

Análisis de las precipitaciones en Colombia, pronóstico y
tendencias

Trabajo de grado presentado para obtener
El título de Ingeniera Civil
Universidad Antonio Nariño

Tatiana María Gallo Centeno
Mayo 2021

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil

Análisis de las precipitaciones en Colombia, pronóstico y tendencias

Tatiana María Gallo Centeno
Mayo 2021

Director: Ing. Alexandra Morales

Asesores:

Dr. Juan Pablo Rodríguez Rincón

Ing. Raúl Echeverry E.

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil

Copyright © 2021 por Tatiana María Gallo Centeno

Todos los derechos reservados

Nota de aceptación:

Ing. Alexandra Morales

Dr. Juan Pablo Rodriguez Rincón

Ing. Raúl Echeverry E.

Firma del jurado

Tabla de Contenido

1. Resumen.....	8
2. Abstract.....	9
3. Introducción.....	10
4. Objetivos.....	12
5. Marco teórico.....	13
5.1 Cambio Climático.....	14
5.2 Fenómeno del Niño y la Niña.....	14
5.3 Escenarios del cambio climático.....	15
5.3.1 Proyecciones del cambio climático.....	16
5.3.2 Modelos de circulación general (GCM) (ejemplo Community Climate System Model, version 4 (CCSM4) and Max Planck Institute for Meteorology Paleoclimate Model (MPI-ESM-P)).....	17
5.3.3 Modelos numéricos para el estudio del clima (incluye downscaling).....	18
5.3.4 Métodos dinámicos.....	18
5.3.5 Métodos estadísticos.....	19
6. Estado del arte.....	19
6.1 Desarrollo de la idea del cambio climático y su interacción con los estados en Colombia.....	19
6.2 Investigaciones de cambio climático (IPCC).....	21
6.3 Investigaciones del cambio en Colombia (principalmente IDEAM).....	23
7. Datos y procesamiento.....	23
8. Análisis de Tendencias.....	26
9. Análisis de las precipitaciones máximas.....	28
10. resultados.....	29
10.1 Cálculos de los períodos de retorno.....	29
.....	31
10.2 Análisis de las estaciones del IDEAM.....	32
.....	34
.....	34
.....	34
.....	35
.....	35
.....	35
.....	35
10.2.1 Análisis de la varianza.....	36
10.2.2 Análisis de los valores máximos de precipitación.....	36
10.2.3 Análisis del percentil 75.....	37
10.3 Análisis por medio de gráficos de las 16 estaciones en estudio.....	38
10.3.1 Estación 11045010.....	38
10.3.2 Estación 14015010.....	39
10.3.3 Estación 15015050.....	40
10.3.4 Estación 17015010.....	41
10.3.5 Estación 17025020.....	42

10.3.6 Estación 21115020.....	435
10.3.7 Estación 23155030.....	44
10.3.8 Estación 24025020.....	45
10.3.9 Estación 26035030.....	46
10.3.10 Estación 26075050.....	47
.....	47
10.3.11 Estación 26135040.....	48
10.3.12 Estación 34015010.....	49
10.3.13 Estación 37015010.....	50
.....	50
10.3.14 Estación 34035020.....	51
.....	51
10.3.15 Estación 52045010.....	52
10.3.16 Estación 52045020.....	53
11. Conclusiones	54
12. Recomendaciones	56
Referencias Bibliográficas	57

Tabla de figuras

Figura 1. Comparación de las condiciones del fenómeno del niño y la niña.....	15
Figura 2. Ubicación de los nevados en Colombia.....	20
Figura 3. Evolución de la superficie glaciaria en Colombia de 1960 a 2019	21
Figura 4. Estaciones de precipitación en Colombia.....	25
Figura 5. Gráfica de los valores máximos de las estaciones del IDEAM.....	26
Figura 6. Ubicación de las estaciones pluviométricas en estudio	27
Figura 7. Mapa interpolación de varianzas.....	33
Figura 8. Mapa interpolación de Máximos	34
Figura 9. Mapa interpolación de P75	35
Figura 10. Gráfica de la proyección de la estación 11045010.....	38
Figura 11. Gráfica de la proyección de la estación 14015010.....	39
Figura 12. Gráfica de la proyección de la estación 15015050.....	40
Figura 13. Gráfica de la proyección de la estación 17015010.....	41
Figura 14. Gráfica de la proyección de la estación 17015020.....	42
Figura 15. Gráfica de la proyección de la estación 2115020.....	43
Figura 16. Gráfica de la proyección de la estación 23155030.....	44
Figura 17. Gráfica de la proyección de la estación 24025020.....	45
Figura 18. Gráfica de la proyección de la estación 26035030.....	46
Figura 19. Gráfica de la proyección de la estación 26075050.....	47
Figura 20. Gráfica de la proyección de la estación 26135040.....	48
Figura 21. Gráfica de la proyección de la estación 34015010.....	49
Figura 22. Gráfica de la proyección de la estación 37015010.....	50
Figura 23. Gráfica de la proyección de la estación 44035020.....	51
Figura 24. Gráfica de la proyección de la estación 52045010.....	52
Figura 25. Gráfica de la proyección de la estación 52045020.....	53

Tablas de datos

Tabla 1. Periodo de retorno (2).....	29
Tabla 2. Período de retorno (5).....	29
Tabla 3. Periodos de retorno (20)	30
Tabla 4. Períodos de retorno (50)	30
Tabla 5. Períodos de retorno (100)	31
Tabla 6. Periodos de retorno (500)	31

1. Resumen

El objetivo de este documento es construir modelos de reducción a escala mediante la regresión de componentes principales y así poder realizar una simulación de la precipitación en Colombia durante un período de 1981 – 2011 y la realización de proyecciones climáticas en un período comprendido entre 2011 – 2070, con la aplicación de la escala estadística SD anterior. Los datos analizados de 16 estaciones de las 274 del sistema nacional que pertenece al IDEAM y de las cuales se obtuvo la información necesaria para la ejecución de este documento, debido a que las estaciones restantes después de realizarse un análisis por vías y correlación y no se encontró esta característica para dicho análisis; los datos del IDEAM que se trabajaron en este proyecto, fueron recopilados por el grupo GRESIA de la universidad Antonio Nariño. Para las estaciones que no se pudieron analizar por falta de datos homogéneos se realizó una interpolación en SIG del máximo de la varianza, P75, máximo de los datos que arrojaron, también se analizaron los comportamientos de las precipitaciones con modelación numérica alimentada por los escenarios RCP 4.5 y 8.5, MPI_ESM_RCP85 y MPI_ESM_RCP45 del cambio climático, además de ordenar estos datos para obtener las estaciones representativas del estudio y posteriormente analizar los máximos, media, de los días precipitables, en las demás estaciones del sistema no se encontraron datos suficientes por lo cual no había consistencia y homogeneidad en ellos. Después realizar el análisis probabilístico y determinar los periodos de retorno Tr (2,5,20,50,100,500) de estaciones corregidas; teniendo estos datos se realizará la comparación de los períodos 1981-2005 y 2005 - 2070, se realizó una gráfica de cada una de las 16 estaciones analizadas para determinar si sobrepasaban los períodos de retorno Tr 50 y Tr 100; todo esto para concluir cómo será el escenario climático en promedio en cuanto a precipitaciones en Colombia.

The objective of this document is to build downscaling models through the regression of principal components and thus be able to carry out a simulation of precipitation in Colombia during a period from 1981 - 2011 and to carry out climate projections in a period between 2011 - 2070. , with the application of the previous SD statistical scale. The data analyzed from 16 stations of the 274 of the national system that belongs to IDEAM and from which the necessary information was obtained for the execution of this document, due to the fact that the remaining stations after performing an analysis by lanes and correlation and this characteristic was not found for said analysis the IDEAM data that was worked on in this project, were compiled by the GRESIA group of Antonio Nariño University. For the stations that could not be analyzed due to lack of homogeneous data, an interpolation in GIS of the maximum of the variance, P75, maximum of the data that they gave, was also analyzed the behavior of the precipitations with numerical modeling fed by the RCP scenarios. 4.5 and 8.5, MPI_ESM_RCP85 and MPI_ESM_RCP45 of climate change, in addition to ordering these data to obtain the representative stations of the study and subsequently analyzing the maximums, mean, of the rainy days, in the other stations of the system insufficient data were not found, therefore there was no consistency and homogeneity in them. Then carry out the probabilistic analysis and determine the return periods Tr (2,5,20,50,100,500)) of corrected stations; Taking these data, the comparison of the periods 1981-2005 and 2005 -2070 will be made, a graph of each of the 16 stations analyzed was made to determine if they exceeded the return periods Tr 50 and Tr 100, all this to conclude how it will be the average climate scenario in terms of rainfall in Colombia.

3. Introducción

Cada vez observamos, como el clima varía provocando cambios en la naturaleza que se ven reflejados en los animales y su comportamiento, también el mar con sus inesperados cambios de nivel; los estudios que se han venido realizando nos dejan una alerta de los cambios que se vienen produciendo en la temperatura y las precipitaciones; uno de los retos de la humanidad es asumir y enfrentar las consecuencias del impacto que se generará a futuro consecuencia del cambio climático, las características de relieve que se presentan en Colombia pueden llegar a diferir un poco más de los estudios globales; lo anterior nos deja entrever que las condiciones climáticas que se presentan en la actualidad en nuestro país vienen de la mano con el cambio climático reflejado en los diferentes fenómenos que vienen ocurriendo(Pabón.J.D. Junio 2012) .

Para que las condiciones climáticas no produzcan más daños en la naturaleza, el hombre ha optado por desarrollar cada día, más acciones que mitiguen en algún modo las consecuencias que estos cambios conllevan, además de realizar trabajo directo con las comunidades y concientizarlas de dichos cambios y buscando además un proceso de adaptación lo que permitiría en casos extremos la reacción oportuna ante este tipo de situaciones (Pabón.J.D. junio 2012). Los cambios climáticos se ven reflejados en los deshielos que se presentan actualmente en las estructuras del relieve que se encuentran en nuestro país, de las 8 existentes ya habían perdido entre 1 y 2 Mts de espesor al año; además del incremento del nivel medio del mar (Flórez, 1992b); la finalidad de este documento es realizar una proyección que determine como se comportará el clima por medio de un sistema climático escalado (WRF), con datos obtenidos de las estaciones climáticas pertenecientes al sistema meteorológico nacional durante el periodo de 1950 - 2010 se han construido modelos de reducción de escala estadística para realizar una simulación de la

precipitación en Colombia; así mismo proyectarlos hacia el 2070 además tener una compilación de las temperaturas medias anuales y las precipitaciones máximas mensuales en Colombia.

4. Objetivos

- Analizar el comportamiento de las precipitaciones con modelación numérica alimentada con los escenarios RCP 4.5 y 8.5, , MPI_ESM_RCP85 y MPI_ESM_RCP45 del cambio climático.
- Análisis de datos de precipitación, media, máxima, varianza, P25, P75 de todas las estaciones del IDEAM, de los días precipitables, para la verificación de la homogeneidad de los datos.
- Análisis probabilístico (Tr. (2,5,20,50,100,500)) de las 16 estaciones corregidas.
- Análisis de estaciones no homogéneas e interpolación de varianza, P75, máximos.
- Comparación con datos modelo de las 16 estaciones. 1981-2005 y 2005 -2070.

5. Marco teórico

Colombia es un país que se ubica al noreste de América del Sur y hace parte del cinturón de fuego del Pacífico, por su ubicación la rodean dos océanos, al norte el océano Atlántico y al oeste con el océano Pacífico, se encuentra dividido en cinco regiones naturales: Andina, Pacífica, Orinoquia, Amazonia y Caribe, la posición en zona tropical hace que el país sea privilegiado con la mayor parte de la energía que el sol transmite a la tierra (IDEAM, s. f.); morfoestructuralmente Colombia se ubica entre un espacio de placas tectónicas lo que finalmente logró definir el relieve que se ha venido formando con los años, modelando así el levantamiento de las cordilleras, serranías, mesetas, llanuras, que definen por su altitud el clima y la temperatura de cada región donde se encuentran ubicados estos sistemas, convirtiéndose en un factor determinante, la incidencia del clima depende no solo de la altura sino que además, depende de los vientos y la latitud; estos sistemas montañosos que se han venido formando son los que nos determinan el clima en Colombia y ha dividido además al país en pisos térmicos: Cálido (altura inferior a 1.000 Mts sobre el nivel del mar), Templado (altura entre 1.000 y 2.000 Mts sobre el nivel del mar), Frío (altura de 2.000 a 3.000 Mts sobre el nivel del mar), Páramo (altura de más de 3.000 Mts sobre el nivel del mar), por estos factores mencionados se puede determinar que en Colombia existen zonas húmedas y desérticas y de ahí que se convierta en factor que determina la formación de los suelos, las precipitaciones influyen también en los cambios del clima, se ven determinadas por la línea ecuatorial, la cual en estudios anteriores se ubica en la zona occidental del país (donde se encuentran los departamentos de Chocó, Valle del Cauca y Nariño) que son las zonas en las que mayormente presentan precipitaciones (*CLIMA EN COLOMBIA - Colombiamania.com*, 2017).

5.1 Cambio Climático

No hay país en el mundo que no haya experimentado dramáticamente los cambios climáticos, Colombia es uno de los países que por su ubicación geográfica representa mayor riesgo de eventos catastróficos a consecuencia del clima y las precipitaciones, el cambio climático se ha convertido en uno de los fenómenos que más afecta al planeta y en Colombia lo vemos reflejado en el deshielo de los nevados, la tala de árboles, la pérdida de playas, la erosión costera, falta de control en la emisión gases efecto invernadero (GEI) que de acuerdo con el IDEAM no permite que salgan e ingresen los rayos del sol de manera natural y esto trae como consecuencia que las temperaturas sean más elevadas (CAMBIO CLIMÁTICO AFECTA A COLOMBIA, 2017); el hombre siempre ha tratado de realizar estudios que permitan prever los fenómenos que se presentan con el cambio climático y el gobierno de Colombia cada vez se compromete más a ejecutar acciones que contribuyan al avance de este objetivo de desarrollo sostenible, recuperando aunque sea en parte los recursos que los hombres le han robado al planeta; se espera que para el año 2022 todos los departamentos que conforman el territorio Colombiano hayan implementado proyectos de adaptación al cambio climático y que estos hayan sido orientados por las autoridades ambientales, para lo cual la proyección a 2030 es que en Colombia la emisión de gases efecto invernadero se reduzca al menos al 20% (DPN (Departamento de Planeación Nacional), 2019).

5.2 Fenómeno del Niño y la Niña

A raíz de los cambios que se generan con el clima surgen dos fenómenos ENSO ó ENOS (siglas en inglés) patrón climático de los fenómenos climatológicos del pacífico ecuatorial originando dos eventos adversos entre sí, el niño y la niña; estos dos eventos están asociados a las anomalías que

se presentan en el trópico de la región sudamericana por el aumento o disminución anormal de la temperatura superficial del mar, el niño se caracteriza por períodos largos de sequía los cuales se inician con el calentamiento del océano Pacífico en las costas de Perú como se observa en la figura 1, por el contrario el fenómeno de la niña se caracteriza por períodos de inundaciones y aumento de las precipitaciones de manera prolongada además del aumento de las temperaturas por lo menos por un periodo de seis meses como se observa en la figura 1, este fenómeno ocurre cada 2 ó 7 años



Figura 1. Comparación de las condiciones del fenómeno del niño y la niña

Fuente: (Meteorología, 1996).

5.3 Escenarios del cambio climático

Los escenarios se convierten en una herramienta que permite prevenir anticipadamente qué ocurrirá si se presentan los eventos a futuro; estos se basan en una proyección del comportamiento del cambio climático y es la forma de determinar una información estadística que se aproxime a los comportamientos climáticos y sus variables (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2015), los datos son derivados generalmente de una muestra global tomados bajo distintos

procedimientos, el fenómeno del cambio climático es cada vez más una realidad, si revisamos¹⁶ estudios con proyecciones de la temperatura, se prevé que en 2100 la temperatura en el planeta estaría por encima de 1.93°C y el nivel del mar aumentaría entre 18 y 60 cms, estableciendo como regiones más vulnerables los Llanos Orientales y la región Caribe, esto indica que los cambios podrían presentarse en sequías, cambios en los ciclos de precipitaciones, aumento del calor, grandes olas y aumento del nivel del mar (Sostenibilidad Semana, 2015). Contextualizando podríamos concluir que un escenario de cambio climático es lo que se observará con la medición de la concentración de los aerosoles y los gases efecto invernadero a futuro, el principal objetivo es la evaluación de las proyecciones que existen del posible o posibles comportamientos del clima y así introducir acciones correctivas y preventivas (Ruiz Murcia, 15-03); el objetivo de los escenarios de cambio climático es la evaluación de los cambios que se puedan presentar en el clima y proyectarse a la toma de decisiones que contribuyan con el análisis y la anticipación de eventos futuros, la mejor referencia que se puede tomar de datos recopilados en el país se encuentran entre 1976 y 2005 que es un período de tiempo en donde se pudo recopilar una amplia cantidad de datos por el IDEAM (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2015).

5.3.1 Proyecciones del cambio climático

Conocer con anterioridad los efectos que el cambio climático presenta en un futuro para un país o sus regiones, reviste una gran importancia ya que muchas actividades sobre todo la más vulnerables, no se verían afectadas con el cambio climático, con la información recopilada a través de los modelos a nivel global se puede generar esta información que tanto necesitamos y que nos permitirá crear escenarios de prevención y mitigación de este (Oviedo Torres, 2010).

Colombia a nivel mundial se encuentra catalogado como un país con poco desarrollo en el sector de la industria lo que permite a su vez que no produzca la suficiente cantidad de gas efecto

invernadero, quienes mayormente aportan al deterioro de la atmósfera; cada sector que¹⁷ representa la economía, la salud, vías e infraestructura, deberán adaptarse al clima futuro el cual influye de forma significativa en cada caso al acceso de los recursos naturales y renovables, debemos pensar en ir evaluando entornos más resilientes que nos aseguren que tendremos siempre los mismos bienestar a futuro (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2015); según (Rodríguez, et al.2010) indica que la zona Andina Colombiana puede presentar el mayor deterioro y ser la más afectada. Se ha venido generando escenarios regionales de emisiones a través del IPCC a partir del año 2006 por parte del IDEAM y la Universidad Nacional de Colombia; en 2007 utilizando el programa AOGCM (modelo acoplado a nivel global océano - atmósfera) con una resolución de 20 x 20 Kms se verificó y corrigió resultados de modelos globales con respecto a nuestro país (Oviedo Torres, 2010).

5.3.2 Modelos de circulación general (GCM) (ejemplo Community Climate System Model, version 4 (CCSM4) and Max Planck Institute for Meteorology Paleoclimate Model (MPI-ESM-P))

Estos modelos climáticos globales se utilizan para el análisis de tendencias relacionadas con la temperatura y las precipitaciones el CCSM4 y el MPI-ESM-LR, son modelos WRF (Weather Research & Forecasting) (García-Valdecasas, 2018) se usan para realizar análisis comparativos para saber si las demandas que se proyectarán serán las correctas no solo los datos proyectados sino también los pasados y presentes. Además estos modelos presentan unos resultados que se aproximan mucho con la realidad en cuanto lo que se refiere a variables de temperatura y presión del nivel del mar, en cuanto a las precipitaciones en sus casos más extremos no suelen ser tan exactos (Oviedo Torres, 2010); en este proyecto se analizarán las temperaturas y las precipitaciones con datos disponibles en las estaciones del sistema meteorológico de Colombia,

para compararlas con los datos anteriormente tomados por estas estaciones desde 1972 a 2011¹⁸ y se proyectarán a 2070 alimentada mediante escenarios RCP 4.5 y 8,5, este análisis proyectará las temperaturas máximas y medias, precipitaciones máximas y medias .

Glosario:

GMC: Variables grados, mes, calor.

CCSM4: The Community Climate System Model - Modelo climático para realizar simulaciones de los sistemas climáticos del planeta.

MPI: Max Planck Institute - modelo climático regional que ofrece información a 50 y 25 Km.

ESM - LR: Earth, Science and technology - Sirve para determinar los principales flujos de carbono entre la atmósfera, el océano y los reservorios terrestres.

5.3.3 Modelos numéricos para el estudio del clima (incluye downscaling)

Para el manejo de las proyecciones de los datos tomados a nivel global que provienen de los modelos MAGCA y las técnicas de escala de ajuste estadístico y dinámico, al estimar las condiciones atmosféricas y climáticas superficiales nos están entregando información similar, estos resultados deben estar con un soporte de un modelo conceptual físico; estos son los métodos:

5.3.4 Métodos dinámicos

Se usa para obtener información sobre el cambio climático y sus fenómenos a partir de datos suministrados por el MACGA (que son datos de baja resolución), este modelo dinámico tiene una resolución entre 150 a 300 Km, teniendo en cuenta que otros modelos requieren una información de 50 km en escala; este modelo se usa en una escala con límites de alta definición. Este método requiere de suficientes conocimientos en el tema de la climatología (Amador, 09-02-17).

Este Método se usa cuando se requiere evaluar un escenario climático local de manera rápida y permite un análisis riesgo/incertidumbre que ha arrojado resultados confiables; las debilidades de éste método radican en:

- El tamaño del dominio escogido y su ubicación afectan los resultados.
- Requiere de muy buenos datos para buenos resultados del modelo.
- Se presentan inconvenientes en la variabilidad climática, cuando se usan series de tiempo cortas.

Glosario: MACGA: modelo general de circulación atmosférico (siglas en inglés).

6. Estado del arte

6.1 Desarrollo de la idea del cambio climático y su interacción con los estados en Colombia

El cambio climático va afectando cada día más ecosistemas que se encuentran en áreas protegidas como páramos, humedales, los cuales se ven afectados con la variabilidad del clima y las precipitaciones, no sin dejar de lado que la expansión demográfica ayuda a agudizar las diferentes situaciones en los ecosistemas. Para verificar las afectaciones que se han presentado en el país, es necesario realizar un comparativo de todos los fenómenos que se presentaron en el pasado y los que se presentan actualmente, para así analizar las evidencias de los estudios realizados y poder lograr hacer una proyección a futuro; podemos mencionar que entre 1940 y 1985 desaparecieron del territorio Colombiano varios glaciares y en la actualidad solo quedan 4 sistemas de nevados sobre estructuras volcánicas, evidenciándose la pérdida de espesor de estos, cada año se pierden entre el 3% y el 5% de los glaciares del país y se han perdido 37.17 Kms² anualmente de éstos, las causas principalmente son el calentamiento global de la atmósfera del planeta, el aumento de las temperaturas, mayor exposición de la radiación; de los sistemas afectados el más grande es la

Sierra Nevada del Cocuy el cual según información recopilada pierde al año 3%, su cercanía²⁰ con la región Orinoquia le favorece ya que esta le entrega mucha humedad. Los nevados del Ruiz y el del Huila, como consecuencia de los cambios presentados se han reactivado y a su vez el calentamiento se ha acelerado, lo que ha ayudado al proceso de deshielo. Del lado de la Sierra Nevada de Santa Marta, catalogado como reserva de la biosfera por la UNESCO 1979, solo cuenta con 6.7 Km de nieve y de modo fraccionado, hace medio siglo atrás la Sierra contaba con 83 Kms de extensión y podríamos decir con estas cifras que se ha perdido el 92% de la nieve (Alarcón, 2017). En la figura 2 podemos observar la ubicación de cada uno de los nevados existentes en Colombia.

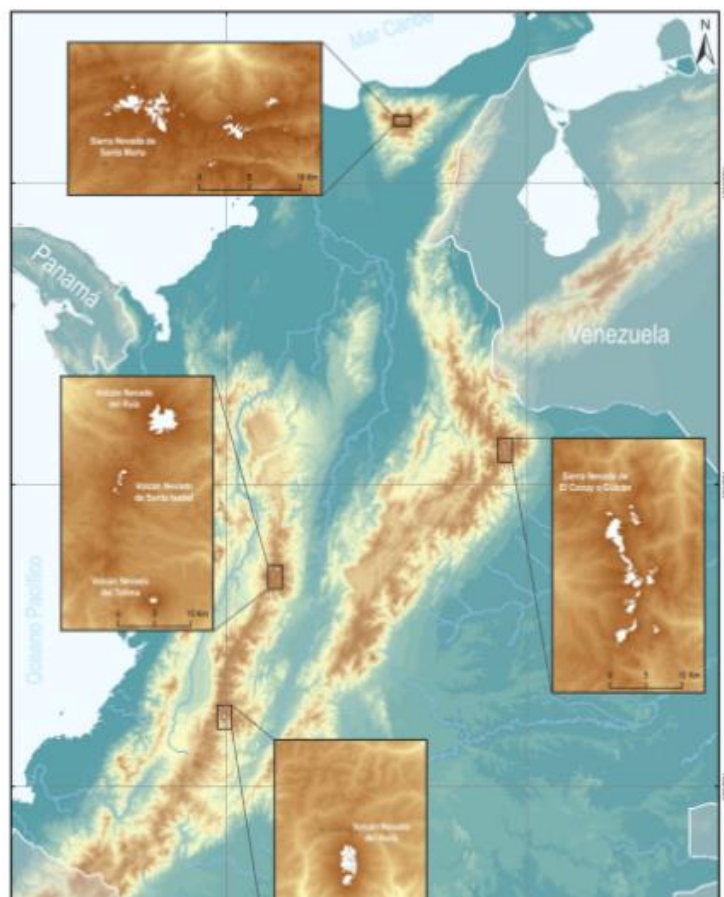


Figura 2. Ubicación de los nevados en Colombia

Recuperado:(IDEAM, 2019)

A continuación, en la figura 3 se puede observar cómo han evolucionado estadísticamente las áreas de los glaciares en estudios realizados por el IDEAM, incluso los que ya no cuentan con las nieves perpetuas (IDEAM, 2019).

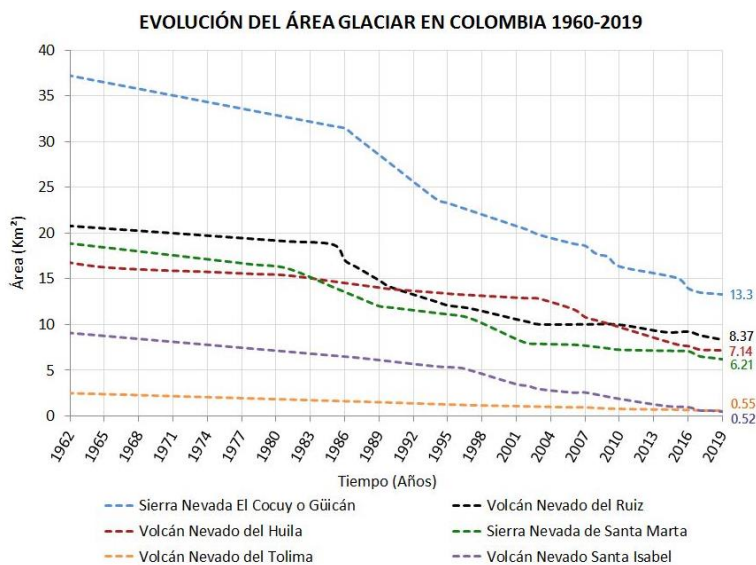


Figura 3. Evolución de la superficie glaciaria en Colombia de 1960 a 2019

Recuperado: (IDEAM, 2019)

6.2 Investigaciones de cambio climático (IPCC)

Desde hace millones de años la tierra en general, ha venido experimentando cambios significativos y en especial el incremento de la temperatura media global ya que hoy día es más caliente, la tierra lo ha experimentado aún más en los últimos 10 años, llegando a la conclusión más triste que ha sido el hombre quien más ha aportado para que este fenómeno se dé con mayor intensidad, sumadas a las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), la comisión del IPCC (Intergovernmental panel on climate change) ha determinado que estas concentraciones han tenido

un aumento significativo de 35% y continúa en ascenso, por la quema de combustibles y la mala²² utilización de los suelos; entre las tendencias que se presentan en los estudios realizados se puede decir que cada día a nivel global, aumentan las concentraciones de los gases efecto invernadero podemos concluir entonces:

- Aumento de la temperatura con más rapidez incluso que en los últimos 10 años. determinando un promedio de 1.1 a 6.4°C.
- Aumento de las precipitaciones a causa del incremento del vapor de agua en un 1.2% pero muy sectorizadas a nivel mundial se prevé que México es una de las Ciudades donde se presentarán más intensamente.
- El deshielo de los glaciares de los cuales ya se ha evidenciado en más de la mitad del país y se prevé que de seguir esta tendencia en aumento aproximadamente para el 2040 dejarían de existir.
- A raíz de los deshielos que se presentan en el Ártico, se presentaría un aumento considerable en los niveles del mar, además de la precipitación pluvial y el aumento de la expansión térmica, además de poner en riesgo todos los ecosistemas asociados y la vegetación la cual también podría desaparecer.
- Aparición de desastres como huracanes, sequías y ondas de calor prolongadas, tornados intensos, heladas y frentes fríos (Santiago Lastra, 2008, p. 627).

El objetivo de los juicios emitidos son resultados de los estudios y es proporcionar la información correspondiente a los responsables de la ejecución de los planes de mitigación y prevención de cada país, revisando siempre sus procedimientos metodológicos (Jebeile, 2020, p. 454).

6.3 Investigaciones del cambio en Colombia (principalmente IDEAM)

Una de las funciones del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales) es hacer un seguimiento y recopilación a los datos de temperatura y precipitación que emiten las estaciones instaladas a lo largo del país, datos que hoy día permiten que se puedan realizar los estudios con los cuales se puede analizar el pasado para realizar proyecciones que nos sirvan para el futuro, Colombia emite estos informes directamente a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático a estos informes se les llama Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático, el IDEAM emite estos informes de forma detallada a nivel departamental (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2015); en los más recientes estudios donde se hacen visibles las proyecciones de los periodos comprendidos entre 1961 y 1990 con respecto a 2070 y 2100, se determina que el crecimiento económico y la sostenibilidad (escenarios A1 y B2) del IPCC indica que se presentará una variabilidad en la temperatura de 1° a 4°C lo que corresponde a un porcentaje de entre 15% - 30%; en estudio se realizó mediante el modelo PRECIS utilizando una resolución de 25 X 25 Kms; determinando las zonas con mayor vulnerabilidad que son: Zonas de costa, ecosistemas de alta montaña e hídricos; además de esto se ven afectados los sectores de la salud, energéticos y agropecuario (IDEAM, 2019a).

7. Datos y procesamiento

Para el procesamiento de datos se realizó una búsqueda en el IDEAM los datos emitidos por las 274 estaciones que conforman el sistema nacional, estas estaciones tienen información en promedio desde 1970 a 2019; se realizó una revisión de los datos y se identificaron las estaciones que tenían información significativa, lo cual permitiría encontrar el equilibrio del sesgo y la varianza, al finalizar este análisis solamente 16 de las 274 estaciones permitirían la realización del

análisis para las precipitaciones, ya que las demás estaciones a pesar de estar en funcionamiento no tenían la información suficiente para la realización de este análisis. Para el cálculo de las proyecciones futuras, con la construcción de modelos CCSM4 (Community Climate System Model en Versión 4) y el modelo (MMPI - ESM - P) Max Planck Institute for meteorology Paleoclimate Model, se realizó una proyección para los años 2011 a 2070.

Por lo general todos los modelos climáticos proporcionan algunas representaciones sesgadas de las series del tiempo lo que obligatoriamente conlleva a la corrección de los procedimientos; para la precipitación diaria simulada y el sesgo estadístico a los datos proyectados en dos modelos climáticos (CCSM4 y MPI-ESM) para escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCP45 y RCP 85) para los años de 2011 a 2070. Estos resultados nos dejan claro que la corrección que se realizó mejora la media de las estaciones de precipitación que se proyectaron como se observa en la figura 4. Los resultados de corrección del sesgo se calcularon utilizando las simulaciones y observaciones de 25 años anteriores (1981–2005) y luego se realizó la revisión de los datos generales en el país.

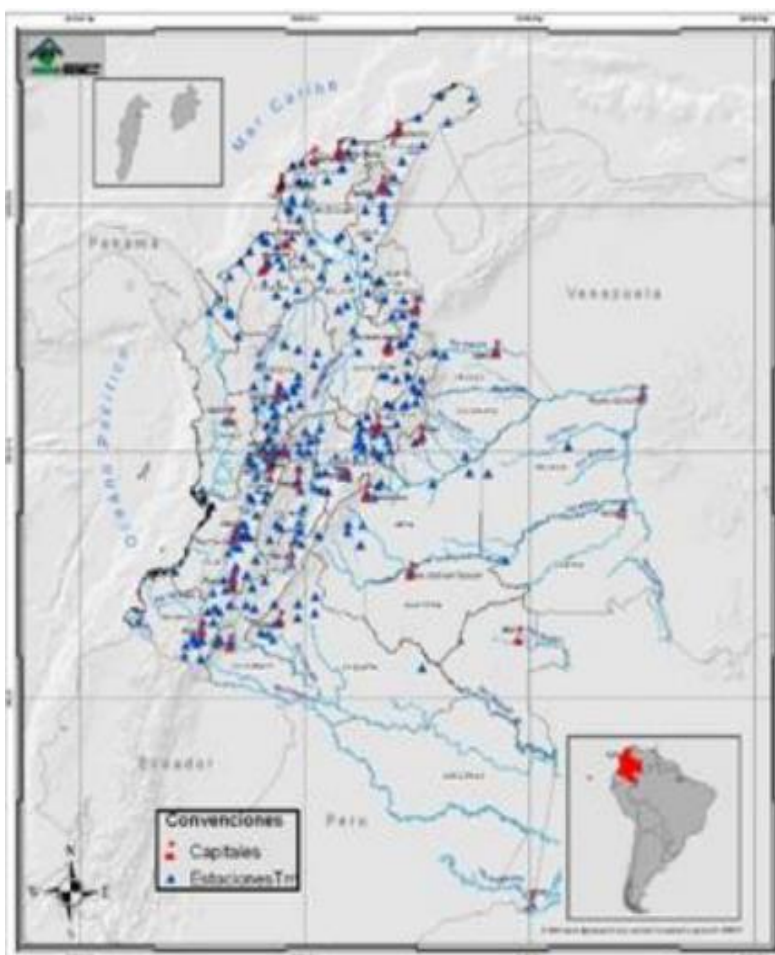


Figura 4. Estaciones de precipitación en Colombia

Fuente: (IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2009)

8. Análisis de Tendencias

Para la realización de estos análisis de tendencias para la precipitación, se evaluó la pendiente de largo plazo para las series anteriores y las series proyectadas con WRF; los datos entregados de las 274 estaciones del IDEAM, estaban distribuidos mes a mes por día cada año, se descartaron los días no lluviosos y se analizaron solo los datos relevantes y se unificaron anualmente, determinando que solo 16 estaciones cumplían con una homogeneidad en su información como se observa en la figura 6, lo cual permitiría el análisis objetivo de este estudio; se realizó un análisis con los datos de los días lluviosos, determinando la máxima, media, la varianza, la mediana, el percentil (25) y el percentil (75), luego se realizaron las gráficas correspondientes de cada una de las 16 estaciones con los datos máximos .

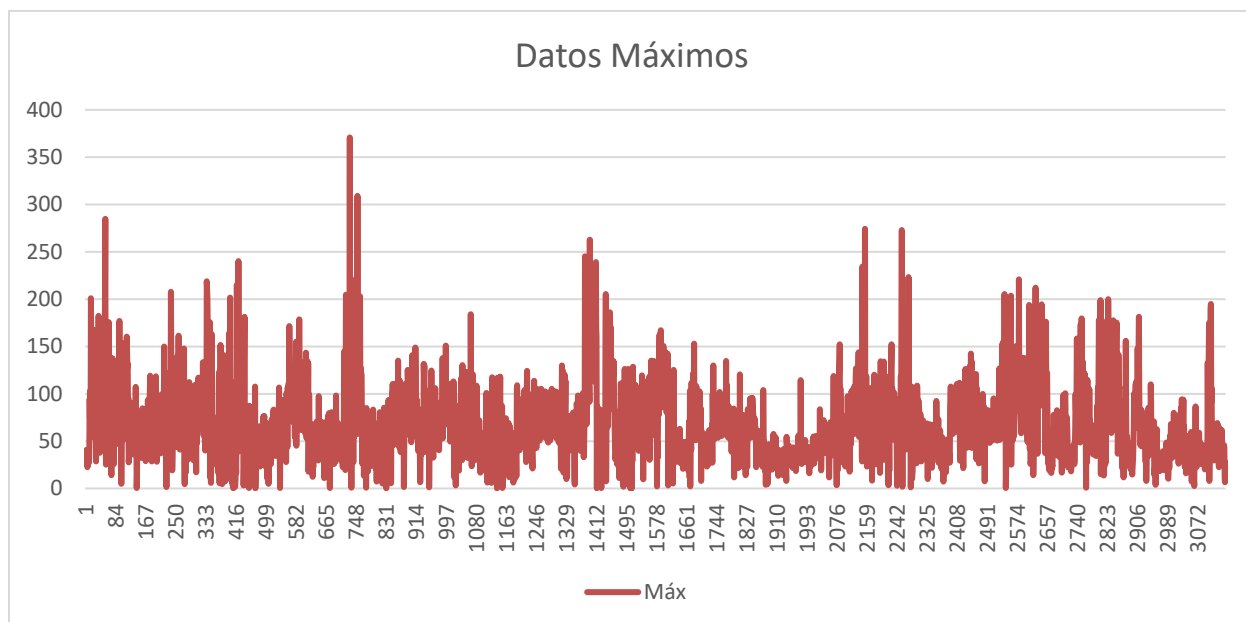


Figura 5. Gráfica de los valores máximos de las estaciones del IDEAM

Fuente: El autor

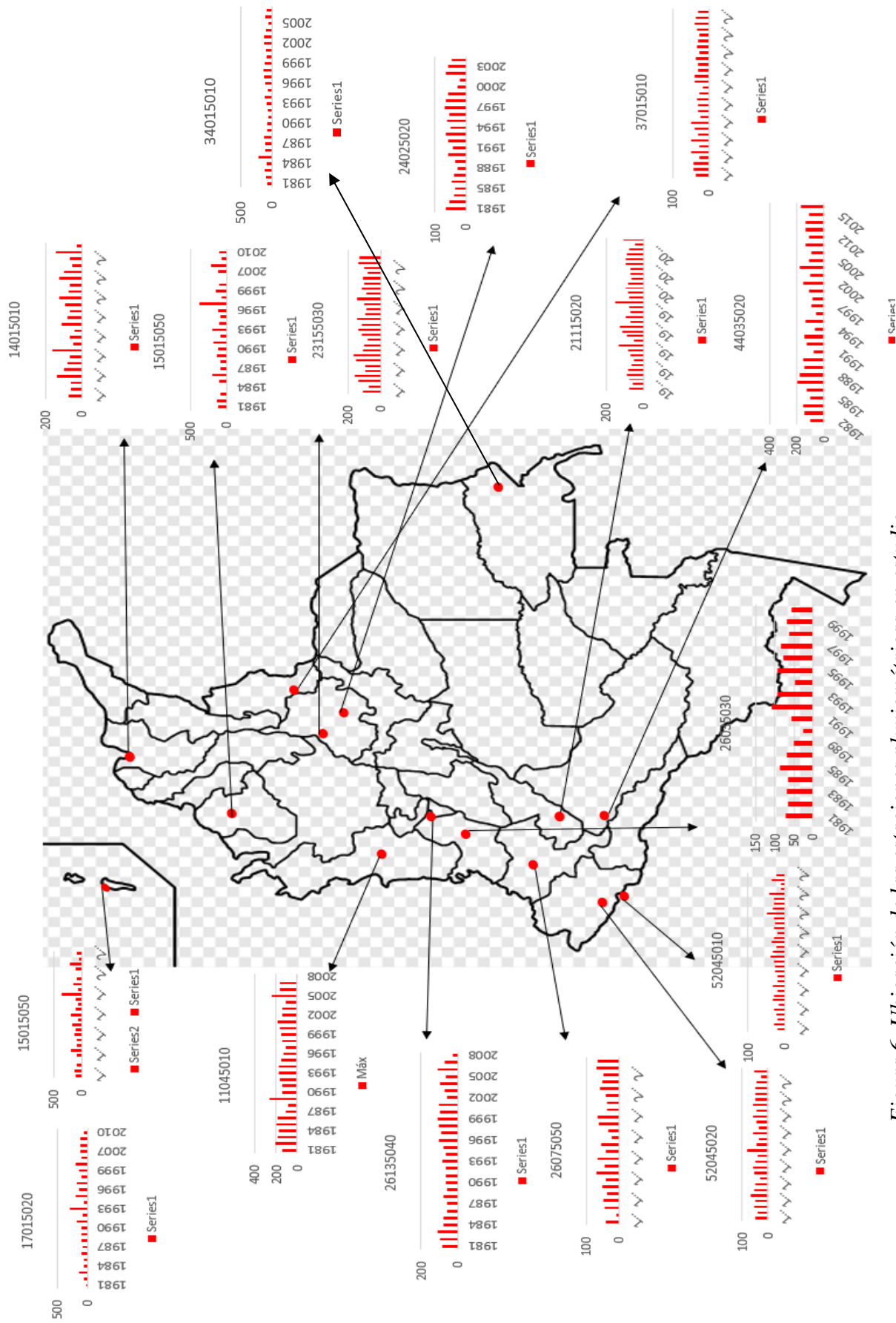


Figura 6. Ubicación de las estaciones pluviométricas en estudio

Fuente: El autor

9. Análisis de las precipitaciones máximas

Las frecuencias de las series máximas anuales se analizaron mediante la probabilidad empírica de los registros de las 16 estaciones con datos históricos y los simulados con WRF. Se realizó el análisis mediante la ley de Weibull para definir el período de retorno de una serie ordenada de mayor a menor y está dado por la fórmula:

$$Tr(m) = (n + 1)/m$$

Tr= Período de retorno en años

n= Número de elementos de la serie

m= es el orden de elemento en la serie ordenada de mayor a menor

La probabilidad de no excedencia está dada a partir de la ecuación:

$$F(X \leq x) = 1 - \frac{1}{Tr}$$

Se realizó el cálculo del período de retorno medida en $Tr = 2,5,20,50,100,500$, se presentó una notoria variación de la probabilidad de ocurrencia en los Departamentos de Nariño, Valle del Cauca y Chocó, con lo que se puede concluir que la probabilidad de ocurrencia de lluvias en la zona pacífica del territorio Colombiano como se puede observar en las Tablas 1 a la 6.

10. resultados

10.1 Cálculos de los períodos de retorno

Tabla 1. Período de retorno (2)

11045010	$Tr(2) = \frac{(28+1)}{2} = 14,5$	0,93
14015010	$Tr(2) = \frac{(24+1)}{2} = 12,5$	0,92
15015050	$Tr(2) = \frac{(23+1)}{2} = 12,5$	0,92
17015010	$Tr(2) = \frac{(25+1)}{2} = 13$	0,92
17025020	$Tr(2) = \frac{(25+1)}{2} = 13$	0,92
21115020	$Tr(2) = \frac{(32+1)}{2} = 16,5$	0,94
23155030	$Tr(2) = \frac{(28+1)}{2} = 14,5$	0,93
24025020	$Tr(2) = \frac{(23+1)}{2} = 12$	0,92
26035030	$Tr(2) = \frac{(18+1)}{2} = 9,5$	0,89
26075050	$Tr(2) = \frac{(24+1)}{2} = 12,5$	0,92
26135040	$Tr(2) = \frac{(28+1)}{2} = 14,5$	0,93
34015010	$Tr(2) = \frac{(27+1)}{2} = 14$	0,93
37015010	$Tr(2) = \frac{(29+1)}{2} = 15$	0,93
44035020	$Tr(2) = \frac{(29+1)}{2} = 15$	0,93
52045010	$Tr(2) = \frac{(33+1)}{2} = 17$	0,94
52045020	$Tr(2) = \frac{(27+1)}{2} = 14$	0,93

Tabla 2. Período de retorno (5)

$Tr(5) = \frac{(28+1)}{5} = 5,8$	0,83
$Tr(5) = \frac{(24+1)}{5} = 5$	0,8
$Tr(5) = \frac{(23+1)}{5} = 4,8$	0,79
$Tr(5) = \frac{(25+1)}{5} = 5,2$	0,81
$Tr(5) = \frac{(25+1)}{5} = 5,2$	0,81
$Tr(5) = \frac{(32+1)}{5} = 6,6$	0,85
$Tr(5) = \frac{(28+1)}{5} = 5,8$	0,83
$Tr(5) = \frac{(23+1)}{5} = 4,8$	0,79
$Tr(5) = \frac{(18+1)}{5} = 3,8$	0,74
$Tr(5) = \frac{(24+1)}{5} = 5$	0,8
$Tr(5) = \frac{(28+1)}{5} = 5,8$	0,83
$Tr(5) = \frac{(27+1)}{5} = 5,6$	0,82
$Tr(5) = \frac{(29+1)}{5} = 6$	0,83
$Tr(5) = \frac{(29+1)}{5} = 6$	0,83
$Tr(5) = \frac{(33+1)}{5} = 6,8$	0,85
$Tr(5) = \frac{(27+1)}{5} = 5,6$	0,82

Tabla 3. Periodos de retorno (20)

UBICACIÓN	PERIODOS DE RETORNO 16 ESTACIONES	F _x
11045010	$Tr(20) = \frac{(28+1)}{20} = 1,45$	0,31
14015010	$Tr(20) = \frac{(24+1)}{20} = 1,25$	0,2
15015050	$Tr(20) = \frac{(23+1)}{20} = 1,25$	0,2
17015010	$Tr(20) = \frac{(25+1)}{20} = 1,3$	0,23
17025020	$Tr(20) = \frac{(25+1)}{20} = 0,26$	-2,85
21115020	$Tr(20) = \frac{(32+1)}{20} = 1,65$	0,39
23155030	$Tr(20) = \frac{(28+1)}{20} = 1,45$	0,31
24025020	$Tr(20) = \frac{(23+1)}{20} = 1,2$	0,17
26035030	$Tr(20) = \frac{(18+1)}{20} = 0,95$	-0,05
26075050	$Tr(20) = \frac{(24+1)}{20} = 1,25$	0,2
26135040	$Tr(20) = \frac{(28+1)}{20} = 1,45$	0,31
34015010	$Tr(20) = \frac{(27+1)}{20} = 1,4$	0,29
37015010	$Tr(20) = \frac{(29+1)}{20} = 1,5$	0,33
44035020	$Tr(20) = \frac{(29+1)}{20} = 1,5$	0,33
52045010	$Tr(20) = \frac{(33+1)}{20} = 1,7$	0,41
52045020	$Tr(20) = \frac{(27+1)}{20} = 1,4$	0,29

Tabla 4. Periodos de retorno (50)

PERIODOS DE RETORNO 16 ESTACIONES (5)	F _x
$Tr(50) = \frac{(28+1)}{50} = 0,58$	-0,72
$Tr(50) = \frac{(24+1)}{50} = 0,5$	-1
$Tr(50) = \frac{(23+1)}{50} = 0,48$	-1,08
$Tr(50) = \frac{(25+1)}{50} = 0,52$	-0,92
$Tr(50) = \frac{(25+1)}{50} = 0,52$	-0,92
$Tr(50) = \frac{(32+1)}{50} = 0,66$	-0,52
$Tr(50) = \frac{(28+1)}{50} = 0,58$	-0,72
$Tr(50) = \frac{(23+1)}{50} = 0,48$	-1,08
$Tr(50) = \frac{(18+1)}{50} = 0,38$	-1,63
$Tr(50) = \frac{(24+1)}{50} = 0,5$	-1
$Tr(50) = \frac{(28+1)}{50} = 0,58$	-0,72
$Tr(50) = \frac{(27+1)}{50} = 0,56$	-0,79
$Tr(50) = \frac{(29+1)}{50} = 0,60$	-0,67
$Tr(50) = \frac{(29+1)}{50} = 0,60$	-0,67
$Tr(50) = \frac{(33+1)}{50} = 0,68$	-0,47
$Tr(50) = \frac{(27+1)}{50} = 0,56$	-0,79

Tabla 5. Períodos de retorno (100)

PERIODOS DE RETORNO 16 ESTACIONES (100)		Fx
11045010	$Tr(100) = \frac{(28+1)}{100} = 0,29$	-2,45
14015010	$Tr(100) = \frac{(24+1)}{100} = 0,25$	-3
15015050	$Tr(100) = \frac{(23+1)}{100} = 0,24$	-3,17
17015010	$Tr(100) = \frac{(25+1)}{100} = 0,26$	-2,85
17025020	$Tr(100) = \frac{(25+1)}{100} = 0,26$	-2,85
21115020	$Tr(100) = \frac{(32+1)}{100} = 0,33$	-2,03
23155030	$Tr(100) = \frac{(28+1)}{100} = 0,29$	-2,45
24025020	$Tr(100) = \frac{(23+1)}{100} = 0,24$	-3,17
26035030	$Tr(100) = \frac{(18+1)}{100} = 0,19$	-4,26
26075050	$Tr(100) = \frac{(24+1)}{100} = 0,25$	-3
26135040	$Tr(100) = \frac{(28+1)}{100} = 0,29$	-2,45
34015010	$Tr(100) = \frac{(27+1)}{100} = 0,28$	-2,57
37015010	$Tr(100) = \frac{(29+1)}{100} = 0,30$	-2,33
44035020	$Tr(100) = \frac{(29+1)}{100} = 0,30$	-2,33
52045010	$Tr(100) = \frac{(33+1)}{100} = 0,34$	-1,94
52045020	$Tr(100) = \frac{(27+1)}{100} = 0,28$	0,93

Tabla 6. Periodos de retorno (500)

PERIODOS DE RETORNO 16 ESTACIONES		Fx
	$Tr(500) = \frac{(28+1)}{500} = 0,058$	-16,24
	$Tr(500) = \frac{(24+1)}{500} = 0,05$	-19
	$Tr(500) = \frac{(23+1)}{500} = 0,048$	-19,83
	$Tr(500) = \frac{(25+1)}{500} = 0,052$	-18,23
	$Tr(500) = \frac{(25+1)}{500} = 0,052$	-18,23
	$Tr(500) = \frac{(32+1)}{500} = 0,066$	-14,15
	$Tr(500) = \frac{(28+1)}{500} = 0,058$	-16,24
	$Tr(500) = \frac{(23+1)}{500} = 0,048$	-19,83
	$Tr(500) = \frac{(18+1)}{500} = 0,038$	-25,32
	$Tr(500) = \frac{(24+1)}{500} = 0,05$	-19
	$Tr(500) = \frac{(28+1)}{500} = 0,058$	-16,24
	$Tr(500) = \frac{(27+1)}{500} = 0,056$	-16,86
	$Tr(500) = \frac{(29+1)}{500} = 0,060$	-15,67
	$Tr(500) = \frac{(29+1)}{500} = 0,06$	-15,67
	$Tr(500) = \frac{(33+1)}{500} = 0,068$	-13,71
	$Tr(500) = \frac{(27+1)}{500} = 0,056$	-16,86

10.2 Análisis de las estaciones del IDEAM

Se realizó un análisis de las precipitaciones a nivel nacional con todas las estaciones que componen el sistema del Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales, generando un mapa e interpolando la varianza, máxima, P75; se tomó finalmente un 83% de las estaciones para este análisis, teniendo en cuenta todas las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM 2007) para una buena calidad en la observación de los datos y posterior análisis de los mismos:

- El valor de las precipitaciones debe ser mayor a cero.
- Verificar por medio de la serie de tiempo la existencia de valores no convencionales, mediante la verificación de fenómenos como el ENSO.
- Identificación de las series climáticas homogéneas.
- Escogencia de los datos mayores a 0,6.

Después de esta observación se realizó la interpolación con IDW para la precipitación, con el software ARCGIS 1,3 para los análisis finales, los resultados arrojados por este análisis fueron: como se observa en las figuras 7 – 8 – 9:

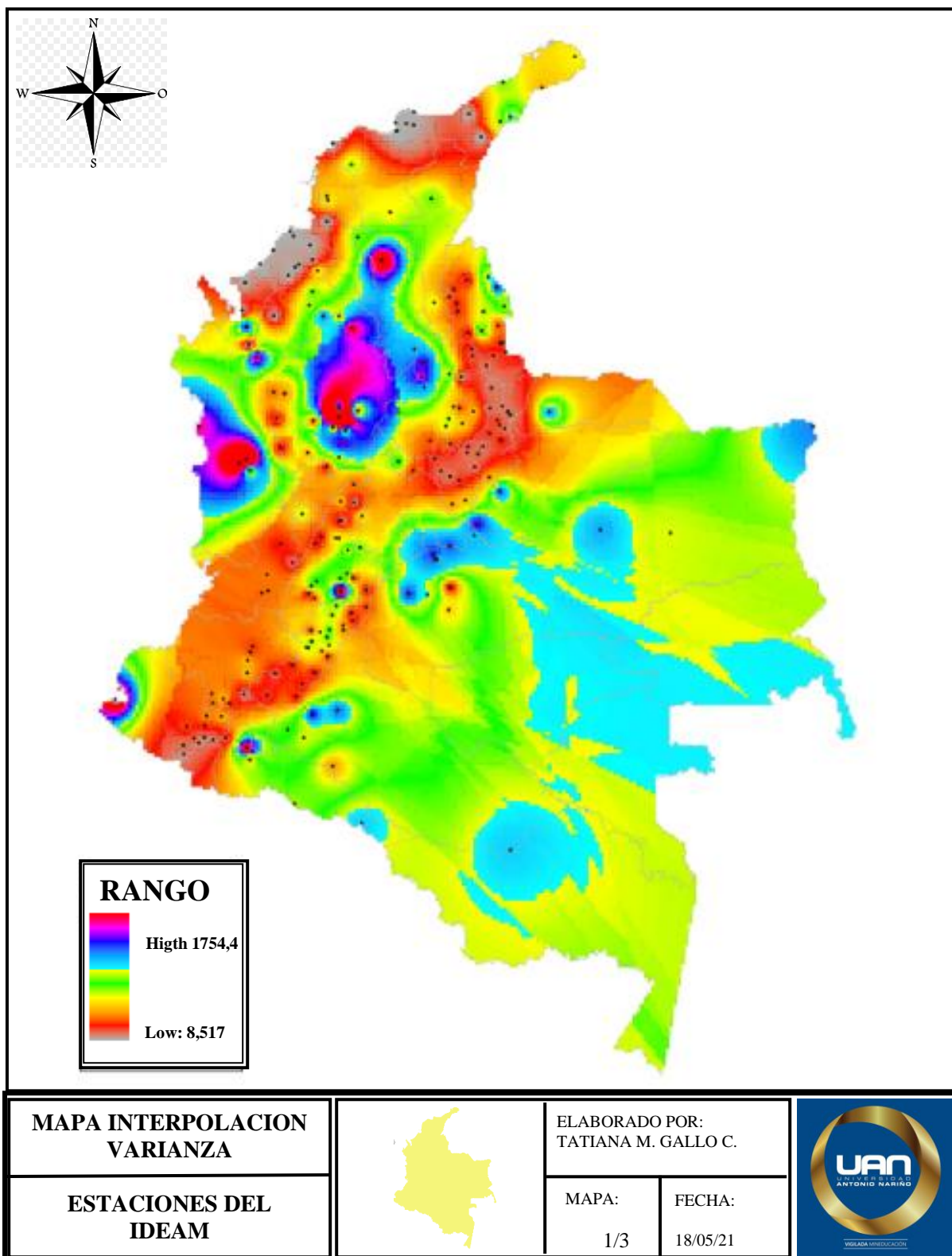
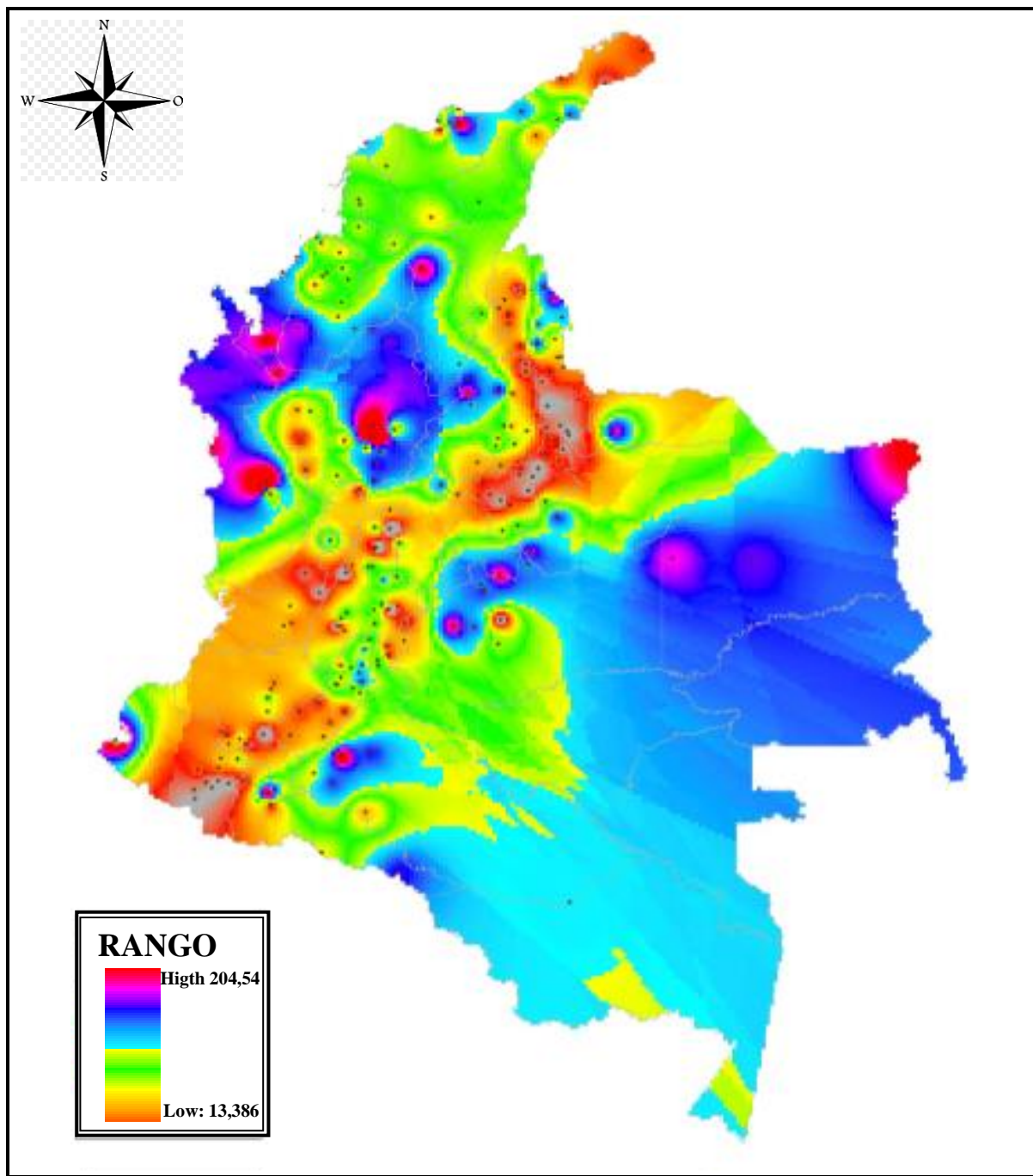
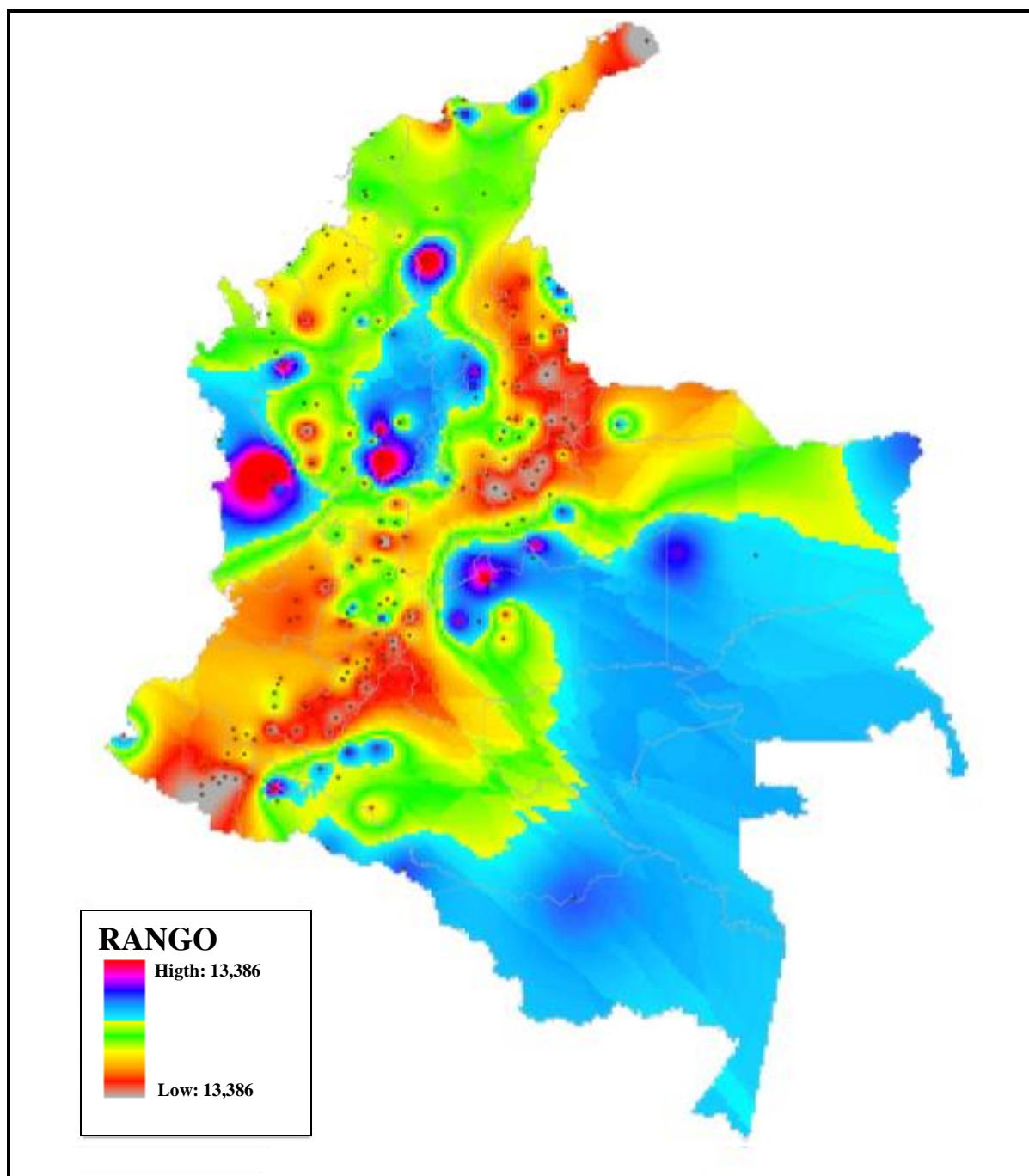


Figura 7. Mapa interpolación de varianza



<p>MAPA INTERPOLACION MAXIMO</p>		<p>ELABORADO POR: TATIANA M. GALLO C.</p>		
<p>ESTACIONES DEL IDEAM</p>		<p>MAPA: 2/3</p>	<p>FECHA: 18/05/21</p>	

Figura 8. Mapa interpolación de máximos





MAPA INTERPOLACION PERCENTIL 75		ELABORADO POR: TATIANA M. GALLO C.		
ESTACIONES DEL IDEAM		MAPA: 3/3	FECHA: 18/05/21	

Figura 10. Mapa interpolación de P75

Al 83% restante de las estaciones que no tenían datos homogéneos se analizó la varianza, determinando los valores promedios de cada estación por año y como se observa en la figura 7 las zonas de las regiones de Colombia, mediante el software ARCGIS 1.3 se realizó una interpolación de los datos de los promedios de la varianza, esta representa el conjunto de datos variables con respecto a la precipitación con datos analizados de 1981- 2005; analizando el mapa por las regiones naturales de Colombia podríamos concluir: En la zona de la región de la Orinoquia y Amazonía se muestran datos de precipitación un poco mas homogéneos con valores en las precipitaciones en el rango de 162,52 mm/año y 259,49 mm/año; en la región caribe en la zona costera en los departamentos de Bolívar, Córdoba, Sucre, Magdalena y sur de la Guajira, se presentan precipitaciones en un rango de 63,82 mm/año, en la zona de la Sierra Nevada de Santa Marta los datos de precipitación medios son entre 112,3 y 162,52 mm/año, lo que hace que esta zona en su mayoría tenga datos homogéneos en un alto porcentaje; en la región Pacífica de Colombia, presenta datos de precipitación dispersos que van en el orden de rango entre 63,82 a 259,49 mm/año, concentrando la homogeneidad en los límites de los departamentos, Valle del cauca, sur de Chocó y Cauca, manteniendo el valor de la precipitación 112,31 mm/año; en la zona andina que es la región que más departamentos tiene, se observan datos entre 112,30 y 358,196 mm/año, es un rango amplio para la región.

10.2.2 Análisis de los valores máximos de precipitación

Se realizó la interpolación del promedio de los datos máximos de todas las estaciones, con el software de ARCGIS 1.3, los resultados del análisis arrojaron por regiones los siguientes resultados: En la región de la Orinoquia y la Amazonía, se presentan datos en un rango de 78,03 y 96,33 mm/año, perdiendo la homogeneidad de los datos en el sur de la Amazonía con

precipitaciones de 60,07 mm/año y en la región de Vaupés con 105,31 mm/año, los departamentos de Arauca y Casanare con un rango de 60,07 a 69,05 mm/año; en la región del Caribe se presenta una variedad de datos de precipitación en un rango de 50,76 a 105,31 mm/año siendo un rango bastante amplio demostrando la dispersión de los datos de precipitación; en la región del Pacífico Colombiano, encontramos un amplio rango en los valores de la precipitación, coincidiendo con zonas de homogeneidad sectorizada en la zona norte del Chocó con datos entre 96,32 y 105,31 mm/año y en los límites de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca y norte de Nariño con datos entre 50,76 y 60,07 mm/año; en la zona andina los datos promedios de las precipitaciones máximas, son homogéneos en la zona de cordilleras, con un rango de 50,77 a 69,05 mm/año, en la región de los Santanderes se 41,78 y 50,76 mm/año, el resto de la región andina está representada por datos dispersos que se encuentran entre 69,05 a 96,32mm/año.

10.2.3 Análisis del percentil 75

En este análisis se está determinando el percentil de los datos tomados del 83% de las estaciones que conforman el sistema de estaciones del IDEAM y que no suministraron datos homogéneos; en la región de la Amazonía y la Orinoquía se encuentra en gran parte datos con un rango entre 14,25 y 16,01 mm/año, en la zona de los departamentos de Meta, Putumayo, se encuentran datos de precipitación en un rango de 9,09 y 12,55 mm/año; en la zona norte de la región Caribe se presenta un amplio rango comprendido entre 12,55 y 33,04 mm/año, en la zona de la Guajira en la península se observa un número reducido de precipitaciones; en la zona del Pacífico se encontró un rango entre 7,39 y 17,71 mm/año siendo más homogéneos en los departamentos de Nariño, Cauca y Valle del Cauca con un valor de 9,09 mm/año; en la región andina la tendencia de la homogeneidad en las precipitaciones se refleja en el sur de la región

Tolima Huila, sur de Cundinamarca con un valor de 9,09 mm/año y en la zona norte en los departamentos de Norte de Santander, Boyacá y norte del departamento de Santander.

10.3 Análisis por medio de gráficos de las 16 estaciones en estudio

10.3.1 Estación 11045010

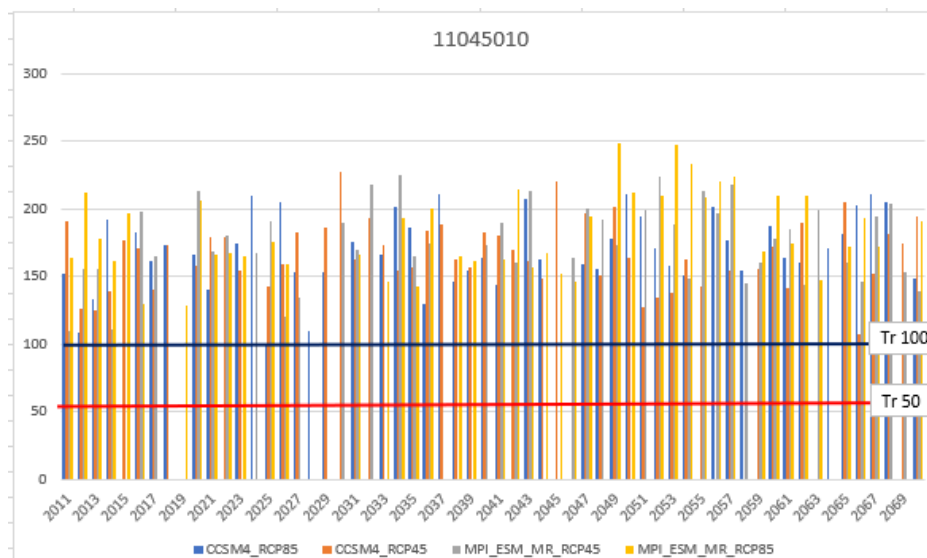


Figura 11. Gráfica de la proyección de la estación 11045010

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el Departamento de Chocó en la Ciudad de Quibdó en latitud 56.905.555.560 y longitud -7.664.377.778 y a una altura de es uno de los departamentos de Colombia en el que más precipitaciones se presentan, con un régimen monomodal (D.C, 2019), según la información que nos brinda esta estación por medio de la gráfica 10, se observa que las lluvias superan los períodos de retorno en los escenarios de ocurrencia Tr 100 y Tr 50, en la proyección a 2070, en los años 2049 a 2050 y el 2053 al 2055 superará los 200 mm según el

escenario MPI_ESM_MR_RCP85, manteniéndose más homogénea en los períodos restantes,³⁹ sin dejar de superar los periodos de retorno mencionados anteriormente.

10.3.2 Estación 14015010

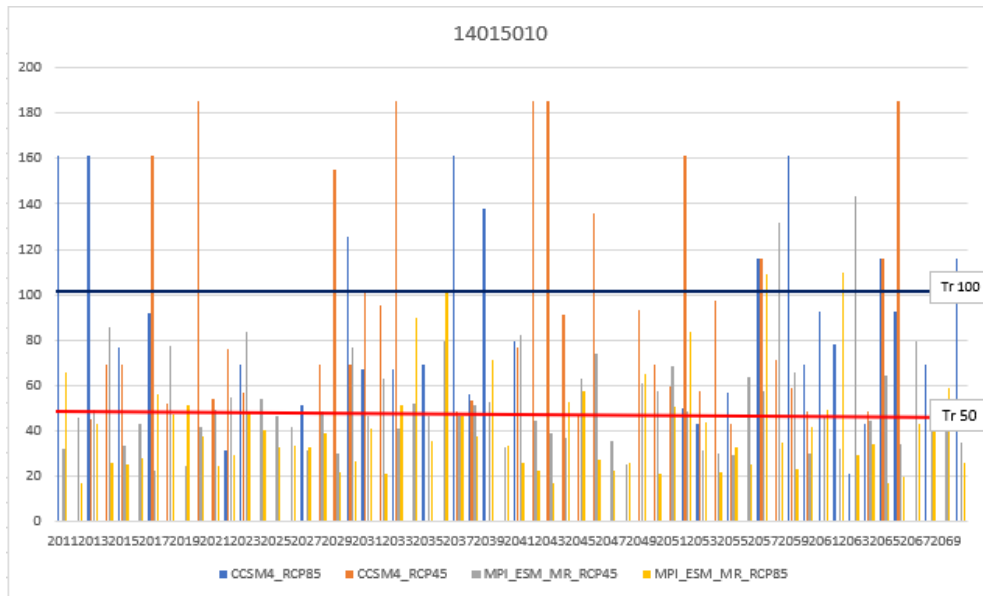


Figura 12. Gráfica de la proyección de la estación 14015010

Fuente: El Autor

Análisis: La estación se encuentra ubicada en el Departamento de Bolívar en el municipio de Santa Catalina, ubicado en latitud 1.079.416.667 y longitud -7.526.055.556 a una altura de 20 mts sobre el nivel del mar; es una zona que se caracteriza por ser muy húmeda y nublada todo el año (D.C, 2019), en la gráfica 11 podemos observar que las mayores precipitaciones están en el promedio de 160 a 180 mm y sobrepasan además los períodos de ocurrencia Tr 50 y Tr 100 y se encuentra muy marcada por la tendencia CCSM4_RCP45 mayormente, el resto de las gráfica nos indica una homogeneidad promedio en los periodos de lluvia con valores en promedio de 30 a 40 mm/año.

10.3.3 Estación 15015050

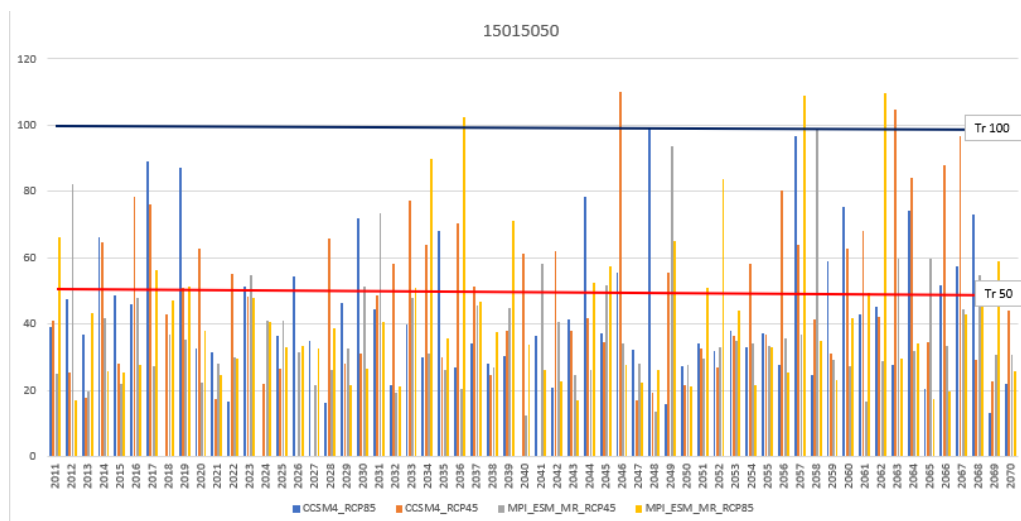


Figura 13. Gráfica de la proyección de la estación 15015050

Fuente: El Autor

Análisis: La estación se encuentra ubicada en el Departamento de Magdalena exactamente en la Ciudad de Santa Marta a una latitud de 1.112.833.333 y a una longitud de -7.422.888.889 y ubicada a una altura de 4 Mts sobre el nivel del mar, registrando por lo general lluvias de intensidad moderada en la mayor parte del departamento exceptuando la zona de la Sierra Nevada donde se presentan más lluvias de tipo bimodal (D.C, 2019), en la gráfica 12 se observa lluvias homogéneas excepto por la proyección de algunos escenarios CCSM4_RCP45 y MPI_ESM_MR_RCP85 y el período de ocurrencia Tr100; en el periodo proyectado los datos nos muestran que sobrepasan el período de retorno Tr 50 en un porcentaje no mayor al 25%, lo que indica una ocurrencia de lluvias en un promedio de 40 mm/año.

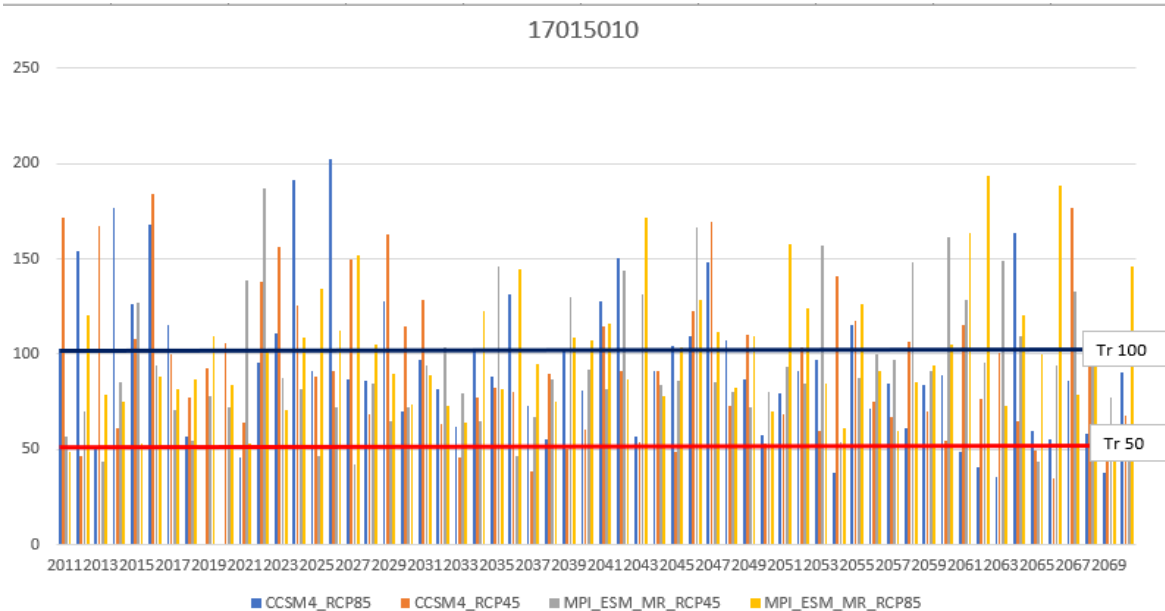


Figura 14. Gráfica de la proyección de la estación 17015010

Fuente: El Autor

Análisis: La estación se encuentra ubicada en el Departamento de San Andres y Providencia a una latitud de 1.254.218.333 y una longitud de -8.173.096.944 a 1 Mt de altura sobre el nivel del mar, las precipitaciones son moderadas y presentan un régimen de lluvia monomodal por lo general el clima predominante es húmedo (D.C, 2019); en la proyección realizada los datos representados en la gráfica 13 donde se muestra la proyección, superan el período de ocurrencia de Tr 50 y en un 20% el Tr 100 lo que indica que se proyectan lluvias no mayores a 100 mm/año, aunque en el escenario CCSM4_RCP85 pueden alcanzar en algunos casos precipitaciones alrededor de los 200 mm/año.

10.3.5 Estación 17025020

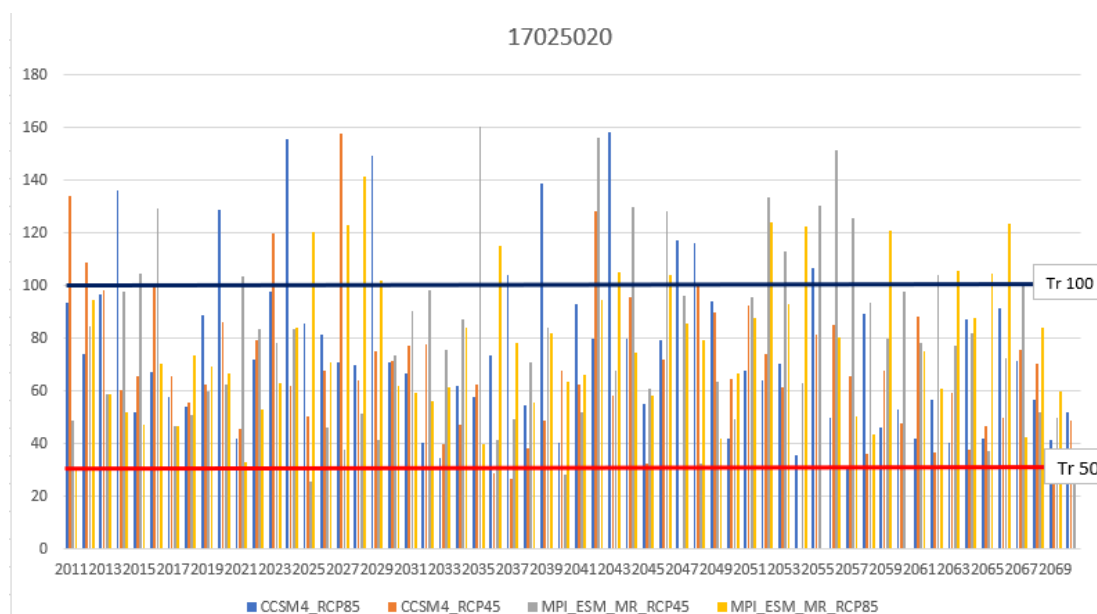


Figura 15. Gráfica de la proyección de la estación 17025020

Fuente: El Autor

Análisis: Esta ubicada en el departamento de San Andres y Providencia una latitud de 133.595 y una longitud de -8.135.772.222 a 1 Mt de altura sobre el nivel del mar (D.C, 2019), esta gráfica 14 que representa la estación se encuentra ubicada al igual que la anterior en el departamento de San Andres y providencia, se presenta homogeneidad en un promedio no mayor a 60 mm/año, superando además el período de ocurrencia Tr 50; el período de ocurrencia Tr 100 es superado en un porcentaje menor en 160 mm/año, siendo más representativo el escenario CCSM4_RCP85

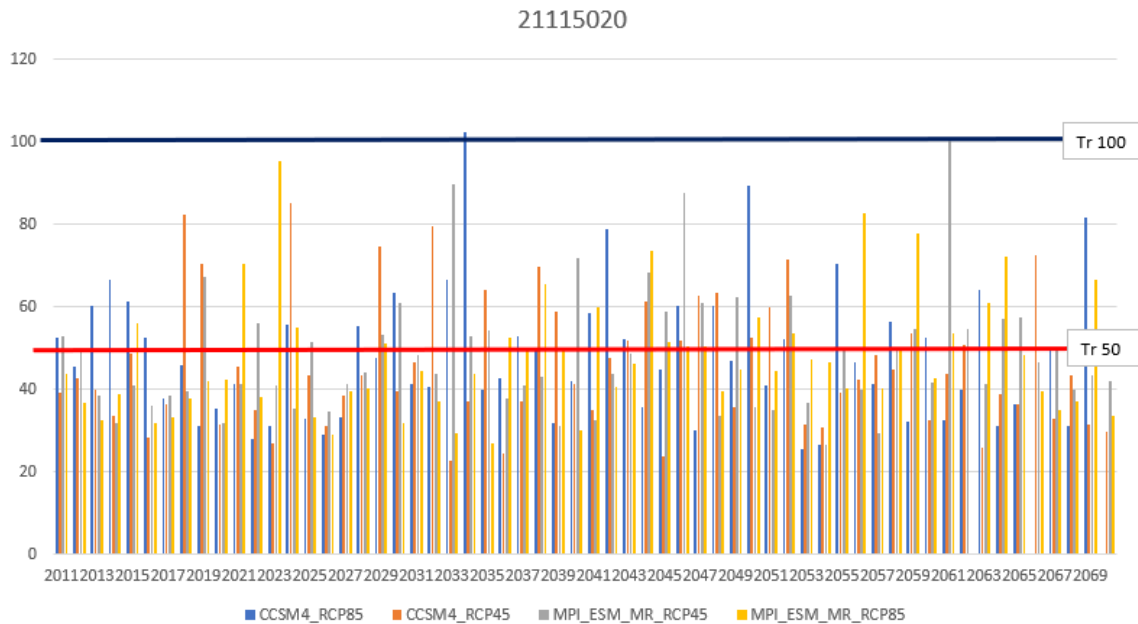


Figura 16. Gráfica de la proyección de la estación 2115020

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el departamento de Huila, en la Ciudad de Neiva a una latitud 2.948.750 y una longitud de -7.529.305.556 y una altura de 439 mts sobre el nivel del mar, en este departamento en general se pueden experimentar todos los tipos de clima gracias a su sistema montañoso y predomina una humedad media (D.C, 2019), en la gráfica 15 se observa un promedio de ocurrencia de lluvias hasta de 45 mm/año mayormente y sobrepasando el período de ocurrencia Tr 50, solo en el año 2034 se prevé que superará los datos homogéneos con una ocurrencia de precipitaciones de 100 mm/año; la característica más importante son sus datos relativamente homogéneos en la proyección realizada.

10.3.7 Estación 23155030

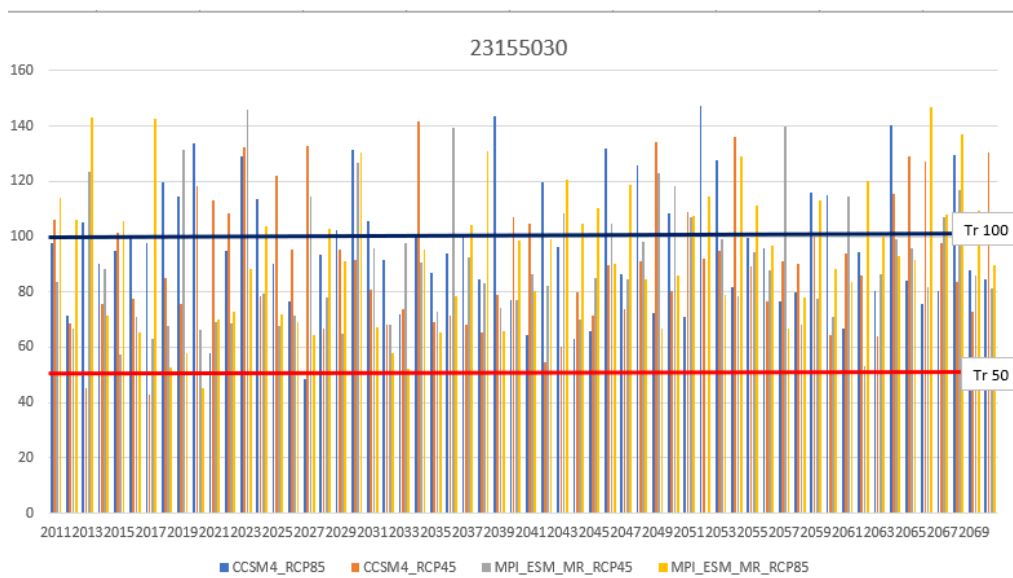


Figura 17. Gráfica de la proyección de la estación 23155030

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el departamento de Santander en la ciudad de Barrancabermeja a una latitud 65.322.222.22 y una longitud -7.319.916.667 a una altura de mts sobre el nivel del mar, predomina el clima templado y está ubicado en una zona del departamento donde mas predominan las lluvias al nororiente de este (D.C, 2019); las proyecciones en las ocurrencias denotan homogeneidad en el período de retorno Tr 50 y en algunos casos supera el Tr 100 superándolos hasta 140 mm/año predominando el escenario de proyección MPI_ESM_MR_RCP85 y el escenario CCSM4_RCP85.

10.3.8 Estación 24025020

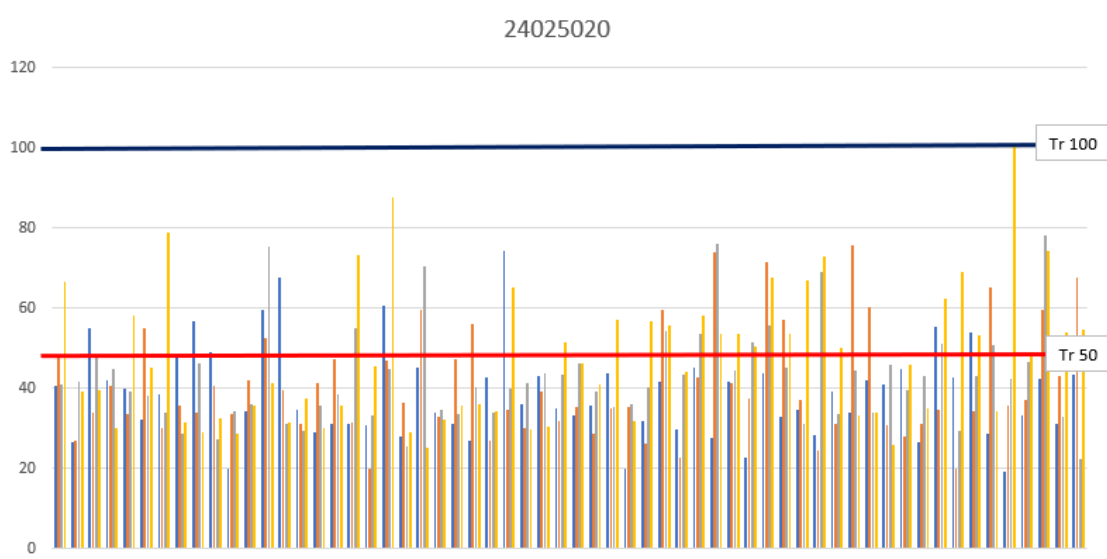


Figura 18. Gráfica de la proyección de la estación 24025020

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el departamento de Santander en el municipio de Pinchote ubicado al sur oriente a una latitud 65.322.222.220 y una longitud -7.319.916.667 a una altura de 975 mts sobre el nivel del mar, en la zona se presentan lluvias de carácter moderado (D.C, 2019); la gráfica 17 muestra la proyección de los datos de precipitación homogéneos con un valor de 40 mm/año superando menormente el período de ocurrencia Tr 50, solo en 2067 se proyecta que superará este periodo de ocurrencia y alcanzará los 100 mm/año.

10.3.9 Estación 26035030

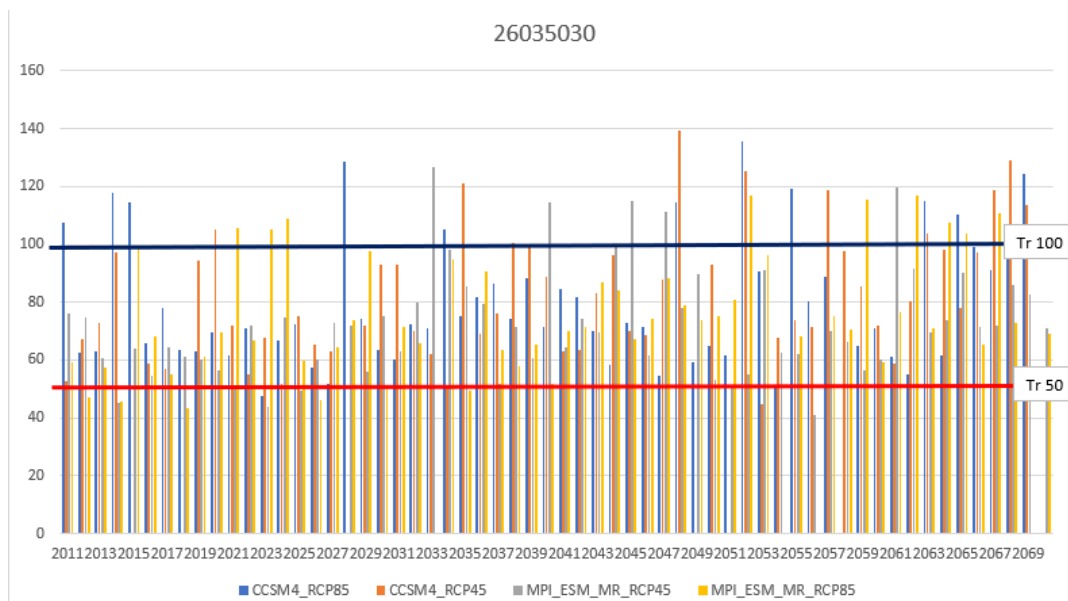


Figura 19. Gráfica de la proyección de la estación 26035030

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se ubica en el departamento de Cauca en la Ciudad de Popayán a una latitud de 24.528.888.890 y una longitud -76.608.750 a una altura de 1752 mts, el departamento en general cuenta con un régimen de lluvia bimodal y un clima templado (D.C, 2019); en la gráfica 18 de la proyección de precipitación, se observa homogeneidad en los datos inferiores a 50mm/año aunque superando mayormente el periodo de ocurrencia Tr 50 y alcanzando a superar en menor proporción el periodo de ocurrencia Tr100 en un 15% hasta 140 mm/año.

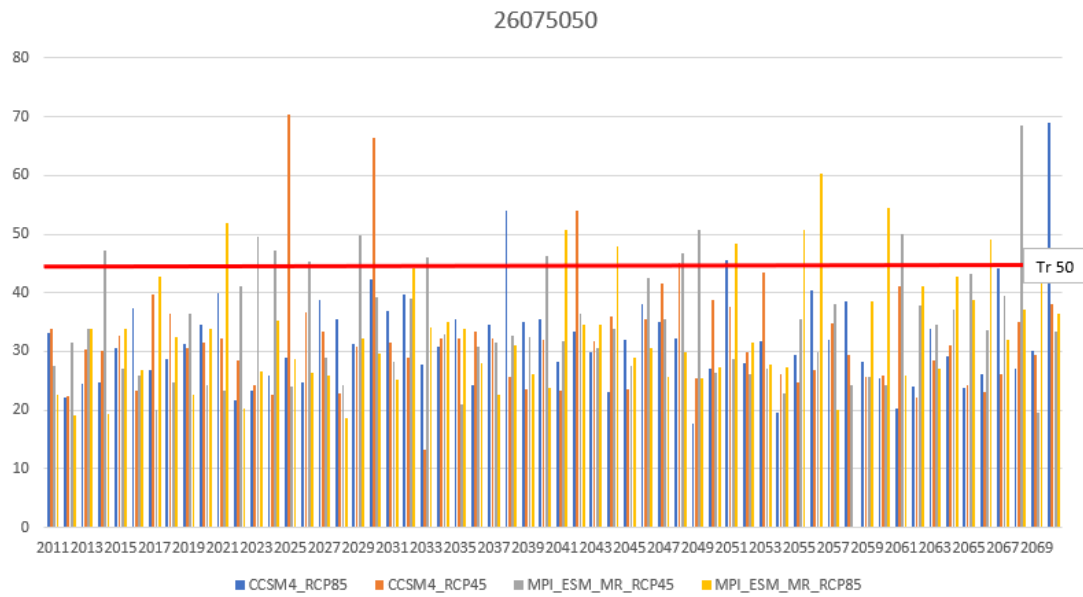


Figura 20. Gráfica de la proyección de la estación 26075050

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se ubica en el departamento de Valle del Cauca en la ciudad de Palmira a una latitud de 35.740.555.560 y una longitud de -7.627.780.556 y una altura de 159 mts sobre el nivel del mar, presentan lluvias de bajas a moderadas, con un régimen de lluvia bimodal (D.C, 2019), en la gráfica 19 se muestra un promedio de homogeneidad en la probabilidad de lluvia entre 30 y 40 mm/año, en algunos casos alcanza a superar el periodo de ocurrencia Tr 50 en un 4%.

10.3.11 Estación 26135040

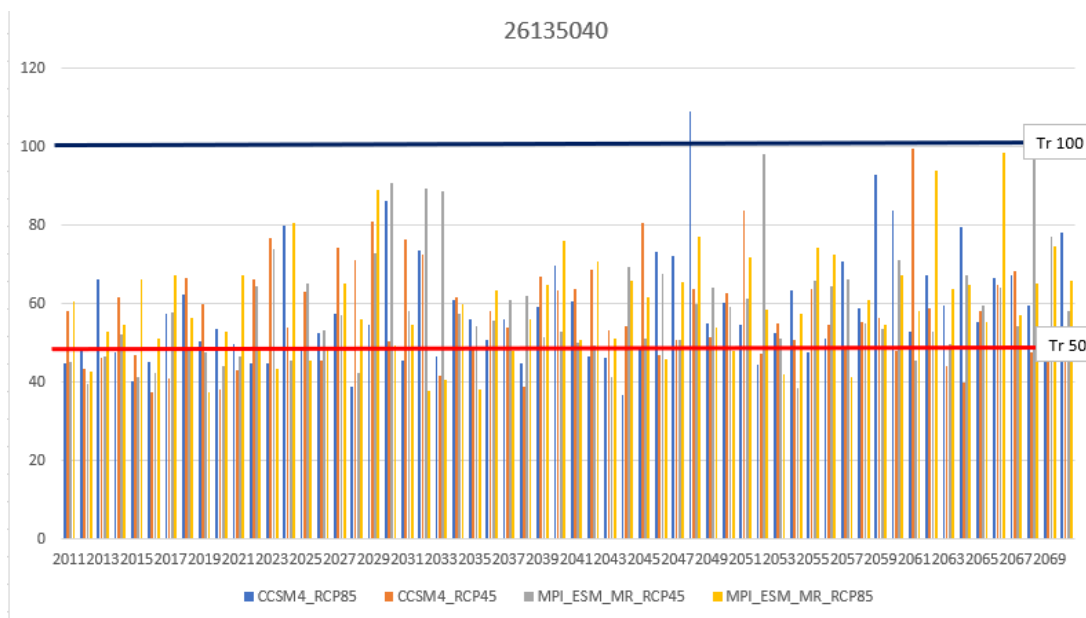


Figura 21. Gráfica de la proyección de la estación 26135040

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra en el departamento de Risaralda en la Ciudad de Pereira con una latitud de 48.158.611.11 y una longitud -7.573.722.222 a una altura de 1199 mts sobre el nivel del mar, tiene periodos de lluvia bimodal y una humedad relativa de 76% en promedio (D.C, 2019); en la gráfica 20 se observa el promedio de la proyección de las precipitaciones en 40 y 45 mm/año, la gran mayoría supera esta proyección el escenario de ocurrencia Tr50, sin superar el restante al período de ocurrencia Tr100, la excepción se presenta en el año 2047 con una precipitación proyectada de 120 mm/año.

10.3.12 Estación 34015010

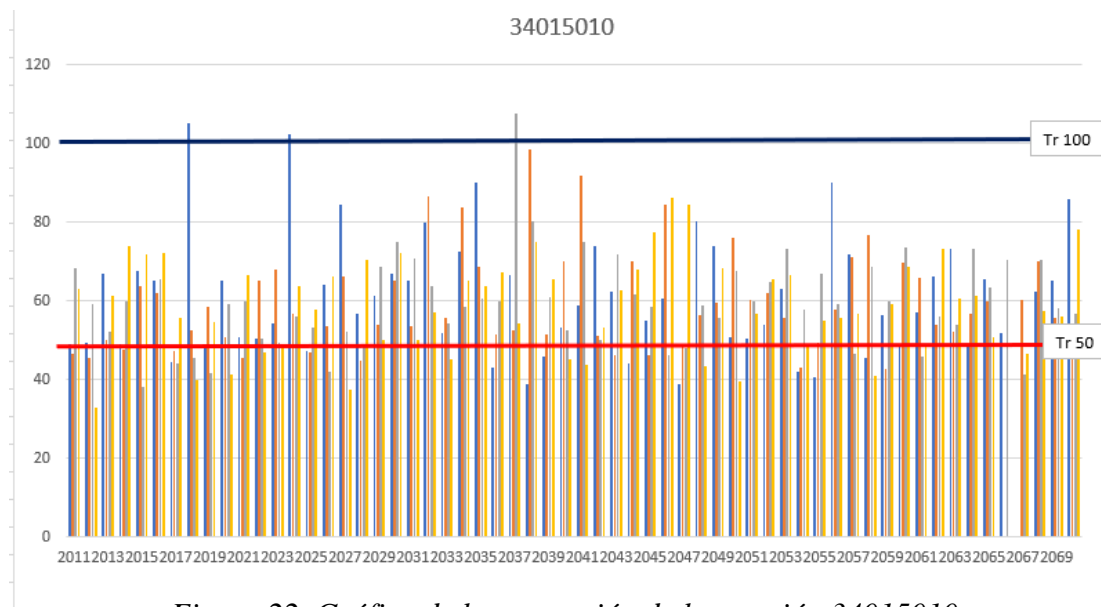


Figura 22. Gráfica de la proyección de la estación 34015010

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se ubica en el departamento de Vichada en el municipio de Cumarimbo en latitud 45.539.444.440 y la longitud -7.093.011.111 y una altura de 171 mts sobre el nivel del mar (D.C, 2019), presenta una probabilidad de precipitaciones como se observa en el gráfico 21 con un promedio de proyección de 50mm/año y superando en un gran porcentaje el período de ocurrencia Tr 50, el resto de datos no exceden los 80 mm/año, los datos proyectados que superan el periodo de ocurrencia Tr 100 excepto en el 2037 que tiene una proyección de 130 mm/año en el escenario de proyección CCSM4_RCP 85.

10.3.13 Estación 37015010

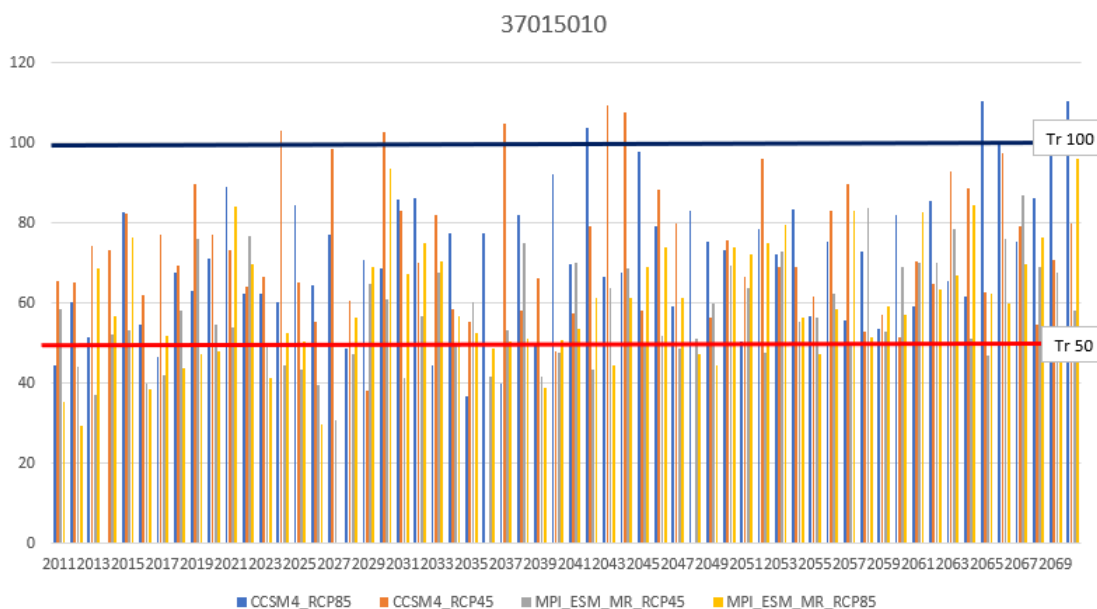


Figura 23. Gráfica de la proyección de la estación 37015010

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el departamento de Norte de Santander en el municipio de Silos en una latitud de 72.075 y una longitud de -7.275.333.333 a una altura 2765 mts de altura sobre el nivel del mar, el departamento en general presenta una alta variabilidad en la precipitación, pero en el suroccidente del departamento se presenta en menores cantidades (D.C, 2019); en la gráfica 22 se observa la proyección la precipitación la cual se presenta homogéneamente en un promedio de 40 a 45 mm/año, supera el periodo de ocurrencia Tr50 y en algunos casos el Tr100 en el escenario de proyección CCSM4_RCP85a la altura de los años 2065 y 2069.

10.3.14 Estación 34035020

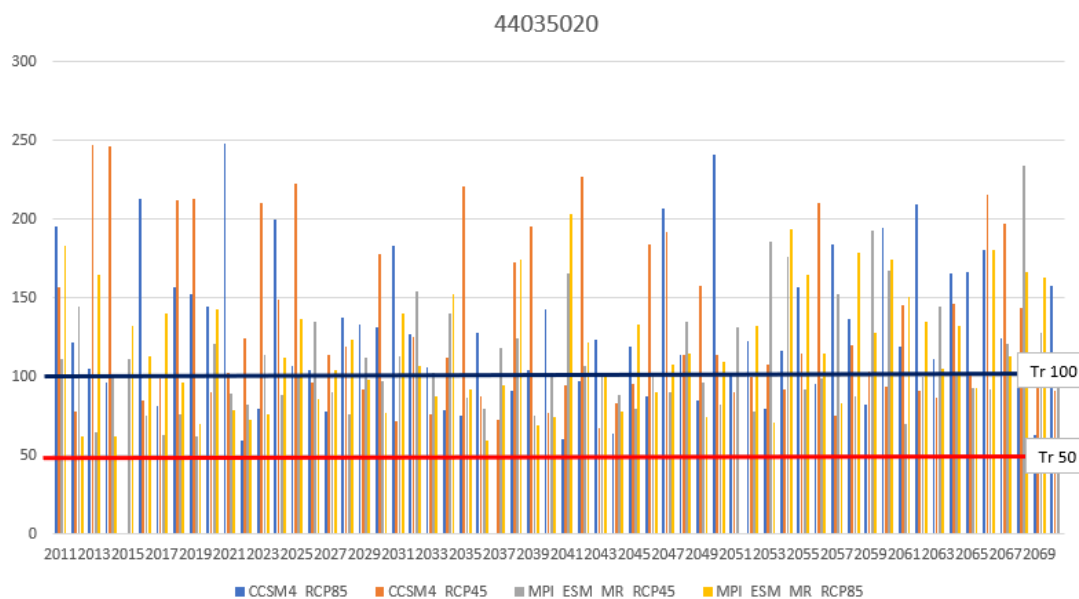


Figura 24. Gráfica de la proyección de la estación 44035020

Fuente: El Autor

Análisis: Esta ubicada en el departamento de Caquetá en la Ciudad de Florencia con latitud 15.890.555.560 y longitud -7.555.955.556 a una altura de 244 mts sobre el nivel del mar, presenta variedad de pisos térmicos por su ubicación cerca al sistema montañoso andino (D.C, 2019), en el gráfico 23 podemos observar la proyección de las precipitaciones las cuales tienen un promedio de 80 a 100 mm/año, superando ampliamente los periodos de ocurrencia Tr 50 y Tr 100 hasta alcanzar precipitaciones proyectadas de 250 mm/año.

10.3.15 Estación 52045010

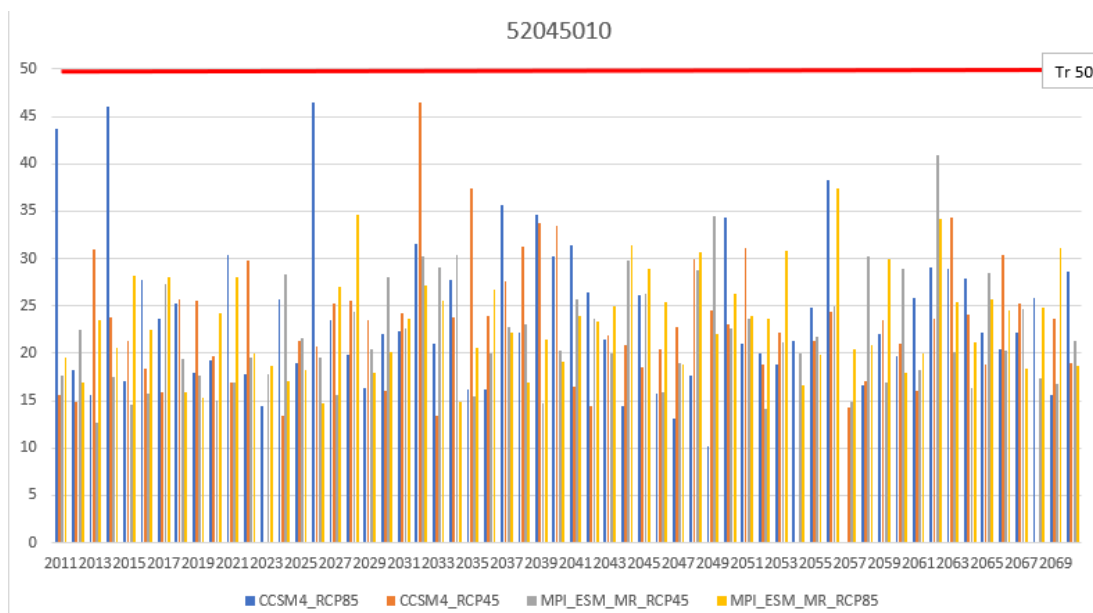


Figura 25. Gráfica de la proyección de la estación 52045010

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el departamento de Nariño en el municipio de Pasto a una latitud de 11.982.222.220 y longitud -7.730.308.333, a una altura de 2710 mts sobre el nivel del mar, presenta patrones de lluvia homogéneos lo cual tiene relación con el régimen que se presenta en la región natural del pacifico, las lluvias son abundantes todo el año, presentándose en promedio precipitaciones de 15 a 25 mm/año (D.C, 2019); la gráfica 24 muestra la proyección del clima la cual no supera el período de ocurrencia Tr50 y presentando períodos de precipitación muy equitativos y homogéneos.

10.3.16 Estación 52045020

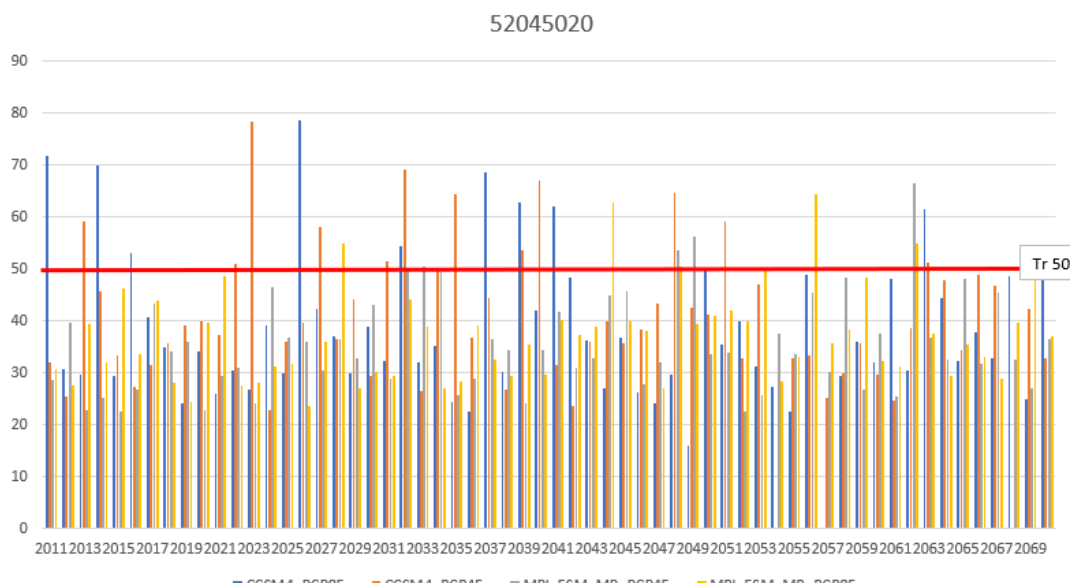


Figura 26. Gráfica de la proyección de la estación 52045020

Fuente: El Autor

Análisis: Esta estación se encuentra ubicada en el departamento de Nariño en el municipio de Chachagua en latitud 13.940.833.330 y una longitud de -7.729.086.111 a una altura de 1796 sobre el nivel del mar, en la gráfica 25 se observa la proyección de la precipitación y muestra un promedio de 30 a 45 mm/año, presentando resultados muy homogéneos en este rango y superando el período de ocurrencia Tr50 en un porcentaje menor de los datos que se proyectaron, los escenarios predominantes son CCSM4_RCP85 y CCSM4_RCP45.

- Se aplicó metodología de corrección de sesgo estadística previamente desarrollada para la precipitación diaria simulada y corregir las precipitaciones medias actuales y proyectadas. Los resultados de corrección del sesgo se calcularon utilizando las observaciones de los períodos comprendidos entre (1980 – 2005) y luego se proyectó para los años 2011 a 2070. Los resultados de las correcciones mejoran los datos y estos son demasiado útiles para proyectar las precipitaciones y para ejecutar simulaciones hidrológicas. El cambio de la precipitación presenta una variación en mayor cantidad a lo largo del país, en la región pacífica colombiana se encontró mayor homogeneidad que en las otras con las que se realizó la comparación.
- El estimativo de probabilidad de ocurrencia Tr50 fue el más recurrente a lo largo de este análisis de las 16 estaciones y en algunos casos superado por algunas de las proyecciones realizadas a las estaciones, lo que puede concluir que en la mayoría de la estación se proyectó una probabilidad de excedencia de 1/50.
- La falta de homogeneidad en los datos suministrados por las estaciones del IDEAM, no permitió ampliar aún más el análisis de la proyección, por lo que con éste 17% se debe tener en cuenta la generación de un nivel de confianza para el diseño de los proyectos a futuro como acueductos, alcantarillados y presas entre otras obras de ingeniería, evaluando además con estos resultados, costos, seguridad, tiempo de servicio de las mismas.
- Se puede concluir entonces que la homogeneidad de los datos presentados en el análisis de los promedios de la varianza está sectorizada en la región amazónica y de los llanos y en la región centro de la zona andina.

- En el análisis de los datos máximos se encuentran datos dispersos en rangos muy amplios⁵⁵ y se sigue manteniendo mayormente homogénea la zona de la Amazonía y la Orinoquia Colombiana.

12. Recomendaciones

- Es importante que se tenga en cuenta la importancia del mantenimiento de los datos al orden del día de las estaciones para futuros estudios de proyección y además de la calidad de los mismos, en este proyecto se pudo demostrar la importancia del estudio de datos como las precipitaciones para la proyección de obras futuras.

Referencias Bibliográficas

IDEAM. (s. f.). *Clima - IDEAM*. siac.gov.co. Recuperado 21-02-16, de

<http://www.siac.gov.co/clima>

CLIMA EN COLOMBIA - Colombiamania.com. (2017). colombiamania.com.

http://www.colombiamania.com/geografia/index_geografia/index_geografia_clima.html

CAMBIO CLIMÁTICO AFECTA A COLOMBIA. (2017, 3 febrero). Universidad Sergio

Arboleda. <https://www.usergioarboleda.edu.co/medio-ambiente/cambio-climatico-afecta-a-colombia/#:%7E:text=En%20Colombia%20hay%20cinco%20efectos,extremos%20y%20animales%20en%20peligro.>

Meteorología, A.-A. E. (2018). ▷ *Definición de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) en*.

MeteoGlosario Visual.

Meteorología, A.-A. E. (1996, enero). ▷ *Definición de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) en*.

MeteoGlosario Visual. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/695_el-nino-oscilacion-del-sur-enso

Oviedo Torres, B. E. (2010). *GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALES Y LOCALES A PARTIR DE MODELOS GLOBALES - GUÍA PARA TOMADORES DE DECISIONES*. <http://www.ideam.gov.co/>.

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+para+Tomadores+de+Decisiones.pdf/fa7abe38-43cc-49c8-96a3-f2b5c24ecce3>

Sostenibilidad Semana. (2015, 10 abril). *Escenarios de cambio climático (2011 – 2100): ¿Qué son y para qué sirven?* Escenarios de cambio climático 2011 – 2100 ¿Qué son y para qué sirven? [https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/escenarios-cambio-climatico-2011-2100-que-para-que-sirven/32812#:~:text=Un%20Escenario%20de%20Cambio%20Clim%C3%A1tico,2070%20y%202071%20%2D%202100\).](https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/escenarios-cambio-climatico-2011-2100-que-para-que-sirven/32812#:~:text=Un%20Escenario%20de%20Cambio%20Clim%C3%A1tico,2070%20y%202071%20%2D%202100).)

Ruiz Murcia, F. (15-03). *NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA 2011-2100 NIVEL NACIONAL-DEPARTAMENTAL*.
<http://www.andi.com.co/>.
<http://www.andi.com.co/Uploads/NUEVOS%20ESCENARIOS%20DE%20CAMBIO%20CLIM%C3%81TICO%20COLOMBIA%202011%20-%202100.pdf>

García-Valdecasas, M. (2018, 2 noviembre). Arcimís: Proyecciones regionales de variables hidrológicas para la Península Ibérica. <https://repositorio.aemet.es/>.
<https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9980>

Amador, J. (09-02-17). *Vista do Métodos de redução: aplicações ao clima, clima, variabilidade climática e mudanças climáticas*. <https://redibec.org/>.
<https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/260/135>

Alarcón

, L. B. (2017, 28 marzo). *En 30 años, Colombia se quedaría sin nevados*. El Tiempo.
<https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/deshielo-de-glaciares-en-colombia-72050>

IDEAM. (2019). *GLACIARES EN COLOMBIA - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/>.

59

<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/glaciares-colombia>

IDEAM. (2019a). *CAMBIO CLIMÁTICO - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/>.

<http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>

Santiago Lastra, J. (2008). TENDENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y LOS EVENTOS EXTREMOS ASOCIADOS. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 4(3), 625-629. <http://uaim.edu.mx/>

Jebeile, J. (2020). Values and Objectivity in the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Social Epistemology*, 34(5), 453-468. <https://doi.org/10.1080/02691728.2020.1779380>

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2009, 17 septiembre). *Mapa Físico de Colombia - Tamaño completo | Gifex*. https://www.gifex.com/fullsize/2009-09-17-2031/Mapa_Fisico_de_Colombia.html. https://www.gifex.com/fullsize/2009-09-17-2031/Mapa_Fisico_de_Colombia.html

DPN (Departamento de Planeación Nacional). (2019). *Objetivos de desarrollo sostenible*.

<https://www.ods.gov.co/es/objetivos/accion-por-el-clima>.

<https://www.ods.gov.co/es/objetivos/accion-por-el-clima>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. 2015. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

<http://atlas.ideam.gov.co/>. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

