



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y
TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN EL
DISTRITO DE TURBO, COLOMBIA**

Autores:

Ayda Luz Mercado Fuentes

Tania Hernández Correa

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Corporación Académica Ambiental

Turbo, Colombia

2020



Estimación de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el distrito
de Turbo, Colombia

Ayda Luz Mercado Fuentes

Tania Hernández Correa

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

Ingeniera Oceanográfica

Oceanógrafa

Asesor:

Vladimir G Toro Valencia

Ingeniero Civil, PH. D Oceanografía Física

Co-Asesor:

Joany Sánchez Molina

Ingeniero Magister en Recursos Hidráulicos.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental

Corporación Académica Ambiental

Turbo, Colombia

2020.

DEDICATORIA

A Dios y al universo, fuentes de energía e inspiración, a mi hija quien con ternura hace brotar de mí los más sinceros sentimientos. A Ubaldo, quien me ayudó a forjar mi carácter, y por supuesto, no por menos, a mis bellos padres; Orlando y Trini, a quienes amo profundamente y por quienes siento una gran admiración. No puedo dejar detrás mis grandes amigos y compañeros de viaje que encontré en mi Alma Máter; la que llevaré por siempre en el corazón. A mis profesores que no solo me enseñaron, sino que también me inspiraron a seguir y a ser mejor.

Ayda.

Principalmente a Dios, por haberme dado la gran oportunidad de haber llegado hasta este punto de mi formación profesional. A mi madre Doralba Correa, por ser el pilar más importante y por darme su cariño y apoyo incondicional sin importar las dificultades. A mis hermanos por su apoyo y compañía en todo este proceso. A mis familiares y hermanos en Cristo por sus oraciones y respaldo en lo corrido de la carrera y a mis docentes y compañeros de formación profesional que me guiaron, formaron y acompañaron en todo este proceso de formación, por el conocimiento impartido, por la ayudada brindada y por los consejos que me enseñaron y me permitieron ser mejor persona y a la Universidad de Antioquia por esta gran oportunidad.

Tania

AGRADECIMIENTOS

A nuestros asesores de tesis; el profesor Vladimir G. Toro y el Ingeniero Joany Sánchez, que estuvieron acompañándonos a lo largo de este proyecto y que a través de sus conocimientos y tiempo brindado hicieron de este trabajo, un trabajo mejor.

Al proyecto Gotas de Lluvia, Semillas de Ciencia; a los docentes y estudiantes que hicieron parte de este gran proyecto y a la Universidad de Antioquia, que con su apoyo y aporte hicieron real el desarrollo y resultado de esta investigación.

A nuestros familiares por su apoyo incondicional, no solo económico, sino también por sus palabras alentadoras, esas que forjaron nuestro carácter y nos permitieron ver que siempre se puede.

A cada uno de los profesores de nuestra sede Ciencias del Mar por las enseñanzas impartidas, por los lazos y vínculos creados, por sus correcciones, por enseñarnos que este es solo el inicio de cosas grandes que conllevan esfuerzo pero que valen cada minuto dedicado, en especial al profesor Fernando Parra y Cecilia Bustamante que con su exigencia nos enseñaron que puedes hacer más de lo que piensas.

A nuestro compañero Ferney Orejuela Moreno por sus asesorías y ayuda en el lenguaje de programación de MatLab.

A nuestros amigos y compañeros de la universidad por la motivación, por la compañía y ayuda brindada, por las risas y lágrimas, y por todos y cada uno de los momentos que compartieron con nosotros.

Y por todos aquellos que no se mencionan nombre a nombre porque no terminarían nuestros agradecimientos, pero que saben que hicieron parte directa e indirectamente de este trabajo, de corazón gracias.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo general.....	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. MARCO TEÓRICO.....	12
4. METODOLOGÍA	13
4.1 Descripción del área de estudio.....	13
4.2 Datos	14
4.2.1 Datos in situ	14
4.2.2 Datos satelitales	16
4.3 Sistema de mediciones in situ.....	18
4.4 Sistema de medición remota	20
4.5 Cálculos estadísticos	20
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	21
5.1 Series de tiempo de las estaciones <i>in situ</i>	23
5.1.1 Estaciones in situ zona norte.....	23
5.1.2 Estación <i>in situ</i> zona sur	24
5.1.3 Datos <i>in situ</i> estación sur vs. estación norte.....	25
5.1.4 Zonas aledañas al sur del casco urbano del distrito.....	26
5.1.5 Serie de tiempo casco urbano vs zonas aledañas.	27
5.2 Series de tiempo de las bases de datos.....	29
5.3 Datos <i>in situ</i> vs. bases de datos	30
5.4 Serie de tiempo decadal (CHIRPS).....	36
6. CONCLUSIONES.....	39
7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	39
8. REFERENCIAS.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del distrito de Turbo. Ubicación referida a Colombia y a la región de Urabá.	14
Figura 2. Mapa de localización geográfica de las estaciones pluviométricas in situ del proyecto “Gotas de lluvia, semillas de ciencia”.	15
Figura 3. Pluviómetros. A. Pluviómetro casero y B. Pluviómetro Calibrado.	15
Figura 4. Esquema del satélite e instrumentos de la misión TRMM. Tomado de National Aeronautics and Space Administration (NASA,2015).	17
Figura 5. Ruta realizada por el satélite TRMM, desplazamiento entre los 35°N y los 35°S (NASA,2015). Tomado de: https://pmm.nasa.gov/TRMM/quicklooks-at-TRMM-orbits	18
Figura 6. Gráfico de dispersión de los datos tomados con los 2 pluviómetros (puntos azules). Línea roja: línea de tendencia; línea azul: línea de ajuste perfecto. Se muestra la ecuación de ajuste y el valor del coeficiente de correlación R2.	22
Figura 7. Series de tiempo diarias de las estaciones in situ en la zona norte del Distrito de Turbo.	24
Figura 8. Serie de tiempo de la estación in situ en la zona Sur del Distrito de Turbo.	25
Figura 9. Serie de tiempo diaria de la estación Sur vs. estación Norte dentro del casco Urbano del distrito de Turbo.	25
Figura 10. Serie de tiempo de la estación in situ El Tres, en la zona aledaña al Sur del Distrito de Turbo, corregimiento de El Tres.	26
Figura 11. Serie de tiempo de la estación in situ Currulao, en la zona aledaña al Sur del Distrito de Turbo, corregimiento de Currulao.	27
Figura 12. Comparación de los datos in situ de las estaciones norte y sur en el casco urbano (Buenos aires y Jesús mora) vs las estaciones localizadas en las zonas aledañas al sur del casco urbano (El Tres y Currulao) del Distrito.	28
Figura 13. Serie de tiempo del modelo CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km).	29
Figura 14. Serie de tiempo de la base de datos TRMM, resolución 0.25° (28 km).	30
Figura 15. Comparación de los datos in situ (estaciones norte y sur y por fuera del Distrito) vs. bases de datos CHIRPS y TRMM.	31
Figura 16. Comparación base de datos CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km) vs representación estación in situ barrios Norte del casco urbano del Distrito.	32
Figura 17. Comparación base de datos TRMM, resolución espacial 0.25° (28 km) vs representación estación in situ barrios norte del casco urbano del Distrito.	33
Figura 18. Comparación base de datos CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km) vs representación estación in situ barrios Sur del casco urbano del Distrito.	33
Figura 19. Comparación base de datos TRMM, resolución espacial 0.25° (28 km) vs representación estación in situ barrios Sur del casco urbano del Distrito.	34

Figura 20. Comparación base de datos CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km) vs representación estación in situ zona aledaña al Sur del casco urbano del Distrito.	34
Figura 21. Comparación base de datos TRMM, resolución espacial 0.25° (28 km), vs representación estación in situ zona aledaña al Sur del casco urbano del Distrito.	35
Figura 22. Serie de tiempo mensual entre 1981 y 2019 de la base de datos CHIRPS.	36
Figura 23. Promedio mensual multianual de precipitación entre 1981 y 2019 de la base de datos CHIRPS.	37
Figura 24. Transformada mensual, para la serie de tiempo mensual entre 1981 y 2019 de datos de la base de datos CHIRPS.	37
Figura 25. Valores de precipitación mensual multianual con base en el índice ONI.	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fases de medición in situ.....	19
Tabla 2. Estaciones in situ, distribuidas en el Distrito de Turbo.	20
Tabla 3. Valores acumulados de precipitación mensual medidas por cada una de las estaciones en mm, desde diciembre de 2018 hasta septiembre de 2019.	22
Tabla 4. Picos máximos de precipitación para los 6 eventos más significativos registrados por las 10 estaciones de medición in situ. El color amarillo representa el evento de mayor valor medido y el color verde representa valores representativos de medición por debajo del mayor valor medido y por encima de los 100 mm/día para cada estación.	28

SIGLAS

CERES: Sistema de energía radiante de la tierra y de las nubes.

CHRIPS: *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data.*

CNS: Colegio Normal Superior.

CSM: Colegio San Martin.

CSJS: Colegio San José de la Salle.

IDEAM: Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales.

IES: Instituciones de Educación Secundaria.

JAXA: Agencia Aeroespacial Japonesa.

LIS: Sensor de imágenes de relámpagos.

NASA: Administración Nacional de la aeronáutica y el espacio.

PR: Radar de precipitación.

TRMM: *Tropical Rainfall Measuring Mission.*

TMI: Sensor de Imágenes por microondas.

VIRS: Escáner visible e infrarrojo.

GLOSARIO

Área: Es la superficie o región que se delimitan a partir de determinadas características, geográficas o físicas.

Banda espectral: Son las longitudes de ondas ínfimas, rayos x y gamma. se encargan de demarcar un blanco y los valores que registran se expresan en unidades de frecuencia.

Latitud: Distancia angular que hay desde un punto de la superficie de la tierra hasta el paralelo del ecuador; se mide en grados, minutos y segundos sobre los meridianos.

Longitud: Es la dimensión que atraviesan el globo terráqueo de norte a sur, pero se miden de este a oeste empezando en el meridiano cero.

Pluviómetro: Instrumento para medir la cantidad de lluvia que cae en un lugar y en un espacio de tiempo determinados; el agua recogida por él se mide en litros o milímetros por metro cuadrado.

Régimen de lluvia: Es el comportamiento de las lluvias a lo largo del año, promediando el monto de las precipitaciones (lluvias, nieve, granizo convertidas a mm de lluvia) obtenidas a lo largo de un número considerable de años.

Régimen de lluvia monomodal: Se refiere a la sucesión de estaciones secas y lluviosas en los trópicos y se caracteriza por una estación seca y una de lluvias al año, esto significa que tiene solamente un máximo bien definido en el año, prácticamente entre abril y noviembre.

Resolución espacial: Es la capacidad que tiene el satélite de generar información en una zona determinada según su alcance y resolución. esta resolución está dada por el tamaño del píxel, y entre menor sea el tamaño del pixel hay mayor información en la imagen satelital.

Resolución temporal: Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir, cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

Tasa de precipitación: Es un coeficiente que define la cantidad de agua líquida o sólida que cae desde las nubes sobre la superficie de la tierra, en forma de llovizna, lluvia, nieve, granizo, agua nieve, y lluvia congelada en cierta unidad de tiempo.

RESUMEN

El monitoreo de las variables climáticas, y de manera específica de la precipitación, en lugares con topografía plana, permite identificar las áreas que son propensas a inundarse. Con el cambio climático, el ciclo hidrológico está presentando variaciones, afectando ecosistemas y poblaciones humanas. Un adecuado monitoreo del clima permite, entre otras cosas, tomar decisiones territoriales que influyen en la economía, calidad de vida de las personas y en el diagnóstico de eventos hidroclimatológicos extremos. Teniendo en cuenta que el Distrito de Turbo presenta problemas de inundaciones debido a eventos de lluvia extremos o no tan extremos pero prolongados, se propuso estimar la distribución espacial y temporal de la precipitación en el casco urbano del Distrito de Turbo y algunas zonas aledañas al mismo. Alrededor de 40 estudiantes se capacitaron en la medición de la precipitación bajo el marco del proyecto “Gotas de lluvia, Semillas de ciencia”, construyendo pluviómetros caseros, que fueron reemplazados posteriormente por pluviómetros calibrados, diseñados por la Universidad de Antioquia y utilizados por Corantioquia en el Programa Integral Red de Agua (PIRAGUA). Las mediciones de precipitación se realizaron con una frecuencia de 12 horas, desde diciembre de 2018 hasta septiembre de 2019. De otro lado y con el fin de realizar un análisis a una mayor escala espacial, se utilizaron datos satelitales de TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) y salidas del modelo CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) entre diciembre de 2018 y septiembre de 2019. Los resultados sugieren una buena correlación entre los datos medidos y los de las bases de datos. En general, se identificaron dos temporadas debidamente diferenciadas: una época seca (diciembre - marzo), una época húmeda (abril-septiembre, mes hasta donde se realizaron mediciones) y una de transición donde se evidenció un leve descenso en los niveles de precipitación (junio- julio). Con los datos consolidados, se logró identificar el comportamiento y la distribución espacial y temporal de la lluvia en el casco urbano de Turbo y algunas de sus zonas aledañas.

Palabras claves: Clima, precipitación, pluviómetro, imágenes satelitales, series de tiempo.

1. INTRODUCCIÓN

Monitorear la lluvia es de vital importancia, no solo para la toma de decisiones territoriales que influyen en la economía y en la calidad de vida de las personas, sino también para el diagnóstico de eventos hidroclimáticos extremos (IDEAM- UNAL, 2018). Se ha evidenciado que el cambio climático ha generado reducciones y aumentos en la precipitación anual y en la frecuencia de los eventos de lluvia (Pabón, 2012). Sin embargo, los registros de precipitación en muchas regiones de Colombia no son suficientes y adecuados para llevar a cabo estudios rigurosos de su comportamiento.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), es el ente encargado del manejo de la información meteorológica. El IDEAM cuenta con una serie de estaciones distribuidas en diferentes partes del país, las cuales proporcionan datos relacionados con el clima, entre ellos la precipitación (IDEAM - UNAL, 2018). De acuerdo con el Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM de 2019, existen alrededor de 8.858 estaciones en todo el país, en la región de Urabá hay aproximadamente 25 estaciones meteorológicas localizadas en los diferentes municipios que la conforman. El municipio de Mutatá cuenta con 1 estación, Chigorodó con 5, Carepa con 3, Apartado con 4 y el Distrito de Turbo con 12 estaciones, la mayoría con numerosos registros y series de datos faltantes y algunas fuera de servicio. En el caso del casco urbano del distrito de Turbo y de algunas zonas aledañas al mismo, es decir; en el área de estudio, solo se conoce de la existencia de una estación de medición climática, localizada en el antiguo Aeropuerto de Turbo, la cual se encuentra fuera de servicio y sin acceso a los datos. De igual forma se desconoce la existencia de estaciones de otras instituciones. La escasa presencia de estaciones a nivel nacional y regional afecta estudios adecuados de la distribución de la lluvia; debido a que los procesos climáticos de la región son diversos, presentando diferencias en la distribución, el comportamiento y la frecuencia de la lluvia entre los municipios vecinos de la misma región e inclusive dentro del mismo municipio, sin importar la extensión territorial que este posea.

Pabón y Eslava, (2001) establecieron que en las llanuras del Caribe la precipitación aumenta del litoral hacia el interior, oscilando entre 1.500 mm y 2.500 mm en el litoral de Urabá. Así mismo, Guarín (2011) Encontró un gradiente latitudinal de la precipitación en el eje bananero; observó que por cada km que se recorre desde el municipio de Chigorodó hacia al norte de la región existe una reducción media de las tasas de precipitación anuales de aproximadamente 34mm. Sin embargo, hay que tener en cuenta lo encontrado por Pabón (2012) el cual descubrió que la precipitación anual en la segunda mitad del siglo XX ha venido presentando cambios diferenciado por regiones, con reducción de diversa magnitud en los sectores de la región Caribe, debido al cambio climático.

En cuanto a la distribución de la precipitación Jaramillo y Chaves, (2000) encontraron que en las regiones de influencia directa de los alisios del Norte como son las Llanuras del Caribe, se presenta una distribución unimodal con un período seco definido entre diciembre y marzo, con las mayores cantidades de lluvia en los meses de octubre y noviembre, mientras que Pabón y Eslava, (2001) establecieron para la región Caribe, un patrón general de distribución durante al año Cuasimonomodal (o cuasibimodal). Cabe mencionar, aunque la zona de Urabá está inmersa dentro de la región Caribe, Guarín (2011) encontró que las estaciones meteorológicas ubicadas al sur del eje bananero poseen una mayor correlación con las variables asociadas al océano Pacífico, mientras que las estaciones ubicadas al norte, presenta mayores valores del coeficiente con las variables asociadas al océano Atlántico.

Con respecto a la región de Urabá, según el IGAC (2007), la distribución de la precipitación en la región de Urabá posee una alta variabilidad, debido en gran medida a la cercanía al mar, el régimen de vientos y probablemente a la orografía. Las lluvias tienen comportamiento monomodal, con una época de lluvias (de mayo a noviembre) y una época seca (de diciembre a abril). Sin embargo, existen lugares que presentan una mayor tasa de precipitación que otras, al parecer independientes de la época climática. Más tarde, CORPOURABA (2009) estableció que, en las áreas urbanas de los municipios de la región, se han incrementado los riesgos causados por eventos extremos de lluvia como inundaciones, erosión fluvial, inestabilidad de taludes y movimiento en masa. Así mismo; Guarín (2011) concluyó que la ocurrencia de las fases del ENSO, de manera específica el Niño, afecta fuertemente el volumen anual de precipitación en el eje bananero, anomalías que se evidencian en una disminución en la producción del banano. Encontró además que tanto el déficit como el exceso de humedad en el terreno son causa de problemas en el desarrollo del cultivo de banano.

Lo anterior muestra como los procesos climáticos y en especial la lluvia intervienen de manera importante en la producción agrícola y comercial de la región. Muestra también la importancia de conocer cómo se presentan estos procesos, más aún cuando en la región de Urabá la lluvia muestra diferencias en la distribución, comportamiento y frecuencia. Se planteó entonces como hipótesis, el distrito de Turbo presenta diferencias en las tasas de precipitación; en el sector Sur existe una mayor tasa de precipitación comparado con el sector Norte.

Por tal motivo, en esta investigación se propuso realizar la estimación de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el casco urbano del distrito de Turbo y algunas zonas aledañas, mediante el procesamiento y análisis de datos de precipitación provenientes de estaciones pluviométricas *in situ* y de

imágenes satelitales. Las bases de datos satelitales corresponden a los modelos CHIRPS y TRMM y los datos *in situ* fueron medidos por la red pluviométrica del proyecto “*Gotas de lluvia, semillas de ciencia*” financiado por la Vicerrectoría de Extensión de la Universidad de Antioquia. En el marco de este proyecto se realizó la medición de la precipitación en colaboración de aproximadamente cuarenta (40) estudiantes de tres (3) instituciones de educación secundaria del Distrito de Turbo. Cada uno de los estudiantes midió la lluvia con un pluviómetro casero durante un periodo de ocho (8) meses y posterior a este se midió con pluviómetros calibrados durante un periodo de dos (2) meses; los datos de precipitación corresponden a acumulados de doce (12) horas, durante un periodo total de diez (10) meses, iniciando en diciembre de 2018 y finalizando en septiembre de 2019.

En cuanto a la información utilizada de las bases de datos, se usó un periodo comprendido entre diciembre de 2018 y septiembre de 2019, es decir, el mismo periodo comprendido para las mediciones *in situ*. Los datos de CHIRPS tienen una resolución espacial de 5 x 5 km y temporal diaria, mensual y anual. Los datos de TRMM una resolución espacial de 28 x 28 km y temporal diaria, mensual y anual. Se obtuvo de esta forma una caracterización del comportamiento de la precipitación con una resolución espacial mayor con los datos satelitales y con los datos *in situ* información en una escala espacial más fina. Los resultados obtenidos en este trabajo se esperan puedan ser utilizado más adelante para una correcta identificación de las zonas de inundación producidas por eventos de lluvia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estimar la distribución espacio-temporal de la precipitación en el distrito de Turbo, a través de la realización de campos de precipitación con base en información *in situ* y satelital.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar en una escala temporal más amplia el comportamiento del fenómeno (precipitación) a través de información satelital.
- Valorar la distribución espacial de lluvia en el municipio de Turbo, a través de la obtención de datos de la red pluviométrica (medición de lluvia) de bajo costo.

- Identificar las zonas de mayor y menor tasa de precipitación en el área de estudio, a través de campos de precipitación mensuales y anuales y de la comparación de los datos de las mediciones in situ y las mediciones satelitales.

3. MARCO TEÓRICO

La precipitación es un proceso complejo en el que influyen las condiciones atmosféricas locales y de carácter sinóptico o de gran escala, así como las condiciones ambientales y orográficas. Este último es uno de los factores que más interviene y puede provocar variaciones locales de la precipitación (Salazar, 2010). Colombia por ser un país altamente montañoso presenta una gran variedad de climas y valores diferenciados de precipitación (Pabón y Eslava, 2001).

Una de las regiones de mayor pluviosidad en Colombia es la zona nor-occidental en donde está incluida la región de Urabá. Esta región se encuentra bajo la influencia de la zona de circulación ecuatorial, caracterizada por una franja de baja presión denominada zona de convergencia intertropical (ZCIT). En el nor-occidente de Colombia, la ZCIT es modulada por la convergencia de los vientos del nordeste, provenientes del mar Caribe en época seca, y los vientos del sudoeste que penetran en el territorio colombiano por la costa Chocoana durante el periodo abril a noviembre. Esto genera un flujo de humedad en dirección sur-norte hacia el golfo sobre la cuenca del río Atrato (García et al., 2007).

Cuando la ZCIT alcanza su posición más meridional, la región se ve sometida a un régimen de altas presiones con vientos superficiales provenientes del norte que atraviesan la región en sentido noroeste y con velocidades superiores a los 15 km/h, produciéndose un período de menor cantidad de lluvias. Cuando alcanza su posición más septentrional, la región es sometida a la influencia de masas de aire húmedas que se desplazan en sentido sur sureste, provenientes del océano Pacífico que originan lluvias más frecuentes (Guarín, 2011). Esta oscilación concuerda con las dos épocas climáticas que gobiernan la región de Urabá, una época seca (diciembre a abril) y una época húmeda (mayo a noviembre). En los meses de junio y julio se presenta una etapa de transición de la época seca a la lluviosa. El valor promedio anual de precipitación es de 2.500 mm y la región posee distribución mensual monomodal (García et al., 2007).

Guarín (2011) señala a una escala interanual, eventos como fenómeno de El Niño; Oscilación del Sur (ENSO) que provocan mayores anomalías en las precipitaciones. La fase positiva (El Niño) provoca una leve disminución en la precipitación y un leve aumento en la temperatura. La fase negativa (La Niña) por el contrario aumenta la

precipitación y disminuye la temperatura media. Hay que tener en cuenta además que existen evidencias que el cambio climático afecta la intensidad y frecuencia con que se presenta el ENSO y por lo tanto las lluvias. La ocurrencia de las fases del ENSO afecta fuertemente el volumen anual de precipitación en el eje bananero, anomalías que se evidencian en una disminución en la producción del banano, en el caso de la fase de El Niño.

De otro lado, es importante resaltar que los campos o mapas de precipitación son una herramienta de gran utilidad para el entendimiento e identificación de patrones que permitan comprender y observar la intensidad, distribución y/o variabilidad espacio temporal de la precipitación en un área específica, bien sea en un periodo diario, semanal, mensual y anual. La calidad de un campo de precipitación que se obtiene empleando un método de estimación espacial, está estrechamente ligada con la cantidad, calidad y distribución de los datos (Hurtado, 2009).

4. METODOLOGÍA

4.1 Descripción del área de estudio

El municipio de Turbo está localizado al noroeste del departamento de Antioquia, en la llamada zona del Urabá antioqueño. Geográficamente se encuentra aproximadamente en la posición 08° 05' de latitud Norte y 76° 44' de longitud Oeste (Figura 1), con una altura promedio de 2 metros sobre el nivel del Mar (CIOH, 2009). Tiene una extensión territorial de 3.055 km², siendo así el municipio más grande de Antioquia, conformado por 17 corregimientos y 230 veredas. Además cuenta con una población de 159.268 habitantes (Población Urbana: 63.505 y Rural: 95.765) de acuerdo a las Proyecciones Estadísticas por Municipio (Acevedo, 2014).

Turbo posee un clima tropical húmedo, con una temperatura media de 28°C y precipitaciones anuales entre 2000 y 2500 milímetros, generadas principalmente por la presencia de un sistema de baja presión casi permanente (CIOH, 2009). La región cuenta principalmente con dos épocas climáticas, una época seca que por lo general se establece desde diciembre hasta mediados de abril y una época húmeda entre mayo y noviembre. A mediados del año se presenta una leve disminución de los valores pluviométricos en los meses de junio y julio con respecto a los registrados en la época seca a la cual se le denomina etapa de transición. El distrito de Turbo se caracteriza por la riqueza hídrica, que en gran parte determina su biodiversidad y ecosistemas; entre las cuales se encuentran los ríos Atrato, León, Turbo, río Grande y Mulatos (Acevedo, 2014).

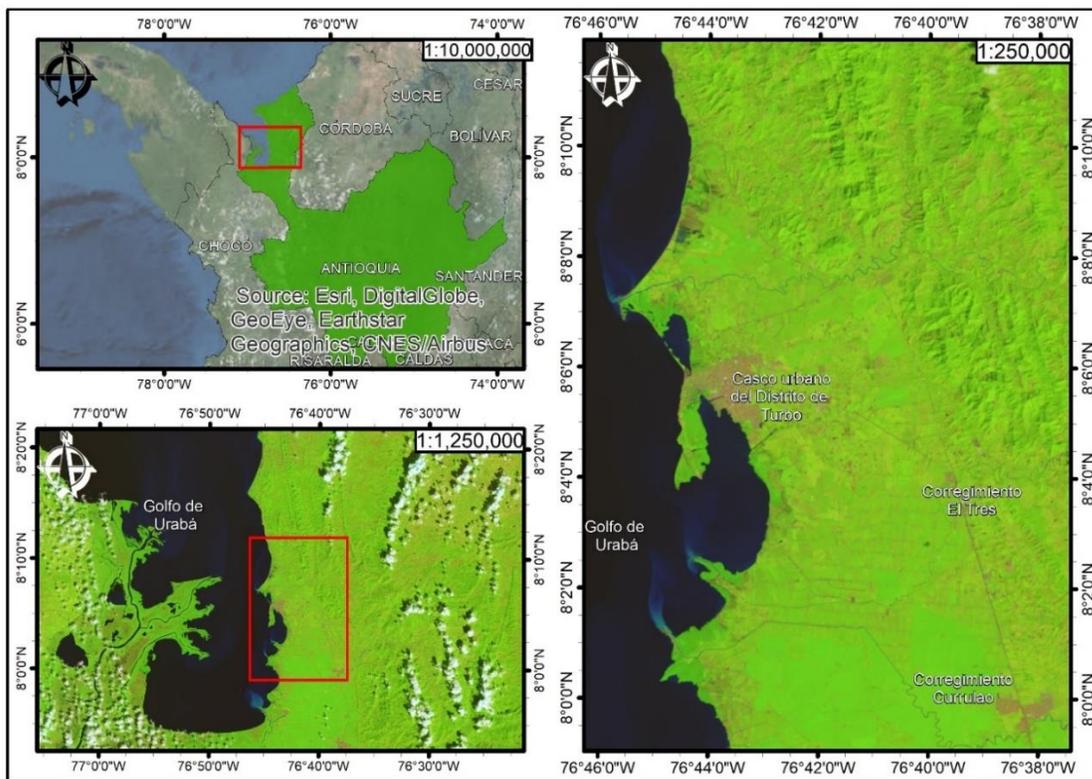


Figura 1. Localización geográfica del distrito de Turbo. Ubicación referida a Colombia y a la región de Urabá.

4.2 Datos

4.2.1 Datos in situ

Los datos *in situ* fueron proporcionados por la red de monitoreo pluviométrica del proyecto “*Gotas de lluvia, semillas de ciencia*”, financiado por la Vicerrectoría de Extensión de la Universidad de Antioquia. En este proyecto se obtuvieron datos de lluvia en cuarenta (40) estaciones distribuidas aleatoriamente al norte y al sur del área de estudio (figura 2).

Las estaciones mostradas en la Figura 2 fueron administradas por cada uno de los estudiantes que participaron en el proyecto, con una frecuencia de medición de doce (12) horas, es decir, dos datos por día. Los estudiantes pertenecían a tres (3) Instituciones de Educación Secundaria (IES) del distrito de Turbo y de algunas zonas rurales aledañas como el corregimiento de El Tres y Currulao.

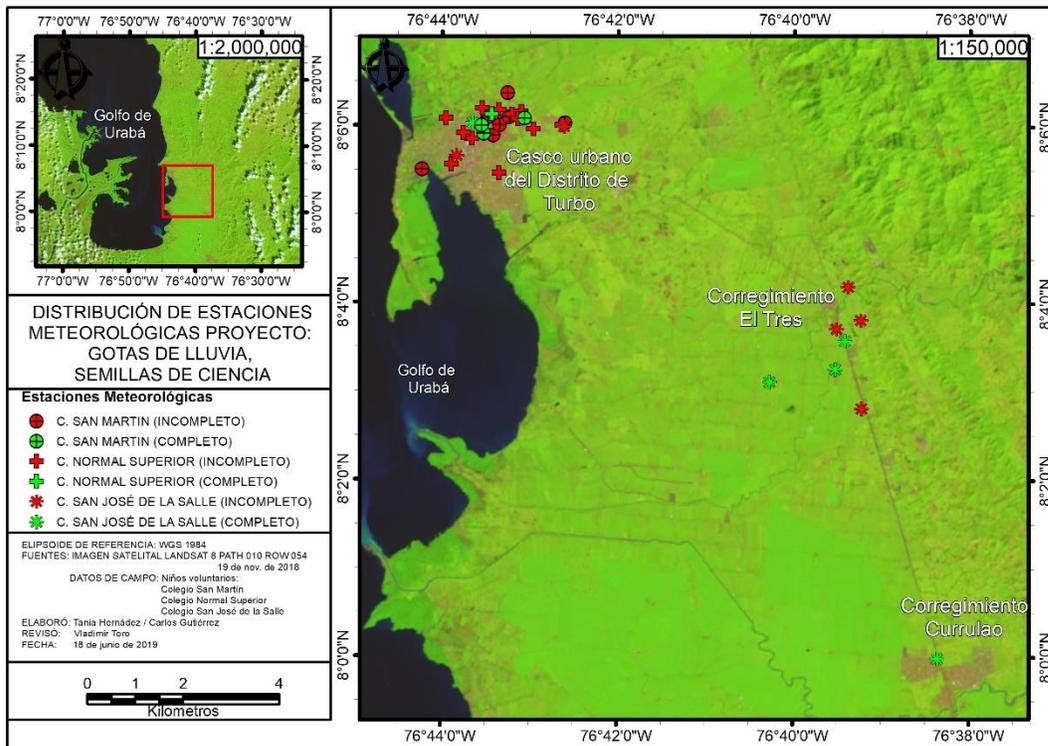


Figura 2. Mapa de localización geográfica de las estaciones pluviométricas in situ del proyecto “Gotas de lluvia, semillas de ciencia”.



Figura 3. Pluviómetros. A. Pluviómetro casero y B. Pluviómetro Calibrado.

Las mediciones se realizaron de acuerdo al instrumento implementado, en dos (2) fases; en la fase 1 las mediciones se realizaron con pluviómetros caseros (figura 3A), los cuales fueron elaborados de forma manual por cada uno de los estudiantes con asesoría del personal de la Sede de Ciencias del Mar. Para esto, se usaron botellas reciclables de 2 y 3 litros de la misma marca comercial con el fin de minimizar las variaciones de las mediciones realizadas. En general, las botellas tenían una altura de 35 cm y un diámetro de 12 cm, la parte inferior era de forma irregular y la parte superior tenía una estructura cónica; esta última parte fue recortada y ubicada como embudo en la parte cilíndrica y sirvió como captador de agua o boca del pluviómetro. Este pluviómetro se diseñó y usó de tal manera que sirvió para la adaptación, y sensibilización de los estudiantes frente a las mediciones.

En la fase 2, los pluviómetros caseros fueron remplazados por pluviómetros calibrados, también llamados “luviómetros” (figura 3B). El diseño de este pluviómetro fue realizado por la Universidad de Antioquia para el programa PIRAGUA financiado por CORANTIOQUIA. Este instrumento tiene una altura de 25 cm y un diámetro de 6 cm y fue calibrado en el marco del proyecto mencionado. Estos pluviómetros fueron instalados durante el segundo semestre del año 2019, bajo el mismo protocolo de medición de los pluviómetros caseros.

Las mediciones realizadas con ambos pluviómetros (caseros y calibrados) tuvieron una frecuencia de medición de doce (12) horas durante un periodo de diez (10) meses, iniciando en diciembre de 2018 hasta septiembre de 2019. La unidad que se utiliza para medir la precipitación o volumen de lluvia es el milímetro (mm), donde un milímetro equivale a un litro de agua por metro cuadrado (IDEAM, 2016).

4.2.2 Datos satelitales

4.2.2.1 TRMM

La medición pluviométrica *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM por sus siglas en inglés), es obtenida a partir de equipos ubicados en un satélite lanzado a finales de 1997 (figura 4), bajo la iniciativa de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA). Este equipo fue diseñado para monitorear y medir la distribución vertical de las precipitaciones en los trópicos y subtrópicos en una banda de 35° al norte y 35° al sur y una Longitud 180° O y 180° E (NASA, 2015).

El satélite fue diseñado para recorrer toda la zona tropical a una velocidad de 7,3km/s desde una altura de 403 km, cubriendo a lo ancho y largo las latitudes ya antes mencionadas (figura 5), Proporciona imágenes satelitales con una resolución

espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ que equivale a una celda de 28 x 28 kilómetros aproximadamente.

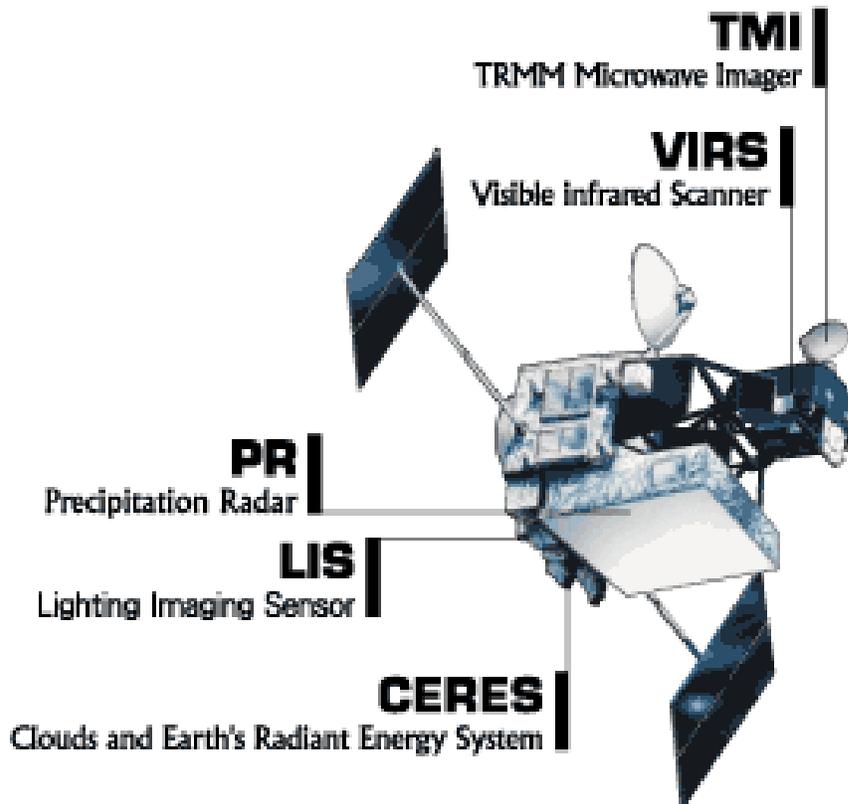


Figura 4. Esquema del satélite e instrumentos de la misión TRMM. Tomado de National Aeronautics and Space Administration (NASA,2015).

En la figura 4 se observa la estructura del satélite TRMM y los instrumentos que componen al mismo y que permiten su funcionamiento, instrumentos que proporcionan de manera integrada información satelital de las variables climáticas, así como de su comportamiento en las latitudes y longitudes ya antes mencionadas, la estructura del satélite está conformada por una serie de radares, sensores, escáneres, entre otros, estos son:

- Radar de precipitación (PR)
- Imágenes por microondas (TMI)
- Escáner visible e infrarrojo (VIRS)
- Sistema de energía radiante de la tierra y de las nubes (CERES)
- Sensor de imágenes de relámpagos (LIS)

De la misión TRMM, se escogió el producto llamado TRMM 3B42RT daily V7, el cual proporciona registros diarios, lo cual facilita la comparación con los datos *in situ*. Los datos de este producto fueron transformados en series de tiempo de tipo mensual, lo cual facilita el análisis de la información, así como de su uso.

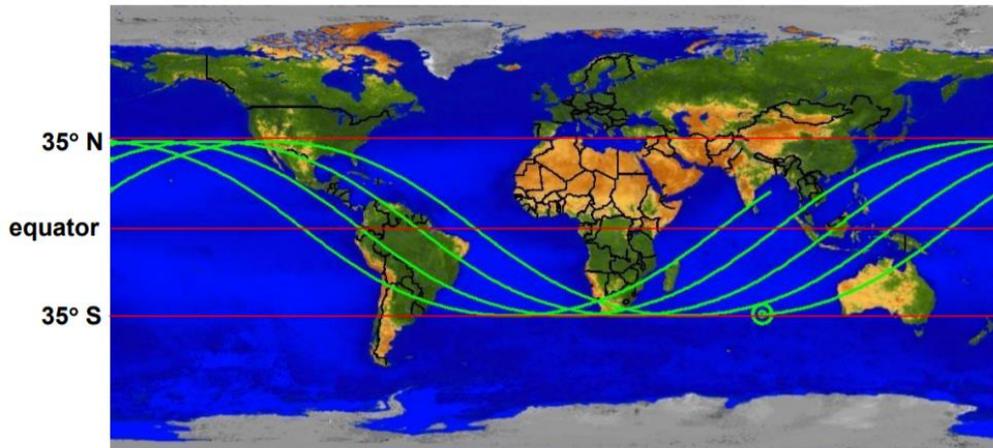


Figura 5. Ruta realizada por el satélite TRMM, desplazamiento entre los 35°N y los 35°S (NASA,2015). Tomado de: <https://pmm.nasa.gov/TRMM/quicklooks-at-TRMM-orbits>

4.2.2.2 CHIRPS

Los datos de *Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with Station data* (CHIRPS, por sus siglas en inglés) fue creada y es administrada por el U.S. *Geological Survey* (USGS, por sus siglas en inglés) y *University of California, Santa Bárbara*. Son resultado de una modelación cuasi global de precipitación de 38 años calibrados con datos *in situ*, desde 1981 hasta el presente y una extensión espacial con datos únicamente en las zonas terrestres, con un alcance comprendido entre las latitudes 50° S y 50° N y en todas las longitudes. Los datos de CHIRPS tienen una resolución espacial de 0.05° que equivale a una celda de 5 x 5 kilómetros aproximadamente. Las resoluciones temporales son de días a años. (Urrea, Ochoa, y Mesa, 2016). CHIRPS incorpora dentro de sus datos mediciones de precipitación a través de imágenes satelitales, estaciones de medición *in situ* y datos históricos.

4.3 Sistema de mediciones in situ

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó la información de la red pluviométrica del proyecto “*Gotas de lluvia, semillas de ciencia*” (proyecto BUPPE 2017-17826). Las mediciones fueron realizadas con una frecuencia de doce horas durante un periodo de diez meses. Este periodo se dividió en dos fases; Fase I y

Fase II (tabla 1). Estas fases están relacionadas con los pluviómetros utilizados para la medición.

Tabla 1. Fases de medición *in situ*

Fase	Periodo de medición	Pluviómetro Utilizado
Fase I	Diciembre de 2018 a julio de 2019	Casero
Fase II	Agosto a septiembre del 2019	Calibrado

Con el fin de que las mediciones de las dos fases estuvieran en un mismo nivel de referencia, se realizaron pruebas estadísticas para normalizar todos los datos. Para estos se utilizó dos estaciones que permitieron comparar mediciones de la segunda fase de manera simultánea con el pluviómetro casero y calibrado. Estas dos estaciones a cargo de los coordinadores contaron con mediciones completas y se les llamó estaciones “madres”. Se realizó un ajuste a los datos de los pluviómetros casero y calibrado a través de un gráfico de dispersión.

Es de notar que, de las 40 estaciones analizadas inicialmente, se seleccionaron 10 estaciones (8 del casco urbano y 2 de zonas aledañas al sector sur del distrito). Estas estaciones se seleccionaron teniendo en cuenta la calidad y continuidad de los datos, ubicación espacial y una distancia no mayor a 3 km con las demás estaciones. Se tomó esta determinación debido a la no continuidad de algunas estaciones con periodos superiores a las 2 semanas, mediciones con datos altos en comparación con las estaciones madres, entre otros factores. Con el fin de no desechar la información de las estaciones que presentaron estos inconvenientes se utilizó un promedio de los datos.

Las estaciones seleccionadas/compiladas se presentan en la tabla 2. El total 10 estaciones, de las cuales ocho corresponden a algunos barrios del casco urbano y las otras dos estaciones corresponden a dos corregimientos (El Tres y Currulao), localizados al sur del Distrito. Se muestran los nombres de las instituciones y estudiantes/coordinadores a cargo de la estación y el barrio correspondiente.

Por supuesto, entre más información medida *in situ* y con una mejor distribución espacial, la definición del campo de lluvia será más adecuado. De acuerdo con lo presentado hasta ahora el número de estaciones solo permitirán caracterizar la zona cercana al caso urbano del Distrito. Con el fin de tener información de un campo espacial a una escala menor y realizar comparaciones con otros datos medidos se utilizó información de sistemas de medición remota.

Tabla 2. Estaciones *in situ*, distribuidas en el Distrito de Turbo.

Colegio	Encargado de la estación	Latitud (Y)	Longitud (X)	Nombre dado a la estación
CNS	Aitna Sofia Plaza	8,102	-76,723	Julia Orozco
CNS	Melany Riaño	8,098	-76,721	Instituto
CSM	Sara Mosquera H	8,101	-76,716	La Lucila
CSJS	Tania Hernández	8,100	-76,727	Jesús Mora
CSM	Carlos Iván Valoyes	8,093	-76,732	Buenos Aires
CSM	Alexandra Restrepo	8,097	-76,720	Monterrey 1
CSM	Gabriela Miranda	8,102	-76,717	Hoover Quintero
CSM	Josue Rodriguez	8,103	-76,722	Manizales
CSJS	Yair Flórez	8,059	-76,656	El Tres
CSJS	Yildriana Olascoaga	7,999	-76,639	Currulao

* CNS (Colegio Normal Superior), CSM (Colegio San Martin), CSJS (Colegio San José Salle)

4.4 Sistema de medición remota

Teniendo en cuenta la naturaleza de los datos de lluvia y su comportamiento espacial es necesario tener mediciones con una resolución espacial menor y de esta manera entender los procesos en estas escalas. Con este fin se utilizaron información de la base de datos TRMM y salidas del modelo CHIRPS, las cuales permitieron complementar los análisis de los datos medidos *in situ*. De estas bases de datos se seleccionó el periodo diciembre de 2018 a septiembre 2019.

4.5 Cálculos estadísticos

Se realizaron análisis estadísticos tipo ANOVAS, con el fin de determinar las diferencias de la precipitación entre zonas urbanas y las zonas aledañas del Distrito. Para esto se utilizaron los datos de lluvia de cada una de las estaciones seleccionadas. Este análisis permitió además comparar estas dos zonas en función de las épocas climáticas.

Con el fin de determinar el comportamiento de la lluvia a nivel decadal, se utilizó información diaria de la base de datos de CHIRPS para los años 1981 a 2019 (38 años). Con estos datos se calcularon series de datos mensuales, en los cuales se utilizó la ecuación (1) transformada mensual.

Ecuación 1. Transformada mensual

$$TM = \frac{mm \text{ mes} - \text{media del mes}}{\text{desviación estándar}}$$

Donde TM es el índice calculado a partir del total de la precipitación y media mensual y su desviación estándar.

Un $TM > 0$ Significa que la cantidad de lluvia del mes estuvo por encima del valor promedio de los meses, $TM = 0$ Significa que la cantidad de lluvia del mes es igual al promedio de lluvia de los meses y $TM < 0$ Significa que el valor de la lluvia del mes estuvo por debajo del promedio de los meses.

Finalmente, con el fin de asociar los datos a eventos de mayor escala temporal se agruparon los datos mensuales por año y se realizó el cálculo del promedio mensual multianual. Los datos se agruparon teniendo en cuenta el índice ONI para el fenómeno ENSO en sus fases Niña, Niño y Neutro.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la obtención de resultados verídicos y confiables, se realizó un ajuste de datos a través de la medición con los dos pluviómetros (casero y calibrado) durante la Fase II, de manera simultánea de un mismo evento de lluvia y en la misma estación (estación madre Jesús Mora), por un periodo de 2 meses. Esto, con el objetivo de comparar la cantidad de lluvia obtenida por cada pluviómetro. Para el análisis de los datos obtenidos; se realizó un diagrama de dispersión (figura 6) lo que permitió comparar la cantidad de lluvia obtenida por cada pluviómetro. Se calculó de esta manera, el valor de coeficiente de correlación y la ecuación de la línea de tendencia de la comparación.

En la figura 6, el gráfico de dispersión muestra en general una línea de tendencia proporcional a la línea de ajuste perfecto. Estas características sugieren que los datos medidos con los pluviómetros caseros tienen diferencias similares con los calibrados para el intervalo de valores medidos. Sin embargo, se identifica como los datos del pluviómetro casero están subestimados respecto al calibrado. Se realizó el cálculo del error cuadrático medio (RMS), el cual dio un resultado de $RMS = 16$, se calculó la raíz cuadrada del error cuadrático medio $\sqrt{RMS} = \sqrt{16} = 4$; obteniendo un valor de 4mm, de tal manera que los datos de los pluviómetros caseros fueron corregidos adicionando este valor para datos diferente de cero.

Luego de la corrección realizada a los datos de los pluviómetros caseros, se presentan en la tabla 3 los valores acumulados (mensuales y del periodo) de las 10 estaciones del área de estudio. En esta tabla desde diciembre del 2018 hasta septiembre de 2019 permite observar a grandes rasgos las épocas climáticas de la región.

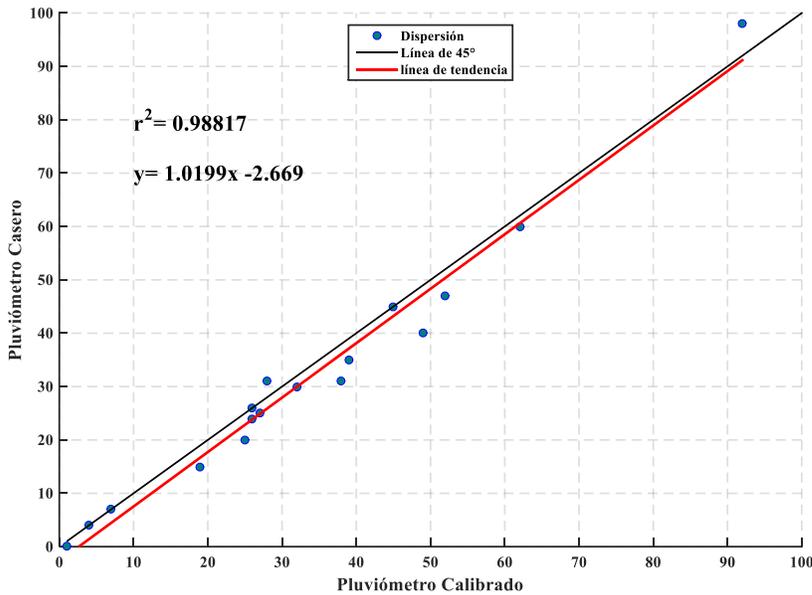


Figura 6. Gráfico de dispersión de los datos tomados con los 2 pluviómetros (puntos azules). Línea roja: línea de tendencia; línea azul: línea de ajuste perfecto. Se muestra la ecuación de ajuste y el valor del coeficiente de correlación R2.

Tabla 3. Valores acumulados de precipitación mensual medidas por cada una de las estaciones en mm, desde diciembre de 2018 hasta septiembre de 2019.

Estación mes/año	Mm/ mes										Lluvia acumulada (mm)
	D/18 (mm)	E/19 (mm)	F/19 (mm)	M/19 (mm)	A/19 (mm)	M/19 (mm)	J/19 (mm)	J/19 (mm)	A/19 (mm)	S/19 (mm)	
Julia Orozco	160	9	0	16	457	406	195	267	225	173	1907
Instituto	155	6	0	116	223	297	212	277	276	161	1721
La Lucila	153	33	0	139	31	181	206	259	239	123	1363
Jesús Mora	126	9	0	16	470	476	300	306	253	173	2127
Buenos Aires	126	9	0	78	492	385	456	528	253	223	2548
Monterrey 1	184	8	0	82	418	364	391	318	239	174	2177
Hoover Quintero	64	0	0	122	31	181	206	259	239	123	1225
Manizales	179	12	0	16	457	432	218	332	253	173	2072
El Tres	341	11	0	0	517	619	418	185	223	97	2412
Currulao	0	0	0	0	375	0	399	321	498	97	1690

5.1 Series de tiempo de las estaciones *in situ*

Con base en los valores de la tabla 3, se construyeron las series de tiempo con los pluviómetros caseros/calibrado con el fin de conocer las tasas de precipitación medidas en cada estación y de esta forma poder comparar/evidenciar diferencias significativas entre los valores de cada estación. Las series de tiempo se realizaron con datos compilados a nivel diario. En las figuras 7 a 15 se observan las series de datos de las 10 estaciones, donde en el eje X se muestra el periodo de medición (diciembre de 2018 a septiembre de 2019) y en el eje Y se observa el valor de la cantidad de agua medida en milímetros por día. Los valores de precipitación diaria están en el intervalo de 0 mm a 220 mm.

5.1.1 Estaciones in situ zona norte.

De las ocho estaciones ubicadas dentro del casco urbano del distrito de Turbo, siete corresponden a la zona norte, (figura 7); de forma general en las series de tiempo de estas estaciones se observa un comportamiento similar. A principios del mes de diciembre se evidencia un evento de lluvia que estuvo entre los 70 mm y los 90 mm/día, con excepción de la estación Hoover Quintero, la cual registró 40 mm aproximadamente, posterior a este evento de lluvia, se observa un descenso significativo tanto en la frecuencia, como en la cantidad de lluvia medida, hasta llegar a valores de 0 mm/día, los cuales se mantienen durante los meses de enero, febrero hasta finales de marzo. Luego se evidencia a principios de abril eventos fuertes de lluvia como el del 9 de abril, el cual presentó valores de 170 mm en las estaciones Julia Orozco y Manizales. De este modo se observó un incremento tanto en la frecuencia como en la intensidad de los eventos de lluvias, que se mantuvo hasta el mes de septiembre (último mes de las mediciones realizadas *in situ*). Para los meses de mayo y junio también se registraron picos máximos con valores 160 y 180 mm por día, específicamente en las estaciones Julia Orozco y Manizales, ubicadas más al norte del casco urbano, las cuales registraron 3 eventos con valores mayores que el resto de las estaciones de la zona Norte; seguido de la estación Jesús Mora y Buenos Aires con 110 mm/día, el resto de las estaciones estuvo por debajo de los 90 mm/día.

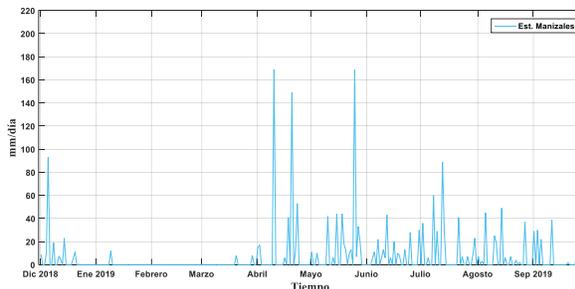
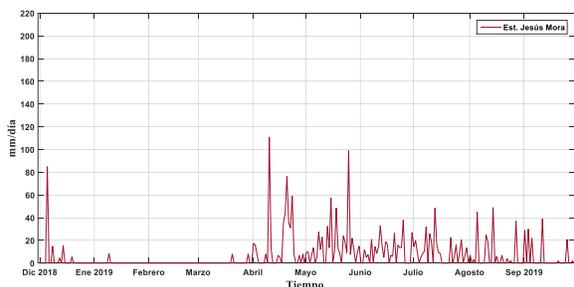




Figura 7. Series de tiempo diarias de las estaciones *in situ* en la zona norte del Distrito de Turbo.

5.1.2 Estación *in situ* zona sur

De las 8 estaciones del casco urbano, la más cercana a la zona sur (figura 2) es la estación Buenos Aires (figura 8). La serie de tiempo muestra de manera general el mismo comportamiento de las estaciones del norte; se evidenció un pico para el mes de diciembre con un valor de 85 mm/día, posterior a este evento existió un descenso en la frecuencia y en la cantidad de lluvia, alcanzando valores de 0 mm/día; comportamiento que se mantuvo casi constante hasta finales del mes de marzo y principios del mes de abril; a partir de allí, se logró registrar el mayor pico de lluvia, el cual alcanzó un valor de 110 mm/día, manteniéndose la frecuencia de los eventos de lluvia hasta el mes de septiembre.

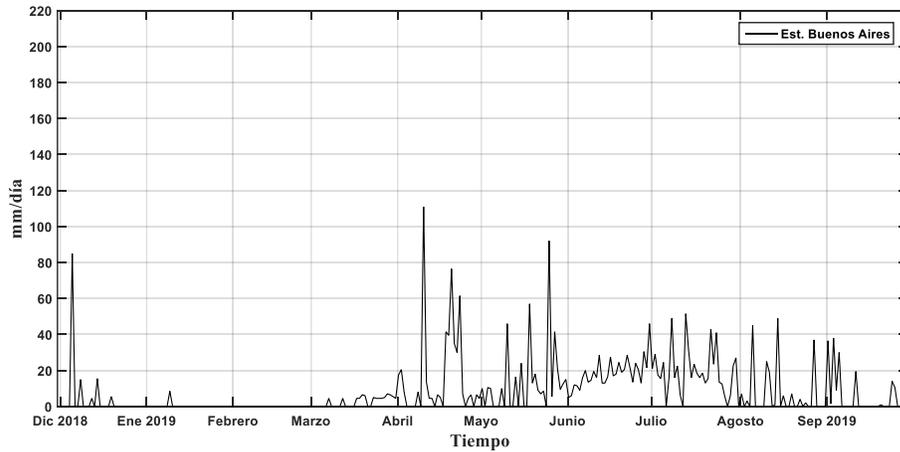


Figura 8. Serie de tiempo de la estación in situ en la zona Sur del Distrito de Turbo.

5.1.3 Datos *in situ* estación sur vs. estación norte

Con el objetivo de estudiar diferencias en la tasa de precipitación entre las estaciones localizadas al norte vs las estaciones localizadas al sur del casco urbano del distrito de Turbo (Figura 9), se escogió la estación Jesús Mora (Al norte) y la estación Buenos Aires (Al sur). Ambas series de tiempo muestran coincidencia en la mayoría de los eventos de lluvia, incluso cerca de los mismos valores, sin embargo, para los meses de junio, julio y agosto la estación buenos aires mantuvo valores por encima de la estación Jesús Mora, lo que deja dicho que podría haber un gradiente latitudinal en el mismo casco urbano, sin embargo al comparar la estación Buenos Aires con el resto de estaciones, esta hipótesis no es válida, puesto que las estaciones Julia Orozco, Manizales y Monterrey 1, (estaciones al norte) registraron mayores valores de precipitación.

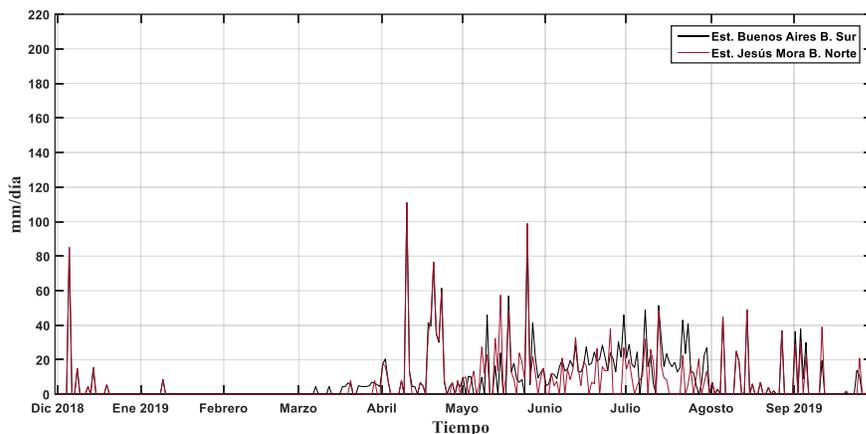


Figura 9. Serie de tiempo diaria de la estación Sur vs. estación Norte dentro del casco Urbano del distrito de Turbo.

5.1.4 Zonas aledañas al sur del casco urbano del distrito

La estación pluviométrica El Tres, presentada a través de la serie de tiempo de la figura 10, localizada al sur del distrito de Turbo, aproximadamente a 8 km de distancia del casco urbano, presentó mayores valores de precipitación durante las mediciones realizadas; exponiendo los mayores picos, para los meses de diciembre, abril y mayo, siendo el mayor de ellos en diciembre, donde se registró un valor de 209mm/día, seguido de otro pico para el mismo mes de 136 mm/día, posterior a estos eventos, se evidencia un descenso abrupto en los niveles de precipitación hasta llegar a valores de 0mm/día para los meses de enero, febrero y marzo. Luego de este descenso, se observó un incremento en la precipitación, atribuido al inicio de la época húmeda; con tres picos máximos; dos para el mes de abril de 130 mm/día y 170 mm/día y uno para el mes de mayo de 160 mm/día. El resto de meses siguiente la precipitación sostuvo una frecuencia constante con valores que no superan los 100mm/día.

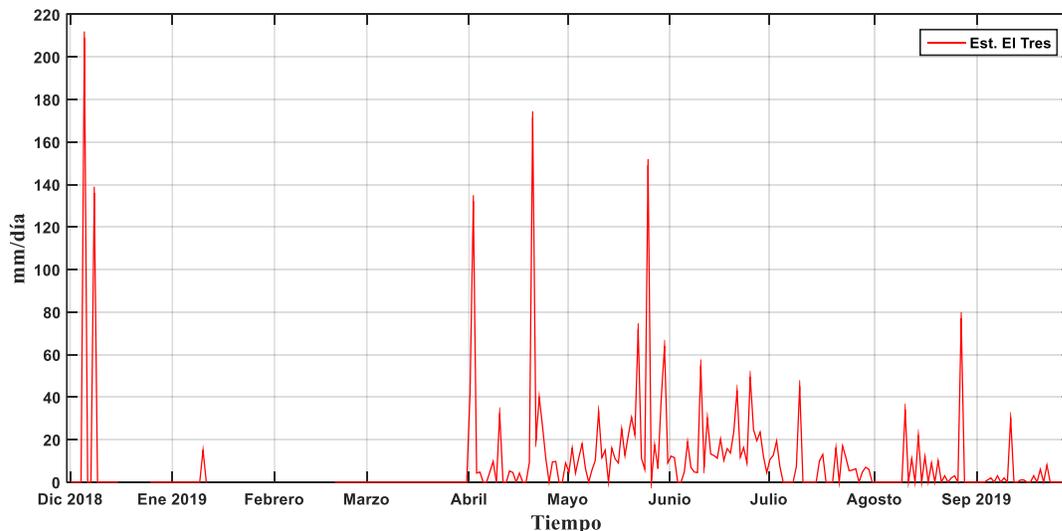


Figura 10. Serie de tiempo de la estación in situ El Tres, en la zona aledaña al Sur del Distrito de Turbo, corregimiento de El Tres.

La estación pluviométrica Currulao, presentada a través de la serie de tiempo de la figura 11, localizada al sur del distrito de Turbo, aproximadamente a 15 km de distancia del casco urbano; permite observar dos picos máximos durante el mes de abril; uno de 120 mm/día y otro de 140 mm/día, eventos de considerable intensidad comparados con algunas estaciones del casco urbano del distrito, sin embargo, cabe mencionar que esta estación tuvo numerosos registros faltantes, específicamente para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, factor que se tuvo en cuenta para el procesamiento y análisis de estos datos. Por lo anteriormente expresado no se evidencia aparentemente una mayor tasa de

precipitación en comparación con la estación El Tres, como debería esperarse por estar ubicado más al sur del distrito. No obstante, hay que tener en cuenta la calidad de estos datos, a los cuales no se les pudo realizar prueba de validez, por lo que no existió una estación madre que corroborara la calidad y confiabilidad de estas mediciones.

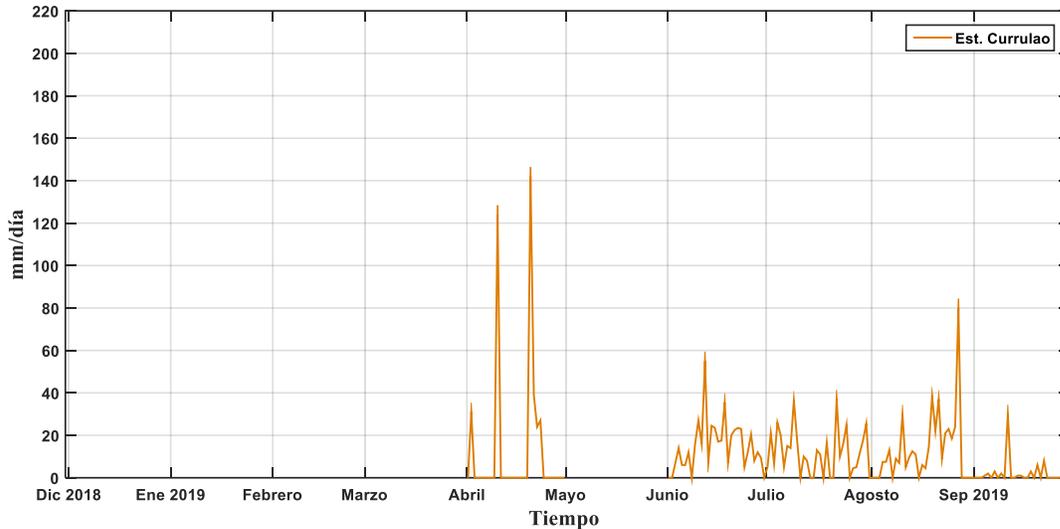


Figura 11. Serie de tiempo de la estación in situ Currulao, en la zona aledaña al Sur del Distrito de Turbo, corregimiento de Currulao.

Con base a la hipótesis, se esperaba observar mayores tasas de precipitación en esta estación, sin embargo, y debido a la ausencia e inconsistentes mediciones no se rechaza la veracidad de la hipótesis, pues la carencia de datos para los primeros cuatro meses permite evidenciar un mal manejo de la estación Currulao. No se desechan los datos, pues son un motivo para seguir realizando mediciones de forma continua que permitan dar una mejor estimación de esta área.

Con el objetivo de comprender y analizar con mayor claridad las estaciones donde se presentaron los mayores valores de precipitación, es decir, los picos máximos se realizaron dos tablas (tabla 3 y 4) que permitieron identificar con detalle las mayores tasas de precipitación y por ende las estaciones asociadas a estas.

5.1.5 Serie de tiempo casco urbano vs zonas aledañas.

La figura 12 permite observar de forma simultánea las series de tiempo de las estaciones *in situ* de la parte norte y sur del casco urbano del distrito de Turbo y de sus zonas aledañas al sur; El Tres y Currulao. Se evidencia de forma general en estas series de tiempo un comportamiento similar en los eventos de lluvia, sin embargo, es necesario mencionar que la estación del corregimiento El Tres

presentó los mayores valores de precipitación, llegando a los 209 mm/día en su pico máximo (diciembre), seguida por la estación del corregimiento de Currulao, con un pico máximo de 140 mm/día para el mes de abril, sucedida por la estación de los barrios al sur del casco urbano; Buenos aires, cuyo pico máximo alcanzó un valor de 100 mm/día (abril) y por último la estación barrios norte del casco urbano (Jesús mora), con un pico máximo que llegó a los 90 mm/día (junio), se observa así, un leve pero importante gradiente latitudinal entre los valores de las tasas de precipitación comprendidas entre estas estaciones *in situ*.

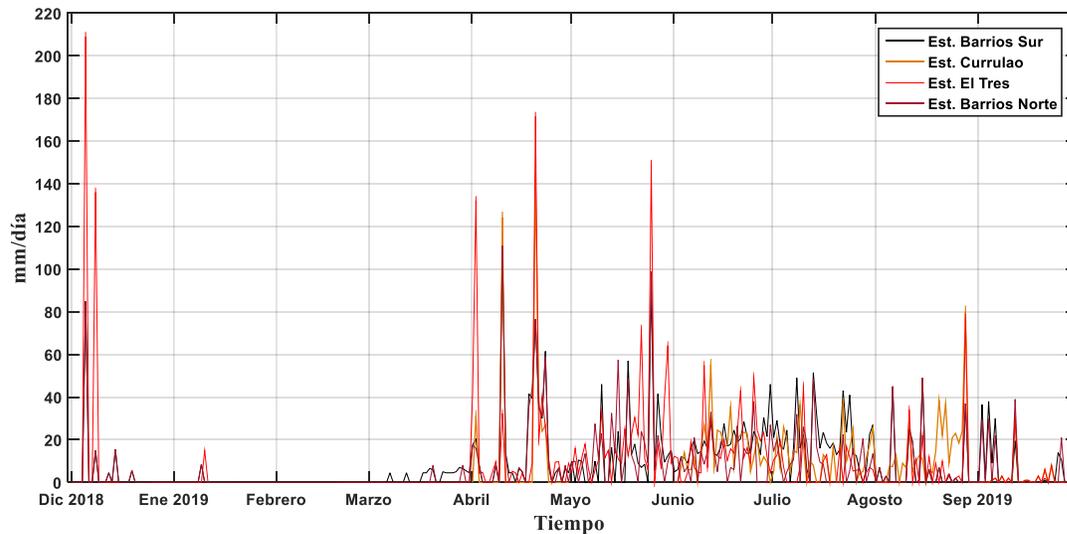


Figura 12. Comparación de los datos *in situ* de las estaciones norte y sur en el casco urbano (Buenos aires y Jesús mora) vs las estaciones localizadas en las zonas aledañas al sur del casco urbano (El Tres y Currulao) del Distrito.

Tabla 4. Picos máximos de precipitación para los 6 eventos más significativos registrados por las 10 estaciones de medición *in situ*. El color amarillo representa el evento de mayor valor medido y el color verde representa el segundo valor.

Fecha	Instituto	Hoover Q.	Jesús Mora	Julia Orozco	Manizales	La Lucila	Monterrey	Buenos Aires	El Tres	Currulao
05/12/18	70	37	85	97.5	93	67.5	70	85	209	NaN
08/12/18	18.5	9.5	15	17	19	18.5	14	15	136	NaN
01/04/19	19.5	0	16	17	17	0	23.5	20.5	132	31
09/04/19	61.5	0	111	169	169	0	152.5	111	32.25	124
19/04/19	40	0	76.5	149	149	0	95	76.5	171.5	142
24/05/19	53.5	17	99	149.5	169	17	90	92	149	NaN

La tabla 4 presenta la cantidad de lluvia en mm/día, para los seis eventos de mayor valor registrados en las estaciones *in situ*, tanto en el casco urbano como en las zonas aledañas del distrito. La estación del corregimiento El tres registró el mayor pico de lluvia, con un valor de 209 mm/día en el mes de diciembre, para el resto de

las estaciones sus picos máximos no superaban los 169 mm/día. Cinco de los seis eventos de lluvia más representativos o de mayor valor, se presentaron en la estación El Tres, seguido de tres para la estación Manizales y la estación Julia Orozco, dos para la estación Currulao y uno para la estación Jesús Mora, Monterrey 1 y Buenos Aires. La estación El Tres sostuvo los valores más altos para los mayores eventos de lluvia.

5.2 Series de tiempo de las bases de datos

Para la visualización de los datos obtenidos por las dos bases de datos (CHIRPS y TRMM) se realizó la descarga, el procesamiento y análisis de los datos bajo el mismo periodo de medición de las estaciones *in situ*.

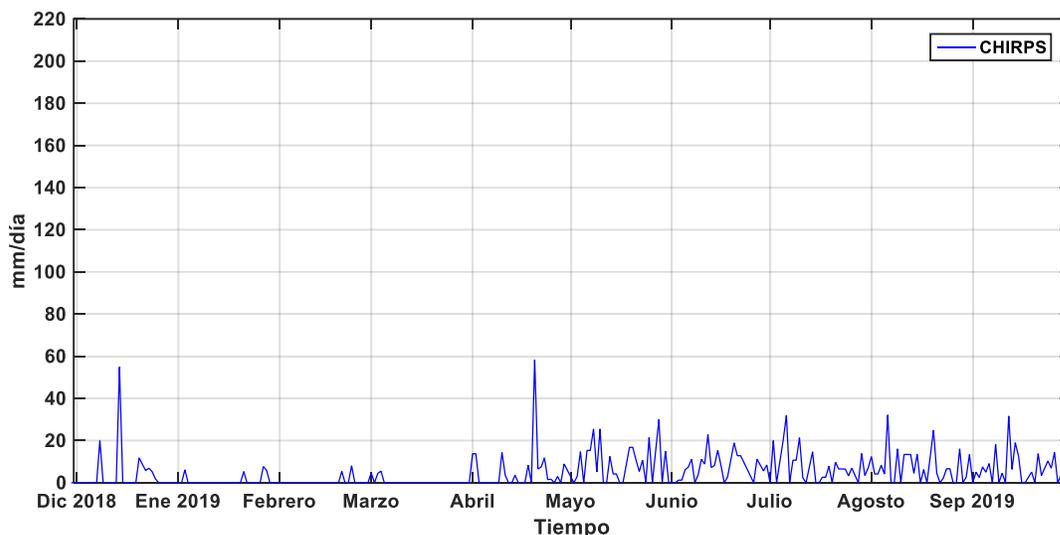


Figura 13. Serie de tiempo del modelo CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km).

La serie de tiempo diaria de la base de datos CHIRPS (figura 13) muestra dos picos máximos, uno en el mes de diciembre y otro a finales de abril, ambos alrededor de los 50 mm/día y 60 mm/día. Para los meses de enero a marzo se presentan las menores tasas de precipitación, con valores de 0 mm. Entre los meses de mayo a septiembre se presentan valores promedio 20mm.

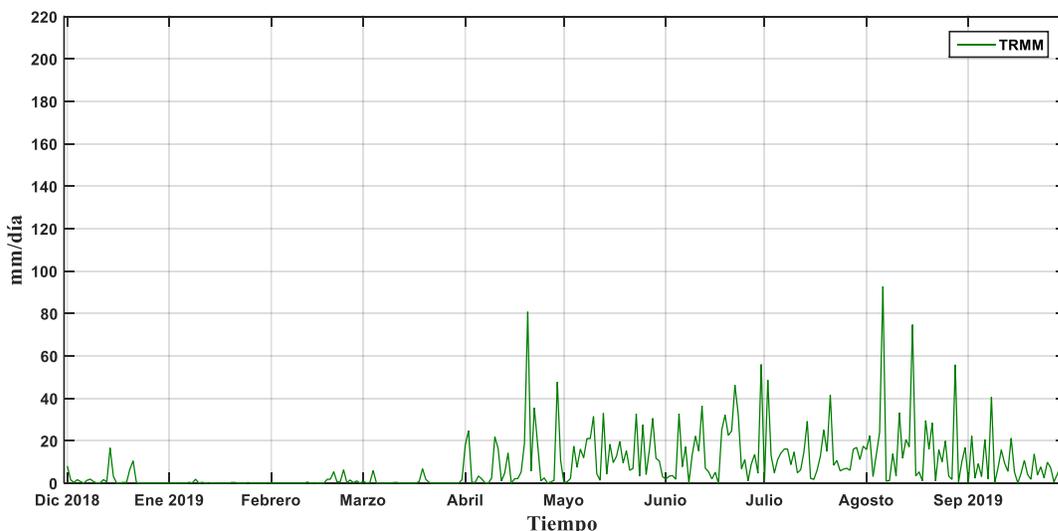


Figura 14. Serie de tiempo de la base de datos TRMM, resolución 0.25° (28 km).

La serie de tiempo diaria de la base de datos TRMM (figura 14) muestra algunos picos máximos; se evidencia uno en el mes de abril con un valor de 80 mm/día y dos en agosto con valores superiores a los 80 y 90 mm/día, siendo el mayor de ellos en agosto. Para los meses de diciembre a marzo se presentan las menores tasas de precipitación, llegando a los 0 mm durante un prolongado periodo, un comportamiento semejante al presentado por la base de datos de CHIRPS (figura 13); entre los meses de abril a septiembre se presentan eventos frecuentes de lluvia, alcanzando algunos eventos superiores a los 20 mm/día. Cabe mencionar que la base de datos TRMM registró mayores valores de precipitación en diversos eventos con respecto a la base de datos CHIRPS. Los valores de la primera alcanzaron los 90mm/día, mientras que la segunda no superó los 60mm/día.

5.3 Datos *in situ* vs. bases de datos

La figura 15 permite observar de forma simultánea las series de tiempo de las bases de datos CHIRPS y TRMM, de las estaciones *in situ* barrios norte y sur y la estación El Tres; en donde se evidencia de forma general un comportamiento similar en los eventos de lluvia para las dos épocas climáticas que se presentan en la región como lo menciona García (2007). Existe un descenso significativo de la precipitación desde mediados de diciembre hasta principios de abril. En estos meses los eventos de lluvia fueron poco frecuentes, casi nulos, con valores que no superaban los 20mm/día, lo que corresponde a la época seca. En el mes de abril se empieza a notar la presencia de lluvias, así como la frecuencia de estos eventos de precipitación, alcanzando valores altos a partir del mes ya mencionado, a lo cual se le atribuye el inicio de la época húmeda, intensificando su valor y frecuencia durante

los meses posteriores hasta el mes de septiembre en donde se terminaron las mediciones *in situ*.

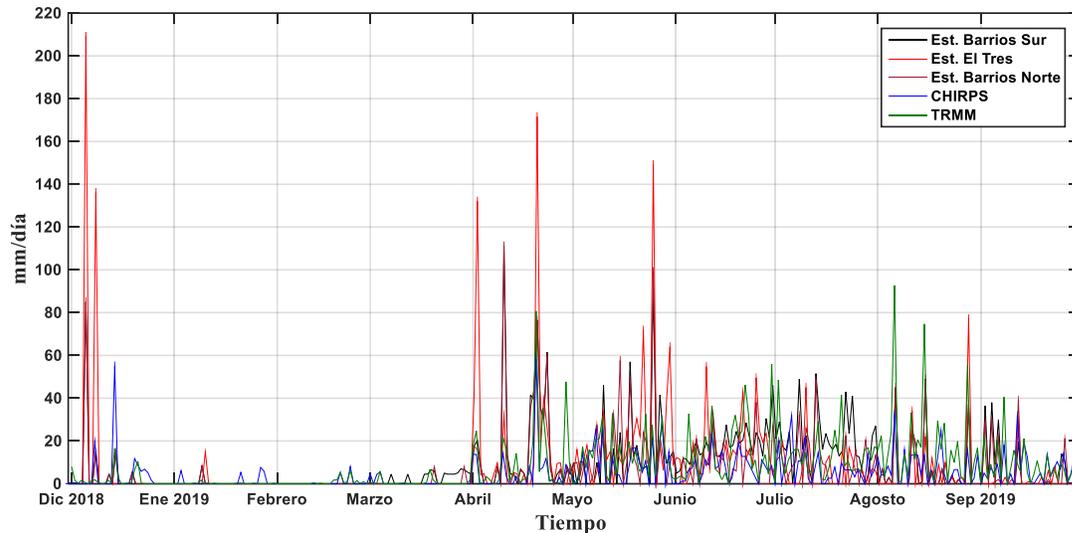


Figura 15. Comparación de los datos *in situ* (estaciones norte y sur y por fuera del Distrito) vs. bases de datos CHIRPS y TRMM.

De las cinco (5) estaciones ya antes mencionadas, la que registró mayores picos de lluvia fue la estación pluviométrica El Tres, que alcanzó un valor de 209 mm /día según lo demuestran los registros, seguido de dos picos fuertes superiores a los 170 mm/día, uno presentado en el mes de abril y otro en el mes de mayo. El resto de las estaciones sostuvo valores por debajo de los 120mm/día. De esta manera se puede observar que la estación El Tres ubicada más al sur del Distrito, presentó mayores tasas de precipitación, lo que era de esperarse, según lo establecido por Guarín (2011), quien observó un gradiente latitudinal de 34mm en la tasa de precipitación anual. Por cada kilómetro que se recorre de sur a norte entre los municipios de la región de Urabá, la tasa disminuye; sin embargo, y resaltando que el estudio de Guarín contaba con un área de estudio mucho mayor que la de esta investigación, para calcular con exactitud este tipo de diferencias dentro de un área de estudio relativamente menor como lo es en este caso, es conveniente continuar con las mediciones realizadas por la red pluviométrica del proyecto “Gotas de Lluvia, semillas de ciencia”; así como una mejor y mayor ubicación de los pluviómetros.

En ese mismo sentido, cabe mencionar, que las bases de datos presentaron menores tasas de precipitación respecto a las estaciones *in situ*, donde los valores de TRMM estuvieron por debajo de los 90 mm/día y los de CHIRPS por debajo de los 60 mm/día, lo cual se le atribuye a la resolución y al hecho de que los datos de las bases de datos son un promedio de los valores obtenidos tanto de registros *in situ* como del barrido o escáner que realiza el satélite encargado de la medición; sin

embargo, la tendencia de las series de tiempo de las bases de datos, sirvieron para corroborar la información obtenida por los estudiantes del proyecto. Así mismo la información de los estudiantes sirvió para validar la información de las bases de datos, aunque registraron valores por debajo de las estaciones *in situ*, permite establecer una relación acorde.

Con el fin de comparar de una manera adecuada los datos medidos y los datos *in situ*, se realizaron gráficos de dispersión. En las figuras 16 a 21 se observa la comparación con las bases de datos CHIRPS y TRMM.

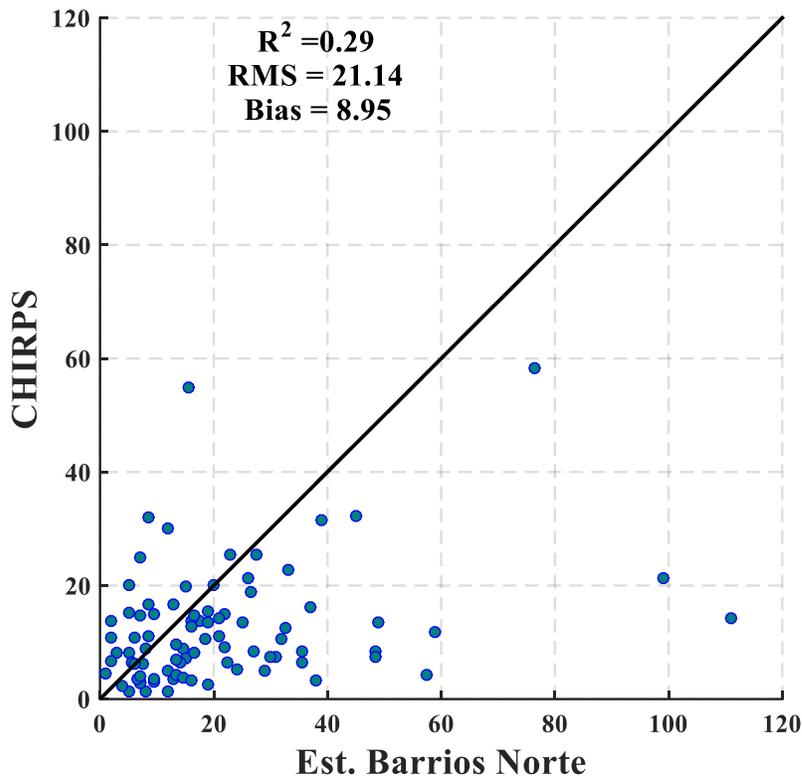


Figura 16. Comparación base de datos CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km) vs representación estación *in situ* barrios Norte del casco urbano del Distrito.

La comparación realizada sugiere que las estaciones *in situ* tiene un comportamiento similar a las bases de datos lo cual es corroborado por los valores del coeficiente de correlación (R^2), el error cuadrático medio (RMS) y el bias.

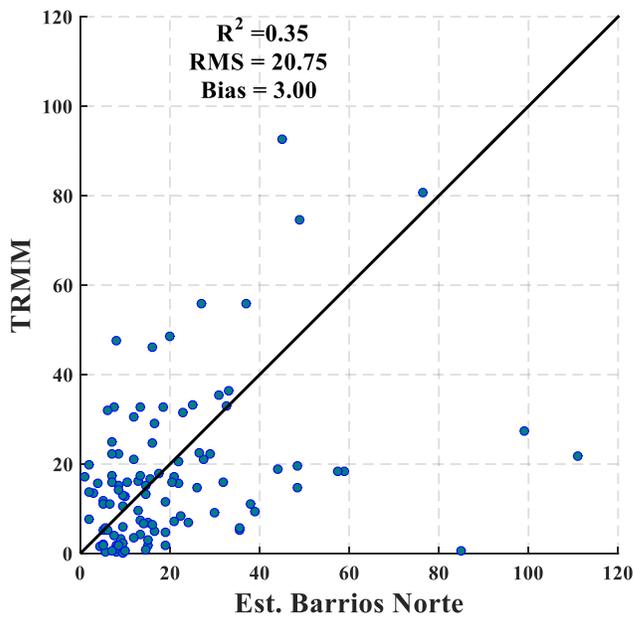


Figura 17. Comparación base de datos TRMM, resolución espacial 0.25° (28 km) vs representación estación in situ barrios norte del casco urbano del Distrito.

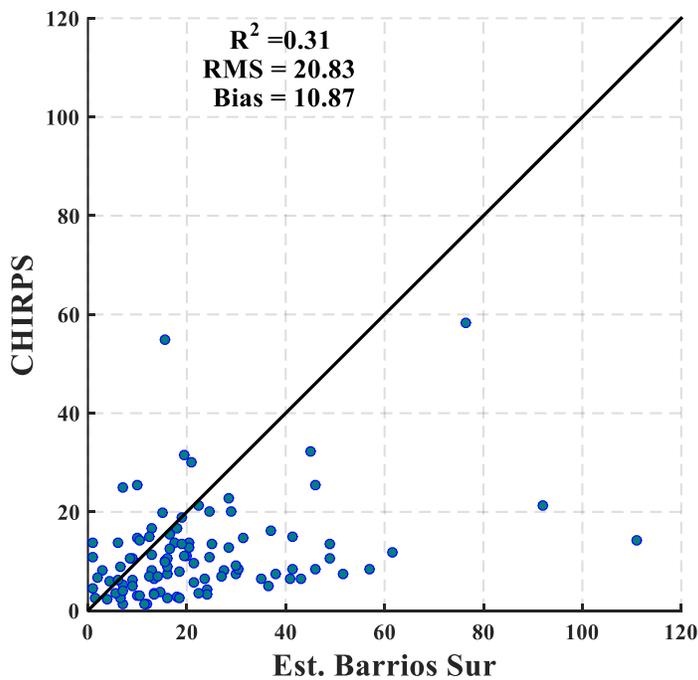


Figura 18. Comparación base de datos CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km) vs representación estación in situ barrios Sur del casco urbano del Distrito.

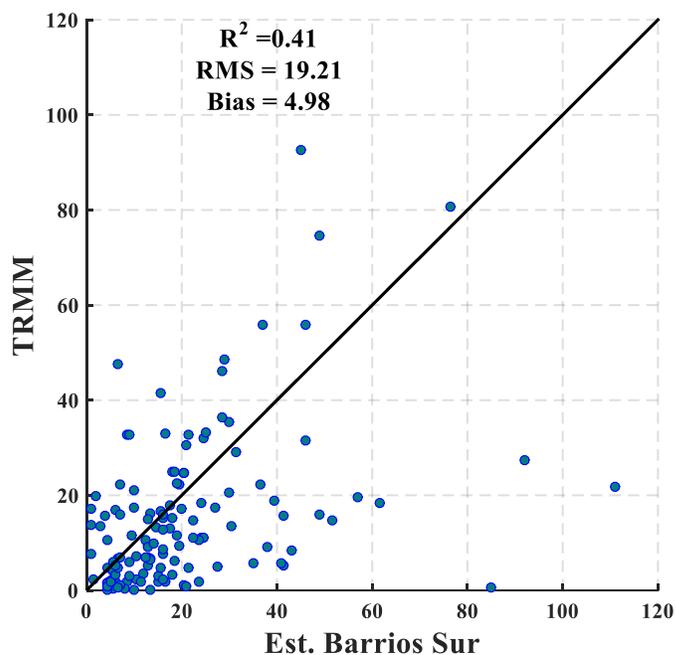


Figura 19. Comparación base de datos TRMM, resolución espacial 0.25° (28 km) vs representación estación in situ barrios Sur del casco urbano del Distrito.

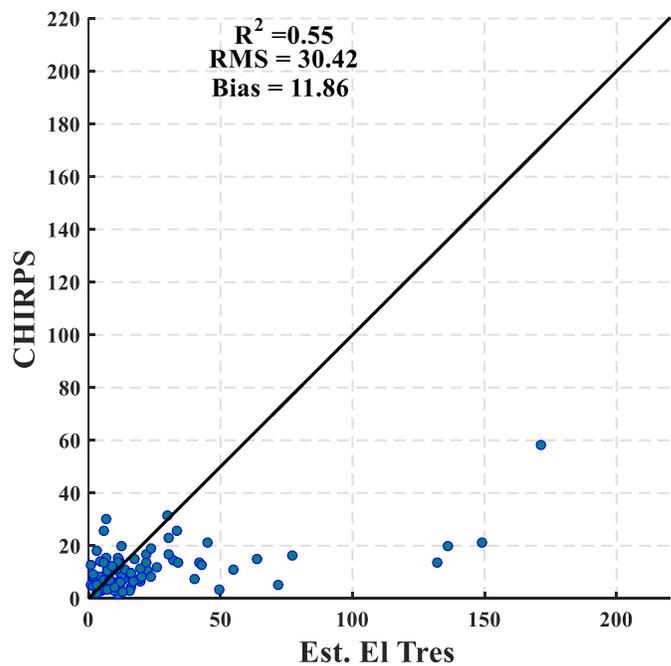


Figura 20. Comparación base de datos CHIRPS, resolución espacial 0.05° (5 km) vs representación estación in situ zona aledaña al Sur del casco urbano del Distrito.

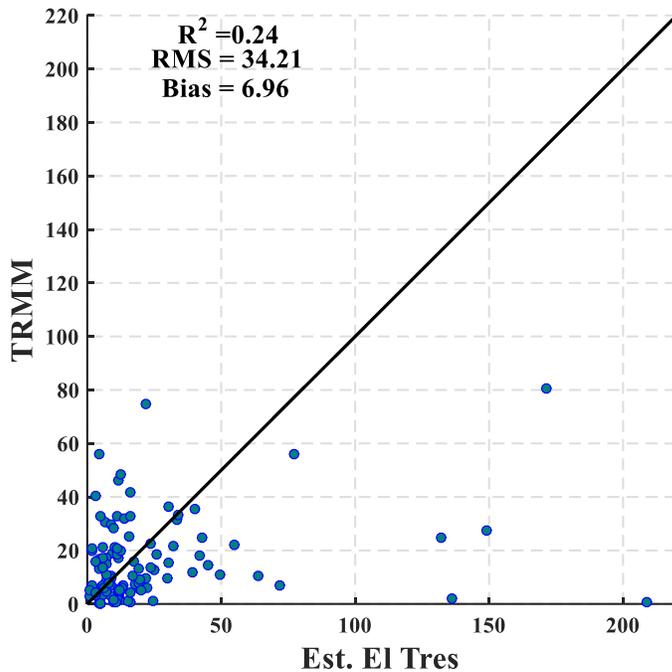


Figura 21. Comparación base de datos TRMM, resolución espacial 0.25° (28 km), vs representación estación *in situ* zona aledaña al Sur del casco urbano del Distrito.

Para la estación al norte del casco urbano, el coeficiente de correlación fue de 0.29 y 0.35 con respecto a CHIRPS y TRMM. De igual manera se observa un RMS de 21.14 mm y 20.75 mm, así como un bias de 8.95 y 3.00 para CHIRPS y TRMM respectivamente. (Figura 16 y 17). Para la estación *in situ* de la parte sur del casco urbano, los valores del coeficiente de correlación fueron de 0.31 y 0.41 con respecto a CHIRPS y TRMM, con un RMS de 20.83 mm y 19.21 mm, así como un bias de 10.87 y 4.98 respectivamente. (figura 18 y 19). Finalmente, para la estación de la zona sur aledaña al casco urbano, los valores del coeficiente de correlación fueron de 0.55 y 0.24 con respecto a CHIRPS y TRMM, con un RMS de 30.42 mm y 34.21 mm, y un bias de 11.86 y 6.96; respetivamente. (figura 20 y 21).

En general, en estos resultados se observa una diferencia en la magnitud de la precipitación entre los datos medidos y las bases de datos. Estas diferencias no son significativas del comportamiento obtenido en una escala espacial más fina, proporcionada por los datos *in situ*. De acuerdo con las características de las bases de datos, se supone que estas diferencias están asociadas a las maneras como calculan la cantidad de lluvia los satélites de TRMM y a los datos asimilados por el modelo CHIRPS, ya que la mayoría de ellos están alejados de la zona de estudio.

A pesar de las diferencias en la magnitud de la precipitación entre los valores medidos y los de las bases de datos, los resultados sugieren una buena calidad de los datos medidos por los estudiantes y coordinadores. Esto es evidente en la forma similar de los registros medidos y principal los datos de TRMM.

5.4 Serie de tiempo decadal (CHIRPS)

Con el fin de entender los procesos decadales de precipitación, se analizó la serie de tiempo de datos mensuales entre el año 1981 y 2019 (38 años) de la base de datos CHIRPS.

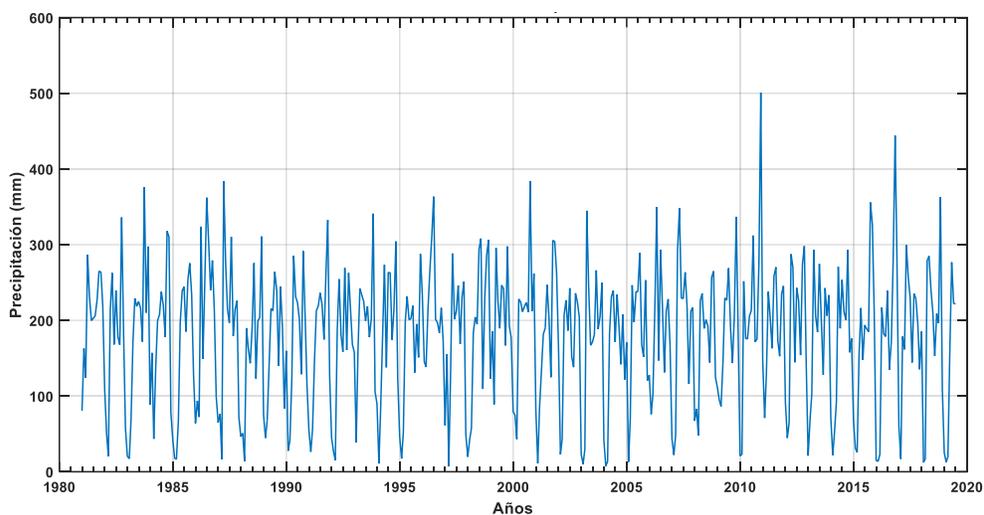


Figura 22. Serie de tiempo mensual entre 1981 y 2019 de la base de datos CHIRPS.

En la figura 22 se observa la serie de tiempo mensual de la base de datos CHIRPS, Se evidencian picos mínimos y máximos con una frecuencia anual, presentándose los primeros en los meses de enero y febrero y los máximos en los meses de noviembre y diciembre. En esta figura además el pico máximo de precipitación alcanza un valor de 500 mm en noviembre del 2010, seguido de otro en el mismo mes del año 2017 con un valor aproximado de 450 mm. En general el valor promedio de los eventos máximos no supera los 400 mm.

Con el fin de conocer el ciclo anual de la región, se realizó un promedio mensual multianual el cual se presenta en la figura 23. En esta gráfica se observa que el mes de febrero tiene la menor tasa de precipitación anual con valores alrededor de 50mm y noviembre el de mayor tasa de precipitación anual con valores de 250mm.

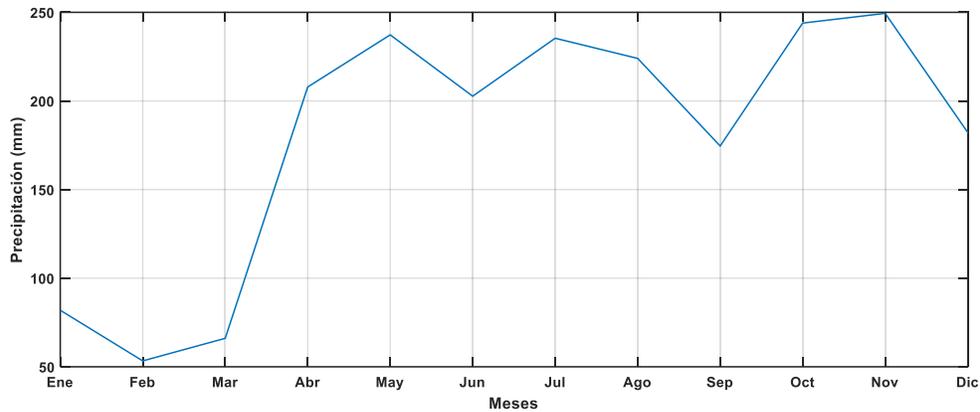


Figura 23. Promedio mensual multianual de precipitación entre 1981 y 2019 de la base de datos CHIRPS.

El promedio mensual multianual realizado con los 38 años, además, permite observar una época seca que se establece desde mediados de diciembre hasta principios de abril donde se presentan las menores tasas de precipitación. Mientras que la época húmeda se establece entre mayo y noviembre, presentando en noviembre las mayores tasas de precipitación con valores de hasta 250 mm. En los meses de junio y septiembre se presenta una leve disminución de los valores pluviométricos respecto a los registrados en mayo y noviembre. Por último, podríamos definir el mes de abril como una época de transición.

A la serie de tiempo mensual de 38 años de datos de la base de datos CHIRPS, se le calculó la transformada mensual (ecuación 1).

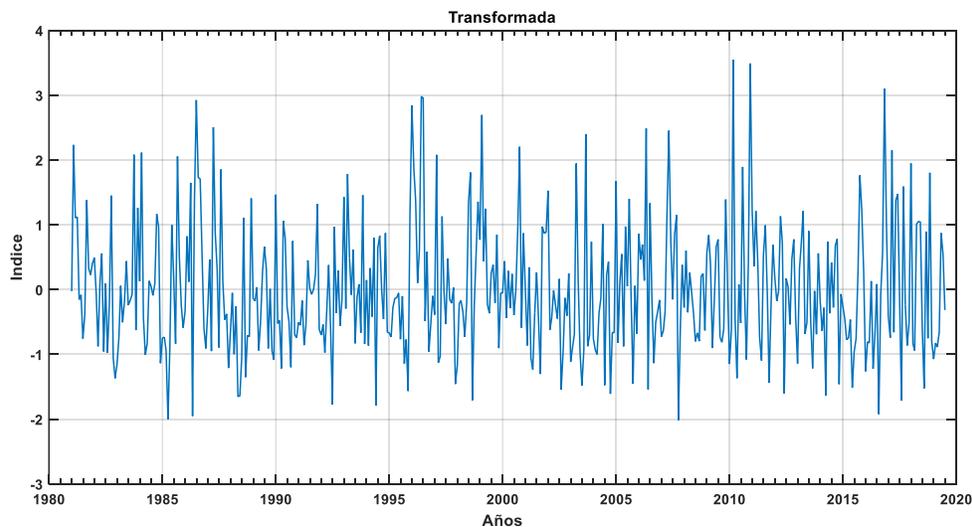


Figura 24. Transformada mensual, para la serie de tiempo mensual entre 1981 y 2019 de datos de la base de datos CHIRPS.

La transformada (Figura 24) muestra un patrón similar a la serie de tiempo mensual, dejando ver el mayor pico para el año 2010, lo que muestra la mayor tasa de precipitación mensual dentro de las que estuvieron por encima del valor medio. Entre los picos de menor tasa, se destaca uno para el año 1985 y otro para el año 2017. Los valores mayores que 0 muestran que la cantidad de lluvia del mes estuvo por encima del valor promedio de los meses, los valores cercanos o iguales a 0 muestran que la cantidad de lluvia del mes es igual al promedio de lluvia de los meses y los valores menores que 0 muestran que el valor de la lluvia del mes estuvo por debajo del promedio de los meses.

Con el fin de realizar un análisis de la precipitación en función de eventos de mayor escala temporal, se agruparon los meses teniendo en cuenta el índice ONI para el fenómeno ENSO; Niña, Niño y Neutro. Con base en esa agrupación, se calcularon los valores promedio de esos meses.

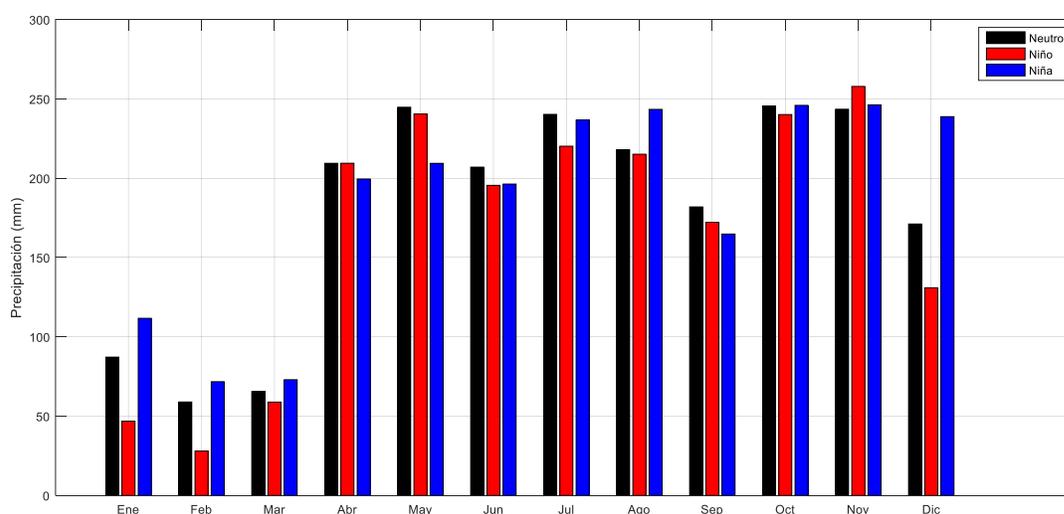


Figura 25. Valores de precipitación mensual multianual con base en el índice ONI.

En la figura 25 se observa el ciclo anual multianual similar al calculado anteriormente. El resultado sugiere que no existen diferencias significativas entre las fases Niño, Niña y Neutro para la época húmeda (mayo a noviembre) y el mes de transición (abril). Sin embargo, es evidente las diferencias para la época seca (diciembre a marzo), donde los valores de precipitación decrecen desde la fase Niña, Neutro y Niño. Este resultado es corroborado por lo encontrado por Guarín (2011) quien afirma que la ocurrencia de las fases del ENSO afecta fuertemente el volumen anual de precipitación en el eje bananero, anomalías que se evidencian en una disminución en la producción del banano, en el caso de la fase de El Niño.

6. CONCLUSIONES

Durante el periodo de medición efectuado en esta investigación, no hay una diferencia significativa de la tasa de precipitación entre la zona norte vs la zona sur del casco urbano del Distrito de Turbo.

Existe una reducción de la tasa de precipitación de las estaciones ubicadas dentro del casco urbano del Distrito, en comparación a las estaciones localizadas en el corregimiento de El Tres, es decir, se confirma la hipótesis, pues se logra evidenciar una reducción en las tasas de precipitación de sur a norte. Sin embargo, la reducción de los valores en la estación Currulao, podrían sugerir la presencia de fenómenos locales.

Se presentan claramente dos épocas climáticas en la zona, evidenciadas tanto en las dos bases de datos como en los datos medidos en las estaciones *in situ*. Una época seca que se presenta desde inicios de diciembre a marzo y una época húmeda que inicia a partir del mes de abril hasta el mes de septiembre (último mes con mediciones).

De acuerdo con los análisis decadales, los resultados sugieren que el mes con menor tasa de precipitación es febrero con un promedio de la tasa de precipitación con un valor de 50 mm y el de mayor precipitación en noviembre, con una tasa de precipitación de 250 mm; donde sobresale el mes noviembre de 2010, con la mayor tasa de precipitación de los últimos 38 años con un valor de 500 mm aproximadamente. De igual manera, se evidenció una reducción en la tasa de precipitación entre las fases del ENSO, Niña. Neutro y Niño solo en los meses de diciembre a marzo, correspondientes a la época seca.

Las series de tiempo de las estaciones *in situ* y las bases de datos satelitales mostraron un comportamiento similar. Sin embargo, se encontró una diferencia en la magnitud de la lluvia entre las bases de datos y los medidos. Este resultado permitió validar la información medido en el proyecto *Gotas de Lluvia, Semillas de Ciencia* y la importancia de la implementación de la red pluviométrica en la región.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

Para una mejor y mayor calidad de los datos, así como una mejor definición del campo de precipitación y de su comportamiento, se recomienda la instalación de más estaciones pluviométricas. Se sugiere que las mismas sean distribuidas en la zona de Urabá (con una cobertura inicialmente latitudinal) y así cubrir mayor área.

De esta forma es posible ampliar la escala espacial de análisis de la lluvia en la región. Es necesario implementar metodologías similares a las utilizadas en el proyecto *Gotas de lluvia, semillas de ciencia*, con fin de mejorar/mantener la calidad de la información medida, ya que la misma dependerá de la cantidad de instrumentos y la manera como estos se manipulen.

Por lo pronto, con el propósito de obtener mayores registros en el tiempo, se recomienda continuar con la red pluviométrica y así tener una mayor escala temporal. Finalmente, se recomienda utilizar al menos una estación meteorológica con el objetivo de validar la información medida y tener un mayor criterio de calidad de los datos.

8. REFERENCIAS.

Acevedo Ortiz, D.A. y Flórez Yepes, G.Y. (2014). Estudio de los Instrumentos Normativos de Ordenamiento Ambiental del Municipio de Turbo, Departamento de Antioquia, en el marco de las Políticas de Ordenamiento Ambiental. *Revista Luna Azul*. (42):167-184.

CIOH. (2009) Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano. Turbo – Golfo de Urabá. *Climatología Del Caribe*. (<https://www.cioh.org.co/meteorologia/ClimatologiaCaribe.php>).

Corpouraba et al., (2009). Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Turbo Diagnóstico Físico-Ambiental. 3.1.1 R. 2–72.

García Valencia et al., (2007). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – Invemar– y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR N°.12

Guarin, G. W. (2011). Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín Colombia.

Hurtado M., A. F., & Mesa S., Ó. J. (2015). Climate change and space-time variability of the precipitation in Colombia. *Scielo.Org.Co*, 131–150. <https://doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.131-150>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) - Indicadores ambientales., (2016).

Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (2007) página web: <https://www.igac.gov.co/es>

IDEAM - UNAL. (2018). la Variabilidad climática y el cambio climático en Colombia.

Jaramillo, A., y Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2), 102–113.

National Aeronautics and Space Administration (NASA,2015). Quicklooks at TRMM Orbits. Recuperado de: <https://pmm.nasa.gov/TRMM/quicklooks-at-TRMM-orbits>

Pabón-Caicedo, J. D., y Eslava-Ramírez, J. A. (2001). Generalidades De La Distribución Espacial Y Temporal De La Temperatura Del Aire Y De La Precipitación En Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47–59. <https://doi.org/ISSN-0124-6984>

Pabón, Jose Daniel; Montealegre, J. E. (2000). La Variabilidad Climática Interanual Asociada Al Ciclo El Niño-La Niña–Oscilación Del Sur Y Su Efecto En El Patrón Pluviométrico De Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7–21. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/281605886>

Pabón J. (2012). Medio Ambiente Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo xx y escenarios posibles para el siglo xxi. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 36(139), 261–278.

Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2016). Validación de la base de datos de precipitación chirps para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014 (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia