



## ***Definición del Sistema de Información Hidrometeorológica***

### **Proyecto**



Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, en el marco de las declaratorias de calamidad pública y desastre del Municipio de Mocoa - Putumayo, debidas al evento presentado el 31 de marzo de 2017.



	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>	
	<b>Documento – Plan de Trabajo</b>	

## CONTENIDO

RESUMEN .....	6
1    ÁREA DE ESTUDIO .....	7
1.1    Evento crítico: 01/04/2017 .....	7
1.2    Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) .....	10
1.3    Geología.....	11
1.4    Geomorfología de laderas .....	11
1.5    Procesos de remoción en masa .....	13
1.6    Usos del suelo .....	14
1.7    Morfometría .....	15
1.8    Tiempos de concentración .....	17
2    PARAMETRIZACIONES FÍSICAS DEL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF) ..	18
3    CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA (IC/BC) .....	21
4    VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS.....	22
4.1    Estaciones meteorológicas.....	23
4.2    Estaciones hidrológicas.....	24
5    SISTEMA DE INFORMACIÓN .....	26
6    HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS UNIVARIADO Y MULTIVARIADO DE LA INFORMACIÓN .....	28
6.1    Herramientas gráficas .....	28
6.2    Funciones de distribución de probabilidad .....	29
6.3    Tendencia de las series .....	30
6.4    Correlograma .....	31
6.5    Periodograma.....	32
6.6    Análisis multivariado.....	33
6.7    Análisis de componentes principales .....	34
6.8    Agrupamiento o Clusters.....	35
6.9    Interpolación espacial.....	36
6.10   Downscaling temporal de las series .....	38
7    ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	39
7.1    Análisis univariado .....	43
7.2    Análisis multivariado.....	58
7.3    Análisis de componentes principales y clusters .....	59

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p><b>Documento – Plan de Trabajo</b></p>		



7.4 Análisis espacial y downscaling temporal de las series ..... 61

8 REFERENCIAS..... 63

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p align="center"><b>Documento – Plan de Trabajo</b></p>		

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación del área de drenaje conformada por los ríos Mulato y Sangoyaco, junto con las quebradas Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	7
Figura 1-2 Precipitación acumulada cada 10 min registrada por la estación Mocoa Autom Acueducto. ....	8
Figura 1-3 Radiosondeo 31 de marzo de 2017. ....	9
Figura 1-4 Imágenes de satélite GOES 16 con el filtro del infrarrojo activo del día del evento fluviotorrencial en Mocoa (01-04-2017).....	9
Figura 1-5 Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	10
Figura 1-6 Pendientes de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	12
Figura 1-7 Imágenes multitemporal Landsat/ Copernicus de la parte alta de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) Sangoyaco, Taruca y Taruquita. ....	13
Figura 1-8 Procesos de remoción en masa registrados por la visita del servicio geológico colombiano SGC. ....	14
Figura 1-9 Coberturas del suelo 2010-2012. ....	15
Figura 2-1 Esquema de las parametrizaciones físicas contenidas en los modelos numéricos. ....	19
Figura 2-2 Composición de la troposfera: capa limite cerca de la superficie y atmosfera libre encima de ella. ....	21
Figura 4-1 Estaciones meteorológicas identificadas en la zona del proyecto. En amarillo se muestra las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) para el municipio de Mocoa.....	24
Figura 4-2 Estaciones hidrológicas identificadas en la zona del proyecto. En amarillo se muestra las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) para el municipio de Mocoa. ....	25
Figura 5-1 Sistema de información a resolución diaria para Mocoa.....	26
Figura 5-2 Sistema de información a resolución minutal para Mocoa. ....	27
Figura 6-1 Diagrama de Caja y Bigotes Fuente: (Moros, 2010) ....	28
Figura 7-1 Datos faltantes del sistema de información (SI), parte 1. ....	40
Figura 7-2 Datos faltantes del sistema de información (SI), parte 2. ....	41
Figura 7-3 Datos faltantes del sistema de información (SI) minutal. ....	41
Figura 7-4 Scatter plot para las variables seleccionadas.....	42
Figura 7-5 Scatter plot para las variables seleccionadas.....	43
Figura 7-6 Diagrama de caja y bigotes para las variables 8-VD, 9-HR, 8-HR, 9-BS, 8-BS, 9-EV, 8-EV, 9TS, 8-TS, 13-ST, 10-ST y 10-SD.....	45
Figura 7-7 Diagrama de caja y bigotes para las variables de precipitación (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9), caudal (12, 13 y 14) y niveles (10, 11, 12, 13 y 14). ....	46
Figura 7-8 Aceptación del test de Kolmogorov–Smirnov. ....	46
Figura 7-9 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de caudal y nivel. ....	47
Figura 7-10 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de nivel.....	48
Figura 7-11 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de precipitación.....	49
Figura 7-12 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de precipitación.....	49
Figura 7-13 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de precipitación.....	50
Figura 7-14 Test de tendencia de Man Kendall para las variables del SI. ....	53
Figura 7-15 Correlograma de las variables 8-VD, 8-HR, 9-TS, 8-TS, 13-ST, 9-HR, 9-BS, 8-BS, 9-EV, 8-EV, 10-ST y 10-SD. ....	54
Figura 7-16 Correlograma de las variables de precipitación (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9), caudales (12,13 y 14) y niveles (10, 11, 12, 13 y 14).....	54
Figura 7-17 Periodograma para las estaciones 8 (HR y TS) y 9(TS). ....	55
Figura 7-18 Periodograma para las estaciones 8 (VD, BS y EV), 9(HR, BS y EV), 13(ST) y 10(ST y SD).....	56
Figura 7-19 Periodograma para la variable de precipitación de las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.....	57
Figura 7-20 Periodograma para las variables de caudal líquido y niveles de las estaciones 12,13 y 14. ....	57
Figura 7-21 Periodos de análisis evaluados.....	59
Figura 7-22 Análisis de componentes principales para las estaciones 13-ST, 4-PT, 3-PT, 9PT, 6PT, 5PT, 13-QL y 13-NV. ....	60
Figura 7-23 Clusters evaluados con el método caminos.....	60
Figura 7-24 Distribución espacial de la precipitación interpolada con Kriging.....	61
Figura 7-25 Scatter plot de las series de precipitación mensual multianual de la precipitación en la parte baja con la parte alta de la cuenca del área delimitada para el proyecto. ....	61
Figura 7-26 Precipitación diez minutal en Mocoa. ....	62
Figura 7-27 Serie complementada de temperatura media observada en la estación 9. ....	63

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p><b>Documento – Plan de Trabajo</b></p>		

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Parámetros morfométricos a evaluar en las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	16
Tabla 1-2 Morfometría de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	16
Tabla 1-3 Tiempos de concentración a evaluar para las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje del río Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	17
Tabla 1-4 Tiempos de concentración para las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje del río Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. ....	18
Tabla 4-1 Ecuaciones de la curva de calibración para las estaciones limnimétricas .....	25
Tabla 5-1 Nomenclatura del SI para el SAT. ....	27
Tabla 5-2 Nomenclatura del SI para el SAT. ....	28
Tabla 6-1 Funciones de densidad de probabilidad evaluadas .....	29
Tabla 6-2 Influencia asignada a cada variable del SI .....	33
Tabla 7-1 Estadísticos básicos en las series hidrometeorológicas.....	44
Tabla 7-2 Periodo de retorno en base a la función generalizada de valores extremos (GEV). ....	51
Tabla 7-3 Periodo de retorno en base a la Kernel.....	52



## **RESUMEN**

El presente informe presenta el Sistema de Información (SI) que será la base de la modelación hidrometeorológica para el Sistema de Alerta Temprana (SAT) por avenidas flujo torrenciales en Mocoa, Colombia. El SI debe ser visto como la recopilación de datos que son considerados a priori como importantes en la conceptualización hidrometeorológica del SAT.

Este reporte está subdividido en 7 capítulos. El primer capítulo presenta la definición espacial y temporal del área de estudio con base en diferentes características tales como la geomorfología, el relieve y el uso del suelo entre otras; como también se muestra la descripción del evento del pasado 31 de marzo del 2017 en el municipio de Mocoa. A continuación, en los capítulos 2 y 3 se describen las parametrizaciones del modelo WRF y las condiciones iniciales y de frontera, respectivamente.

Las variables hidrometeorológicas observadas son presentadas en el capítulo 4. Posteriormente, en el capítulo 5 se presenta el SI y en el capítulo 6 se exponen las herramientas que son utilizadas en el análisis del SI haciendo especial énfasis en la metodología de downscaling temporal. Finalmente en el capítulo 7 se presentan los análisis del SI, el cual es principalmente de resolución diaria dada la falta de información a una escala temporal más fina. En este capítulo se muestra el diagnóstico de las series con análisis univariados y multivariados.

## 1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende el área de drenaje de los ríos Mulato y Sangoyaco, junto con las quebradas Taruca, Taruquita y San Antonio (Ver Figura 1-1), la cual está localizada en el municipio de Mocoa, departamento del Putumayo, hace parte de la subzona hidrográfica del río Alto Caquetá que a su vez es tributaria de la zona hidrográfica río Caquetá.

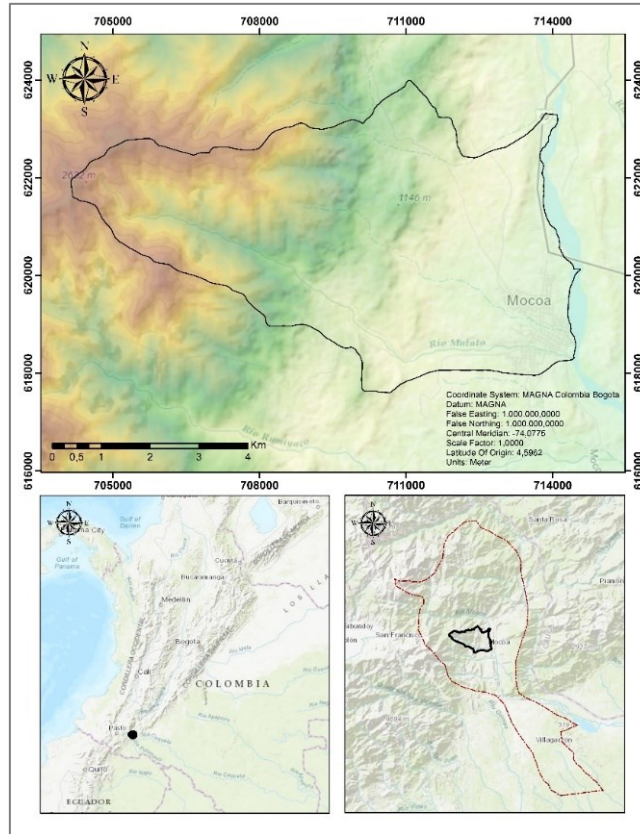


Figura 1-1 Ubicación del área de drenaje conformada por los ríos Mulato y Sangoyaco, junto con las quebradas Taruca, Taruquita y San Antonio.

Fuente: Elaboración propia.

### 1.1 Evento crítico: 01/04/2017

En el municipio de Mocoa durante la noche del 31 de marzo y la madrugada del 1 de abril del 2017 se presentó flujo de detritos que transitaron por las quebradas Taruca, Taruquita y San Antonio, como también los ríos Sangoyaco y Mulato. El día 31 de marzo se registró una precipitación de 129.3 mm de lluvia en la estación de Mocoa Acueducto. En la Figura 1-2 se presenta la precipitación registrado por la estación Mocoa Autom Acueducto, en la que observa el pico de precipitación de 12.3 mm en tan solo 10 min, alcanzando la intensidad máxima del evento de 73.8 mm/hr.

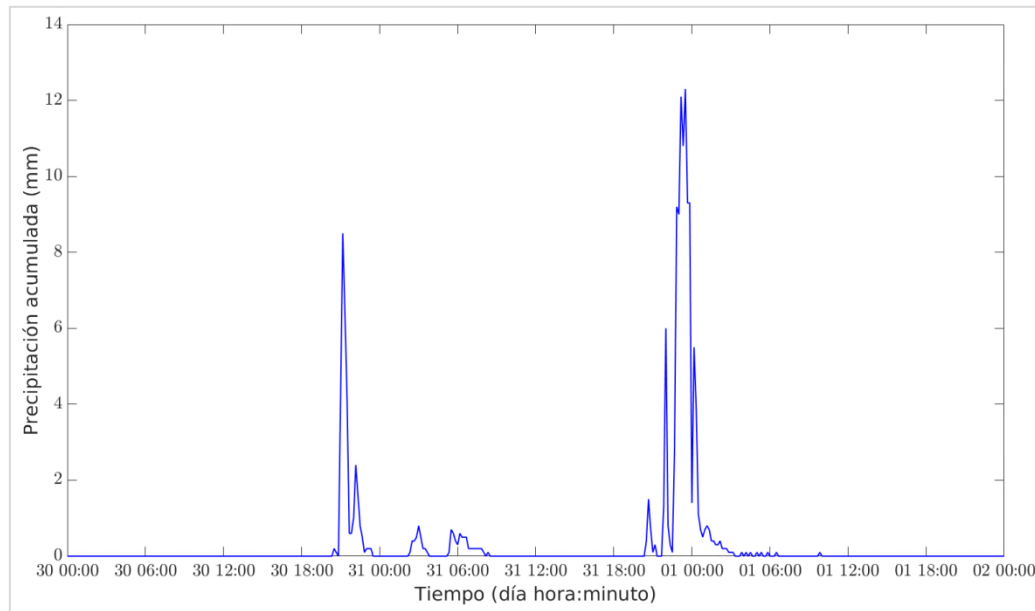


Figura 1-2 Precipitación acumulada cada 10 min registrada por la estación Mocoa Autom Acueducto.  
Fuente: Elaboración propia.

Se hizo un análisis con el radio-sondeo de Leticia en el departamento de Amazonas, el cual corresponde al lugar más cercano a Mocoa para estimar las condiciones sinópticas de la atmósfera y poder inferir hipótesis sobre el evento meteorológico que ocasionó el evento fluviotorrencial sobre el río Mulato, Sangoyaco y las quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio. Inicialmente, se puede observar en la Figura 1-3 que la atmósfera era inestable en los primeros niveles y altamente húmeda llegando a saturación alrededor de los 450 hPa (aproximadamente 5000 msnm). También se observan vientos del este de gran intensidad en los 500 hPa, lo que posiblemente transportaron la humedad desde la Amazonía.

Las imágenes de satélite (Ver Figura 1-4) muestra un sistema meteorológico de gran tamaño espacial que se desplaza de este a oeste encontrando una barrera natural como es el macizo colombiano que propicia la precipitación en la cuenca alta de los ríos y quebradas en el área de estudio. Este sistema húmedo de gran tamaño viajó desde el sur por la frontera con Perú. La suma de estos dos sistemas creó una gran celda activa que descargó gran cantidad de agua en el macizo colombiano.



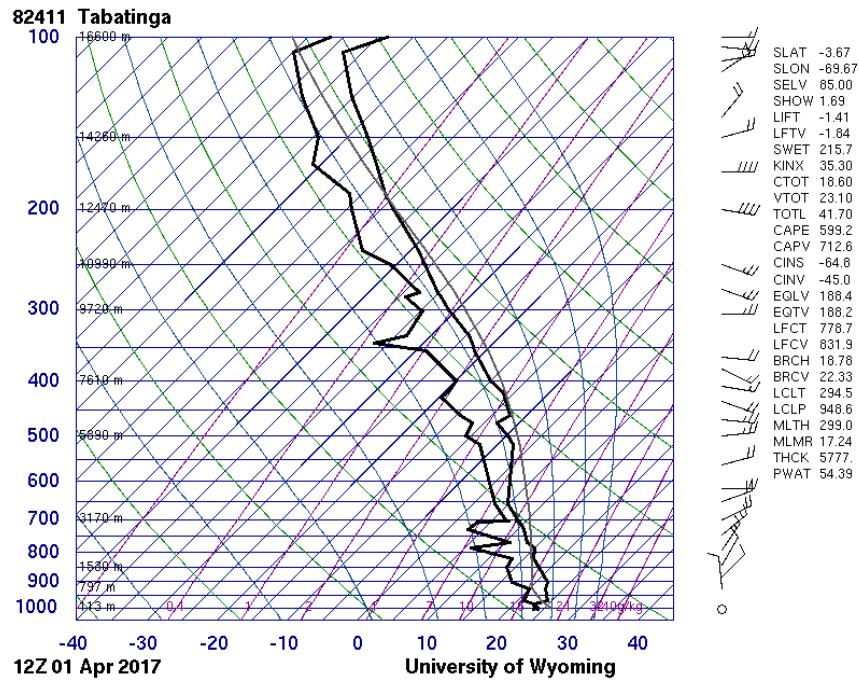


Figura 1-3 Radiosondeo 31 de marzo de 2017.  
Fuente Universidad de Wyoming

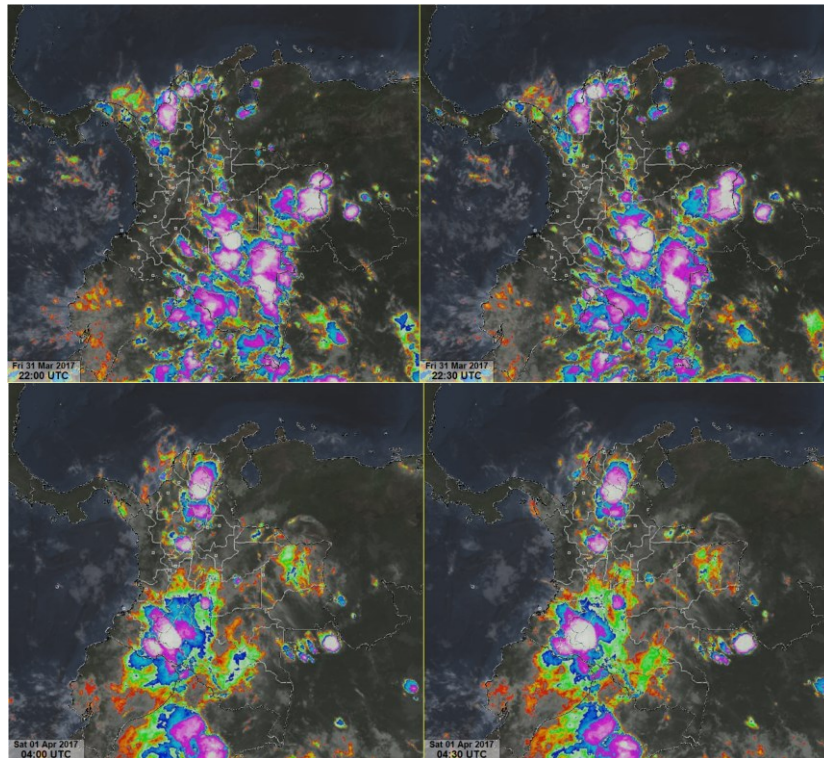


Figura 1-4 Imágenes de satélite GOES 16 con el filtro del infrarrojo activo del día del evento fluviotorrencial en Mocoa (01-04-2017).  
Fuente: NASA

## 1.2 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)

La modelación hidrológica agregada o global, por sí sola no es capaz de captar las respuestas instantáneas ante un evento de lluvia extremo en un punto del área de drenaje en particular, debido a la amplia variabilidad espacial que presentan los campos de lluvia, como también la alta heterogeneidad en cuanto a las condiciones biofísicas, las cuales rigen directamente la repuesta hidrológica de la misma. Por esta razón para el área de estudio, se implementó el concepto de Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU por sus siglas en inglés - Hydrological Response Unit). Estas son áreas de una cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas, como los son la pendiente, la elevación, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y el uso de suelo entre otros (Flügel, 1995).

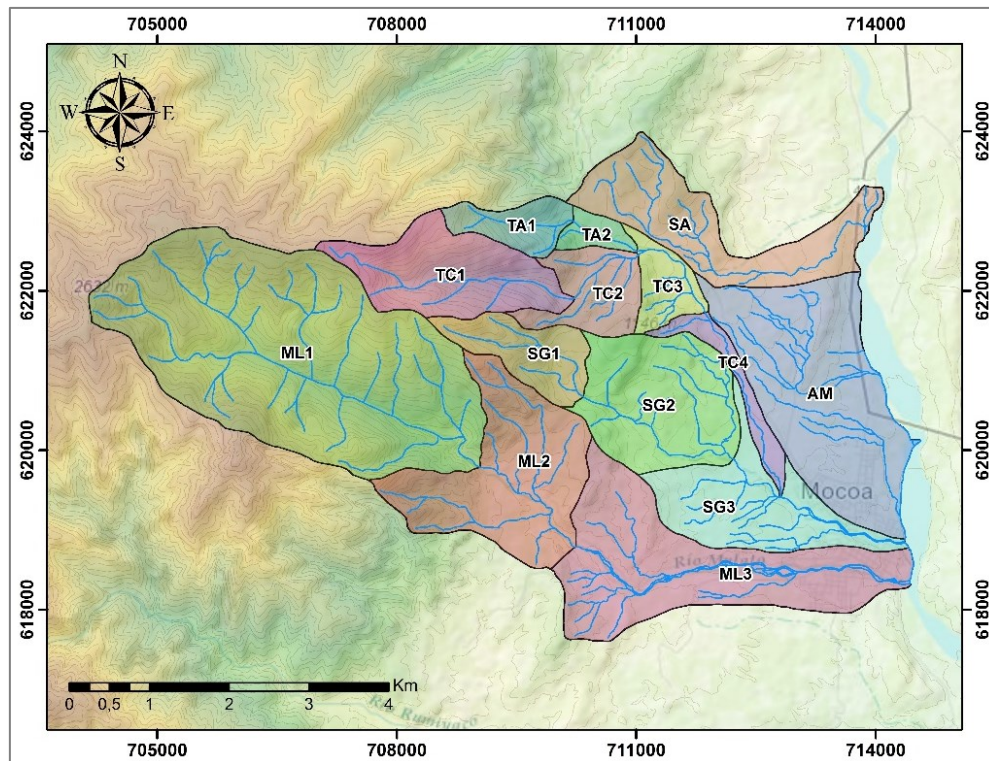


Figura 1-5 Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio.  
Fuente: Elaboración propia.

La selección de las HRU se realizó a partir del análisis de coberturas, pendientes, geología y suelos los cuales se presentan posteriormente. Con base en ésta información se discretizó el área de estudio en 14 HRU conectadas topológicamente como se muestra en la Figura 1-5.

### 1.3 Geología

En el municipio de Mocoa afloran rocas del Jurásico que corresponde a un cuerpo intrusivo conocido como Batolito de Mocoa o Monzogranito de Mocoa (Arango, Rodríguez, Zapata, & Bermúdez, 2015; Servicio Geológico Colombiano, 2017a). En esta región la tectónica está controlada por la continuación sur del sistema de fallas del borde Llanero que corresponde al Sistema de Fallas Algeciras–Garzón que incluye la Falla Mocoa y Afiladores (Robertson & Castiblanco, 2011). La Falla de Mocoa es una estructura importante en la cuenca sedimentaria petrolífera del Putumayo, debido a que marca el límite entre ésta y la cordillera Andina; la cual pone en contacto rocas ígneas plutónicas (JRcd) y volcánicas (JRvs) del juratriasico, con rocas sedimentarias terciarias y cretácicas de las formaciones Villeta, Caballos y grupo orito (Jojoa Chantre, 2003).

En Mocoa han predominado procesos geológicos de tipo denudativo (meteorización, erosión y sedimentación), prevaleciendo los sedimentos del denominado Terciario Superior Amazónico formados por arcillas rojas, amarillas, abigarradas y blancuzcas, y por gravas y areniscas poco consolidadas con matriz ferruginosa o arcillosa. Estas formaciones y sus materiales se encuentran distribuidos en depósitos aluviales y depósitos de terrazas.

Los depósitos aluviales están ubicados sobre pendientes suaves (entre 2-12%), principalmente en las áreas de influencia de los ríos Mocoa y algunas de sus quebradas afluentes. Estos depósitos contienen materiales heterométricos, donde predominan las gravas y arenas con espesores normalmente menores de 20 metros. Los depósitos de terrazas (Qt) están ubicados en las zonas de influencia de las pequeñas llanuras aluviales de desborde de los ríos y quebradas localizadas al occidente del municipio, compuestas generalmente por gravas y conglomerados estratificadas en formaciones con espesores entre 30 y 150 metros, las cuales poseen matrices con materiales finos (Alcaldía Municipal de Mocoa Putumayo, 2000). El Monzogranito de Mocoa (roca fuente de más del 90% del material), las formaciones Villeta, Rumiyaco, Pepino y el Grupo Orito, son las unidades que están relacionadas con el evento como material fuente (Servicio Geológico Colombiano, 2017a).

### 1.4 Geomorfología de laderas

La geomorfología de las microcuencas de los ríos Mocoa, Mulato, Sangoyaco y quebrada Taruca presentan pendientes superiores al 75% y se caracteriza por la inestabilidad debido a la alta meteorización que tienen las rocas y fracturamiento que presentan por la presencia de fallas geológicas lo que ha dado como resultado fuertes plegamientos y degradación (Jojoa Chantre, 2003).

Según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial para Mocoa Putumayo (2000), el municipio cuenta con una gama variada de geoformas que van desde laderas altas de cordillera, hasta planicies ligeramente onduladas. La mayor extensión comprende zonas de montaña, correspondientes a laderas altas de cordillera, cuyas características geomorfológicas son, pendientes mayores al 75%, valles en forma de “V” y suelos superficiales. En el nacimiento del río Mulato, se puede identificar las zonas de laderas bajas de cordillera, caracterizadas por poseer pendientes entre 50 y 75% y drenajes con valles moderadamente profundos. La siguiente unidad de relieve se clasifica como piedemonte cordillerano y se refiere a zonas de colinas altas y bajas, con terrazas fuertemente disectadas y pendientes entre los 10 y el 50%, esta unidad estaría ubicada en la Tebaida, San Antonio (Alcaldía Municipal de Mocoa Putumayo, 2000); en la Figura 1-6 se muestran la distribución de pendientes en las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) del SAT.

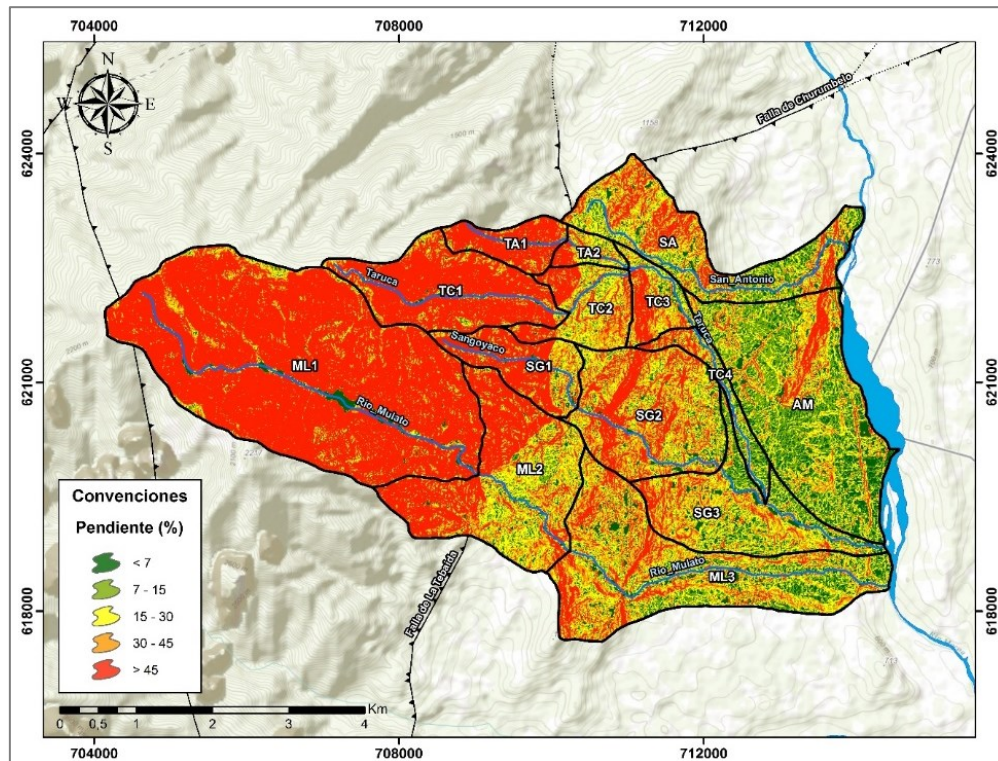


Figura 1-6 Pendientes de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio.

En la Figura 1-7 se muestran las imágenes de la parte alta de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) en 1969, 2001, 2012, 2013 y Abril del 2017. Esta última refleja el estado de las laderas después del evento. En la imagen se puede evidenciar un aumento de procesos de remoción en masa en el lapso de finales del 2012 al 2017; no obstante, por la falta de imágenes entre este lapso no se puede afirmar que todos los procesos de remoción en masa ocurrieron en el evento del 31 de marzo del presente año.

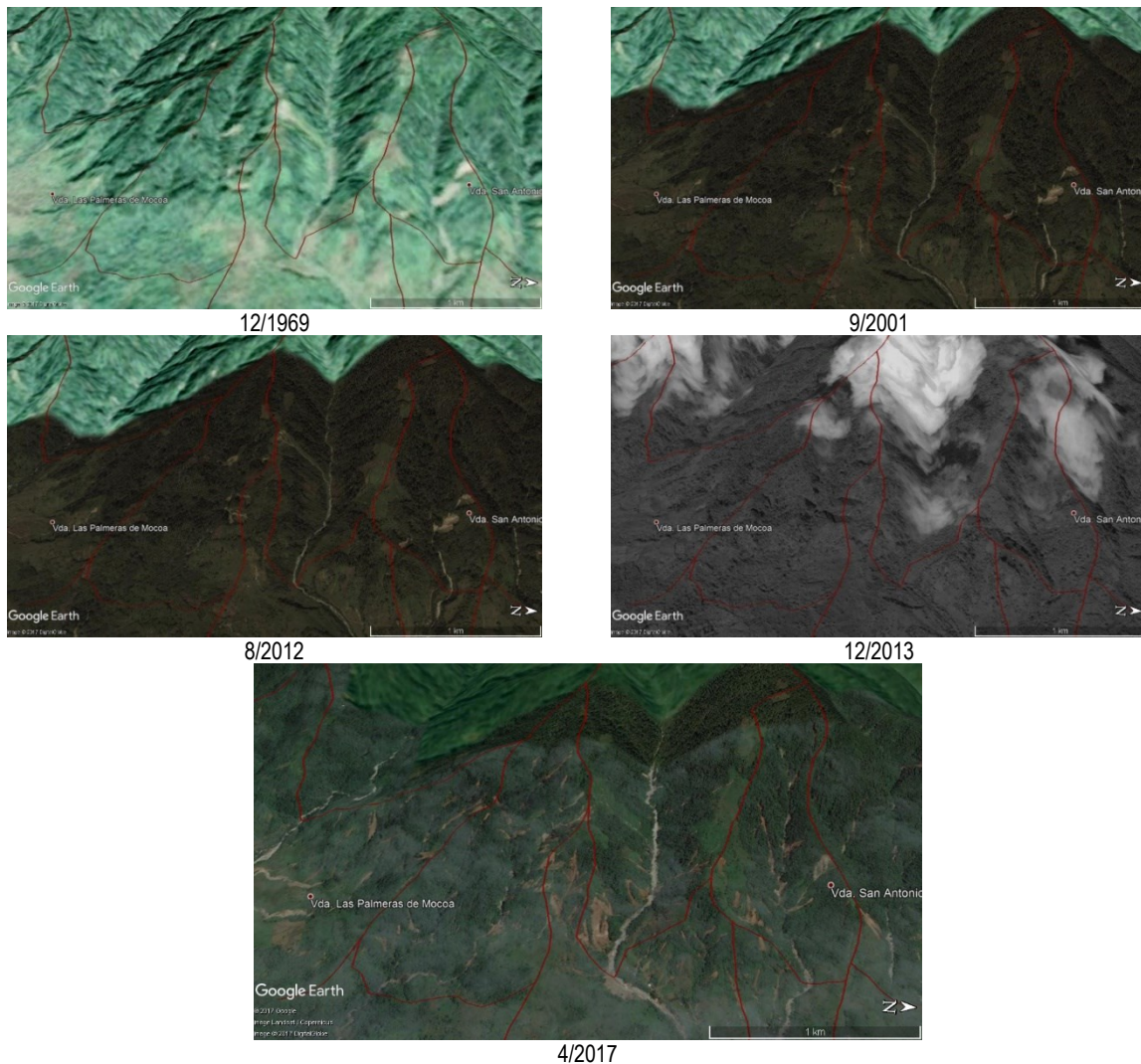


Figura 1-7 Imágenes multitemporal Landsat/ Copernicus de la parte alta de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homogénea (HRU) Sangoyaco, Taruca y Taruquita.  
Fuente: Google Earth

### 1.5 Procesos de remoción en masa

Según el inventario de proceso de remoción en masa detonados en el evento del 31 de marzo de 2017 en el municipio de Mocoa, realizado por el Servicio geológico colombiano (SGC), basado en la interpretación de los movimientos en masa sobre el ortofotomosaico del 6 de abril de 2017 de alta resolución (0.2 m) de Corpoamazonia, adquirida por GeoSspatial y las imágenes satelitales Digital Globe proporcionadas por CORPOAMAZONIA (así mismo después del evento), se identificaron un total de 629 movimientos en masa. Del total de procesos de remoción en masa identificados se presentaron 179 en la parte alta de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) de las quebradas Taruca (TC1) y Taruquita (TA1), de los cuales se estimó que 84 movimientos en masa aportaron directamente a los drenajes (Ver Figura 1-8). En la cuenca del

Río Mulato fueron identificados 132 movimientos en masa, de los cuales 47 aportaron al directamente al afluente hídrico y en la cuenca del río Sangoyaco se detectaron un total de 153 movimientos, de los cuales 59 aportaron material al drenaje (Servicio Geológico Colombiano, 2017b).

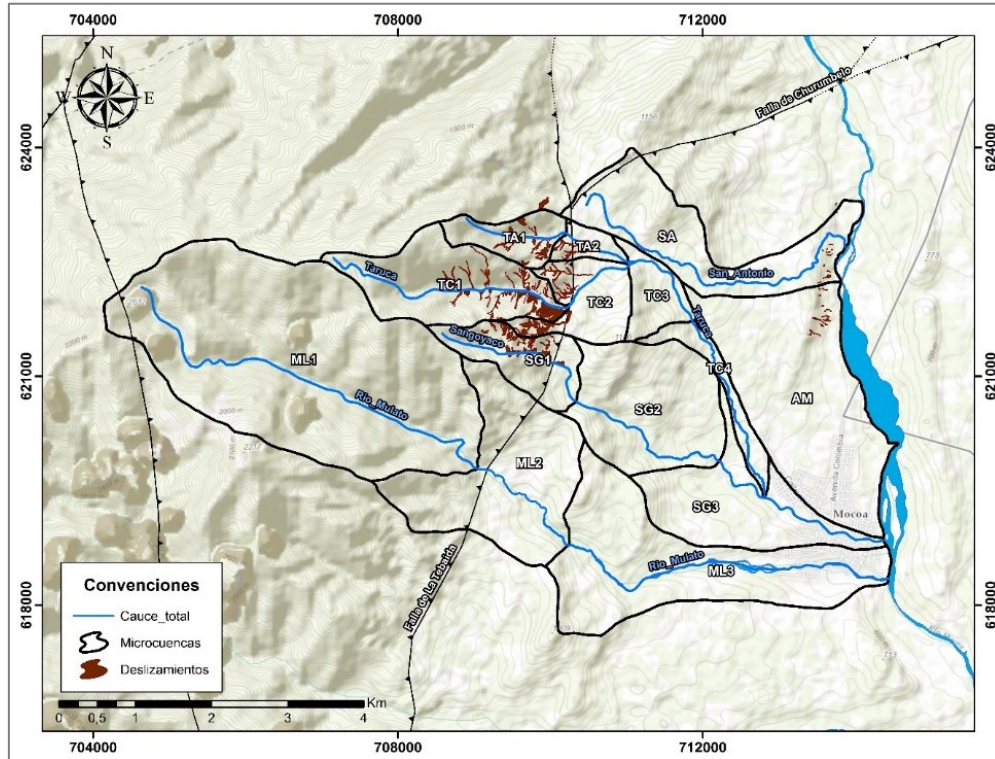


Figura 1-8 Procesos de remoción en masa registrados por la visita del servicio geológico colombiano SGC.

## 1.6 Usos del suelo

En el municipio de Mocoa según el IDEAM, para los años 2010-2012, las coberturas en las HRU comprendían en la parte alta grandes extensiones de bosque denso (Unidad río Mulato ML1 y quebrada Taruca TC1) (Ver Figura 1-9). El tejido urbano continuo se encuentra localizado en la parte baja de las unidades Afluentes Mocoa (AM), la quebrada Taruca (TC4), río Sangoyaco (SG3) y el río Mulato (ML3), en la rivera al margen izquierdo del río Mocoa. En la zona de la unidad quebrada Taruquita (TA1) se identificó bosques fragmentados, como también en la parte intermedia de las HRU se destaca una mezcla entre pastos con vegetación secundaria o en transición.

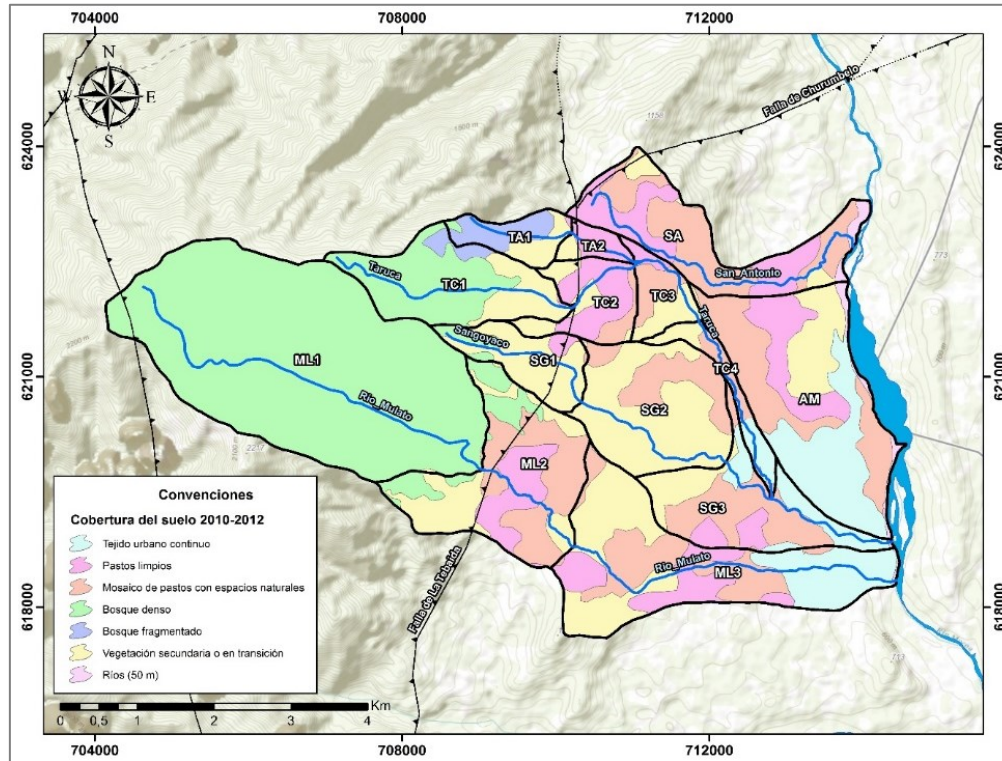


Figura 1-9 Coberturas del suelo 2010-2012.  
Fuente: IDEAM (2014)

## 1.7 Morfometría

La caracterización morfométrica de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las microcuencas de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca, Taruquita y San Antonio del municipio de Mocoa, se realizó a escala 1:25000 tomando como base la cartografía nacional base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se procesó mediante el software ArcGis. El sistema de referenciación utilizado en los productos del presente informe es Magna-Colombia-Bogotá (Código EPSG 3116).

La morfometría hidrográfica actual se centra en el área, longitud, forma y atributos del relieve de la cuenca, y su importancia radica en el poder de inferencia que genera sobre fenómenos tales como las inundaciones, remoción en masa, avenidas torrenciales entre muchos otros más (Dominguez C., 2010). A continuación, se describen algunos parámetros morfométricos para las HRU, adicionalmente en el Anexo 1 se presentan las curvas hipsométricas para cada unidad.

**Tabla 1-1 Parámetros morfométricos a evaluar en las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homogénea (HRU) que componen las áreas de drenaje Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio.**

Parámetros morfométricos	Símbolo	Ecuación	Referencia
Área de la cuenca – Área aferente	A	-	Reyes T. et al (2010)
perímetro o longitud del parteaguas	P	-	Reyes T. et al (2010)
Longitud del cauce principal	L <sub>T</sub>		Dominguez C. (2010)
Coefficiente de sinuosidad	K <sub>s</sub>	$K_s = L_t/L_l$	Dominguez C. (2010)
Distancia lineal desde el nacimiento hasta la desembocadura	L <sub>l</sub>	-	Dominguez C. (2010)
Ancho medio de la cuenca	B	$B = A/L_l$	Dominguez C. (2010)
Factor de forma	F	$F = A/L_t^2$	(Jardí, 1985).
Coefficiente de compacidad	K <sub>C</sub>	$k_c = \frac{P_{cuenca}}{P_{circulo}} = \frac{P_{cuenca}}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P_{cuenca}}{\sqrt{A}}$	Reyes T. et al (2010)
Índice de alargamiento	I <sub>a</sub>	$I_a = L_t/B$	Reyes T. et al (2010)
Altura del cauce principal	H <sub>CAUCE</sub>	$H_{cauce} = H_1f_1 + H_2f_2 + \dots + H_nf_n$	Dominguez C. (2010)
Altura de la cuenca	H <sub>CUENCA</sub>	$H_{cuenca} = H_1f_1 + H_2f_2 + \dots + H_nf_n$	Dominguez C. (2010)
Pendiente de la cuenca	I <sub>CUENCA</sub>	$I_{cuenca} = I_1f_1 + I_2f_2 + \dots + I_nf_n$	Dominguez C. (2010)

Como se puede observar y bajo el criterio de clasificación por áreas de Reyes y colaboradores, las áreas de drenaje que componen el área de estudio se clasifican como unidad, a excepción de ML1 que corresponde a la parte alta del río Mulato. En la Tabla 1-2 se presenta los resultados de la morfometría para las HRU.

**Tabla 1-2 Morfometría de las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homogénea (HRU) que componen las áreas de drenaje Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio.**

Nombre	Á (km <sup>2</sup> )	P (km)	Unidad hidrológica	L <sub>t</sub> (km)	L <sub>l</sub> (km)	K <sub>s</sub>	I <sub>a</sub>	H <sub>CAUCE</sub>	H <sub>CUENCA</sub>	Pendiente	
										Promedio (%)	Clasificación
AM	4,75	10,51	Unidad	-	-	-	-	-	682,29	19,71	Fuertemente inclinado
ML1	9,73	13,18	Sector	5,81	5,02	1,16	2,99	1445,85	1712,63	80,90	Fuertemente escarpado
ML2	3,62	9,83	Unidad	1,83	1,57	1,16	0,79	883,11	1059,33	46,91	Ligeramente escarpado
ML3	4,64	12,59	Unidad	4,68	4,21	1,11	4,25	688,05	762,38	29,01	Ligeramente escarpado
SA	2,80	10,87	Unidad	4,76	3,45	1,38	5,86	858,00	899,80	30,58	Ligeramente escarpado
SG1	1,23	5,43	Unidad	2,29	1,52	1,51	2,81	1238,10	1256,13	61,01	Moderadamente escarpado
SG2	2,95	7,14	Unidad	2,32	2,53	0,92	2,00	789,24	864,41	38,59	Ligeramente escarpado
SG3	2,43	10,56	Unidad	2,71	2,39	1,13	2,67	618,85	684,86	24,86	Fuertemente inclinado
TA1	0,75	4,18	Unidad	1,39	1,35	1,04	2,51	1330,46	1397,49	74,22	Moderadamente escarpado



TA2	0,35	2,82	Unidad	1,01	0,89	1,13	2,59	1013,56	1063,61	37,90	Ligeramente escarpado
TC1	2,43	7,87	Unidad	3,44	3,15	1,09	4,46	1540,82	1613,70	75,35	Fuertemente escarpado
TC2	1,19	5,97	Unidad	1,04	0,96	1,08	0,84	1023,38	1101,68	40,72	Ligeramente escarpado
TC3	0,73	4,20	Unidad	1,34	1,11	1,20	2,05	901,41	956,19	37,88	Ligeramente escarpado
TC4	0,62	6,57	Unidad	2,70	2,51	1,08	10,97	730,40	769,97	25,62	Ligeramente escarpado

Fuente: Elaboración propia.

## 1.8 Tiempos de concentración

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) se asocia generalmente con el tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo. No obstante, algunos autores reportan el  $T_c$  como el tiempo comprendido entre el centroide del hietograma de excesos y el punto de inflexión sobre la curva de recesión del hidrograma de escurrimiento directo. Otros definen el tiempo de concentración como el tiempo que demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. Se encuentran también definiciones como el lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. Existen una serie de fórmulas que permiten la determinación de este tiempo desarrolladas por diversos autores. Sus ecuaciones para el cálculo se muestran a continuación (Velez & Botero, 2010):

Tabla 1-3 Tiempos de concentración a evaluar para las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) que componen las áreas de drenaje del río Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio.

Tiempo de concentración (TC)	Ecuación
Bransby-Williams	$T_c = 14.6LA^{-0.1}S^{-0.2}$
California Culvert Practice	$T_c = \left[ \frac{0.87075L^3}{H} \right]^{0.385}$
Clark	$T_c = 0.335 \left[ \frac{A}{H^{0.5}} \right]^{0.593}$
Giandotti	$T_c = \left[ \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \right]^{0.75}$
Kirpich	$T_c = 0.02 * L^{0.77} * S^{-0.385}$
Passini	$T_c = \left[ \frac{0.108 * (A * L)^{1/3}}{S^{0.5}} \right]$
Pilgrim y McDermott	$T_c = 0,76A^{0.38}$
Témez	$T_c = 0.3 * \left[ \frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.75}$

Valencia y Zuluaga	$T_c = 1,7694A^{0.325}A^{-0.096}A^{-0.290}$
--------------------	---

Tc: Tiempo de concentración (horas), A: Área de la cuenca en Km<sup>2</sup>, H: diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m), L: Longitud del cauce principal (Km) y S: Pendiente promedio del cauce principal (m/m).

Los tiempos de concentración se determinaron para cada una de las unidades de respuesta hidrológicas definidas para el área de drenaje río del río Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio por cada una de las metodologías descritas anteriormente. En la Tabla 1-4 se presentan los resultados obtenidos, como es de esperar, los valores difieren ampliamente según la metodología utilizada. Sin embargo, los valores reflejan tiempos de concentración relativamente cortos propios de cuencas de alta montaña con altas pendientes.

Tabla 1-4 Tiempos de concentración para las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homogénea (HRU) que componen las áreas de drenaje del río Mulato, Sangoyaco, quebradas la Taruca, Taruquita y San Antonio.

Nombre	Bransby-Williams	California Culvert Practice	Clark	Giandotti	Kirpich	Passini	Pilgrim y McDermott	Témez	Valencia y Zuluaga
ML1	1,33	0,41	1,64	0,52	0,35	0,62	1,80	1,33	1,04
ML2	0,54	0,13	1,15	0,67	0,19	0,45	1,24	0,64	1,05
ML3	1,42	0,44	1,45	0,73	0,45	0,77	1,36	1,38	1,13
SA	1,47	0,42	1,02	0,59	0,42	0,60	1,12	1,36	0,92
SG1	0,65	0,16	0,49	0,32	0,17	0,24	0,82	0,66	0,59
SG2	0,68	0,19	0,98	0,56	0,22	0,43	1,15	0,75	0,93
SG3	0,90	0,24	1,03	0,67	0,31	0,55	1,06	0,94	1,01
TA1	0,39	0,09	0,33	0,25	0,11	0,15	0,68	0,43	0,48
TA2	0,37	0,07	0,29	0,34	0,12	0,17	0,51	0,41	0,52
TC1	0,90	0,23	0,72	0,37	0,24	0,33	1,06	0,90	0,70
TC2	0,36	0,07	0,65	0,59	0,14	0,30	0,81	0,44	0,85
TC3	0,47	0,09	0,45	0,43	0,16	0,25	0,67	0,51	0,66
TC4	1,02	0,23	0,45	0,46	0,30	0,34	0,63	0,93	0,64

Fuente: Elaboración Propia

## 2 PARAMETRIZACIONES FÍSICAS DEL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

Las parametrizaciones físicas consisten en procesos que no se pueden representar por ecuaciones basadas en leyes físicas, sino que son productos de experimentaciones y experiencias de empíricas. Este tipo de parametrizaciones generalmente se usa en esquemas de alta resolución espacial y temporal (escala de grilla), donde la fenomenología cambia y las escalas de cada proceso es diferente; por ejemplo, la turbulencia, y los flujos desde la superficie (Castro et al., 1991). En la Figura 2-1 se observa los diferentes procesos que intervienen en el ciclo del agua. Estos procesos interactúan continuamente, pero en los modelos numéricos

deben ser resueltos separadamente, debido a la incompatibilidad de escalas de cada proceso respecto a la escala de la dinámica de fluidos. En este estudio se hará énfasis en solo dos parametrizaciones físicas: Microfísica, y capa limite atmosférica.



Figura 2-1 Esquema de las parametrizaciones físicas contenidas en los modelos numéricos.  
Fuente: METED - Meteorological Education (2013)

### Microfísica de Nubes

Los esquemas de microfísica describen la formación (llamado nucleación), crecimiento y precipitación de las partículas de agua (hidrometeoros). Adicionalmente proporcionan las tasas de calor latente de la superficie que alimenta el núcleo dinámico, en otras palabras, establece el intercambio energético

Las suposiciones básicas de la parametrización de microfísica son:

- De los diferentes tipos de hidrometeoros que existen, se ha simplificado el análisis y estudio a unos pocos, como son gotas en la nube, gotas de lluvia, hielo en la nube, nieve, granizo, etc.
- Se supone un equilibrio termodinámico entre las gotas de las nubes y el vapor de agua. Por lo tanto, la condensación y/o evaporación es tratado por el método ajustado de saturación.

La condensación y/o evaporación de las gotas en la nube puede ser parametrizado por el esquema ajustado de saturación. Este esquema lleva la humedad relativa a un valor del 100% cuando se produce sobresaturación. De este modo, la entalpia de condensación o deposición (precipitación) se libera, la temperatura aumenta justo para



una humedad del 100%, por lo tanto, el aire se condensa formando gotas en la nube a una temperatura mayor a 273,15 °K (mayor a 0°C) (Straka, 2009). Se describe los esquemas usados en el modelo propuesto en el Sistema de Alerta temprana de Mocoa.

El esquema de Thompson es un esquema tipo “bulk” de fase mixta. Siendo muy eficiente en la recolección de lluvia y en los procesos de descongelación. Incluye los hidrometeoros agua en la nube, lluvia líquida, hielo prístino, nieve y granizo (en diferente estado, blando, duro, etc.). Tiene capacidad de predecir lloviznas frías. Incluye la influencia natural y antropogénica en los aerosoles y desarrollo de la precipitación. Implementaciones en zonas de latitudes medias con buen desempeño para la estimación de tormentas severas, en la zona andina colombiana y zona de piedemonte, donde los flujos convectivos influyen procesos locales de formación de nubes. (Uribe, 2012).

### Capa Límite Atmosférica

La capa límite atmosférica o PBL como se conoce, por sus siglas en inglés (Planetary Boundary Layer) es definida por (Stull, 1988) como “La parte de la troposfera que está influenciada por la superficie de la tierra, y responde a fuerzas de superficie con escalas temporales cerca de la hora o menos”, (ver Figura 2-2). En otras palabras, la capa límite es la fracción cerca de la superficie donde ocurre la transferencia de energía turbulenta, también conocida como capa de mezcla, esta zona de atmósfera se mezclan los gases y contaminantes que emergen de la superficie.

La parametrización de la capa límite, consiste en el cálculo de los valores de los flujos turbulentos en el nivel de superficie, y a lo extenso de la atmósfera, como una función de los valores de la variable de pronóstico, que es proporcionada por el núcleo dinámico del modelo. En las inmediaciones de la superficie, los flujos también dependen de las variables del suelo suministradas por el modelo de superficie (parametrización de superficie), (Coiffier, 2011).

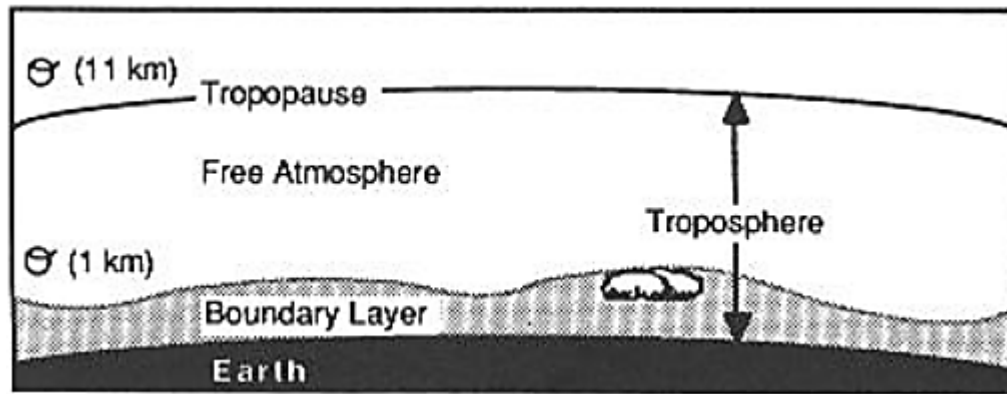


Figura 2-2 Composición de la troposfera: capa límite cerca de la superficie y atmósfera libre encima de ella.  
Fuente: Stull (1988)

Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) PBL-EI es un esquema MYJ, el cual determina los coeficientes de difusión turbulentos (eddies) desde en la energía cinética turbulenta ó TKE (del inglés, Turbulent Kinetic Energy) y representa la turbulencia en la capa de superficie. Es adecuado para los flujos estables y ligeramente inestables, aunque es propenso a errores altos cuando el flujo se acerca al límite de convección libre. Ha sido modificado para la implementación en el modelo WRF, y la formulación ha aumentado el número de Richardson crítico de 0 a 0.25, mejorando la mezcla en la capa límite estable.

### 3 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA (IC/BC)

Existen dos conjuntos de datos que se pueden implementar para la inicialización y predicción en tiempo real, los datos de EE.UU *Global Forecasting Systems* (GFS con dos resoluciones espaciales) y del *European Center of Medium-range Weather Forecast* (ECMWF). Ambos sistemas consisten en modelos globales de pronósticos y son disponibles para los el uso directo de WRF. El GFS y el ECMWF son muy similares aunque difieren (sutilmente) en los métodos de asimilación de datos y los procedimientos para la inclusión y transformación de datos derivados de plataformas satelitales. Además, estos modelos son ampliamente reconocidos en su capacidad de simular los aspectos básicos del clima de la región y sistemas meteorológicos que introducen variabilidad (y predictibilidad) en la región del sur de Colombia (Cuenca Amazónica).

Existen muchos grados de libertad y esquemas de parametrización física dentro de WRF, incluyendo, física de las nubes, capa límite, convección, radiación solar, interacción suelo- atmósfera, que dificultan la selección de una combinación de parámetros única (también llamado “simulación determinística”). Esta tarea es más difícil considerando que las condiciones climáticas cambian durante el año y durante condiciones del flujo extremas. Sin embargo, es común, y en algunos casos necesarios, realizar estudios de sensibilidad a las parametrizaciones



físicas del modelo. Por ejemplo variando los esquemas disponibles de parametrización de los procesos más importantes para la aplicación deseada, en este caso eventos de precipitación. Existen varias opciones para los procesos de interacción suelo- atmósfera, capa superficial y límite, procesos húmedos (convectivos y de microfísica de las nubes), procesos de radiación. La calidad de las condiciones de frontera estáticas y la escala de la información, incluyendo la topografía, usos del suelo, y SSTs, también pueden influenciar las soluciones de WRF.

Cuando los recursos computacionales lo permiten, se recomienda el uso de conjunto de simulaciones o “Ensamblajes o Simulaciones probabilísticas”. Esto se justifica dado a que la incertidumbre que se introduce en las diferentes capas de modelamiento, las limitaciones en las condiciones iniciales y de borde, y en el procesamiento de la información para las simulaciones. Los ensambles tienen un costo computacional alto pero ayudan a determinar el rango de soluciones asociados ya sea a (i) diferentes esquemas de parametrización física, (ii) perturbaciones en las condiciones iniciales, (iii) o diferentes modelos globales y NWP, (iv) o combinaciones de las anteriores. Es común realizar estudios de diagnósticos para buscar la mejor forma y realizar ensambles ya sea durante condiciones de flujo frecuentes o casos extremos. Estos diagnósticos entregan información de la predictibilidad del sistema y en algunos casos, configuraciones del modelo “óptimas” para replicar en modo operativo.

Los modelos meteorológicos son imperfectos y altamente no-lineales, i.e., pequeños cambios en las condiciones iniciales causan divergencia en las soluciones. Varios de los procesos físicos atmosféricos son parametrizados en el modelo y en algunos casos no completamente entendidos. Se acostumbra estudiar el efecto de los diferentes esquemas de parametrización y el efecto de las observaciones usadas para crear las condiciones iniciales. Aunque la configuración óptima del modelo puede variar con respecto a la época del año y las condiciones de flujo predominantes. Los métodos de predicción probabilista (ensambles) son una forma segura y cada vez más común para atacar estos problemas.

#### 4 VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS

La disponibilidad de datos hidrometeorológicos históricos de alta resolución espacio - temporal es fundamental en la concepción de un sistema de alerta temprana por avenidas torrenciales en ríos de alta montaña, como lo son los ríos Mulato y Sangoyaco, y las quebradas Taruca y Taruquita. Las HRU se caracterizan por las altas pendientes, la amplia heterogeneidad de la distribución de los campos de lluvia y altas intensidades, la variación del relieve, los cambios de la fisiografía y de las coberturas, como también presentan cortos tiempos de

concentración, lo cual reitera el uso en el estudio de datos del comportamiento hidrológico a una resolución muy fina (horaria o subhoraria).

#### **4.1 Estaciones meteorológicas**

Se realizó una búsqueda de las estaciones de medición en la zona, con el fin de conocer la cantidad y calidad de información meteorológica disponible. Se cuenta con información de las estaciones de medición en tierra en su mayoría pertenecientes al IDEAM y en una menor proporción del Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá (SIATA). En la Figura 4-1 se muestra la localización de las estaciones para la zona del proyecto, las convenciones empleadas para identificar la categoría de la estación son las utilizadas por las entidades: agrometeorológica (AM), climatológica ordinaria (CO), pluviográfica (PG) y pluviométrica PM. Además de las estaciones de precipitación a resolución diaria y minutar mostradas en la Figura 4-1, fue posible acceder a la información a nivel subdiario (estación pluviográfica) de la estación Acdto Mocoa Autom ubicada en el área urbana del municipio de Mocoa.

Se resalta de la información base, los registros de tres estaciones pluviométricas (1010, 1012 y 1021) instaladas por el SIATA en el municipio de Mocoa, y los datos registrados por la estación meteorológica denominada “Policía [1011]”, con registros que van desde el 13 de abril del 2017 hasta el 6 de octubre del 2017 a alta resolución temporal.

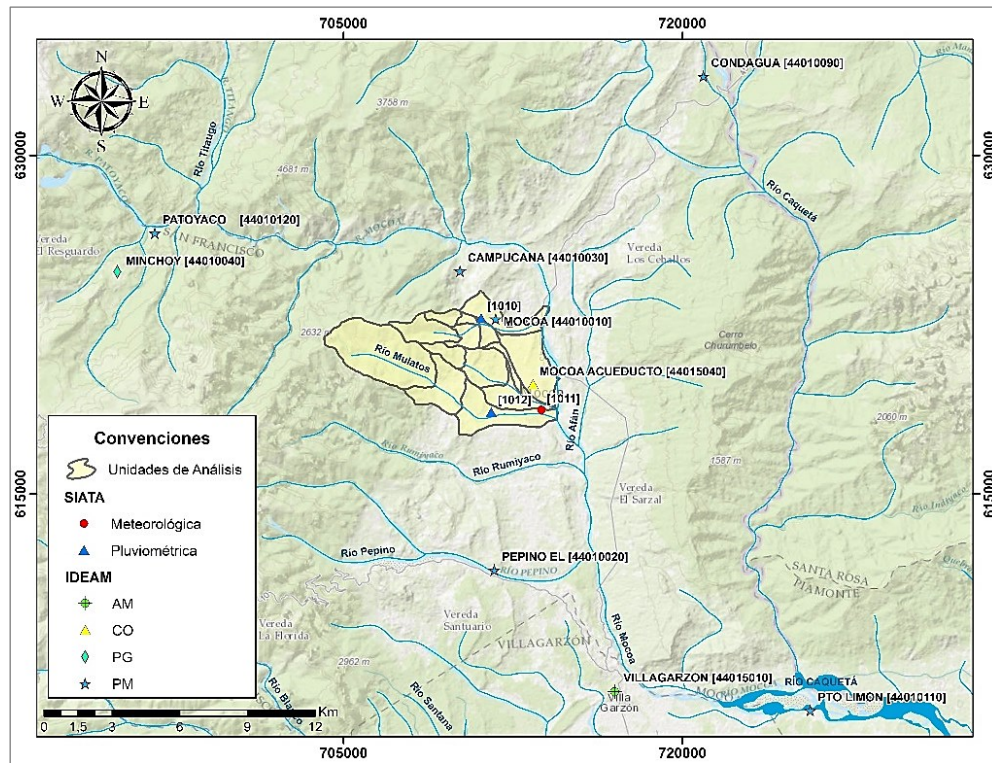


Figura 4-1 Estaciones meteorológicas identificadas en la zona del proyecto. En amarillo se muestra las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homógena (HRU) para el municipio de Mocoa.

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Estaciones hidrológicas

En cuanto a las estaciones de medición de caudal instaladas por el IDEAM, no se encontraron dentro del área de estudio; sin embargo, se cuenta con la información de niveles de las estaciones que fueron instaladas por el SIATA en los ríos Mulato y Sangoyaco (1014 y 1013, respectivamente) poco después del evento del 31 de marzo, con registros que van desde el 13 de abril del 2017 hasta el 6 de octubre del 2017 a una resolución minutal, con la limitante que no se tiene a la fecha las curvas de calibración para las secciones en esas estaciones, sumando otra dificultad para la realización de dicho tipo de análisis hidrológico. La información hidrológica disponible, correspondió a registros de las estaciones mostradas en la Figura 4-2.



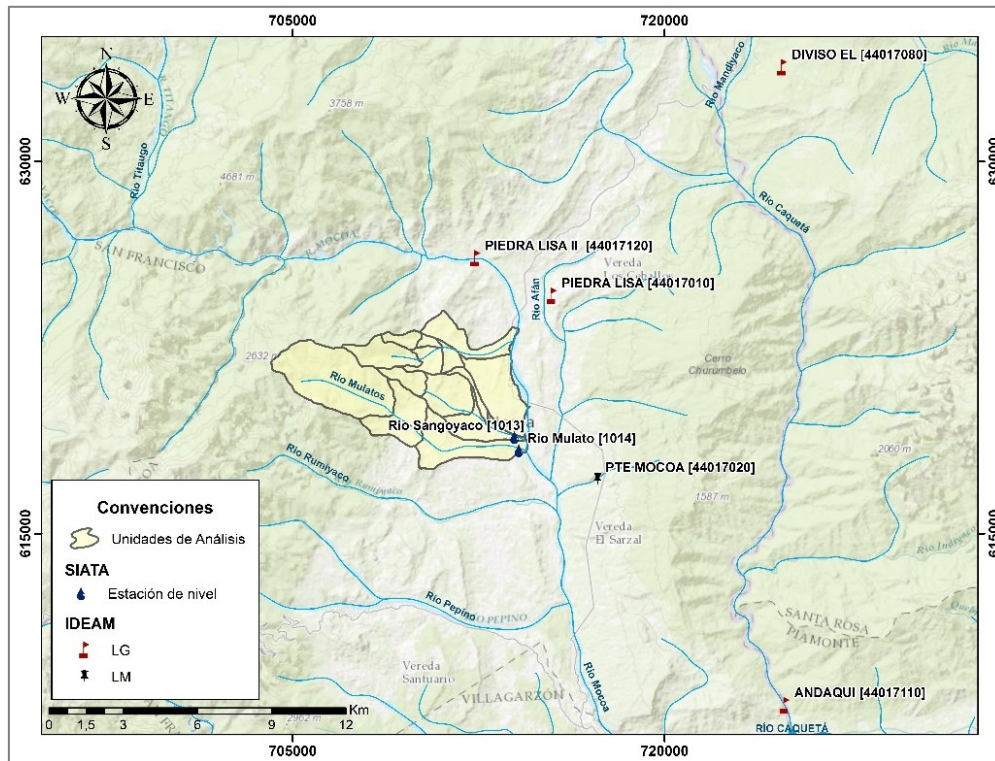


Figura 4-2 Estaciones hidrológicas identificadas en la zona del proyecto. En amarillo se muestra las Unidades Hidrológicas de Respuesta Homogénea (HRU) para el municipio de Mocoa.  
Fuente: Elaboración propia

Dado que de la información hidrológica proveniente del IDEAM se cuenta con niveles, fue necesario realizar las curvas de calibración empleando la metodología descrita por McMillan, Freer, Pappenberger, Krueger, & Clark (2010) para cada estación en base a los datos de los aforos en cada una de ellas, de tal manera que se obtuvo la ecuación de ajuste a la curva, lo cual permite realizar la posterior conversión de nivel a caudal. A continuación, se presenta las ecuaciones determinadas para cada estación y en el Anexo 2 se presentan las curvas de calibración encontradas para las mismas.

Tabla 4-1 Ecuaciones de la curva de calibración para las estaciones limnimétricas

Código de Estación	Ecuación		
	Convnt. fit	Bootstr. fit	Kmeans fit
44017010	$Q = 7,69L^{2,73} + 21,33$	$Q = 5,69L^{2,97} + 24,43$	$Q = 35,31L^{1,65} + 0,00$
44017080	$Q = 98,51L^{0,86} + 1,64$	$Q = 96,89L^{0,85} + 0,00$	$Q = 101,78L^{0,82} + 0,00$
44017110	$Q = 50,30L^{2,22} + 0,00$	$Q = 48,42L^{2,27} + 0,00$	$Q = 37,60L^{2,54} + 0,00$
44017120	$Q = 34,34L^{1,56} + 3,85$	$Q = 29,34L^{1,65} + 7,23$	$Q = 9,46L^{4,99} + 21,93$
44017130	$Q = 11,07L^{3,24} + 101,70$	$Q = 10,01L^{3,37} + 97,7$	$Q = 29,72L^{2,29} + 86,10$
44017140	$Q = 63,23L^{0,80} + 0,00$	$Q = 61,79L^{0,81} + 0,00$	$Q = 67,61L^{2,69} + 16,60$
44017150	$Q = 39,99L^{2,08} + 26,47$	$Q = 41,34L^{2,07} + 24,57$	$Q = 47,39L^{1,87} + 20,43$
47017030	$Q = 10,50L^{30,99} + 0,35$	$Q = 1,24L^{6,52} + 0,31$	$Q = -49,41L^{-0,01} + 50,20$
47017040	$Q = -3,66L^{38,04} + 0,41$	$Q = -0,01L^{0,74} + 0,42$	$Q = 19883,69L^{12,48} + 0,37$
47017050	$Q = 20,82L^{2,34} + 1,52$	$Q = 20,61L^{2,43} + 1,53$	$Q = 74,56L^{4,44} + 2,39$
47017060	$Q = 1726,34L^{12,23} + 0,08$	$Q = 213,91L^{11,13} + 0,08$	$Q = 2596,21L^{12,87} + 0,09$

Código de Estación	Ecuación		
	Convent. fit	Bootstr. fit	Kmeans fit
47017070	$Q = 6,94L^{1,46} + 12,36$	$Q = 8,94L^{1,34} + 10,74$	$Q = 7,16L^{2,48} + 0,00$
47017080	$Q = 2,58L^{1,87} + 3,31$	$Q = 2,20L^{1,84} + 3,73$	$Q = 9,91L^{1,68} + 0,00$
47017140	$Q = 0,65L^{4,28} + 2,90$	$Q = 0,67L^{4,24} + 2,87$	$Q = 4,74L^{2,24} + 0,00$

Fuente: Elaboración propia.

## 5 SISTEMA DE INFORMACIÓN

El sistema de información (SI) a resolución diaria que se estableció para Mocoa está conformado por 14 estaciones del IDEAM (Ver Figura 5-1), las estaciones están numeradas del 1 al 14 para simplificar la nomenclatura. Las variables que están disponibles son: velocidad del viento (VD), humedad relativa (HR), brillo solar (BS), evaporación (EV), temperatura media diaria (TS), transporte diario de materiales en suspensión (ST), concentración media diaria de sedimentos en suspensión (SD), precipitación diaria (PT), caudal líquido (QL) y niveles de caudal (NV). En el Anexo 3 se presenta el mapa con las variables que registra cada estación, junto con el periodo de registro.

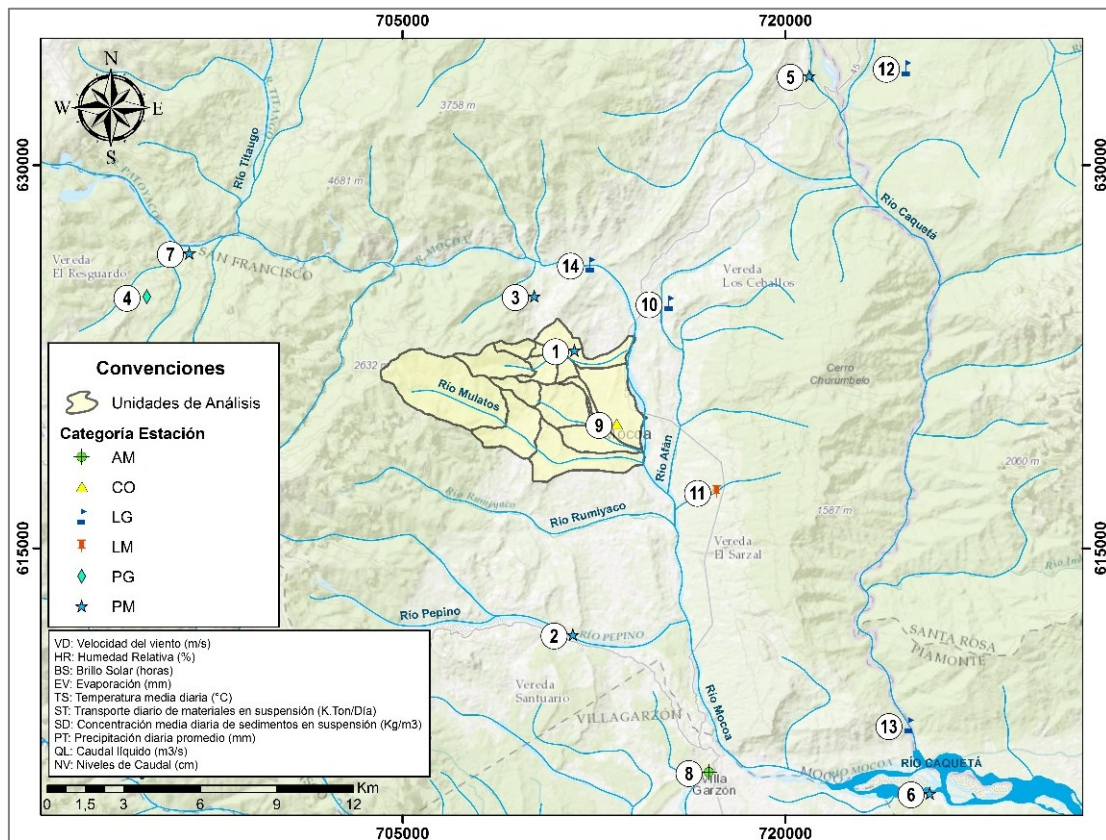


Figura 5-1 Sistema de información a resolución diaria para Mocoa.

Fuente: Elaboración propia

A partir del SI, se pueden realizar los procedimientos pertinentes para obtener la información en cada una de las HRU del presente proyecto. En la Tabla 5-1 se denota la nomenclatura empleada en el SI para el SAT y la estación del IDEAM a la cual corresponde.

Tabla 5-1 Nomenclatura del SI para el SAT.

ID SAT	ID IDEAM	ID SAT	ID IDEAM
1	44010010	8	44015010
2	44010020	9	44015040
3	44010030	10	44017010
4	44010040	11	44017020
5	44010090	12	44017080
6	44010110	13	44017110
7	44010120	14	44017120

Fuente: Elaboración propia

El sistema de información a resolución minutal está compuesto por las estaciones automáticas del IDEAM, las cuales registran precipitación a resolución diez minutal, y la estación del SIATA a resolución minutal que registra la temperatura en el casco urbano de Mocoa. En la Figura 5-2 se presentan la localización de las estaciones del sistema de información a resolución minutal.

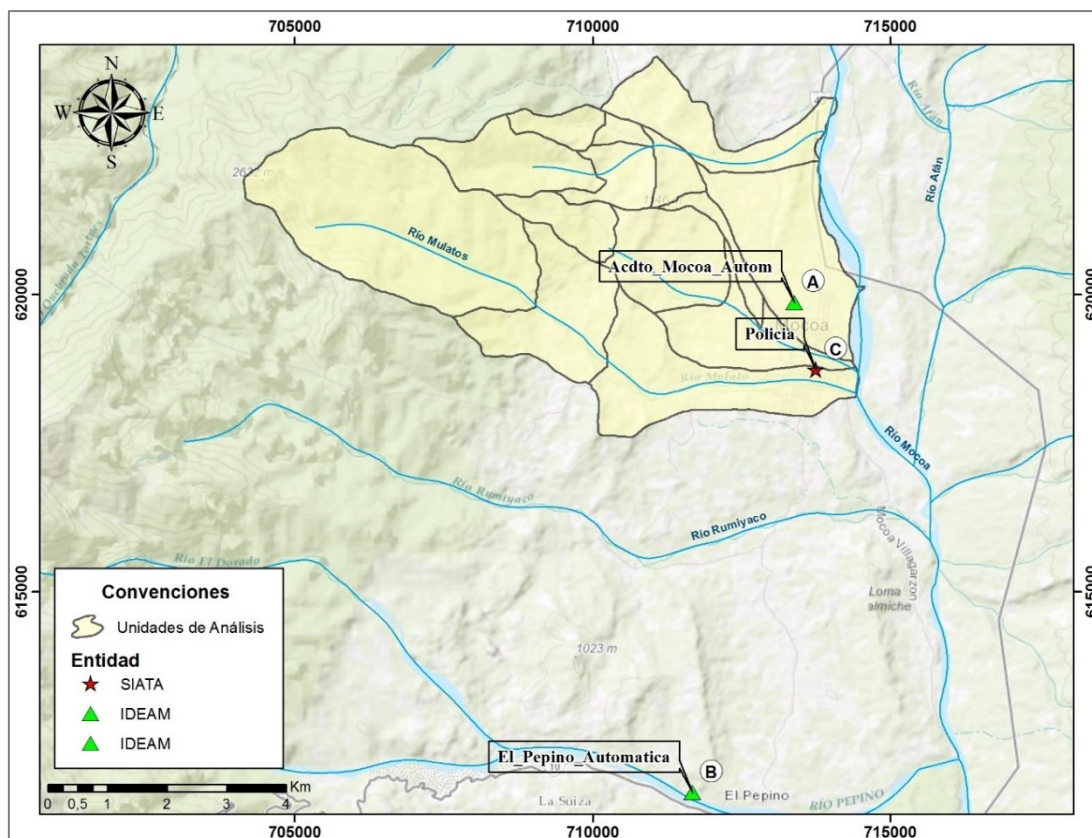


Figura 5-2 Sistema de información a resolución minutal para Mocoa.

Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de sintetizar la nomenclatura para efectos de la presentación de los resultados, se ha denominado las tres estaciones con las letras A, B y C. En la Tabla 5-2 se denota la nomenclatura empleada en el SI para el SAT y el código oficial al cual corresponde según la entidad la que pertenece.

Tabla 5-2 Nomenclatura del SI para el SAT.

ID SAT	ID DE LA ENTIDAD
A	44015060
B	44015070
C	1011

Fuente: Elaboración propia

## 6 HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS UNIVARIADO Y MULTIVARIADO DE LA INFORMACIÓN

### 6.1 Herramientas gráficas

Para el análisis de la información se emplearon las herramientas gráficas del box plots y scatter plot. Un diagrama de dispersión o scatter plot es un resumen útil de un conjunto de datos bivariados (dos variables), generalmente extraídos antes de calcular un coeficiente de correlación lineal o ajustar una línea de regresión. Proporciona una buena imagen visual de la relación entre las dos variables y ayuda a la interpretación del coeficiente de correlación o modelo de regresión.

El diagrama de box plot, también conocido como box – whister, fue desarrollado por Tuckey en 1977, ofrece una representación creada a partir de siete números, con el objeto de que los datos del conjunto analizado no pierdan su distribución espacial. Esta herramienta de análisis exploratorio permite estudiar la simetría de los datos y detectar los valores atípicos en la información que se está analizando (Ver Figura 6-1).

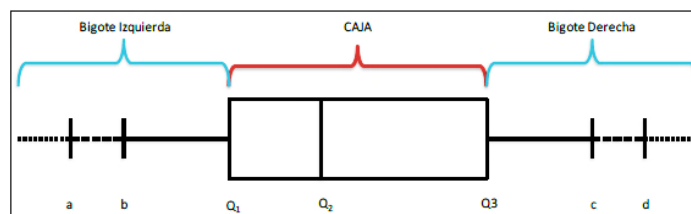


Figura 6-1 Diagrama de Caja y Bigotes  
Fuente: (Moros, 2010)

El diagrama de caja y bigotes consta de una caja central y dos segmentos horizontales (bigotes) que parten del centro de cada lado de la caja. La caja central encierra el 50% de los datos. La línea vertical al interior de la caja representa la mediana o 50 percentil. Si esta línea está en el centro de la caja, no hay asimetría en los datos. Los

lados verticales de la caja están situados en los cuartiles inferior (25 percentil) y superior (75 percentil) de los datos.

Para el presente informe se graficaron los box plot que parten de series normalizadas, es decir, a cada serie se le resta la media y se dividió por la desviación estándar, y se aplicó una translación adimensional con un factor para obtener todos los valores positivos y poderlos graficar en escala logarítmica, de manera que se visualice mejor los resultados.

## 6.2 Funciones de distribución de probabilidad

Una distribución de probabilidad es una función (PDF) que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística de la muestra puede resumirse de forma compacta en la función y en sus respectivos parámetros asociados (Ven Te Chow David R. Maidment Larry W. Mays, 1994).

Habitualmente el ajuste de una PDF, se efectúa mediante la calibración de su frecuencia empírica ( $F_e$ ) con la obtenida por los modelos o teórica ( $F_t$ ). Para este caso se realizó la calibración mediante la  $F_e$  propuesta por weibull, tal como lo describe Domínguez C (2016b) y las obtenidas por los modelos presentados en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Funciones de densidad de probabilidad evaluadas

PDF	Ecuación
Normal	$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$
Log Normal	$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$
Exponencial	$P(x) = \lambda e^{-\lambda x} \forall x \geq 0$
Gamma	$P(x) = \frac{\lambda^2 x^{(a-1)} e^{-\lambda x}}{\Gamma(a)}$
ExtremeValue	$y = f(x \mu, \sigma) = \sigma^{-1} \exp\left(\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)\right)$
GeneralizedExtremeValue	$y = f(x \kappa, \sigma, \theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \left(-\left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}}\right) \left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{\kappa}}$ para $1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma} > 0$
Kernel	$\hat{f}_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$ donde $x_1, x_2, \dots, x_n$ son muestras aleatorias de una distribución desconocida, n: tamaño de la muestra, $K(\cdot)$ : función de suavizado del núcleo, y h: ancho de banda.

InverseGaussian	$P(x) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left\{\frac{-\lambda}{2\mu^2 x}(x - \mu)^2\right\}$
Logistic	$f(x \mu, \sigma) = \frac{\exp\left\{\frac{x - \mu}{\sigma}\right\}}{\sigma \left(1 + \exp\left\{\frac{x - \mu}{\sigma}\right\}\right)^2}; -\infty < x < \infty$
LogLogistic	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \frac{e^z}{x(1 + e^z)^2}; x \geq 0 \text{ donde } z = \frac{\log(x) - \mu}{\sigma}$
tLocationScale	$P(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu + 1}{2}\right)}{\sigma \sqrt{\nu\pi} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left[ \frac{\nu + \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2}{\nu} \right]^{-\left(\frac{\nu + 1}{2}\right)}$ donde $\Gamma(\bullet)$ : función gamma, $\mu$ : parámetro de localización, $\sigma$ : parámetro de escala y $\nu$ : arámetro de forma

Fuente: (Monsalve, 1995), Chow (1965) y (Garnett P., 1997)

El criterio de selección para el mejor ajuste, se realizó mediante la prueba de hipótesis de Kolmogorov-Smirnov. Considerando como un ajuste bueno, la aceptación de la hipótesis nula con un nivel de significancia del 95% y el valor de p más aproximado. El test compara la distancia máxima entre la distribución acumulada de probabilidad y la distribución empírica; la distancia máxima está en función de los grados de libertad con los que el test supone que se puede aceptar la hipótesis de que los datos vienen de una distribución dada.

Se evaluaron las distribuciones de probabilidad (PDF) para los eventos diarios en todas las variables analizadas; como también, se determinaron los eventos máximos diarios anuales, es decir, de cada año se extrae su evento máximo y a partir de estos datos se crea una nueva serie de eventos máximos, a esta nueva serie se le aplica el ajuste de distribución de probabilidad y se evalúa la aceptación mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. Para los eventos máximos diarios anuales se presentan los resultados tanto de precipitación como de caudal y niveles.

### 6.3 Tendencia de las series

La prueba de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1955) es una prueba de tendencias en series de tiempo, de orden aleatorio contra no aleatorio de una serie en el tiempo. La hipótesis alternativa de la prueba original cubre, por lo tanto, todos los tipos de ordenamiento no aleatorio de datos, incluyendo correlación serial, tendencias, saltos y otros tipos de no estacionalidad. Sin embargo, el tratamiento en este trabajo se limita a series de tiempo autocorrelacionadas con tendencias lineales, que es una suposición común para series de tiempo hidrológicas. La prueba de tendencia de Mann-Kendall es adecuada para probar tendencias en series de tiempo naturales, muchas de las cuales se desvían significativamente de la distribución Normal. Una suposición básica de la prueba original de Mann-Kendall es que los datos se ordenan aleatoriamente, lo que rara vez ocurre en las series

temporales naturales. Cuando existe una correlación positiva en los datos, la prueba tiende a rechazar la hipótesis nula de no tendencia con más frecuencia de lo que debería, incluso cuando no existe una tendencia en los datos (Cox y Stuart, 1955).

La prueba de tendencia de Mann-Kendall (Hamed, 2009) es una prueba de correlación de rangos entre los rangos de observaciones y su orden de tiempo. Para una serie temporal  $\{x_t, t = 1, 2, \dots, n\}$ , la estadística de prueba S está dada por

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij}$$

Donde:

$$a_{ij} = \text{sign}(x_j - x_i) = \text{sign}(R_j - R_i) = \begin{cases} 1, & x_i < x_j \\ 0, & x_i = x_j \\ -1, & x_i > x_j \end{cases}$$

Kendall (1955) proporciona un método iterativo para el cálculo de la distribución exacta de S para el caso de datos independientes. También muestra que la distribución de S se acerca a la distribución Normal a medida que el número de observaciones se hace grande (Kendall, 1975).

## 6.4 Correlograma

El correlograma es una imagen de la correlación, también conocido como un gráfico de autocorrelación; el cual, como su nombre lo indica, representa gráficamente las autocorrelaciones. La autocorrelación mide la correlación entre dos variables a través del coeficiente de correlación de Pearson (Williams, 2014). Éste coeficiente permite estimar el grado de dependencia lineal entre dos variables, ya sean dependientes o independientes. Cabe resaltar que la correlación da un indicativo de la similitud en el comportamiento entre las variables comparadas, mas no implica una causalidad entre las mismas. La expresión matemática se presenta a continuación:

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde

$\sigma_{xy}$  Covarianza de (X, Y)

$\sigma_x$  Desviación estándar de la variable X

$\sigma_y$  Desviación estándar de la variable Y

La correlación varía entre -1 y 1, siendo menos uno correlación perfecta de forma inversa, una correlación perfecta de forma directa y cero sin correlación. En el capítulo 7 se presentan los correlogramas resultantes de la correlación lineal a partir de los rezagos, mostrando 365 días de rezago.

## 6.5 Periodograma

El periodograma es una herramienta que se utiliza para analizar la frecuencia de la información. El análisis de las series de tiempo mediante el uso de la transformada de Fourier, permite conocer el contenido de frecuencia de la función, es decir, expresan directamente cuáles son los armónicos que contribuyen de mayor manera en la construcción de la señal, ya que nos permite representar mediante armónicos una señal originalmente desarrollada en el dominio del tiempo o del espacio (Moros A., 2010).

Una serie de tiempo  $y(t)$  puede ser representada mediante la combinación lineal de funciones sinusoidales conocidas como armónicos. (Moros A., 2010). La ecuación que rige la obtención de los diferentes valores para un valor de  $n$  armónicos es:

$$F_A(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ A_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] - \frac{i}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ A_k \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right]$$

Donde.

- $A_k$  Amplitud del armónico
- $K$  Armónico o frecuencia
- $n$  Valor del Armónico
- $N$  Número de datos

Luego de la obtención de los diferentes armónicos de la serie de tiempo se grafican los valores  $(A_k)^2$  es decir la amplitud del armónico al cuadrado vs los valores de  $K$  o las oscilaciones por unidad de tiempo, obteniéndose una gráfica denominada Periodograma o espectro de potencia, la cual permite observar la importancia de cada armónico al momento de la reconstrucción de la señal (Moros A., 2010).

El periodograma tiene la particularidad de recrear la serie en base a las principales frecuencias encontradas realizando una convolución de diferentes armónicos. Ésta convolución en diferentes periodos puede llevar a



obtener una serie suavizada, pero depende de que tanta varianza del fenómeno se logre captar con los armónicos. En el presente informe se presenta los 20 principales armónicos en la reconstrucción de la señal de las series analizadas.

## 6.6 Análisis multivariado

Dado el espacio multidimensional donde “ $x$ ” representa cada variable, “ $n$ ” representa el número de datos y “ $p$ ” el número de variables.

$$X_{n,p} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,p} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \ddots & X_{2,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \dots & X_{n,p} \end{bmatrix}$$

El objetivo es encontrar el periodo “ $L$ ”, en años, en el cual se tenga la mayor disponibilidad de información para hacer distintos análisis multivariados. “ $L$ ” es evaluado iniciando el primer día de cada mes y variando la longitud de años a evaluar entre 4, 6, 8, 10, 12 y 14 años.

Para la configuración del periodo de análisis se tiene en cuenta como estación objetivo la estación Acueducto Mocoa (PMC) y el Límite de datos faltantes por variable se establece como máximo del 5%, es decir, si más del 5 % de la información es faltante, esta variable no se tiene en cuenta para el análisis. Adicionalmente el método de selección del periodo de análisis utiliza la influencia asignada a cada variable, la cual representa la importancia que se le es asignada objetivamente, la influencia establecida para cada variable se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6-2 Influencia asignada a cada variable del SI.

ID	Influencia Asignada (fj)	Descripción	Unidades
VD	1	Velocidad del viento	m/s
HR	5	Humedad Relativa	%
BS	2	Brillo Solar	horas
EV	7	Evaporación	mm
TS	6	Temperatura media diaria	°C
ST	6	Transporte diario de materiales en suspensión	Kg·Ton/día
SD	6	Concentración media diaria de sedimentos en suspensión	Kg/m <sup>3</sup>
PT	10	Precipitación diaria acumulada	mm
QL	9	Caudal líquido	m <sup>3</sup> /s
NV	9	Niveles de Caudal	cm

Fuente: Elaboración propia

El objetivo es encontrar un periodo  $\mathcal{L}$  que representa la evaluación de muchos periodos “Y” en los cuales se determinan el número de datos faltantes por cada variable “j” y se multiplica por el peso de la variable “j”. El peso es una variable que depende de la distancia de las estaciones hidrometeorológicas basados en el método IDW y la influencia asignada a cada variable. Las ecuaciones establecidas para el cálculo se presentan a continuación:

$$\mathcal{L} = \underset{y \in Y}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^p [(O_j)_y \times V_j]$$

Donde:

$(O_j)_y$  : representa el número de datos faltantes de la variable “j” en el periodo evaluado “y”.

$V_j$ : representa el peso de la variable “j” ( $w_j$ ) y la influencia asignada a la variable “j” ( $f_j$ ), así:

$$V_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^p w_j} \times f_j$$

Siguiendo la formulación basada en el método de interpolación IDW (Inverse distance weighting) se tiene:

$$w_j = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{d(est_j, est_{obj})} & \text{si } j \neq obj \\ \frac{\min_{\forall j \neq obs} d(est_j, est_{obj})}{3} & \text{si } j = obj \end{array} \right\}$$

Se estableció como 3, un factor arbitrario que representa cuántas veces más importante se considera la información proveniente de la misma estación objetivo con respecto a la estación más cercana

$$\left( \min_{\forall j \neq obs} d(est_j, est_{obj}) \right).$$

## 6.7 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales busca explicar la estructura de varianza-covarianza en conjuntos de datos múltiples usando unas pocas combinaciones lineales de las variables originales, de manera que se reduzca la dimensionalidad de la información. En este sentido, los principales objetivos son la reducción e interpretación de datos (Kottegoda & Rosso, 2008).

La técnica se concibe para transformar, p variables y la correlación de las variables X, que se conocen u observan, en un número igual de índices Z no correlacionados (ortogonales). Estas son funciones lineales de las variables originales. El primer índice representa la mayor cantidad posible de la varianza de las variables originales. El segundo índice retiene la mayor varianza restante posible. Esto continúa hasta el índice p, que tiene

la fracción más pequeña de la varianza original. Estos índices Z se llaman componentes principales. El objetivo es usar una cantidad de componentes que son menores que p para tener en cuenta la mayor parte de la variación en las variables p originales; por lo tanto, se logra reducir la dimensionalidad. Es de esperarse que suceda cuando la estructura de correlación de las variables X es fuerte. La metodología utilizada es la planteada en Kottegoda & Rosso (2008).

## 6.8 Agrupamiento o Clusters

El objetivo del clustering es identificar la estructura en un conjunto de datos no etiquetados mediante la organización objetiva de los datos en grupos homogéneos donde la similitud entre los objetos dentro del grupo se minimiza y la diferencia entre los objetos entre los grupos se maximiza. La agrupación es necesaria cuando no hay datos etiquetados disponibles independientemente de si los datos son binarios, categóricos, numéricos, de intervalo, ordinales, relacionales, textuales, espaciales, temporales, espaciales temporales, de imágenes, multimedia o mezclas de los tipos de datos anteriores (Warren Liao, 2005).

Para el presente estudio se implementó el algoritmo k-means el cual usa una heurística para encontrar semillas de centroides para k means. Los resultados del clustering se grafican en el espacio definido por el análisis de componentes principales. El algoritmo k-means elige las semillas de la siguiente manera, suponiendo que el número de clústeres es k.

- Seleccionar una observación uniformemente al azar a partir del conjunto de datos, X. La observación elegida es el primer centroide y se denota como C.
- Calcula las distancias de cada observación a  $C_1$ . Denota la distancia entre C y la observación m como d  $(X_m, C_j)$ .
- Selecciona el siguiente centroide, c 2 al azar de X con probabilidad

$$\frac{d^2(X_m, C_1)}{\sum_{i=1}^n d^2(X_j, C_1)}$$

- Para elegir el centro  $j$ :
  - Calcule las distancias de cada observación a cada centroide y asigne cada observación a su centroide más cercano.
  - Para  $m = 1, \dots, n$  y  $p = 1, \dots, j - 1$ , seleccione centroide  $j$  al azar de X con probabilidad

$$\frac{d^2(X_m * C_p)}{\sum_{h: x_h \in C_p}^n d^2(X_h, C_p)}$$

Donde  $C_p$  es el conjunto de todas las observaciones más cercanas al centroide  $C_p$  y  $X_m$  pertenece a  $C_p$ . Es decir, seleccione cada centro subsiguiente con una probabilidad proporcional a la distancia desde sí mismo al centro más cercano que ya eligió.

- Repita el paso 4 hasta que se elijan  $k$  centroides.

## 6.9 Interpolación espacial

La interpolación Kriging es una técnica de estimación local que ofrece el mejor estimador lineal insesgado. La limitación a la clase de estimadores lineales es bastante natural ya que esto significa que solamente se requiere el conocimiento del momento de segundo orden de la función aleatoria (La covarianza o el variograma) (Giraldo, 2011). A continuación, se describe el semivariograma (herramienta de apoyo para la estimación de la correlación de variable a estimar).

- **Semivariograma**

El semivariograma (también llamado variograma), es la herramienta central de la geoestadística. Dada una variable regionalizada  $Z(x)$  que cumpla la hipótesis intrínseca entonces existe la función semivarianza y se define como:

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

Donde

$Z(x)$  Variable en la posición  $x$

$Z(x+h)$  Variable separada una distancia  $h$  de  $x$

$n$  y  $h$  Número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia.

El semivariograma es una función que relaciona la semivarianza con el vector  $h$  conocido como "lag", el cual denota la separación en distancia y dirección de cualquier par de valores  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$ .

En el presente estudio se evaluaron tres semivariogramas acotados: modelo esférico, exponencial y gaussiano, descritos a continuación.

- **Modelo esférico**

Tiene un crecimiento rápido cerca al origen, pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta que para distancias superiores al rango los incrementos son nulos. Su expresión matemática es:

$$\gamma_{(h)} = C_o + C_1 \left( \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) h \leq a$$
$$\gamma_{(h)} = C_o + C_1 h > a$$

En donde  $C_1$  representa la meseta,  $a$  el rango y  $h$  la distancia.

- **Modelo Exponencial**

Este modelo se aplica cuando la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre las observaciones. El valor del rango es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma un valor igual al 95% de la meseta. Su expresión matemática es:

$$\gamma_{(h)} = C_o + C_1 \left( 1 - e^{\left( \frac{-h^2}{a} \right)} \right)$$

- **Modelo Gaussiano**

Al igual que en el modelo exponencial, la dependencia espacial se desvanece solo en una distancia que tiende a infinito. El principal distintivo de este modelo es su forma parabólica cerca al origen. Su expresión matemática es:

$$\gamma_{(h)} = C_o + C_1 \left( 1 - e^{\left( \frac{-h^2}{a^2} \right)} \right)$$

La selección del mejor ajuste para cada uno de los semivariogramas se realizó mediante el coeficiente de determinación.

- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ): realiza una estimación de la calidad de predicción que puede presentar un modelo para replicar de la mejor forma los resultados producto de una simulación, y la proporción de variación generada, producto de los resultados que puede explicarse por el modelo. (Teegavarapu & Elshorbagy, 2005).

$$r_{xy} = \left[ \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \right]^2 = \left[ \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \right]^2$$

Donde

- $\sigma_{xy}$  Covarianza de valor observado y simulado.
- $\sigma_x$  Desviación estándar del valor observado.
- $\sigma_y$  Desviación estándar del valor simulado.

Para la realización de la interpolación espacial por el método de Kriging se emplearon las series de precipitación de las estaciones cercanas al área del proyecto (estaciones 1 a la 9, definidas en el SI). Con el fin de obtener la serie interpolada de precipitación que represente mejor el comportamiento, se generó una malla de puntos cada 90m, y para cada punto se obtuvo mediante la interpolación con Kriging la serie de precipitación. A partir de estas series interpoladas se generó las series ponderadas para la parte alta (ML1, SG1, TC1 y TA1) y la parte baja del proyecto (ML2, ML3, SG2, SG3, TC2, TC3, TC4, TA2, AM, SA).

#### 6.10 Downscaling temporal de las series

La desagregación de las series de precipitación y temperatura a nivel horario fue realizada siguiendo la metodología presentada en Lee & Jeong (2014), la cual consiste esencialmente en una simulación estocástica no paramétrica combinada con algoritmos genéticos. Esta metodología, parte de un periodo conocido a nivel horario (serie 1) para generar distribuciones horarias similares en los periodos en los que solo se cuenta con registros totales diarios (serie 2). A modo de resumen, para la desagregación se siguen los siguientes pasos (Lee & Jeong, 2014):

**PASO 1.** Calcular distancias: Se estiman las distancias entre la serie diaria  $Y_t$  (cada uno de los valores de la serie 2) y el de los diarios  $y_i$  de la serie horaria  $x_{i,h}$  de la serie 1, así:  $y_i = \sum_{h=1}^{24} x_{i,h}$ ; esto con el fin de buscar dentro de la serie horaria, el registro más parecido, en términos de la serie total, a la serie diaria  $Y_t$  que se quiere desagregar.

**PASO 2.** Seleccionar las menores distancias: Se organizan las distancias calculadas en el Paso 1 en forma ascendente y se seleccionan las menores  $k$  distancias. El valor  $k$  se determina de la siguiente forma:  $k = \sqrt{n}$ , donde  $n$  denota el número de días de la serie 1.

**PASO 3.** Calcular ponderaciones: Se selecciona aleatoriamente uno de los  $k$  valores seleccionados en paso 2, según su probabilidad ponderada dada por la siguiente expresión:

$$W_m = \frac{1/m}{\sum_{j=1}^k 1/j}, m = 1, \dots, k$$

**PASO 4.** Asignar distribución porcentual horaria seleccionada: Se asigna la distribución horaria seleccionada en paso 3 ( $x_{p,h}$ ), al valor  $Y_t$ .

**PASO 5.** Cruce y mutación según metodología de algoritmos genéticos: Se realiza en dos partes:

- Reproducción : Se selecciona una distribución horaria adicional para  $Y_t$  siguiendo los pasos del 1 al 4, esta segunda distribución se denota como  $x_{p^*,h}$
- Cruce: Parte de  $x_{p,h}$  es reemplazada por su parte equivalente en  $x_{p^*,h}$  en caso de que un valor  $P_c$ , seleccionado aleatoriamente, sea menor a una tolerancia definida, en este caso de 0.3.
- Mutación: Un solo elemento de  $x_{p,h}$  es reemplazado por su equivalente en  $x_{p^*,h}$  en caso de que un valor  $P_m$ , seleccionado aleatoriamente, sea menor a una tolerancia definida, en este caso de 0.02

**PASO 6.** Preservar masa (caso de precipitación): Se ajusta la serie horaria obtenida en el Paso 5, con el fin de preservar la masa de  $Y_t$ .

## 7 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó una inspección visual de la continuidad de los registros a cada una de las series del SI, con el fin de observar datos faltantes. En el eje x se presenta el tiempo de registro, cada fila representa cada una de las variables del SI, en blanco no hay dato y en color donde hay información. En la Figura 7-1 se muestran doce variables de diferentes estaciones (VD, HR, BS, EV, TS, ST, SD), la cuales presentan muchos vacíos, por ejemplo velocidad del viento cuenta con datos muy esporádicos. Sin embargo, en términos cualitativos las variables tales como HR, BS, EV y TS pueden permitir llegar a realizar conclusiones sobre el modelo meteorológico, dado la complejidad de hacer coincidir fechas del modelo meteorológico con lo observado. De igual forma, se cuenta con información referente a transporte diario de material en suspensión y la concentración media diaria de materiales en suspensión; información que brinda órdenes de magnitud.

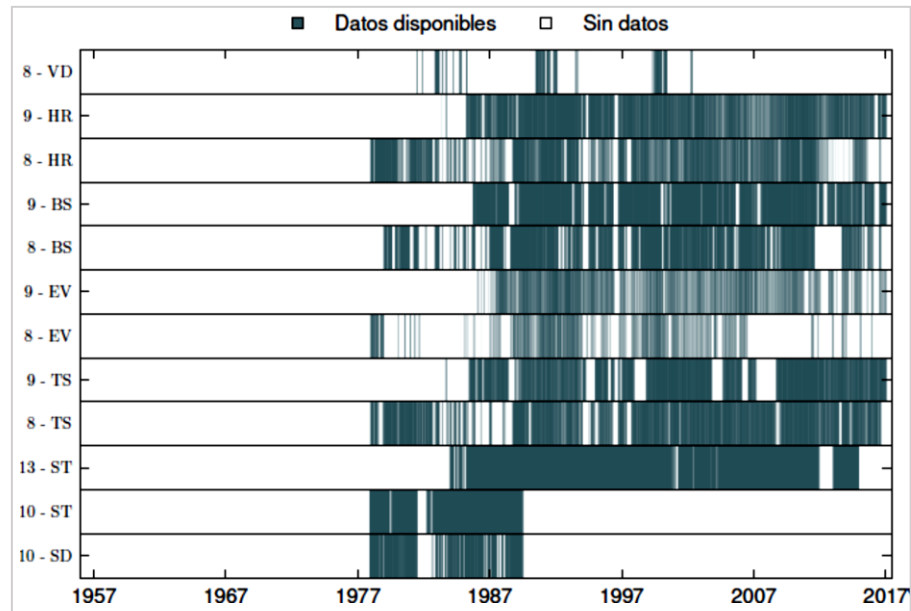


Figura 7-1 Datos faltantes del sistema de información (SI), parte 1.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-2 se muestra el análisis de información faltante para las estaciones de precipitación, caudal líquido y niveles. Se resalta la buena disponibilidad de información de precipitación diaria en algunas estaciones, en cuanto a caudales líquidos se tiene información de cuencas lejanas. Referente a los niveles de las estaciones Pte Mocoa y Piedra Lisa (Id 11 y 10, respectivamente), se evidencia registros con poca información.

El análisis de la información faltante para las series del SI minutal se presenta en la Figura 7-3. En esta se destaca la buena disponibilidad de información de temperatura (estación C) en los meses que ha registrado por el sensor del SIATA, además se puede apreciar que la estación A con un poco más de dos años de registro no presenta un número importante de datos faltantes. Por otro lado, aunque presenta un registro amplio, la estación B presenta un número importante de datos faltantes.



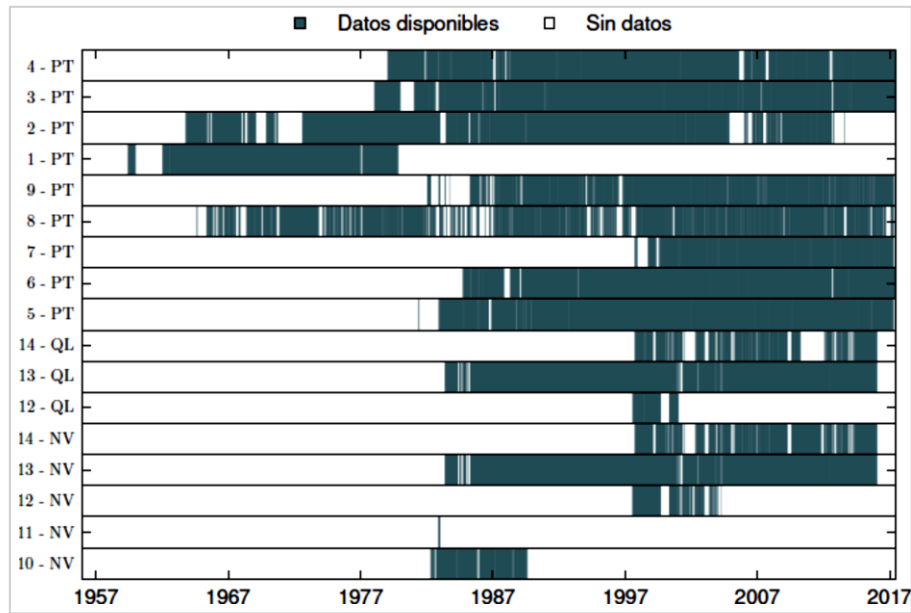


Figura 7-2 Datos faltantes del sistema de información (SI), parte 2.  
Fuente: Elaboración propia

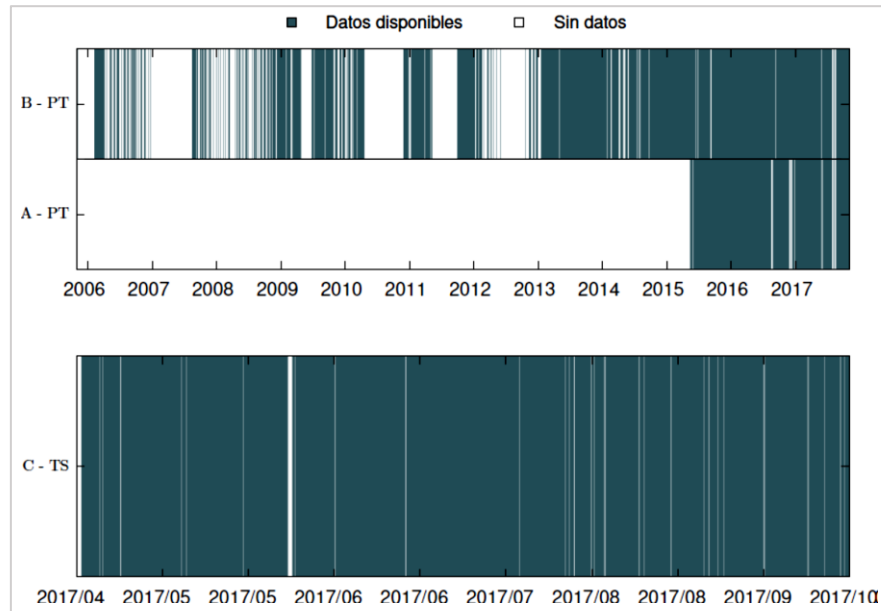


Figura 7-3 Datos faltantes del sistema de información (SI) minutil.  
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los gráficos de nubes de puntos (scatter plot) para las variables del SI se presenta en la Figura 7-4, de las cuales se destacan principalmente precipitaciones acumuladas, caudales líquidos, solidos suspendidos en la estación 13 (estación sobre el río Caquetá). Ésta última se encuentra afuera del área de influencia; sin embargo, se tiene en cuenta para analizar si hay alguna dependencia o relación con las demás

variables del área de estudio. El scatter plot muestra una relación directa entre los caudales líquidos y los sólidos suspendidos en la estación 13 y los niveles con los sólidos suspendidos, relaciones que siguen los procesos físicos de este tipo de variables. En cuanto a las precipitaciones se evidencia el ruido que se presenta al comparar una precipitación con otra, lo cual hace pensar en los fenómenos locales que se dan en estas cuencas donde se crean micro clusters de precipitación.

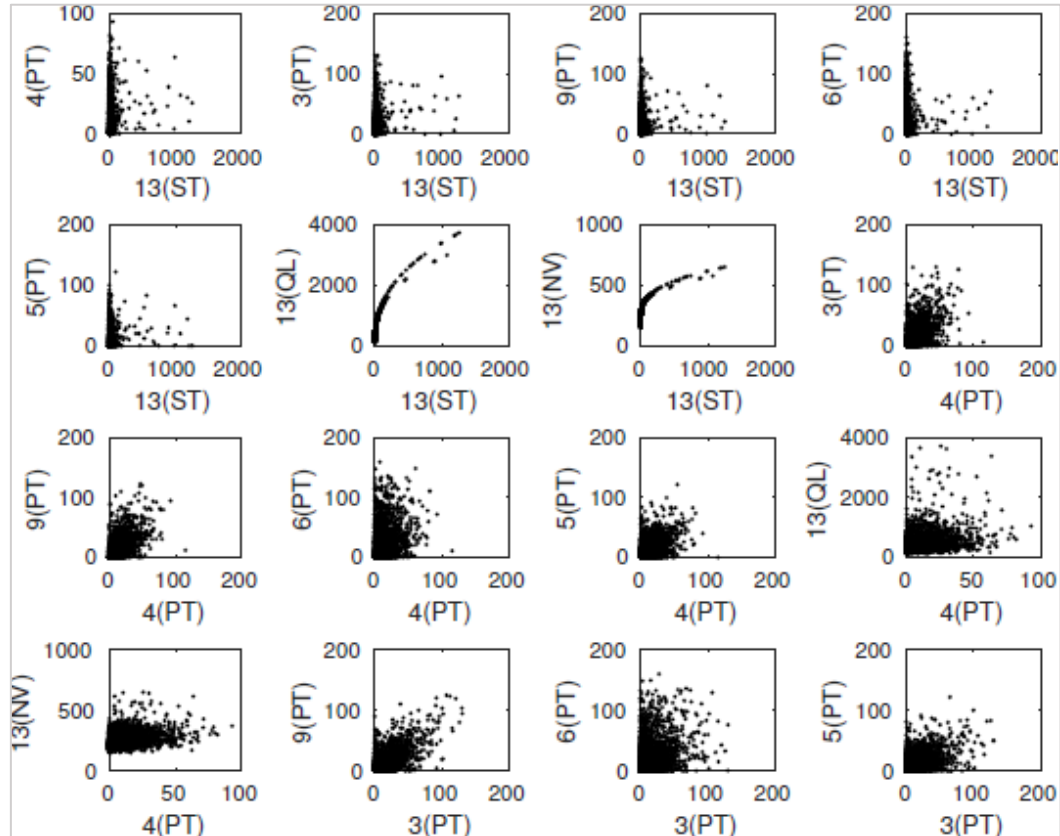


Figura 7-4 Scatter plot para las variables seleccionadas.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-5 se continúa con las gráficas scatter plot para las variables seleccionadas. No se muestra una tendencia clara al comparar diferentes estaciones de precipitación. La precipitación si bien no muestra una tendencia clara, si se muestran ordenes de magnitud similares en las nubes de puntos. En cuanto a niveles y caudales líquidos se sigue mostrando la correspondencia, hay que recordar que los caudales líquidos hacen parte de un filtro que ha aplicado el IDEAM para transformar los niveles, por lo tanto, es una correspondencia que no presenta problemas. Estas gráficas corresponden a un filtro para analizar la calidad de información y no para generar conclusiones sobre el fenómeno.

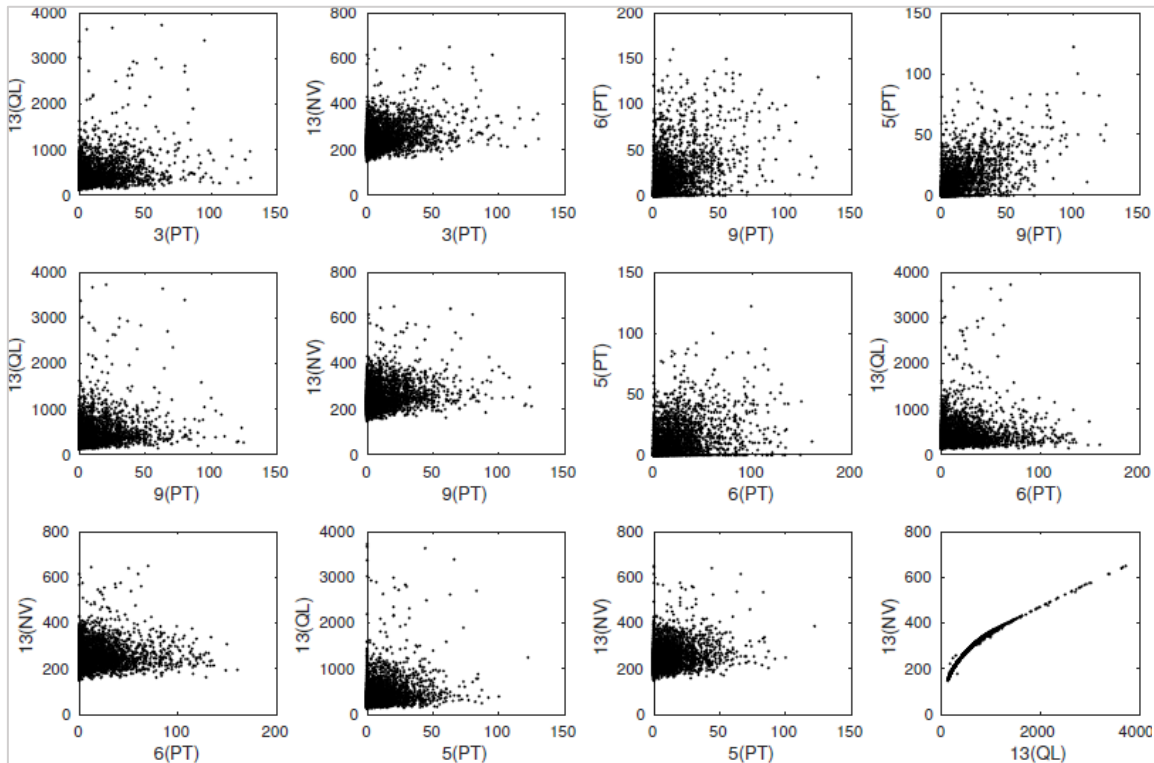


Figura 7-5 Scatter plot para las variables seleccionadas.  
Fuente: Elaboración propia

## 7.1 Análisis univariado

Para caracterizar una serie es necesario disponer de un valor indicativo de su tendencia central y la dispersión de la información, por consiguiente, a cada una de las series se determinó el promedio, la mediana y la desviación estándar. Así mismo se calcularon los cuantiles, aquellos valores de la variable que ordenados de menor a mayor dividen a la distribución en partes, de tal manera que cada una de ella contiene el mismo número de frecuencias. En este sentido, se resaltan los cuantiles Q5 y Q95, el primero hace referencia a los valores mínimos (por debajo de este valor está comprendido el 5% de la información), y el segundo corresponde a los valores máximos (Por encima de este valor se encuentra el 5% de los valores máximos de la serie).

Por otro lado, se determinaron los momentos estadísticos, los cuales son un conjunto de características cuantitativas que sirven para describir las series. Los momentos estadísticos presentados son el promedio, asimetría y curtosis. Adicionalmente se calculó el coeficiente de variación, el cual expresa la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable; a mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad de los valores de la variable y a menor valor del coeficiente de variación, mayor homogeneidad

en los valores de la variable. Los resultados de los estadísticos anteriormente descritos se presentan en la Tabla 7-1 para cada variable analizada en el SI.

Tabla 7-1 Estadísticos básicos en las series hidrometeorológicas.

ID	Var	# Datos	Q5	Q25	Q75	Q95	Min	Max	Promedio	Desv. Est.	Mediana	Asimetría	Curtosis	Coef. Var
8	VD	1325	1.7	7.2	17.0	81.7	1.0	84.1	21.7	26.2	11.7	1.6	4.1	1.21
9	HR	10393	74.0	80.0	89.0	94.0	54.0	99.0	84.3	6.2	85.0	-0.3	3.1	0.07
8	HR	9822	75.0	82.0	90.0	95.0	59.0	100.0	85.6	6.2	86.0	-0.4	2.8	0.07
9	BS	10112	0.0	0.8	4.7	7.8	0.0	11.1	3.0	2.5	2.5	0.7	2.6	0.84
8	BS	9724	0.0	0.4	4.6	8.0	0.0	11.1	2.8	2.6	2.2	0.8	2.6	0.94
9	EV	7070	1.1	2.2	4.6	7.4	0.1	22.5	3.6	2.2	3.3	2.0	11.1	0.60
8	EV	4469	1.0	2.3	5.0	8.1	0.0	280.5	4.1	5.8	3.6	28.7	1205.6	1.42
9	TS	9204	18.3	19.6	21.0	24.1	15.0	32.4	20.5	1.9	20.2	2.3	10.9	0.09
8	TS	11081	18.4	20.1	21.6	22.9	10.0	31.0	20.8	1.4	20.9	-1.1	9.0	0.07
13	ST	10729	0.4	1.4	8.5	38.0	0.0	1253.0	11.5	44.9	3.5	16.0	336.6	3.91
10	ST	3949	0.0	0.1	0.5	5.2	0.0	386.1	1.6	10.2	0.1	20.6	610.7	6.40
10	SD	3415	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	34.0	0.2	1.0	0.0	16.7	430.9	4.25
4	PT	13566	0.0	0.5	12.5	32.0	0.0	114.9	8.7	11.5	4.4	2.4	11.3	1.33
3	PT	13849	0.0	0.0	15.0	45.3	0.0	158.5	11.1	17.0	4.0	2.7	12.8	1.54
2	PT	15890	0.0	0.0	19.0	60.0	0.0	315.0	13.8	22.6	4.0	2.8	14.7	1.64
1	PT	6704	0.0	0.0	17.0	47.0	0.0	225.0	11.4	18.2	2.0	2.7	15.4	1.59
9	PT	11465	0.0	0.0	14.0	44.1	0.0	180.0	10.7	16.5	3.9	2.8	14.6	1.55
8	PT	16327	0.0	0.1	20.3	58.6	0.0	251.6	14.5	21.2	5.7	2.5	11.7	1.46
7	PT	6780	0.0	0.0	13.9	37.5	0.0	200.9	10.2	14.8	5.0	3.2	21.1	1.45
6	PT	11715	0.0	0.0	21.6	64.8	0.0	193.0	15.1	23.2	4.5	2.4	9.9	1.53
5	PT	12489	0.0	0.0	14.0	36.0	0.0	129.0	8.9	13.1	3.0	2.2	9.8	1.47
14	QL	5066	9.9	24.0	52.2	101.8	0.1	544.4	43.1	32.9	34.6	3.3	26.4	0.76
13	QL	11704	162.5	256.0	506.0	907.1	3.6	3727.0	422.6	272.9	354.4	3.2	22.6	0.65
12	QL	1056	24.6	41.7	77.0	170.2	12.0	598.5	69.7	55.6	53.3	3.5	20.9	0.80
14	NV	5690	46.0	70.0	114.0	178.0	6.0	400.0	97.3	42.3	89.0	1.7	7.9	0.43
13	NV	11655	176.0	211.0	277.0	356.0	86.0	660.0	249.8	58.2	240.0	1.4	7.3	0.23
12	NV	1890	15.0	33.0	76.0	166.0	2.0	524.0	64.2	53.1	49.0	2.8	15.0	0.83
11	NV	61	109.6	113.8	120.0	126.0	109.0	127.0	117.2	4.8	119.0	0.0	2.3	0.04
10	NV	2587	97.0	124.0	166.0	213.0	79.0	352.0	147.8	35.7	143.0	1.1	5.3	0.24

Fuente: Elaboración propia

Con base en los datos estadísticos de las series de tiempo obtenidos, se procede a realizar los Box Plots para presentar un resumen gráfico del comportamiento de los eventos. Esta herramienta de análisis exploratorio permite estudiar la simetría de los datos y detectar los valores atípicos en la información que se está analizando. En la Figura 7-6 y Figura 7-7 se presentan los box plot para cada una de las variables normalizadas. En las figuras de box plot presentadas se demarca en color amarillo el valor medio de todas las series que es la variable normalizada, y en la parte inferior de cada figura se presenta el valor promedio y la desviación estándar de la serie.

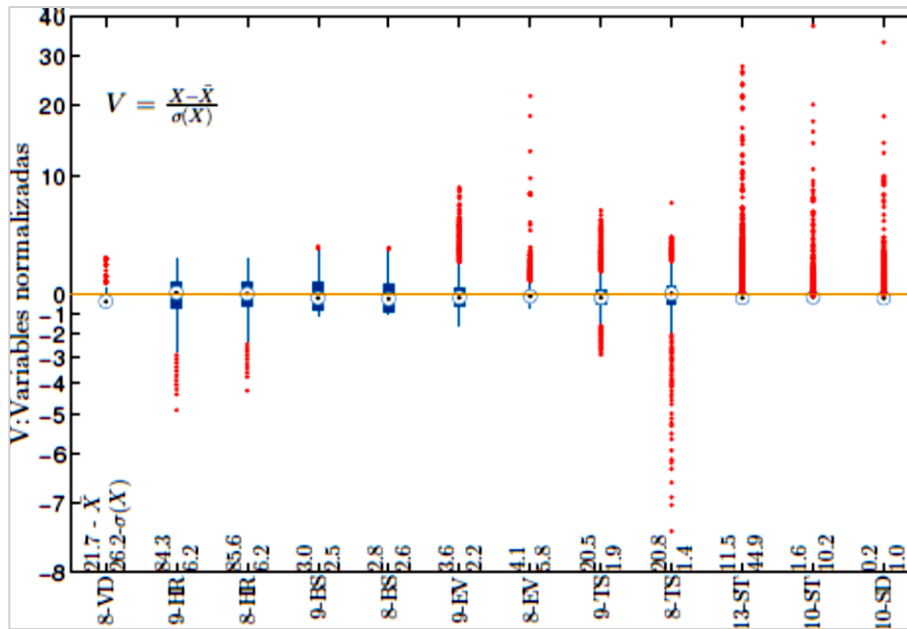


Figura 7-6 Diagrama de caja y bigotes para las variables 8-VD, 9-HR, 8-HR, 9-BS, 8-BS, 9-EV, 8-EV, 9TS, 8-TS, 13-ST, 10-ST y 10-SD.

Fuente: Elaboración propia

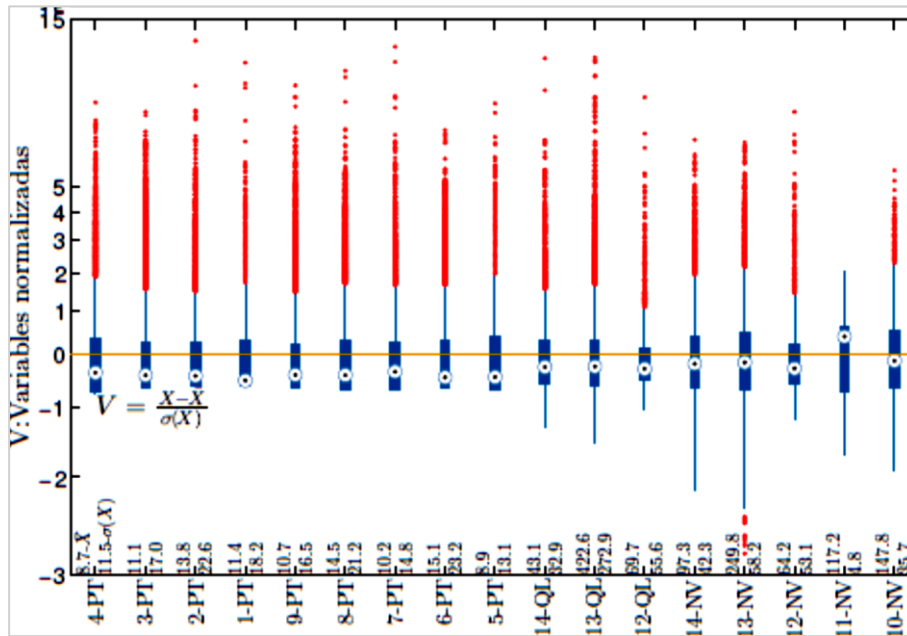


Figura 7-7 Diagrama de caja y bigotes para las variables de precipitación (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9), caudal (12, 13 y 14) y niveles (10, 11, 12, 13 y 14).  
Fuente: Elaboración propia

Continuando con el análisis de las series se presenta el ajuste de las funciones de distribuciones de probabilidad. En la Figura 7-8 se presenta la aceptación al test no paramétrico de Kolmogorov–Smirnov, donde el verde indica la aceptación del test, en la primera columna de la figura se muestra el id de la estación y en la segunda columna la variable.

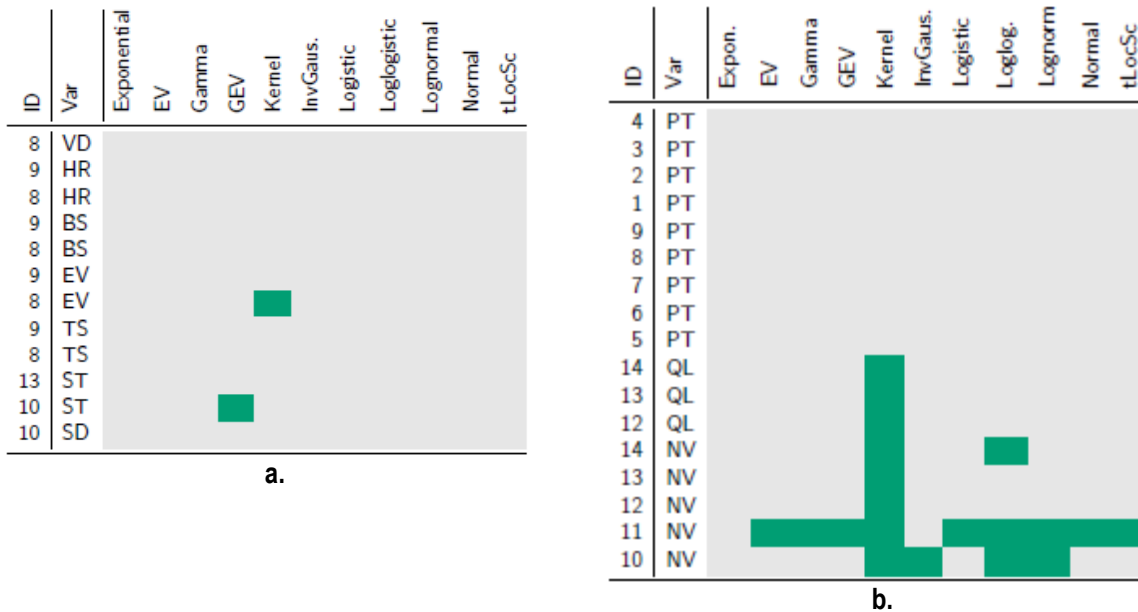


Figura 7-8 Aceptación del test de Kolmogorov–Smirnov.  
Fuente: Elaboración propia

Para los valores diarios con el test fueron aceptadas la PDF que se presentan en la Figura 7-8a la Kernel en 8-EV y GEV en la 10-ST. Los caudales y niveles son más fácil de ajustar a una función de probabilidad, lo cual viene amarrado a la complejidad de las series, los periodogramas muestran en estas variables cierta periodicidad, como también que son series menos complejas que las otras variables meteorológicas. En sí mismas, las series de caudal y nivel han sido filtradas por fenómenos en el suelo y por lo tanto son muy suavizadas y además son series que agrupan muchos procesos complejos. Lo importante a resaltar es la columna del kernel. Últimamente se ha popularizado la utilización de las funciones kernel, esto pues debido a los desarrollos computacionales, permitiendo realizar las convoluciones de series gaussianas para poder crear una PDF más ajustada a la información y aquí se ven los resultados, bajo el test en las series de NV y QL siempre se aceptó las distribuciones de probabilidad resultantes.

Llama la atención la estación 11 (Pte Mocoa) que es una estación con poca información, pero ha sido aceptada con varias funciones (9 de 11), situación que no es usual para eventos diarios.

En la Figura 7-9 se presenta el ajuste de distribución de probabilidad. En gris se encuentra el histograma de frecuencias observadas y las curvas han sido reescaladas para hacer la comparación. Se presenta además las funciones que evidenciaron los mejores ajustes: Kernel en la cual siempre el núcleo es una normal, log logistic y log normal.

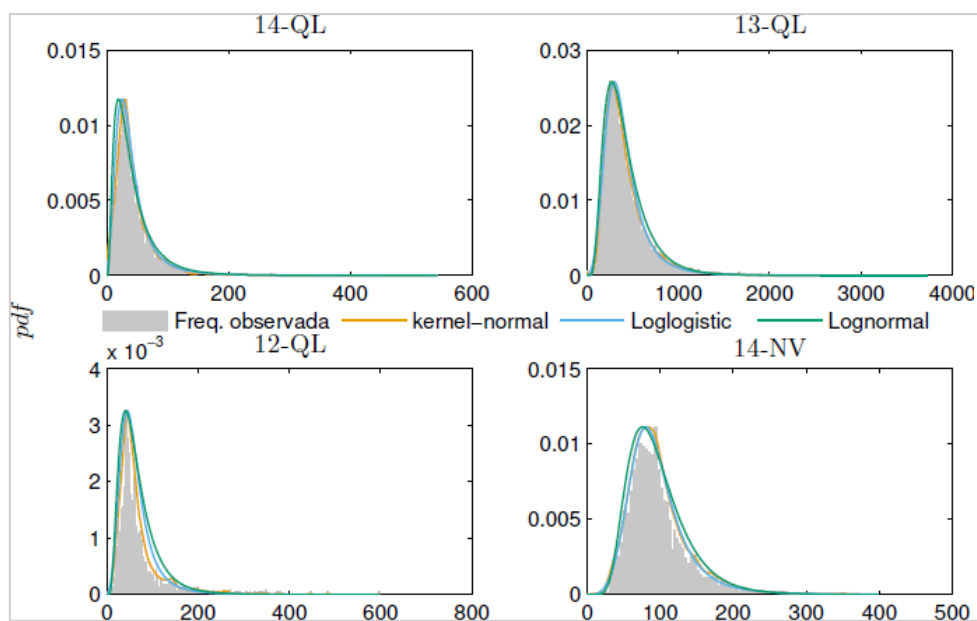


Figura 7-9 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de caudal y nivel.  
Fuente: Elaboración propia

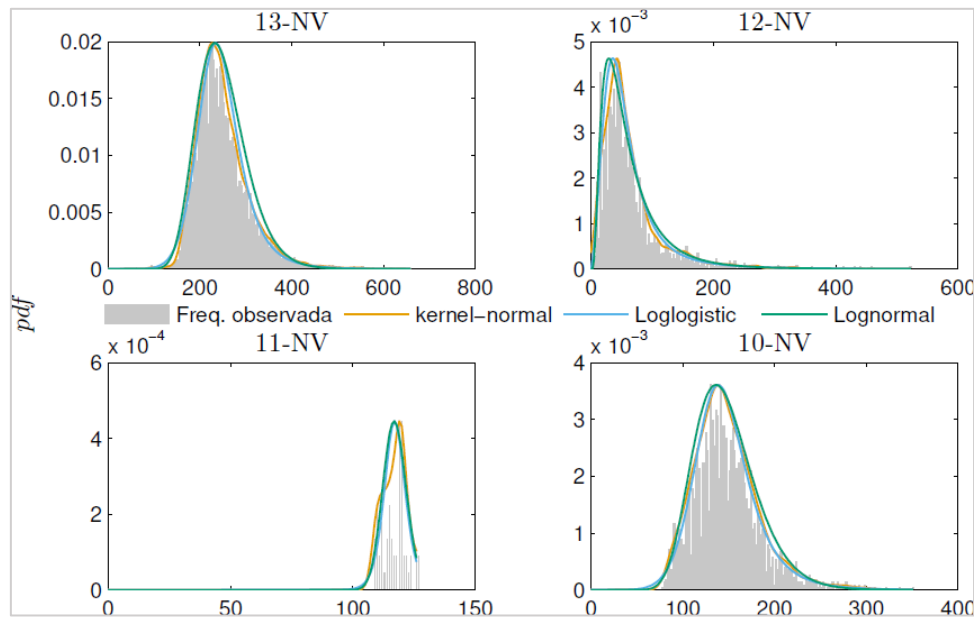


Figura 7-10 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de nivel.  
Fuente: Elaboración propia

La estación de Pte Mocoa (11), refleja un histograma menos nutrido de valores en comparación a las otras, y con unos picos representados por muy pocos valores (Ver Figura 7-10) por lo que se dificulta la aceptación de una distribución de ajuste. La escala de valores en la estación 11 está en el orden de  $10^{-4}$  y las demás por el orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$ , lo cual permite inferir problemas en la resolución.

En la Figura 7-11 se presentan los resultados de los ajustes de distribución de probabilidad de las series máxima diaria anual de precipitación para la estaciones 1, 2, 3 y 4; las funciones que mejores valores mostraron fueron la extreme value, gamma, GEV y Kernel. Así mismo, se puede observar como en general la extreme value, aunque agrupa de buena forma la información, es una función que no alcanza a dar la asimetría de la información. La función gamma contiene un parámetro en si misma que deja ajustar la asimetría; sin embargo, los datos tienen una fuerte influencia, por ejemplo, en la estación 1, la función intenta centrarse en la media. El problema que evidenció la anterior función no es tan evidente como con la GEV donde se presentan varios picos y no hay suficiente resolución en términos probabilistas, es decir, no se concentran los eventos en una franja muy pequeña para tener mayor resolución del problema. En la estación 1 se observa, por el contrario, que la precipitación se concentra de 0 a 200 y el histograma es muy disperso, y se evidencia como la función Kernel en exceso peca tratando de crear esos picos y la función GEV alcanza el pico acertadamente de la kernel, pero suaviza mucho ese fenómeno de dispersión debido a la baja resolución.



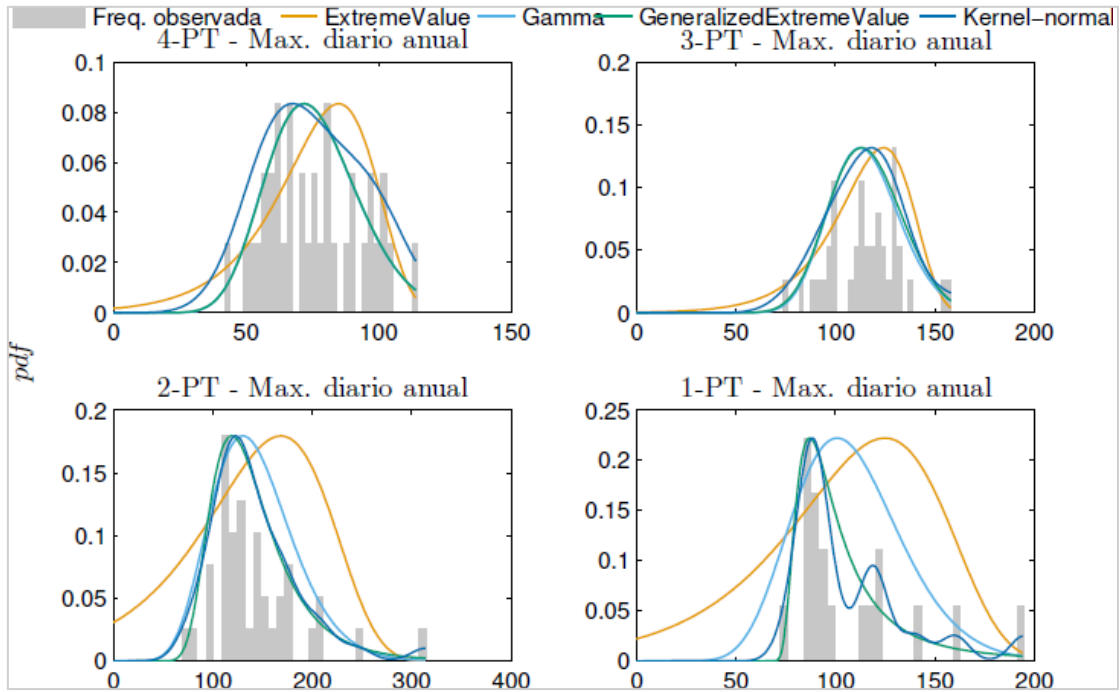


Figura 7-11 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de precipitación.  
Fuente: Elaboración propia

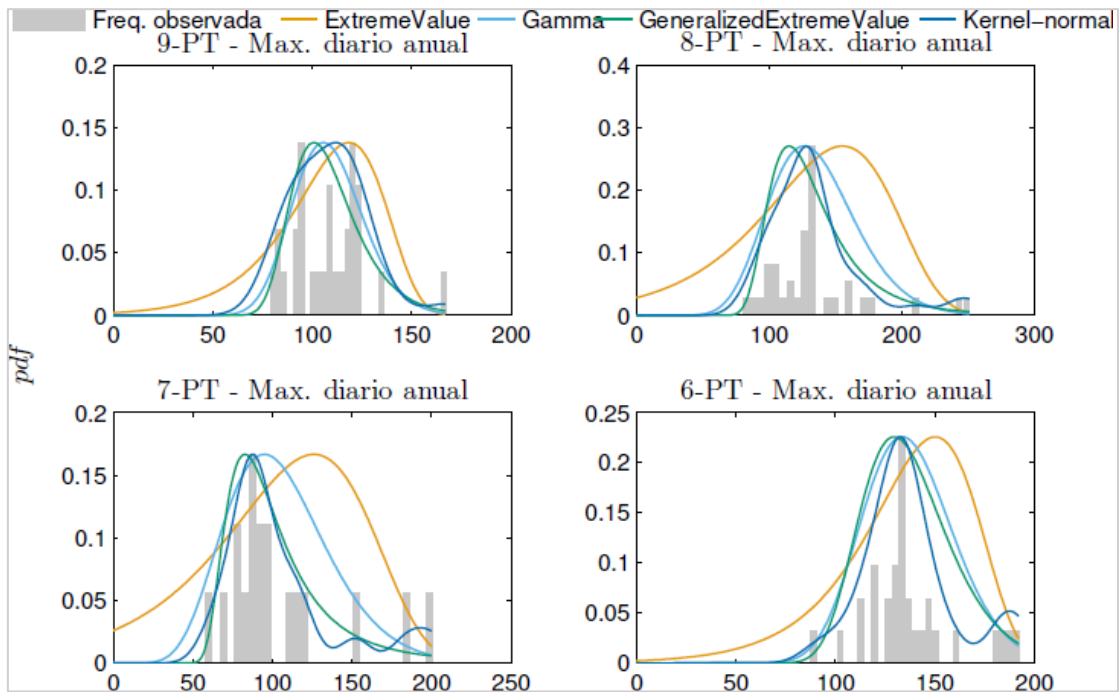


Figura 7-12 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de precipitación.  
Fuente: Elaboración propia

El mismo fenómeno que se evaluó anteriormente se evidenció en la Figura 7-12. Nuevamente la función Kernel y la GEV son las que se ajustan mejor a los histogramas. Finalmente se presenta las distribuciones de probabilidad para eventos máximos diarios anuales de precipitación, de caudal líquido y niveles (Ver Figura 7-13).

En la estación 14 (Ver Figura 7-13) la dispersión de la información es alta, debido a que cuando se determinan los eventos máximos diarios anuales se estableció un umbral del 20% para eliminar años, es decir, si hay más del 20% de datos faltantes en un año no se tienen en cuenta ese valor máximo de ese año. Esto hace que se filtre mucha información de cada estación por lo que la cantidad de datos para la generación de los histogramas es menor que los correspondientes para los análisis diarios, no obstante se obtienen aproximaciones aceptables.

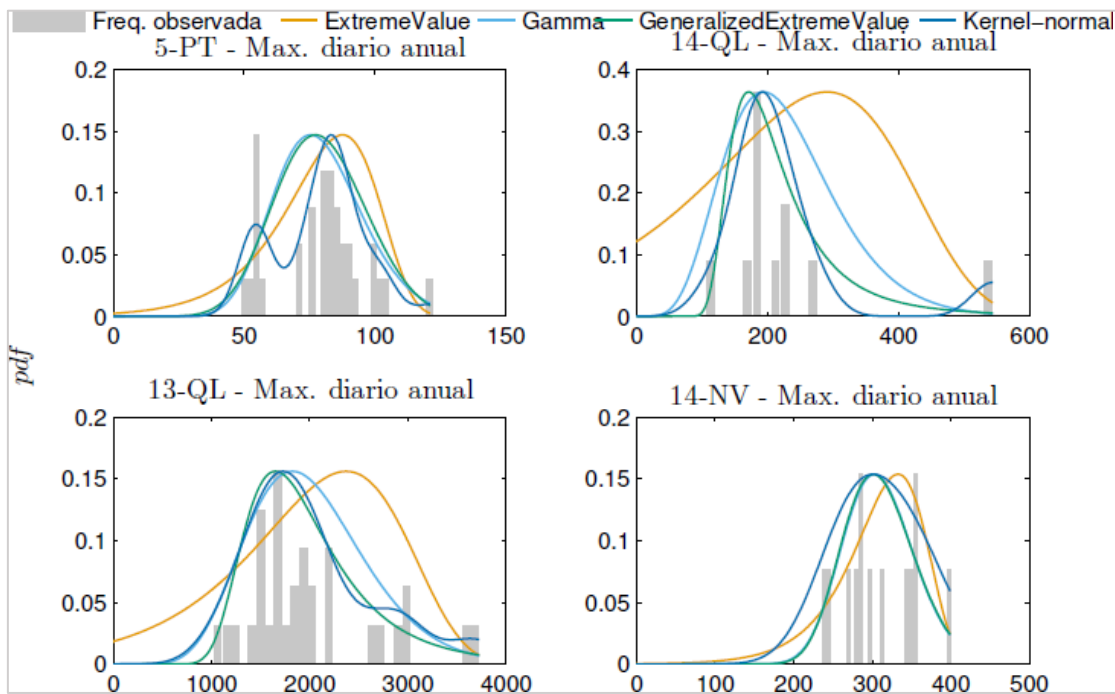


Figura 7-13 Ajuste de funciones de densidad de probabilidad en series de precipitación.  
Fuente: Elaboración propia

En la estación 14 se puede observar que los caudales líquidos alcanzan una distribución de probabilidad GEV y Kernel e incluso la gamma, muy definidas en el mismo pico. En el caso de los niveles el histograma muestra una distribución cuasi uniforme con dos picos en 280 y 360 cm, además se puede visualizar como la extreme value muestra un pico diferente a las otras dos.

El periodo de retorno determinado en base a la función generalizada de valores extremos (GEV) se presenta en la Tabla 7-2, se resaltan la estación 1 ubicada antiguamente en la microcuenca de San Antonio y la 9 localizada

en el casco urbano de Mocoa. Las estaciones anteriormente mencionadas en esta distribución presentan una diferencia significativa en los valores del tiempo del periodo de retorno para las lluvias, comenzando a ser significativa ésta diferencia a partir del periodo de retorno de 25 años (145.9 y 188.4 mm, para la estación 9 y 1, respectivamente) y para 100 años se tiene 164.4 y 293.7 mm para la estación 9 y 1, respectivamente.

En cuanto a la estación 2, ubicada al sur del municipio de Mocoa, presenta valores de periodo de retorno considerablemente altos con respecto a los de Mocoa, alcanzando valores de 200 mm para un periodo de retorno de tan solo 10 años y 300 mm para un periodo de retorno de 100 años. Esto puede ser un indicativo de como es el movimiento de espacialización de la lluvia en cuanto a los periodos de retorno.

En la estación 8 se visualiza también altas acumulaciones de lluvia. Por otro lado, en Puerto Limón, corregimiento de Mocoa, también se presentan altas acumulaciones de lluvia en un periodo de retorno que empieza en dos años con 125 mm de lluvia, inclusive mayor al del casco urbano de Mocoa, y para 25 años con 210 mm de lluvia.

Tabla 7-2 Periodo de retorno en base a la función generalizada de valores extremos (GEV).

Estación	Tipo de variable	Periodo de retorno (T)					
		2	5	10	25	50	100
4	PT	74.6	90.1	98.8	108.2	114.3	119.7
3	PT	114.7	130.6	139.0	147.7	153.0	157.4
2	PT	133.4	171.7	199.3	236.9	267.0	298.7
1	PT	97.3	121.5	145.3	188.4	233.5	293.7
9	PT	105.8	122.3	132.9	145.9	155.3	164.4
8	PT	126.5	156.3	178.5	209.8	235.7	263.7
7	PT	95.1	124.8	149.6	188.5	223.9	265.8
6	PT	134.8	155.9	168.7	183.6	193.8	203.3
5	PT	78.7	93.7	101.7	109.8	114.8	119.0
14	QL	201.0	272.7	331.7	422.5	504.0	599.3
13	QL	1868.6	2443.2	2864.0	3446.6	3918.7	4424.0
14	NV	306.8	346.9	368.8	392.0	406.6	419.2
13	NV	510.8	578.5	615.4	654.5	678.9	699.9
10	NV	302.8	328.4	344.5	363.9	377.6	390.7

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, es importante destacar que para el día del evento (31 de marzo del 2017) en Mocoa, el periodo de retorno correspondiente es de tan solo 5 años, por tanto, es importante que se determine el periodo de retorno de lluvias acumuladas.

El periodo de retorno calculado con la convolución de Kernel para la distribución de probabilidad se presenta en la Tabla 7-3. En primera instancia, las estaciones 1 y 9 no presentan valores tan diferentes como sucedía con la GEV, dado su cercanía espacial.

El comportamiento de las precipitaciones al sur de Mocoa tanto para la estación 2, 8 y 6; como también, la estación de Minchoy que está localizada pasando la cordillera hacia San Francisco, presenta unos valores bajos con respecto a Mocoa. Con un periodo de retorno de 100 años alcanzan los mismos valores de precipitación de Mocoa para un periodo de retorno de 5 años; esto se ve convalidado con la estación Condagua 5 que está ubicada al lado de Michoy al este de Mocoa con valores también muy bajos de precipitación. Se establece que hacia el sur de Mocoa las precipitaciones son muy altas (piedemonte amazónico) con precipitaciones que en general rondan los 110 mm de lluvia para un periodo de retorno de 2 años y alrededor de 140 mm en promedio para un periodo de retorno de 5 años, y alrededor de 170 mm de lluvia para un periodo de retorno de 10 años, siendo una región bastante lluviosa. Hacia el norte, próximo a Mocoa, la estación 4 Campucana presenta una disminución considerable de lluvias, de igual manera en 7 y 4.

En cuanto a niveles se observa que la estación 14 (Piedra Lisa II, objetivo para el proyecto dado que se podría tomar información para la modelación hidrológica) tanto para la normal como para la de valores extremos se tienen valores relativamente similares.

Tabla 7-3 Periodo de retorno en base a la Kernel.

Estación	Tipo de variable	Periodo de retorno (T)					
		2	5	10	25	50	100
4	PT	74.7	95.0	104.4	113.3	118.7	123.5
3	PT	115.4	131.8	140.8	152.9	160.7	166.6
2	PT	133.7	173.6	202.0	243.0	303.0	319.3
1	PT	96.4	126.3	154.5	190.9	197.5	201.5
9	PT	107.8	124.7	133.6	148.7	165.9	174.3
8	PT	127.9	153.4	180.0	238.7	251.4	258.9
7	PT	94.4	124.0	176.7	197.8	205.0	210.1
6	PT	133.9	152.4	180.4	192.4	197.5	201.4
5	PT	80.9	92.8	100.7	110.1	119.3	124.6
14	QL	201.7	256.5	314.4	549.3	569.5	584.2
13	QL	1873.7	2570.2	3059.5	3596.3	3809.9	3951.5
14	NV	308.0	362.7	390.2	418.3	435.8	451.0
13	NV	510.3	600.5	644.4	684.4	707.6	727.2
10	NV	304.4	340.4	357.3	372.8	382.0	389.9

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se presenta el análisis de tendencia de Man-Kendall para cada una de las variables del SI, para esto se analiza los eventos máximos o los eventos promedios acumulados sea anual o mensual. En la Figura 7-14 se presenta los resultados de tendencia obtenidos.

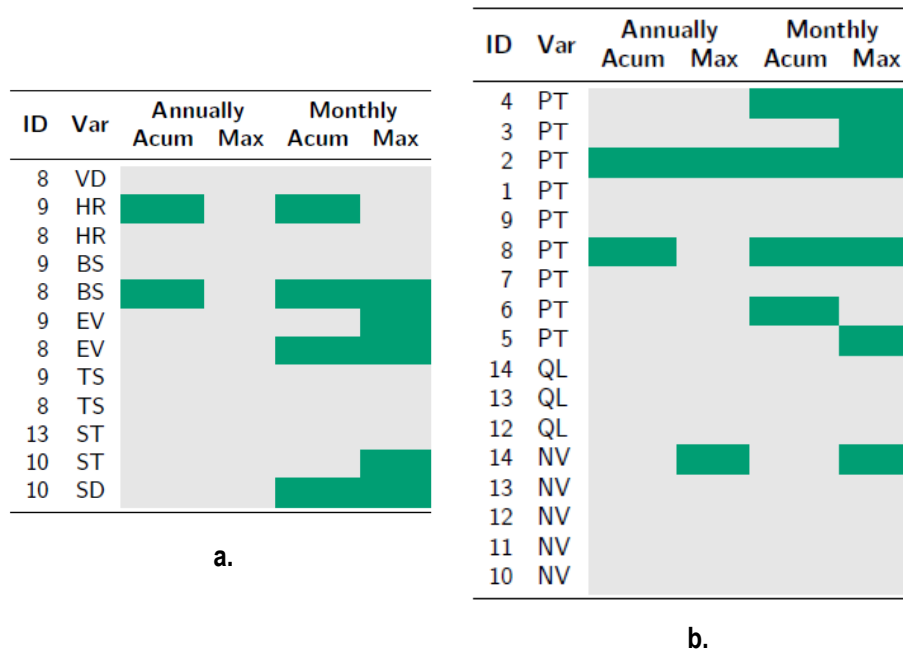


Figura 7-14 Test de tendencia de Man Kendall para las variables del SI.  
Fuente: Elaboración propia

Las variables de HR, BS, EV y SD presentan variación en la tendencia de las series a nivel mensual durante el periodo analizado en la sección a. de la figura anterior. En la sección b. se resalta la variación en la tendencia de la información de 2-PT tanto anual como mensual, el test analizado con los máximos sugiere una variación en la tendencia del 50% de las series de precipitación.

A continuación se presentan los resultados de autocorrelación. Estos se muestran agrupados en diferentes variables y estaciones en función de las magnitudes de las correlaciones encontradas. Cada línea representa una variable diferente en una estación. La escala del eje x está en escala logarítmica con el fin de hacer énfasis en los primeros días. En la Figura 7-15 parte superior se muestra las líneas azul y verde oscuro que marcan la temperatura con resultados muy coherentes, la alta correlación presentada en las series de temperatura se debe a que en los países tropicales no varía de forma apreciable esta variable y por consiguiente se puede retener una correlación alta. La estación 9-TS para 30 días presenta una correlación de 0.8, para la estación 8-TS la correlación es también significativa esta sobre 0.5 para el día 30. De igual forma la HR y VD, presentan correlaciones de menor magnitud (0.5 las más altas), al igual que los sólidos suspendidos.

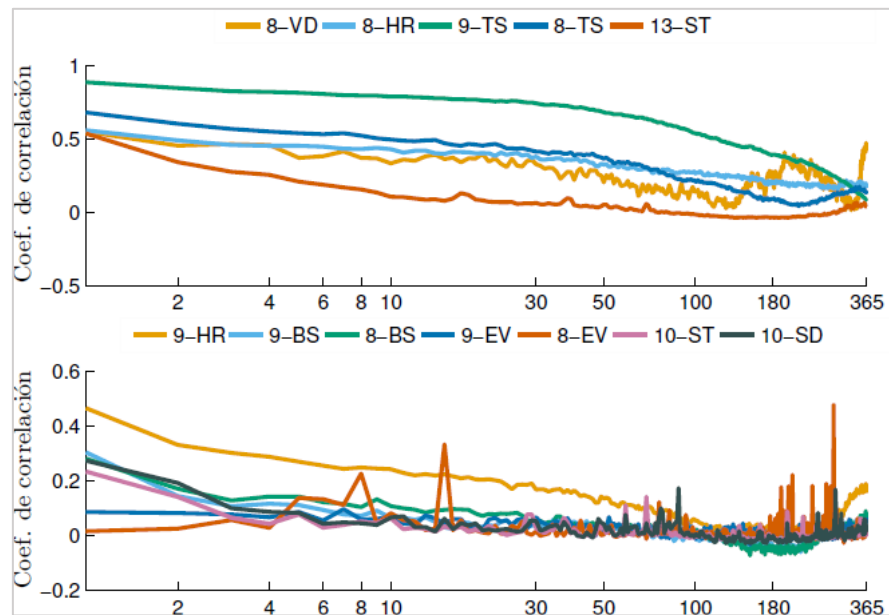


Figura 7-15 Correlograma de las variables 8-VD, 8-HR, 9-TS, 8-TS, 13-ST, 9-HR, 9-BS, 8-BS, 9-EV, 8-EV, 10-ST y 10-SD.  
Fuente: Elaboración propia

En la parte inferior de la figura se muestra el correlograma de otras series como BS, EV, ST, HR y SD, las cuales presentan un comportamiento errático, y se evidencia a partir del rezago 4 una tendencia de ruido para todas las estaciones, a excepción de la 9-HR, la cual se muestra más definida como las que se analizan en la parte superior de esta figura.

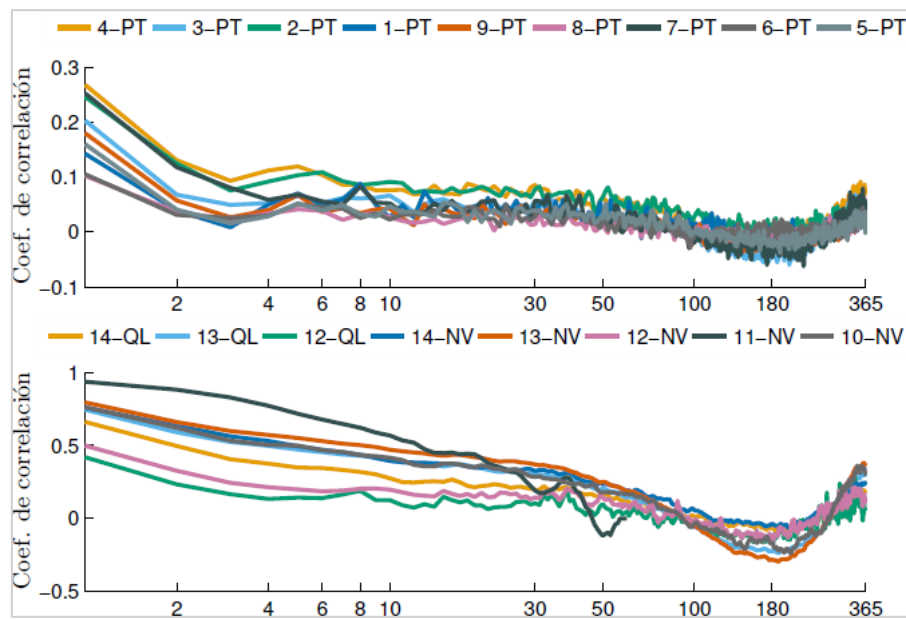


Figura 7-16 Correlograma de las variables de precipitación (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9), caudales (12,13 y 14) y niveles (10, 11, 12, 13 y 14).  
Fuente: Elaboración propia

Es importante, resaltar lo obtenido con las series de evaporación, las cuales tienen un comportamiento caótico, está alrededor de 0 su primer rezago como parte de la estructura de estas series, y en las que no se espera una alta correlación.

El estudio de correlación es complementado con la Figura 7-16, en la cual se presentan los correlogramas para las series de precipitación en la parte superior, y en la parte inferior los correlogramas referentes a las series de caudal y nivel. Las estructuras del correlograma de precipitación muestran un nivel apreciable de ruido, y se observa que la mayor correlación con un rezago unitario (el primer dato que se tiene correlaciones) es de 0.28, lo cual no es significativo.

Los resultados de los periodogramas se presentan a continuación. Al igual que la presentación de los correlogramas, los resultados se agruparon por valores similares para compactar la información de mejor forma. La parte superior de las figuras que se muestran a continuación presenta la varianza normalizada de cada armónico y en la parte inferior el tiempo en días correspondientes a los armónicos evaluados (frecuencias evaluadas).

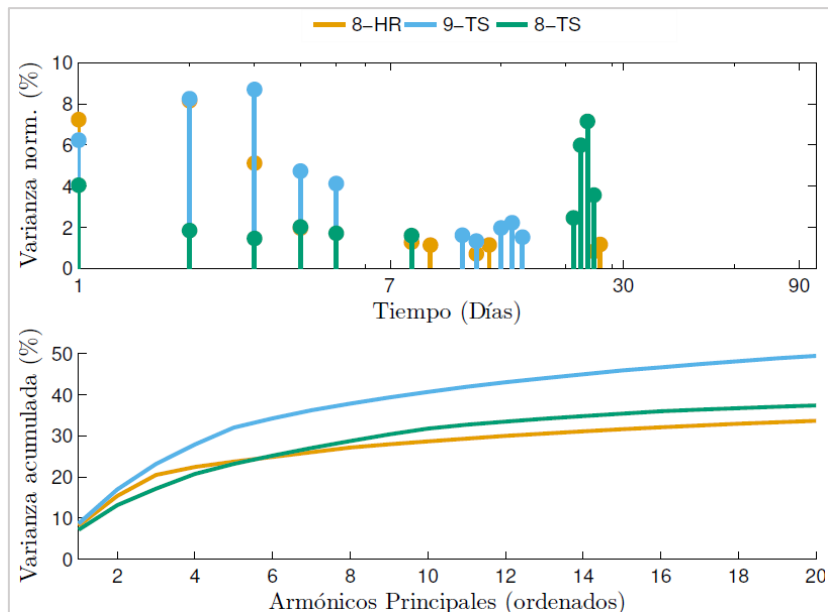


Figura 7-17 Periodograma para las estaciones 8 (HR y TS) y 9(TS).  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-17 se presenta la humedad relativa (8) y la temperatura (9 y 8), donde se muestra que en la estación 8-HR el armónico 1 retiene alrededor del 7.5 % de la varianza total calculada en la serie, el armónico 2 retiene el 8%, el armónico 3 retiene 5.5% y así sucesivamente se presentan los 10 principales armónicos. En la parte inferior de la figura se muestra cual es la varianza total acumulada, 8-HR alcanza apenas una varianza del

30 % con 20 armónicos, mientras que la 9-TS alcanza una varianza aproximada del 50%, indicando que tan caótico o complejo es el problema.

El periodograma para otro grupo de variables se presenta en la Figura 7-18, donde en la parte inferior se observa que la mayoría están por debajo del 10 % de la varianza acumulada con 20 armónicos, es decir, son series que presentan mucho ruido, bastante caóticas, sin un patrón definido, a excepción de la serie de velocidad del viento de la estación 8, aunque tampoco se puede afirmar lo contrario porque la varianza acumulada es alrededor del 20%. Ésta figura muestra que todas estas variables, son series que no son fácilmente mapeables con una superposición de ondas sinusoidales.

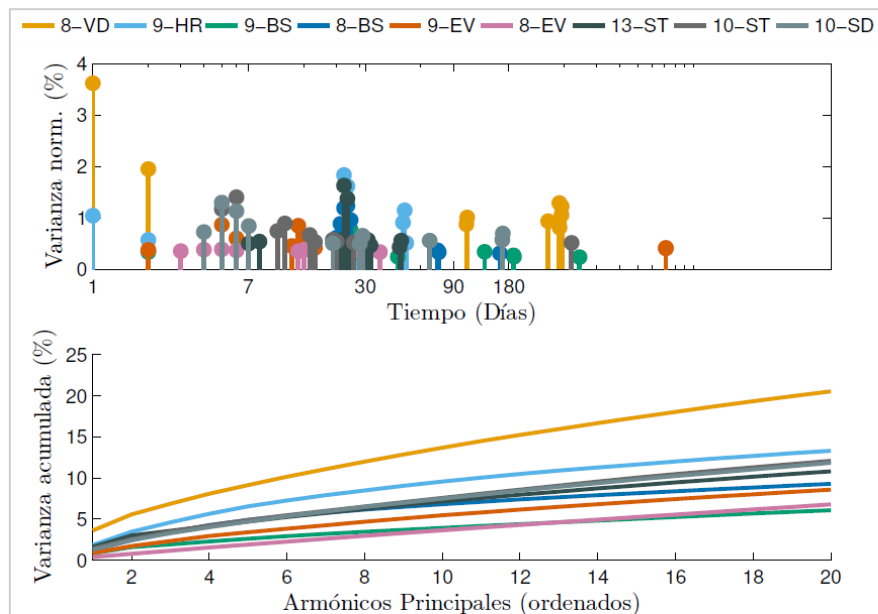


Figura 7-18 Periodograma para las estaciones 8 (VD, BS y EV), 9(HR, BS y EV), 13(ST) y 10(ST y SD).  
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se agruparon los periodogramas para todas las series de precipitación disponibles (Ver Figura 7-19), las cuales alcanzan con 20 armónicos del 3 al 9 % de la varianza acumulada, lo que confirma que las series de precipitación diaria presentan mucho ruido y por consiguiente pueden ser catalogadas como caóticas, de ahí radica la importancia de utilizar un modelo de predicción ajustado para los objetivos del SAT.



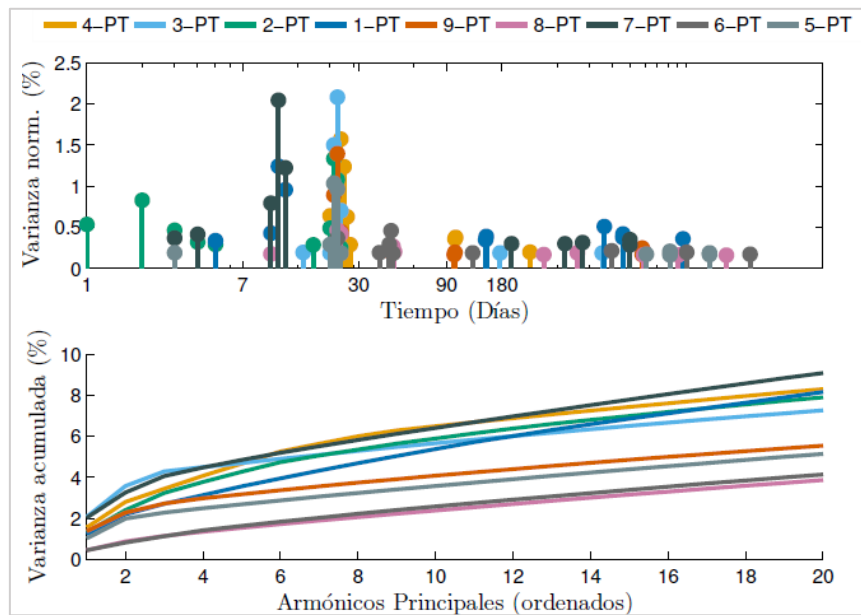


Figura 7-19 Periodograma para la variable de precipitación de las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.  
Fuente: Elaboración propia

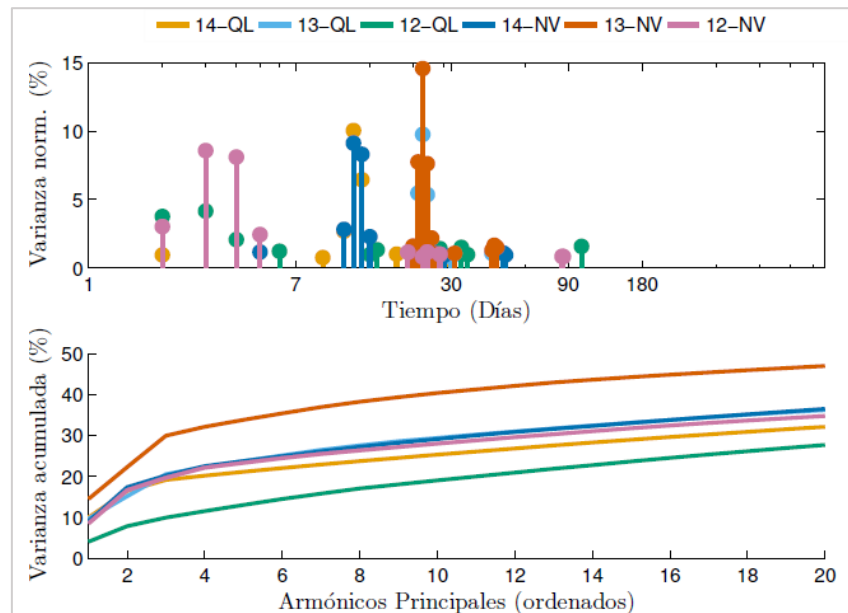


Figura 7-20 Periodograma para las variables de caudal líquido y niveles de las estaciones 12,13 y 14.  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 7-20 se centra en el análisis de las series de caudal líquido y nivel. En esta figura se evidencia que si bien son series con una estructura compleja, el número armónico también muestra que con un total de 20 en la estación 13-NV alcanza varianzas acumuladas del 40%, y para el resto de las series esta entre el 20 a 30 %,

siendo esto un indicador de que no son series complejas de modelar. La cantidad de armónicos que se requieren para reconstruir la serie es un indicador de que tan compleja es la serie en sí misma para modelar.

En 13-NV, un armónico representa el 15% de la varianza con cerca de 30 días. Para la estación 14-NV se tiene una serie donde los armónicos más importantes están agrupados alrededor de 10 días. Es importante notar que las cuatro barras azules correspondientes a esta variable están todas agrupadas a diez días, es un dato interesante en cuanto a la periodicidad que podría adjudicársele a las series, puesto que con tan solo esos cuatro armónicos se alcanza a capturar el 20 % de la varianza de la serie.

## 7.2 Análisis multivariado

En la Figura 7-21 se presentan los resultados del análisis multivariado para la selección del periodo de análisis. En la figura se muestran una serie de curvas erráticas que representan el valor del periodo  $\gamma$  seleccionado, de forma que se minimice el número de datos faltantes por el peso asignado a cada variable. La sumatoria es el objetivo a minimizar. La figura muestra cuando se evaluó con cuatro años se encontró el periodo más bajo. Al evaluarlo con 5 el resultado dio alrededor de dos y así sucesivamente. Los colores en la figura representan el periodo de análisis y en las abscisas están los años evaluados. En razón a lo anterior, se seleccionó un periodo correspondiente a diez años que esta entre el promedio de lo más bajo y más alto que se obtuvo en los óptimos de cada periodo. En el círculo punteado en rojo se resalta la selección del periodo que está comprendido del 01/11/1996 al 01/11/2006.

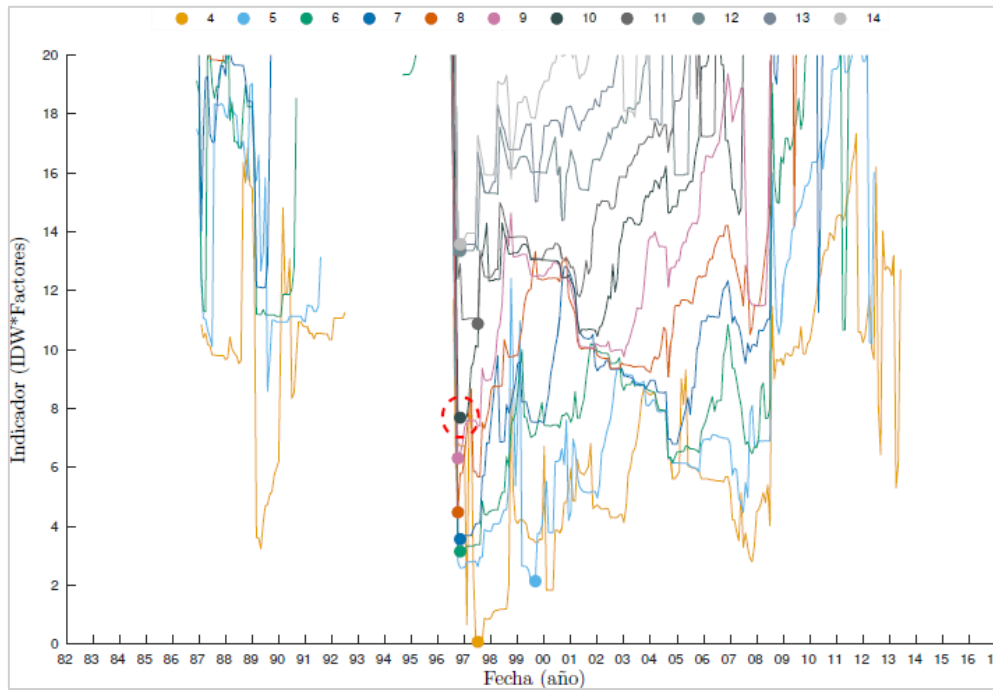


Figura 7-21 Periodos de análisis evaluados.

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 Análisis de componentes principales y clusters

Se cuenta con ocho variables del análisis multivariado, de las cuales por análisis de componentes principales se alcanza a retener el 82% de la información con tres componentes (Ver Figura 7-22), lo que muestra que se puede reducir el problema a tres dimensiones; sin embargo, la precipitación de puerto limón (vector 6) tiene mayor incidencia en la transformación del sistema de coordenadas y las otras variables tienen más o menos el mismo peso sobre la transformación del sistema de coordenadas. En este sentido, el contar con las mediciones en otros puntos así no estén en el área del proyecto es importante para definir la variabilidad innata del problema.

A continuación se presenta los resultados del clustering (Ver Figura 7-23). Se observa como tres clusters definen el espacio multidimensional del problema, donde se tienen dos grandes grupos que representan los eventos mínimos y medios, y otro donde se representan los eventos máximos.

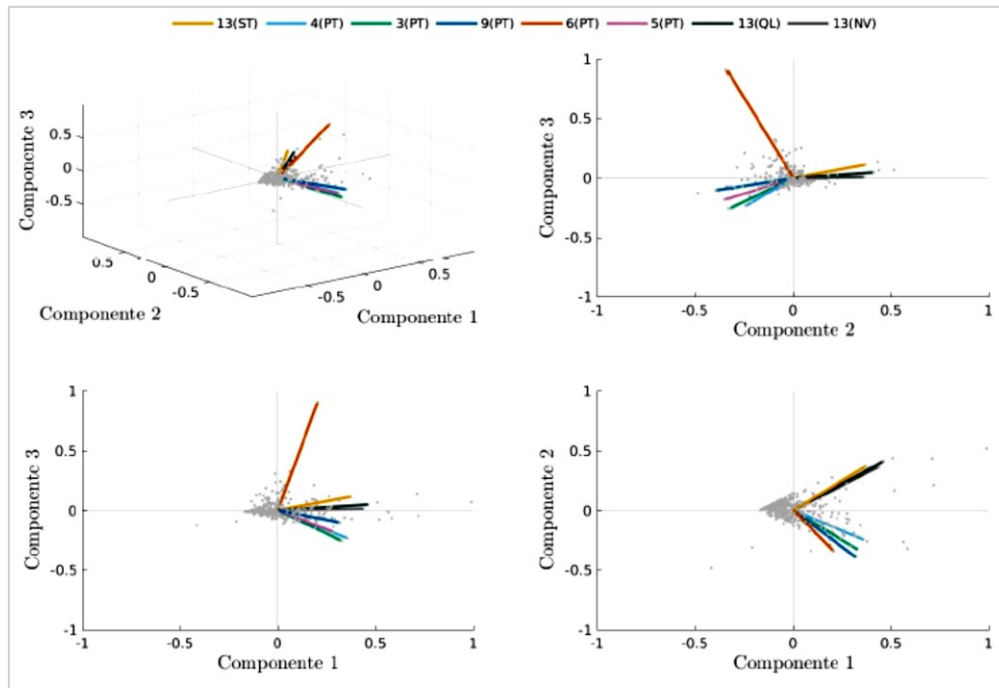


Figura 7-22 Análisis de componentes principales para las estaciones 13-ST, 4-PT, 3-PT, 9PT, 6PT, 5PT, 13-QL y 13-NV.  
Fuente: Elaboración propia

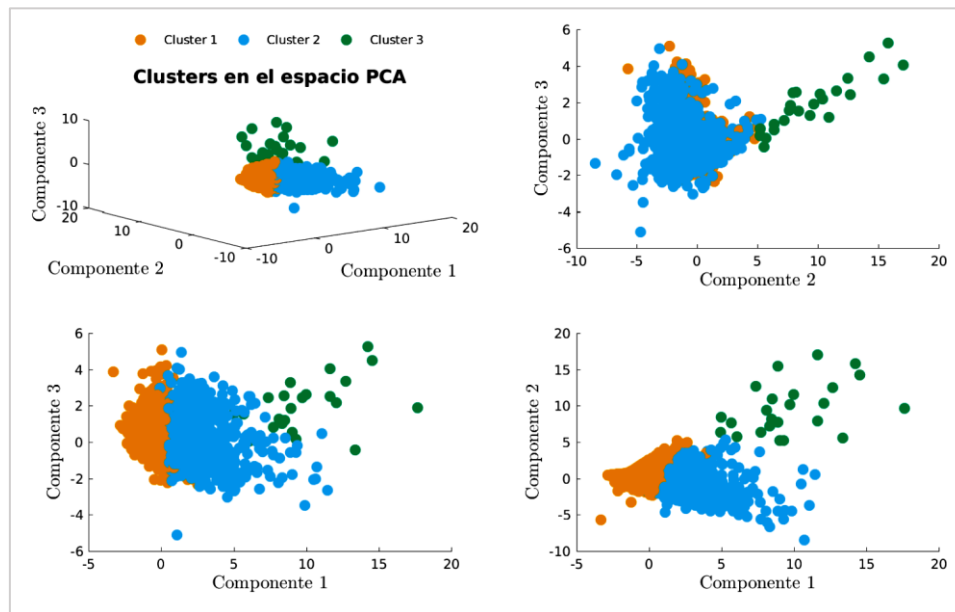


Figura 7-23 Clusters evaluados con el método caminos.  
Fuente: Elaboración propia

#### 7.4 Análisis espacial y downscaling temporal de las series

En primera instancia se realizó un análisis exploratorio con la interpolación de Kriging con el fin de encontrar si existe o no variabilidad en la precipitación. En la Figura 7-24 se muestran los resultados de la malla de precipitación para el día del evento, en donde evidencia el núcleo máximo de precipitación al noroccidente del área de estudio delimitada.

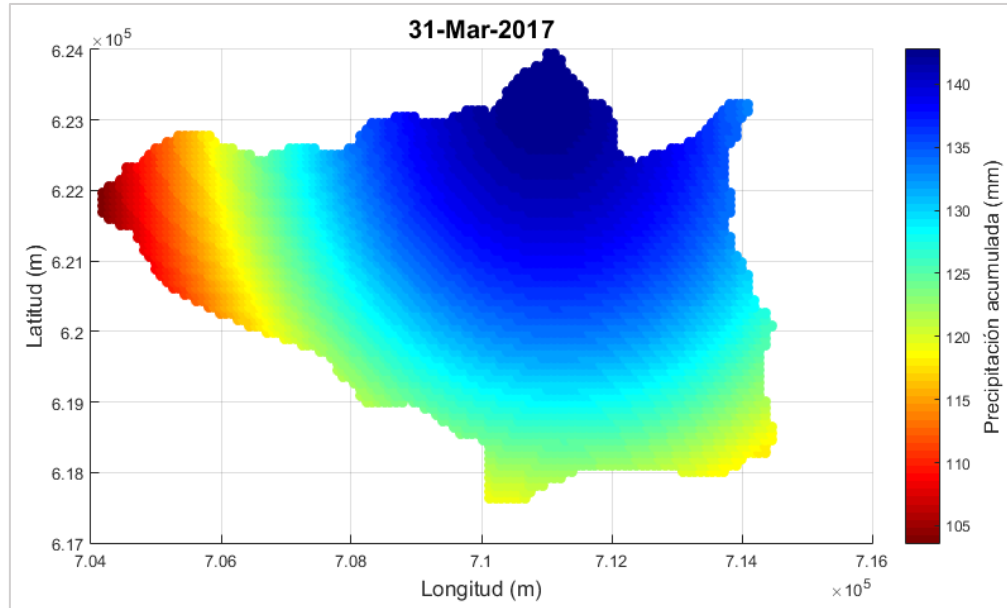


Figura 7-24 Distribución espacial de la precipitación interpolada con Kriging.  
Fuente: Elaboración propia

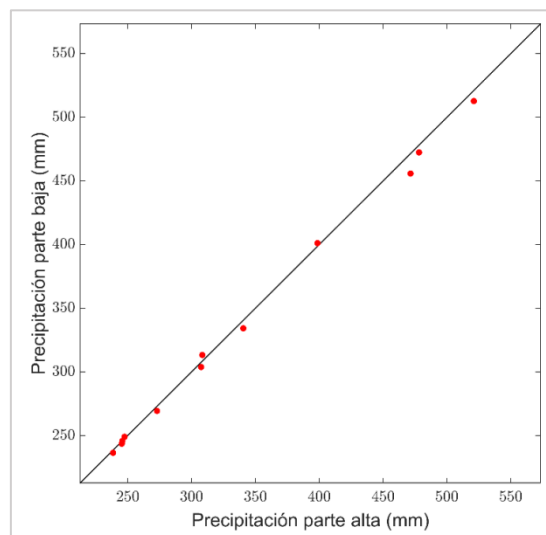


Figura 7-25 Scatter plot de las series de precipitación mensual multianual de la precipitación en la parte baja con la parte alta de la cuenca del área delimitada para el proyecto.  
Fuente: Elaboración propia

No obstante, al realizar la comparación de las dos series de precipitación mensual multianual, esta no alcanza a representar una variabilidad espacial de la información (Ver Figura 7-25), por lo tanto se optó por utilizar una precipitación global, en este caso, la precipitación registrada por la estación Mocoa Autom Acueducto.

En razón a lo anterior, se establece como homogénea la precipitación en toda la cuenca. Para generar la serie de precipitación a resolución diez minutil se utilizó la metodología descrita en el capítulo 6. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología del downscaling temporal para obtener las series diez minutil de precipitación y temperatura para Mocoa. Como se observa en la Figura 7-26 la metodología empleada representa adecuadamente el comportamiento de la precipitación, conservando el soporte cantoniano característicos de esta resolución, representando los intervalos con lluvia y no lluvia.

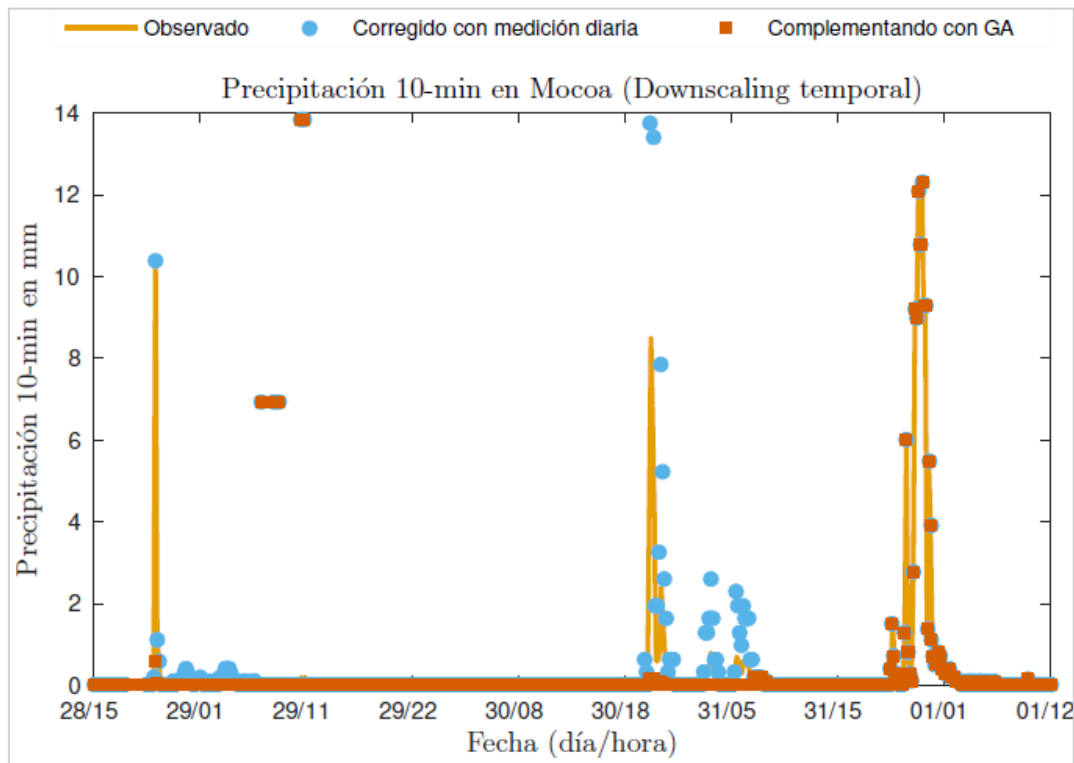


Figura 7-26 Precipitación diez minutil en Mocoa.  
Fuente: Elaboración propia

La serie de temperatura a resolución diez minutil producto del downscaling temporal es el insumo para la modelación hidrológica. Ésta serie corresponde a la generada a partir de la temperatura media diaria observada de la estación 9 y los registros minutales registrados por el SIATA en la estación C. La temperatura media observada complementada con el proceso de downscaling se presenta en la Figura 7-27.

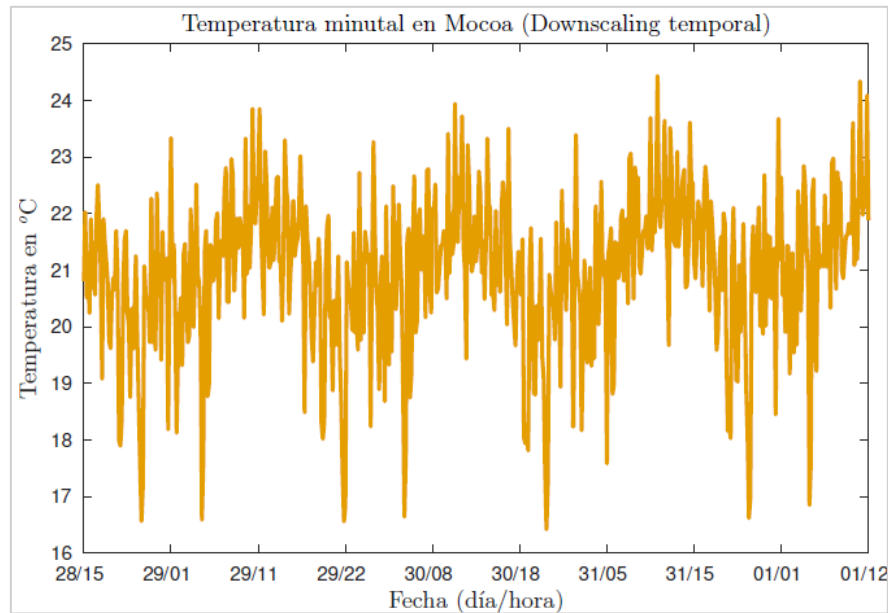


Figura 7-27 Serie complementada de temperatura media observada en la estación 9.  
Fuente: Elaboración propia

## 8 REFERENCIAS

- Ahmed, S. (2010). *Hydrologic ensemble predictions using ensemble meteorological forecasts*. University of the Ryukyus. Retrieved from <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/9027>
- Alcaldía Municipal de Mocoa Putumayo. (2000). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial Mocoa Putumayo 2000*. Mocoa. Retrieved from [http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/diagnostico - mocoa \(80 pag - 1429 kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/diagnostico - mocoa (80 pag - 1429 kb).pdf)
- Arango, M. I., Rodríguez, G., Zapata, G., & Bermúdez, J. G. (2015). *Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Monzogranito de Mocoa*. Medellín.
- Camacho, L. A., & Lees, M. J. (1999). Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing. *Journal of Hydrology*, 226(1–2), 30–47. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00162-6)
- Cantor Monroy, M. M. (2010). *Modelación del transporte de solutos en condiciones de flujo no permanente con alta dispersión y zonas muertas en canales de baja pendiente - aplicación al caso del río Bogotá en el tramo de puente vargas - puente la virgen*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2776/1/295342.2010.pdf>
- Chu, X., & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 119–124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2009\)135:1\(119\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(119))
- Domínguez C., E. A. (2010). Cálculo de parámetros morfométricos.

- Hamed, K. H. (2009). Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 368(1–4), 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.040>
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41–68.
- Jojoa Chantre, O. A. (2003). *Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa departamento del Putumayo*. Mocoa.
- Kottegoda, N. T., & Rosso, R. (2008). *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*. Engineering. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=S7FSnnA6kBIC&oi=fnd&pg=PR5&dq=APPLIED+STATISTICS+FOR+CIVIL+AND+Environmental+Engineers&ots=gvRSfefMIH&sig=RMpcCOgMIJ1CdzFLTadtHO78OK4>
- Lee, T., & Jeong, C. (2014). Nonparametric statistical temporal downscaling of daily precipitation to hourly precipitation and implications for climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 510, 182–196. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.027>
- Mathevet, T. (2005). Quels Modèles Pluie-Debit Globaux au pas de temps horaire? Développements Empiriques et Comparaison de modèles sur un large échantillon de Bassins Versants. *Ecole Nationale Du Génie Rural, Des Eaux et Forêts*, 463.
- McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., & Clark, M. (2010). Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes*, 24(10), 1270–1284. <https://doi.org/10.1002/hyp.7587>
- Moros, A. (2010). *Caracterización De Señales De Precipitación Mediante La Transformada De Fourier Y Transformada Wavelet*. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Hidrosistemas Asesor. Pontificia Universidad Javeriana.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Reyes T., A., Barroso, F., & Carvajal E., Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (Primera Ed). Cali, Colombia: Editorial Universidad del Valle.
- Robertson, K., & Castiblanco, M. A. (2011). Fluvial Hazards in the Colombian Amazon Piedmont, 20(2), 121–215. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rcdg/v20n2/v20n2a10.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (2017a). *Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo*. Bogota, D.C.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017b). *Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de*





2017 en Mocoa – Putumayo. Bogotá.

Teegavarapu, R., & Elshorbagy, A. (2005). Fuzzy conjunto medida de error basado en la evaluación del modelo hidrológico. *Journal of Hydroinformatics*, 7(3), 199–207.

US Army Corps of Engineers. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Retrieved from [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Technical Manual\\_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Manual_(CPD-74B).pdf)

Velez, J. J., & Botero, A. (2010). Estimización del Tiempo De Concentración y Tiempo De Rezago En La Cuenca Experimental Urbana De La Quebrada San Luis , Manizales. *Dyna*, 165, 58–71.

Warren Liao, T. (2005). Clustering of time series data - A survey. *Pattern Recognition*, 38(11), 1857–1874. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.01.025>

Williams, G. P. (2014). *Chaos tehory tamed. Igarss 2014*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>