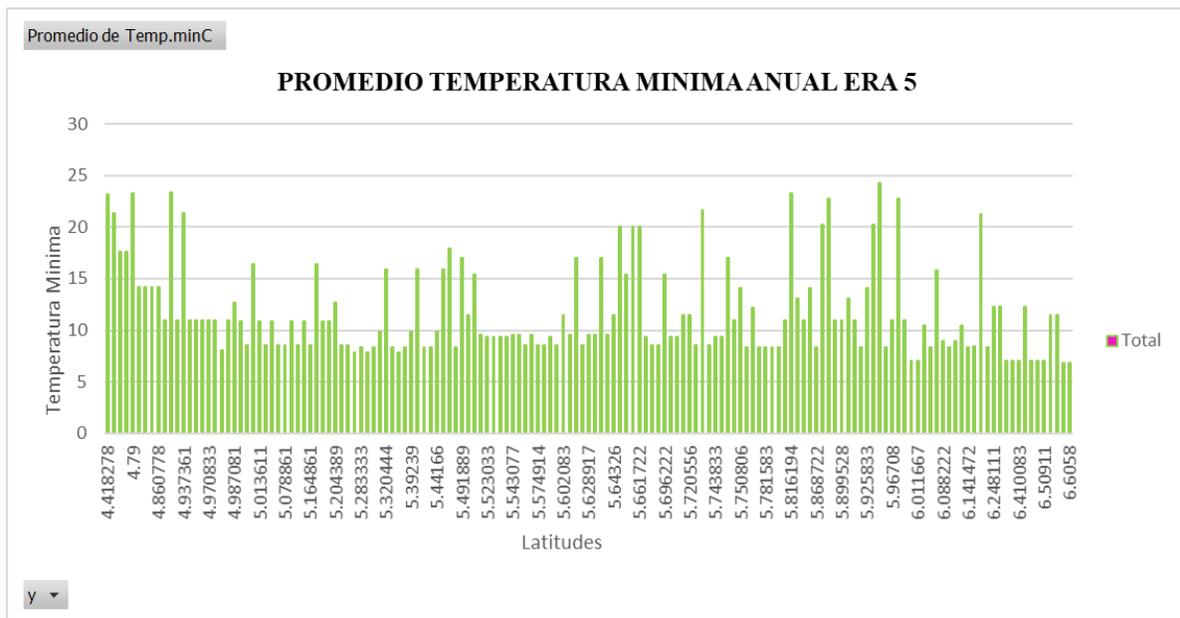


Fuente: Autor, 2024.

El análisis de puntos calientes para temperaturas mínimas en los departamentos de Boyacá y Casanare, revela patrones espaciales distintivos. En la denominada "zona Norte" del departamento de Boyacá, las temperaturas mínimas presentan una homogeneidad significativa, es decir, los valores son relativamente uniformes en toda la región. En contraste, en zonas como Casanare, parte sur de Boyacá y límites con Casanare, se observan patrones de temperaturas mínimas caracterizados por puntos fríos, lo que indica una alta variabilidad en las temperaturas en estas áreas.

Figura 7.

Promedio Temperatura Mínima Anual ERA 5



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de la distribución espacial de la temperatura mínima en el departamento de Boyacá, Colombia, utilizando datos satelitales ERA5 (Fifth Generation European Reanalysis),

revela un patrón notable: la latitud 6.011667, correspondiente a la zona central del departamento, presenta las temperaturas mínimas más bajas.

La gráfica muestra claramente que la latitud 6.011667 registra las temperaturas mínimas más bajas dentro del departamento de Boyacá. Esta concentración de temperaturas frías en esta latitud específica, se debe a la confluencia de diversos factores geográficos y climáticos, puesto que se refiere a la zona central de Boyacá, se caracteriza por una mayor altitud, especialmente en la Cordillera Oriental, lo que genera una disminución de la temperatura a medida que se asciende en altura, esta actúa como barrera natural que bloquea el flujo de aire cálido proveniente del Caribe, contribuyendo a las temperaturas frías en la zona central del departamento, de igual manera la mayor nubosidad en la zona central de Boyacá, debido a la influencia de la Cordillera Oriental y la humedad proveniente del Amazonas, reduce la insolación y favorece la pérdida de calor por radiación terrestre, intensificando las temperaturas frías.

El análisis de la temperatura mínima con ERA5 en Boyacá revela una concentración de temperaturas frías en la latitud 6.011667, coincidiendo con la zona central del departamento. Esta concentración se explica por la altitud, la influencia de la Cordillera Oriental y la nubosidad. Las bajas temperaturas en esta zona tienen implicaciones importantes para los ecosistemas, la agricultura y los recursos hídricos de la región.

7.1.4.2. Estaciones Climatológicas – IDEAM.

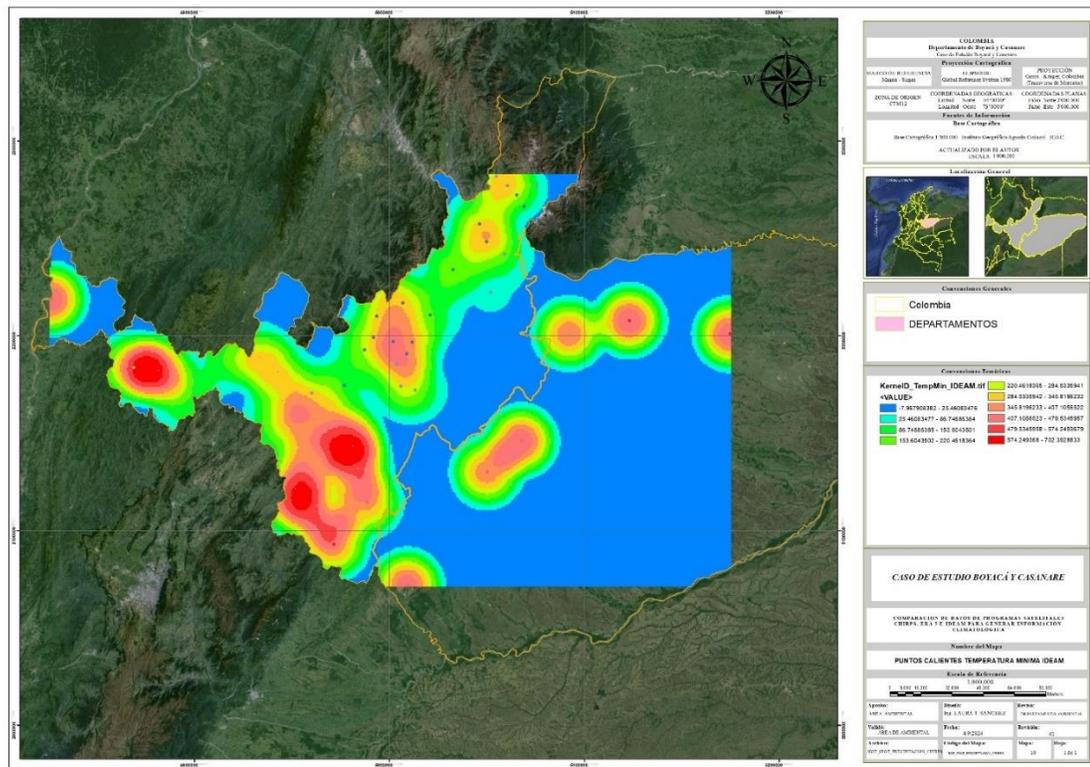
Las temperaturas mínimas se concentran en la zona central de Boyacá, particularmente en áreas como Tunja, Sogamoso y Duitama. Estas regiones, ubicadas en la Cordillera Oriental, presentan una mayor altitud y una menor insolación, lo que explica sus temperaturas más bajas.

La zona contigua al Nevado del Cocuy, caracterizada por su alta altitud y presencia de glaciares, también presenta temperaturas mínimas considerables.

El análisis de la variación temporal de la temperatura revela una clara estacionalidad, con temperaturas más bajas en los meses húmedos (marzo a noviembre). Esta variación se relaciona con la influencia de la radiación solar y la circulación atmosférica.

Mapa 5.

HOT SPOT Temperatura Mínima IDEAM



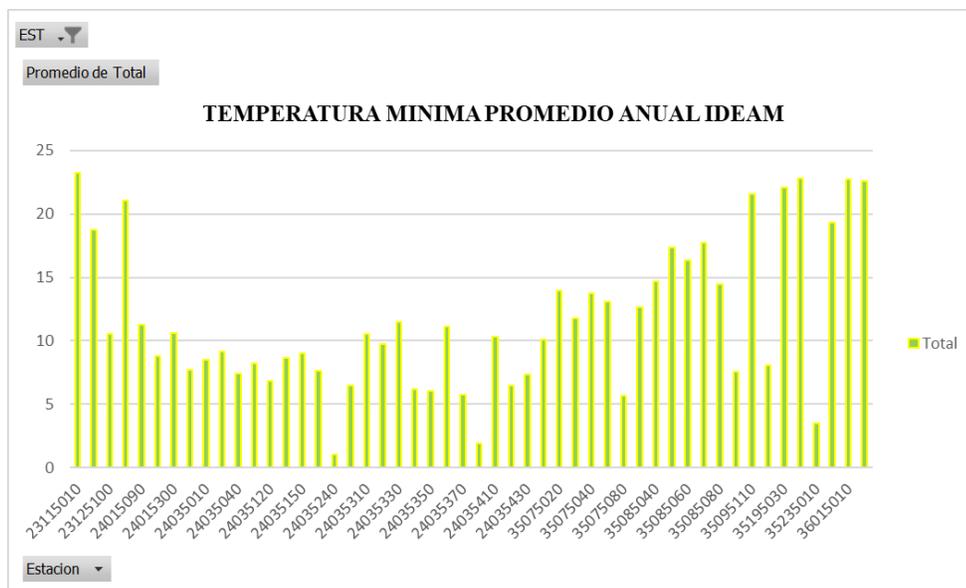
Fuente: Autor, 2024.

La evaluación de eventos extremos de temperatura, como olas de calor y heladas, permite identificar zonas con mayor riesgo de este tipo de fenómenos. El análisis de la frecuencia e

intensidad de estos eventos es crucial para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático.

Figura 8.

Temperatura Mínima Promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de las temperaturas mínimas observadas en la gráfica anterior revela una clara variación entre las diferentes estaciones meteorológicas, con valores que oscilan entre 1.05°C y 7.34°C. Esta variación se explica por la influencia de factores como la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas de cada zona.

Zonas con Temperaturas Mínimas Extremas:

SIERRA NEVADA DEL COCUY [24035240]: Esta estación, ubicada en el Parque Nacional Natural Nevado del Cocuy y Güicán, registra la temperatura mínima promedio más baja (1.05°C). Esta situación se debe a su alta altitud (5.000 metros sobre el nivel del mar) y la presencia de glaciares, que generan un ambiente extremadamente frío.

CARDÓN EL AUT [35235010]: Esta estación presenta una temperatura mínima promedio de 3.52°C. Esta zona, caracterizada por un clima tropical seco, presenta una menor altitud y una mayor influencia de la radiación solar, lo que explica sus temperaturas más elevadas en comparación con la Sierra Nevada del Cocuy.

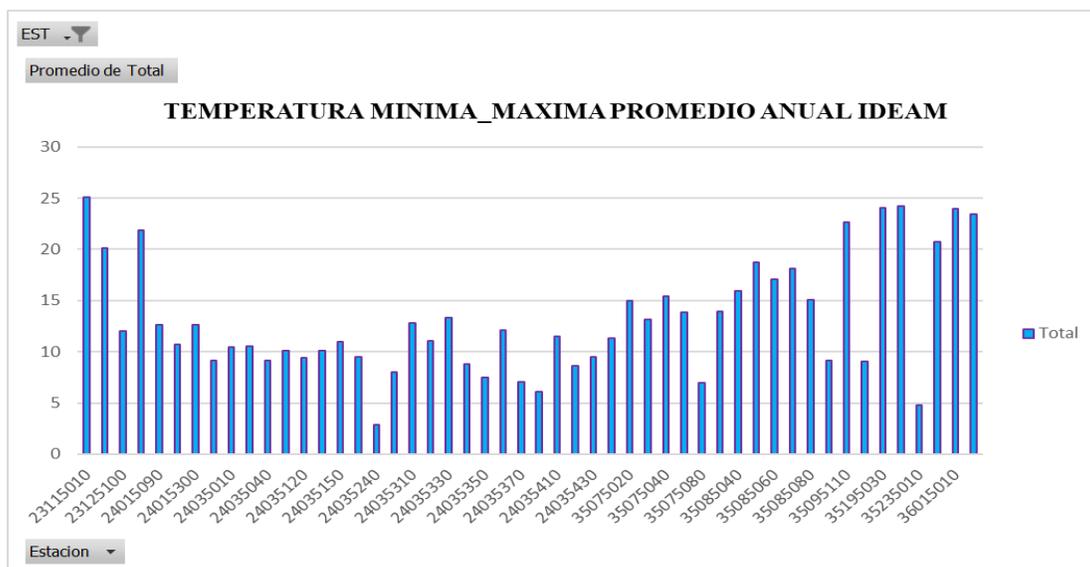
TUNGUAVITA - AUT [24035430]: Situada en la región central de Boyacá, esta estación registra una temperatura mínima promedio de 7.34°C. Esta zona, caracterizada por un clima templado, presenta una altitud intermedia y una menor influencia de los extremos climáticos, lo que explica sus temperaturas más moderadas.

La variación de las temperaturas mínimas observadas se relaciona con la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas de cada zona.

- ✓ Altitud: La altitud es uno de los factores principales que influyen en la temperatura. A mayor altitud, menor temperatura.
- ✓ Presencia de glaciares: La presencia de glaciares, como en el caso de la Sierra Nevada del Cocuy, genera un ambiente extremadamente frío y contribuye a las temperaturas mínimas más bajas.
- ✓ Clima regional: El clima regional, caracterizado por factores como la temperatura promedio, la precipitación y la humedad, también influye en las temperaturas mínimas.

Figura 9.

Temperatura Mínima Máxima Promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El análisis revela que la estación PUERTO BOYACA [23115010] presenta las temperaturas mínimas máximas más elevadas de las estaciones meteorológicas estudiadas. Esta situación se explica por la combinación de factores topográficos y de ubicación geográfica.

PUERTO BOYACA se encuentra ubicada en el Valle del Magdalena, una región caracterizada por una topografía plana y abierta. Esta característica permite una mayor circulación de aire frío durante las noches, lo que contribuye a temperaturas mínimas más bajas.

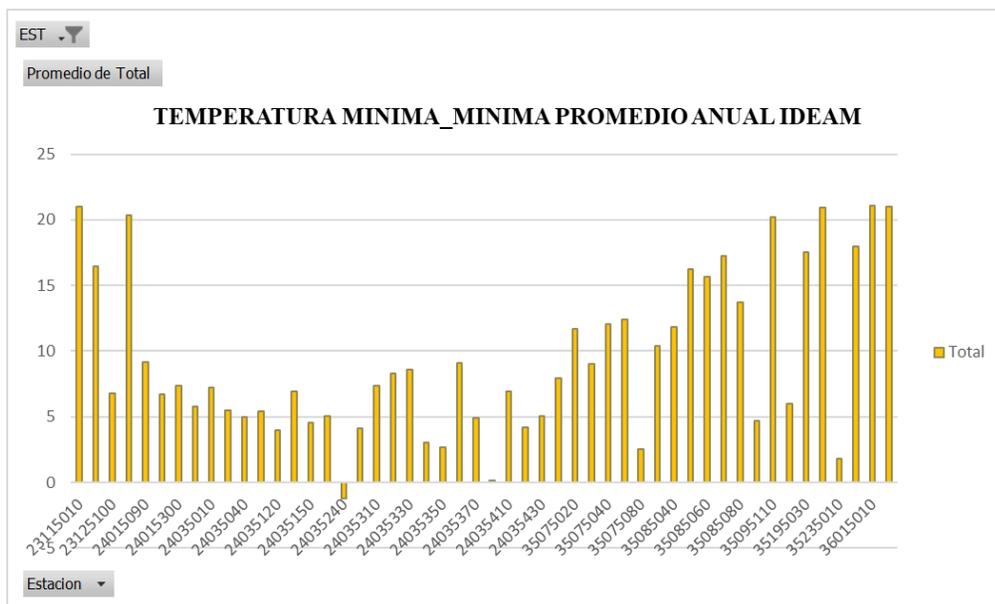
Sin embargo, la estación se sitúa en una zona elevada dentro del valle, lo que la protege de las corrientes de aire frío más intensas que descienden por las laderas de las montañas. Esta elevación relativa ayuda a moderar las temperaturas mínimas, evitando que caigan a valores extremos.

La ubicación de PUERTO BOYACA en el departamento de Boyacá, en la región central de Colombia, también influye en sus temperaturas mínimas máximas. Esta región presenta un clima templado, con temperaturas promedio moderadas y menor influencia de fenómenos climáticos extremos.

La estación se encuentra alejada de zonas montañosas con mayor altitud, donde las temperaturas mínimas suelen ser más bajas. Esta distancia la protege del efecto de enfriamiento por elevación que se observa en zonas montañosas.

Figura 10.

Temperatura Mínima Mínima Promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El análisis revela que la estación SIERRA NEVADA DEL COCUY [24035240] presenta las temperaturas mínimas mínimas más bajas de las estaciones meteorológicas estudiadas en Boyacá y Casanare. Esta situación se explica por la combinación de factores topográficos y la presencia de glaciares.

SIERRA NEVADA DEL COCUY se encuentra ubicada en el Parque Nacional Natural Nevado del Cocuy y Güicán, una zona montañosa con altitudes que superan los 5.000 metros sobre el nivel del mar. Esta altitud extrema genera un ambiente frío y propicia la formación de glaciares.

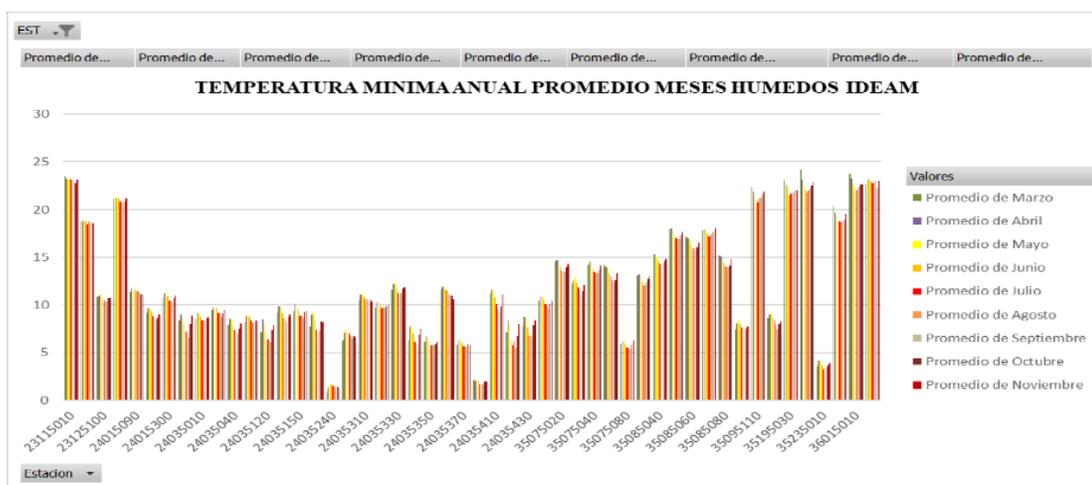
La topografía montañosa de la región limita la circulación de aire caliente proveniente de zonas más bajas, lo que contribuye a mantener temperaturas bajas durante todo el año.

La presencia de glaciares en la Sierra Nevada del Cocuy es un factor determinante en las temperaturas mínimas de la zona. Los glaciares actúan como refrigeradores naturales, reflejando la radiación solar y enfriando el aire circundante.

La fusión parcial de los glaciares durante el día libera agua fría que desciende por las laderas de la montaña, contribuyendo a mantener las temperaturas bajas, incluso durante las horas más cálidas del día.

Figura 11.

Temperatura Mínima Anual Promedio Meses Húmedos IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

Los meses de marzo a noviembre se consideran meses húmedos en Boyacá y Casanare, Colombia, debido a la influencia de dos fenómenos climáticos principales como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) la cual es una banda de nubosidad y lluvias intensas que se ubica cerca del ecuador terrestre, durante su desplazamiento anual, la ZCIT cruza sobre Boyacá y Casanare entre los meses de marzo y noviembre, trayendo consigo un aumento significativo en la precipitación.

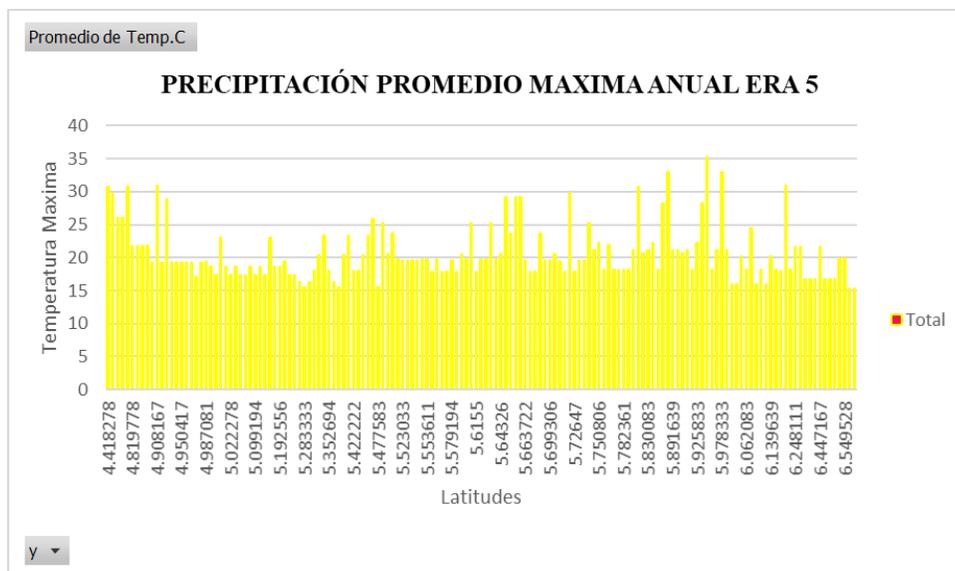
La alta humedad durante los meses de marzo a noviembre tiene un impacto significativo en la vida cotidiana de las personas en Boyacá y Casanare.

7.1.5. Evaluación estadística de la variable de Temperatura máxima

7.1.5.1. ERA 5 Daily Aggregates

Figura 12.

Precipitación Máxima Promedio Anual ERA 5



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de la distribución espacial de la temperatura máxima en el departamento de Boyacá, Colombia, utilizando datos satelitales ERA5 (Fifth Generation European Reanalysis), revela un patrón interesante: la latitud 5.925833, correspondiente a la zona central del departamento, presenta las temperaturas máximas más altas.

Dicha latitud registra las temperaturas máximas más altas dentro del departamento de Boyacá. Esta concentración de temperaturas cálidas en esta latitud específica se debe a la confluencia de diversos factores geográficos y climáticos como la altitud en la zona central de Boyacá presenta una altitud moderada, lo que favorece la absorción de la radiación solar y el aumento de la temperatura durante el día.

El análisis de la temperatura máxima con ERA5 en Boyacá revela una concentración de temperaturas cálidas en la latitud 5.925833, coincidiendo con la zona central del departamento. Esta concentración se explica por la altitud, la influencia de la Cordillera Oriental y la menor nubosidad. Las altas temperaturas en esta zona tienen implicaciones importantes para los ecosistemas, la agricultura y los recursos hídricos de la región.

7.1.5.2. Estaciones climatológicas – IDEAM

El análisis descriptivo de la información revela que las zonas con temperaturas más altas se concentran en el departamento de Casanare, particularmente en áreas como Yopal, Aguazul y Villanueva. Estas regiones, caracterizadas por condiciones climáticas áridas y semiáridas, presentan una menor altitud y una mayor insolación, lo que explica sus temperaturas elevadas.

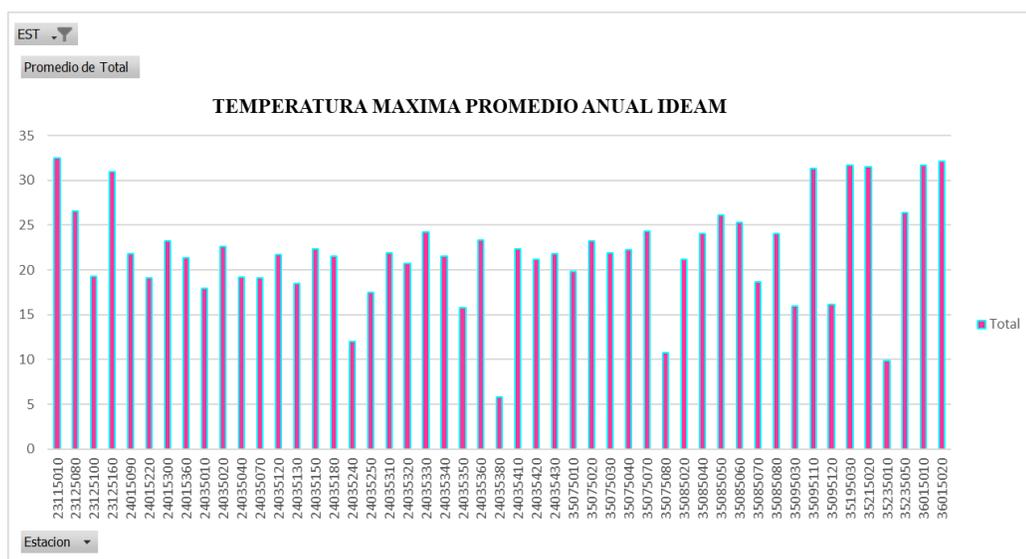
En Boyacá, las zonas con temperaturas más altas se encuentran en Puerto Boyacá, ubicado en la región del Magdalena Medio. Esta zona, caracterizada por un clima cálido y seco,

presenta una menor influencia de la altitud y una mayor influencia de corrientes de aire caliente provenientes del Caribe.

El análisis de la variación temporal de la temperatura revela una clara estacionalidad, con temperaturas más altas en los meses secos (diciembre a febrero). Esta variación se relaciona con la influencia de la radiación solar y la circulación atmosférica.

Figura 13.

Temperatura Máxima Promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de las temperaturas máximas promedios anuales se basa en la identificación de los picos más altos en la gráfica correspondiente. Estas estaciones, ubicadas en zonas con topografía favorable a climas cálidos, presentan las temperaturas máximas promedio anuales más elevadas de la región.

Zonas con Temperaturas Máximas Promedio Anuales Extremas:

El análisis revela que las estaciones SAN PABLO DE BORBUR - AUT [23125160], HUERTA LA GRANDE [35095110], AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020], PAZ DE ARIPORO [36015010] y EL DIAMANTE - AUT [36015020] registran las temperaturas máximas promedio anuales más elevadas. Estas zonas comparten características topográficas y climáticas que favorecen la presencia de temperaturas cálidas.

Las estaciones mencionadas se encuentran ubicadas en zonas de menor altitud, generalmente en valles o planicies. Esta característica permite una mayor recepción de radiación solar y una menor circulación de aire frío, lo que contribuye a temperaturas más elevadas.

Estaciones con Temperaturas Máximas Promedio Anuales Más Elevadas:

SAN PABLO DE BORBUR - AUT [23125160]: Registra una temperatura máxima promedio anual histórica de 30.94°C.

HUERTA LA GRANDE [35095110]: Presenta una temperatura máxima promedio anual histórica de 31.32°C.

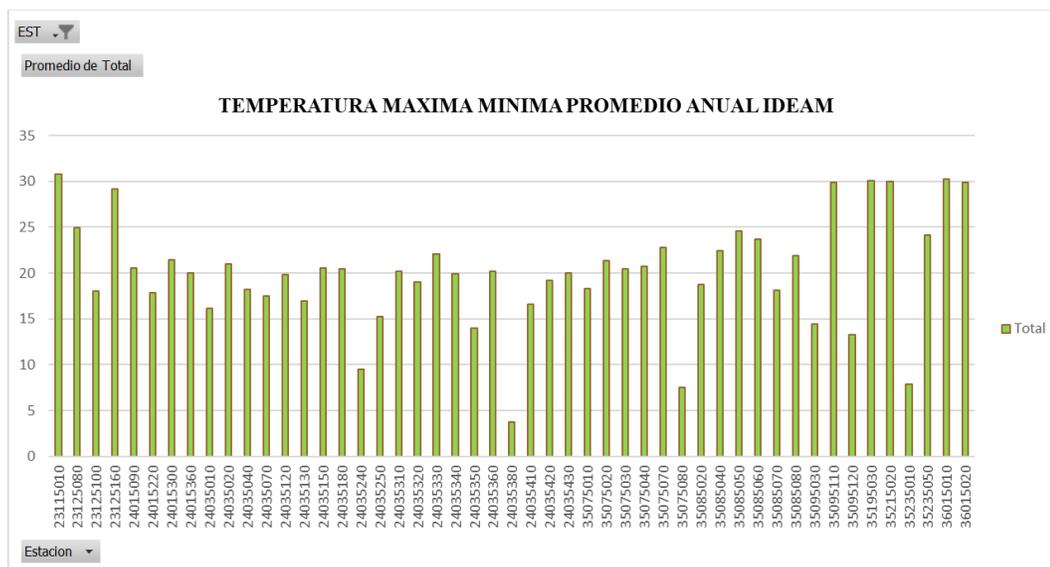
AEROPUERTO YOPAL - AUT [35215020]: Registra una temperatura máxima promedio anual histórica de 31.53°C.

PAZ DE ARIPORO [36015010]: Presenta una temperatura máxima promedio anual histórica de 31.72°C.

EL DIAMANTE - AUT [36015020]: Registra una temperatura máxima promedio anual histórica de 32.10°C.

Figura 14.

Temperatura Máxima Mínima Promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El concepto de "temperaturas máximas mínimas" se refiere a las temperaturas máximas más bajas registradas dentro de un período determinado, generalmente un año. Estas temperaturas son relevantes para comprender la variabilidad climática y evaluar el potencial de eventos extremos de calor en diferentes zonas.

El análisis revela que la estación NEVADO DEL COCUY - AUT [24035380] y el área circundante presentan las temperaturas máximas mínimas más bajas de la región. Esta situación se explica por la combinación de factores topográficos y de altitud.

La estación NEVADO DEL COCUY - AUT [24035380] se encuentra ubicada en el Parque Nacional Natural Nevado del Cocuy y Güicán, una zona montañosa con altitudes que superan los 5.000 metros sobre el nivel del mar. Esta altitud extrema genera un ambiente frío y limita la circulación de aire caliente proveniente de zonas más bajas.

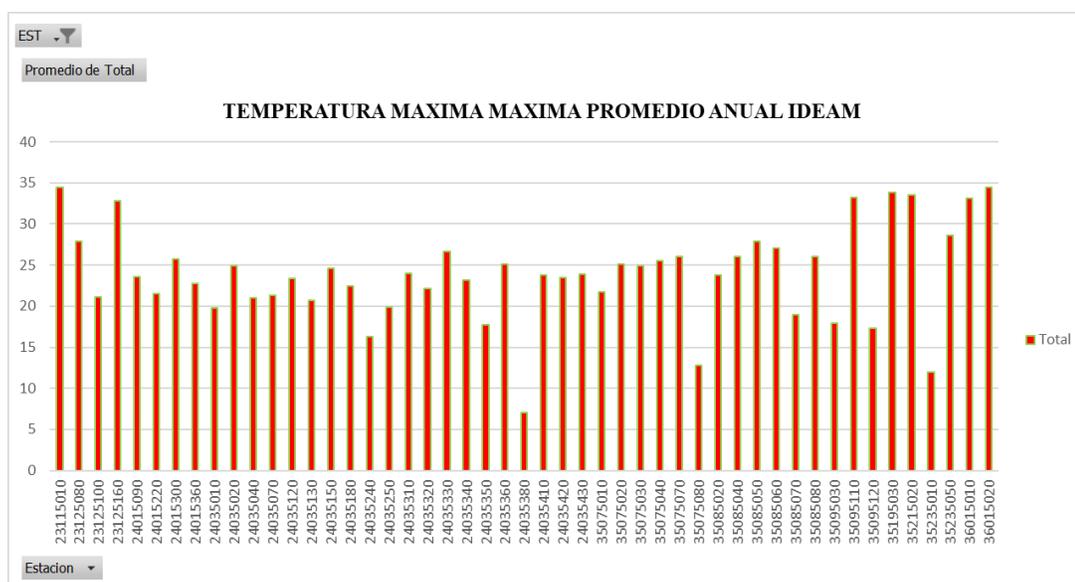
La topografía montañosa de la región impide la entrada de masas de aire caliente provenientes de otras zonas, lo que contribuye a mantener temperaturas máximas más bajas.

La altitud extrema de la zona, superior a los 5.000 metros sobre el nivel del mar, es el factor principal que determina las temperaturas máximas mínimas más bajas. A mayor altitud, menor temperatura.

La disminución de la presión atmosférica con la altura provoca una menor densidad del aire, lo que reduce la capacidad de este para absorber y retener calor.

Figura 15.

Temperatura Máxima Máxima Promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

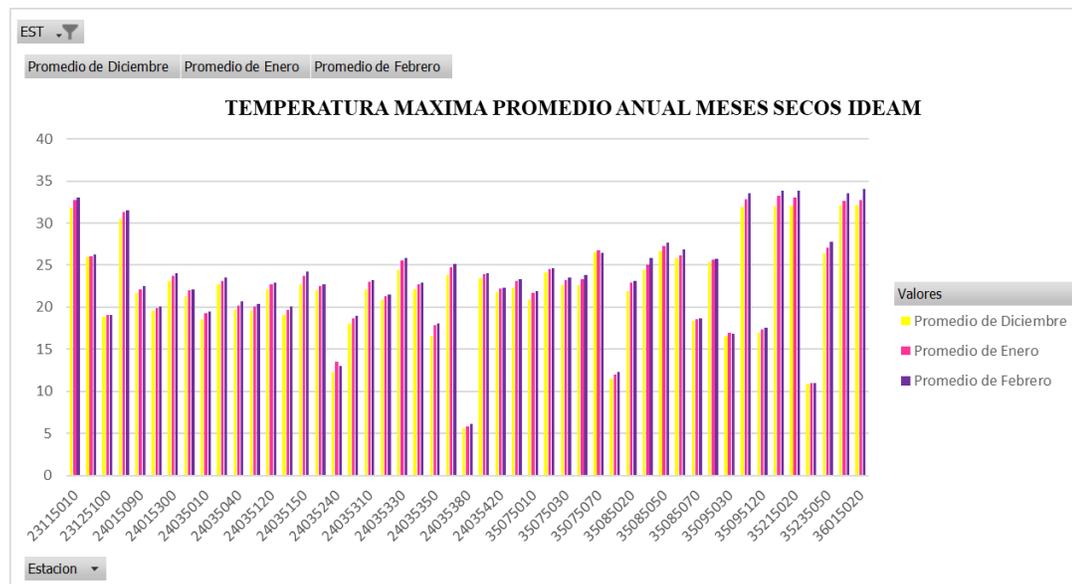
El análisis de las temperaturas máximas máximas en los departamentos de la zona de estudio se basa en la identificación de los picos más altos en la gráfica correspondiente. Estas estaciones, ubicadas en zonas con topografía favorable a climas cálidos, presentan las temperaturas máximas máximas más elevadas de la región.

El análisis revela que la estación PUERTO BOYACA [23115010] registra la temperatura máxima máxima más alta históricamente promedio de la región, con valores superiores a los 32.46°C. Esta zona presenta características topográficas y climáticas que favorecen la presencia de temperaturas extremadamente cálidas.

La estación PUERTO BOYACA se encuentra ubicada en el Valle del Magdalena, una región caracterizada por una topografía plana y abierta. Esta característica permite una mayor recepción de radiación solar y una menor circulación de aire frío, lo que contribuye a temperaturas más elevadas.

La ausencia de barreras montañosas en las cercanías de la estación permite una mayor circulación de aire caliente proveniente de otras zonas, lo que intensifica el efecto de calentamiento.

La zona donde se encuentra la estación PUERTO BOYACA presenta un clima cálido, caracterizado por temperaturas promedio elevadas y baja precipitación. Este tipo de clima se ve favorecido por la topografía plana y la menor influencia de la altitud.

Figura 16.*Temperatura Máxima Promedio Anual Meses Secos IDEAM*

Fuente: Autor, 2024.

Los departamentos de Boyacá y Casanare, en Colombia, experimentan períodos secos a lo largo del año, la variabilidad estacional de las precipitaciones juega un papel crucial en la formación de períodos secos. En Boyacá y Casanare, la temporada seca generalmente se extiende desde diciembre hasta marzo, coincidiendo con el inicio del fenómeno climático El Niño.

Los cambios en la temperatura superficial del Océano Pacífico, específicamente en la región del Pacífico Ecuatorial, influyen en los patrones de circulación atmosférica y la distribución de las precipitaciones. Durante El Niño, estas anomalías oceánicas generan condiciones menos favorables para la lluvia en la región.

La interacción entre la Corriente en Chorro Tropical del Atlántico y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) también afecta la distribución de las precipitaciones. Durante

la temporada seca, la ZCIT se desplaza hacia el sur, reduciendo la actividad convectiva y la lluvia en Boyacá y Casanare.

7.2. Integración de la información climatológica

La integración climatológica es un proceso fundamental para comprender la distribución espacial y temporal de las variables climáticas. Esta disciplina emplea diversas técnicas para estimar y generar información climática en áreas donde no existen datos de observación directa.

Las técnicas de interpolación No determinísticas (kriging) o geoestadísticas utilizan las propiedades estadísticas de los puntos medidos.

Las técnicas geoestadísticas cuantifican la autocorrelación espacial entre los puntos medidos y reflejan la configuración espacial de los puntos de muestra en torno a la ubicación de predicción.

Para el desarrollo de este ítem se utilizó la GEOESTADISTICA en el programa ARCGIS, resaltando la importancia de la estadística en donde se explica que esta es una metodología estadística usada para la estimación, predicción y simulación de datos correlacionados espacialmente, que en su análisis utiliza métodos exploratorios y de interpolación.

7.2.1. Metodología empleada

Para el análisis estadístico y la corrección de datos empleados se implementó el Análisis empleo de ARCGIS en GEOESTADISTICAL ANALISIS, en donde por medio de esta

herramienta se eliminaron datos atípicos, analizaron tendencias y se establecieron tendencias básicas en casa una de las variables analizadas.

Creación del Histograma: por medio del cual se obtiene una descripción univariada de los datos, se despliega la distribución de frecuencia del conjunto de datos y se calcula la mediana, media, cuartiles, varianza y desviación estándar.

Creación Mapa Voronoi: el cual se construyó a partir de los polígonos que se crean alrededor de la localización de un punto de muestreo, el valor de cada polígono se obtiene por la media en este caso.

Creación de QQ Plot: Una distribución acumulada se obtiene a partir de los datos ordenados vs curva de distribución normal: QQ Plot Normal, El procedimiento anterior se repite para obtener el QQPlot de la segunda población y se comparan con la primera.

Creación Análisis de Tendencia (TREND): El uso de esta herramienta es de ayuda para la identificación de tendencias en los datos de entrada.

Creación Nube de Semivariograma/Covarianza: En este paso se muestra el semivariograma empírico experimental y lo plantea como una función de la distancia de todas las parejas de puntos.

La metodología empleada en el estudio se denomina Kriging (KO) que es un método geoestadístico ampliamente utilizado para estimar valores de variables espacialmente distribuidas a partir de datos de observación puntuales. Su precisión y robustez lo convierten en una herramienta valiosa para diversas aplicaciones, incluyendo el área de atmosfera y climatología.

El KO se basa en la suposición de que la variable de interés presenta una correlación espacial, es decir, que los valores observados en puntos cercanos tienden a ser más similares que

los valores observados en puntos más distantes. Esta correlación espacial se modela mediante una función de variograma, que describe la relación estadística entre la distancia entre dos puntos y la diferencia esperada en sus valores.

7.2.2. Precipitación

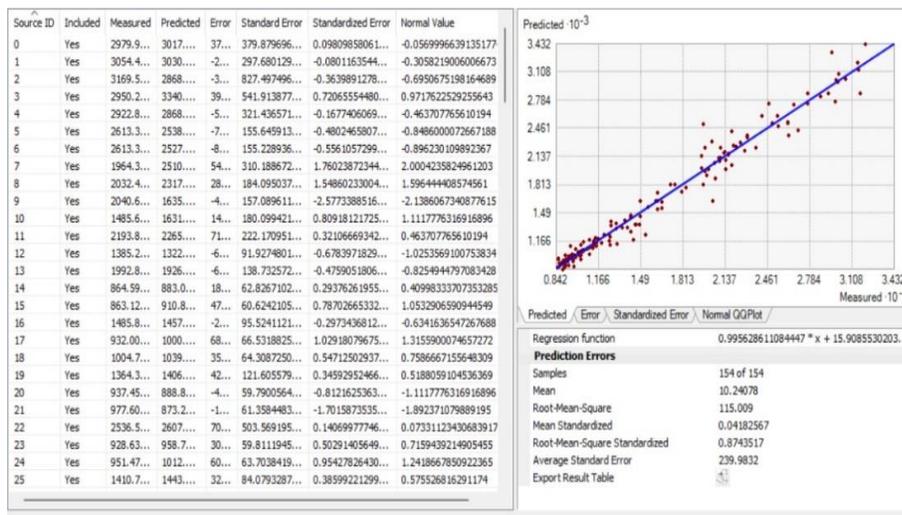
De acuerdo al análisis de la información de precipitación obtenidos tanto local como satelital se procedió a el uso de Kriging Ordinario en donde por medios de interpolación se establecieron valores en de precipitación en cada una de las áreas a trabajar

7.2.2.1. CHIRPS Daily

Para la obtención de interpolación para información satelital de CHIRPS se partió del uso de la base de datos establecida para esta variable precipitación, esta base de datos contenía exactamente las coordenadas en X y Y, la precipitación anual total y el código asociado a la identificación de la estación meteorológica. La información satelital CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) ofrece datos de precipitación a escala global con alta resolución temporal. Para aprovechar al máximo esta información, se empleó el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) a partir de una base de datos exhaustiva de datos CHIRPS.

Figura 17.

Predictec y aceptación interpolación según ROOT -MEAN-SQUARE



Fuente: Autor, 2024.

Figura 18.

Reporte Kriging Ordinario CHIRPS_Precipitación

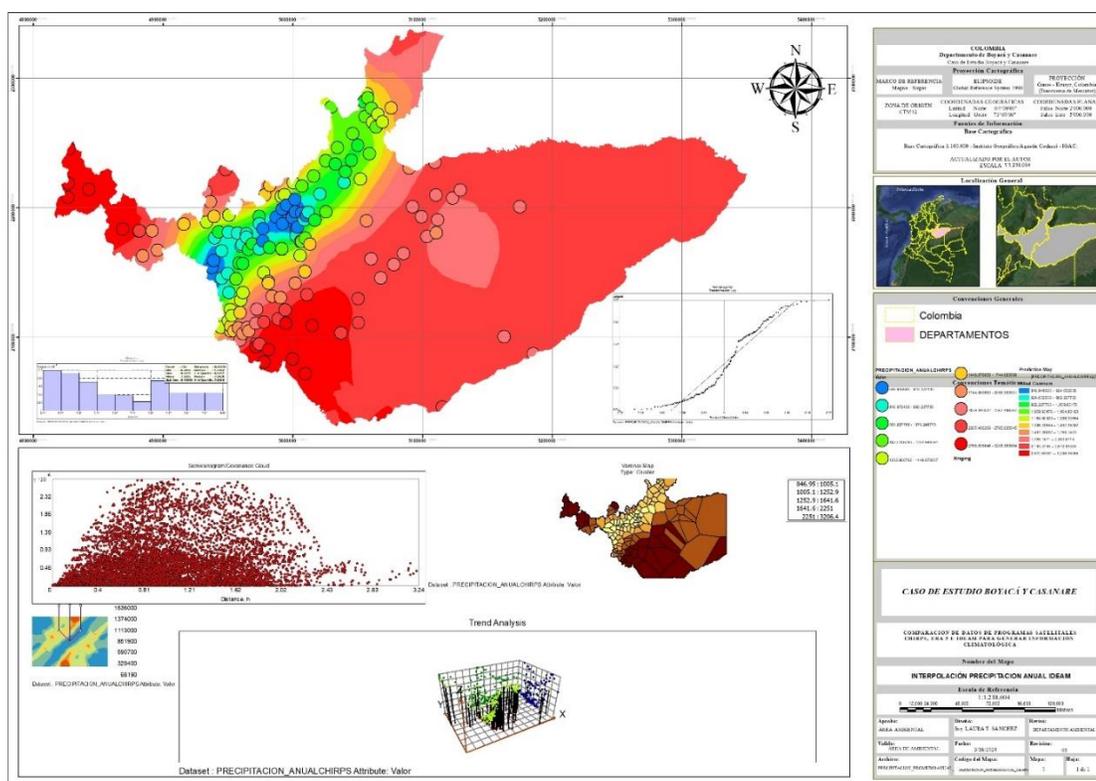


Fuente: Autor, 2024.

Al aceptar el método de interpolación debido al error bajo en interpretación de datos se procede a la construcción de las salidas cartográficas correspondiente a la interpolación de la precipitación con información satelital de CHIRPS en los departamentos de Boyacá y Casanare.

Mapa 6.

Interpolación Precipitación promedio Anual CHIRPS



Fuente: Autor, 2024.

El mapa presentado revela una distribución desigual de la precipitación en los departamentos colombianos de Casanare y Boyacá. En las regiones de los Llanos Orientales, específicamente en zonas con climas cálidos tradicionales, se observan valores de precipitación más bajos. Esto se debe principalmente a la influencia del anticiclón amazónico, que genera condiciones de sequía en la región durante gran parte del año, de igual manera en Boyacá las

zonas aledañas a Puerto Boyacá en Boyacá y la región de Cubaral en los límites del departamento, presentan topografías que no favorecen la presencia de lluvias.

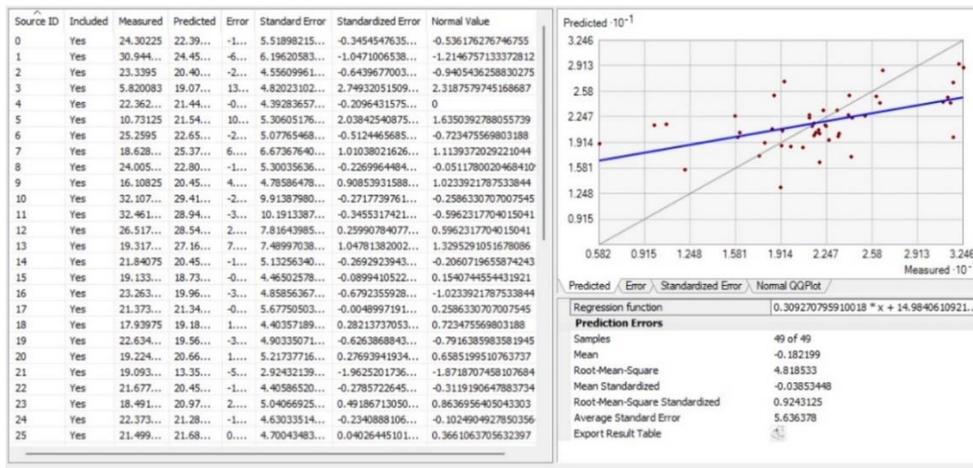
Por otro lado, se resalta el cambio de coloración en la interpolación en la zona central de Boyacá indicando así que las zonas con precipitaciones más bajas se encuentran en la zona central del departamento, estas áreas montañosas actúan como barreras orográficas, forzando el ascenso del aire húmedo y provocando su condensación y posterior precipitación.

7.2.2.2. Estaciones climatológicas – IDEAM

Para la obtención de interpolación para información local del IDEAM y las estaciones meteorológicas utilizadas se partió del uso de la base de datos establecida para esta variable precipitación, esta base de datos contenía exactamente las coordenadas en X y Y, la precipitación anual total y el código asociado a la identificación de la estación meteorológica. La información. Para aprovechar al máximo esta información, se empleó el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) a partir de una base de datos exhaustiva de datos IDEAM.

Figura 19.

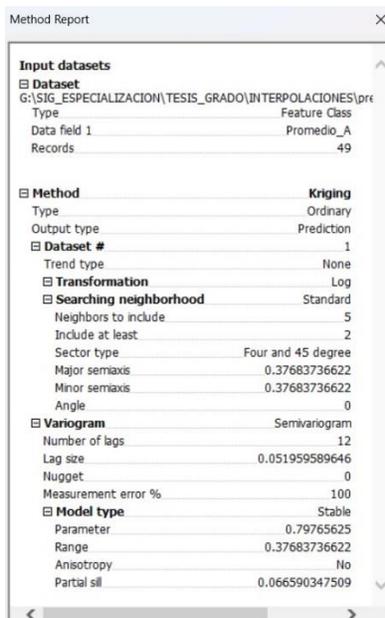
Predictec y aceptación interpolación según ROOT -MEAN-SQUARE



Fuente: Autor, 2024.

Figura 20.

Reporte Kriging Ordinario IDEAM_Precipitación



Fuente: Autor, 2024.

LLANOS ORIENTALES con precipitaciones más bajas y la ZONA CENTRAL del departamento de Boyacá con precipitaciones más altas.

7.2.3. *Temperatura mínima*

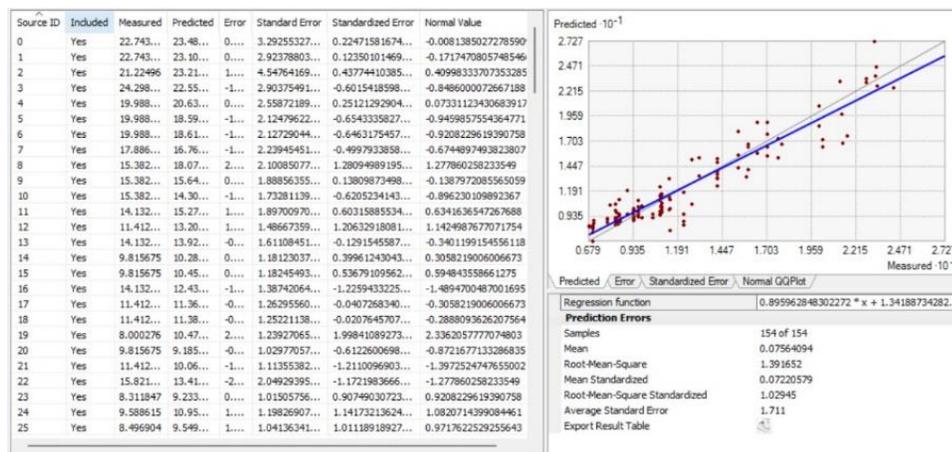
De acuerdo al análisis de la información de temperatura mínima obtenidos tanto local como satelital se procedió a el uso de Kriging Ordinario en donde por medios de interpolación se establecieron valores en de temperatura mínima en cada una de las áreas a trabajar.

7.2.4. *ERA 5 Daily Aggregates*

Para la obtención de interpolación para información satelital de ERA 5 se partió del uso de la base de datos establecida para esta variable Temperatura, esta base de datos contenía exactamente las coordenadas en X y Y, la TEMPERATURA MINIMA anual total y el código asociado a la identificación de la estación meteorológica. La información satelital ERA 5, ofrece datos de Temperaturas Máximas y Mínimas a escala global con alta resolución temporal. Para aprovechar al máximo esta información, se empleó el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) a partir de una base de datos exhaustiva de datos ERA 5.

Figura 21.

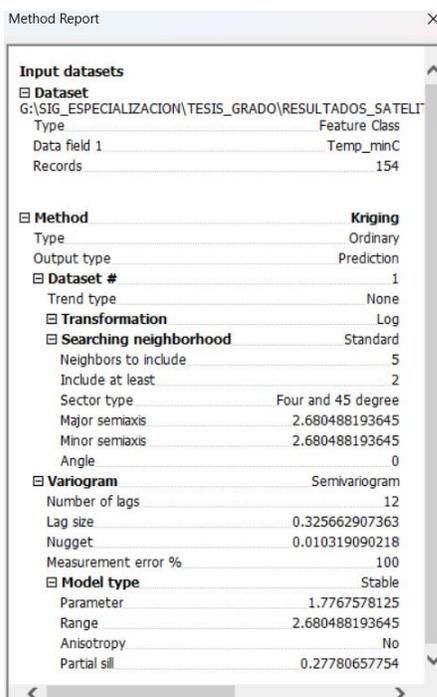
Predictec y aceptación interpolación según ROOT -MEAN-SQUARE



Fuente: Autor, 2024.

Figura 22.

Reporte Kriging Ordinario ERA5_Temperatura_Min

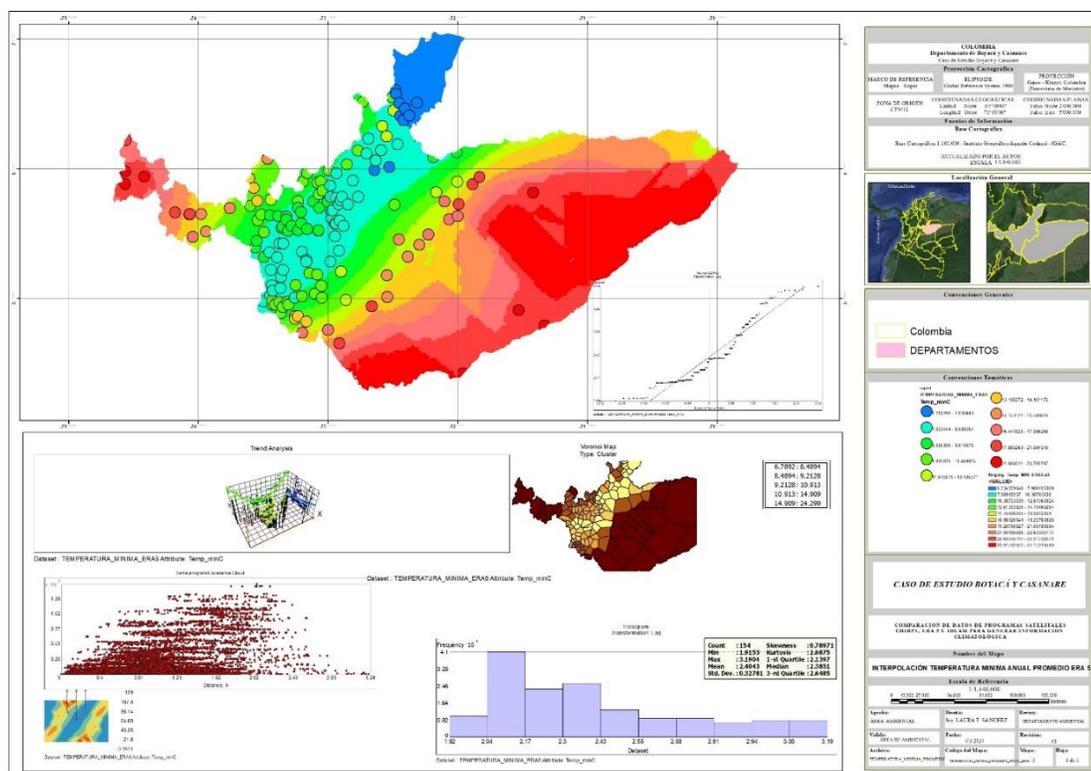


Fuente: Autor, 2024.

Al aceptar el método de interpolación debido al error bajo en interpretación de datos se procede a la construcción de las salidas cartográficas correspondiente a la interpolación de la Temperatura Mínima con información Satelital ERA 5 en los departamentos de Boyacá y Casanare.

Mapa 8.

Temperatura Mínima Promedio ERA 5



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de las medidas de tendencia y el mapa de interpolación obtenido para los departamentos de Boyacá y Casanare para la variable temperatura mínima evidencian que las zonas con temperaturas más bajas son las zonas contiguas y vecinas a él nevado del Cocuy y toda la zona centro del departamento de Boyacá, notamos una variabilidad y un cambio en el

valor de temperaturas mínimas de 5.33 históricamente en dichas zonas mostradas en azul y de rojo se encuentran con las temperaturas mínimas más altas.

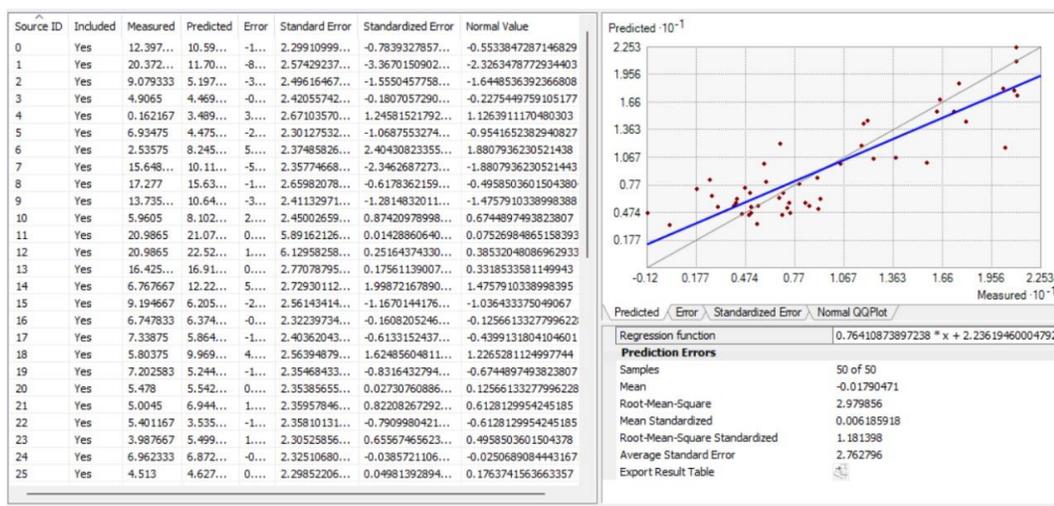
El análisis realizado para los departamentos de Boyacá y Casanare revela patrones espaciales definidos en la distribución de las temperaturas mínima.

7.2.4.1. Estaciones Climatológicas – IDEAM.

Para la obtención de interpolación para información local IDEAM, se partió del uso de la base de datos establecida para esta variable Temperatura Mínima, esta base de datos contenía exactamente las coordenadas en X y Y, la precipitación anual total y el código asociado a la identificación de la estación meteorológica. La información local IDEAM ofrece datos de precipitación a escala Nacional. Para aprovechar al máximo esta información, se empleó el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) a partir de una base de datos exhaustiva de datos IDEAM.

Figura 23.

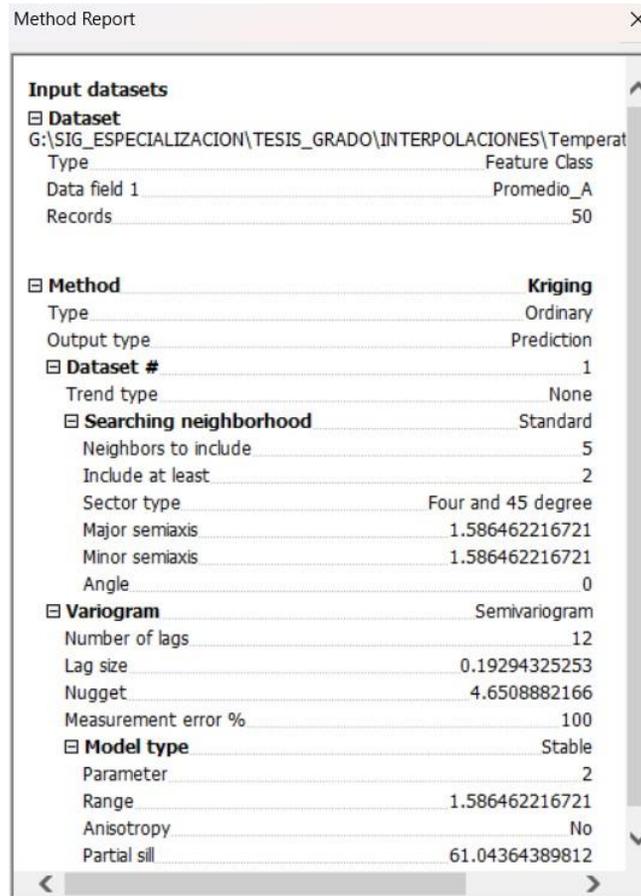
Predictec y aceptación interpolación según ROOT -MEAN-SQUARE



Fuente: Autor, 2024.

Figura 24.

Reporte Kriging Ordinario IDEAM_Temperatura_Min



Fuente: Autor, 2024.

Al aceptar el método de interpolación debido al error bajo en interpretación de datos se procede a la construcción de las salidas cartográficas correspondiente a la interpolación de la Temperatura Mínima con información Local IDEAM en los departamentos de Boyacá y Casanare.

Se observan valores más bajos en la zona central y montañosa del departamento, representadas en color azul en el mapa. Estas áreas, caracterizadas por mayor altitud y presencia de nevados, experimentan temperaturas mínimas más extremas.

Las áreas con valores intermedios se encuentran en regiones de menor altitud, principalmente en zonas limítrofes con el departamento de Casanare. Estas zonas, representadas en color verde en el mapa, presentan temperaturas mínimas menos extremas.

7.2.5. Temperatura máxima

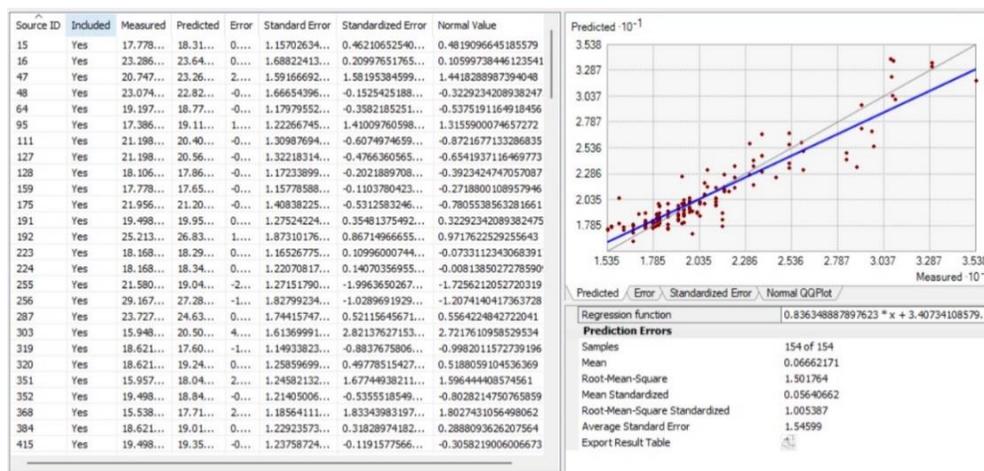
De acuerdo al análisis de la información de temperatura máxima obtenida tanto local como satelital se procedió a el uso de Kriging Ordinario en donde por medios de interpolación se establecieron valores en de temperatura máxima en cada una de las áreas a trabajar.

7.2.6. ERA 5 Daily Aggregates

Para la obtención de interpolación para información satelital de ERA 5 se partió del uso de la base de datos establecida para esta variable Temperatura, esta base de datos contenía exactamente las coordenadas en X y Y, la TEMPERATURA MAXIMA anual total y el código asociado a la identificación de la estación meteorológica. La información satelital ERA 5, ofrece datos de Temperaturas Máximas y Mínimas a escala global con alta resolución temporal. Para aprovechar al máximo esta información, se empleó el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) a partir de una base de datos exhaustiva de datos ERA 5.

Figura 25.

Predicte y aceptación interpolación según ROOT-MEAN-SQUARE



Fuente: Autor, 2024.

Figura 26.

Reporte Kriging Ordinario ERA5_Temperatura_MAX

Input datasets

Dataset
 G:\SIG_ESPECIALIZACION\TESIS_GRADO\RESULTADOS_SATELIT
 Type: Feature Class
 Data field 1: Temp_C
 Records: 154

Method: **Kriging**
 Type: Ordinary
 Output type: Prediction

Dataset #: 1
 Trend type: None

Transformation: Log

Searching neighborhood: Standard
 Neighbors to include: 5
 Include at least: 2
 Sector type: Four and 45 degree
 Major semiaxis: 3.907954888359
 Minor semiaxis: 3.907954888359
 Angle: 0

Variogram: Semivariogram
 Number of lags: 12
 Lag size: 0.325662907363
 Nugget: 0.003545182788
 Measurement error %: 100

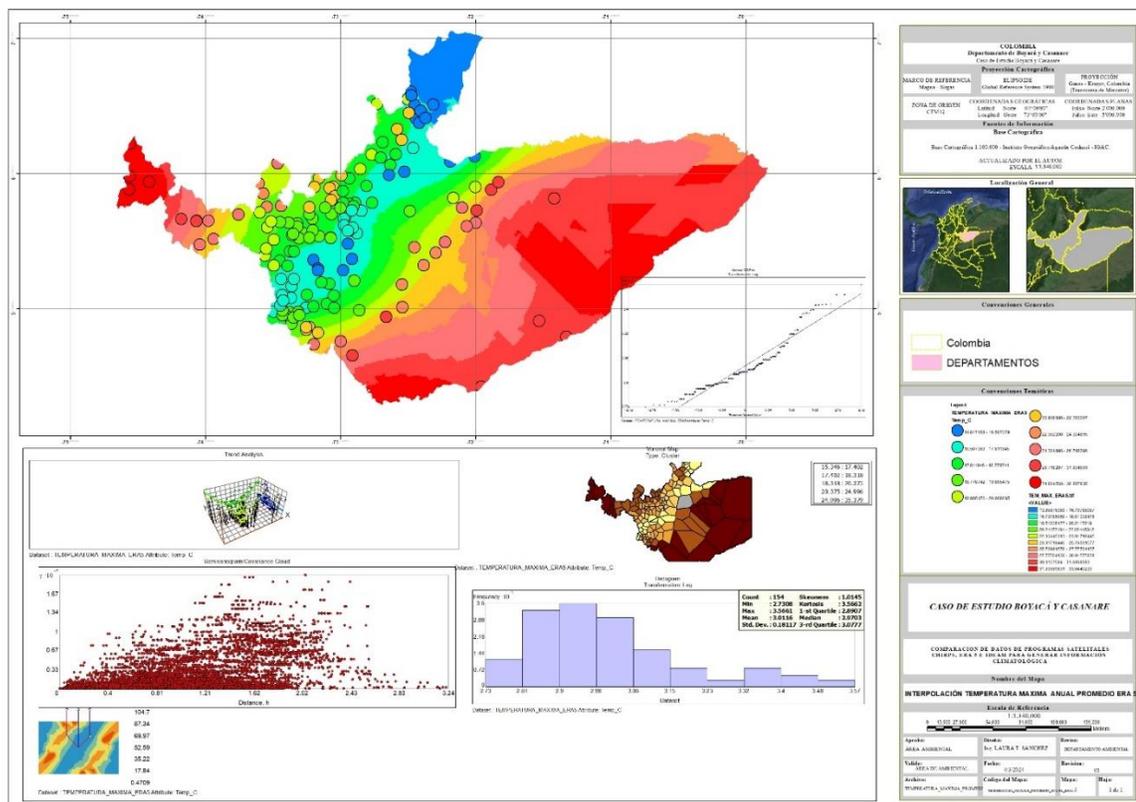
Model type: Stable
 Parameter: 1.690625
 Range: 3.907954888359
 Anisotropy: No
 Partial sill: 0.123363836693

Fuente: Autor, 2024.

Al aceptar el método de interpolación debido al error bajo en interpretación de datos se procede a la construcción de las salidas cartográficas correspondiente a la interpolación de la Temperatura Máxima con información Satelital ERA 5 en los departamentos de Boyacá y Casanare.

Mapa 10.

Interpolación Temperatura Promedio Máxima ERA 5



Fuente: Autor, 2024.

La comparación de datos de temperatura entre ERA 5 y mediciones locales en Boyacá y Casanare evidencia una alta concordancia en la mayoría de las zonas analizadas. Sin embargo, se observan discrepancias en la zona de los Llanos Orientales, lo que sugiere la necesidad de un

análisis más profundo y la consideración de factores como la resolución espacial, la cobertura de nubes y los algoritmos de procesamiento.

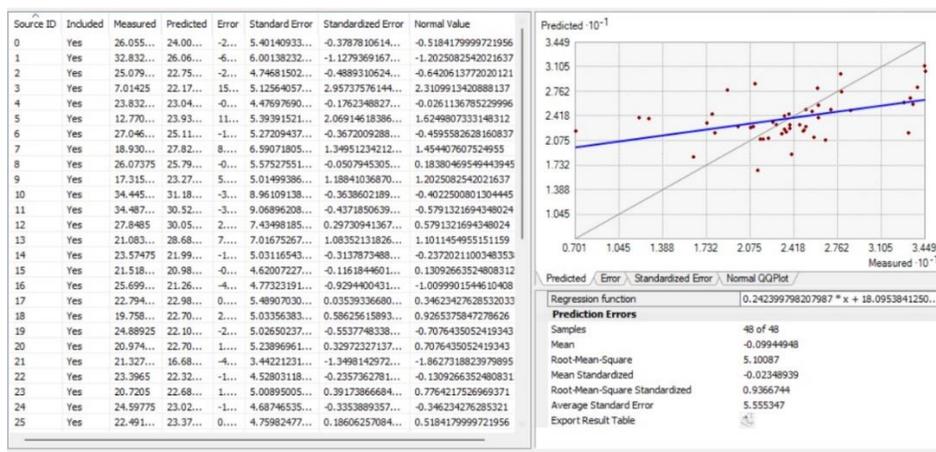
Existen diferentes factores a tener en cuenta en los cuales influyen en las Discrepancias, como la resolución espacial del satélite ERA 5 puede ser inferior a la de las estaciones meteorológicas locales, lo que podría generar diferencias en zonas con alta variabilidad topográfica, la presencia de nubes puede afectar la precisión de las mediciones satelitales, especialmente en zonas con alta nubosidad o los algoritmos utilizados para procesar los datos satelitales y las mediciones locales pueden introducir pequeñas diferencias en los resultados.

7.2.6.1. Estaciones climatológicas – IDEAM

Para la obtención de interpolación para información local IDEAM, se partió del uso de la base de datos establecida para esta variable Temperatura Maxima, esta base de datos contenía exactamente las coordenadas en X y Y, la TEMPERATURA MAXIMA anual total y el código asociado a la identificación de la estación meteorológica. La información satelital ERA 5, ofrece datos de Temperaturas Máximas y Mínimas a escala global con alta resolución temporal. Para aprovechar al máximo esta información, se empleó el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) a partir de una base de datos exhaustiva de datos ERA 5.

Figura 27.

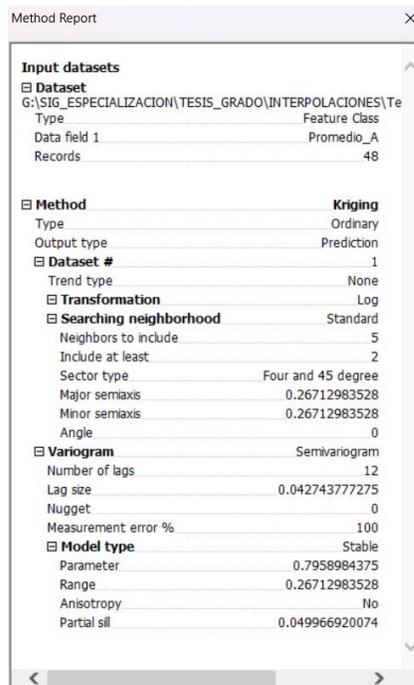
Predictec y aceptación interpolación según ROOT -MEAN-SQUARE



Fuente: Autor, 2024.

Figura 28.

Reporte Kriging Ordinario IDEAM_Temperatura_MAX

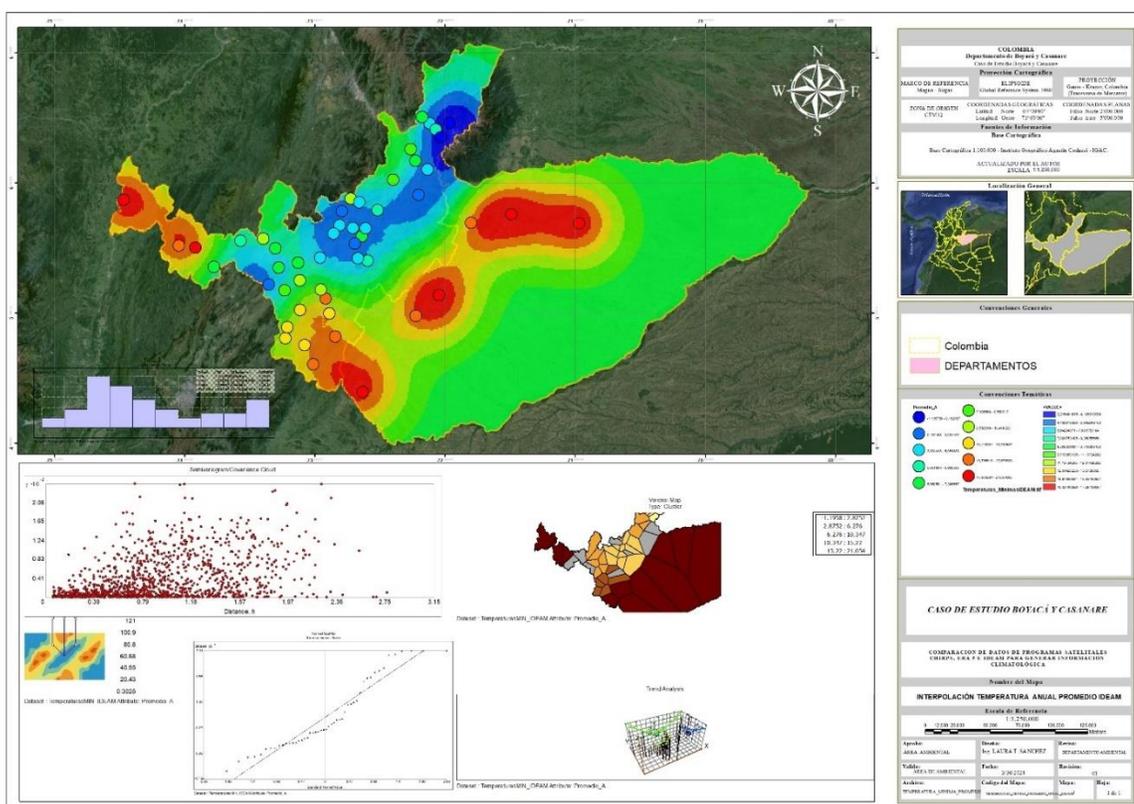


Fuente: Autor, 2024.

Al aceptar el método de interpolación debido al error bajo en interpretación de datos se procede a la construcción de las salidas cartográficas correspondiente a la interpolación de la Temperatura Máxima con información Local IDEAM en los departamentos de Boyacá y Casanare.

Mapa 11.

Interpolación Temperatura Mínima promedio Anual IDEAM



Fuente: Autor, 2024.

El análisis del mapa anterior y la identificación de zonas con valores extremos permiten caracterizar el comportamiento espacial de las temperaturas mínimas y sus implicaciones, este mapa revela patrones espaciales definidos en la distribución de las temperaturas mínimas anuales

en Boyacá y Casanare, se observa una ausencia de información en gran parte del departamento de Casanare, lo que imposibilita la estimación precisa de los valores de temperatura mínima en esas áreas. Esta falta de datos limita la comprensión completa del patrón espacial a nivel regional.

Las zonas con valores más bajos se encuentran en la zona central de Boyacá, particularmente en las áreas aledañas al Nevado del Cocuy. Estas zonas montañosas presentan comportamientos históricos de temperaturas mínimas extremas, lo que las convierte en puntos de interés para estudios climáticos y gestión de riesgos.

Las áreas con valores intermedios se ubican principalmente en zonas de menor altitud, como la zona de Casanare (donde existe información verificada y rectificada), Puerto Boyacá y Cubaral. Estas zonas experimentan temperaturas mínimas menos extremas, lo que la diferencia de las zonas montañosas, las zonas con temperaturas mínimas extremas presentan un mayor riesgo de heladas, lo que puede afectar negativamente los cultivos agrícolas y generar impactos económicos en el sector.

7.3. Comparación entre los datos locales y la información de fuentes satelitales

En este punto de evaluación se procede a la comparación de los datos locales obtenidos por el IDEAM y los datos de paquetes satelitales obtenidos por medio de GGE, haciendo uso del software ArcGIS, específicamente la herramienta Raster Calculator, la cual se utilizó para comparar los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de IDEAM, CHIRPS y ERA 5.

Raster Calculator permite realizar operaciones matemáticas y lógicas entre rásteres, lo que la convierte en una herramienta ideal para comparar y analizar datos espaciales.

La utilización de Raster Calculator en ArcGIS y las métricas BIAS y MAE permite comparar de manera eficiente y precisa los datos de precipitación de IDEAM con datos satelitales de CHIRPS y ERA 5. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre el desempeño de los productos satelitales en la estimación de la precipitación a nivel local, lo que contribuye a la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos y la mitigación de riesgos hidrológicos, Climatológicos y en ejecución de obras.

Para evaluar la precisión de los datos satelitales en comparación con los datos locales, se utilizaron dos métricas: BIAS y MAE (Mean Absolute Error).

El BIAS (Sesgo) mide la tendencia sistemática de los datos satelitales a sobreestimar o subestimar los valores de precipitación en comparación con los datos locales. Un BIAS positivo indica una sobreestimación, mientras que un BIAS negativo indica una subestimación.

El MAE (Error Absoluto Medio) mide la magnitud promedio del error en las estimaciones de precipitación de los datos satelitales en comparación con los datos locales. Un MAE menor indica una mayor precisión.

- Aplicación de Raster Calculator y Métricas:

Carga de rásteres: Se cargaron los rásteres de precipitación de IDEAM, CHIRPS y ERA 5 en ArcGIS.

Cálculo de BIAS y MAE: Se utilizaron las siguientes expresiones en Raster Calculator para calcular BIAS y MAE:

- ✓ BIAS:

$$\text{BIAS} = \left(1 - \frac{\text{IDEAM}(X)}{\text{SATELITAL}(X)}\right) * 100$$

✓ MAE:

$$\text{MAE} = \text{ABS}\left(\left(1 - \frac{\text{IDEAM}(X)}{\text{SATELITAL}(X)}\right) * 100\right)$$

Los ráster de BIAS y MAE resultantes se analizaron para identificar áreas con mayor sesgo o error en las estimaciones de las variables de precipitación, temperaturas Max y Min, de los datos satelitales.

7.3.1. Precipitación

Se utilizaron métricas de BIAS Y MAE en Raster Calculator para obtener los valores de sobreestimación y subestimación en cada una de las zonas y de esta manera poder determinar las zonas en donde es posible el uso de información satelital de acuerdo al porcentaje de error obtenido para la variable precipitación.

Sobreestimación: Las zonas representadas en colores Rojo, Amarillo y verde experimentan una sobreestimación de la precipitación en comparación con los datos locales. Esta sobreestimación podría ser causada por la ausencia de estaciones meteorológicas terrestres en algunas regiones, como los Llanos Orientales, lo que limita la precisión de la interpolación espacial.

Zonas Óptimas para Uso de Datos Satelitales:

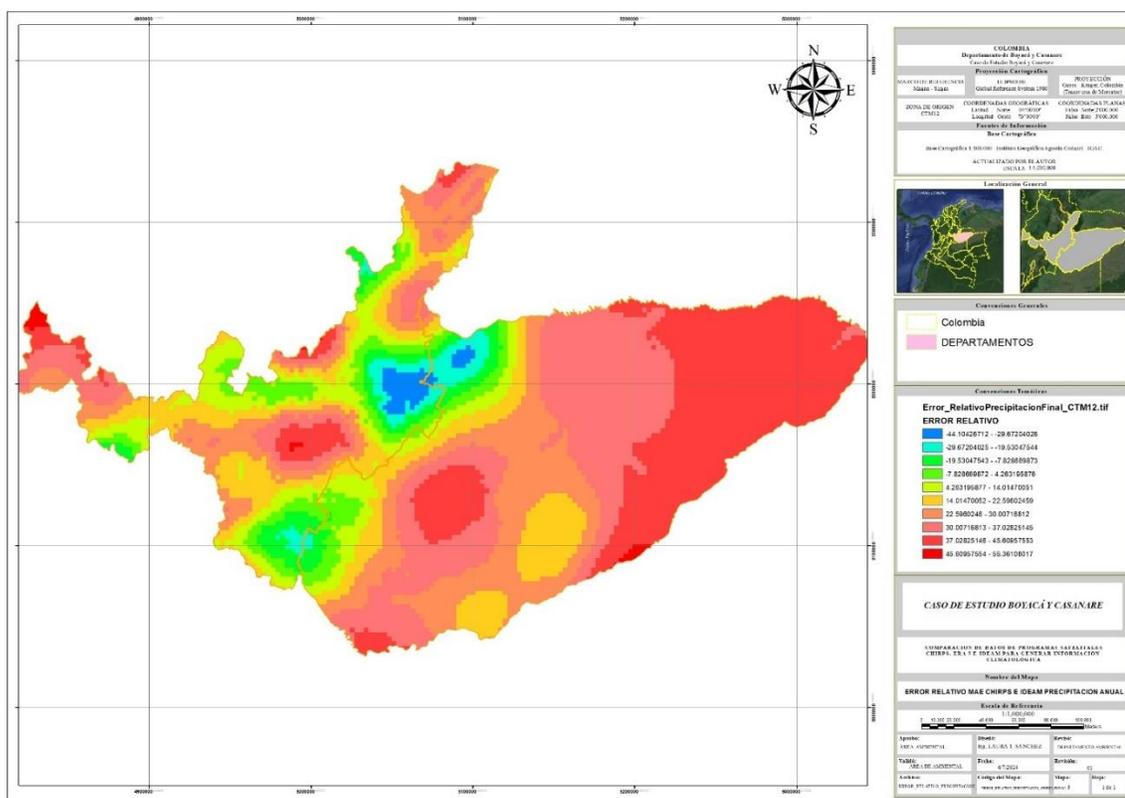
Las zonas representadas en azul agua marina corresponden a áreas donde los valores de precipitación obtenidos por datos satelitales presentan una mayor concordancia con la información local. Estas zonas, al no presentar subestimación ni sobreestimación significativa, son consideradas óptimas para el uso de datos satelitales para la estimación de la precipitación.

El análisis del mapa de precipitación resalta la importancia de comparar datos satelitales con información local para identificar posibles subestimaciones o sobreestimaciones. Las zonas con subestimación requieren un análisis más profundo y la consideración de factores como la topografía, la nubosidad y la densidad de estaciones meteorológicas. Por otro lado, las zonas con sobreestimación, como los Llanos Orientales, demandan la instalación de estaciones meteorológicas terrestres para mejorar la precisión de la interpolación espacial. La identificación de zonas óptimas para el uso de datos satelitales, como las representadas en azul agua marina, permite aprovechar al máximo la información satelital para la estimación de la precipitación.

7.3.1.2. Estimador MAE

Mapa 13.

Estimador MAE



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de MAE en la variable precipitación revela zonas con mayor precisión en el uso de datos satelitales CHIRPS:

Zonas Óptimas: Las zonas representadas en color verde claro presentan un MAE menor, lo que indica una mayor precisión de los datos satelitales en estas áreas. Esto significa que el error en la estimación de la precipitación mediante CHIRPS es menor en estas zonas, haciéndolas más adecuadas para el uso de este producto satelital.

La identificación de zonas con menor MAE, como las representadas en verde claro, permite optimizar el uso de datos satelitales CHIRPS para la estimación de la precipitación. Estas zonas, al presentar una mayor precisión en los datos satelitales, son más confiables para la toma de decisiones relacionadas a estudios meteorológicos y prevención en gestión del riesgo.

El análisis de MAE en la variable precipitación resalta la importancia de evaluar la precisión de los datos satelitales CHIRPS para identificar zonas donde su uso sea más adecuado. Las zonas con menor MAE, como las representadas en verde claro, presentan una mayor confiabilidad en la estimación de la precipitación y son más recomendables para la toma de decisiones.

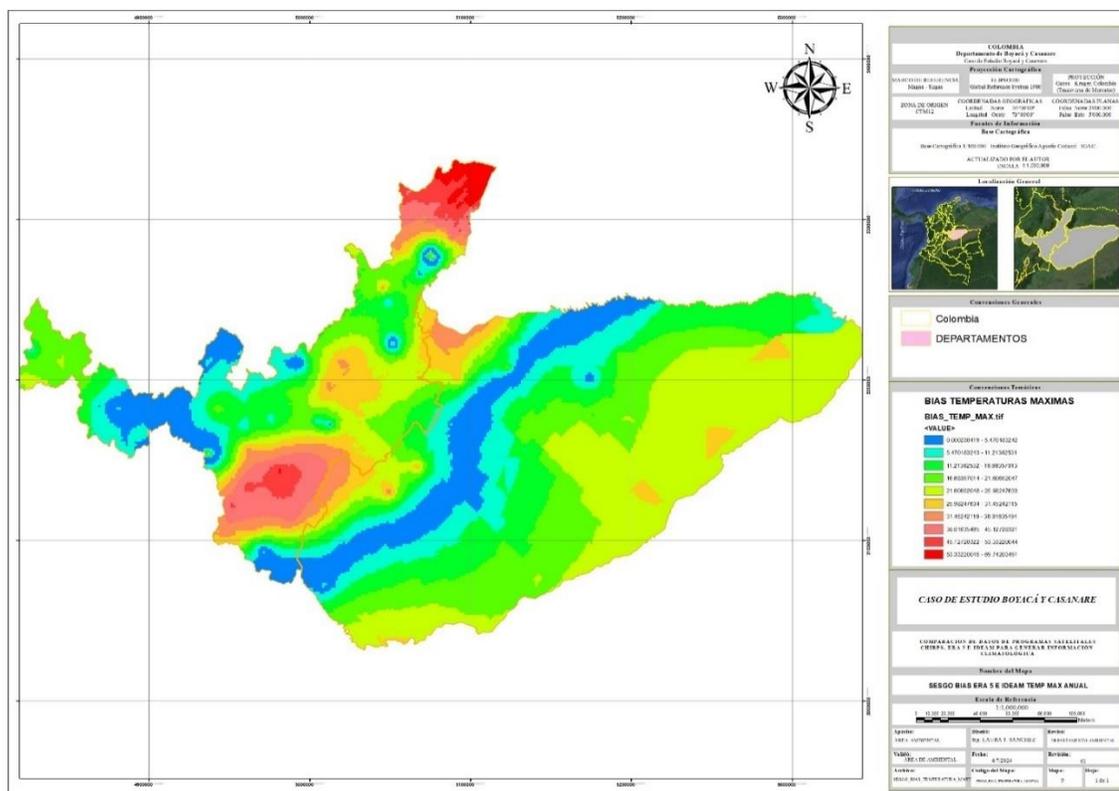
7.3.2. Temperatura máxima

Se utilizaron métricas de BIAS Y MAE en Raster Calculator para obtener los valores de sobreestimación y subestimación en cada una de las zonas y de esta manera poder determinar las zonas en donde es posible el uso de información satelital de acuerdo al porcentaje de error obtenido para la variable Temperatura Máxima.

7.3.2.1. Estimador BIAS

Mapa 14.

Estimador BIAS



Fuente: Autor, 2024.

El análisis del mapa de BIAS en la variable temperatura máxima revela una sobreestimación general por parte de ERA 5 en comparación con los datos locales de IDEAM:

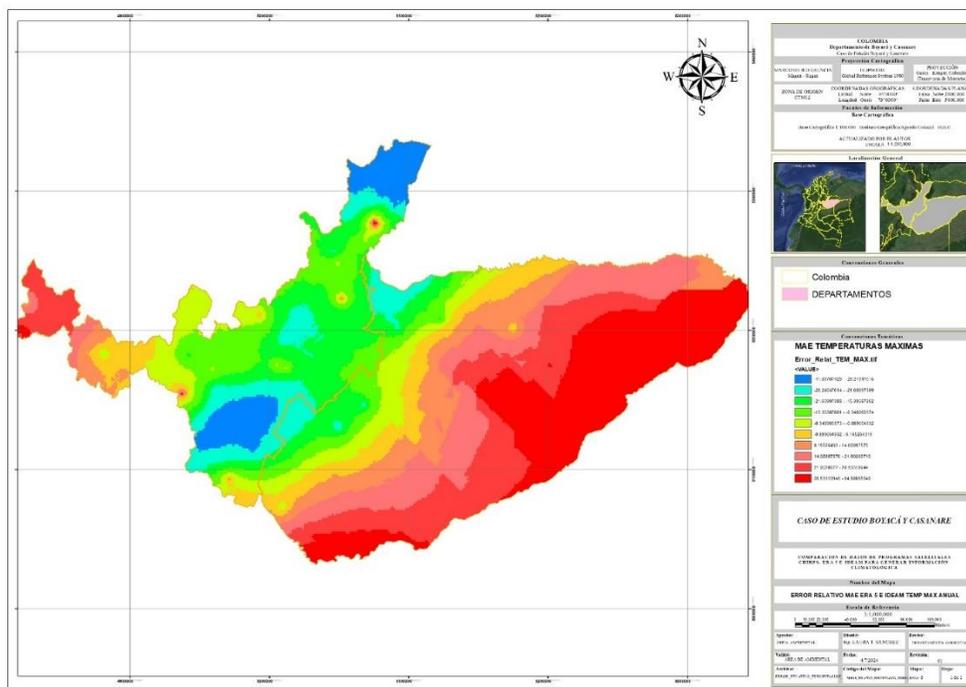
Sobreestimación: Se observa un BIAS positivo en la mayoría de las áreas de los departamentos analizados, lo que indica que ERA 5 tiende a sobreestimar los valores de temperatura máxima en comparación con los datos locales. Esta sobreestimación podría estar

relacionada con la complejidad topográfica de algunas regiones, la presencia de nubosidad o la falta de estaciones meteorológicas locales.

A pesar de la sobreestimación general, las zonas representadas en color azul oscuro presentan un BIAS relativamente menor, lo que las convierte en zonas más óptimas para el uso de información satelital ERA 5 para la estimación de la temperatura máxima. En estas áreas, la sobreestimación es menos significativa, lo que permite un uso más confiable de los datos satelitales.

El análisis del mapa de BIAS resalta la importancia de comparar datos satelitales ERA 5 con información local para identificar posibles sesgos o errores sistemáticos en la estimación de la temperatura máxima. Aunque se observa una sobreestimación general por parte de ERA 5, las zonas representadas en color azul oscuro presentan un BIAS menor, haciéndolas más adecuadas para el uso de este producto satelital.

7.3.2.2. Estimador MAE



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de MAE en la variable temperatura máxima revela zonas con mayor precisión en el uso de datos satelitales ERA 5:

Las zonas representadas en la gama de verdes y amarillo presentan un MAE menor, lo que indica una mayor precisión de los datos satelitales en estas áreas. Esto significa que el error en la estimación de la temperatura mediante ERA 5 es menor en estas zonas, haciéndolas más adecuadas para el uso de este producto satelital.

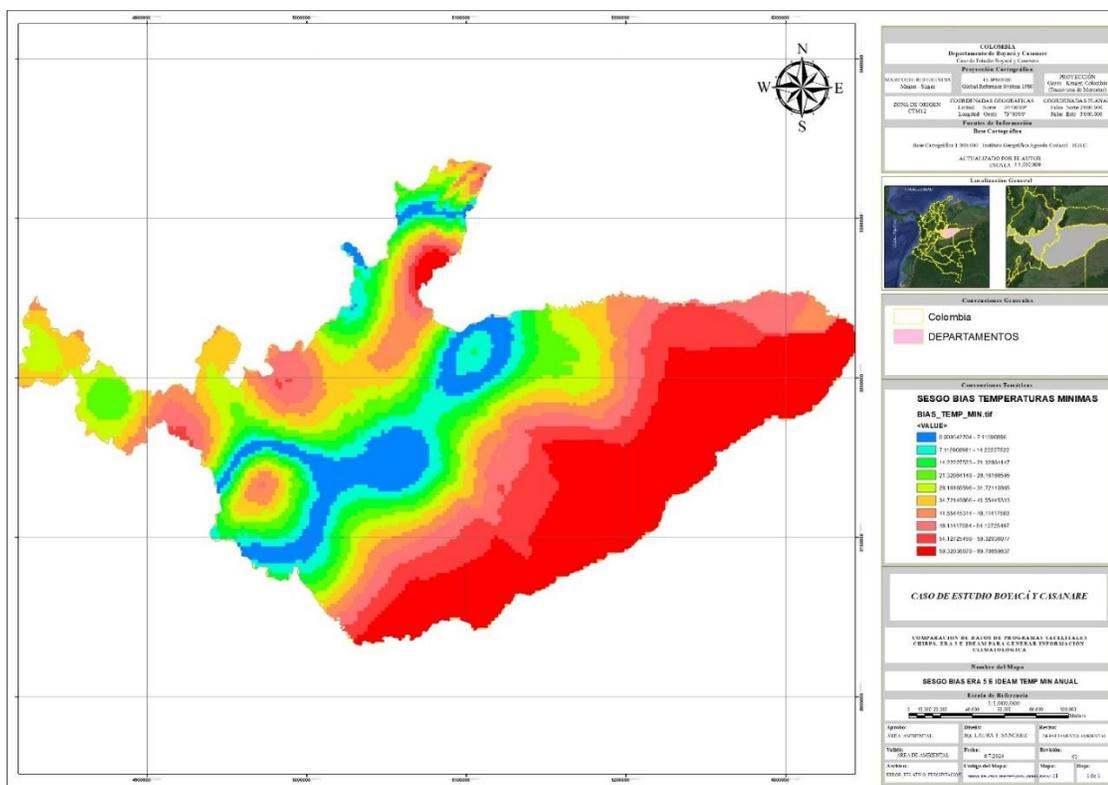
La identificación de zonas con menor MAE, como las representadas en la gama de verdes y amarillo, permite optimizar el uso de datos satelitales ERA 5 para la estimación de la temperatura. Estas zonas, al presentar una mayor precisión en los datos satelitales, son más confiables para la toma de decisiones relacionadas con la gestión de riesgos climáticos, la planificación territorial y el desarrollo sostenible.

El análisis de MAE en la variable temperatura resalta la importancia de evaluar la precisión de los datos satelitales ERA 5 para identificar zonas donde su uso sea más adecuado. Las zonas con menor MAE, como las representadas en la gama de verdes y amarillo, presentan una mayor confiabilidad en la estimación de la temperatura y son más recomendables para la toma de decisiones.

7.3.3. Temperatura mínima

Se utilizaron métricas de BIAS Y MAE en Raster Calculator para obtener los valores de sobreestimación y subestimación en cada una de las zonas y de esta manera poder determinar las zonas en donde es posible el uso de información satelital de acuerdo al porcentaje de error obtenido para la variable Temperatura Mínima.

7.3.3.1. Estimador BIAS



Fuente: Autor, 2024.

El análisis del mapa de BIAS en la variable temperatura mínima revela una sobreestimación general por parte de ERA 5 en comparación con los datos locales de IDEAM:

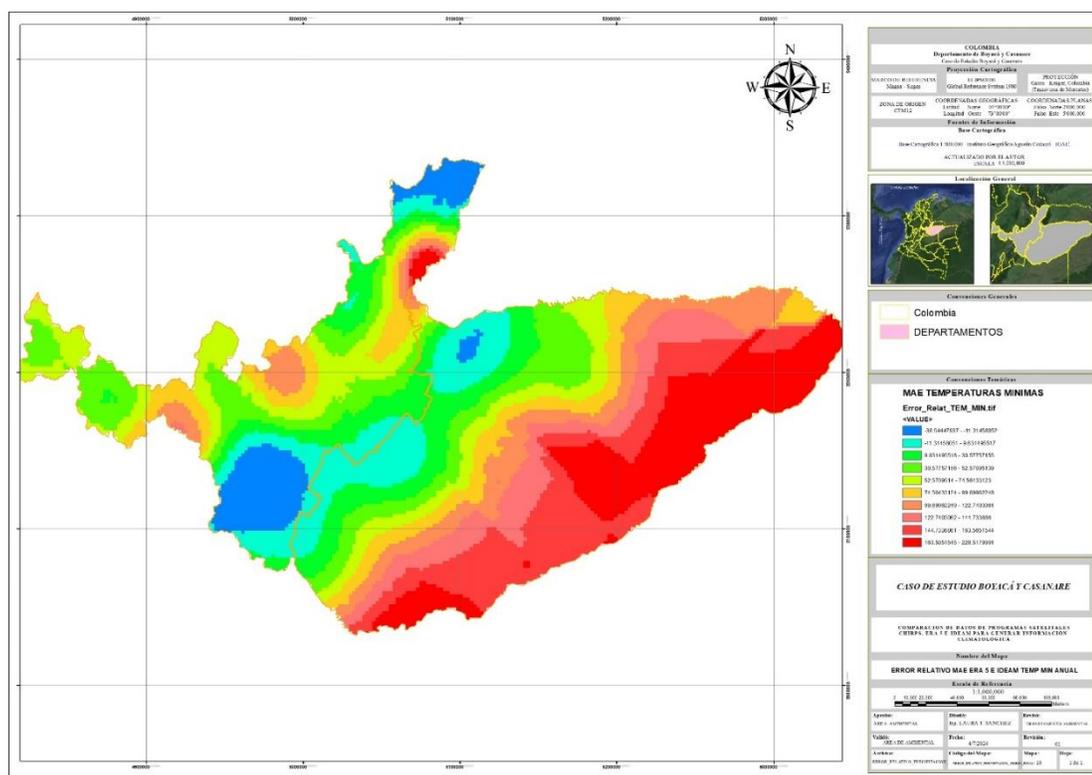
Sobreestimación: Se observa un BIAS positivo en la mayoría de las áreas de los departamentos analizados, lo que indica que ERA 5 tiende a sobreestimar los valores de temperatura máxima en comparación con los datos locales. Esta sobreestimación podría estar relacionada con la complejidad topográfica de algunas regiones, la presencia de nubosidad o la falta de estaciones meteorológicas locales.

A pesar de la sobreestimación general, las zonas representadas en color azul oscuro presentan un BIAS relativamente menor, lo que las convierte en zonas más óptimas para el uso

de información satelital ERA 5 para la estimación de la temperatura mínima. En estas áreas, la sobreestimación es menos significativa, lo que permite un uso más confiable de los datos satelitales.

El análisis del mapa de BIAS resalta la importancia de comparar datos satelitales ERA 5 con información local para identificar posibles sesgos o errores sistemáticos en la estimación de la temperatura mínima. Aunque se observa una sobreestimación general por parte de ERA 5, las zonas representadas en color azul oscuro presentan un BIAS menor, haciéndolas más adecuadas para el uso de este producto satelital.

7.3.3.2. Estimador MAE



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de MAE en la variable temperatura mínima revela zonas con mayor precisión en el uso de datos satelitales ERA 5:

Las zonas representadas en verdes oscuro presentan un MAE menor, lo que indica una mayor precisión de los datos satelitales en estas áreas. Esto significa que el error en la estimación de la temperatura mínima mediante ERA 5 es menor en estas zonas, haciéndolas más adecuadas para el uso de este producto satelital.

La identificación de zonas con menor MAE, como las representadas en verde oscuro, permite optimizar el uso de datos satelitales ERA 5 para la estimación de la temperatura mínima. Estas zonas, al presentar una mayor precisión en los datos satelitales, son más confiables para la toma de decisiones relacionadas con la gestión de riesgos climáticos, la planificación territorial y el desarrollo sostenible.

El análisis de MAE en la variable temperatura mínima resalta la importancia de evaluar la precisión de los datos satelitales ERA 5 para identificar zonas donde su uso sea más adecuado. Las zonas con menor MAE, como las representadas verde oscuro, presentan una mayor confiabilidad en la estimación de la temperatura mínima y son más recomendables para la toma de decisiones.

8. Conclusiones

En el presente estudio, se diseñaron y desarrollaron códigos en Python, que facilitan tanto el análisis estadístico, como la descarga de información satelital, a partir de bases de datos de coordenadas específicas. Estos códigos representan un aporte significativo al campo de la investigación y el análisis espacial, ya que permiten, la descarga de información satelital multivariada, dichos códigos permiten obtener información satelital de múltiples variables, incluyendo ambientales, climáticas y socioeconómicas, para diferentes puntos y a escalas temporales diferentes. Esto abre un abanico de posibilidades para el análisis espacial y la investigación en diversas áreas. De igual forma permiten el Acceso a datos de GEE, puesto que facilitan el acceso a la plataforma Google Earth Engine (GEE), una poderosa herramienta que alberga una vasta colección de datos satelitales de alta resolución. Esto permite a los investigadores aprovechar el potencial de GEE, para realizar análisis complejos y obtener información valiosa para sus estudios.

Los códigos diseñados, permiten realizar análisis estadístico simultáneo de información obtenida de diferentes variables satelitales. Esto facilita la identificación de relaciones y patrones entre las variables.

Es importante destacar que los códigos desarrollados en este estudio se entregan como insumo para diferentes usuarios, con el objetivo de fomentar la colaboración y el intercambio de conocimiento en la comunidad científica. Se espera que estos códigos sean utilizados por investigadores, estudiantes y profesionales en diversos campos para realizar análisis espaciales complejos y generar información relevante para la toma de decisiones y la gestión de recursos en diferentes ámbitos.

Los códigos desarrollados en este estudio representan una herramienta valiosa para el análisis espacial y la investigación, abriendo nuevas posibilidades para la comprensión de fenómenos complejos y la generación de conocimiento científico relevante para el desarrollo sostenible.

La integración de datos locales se desarrolló a partir de métodos estadísticos de interpolaciones punto a punto, las cuales permitieron verificación de precisión de datos, y visualización de puntos atípicos en la subida, cargue y montaje de datos establecidos por el IDEAM, es importante tener en cuenta que al ser un proceso manual cuenta con un error humano al momento de cargue de los datos, el hacer uso de este tipo de interpolaciones permite mejorar la precisión de el uso de los datos.

La comparación estadística de los datos que generan los programas satelitales CHIRPS Daily, ERA5 Daily Aggregates e IDEAM arrojó diferentes análisis con respecto a cada una de las variables trabajadas, para Precipitación, CHIRPS Daily presenta un buen desempeño en la estimación de la precipitación, con un MAE bajo y un BIAS relativamente pequeño en comparación con los datos locales de IDEAM.

ERA5 Daily Aggregates, aunque presenta un MAE ligeramente mayor que CHIRPS Daily, también ofrece una estimación precisa de la precipitación, especialmente en zonas con menor complejidad topográfica.

La integración de datos satelitales con información local de estaciones meteorológicas es crucial para mejorar la precisión de la estimación de la precipitación.

En la variable Temperatura, ERA5 Daily Aggregates presenta un buen desempeño en la estimación de la temperatura, con un MAE bajo y un BIAS relativamente pequeño en comparación con los datos locales de IDEAM, la identificación de zonas con menor MAE, como

las representadas en la gama de verdes y amarillo, permite optimizar el uso de datos satelitales ERA 5 para la estimación de la temperatura.

En general, la evaluación estadística de los datos satelitales CHIRPS Daily, ERA5 Daily Aggregates e IDEAM ha demostrado su potencial para la estimación precisa de variables climáticas como la precipitación y la temperatura. La integración de estos datos con información local y el desarrollo de metodologías de ajuste y análisis avanzadas permitirán mejorar aún más la precisión y confiabilidad de la información climática para diversos fines.

Respecto a análisis de estudios como “Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela”, el cual es un artículo elaborado por (Franklin Javier Paredes Trejo, 2016), Este estudio evalúa el producto satelital CHIRPS v.2, comparándolo con datos medidos entre 1981-2007. Se analizan las fortalezas y debilidades de CHIRPS v.2 en diferentes categorías de lluvia, estaciones y regiones, obteniendo como resultados que CHIRPS v.2 tiende a sobreestimar la lluvia baja y subestimar la lluvia alta. Concluyendo que en general, el rendimiento de CHIRPS v.2 es bueno, con mejor desempeño en la temporada de lluvias (abril-septiembre). CHIRPS v.2 funciona mejor en regiones planas y abiertas como Los Llanos, resaltando que es totalmente concordante con el estudio de la presente investigación, es de resaltar que los datos de CHIRPS solo son exactos en áreas específicas debido a las variaciones topográficas funcionando mejor en zonas planas que en topografías variadas como Boyacá, por otro lado ERA 5 mostro un comportamiento concordante con información local es por esta razón que es posible su uso en gran parte del territorio del área de estudio.

9. Recomendaciones

Fortalecer la red de estaciones meteorológicas dando continuidad a la instalación y mantenimiento de estas, especialmente en zonas con menor densidad de estaciones o con mayor complejidad topográfica, es necesario tener en cuenta que en los mantenimientos preventivos se cuente con un proceso de calibración óptimo para garantizar la calidad de los datos obtenidos localmente.

Implementar y evaluar diferentes metodologías para ajustar los datos satelitales CHIRPS Daily y ERA5 Daily Aggregates, reduciendo el sesgo y mejorando la precisión en la estimación de variables climáticas, Es importante realizar una evaluación crítica de la precisión de los datos satelitales descargados a través de los códigos desarrollados. Esto podría implicar comparar los datos con otras fuentes de información confiables o realizar análisis de validación espacial.

Fomentar la integración de datos satelitales con información local, para obtener una visión más completa y precisa de la distribución espacial y temporal de variables climáticas como la precipitación y la temperatura.

Es importante evaluar cuidadosamente la calidad y confiabilidad de los datos de entrada para garantizar la precisión de los resultados.

Tener en cuenta la integración de técnicas geoestadísticas con modelos climáticos y de recursos hídricos puede contribuir a una mejor comprensión de la variabilidad espacial y temporal de variables climáticas y su impacto en diversos sectores.

Se recomienda aplicar los códigos desarrollados a casos de estudio específicos para demostrar su utilidad y potencial en la práctica. Esto podría involucrar la selección de áreas de estudio relevantes y la realización de análisis espaciales detallados utilizando las variables satelitales descargadas y las herramientas estadísticas implementadas.

Se sugiere explorar el potencial de los códigos para el análisis de series temporales de datos satelitales. Esto podría permitir a los investigadores identificar tendencias y patrones a lo largo del tiempo, proporcionando información valiosa para la comprensión de fenómenos dinámicos.

Se recomienda crear una guía de usuario completa y detallada que explique paso a paso el uso de los códigos desarrollados. Esto facilitaría la adopción de los códigos por parte de otros investigadores y usuarios.

Se sugiere promover activamente la difusión de los códigos desarrollados y los resultados de la investigación a través de publicaciones científicas, presentaciones en conferencias y participación en comunidades en línea. Esto contribuiría al intercambio de conocimiento y al avance del campo de la investigación espacial.

Se recomienda evaluar la escalabilidad de los códigos desarrollados para manejar grandes conjuntos de datos y áreas de estudio extensas. Esto permitiría su aplicación a estudios de mayor envergadura y alcance.

10. Referencias

- Alexander Martinez Pedraza, J. S. (2018). *Validación de las estimaciones de precipitación con CHIRPS e IRE/IDEAM*. IDEAM.
- BEIO. (2022). Una introducción a la estadística espacial. *SEIO*. Obtenido de Una introducción a la estadística espacial.
- Bonilla, M. J. (SF). *INSTITUTO ESPACIAL DE TECNICA AEROESPACIAL*. Obtenido de CENTRO ESPACIAL INTA TORREJÓN:
<https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2020-21/SATELITES.pdf>
- Bonilla, M. J. (SF). *INSTITUTO ESPACIAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL*. En M. J. Bonilla, *Los satélites y su utilidad en nuestro día*. Obtenido de *INSTITUTO ESPACIAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL*.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (s.f.). *Earth Engine Data Catalog*. Obtenido de Google Earth Engine: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY
- Franklin J. Paredes-Trejo, H. B. (2017). Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Elsevier journal of arid environments*.
- Franklin Javier Paredes Trejo, H. A.-M. (2016). Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Scielo*.
- Funk, C. P. (2015.). *Google Earth Engine*. Obtenido de Earth Engine Catalog: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY#citations

- Gabriel Alejandro Perilla, J.-F. M. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Instituto de Geografía UNAM*.
- Getachew Tesfaye Ayehu, T. T. (2018). Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Atmospheric Measurement Techniques*.
- Guzmán, D. R. (2014). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes. *Doscity*.
- Hanqing Chen, B. Y.-E. (2021). Global component analysis of errors in three satellite-only global precipitation estimates. *European Geosciences Union*.
- Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *GUIA METODOLÓGICA DE LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA VARIABLES METEOROLÓGICAS*.
- James Cashion, V. L. (2005). Microwave remote sensing of soil moisture: evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia. *ScienceDirect*.
- Koray K. Yilmaz, T. S.-I. (2005). Intercomparison of Rain Gauge, Radar, and Satellite-Based Precipitation Estimates with Emphasis on Hydrologic Forecasting. *American Meteorological Society*.
- Le, H., Sutton, J., Bui, D., & Bolten, J. (2018). Comparison and Bias Correction of TMPA Precipitation Products over the Lower Part of Red–Thai Binh River Basin of Vietnam. *Remote Sensing*.

-
- Mauricio Zambrano-Bigiarini, A. N. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *European Geosciences Union*.
- Servicio de Cambio Climático de Copérnico. (2024). *ECMWF*. Obtenido de <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
- Su, F. H. (2008). Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Scopus*.
- Tufa Dinku, C. F. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over easternAfrica. *Quartely journal of the royal meteorological society*.
- University of California, S. B. (2024). *Climate Hazards Center*. Obtenido de <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Verdin, A., Funk, C., Rajagopalan, B., & Kleiber, W. (2016). Kriging and Local Polynomial Methods for Blending Satellite-Derived and Gauge Precipitation Estimates to Support Hydrologic Early Warning Systems. *IEEE EXPLORE*.
- Viviana Maggioni, M. R. (2016). Estimating Uncertainties in High-Resolution Satellite Precipitation Products: Systematic or Random Error? *ResearchGate*.
- Zhe Li, D. Y. (2013). Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *ELSEIVER*.
- Zhehui Shen, B. Y. (2022). From TRMM to GPM, how do improvements of post/near-real-time satellite precipitation estimates manifest? *ScienceDirect*.

