

COMPARACIÓN DE FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA DETERMINAR LA
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL CON LOS CAUDALES REALES EN LA CUENCA
DEL RIO LAS PIEDRAS



CAMILO ANDRÉS TOBAR MANZANO
104911012418

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2019

COMPARACIÓN DE FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA DETERMINAR LA
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL CON LOS CAUDALES REALES EN LA CUENCA
DEL RIO LAS PIEDRAS



CAMILO ANDRÉS TOBAR MANZANO

Modalidad de Investigación para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Director
Ing. Luis Jorge González
Departamento de Hidráulica

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2019

Nota de aceptación:

Ing.

Ing.

**Ing. Luis Jorge González M.
Director**

Popayán, de 2019

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. ANTECEDENTES	11
3. JUSTIFICACIÓN	13
3.1. GESTIÓN Y PLANEACIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO.....	13
4. OBJETIVOS.....	16
4.1. OBJETIVO GENERAL	16
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
5. METODOLOGÍA.....	17
5.1. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA.....	17
5.2. RECOLECCIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.	17
5.3. TRATAMIENTO DE DATOS.....	17
5.3.1. Temperatura.....	17
5.3.2. Precipitación.....	17
5.3.3. Polígonos de Thiessen	18
5.4. CALCULO DE LA ESCORRENTÍA.....	19
5.4.1. Formula empírica de Grunsky.....	20
5.4.2. Formula empírica de Turc	20
5.5. CONTRASTACIÓN DE DATOS REALES Y TEÓRICOS	20
5.5.1. Coeficiente de Determinación (R^2).....	21
5.5.2. Error Estándar de Estimación (EEE).....	21
5.5.3. Test de Bland y Altman.....	21
5.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
5.7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
6. MARCO TEÓRICO	24
7. ESTADO DEL ARTE	26
7.1. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DE SIETE MODELOS PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA (BUDYKO, COUTAGNE, GRUNSKY, PEÑUELAS, PIZARRO, TURC-PIKE), EN LA CUENCA DEL RIO MALLECO, IX REGIÓN.	26

7.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS PRECIPITACIÓN- ESCORRENTÍA DE GRUNSKY, PEÑUELAS, COUTAGNE, EN LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO Y EN LA CUENCA DEL RIO PURAPEL, VII REGIÓN.	26
7.3.	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN BOSQUES MONTANOS NATURALES Y PLANTADOS DE PIEDRAS BLANCAS, ANTIOQUIA (COLOMBIA).....	27
8.	DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO	29
8.1.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	29
8.2.	INFORMACIÓN BÁSICA.....	30
9.	APLICACIÓN A LA CUENCA DE ESTUDIO	30
9.1.	PRESELECCIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	30
9.2.	FORMACIÓN DE POLÍGONOS DE THIESSEN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL QGIS.....	31
9.3.	TRATAMIENTO DE DATOS INCOMPLETOS.....	33
9.3.1.	Temperatura.....	33
9.3.2.	Precipitación.....	36
9.4.	APLICAR FORMULA DE POLIGONOS DE THIESSEN	41
9.4.1.	Precipitación media areal.....	41
9.4.2.	Temperatura media areal.....	42
9.5.	CÁLCULO DE APORTACIONES	43
9.5.1.	Formula empírica de Turc	43
9.5.2.	Formula empírica de Grunsky.....	44
9.6.	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	45
9.7.	ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN (EEE).....	46
9.8.	TEST DE BLAND Y ALTMAN	46
9.9.	CONTRASTACIÓN GRAFICA DEL CAUDAL ESTIMADO POR LOS MODELOS EN ESTUDIO VERSUS EN CAUDAL REAL.	52
10.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
10.1.	ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACION (EEE).....	53
10.2.	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2).....	54
10.3.	TEST DE BLAND Y ALTMAN	54
11.	CONCLUSIONES	55
12.	RECOMENDACIONES	55
13.	CITAS BIBLIOGRÁFICAS	56
13.1.	REFERENCIAS DE INTERNET.....	58

Lista de tablas

Tabla 1. Información básica necesaria para el estudio

Tabla 2. Parámetros morfo métricos de la cuenca

Tabla 3. Estaciones cercanas a la subcuenca del río Las Piedras

Tabla 4. Datos estación aeropuerto GLV

Tabla 5. Datos para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina, para Diciembre del año 2002

Tabla 6. Datos para la estación AGLV por medio del gradiente para la región andina, para Junio del año 2002

Tabla 7. Datos para la estación El Lago por medio del gradiente para la región andina, para Junio del año 1998

Tabla 8. Datos para la estación El Lago por medio del gradiente para la región andina, para Junio del año 1998

Tabla 9. Regresión Lineal para estación Arrayanales con la estación Polindara en el año 2002

Tabla 10. Regresión Lineal para estación El Lago con la estación Polindara en el año 1998.

Tabla 11. Regresión Lineal para estación San Pedro con la estación Coconuco en el año 2001

Tabla 12. Área (Ha) de influencia de cada estación sobre la cuenca, obtenidos de QGIS

Tabla 13. Precipitación areal para el mes de Enero de 1998

Tabla 14. Temperatura areal para el mes de Enero de 1998

Tabla 15. Resultados prueba de Bland y Altman

Tabla 16. Resultados de los modelos

Lista de figuras

Figura 1. Imagen de la ventana para encontrar el método de comparación

Figura 2. Imagen de la ventana para selección de métodos

Figura 3. Imagen de la ventana para selección de rangos de confianza

Figura 4. Ubicación de la cuenca del río Las Piedras

Figura 5. Estaciones cuenca río las piedras en Google Earth

Figura 6. Polígonos de Thiessen proyectados para cada una de las estaciones con influencia sobre la Sub Cuenca Río las Piedras

Figura 7. Regresión Lineal Precipitación Polindara vs Arrayanales

Figura 8. Regresión Lineal Precipitación Polindara vs El Lago

Figura 9. Regresión Lineal Precipitación San Pedro vs Coconuco

Figura 10. Fichero de Herramientas avanzadas

Figura 11. Validación de métodos

Figura 12. Bland y Altman

Figura 13. Modelo real

Figura 14. Grunsky

Figura 15. Lista de selecciones

Figura 16. Turc

Figura 17. Diagrama de dispersión para Grunsky

Figura 18. Gráfico de residuos para Grunsky

Figura 19. Diagrama de dispersión para Turc

Figura 20. Gráfico de residuos para Turc

Figura 21. Caudales estimados por cada modelo en estudio vs caudal real para periodo de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a Dios y a mi madre por haberme acompañado incondicionalmente en cada paso dado, alentándome después de cada tropiezo y apoyándome en cada nuevo escalón.

A mi tutor Luis Jorge González, cuya orientación, apoyo y conocimientos aportados fueron muy importantes, a los profesores de mi carrera por aportarme un poco de su conocimiento.

A mi hermana por su apoyo incondicional en cualquier situación, a mis amigos y familia por acompañarme en este proceso.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad es muy notorio el interés por el conocimiento, localización y magnitud de los recursos hídricos (SALA, M. y BATALLA, J. M., 1996), además de la gestión de este, ya que es un elemento natural finito e indispensable para la vida, ya sea dulce, salobre o de mar, fundamental para el sostenimiento y reproducción de los seres vivos en nuestro planeta y necesaria para los diferentes procesos biológicos de los mismos (FERNÁNDEZ, A., 2012).

Este elemento natural cubre más de dos tercios de nuestro planeta en un porcentaje del 97,6% de agua salada (mares y océanos) y el 2.5% restante de agua dulce; de este último un 1,9% se encuentra en los casquetes de hielo y glaciares y tan solo un 0.6% en lagos, ríos, depósitos subterráneos, pantanos, atmosfera y sistemas biológicos, lo que nos deja un pequeño porcentaje de agua dulce para nuestro consumo (AUGE, M., 2007)

Por el continuo crecimiento poblacional e industrial; una agricultura más agresiva, aumento en la deforestación, además de la problemática ambiental que se ha estado viviendo en las últimas décadas por el cambio climático se está presentando una clara repercusión en la oferta hídrica, convirtiéndola en una de las mayores preocupaciones de la sociedad debido a que afecta directamente a los ecosistemas, la agricultura, la industrial y toda actividad humana, haciendo que este recurso se deteriore y minimice progresivamente, afectando principalmente a países en vía de desarrollo los cuales no tienen los suficientes recursos económicos y tecnológicos para afrontar esta situación (MONFORME, G. Y CANTÚ, P.C., 2009)

El elevado incremento de gases invernadero (siendo el 2016 el año más crítico desde hace 800 000 años aproximadamente - OMM, 2017), ha ocasionado que el ciclo hidrológico haya tenido un significativo cambio el cual se presentará con mayores evaporizaciones y precipitaciones, pero estas últimas se darán de manera desigual alrededor del planeta. El clima depende de variables relevantes del ciclo hidrológico, tales como la humedad ambiente y la precipitación, el planeta ha venido sufriendo una serie de cambios drásticos en el transcurso del último siglo y lo que llevamos de este, siendo uno de los más evidentes el aumento de la temperatura del planeta, como se evidencia desde el año 1880 en 1,4 grados Fahrenheit; pero el mayor aumento se ha venido presentando en las últimas décadas, siendo la EL del 2018 el cuarto año más cálido, hasta el momento en 139 años (NOAA, 2019), y las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera ya alcanzaron sus niveles más altos en al menos 800 mil años, además de que se están acelerando a tasas nunca antes registradas y también influyen los eventos climáticos, como El Niño, que provocan un aumentó en las temperaturas (NASA, 2019).

Con el transcurrir del tiempo se ha querido dar una explicación a los fenómenos naturales y se han venido descubriendo y desarrollando diferentes herramientas para dar esta explicación, tales como las ecuaciones de Bernoulli, Chezy, Manning, Darcy-Weisbach, etc., o instrumentos como el pluviómetro, pluviógrafo, limnómetro, entre otros. En todo este transcurso también se desarrollaron los diferentes modelos

para el cálculo de la esorrentía de forma directa como son los de Coutagne, Peñuelas, Turc y Grunsky las cuales usan coeficientes de relación esorrentía-precipitación ya conocidos y dan un valor aproximado, debido a que el valor real de la esorrentía solo se puede determinar experimentalmente mediante la instalación de estaciones de aforo y pluviómetros en la cuenca (GONZÁLEZ, 2008).

Actualmente se observan efectos importantes sobre los recursos hídricos a escala local, como el crecimiento poblacional el cual conlleva a un mayor uso de este recurso, disminuyendo así su cantidad y calidad lo que ha generado una necesidad de entender el comportamiento de los sistemas a través de modelos climáticos y por lo tanto llevar a cabo un adecuado manejo, gestión y planificación de los mismos (GONZÁLEZ et al, 2011); la relación precipitación-esorrentía es una herramienta hidrológica que permite estudiar a las diversas situaciones hídricas, debido a que se encuentran periodos hidrológicos donde hay una gran disminución de las precipitaciones que influyen directamente al caudal, por pequeño que sea, del cauce donde desembocan, advirtiéndole que no todas las precipitación que caen sobre una cuenca determinada llegan al cauce ya que se pueden presentar pérdidas por diferentes razones, tales como, la evapotranspiración (ET), evaporación, almacenamiento o por causas del relieve e infiltración.

2. ANTECEDENTES

Colombia cuenta con 4 de las 214 grandes cuencas del mundo, de más de 100.000 Km², correspondientes a los ríos Magdalena, Guaviare, Casanare y Meta. Igualmente, cuenta con tres cuencas entre 50.000 y 100.000 Km², de los ríos Cauca, Inírida y Putumayo y más de 700.000 microcuencas con áreas menores de 10 Km². Esta red se complementa con aguas subterráneas y almacenamientos superficiales, que entre lagos, lagunas, embalses, ciénagas y pantanos alcanzan 17.000 cuerpos de agua (IDEAM, 2002) y si bien Colombia posee una gran riqueza hídrica, esta no se encuentra distribuida de manera homogénea y contradictoriamente las zonas con mayor concentración de población son las más vulnerables. Según el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2001).

Según el IDEAM, la oferta hídrica en el país experimenta una disminución progresiva a causa de las limitaciones de uso por la calidad del agua, afectada por la contaminación producto de las actividades socioeconómicas e industriales, por los aportes de sedimentos provenientes de fenómenos erosivos y por los procesos de degradación de las cuencas. De no tomarse medidas de conservación y manejo adecuadas, para 2015 y 2025, respectivamente el 66% y el 69% de los colombianos podrían estar en riesgo alto de desabastecimiento en condiciones hidrológicas secas.

El departamento del Cauca está constituido hídricamente por cinco grandes cuencas: Pacífico, Alto Patía, Magdalena, Caquetá y Alto Cauca, esta última, conformada por el río Cauca y sus afluentes río Palo, Negro, Ovejas, Pescador, Piedras, Palacé, Pisojé, Molino; hacen parte también de esta riqueza natural numerosas subcuencas y microcuencas urbanas como la del río Las Piedras, y reconocida como una de las regiones con más quebradas de Colombia. Además, este departamento comparte con Huila, Nariño, Putumayo y Tolima un área de 326.823,7 km² que corresponden al Macizo Colombiano o Nudo de Almaguer, considerado por la Unesco como una de las Reservas Mundiales de la Biosfera. El anterior inventario hídrico la muestra como una zona de gran importancia frente a la problemática de desabastecimiento de agua que hoy en día aqueja a gran parte de la población, atribuyendo un cuidado especial para el desarrollo de programas que permitan el desarrollo de actividades tendientes a su mantenimiento y protección.

La Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC y distintas entidades tanto públicas como la Universidad del Cauca, la Gobernación del Cauca, Fundación Universitaria de Popayán, entre otras, y privadas como Smurfit Cartón de Colombia, conforman la Fundación Procuenca Río Las Piedras la cual es una entidad autónoma de carácter mixto y de mejoras públicas de servicio social, sin ánimo de lucro y su jurisdicción la comprende las cuencas de abastecimiento del Acueducto y Alcantarillado de Popayán con los ríos Piedras, Molino, Pisojé, Palacé, Cauca y micro cuencas del sector urbano. Esta fundación en el contexto de desarrollo humano sostenible tiene como misión principal garantizar la autosuficiencia y disponibilidad del agua a largo plazo para Popayán.

La Fundación ha liderado distintas acciones de prevención ambiental integrando a las comunidades campesinas e indígenas del sector, siendo un referente nacional en actividades como el desarrollo de los procesos de planificación ambiental, protección de las fuentes de abastecimiento y corredores verdes de las microcuencas urbanas, educación ambiental para el uso eficiente del agua y la gestión del riesgo de desastres, además de investigaciones con el apoyo institucional.

La Corporación autónoma del Cauca (CRC) ha adelantado estudios en diferentes cuencas como la de Sambingo, desarrollando un plan de ordenamiento y manejo, usando el Modelo HEC-GeoHMS aplicado para cuencas tributarias a la corriente principal, concluyendo que los caudales son poco regulados por factores como la composición de los suelos y la escasa cobertura vegetal, estos factores influyen en la velocidad del flujo (tiempo de retardo) y juega un papel importante en la forma del hidrograma. La pendiente de las vertientes varía desde fuertes en las zonas altas de montaña a suaves en zonas de valle, además de las condiciones de relieve con pendientes altas conllevan a que gran cantidad del agua en forma de precipitación en época de invierno se convierta en escorrentía natural directa y termine alimentando la red de drenaje generando caudales significativos durante todo el año (CRC, 2006).

En el Departamento de Antioquia, en la región de Piedras Blancas, también se han realizado estudios, en este caso respecto al flujo de la escorrentía en diferentes suelos con tres tipos de coberturas vegetales, tales como, un bosque de roble y zonas plantadas de pino pátula y ciprés; donde los mejores resultados se obtuvieron en la zona cubierta por el ciprés, porque su morfología genera una menor interceptación de la precipitación por el dosel, favoreciendo mayores volúmenes de agua para generar flujos de la escorrentía (Ruiz, O. Acosta, J. Leon, J., 2005)

Este estudio permitió identificar diferentes factores que pueden llegar a afectar la escorrentía, como la morfología de las plantas o de suelos cubiertos con material orgánico en descomposición, el cual genera una película hidrofóbica que puede afectar significativamente la distribución y movimiento de la escorrentía, aumentando así el tiempo de infiltración sobre la capa de hojarasca; con el método de WDPT (Water Drop Penetration Time: tiempo de penetración de una gota en el suelo) se encontraron valores reales para las diferentes capas de material orgánico del ciprés, pátula y roble en condiciones reales, obteniendo más de 1800 segundos, 479,81 segundos y 223,78 segundos respectivamente. La capa de hojarasca tiene un papel importante en el control de la velocidad y cantidad de escorrentía, siendo la capa producida por el ciprés más pequeña y compacta que las otras dos y sumado con los poseos de repelencia al agua, todo esto favoreciendo a las condiciones de escorrentía superficial (Ruiz, O. Acosta, J. Leon, J., 2005).

3. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se realizara conforme a los puntos descritos a continuación.

3.1. GESTIÓN Y PLANEACIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO.

El impacto generado al recurso hídrico es de carácter negativo por su progresiva reducción, mientras que los fenómenos naturales como sequias e inundaciones han ido en aumento con el transcurso del tiempo y con ayuda del cambio climático (GREENPEACE, 2018).

Las cuencas hidrográficas, sus recursos naturales y habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas y sociales que les confieren características particulares, el conocimiento de éstas es importante para saber la oferta hídrica necesaria y atender los requerimientos básicos de la población y las diferentes actividades antrópicas requeridas para alcanzar una adecuada calidad de vida de las comunidades que viven cerca de las cuencas, con el fin de prever y mitigar los diferentes problemas ambientales.

Según las previsiones del cambio climático realizadas por el IDEAM, el impacto sobre el agua es de carácter negativo: reducción de los recursos hídricos y aumento de la magnitud y frecuencia de fenómenos extremos como inundaciones y sequías (IDEAM.2016.Escenarios de cambio climático).

Para el consumo humano, Popayán se abastece hídricamente con agua superficial de cuatro fuentes principales: las subcuencas Molino, Palacé, Las Piedras y Pisojé; siendo el rio Las Piedras la mayor fuente de abastecimiento del municipio, manejando un caudal promedio multianual de 2,44 m³/s y de diferentes comunidades establecidas aledañas a la cuenca del río, que dentro de sus actividades para el sostenimiento tienen la agricultura, piscicultura y ganadería extensiva. Actualmente actores sociales de la Cuenca desarrollan sistemas de planificación ambiental que permiten disminuir los conflictos por uso del suelo y mejorar las condiciones de regulación hídrica de la Subcuenca (Acueducto y alcantarillado de Popayán.2015. Cuenca Piedras).

Por tanto, es importante conocer e identificar el aporte hídrico de la cuenca del rio Las Piedras por medio de escorrentía superficial y más aún, contar con un complemento matemático como la relación precipitación-escorrentía, debido a la escasa información que se tiene del comportamiento de estas relaciones en nuestro país y cuyos resultados pueden ayudar a estudios futuros para el análisis de caudales críticos y apoyar la proyección de la gestión y planificación de recursos para el mantenimiento hídrico de esta cuenca.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia presenta una precipitación anual de aproximadamente 3.000 mm, esta cantidad de agua es suficiente para generar una escorrentía considerable la cual abastece los diferentes ríos, quebradas y demás tipos de abastecimientos. La oferta hídrica generada es de 58 Lts/seg por km² y al comparar esta cifra a nivel mundial, se tiene que Colombia sextuplica la cantidad de agua promedio y triplica la cantidad de Latinoamérica (RAMÍREZ. R., 2003)

También tiene una abundancia significativa de recursos hídricos, la precipitación media anual es de 3.000 mm, la cual genera un caudal superficial de 58 l/s/km², es decir 59.000 m³/hab/año y accesible anual 12.000 m³/hab/año, para el año 2010 la demanda de este recurso fue de 7.503 millones de m³. (IDEAM).

Desde hace más de un siglo con la intensificación de la tala de bosques en nuestro país, se han ido perdiendo gran variedad de recursos naturales, en el 2016 el país Colombia borró de su territorio 178.597 hectáreas de bosque, lo que en términos gráficos es como perder un departamento como el Quindío anualmente y cada hora se pierden 20 hectáreas de bosque (IDEAM, 2017). Pero el principal factor es la destrucción de nacimientos de agua los cuales se han quedado sin protección arbórea riparia, generando una mayor entrada de rayos solares a las fuentes hídricas y por consiguiente aumentando la evaporación, pérdida de humedad en el ambiente y en el suelo, originando disminución de los niveles del agua en los nacimientos y fuentes aledañas que abastecen los ríos, cuencas y quebradas.

Con el cambio climático y las acciones antrópicas se vienen presentando una serie de variaciones en el clima generando nuevos ciclos hídricos, formando grandes precipitaciones, temperaturas extremas y numerosos fenómenos meteorológicos extraordinarios, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en su informe del estado del clima mundial periodo 2001-2010 (OMM, 2010).

Como en todo proceso de vida, las cuencas tienen ciclos, los cuales se generan por las condiciones ambientales donde la cuenca disminuye su caudal en épocas de verano y se reabastece en invierno con el aumento de las precipitaciones.

Con el estudio de las ecuaciones empíricas para escorrentía de flujo superficial de Turc y Grunsky en la cuenca del río Las Piedras ya que estos modelos de precipitación-escorrentía estudiados son de rápida y fácil aplicación, para dar su uso en zonas donde no existe control, ya sea por motivos técnicos o económicos y a diferencia de otros modelos precipitación-escorrentía que existen en la literatura, no necesitan ajustarse a las condiciones particulares que presenta cada cuenca, y se observará cuál de los dos modelos se asemeja más a los datos hidrológicos presentados por el Acueducto de Popayán y así poder ver la factibilidad de su uso en escenarios futuros, además de observar el cambio que ha tenido la escorrentía en el transcurso de los últimos años y tener una mejor idea del estado de la cuenca para tomar las acciones pertinentes y evitar problemas a futuro.

HIPÓTESIS

Por los cambios significativos en el ciclo hidrológico y el aumento de la temperatura, y con ella el de evapotranspiración en las plantas, se prevé una disminución de caudales, presentándose una mayor problemática en los tiempos secos, diferente a las situaciones vividas en anteriores años, por cuanto se ha venido reduciendo la disponibilidad del agua, con decrementos de la precipitación media en la cuenca del río las Piedras en algunas estaciones.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar las formulas empíricas de Grunsky y Turc para la determinación de la escorrentía en la subcuenca del río Las Piedras en el Departamento del Cauca con respecto a los datos hidrológicos presentados por el Acueducto de Popayán.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Verificar la factibilidad de la aplicación de las ecuaciones empíricas en la cuenca del río Las Piedras.
- Estimar la escorrentía superficial para la cuenca del río Las Piedras mediante la aplicación de las metodologías empíricas seleccionadas.

5. METODOLOGÍA

El estudio se realizó comparando dos métodos directos para hallar la escorrentía, comprendidos en las formulas empíricas de Turc y Grunsky. Los parámetros morfológicos de la cuenca del rio Las Piedras fueron entregados por la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, además de basarse en la metodología propuesta por Felipe A. Sánchez (SÁNCHEZ, 2001) y Cristian D. Sandoval (SANDOVAL, 2000), y los diferentes cálculos se realizaron en .A continuación se presenta la metodología a seguir:

5.1. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA.

Se realizó una búsqueda para la obtención de información sobre conceptos asociados a la escorrentía y los modelos de precipitación-escorrentía realizados en distintos lugares, basados en los modelos de Turc y Grunsky.

5.2. RECOLECCIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.

En esta etapa se necesitaron los registros hidrológicos de la cuenca del rio Las Piedras los cuales se a solicitaron a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, documentos que contienen las precipitaciones y temperaturas de la cuenca.

5.3. TRATAMIENTO DE DATOS.

Se tomaron los datos suministrados por el Acueducto del año 1998 hasta el 2012 y se les realizo el respectivo tratamiento para complementar los datos faltantes en temperatura y precipitación, este tratamiento se realizó de la siguiente forma:

5.3.1. Temperatura

Para las proyecciones de temperatura faltantes se utilizó un gradiente dado para la región andina de Colombia está determinado no sólo por su posición intertropical, sino también por las variaciones en altura que ocurren en esta región de montañas. Es así como el régimen de temperaturas de la región andina se caracteriza por la presencia de pisos térmicos, que consisten en la disminución de la temperatura a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar. En promedio la temperatura disminuye 0.625 °C cada 100 metros de altura (Conferencias de Jorge Gonzales). Esta disminución ocasiona cambios en las condiciones ambientales a medida que se asciende y por consiguiente cambios en los ecosistemas y las formas de vida (GONZALEZ, 2008)

5.3.2. Precipitación

Para los datos de precipitación faltantes se utilizó el Método de regresión lineal, esta metodología permite hallar el valor esperado de una variable aleatoria “a” cuando

“b” toma un valor específico. La aplicación de este método implica un supuesto de linealidad cuando la demanda presenta un comportamiento creciente o decreciente, por tal razón, se hace indispensable que previo a la selección de este método exista un análisis de regresión que determine la intensidad de las relaciones entre las variables que componen el modelo.

El pronóstico de regresión lineal simple es un modelo óptimo para patrones de demanda con tendencia (creciente o decreciente), es decir, patrones que presenten una relación de linealidad entre la demanda y el tiempo.

Se recomienda para estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio, en base a datos pluviométricos consistentes de una estación cercana.

Se establece una correlación como esta:

$$Y = a + b*X1 + c*X2 + \dots + n*Xi \text{ (12.2)}$$

Dónde:

Y: valor de precipitación estimada

Xi: valor de precipitación en estaciones con información completa

a, b, c: constantes de regresión

Es más recomendable que el método de regresión Lineal, pero siempre que se cuente con estaciones cercanas y confiables, para esa simulación se tomó estaciones diferentes a Arayanales, Guillermo León Valencia y Puracé, para completar los datos, debido a que estas estaciones tienen datos completos del mes y año faltantes y tienen una cercanía considerable a cada una de las tres estaciones escogidas para este trabajo (Cardona-Gonzales.2013).

5.3.3. Polígonos de Thiessen

Inicialmente los polígonos de Thiessen fueron utilizados para el análisis de datos meteorológicos (estaciones pluviométricas), aunque en la actualidad también se aplica en estudios en los cuales hay que determinar áreas de influencia (centros hospitalarios, estaciones de bomberos, centros comerciales, control del tráfico aéreo, telefonía móvil, análisis de poblaciones de especies vegetales, etc.), además es una de las funciones de análisis básicas en los SIG.

Estos fueron así nombrados en honor al meteorólogo estadounidense Alfred H. Thiessen y son una construcción geométrica que permite construir una partición del plano euclídeo, siendo uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia.

El dominio estudiado se divide en X subregiones o zonas de influencia en torno a cada estación. La precipitación medida (o calculada) en cada pluviómetro se pondera entonces por la fracción del área total de la cuenca comprendida en cada zona de influencia. Las subregiones se determinan de manera tal que todos los puntos incluidos en esa subregión estén más cercanos al pluviómetro correspondiente que a cualquier otra estación. Una vez delimitadas las X zonas de influencia, y calculadas sus áreas (dentro de la cuenca), se obtiene el promedio espacial según:

$$P = \frac{\sum P_i * A_i}{A} \quad (10.3)$$

Dónde:

P = precipitación media sobre la cuenca

P_i = precipitación observada en la Estación i

A_i = área del polígono correspondiente a la Estación i

A = área total de la cuenca

n = número de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas con influencia en la cuenca

Para la aplicación de los polígonos de Thiessen se requiere el conocimiento de la ubicación de cada estación dentro o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación, identificando el área de influencia de cada pluviómetro y/o pluviógrafo. Así se van formando triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que éstos se corten entre sí y tratando que los triángulos sean lo más equiláteros posibles.

A partir de allí se trazan líneas bisectoras perpendiculares a todos los lados de los triángulos, las que al unirse en un punto común dentro de cada triángulo conforma una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación (Facultad de Ingeniería Departamento de Hidráulica). El área de influencia de cada estación considerada "Polígono" está comprendida exclusivamente dentro de la cuenca (Bateman, 2007).

5.4. CALCULO DE LA ESCORRENTÍA.

Con el previo análisis de homogeneidad de datos, se procederá a hacer el respectivo cálculo del caudal medio anual con las formulas empíricas de Grunsky y Turc.

5.4.1. Formula empírica de Grunsky

Grunsky considera que la precipitación sobre 1.250 m escurre toda la $D_{max} = 0.625$ m; constante que representa las pérdidas de agua por ETo para P mayor a 1.25 m (GONZALEZ, 2008)

Para $P \leq 1.250$ m

$$Esc = \frac{((0.4P^2) * S)}{31536000} \quad (10.1.1)$$

Para $P > 1.250$ m

$$Esc = \frac{((P - D_{max}) * S)}{31536000} \quad (10.1.2)$$

Donde:

Esc = Escorrentía media anual en m^3/s

P = Precipitación media anual en la cuenca en m

S = área de la cuenca en m^2

5.4.2. Formula empírica de Turc

Esta expresión se obtuvo mediante la observación de 254 cuencas de características variadas en diferentes partes del mundo (GONZALEZ, 2008):

$$Esc = P - D \quad (10.2)$$

$$D = \frac{P}{(0.9 + \left(\frac{Pm^2}{L^2}\right))^2}$$

$$L = 300 + 25Ta - 0.05Ta^3$$

Donde =

D = déficit hidrológico o evaporación.

Pm = Precipitación media en mm (anual o mensual).

Ta = temperatura media en °C (anual o mensual).

5.5. CONTRASTACIÓN DE DATOS REALES Y TEÓRICOS

El conjunto de datos de caudal medio anual presentado por la empresa de Acueducto y Alcantarillado, fue contrastado con cada uno de los caudales medios

generados para el periodo de 1998 y 2012 a partir de cada uno de los modelos precipitación-escorrentía. La comparación se hizo con respecto a tres medidas de bondad de ajuste como lo es el coeficiente de determinación, Error Estadístico de Estimación (EEE) y el test de Bland y Altman.

5.5.1. Coeficiente de Determinación (R^2)

Con este coeficiente se analizó la bondad del ajuste en términos anuales ya que expresa el porcentaje de la bondad de variación total del modelo, este coeficiente solo se aplicó con el fin de establecer el grado de ajuste de cada modelo respecto a los datos entregados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado en los periodos definidos, ya que expresa el porcentaje de la variación total del modelo.

La expresión utilizada para estimar el valor de R^2 es la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (11.1)$$

Donde:

Y = caudal real

\bar{y} = Promedio caudal real

\hat{y} = Caudales modelados

5.5.2. Error Estándar de Estimación (EEE)

Este valor señala en promedio, cuanto se desvía cada dato modelado con respecto al dato real. Su expresión es:

$$EEE = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{(n - r)}} \quad (11.2)$$

Donde:

Y = caudal real

\hat{y} = Caudales modelados

n = Numero de datos considerados

r = Numero de variables consideradas

5.5.3. Test de Bland y Altman

El test de concordancia de Bland y Altman, es un método gráfico y analítico que permite discriminar cuanto difiere un nuevo método (en este caso los modelos de

Turc y Grunsky) de otro ya establecido (caudal real), es decir, permite discriminar cuál de los modelos en estudio se aproxima más al caudal real.

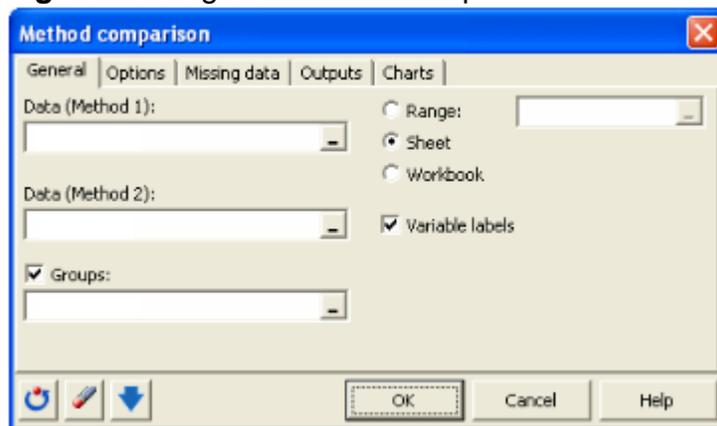
Este método se realizó con la aplicación estadística XLSTAT 2019, la cual brinda los resultados y las gráficas correspondientes.

Figura 1. Imagen de la ventana para encontrar el método de comparación.



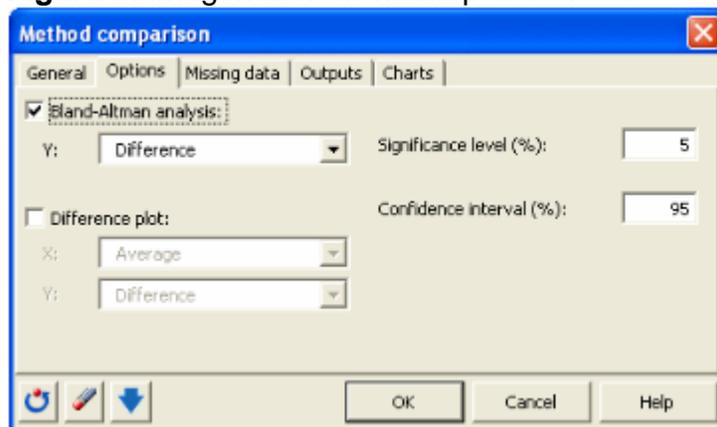
FUENTE. Manual XLSTAT.

Figura 2. Imagen de la ventana para selección de métodos.



FUENTE. Manual XLSTAT.

Figura 3. Imagen de la ventana para selección de rangos de confianza



FUENTE. Manual XLSTAT.

5.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Ya una vez obtenidos los resultados, se analizó el comportamiento de los diferentes modelos de estudio en el periodo establecido y así poder observar cual está más próximo al caudal observado.

Los fundamentos estadísticos en los cuales se basó este estudio para elegir el modelo más adecuado son:

- Mayor Coeficiente de Determinación (R^2).
- Menor valor de Error Estándar de Estimación (EEE).
- Menor valor de las diferencias promedios (Bland y Altman)
- Menor desviación estándar (Bland y Altman)
- Menor coeficiente p

Por último, todos los resultados fueron analizados y comparados.

5.7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones de este trabajo fueron realizadas con forme a los objetivos planteados, y más aún, de que este estudio sirva de modelo para futuros trabajos ligados a la misma línea hidrológica.

6. MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los términos relacionados con la hidrología, presentados en el documento.

Ciclo hidrológico (o del agua) Describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra, el agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años en donde el sol dirige el ciclo, calentando el agua de los océanos convirtiéndose en vapor de agua, después esta se condensa generando la **precipitación**, la cual es cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra y esta ocurre cuando la atmósfera (que es una gran solución gaseosa) se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución (es decir, precipita). Al caer la lluvia sobre una zona natural, esta genera dos tipos de **escorrentía**; la **escorrentía superficial** son los flujos del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua. A la escorrentía que ocurre en la superficie antes de alcanzar un canal se le llama fuente no puntual y la **escorrentía subterránea** que es el agua que desciende por gravedad – percolación y alcanza la zona saturada constituye ‘la recarga de agua subterránea. El agua subterránea puede volver a la atmósfera por **evapotranspiración** cuando el nivel saturado queda próximo a la superficie del terreno, donde la **evapotranspiración** es el proceso por el cual el agua pasa de fase líquida a fase de vapor, desde la superficie de la atmósfera, este cambio de fase requiere un aporte de energía, proporcionado fundamentalmente por la radiación solar y, en menor grado, por el aire que circunda la superficie evaporable.

Con el continuo crecimiento poblacional y el **cambio climático**, es decir, la modificación del clima que ha tenido lugar respecto de su historial a escala regional y global y se trata de cambios de orden natural, pero actualmente, se los encuentra asociados con el impacto humano sobre el planeta, estas modificaciones climáticas han generado un cambio en la **Oferta hídrica** y esta es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Por esta razón diferentes instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (**IDEAM**) el cual es una entidad del gobierno de Colombia dependiente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y se encarga del manejo de la información científica, hidrológica, meteorológica y todo lo relacionado con del medio ambiente en Colombia, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (**IPCC**) que es una organización internacional, constituido a petición de los gobiernos miembros y su misión es proveer con evaluaciones científicas comprensivas sobre la información científica, técnica y socioeconómica actual sobre el riesgo de cambio climático provocado por la actividad humana, sus potenciales consecuencias medioambientales y

socioeconómicas, y las posibles opciones para adaptarse a esas consecuencias o mitigar sus efectos y la **Fundación Procuenca Río Las Piedras**, que es entidad autónoma de carácter mixto y de mejoras públicas de servicio social, sin ánimo de lucro cuyo domicilio es la ciudad de Popayán y su jurisdicción comprende las cuencas de abastecimiento del Acueducto y Alcantarillado de Popayán con los ríos Piedras, Molino, Pisojé, Palacé, Cauca y micro cuencas del sector urbano, las cuales recolectan datos como precipitación, radiación solar, temperatura, velocidad y dirección del viento, etc. de las diferentes estaciones en distintas partes Colombia, como las estaciones pluviométricas (**pm**) encontradas en la cuenca del río Las Piedras.

7. ESTADO DEL ARTE

En esta investigación se tienen en cuenta estudios donde se realizaron análisis similares de escorrentía en cuencas; principalmente se toman los siguientes estudios:

7.1. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DE SIETE MODELOS PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA (BUDYKO, COUTAGNE, GRUNSKY, PEÑUELAS, PIZARRO, TURC-PIKE), EN LA CUENCA DEL RIO MALLECO, IX REGIÓN.

El estudio lo llevo a cabo un estudiante la Universidad de Talca con el fin de ampliar el conocimiento de algunos modelos matemáticos para la representación de la relación entre precipitación-escorrentía en la cuenca del Rio Malleco, IX región de los 7 modelos indirectos propuestos por Budyko, Turc Pike y Pizarro y los directos Coutagne, Grunsky, Peñuelas Turc, y poder examinar la factibilidad de los mismos, que debido a la falta de datos hidrológicos en la región, los estudios son muy pocos.

Concluyendo que ningún modelo debe ser usado a escala mensual, ya que hay una variación bastante marcada entre un mes y otro y que estos modelos no con buenas herramientas para predecir en dicha escala de tiempo. El mejor modelo indirecto fue el de Pizarro el cual se acercó más a la realidad aunque no hubo diferencias muy marcadas entre estos modelos, salvo en el Coeficiente de Determinación (R^2) y Error Estándar de Estimación (EEE), y el mejor modelo directo fue el de Coutagne el cual entrego los mejores resultados en todas las pruebas analizadas en este estudio ya que los demás modelos sobrestiman el caudal constantemente.

7.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA DE GRUNSKY, PEÑUELAS, COUTAGNE, EN LA CUENCA DEL RIO ACHIBUENO Y EN LA CUENCA DEL RIO PURAPEL, VII REGIÓN.

Realizado por un estudiante de la Universidad de Talca con el objetivo de aportar conocimiento de la relación precipitación-escorrentía de Grunsky, Peñuelas, Coutagne y Turc, además de la estimación de caudales medios anuales por medio de dichos modelos para la adecuada conversión de la precipitación en escorrentía en la cuenca VII de la región del Maule y mediante el test de Bland y Altman, Coeficiente de Determinación (R^2) y Error Estándar de Estimación (EEE) fue posible determinar los modelos que estimaron en mejor forma el caudal medio anual para cada cuenca.

En conclusión, al igual que en el estudio anterior, los registros utilizados en el estudio fueron para escala anual y el modelo que mejor se desempeñó en la cuenca del río Achibueno fue el de Peñuelas el cual presento menores valores de error

porcentual y R^2 con respecto a los otros tres modelos. Los mejores modelos en la cuenca del río Purapel fueron el de Peñuelas y Grunsky obteniendo los valores más exactos y precisos del estudio con Coeficientes de Determinación (R^2) de 82% y 80% respectivamente, indicando que no existieron grandes diferencias con respecto a los caudales estimados.

7.3. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN BOSQUES MONTANOS NATURALES Y PLANTADOS DE PIEDRAS BLANCAS, ANTIOQUIA (COLOMBIA).

El objetivo de este trabajo fue determinar el flujo de la escorrentía superficial en parcelas convencionales cerradas de escorrentía de 10 m de largo x 2 m de ancho en el departamento de Antioquia, cuenca hidrográfica de la quebrada Piedras Blancas, con tres tipos de vegetación como bosque roble (*Quercus humboldti* Bonpl.) y zonas plantadas de pino pátula (*Pinus patula* Schltld. & Cham.) y ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.), por un periodo de 16 meses, las parcelas se dispusieron en dirección de la pendiente y fueron delimitadas por láminas de polietileno colocadas de canto en la superficie del terreno, hasta una profundidad de 10 cm con respecto al suelo mineral, quedando 15 cm sobre la superficie del terreno. En la parte inferior de cada parcela, se colectó el flujo mediante una canaleta de 3 pulgadas de diámetro que transportaba el agua hasta un tanque plástico de 250 litros de capacidad. En las parcelas de escorrentía superficial ubicadas en la cobertura de ciprés, se implementó un sistema alternativo de registro volumétrico, pues fue allí en donde se presentaron los mayores volúmenes de escorrentía superficial, adicionalmente se midió la profundidad de la capa de hojarasca en cada parcela de escorrentía superficial, la cual, en promedio, osciló entre 40 y 60 cm en roble, 35 y 40 cm en pátula y entre 5 y 10 cm en ciprés y se monitoreo la precipitación semanal por medio de pluviómetros. Con el fin de relacionar la humedad del suelo con la generación de escorrentía superficial, en cada parcela a una profundidad correspondiente a la primera capa vegetal se instalaron bloques de yeso con electrodos en acero inoxidable para registrar el contenido de humedad, empleando un lector digital de humedad del suelo (Delmhorst modelo KS-D10).

Después de las pruebas y análisis estadísticos se concluye que los menores flujos de escorrentía superficial se presentaron en bosques naturales de roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.), seguidos por bosques plantados de pino pátula (*Pinus patula* Schltld. & Cham.) y por último el de ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.), dado que en las plantaciones de coníferas (pátula y ciprés) los flujos de escorrentía superficial se relacionaron con las variables de volumen e intensidad de las lluvias, mientras que en la cobertura de roble éstos se relacionó con la variable de volumen de la precipitación, otros factores determinantes en la magnitud de los flujos de escorrentía superficial que son aquellas características inherentes de cada cobertura vegetal; las coberturas con mayor profundidad de la capa de hojarasca presentaron menores valores de escorrentía superficial (roble y pátula), mientras que en la cobertura ciprés, donde la capa de hojarasca era delgada, los flujos de

escorrentía superficial alcanzaron los mayores valores, además que el fenómeno de hidrofobicidad presentado en las plantaciones de la zona de estudio, altera el contenido de humedad, y de allí, en forma particular, su relación con los flujos de escorrentía superficial.

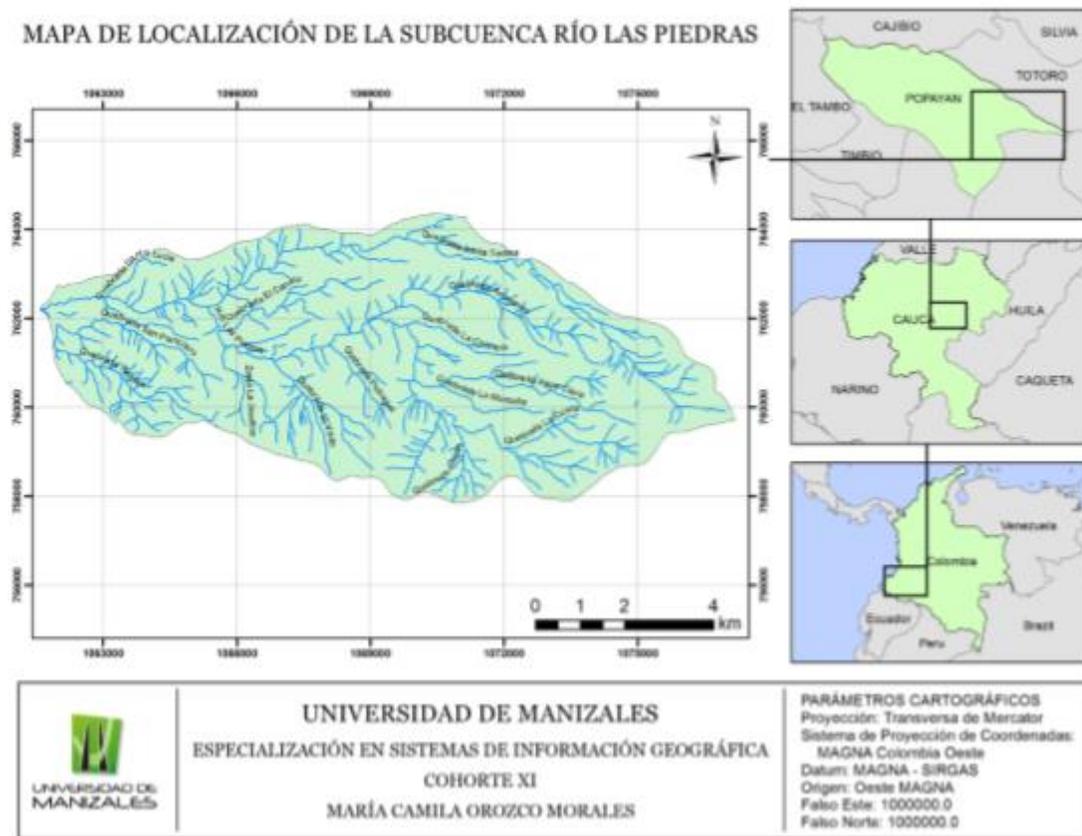
8. DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO

8.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Piedras está ubicada en el municipio de Popayán y Totoró, al nororiente de la ciudad, sobre el flanco occidental de la cordillera Central. Se encuentra a $76^{\circ} 31' 10''$ al Oeste de Greenwich y $2^{\circ} 21' 45''$ de latitud Norte, en el nacimiento del río y a $76^{\circ} 23' 45''$ longitud Oeste y $2^{\circ} 25' 40''$ de latitud Norte en la desembocadura del río Cauca.

Limita al norte con la divisoria de aguas de la cuenca del río Palacé, al sur con la divisoria de aguas del río Vinagre, al este con los cerros de Puzná y Cargachiquillo, al oeste con el río Cauca. Hace parte de la cuenca del río Cauca en el departamento del Cauca y cuenta con una extensión de 6.626 Ha (Acueducto y alcantarillado de Popayán, 2015).

Figura 4. Ubicación de la cuenca del río Las Piedras.



FUENTE. Imagen tomada del documento titulado “Cobertura y uso del suelo en la Subcuenca del río las piedras, departamento del Cauca” De la universidad de Manizales.

8.2. INFORMACIÓN BÁSICA

Los datos requeridos para este trabajo fueron suministrados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P., Fundación Rio Las Piedras y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia –IDEAM-

Tabla 1. Información básica necesaria para el estudio

INFORMACIÓN	DESCRIPCIÓN	FUENTE	FUNCIONARIO
Cartografía digital	Mapa digitalizado de la cuenca del río Las Piedras en SHP del año 2015	Acueducto y Alcantarillado de Popayán – Fundación río las Piedras	Ing. Víctor Hugo Zúñiga
Información de caudales	Datos de los caudales medios del río Las Piedras en el periodo comprendido de 1998 a 2012	Acueducto y Alcantarillado de Popayán – Fundación río las Piedras	Ing. Víctor Hugo Zúñiga
Información meteorológica de la zona	Localización e información de las estaciones meteorológicas más cercanas a/sobre la Subcuenca del río las Piedras presentes en la tabla 3 y los datos meteorológicos tales como temperatura y precipitación media.	Acueducto y Alcantarillado de Popayán – Fundación IDEAM	Ing. Víctor Hugo Zúñiga

Fuente: Acueducto y Alcantarillado de Popayán – Fundación Rio Las Piedras.

Tabla 2. Parámetros morfo métricos de la cuenca.

Subcuenca Rio Las Piedras	P (km)	Largo (Km)	Ancho (km)	A (Ha)
	37.892	15.81	6.39	6551.9

Fuente. Acueducto y Alcantarillado de Popayán

9. APLICACIÓN A LA CUENCA DE ESTUDIO

9.1. PRESELECCIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Para la preselección se analizó la información suministrada de la cuenca del río Las Piedras, donde se analizaron los datos de las diferentes estaciones climatológicas que se encuentran tanto dentro y como muy cercanas a la cuenca del rio Las Piedras, aproximadamente 15 km de cualquier punto de la cuenca, descartando las que no tengan datos históricos desde el año 1998, además aquellas estaciones que no poseen mínimo un 90% de registro de datos.

Tabla 3. Estaciones cercanas a la subcuenca del río Las Piedras.

ID	ESTACION	RED	TE	SUBCUENCA	MUNICIPIO	ELEV (m)	N	W
1	COCONUCO	IDEAM-CVC	PM	CHANGUE	PURACE	2800	750884,44	1064740,76
2	PURACE	IDEAM-CVC	PM	VINAGRE	PURACE	2630	755002,14	1068323,25
3	LOMA REDONDA	IDEAM-CVC	PM	PIEDRAS	PURACE	3305	753164,40	1079447,77
4	LAGUNA SAN RAFAEL	IDEAM-CVC	PM	BEDON	PURACE	3420	755006,55	1077592,88
5	TERMALES PILIMBALA	IDEAM-CVC	PM	VINAGRE	PURACE	2900	753069,99	1074936,51
6	POLINDARA	IDEAM-CVC	PM	PALACE	TOTORO	2470	766862,37	1074836,95
7	ARRAYANALES	ESP - POPAYAN	PM	LAS PIEDRAS	POPAYAN	2464	763297,37	1071378,28
8	SAN PEDRO	ESP - POPAYAN	PM	LAS PIEDRAS	POPAYAN	2900	761024,70	1072337,19
9	EL LAGO	ESP - POPAYAN	PM	LAS PIEDRAS	POPAYAN	2020	762248,85	1062202,39

Fuente. CRC

También se requirieron los datos de la estación del aeropuerto Guillermo León Valencia (AGLV) en la ciudad de Popayán para completar los datos faltantes de las estaciones de la subcuenca del río Las Piedras.

Tabla 4. Datos estación aeropuerto GLV

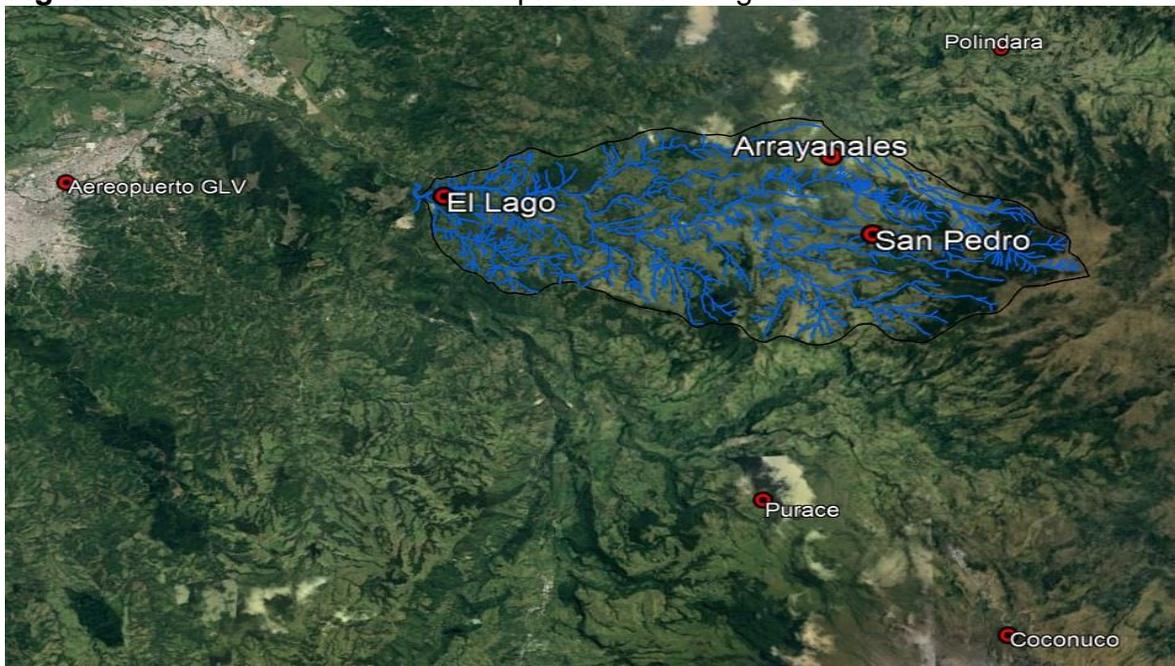
ID	ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	MUNICIPIO
1	APTO G L VALENCIA	2.0° 27.0'	76.0° 36.0'	1757	POPAYAN

FUENTE. Acueducto y Alcantarillado de Popayán

9.2. FORMACIÓN DE POLÍGONOS DE THIESSEN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL QGIS

Una vez seleccionadas las estaciones con los anteriores criterios, se procedió a convertir coordenadas geográficas en planas. Estas coordenadas se cargan a la herramienta computacional QGIS, donde se convierten de WGS84 a MAGNA Colombia oeste, con el fin de que todos los shapefile queden con el mismo tipo de coordenadas (GONZALES, 2015).

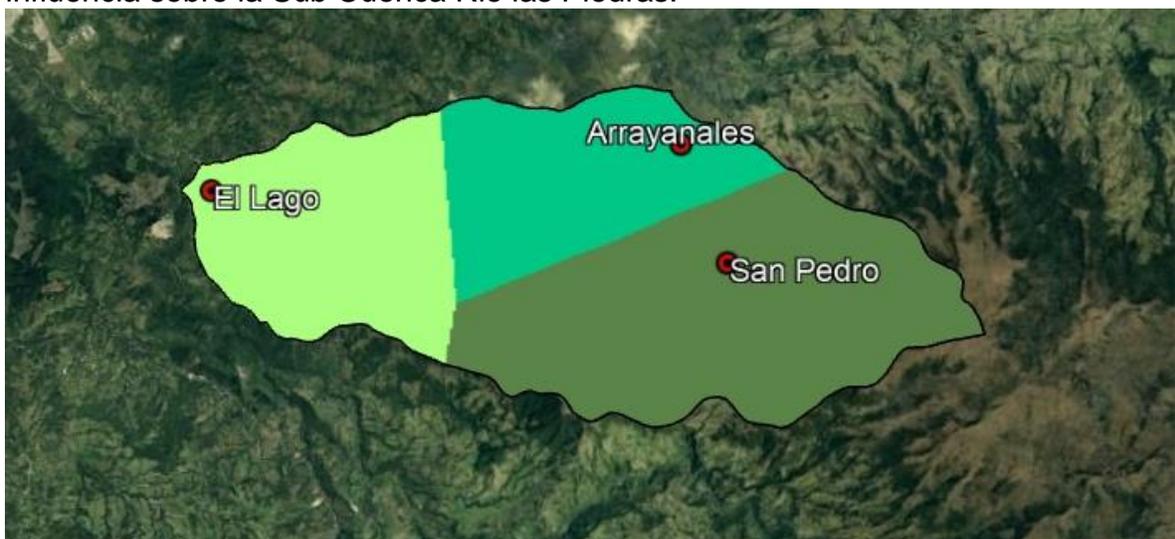
Figura 5. Estaciones cuenca rio las piedras en Google Earth



FUENTE. Propia

Dentro de las funciones de QGIS, está la herramienta para el cálculo de los polígonos Thiessen. Para este cálculo se parte de una nube de puntos sobre los que se generan una serie de polígonos. Los puntos se unen entre sí y se proyectan mediatrices entre los segmentos de unión siendo dichas mediatrices los lados de los polígonos resultantes. La principal regla que se establece en este caso es que, los lados de los polígonos generados, son equidistantes a los puntos vecinos y tratan de encontrar la menor distancia posible (GONZALES, 2015).

Figura 6. Polígonos de Thiessen proyectados para cada una de las estaciones con influencia sobre la Sub Cuenca Rio las Piedras.



FUENTE. Propia

Los polígonos de Thiessen arrojan como resultado las zonas de influencia para las estaciones disponibles dentro de la cuenca las cuales son: la estación San Pedro la cual presenta una mayor área de influencia, la estación Arrayanales y por último la estación El Lago.

9.3. TRATAMIENTO DE DATOS INCOMPLETOS

Con las estaciones ya seleccionadas, se procedió a la verificación de los datos y a se completaron los faltantes tanto de precipitación como temperatura por medio de los métodos descritos a continuación.

9.3.1. Temperatura.

Dado a que la estación del aeropuerto Guillermo León Valencia posee la mayor cantidad de datos de temperatura (anexo I), estos se utilizaron para completar los datos faltantes de la estación Arrayanales (anexo B) y hallar en su totalidad los datos de las estaciones de El Lago y San Pedro ya que estas no presentan ninguno.

Las proyecciones faltantes se hicieron con un gradiente dado para la región andina.

9.3.1.1. Estimación de datos de temperatura para la estación Arrayanales en base a la estación del AGLV

Primero se hace una diferencia de altitudes entre las estaciones del río Las Piedras y la estación del AGLV

Altitud estación Arrayanales: 2464 msnm

Altitud estación AGLV: 1757 msnm

$$2464 \text{ msnm} - 1757 \text{ msnm} = 707 \text{ msnm}$$

Posteriormente se procede a calcular el aumento de temperatura y así poder hallar los datos faltantes.

$$100 \text{ msnm} = 0.625 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$707 \text{ msnm} = X$$

$$X = \frac{0.625 \text{ }^{\circ}\text{C} * 707 \text{ msnm}}{100 \text{ msnm}}$$

$$X = 4.419 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Este valor se le resta a cada dato de la estación del AGLV correspondiente a su faltante de la estación Arrayanales, como se indica a continuación.

Tabla 5. Datos para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina, para Diciembre del año 2002.

Año	Mes	Temp. AGLV ($^{\circ}\text{C}$)
-----	-----	-----------------------------------

		Disminución Temp. (°C)		Temp. Arrayanales (°C)
2002	Dic	4,4	19,4	15,0

FUENTE. Propia

En el anexo **H** se encuentran los datos para completar la información faltante de temperatura para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina.

En el anexo **I** se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación Arrayanales por medio del gradiente para la región andina durante 1998-2012 con un reporte mensual promedio.

9.3.1.2. Estimación de datos de temperatura para la estación del AGLV en base a la estación Arrayanales.

Ya que los datos faltantes de la estación del AGLV son distintos a los de la estación Arrayanales, se usó el mismo procedimiento, es decir, se tomó la misma diferencia de temperaturas entre las estaciones (4,4 °C), pero esta vez no se le restara este valor, si no, se le sumara al valor de temperatura de la estación Arrayanales.

Tabla 6. Datos para la estación AGLV por medio del gradiente para la región andina, para Junio del año 2002.

Año	Mes	Disminución Temp. (°C)	Temp. Arrayanales (°C)	Temp. AGLV (°C)
2002	Jun	4,4	13,0	17,4

FUENTE. Propia

En el anexo **J** se encuentran los datos para completar la información faltante de temperatura para la estación Guillermo León Valencia por medio del gradiente para la región andina.

En el anexo **K** se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación Guillermo León Valencia por medio del gradiente para la región andina durante 1998-2012 con un reporte mensual promedio.

9.3.1.3. Estimación de datos de temperatura para la estación El Lago en base a la estación del AGLV

La estación El Lago se encuentra a 2020 msnm, se procede a calcular la diferencia de altitudes.

Altitud estación El Lago: 2020 msnm

Altitud estación AGLV: 1757 msnm

$$2020 \text{ msnm} - 1757 \text{ msnm} = 263 \text{ msnm}$$

Ahora se procede a calcular el aumento de temperatura.

$$100 \text{ msnm} = 0.625 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$263 \text{ msnm} = X$$

$$X = \frac{0.625 \text{ }^\circ\text{C} * 263 \text{ msnm}}{100 \text{ msnm}}$$

$$X = 1.644 \text{ }^\circ\text{C}$$

Este valor se lo restamos a la temperatura de la estación del AGLV correspondiente al dato faltante en la estación El Lago.

Tabla 7. Datos para la estación El Lago por medio del gradiente para la región andina, para Junio del año 1998.

Año	Mes	Disminución Temp. (°C)	Temp. AGLV (°C)	Temp. El Lago (°C)
1998	Ene	1.6	21.0	19.4

FUENTE. Propia

En el anexo **L** se encuentran los datos para completar la información faltante de temperatura para la estación El Lago por medio del gradiente para la región andina.

En el anexo **M** se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación El Lago por medio del gradiente para la región andina durante 1998-2012 con un reporte mensual promedio.

9.3.1.4. Estimación de datos de temperatura para la estación San Pedro en base a la estación del AGLV

La estación San Pedro se encuentra a 2900 msnm, se procede a calcular la diferencia de altitudes.

Altitud estación San Pedro: 2900msnm

Altitud estación AGLV: 1757 msnm

$$2900 \text{ msnm} - 1757 \text{ msnm} = 1143 \text{ msnm}$$

Ahora se procede a calcular el aumento de temperatura.

$$100 \text{ msnm} = 0.625 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$1143 \text{ msnm} = X$$

$$X = \frac{0.625 \text{ }^\circ\text{C} * 1143 \text{ msnm}}{100 \text{ msnm}}$$

$$X = 7.144 \text{ }^\circ\text{C}$$

Este valor se lo restamos a la temperatura de la estación del AGLV correspondiente al dato faltante en la estación San Pedro.

Tabla 8. Datos para la estación San Pedro por medio del gradiente para la región andina, para Junio del año 1998.

Año	Mes	Disminución Temp. (°C)	Temp. AGLV (°C)	Temp. El Lago (°C)
1998	Ene	7.1	21.0	13.9

FUENTE. Propia.

En el anexo **N** se encuentran los datos para completar la información faltante de temperatura para la estación San Pedro por medio del gradiente para la región andina.

En el anexo **O** se encuentran los datos completos de Temperatura para la estación San Pedro por medio del gradiente para la región andina durante 1998-2012 con un reporte mensual promedio.

9.3.2. Precipitación.

Al igual que la temperatura, hay datos de precipitación faltantes en las estaciones de la cuenca del río Las Piedras, por lo que se optó por utilizar el método de pronóstico regresión lineal.

9.3.2.1. Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación Arrayanales a partir de los datos de la estación Polindara ubicada en el municipio de Totoró y la estación El Lago ubicada en la cuenca del río Las Piedras, mediante el método de regresión lineal.

Para completar los datos de la estación Arrayanales se escogió la estación de Polindara ubicada en el municipio de Totoró la cual tiene una elevación similar a la de Arrayanales y además se encuentran a una distancia de 5.5 km por lo tanto podemos suponer que conllevan una información de circulación atmosférica similar.

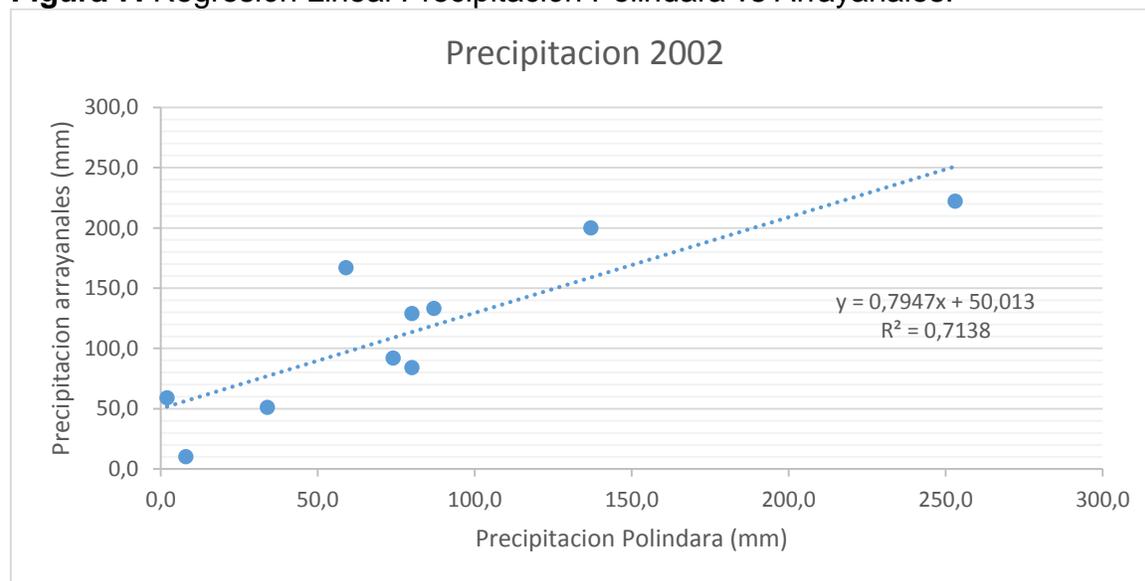
Se tomaron los datos de la estación Polindara (anexo **E**) y los datos iniciales de la estación Arrayanales (anexo **A**) del año 2002 el cual presentaba datos incompletos. Se realizó una regresión lineal con la mayoría de datos existentes y que estuvieran seguidos. Los datos de la estación Polindara se tomaron como la variable INDEPENDIENTE y los datos de la estación Arrayanales como la variable DEPENDIENTE ya que en esta se presentaba la ausencia de datos. En la siguiente tabla se observa en color verde a los valores con los cuales se realizó la gráfica y se halló la ecuación de la recta; de color gris se encuentra el dato que fue hallado mediante dicha ecuación.

Tabla 9. Regresión Lineal para estación Arrayanales con la estación Polindara en el año 2002.

Precipitación 2002		
Mes	Arrayanales (Y)	Polindara (X)
Ene	151,7	128,0
Feb	133,0	87,0
Mar	167,0	59,0
Abr	222,0	253,0
May	92,0	74,0
Jun	129,0	80,0
Jul	10,0	8,0
Ago	59,0	2,0
Sep	51,0	34,0
Oct	200,0	137,0
Nov	84,0	80,0
Dic	230,4	227,0

FUENTE. Propia

Figura 7. Regresión Lineal Precipitación Polindara vs Arrayanales.



FUENTE. Propia

A continuación, se muestra el cálculo para obtener los valores de los recuadros grises. Los dos datos son del año 2002, el primero corresponde al mes de Enero y el segundo al de Diciembre, respectivamente.

- $y = 0,7945(128,0) + 50,013 = 151,7$ (Ecu 14.3.2.1)
- $y = 0,7945(227,4) + 50,013 = 230,4$

Nota. El año 2004 no se tomó ya que presenta una ausencia del más del 80% de los datos, además no estos no presentan continuidad.

En el anexo **P** se encuentran las tablas y figuras para los años restantes, se calcularon de la misma manera que para la precipitación de la estación Arrayanales.

En el anexo **Q** se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la precipitación de la estación de arrayanales.

9.3.2.2. Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación El Lago a partir de los datos de la estación Polindara ubicada en el municipio de Totoró, Coconuco ubicada en el municipio de Coconuco y Arrayanales ubicada en la cuenca del río Las Piedras, mediante el método de regresión lineal.

Para completar los datos de la estación El Lago se escogió la estación de Polindara ubicada el municipio de Totoró la cual tiene una elevación similar a la de El Lago y además se encuentran a una distancia de 7.7 km por lo tanto podemos suponer que conllevan una información de circulación atmosférica similar.

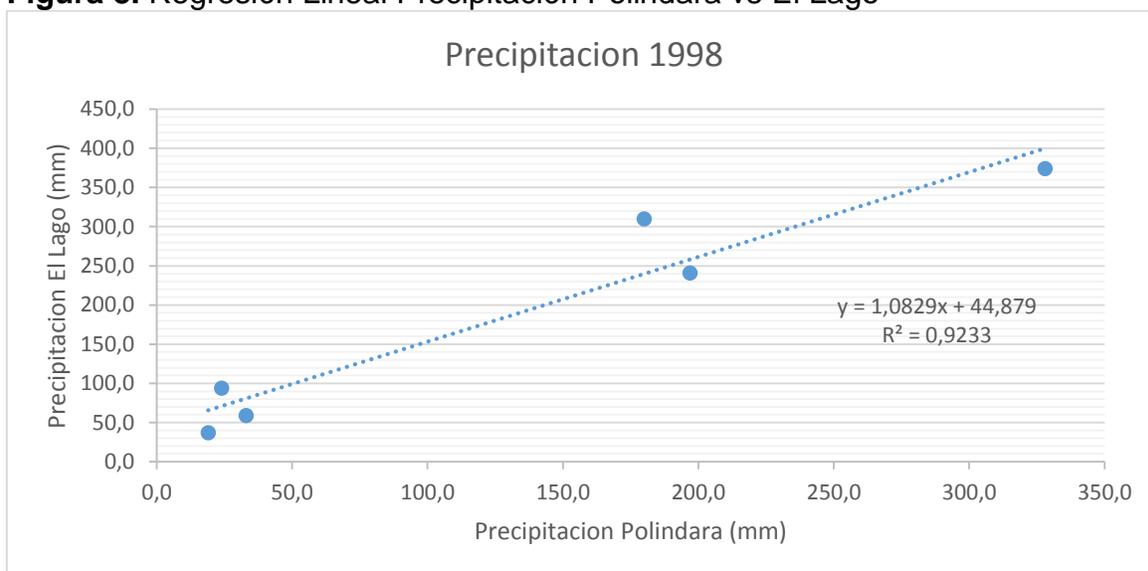
Se tomaron los datos de la estación Polindara (anexo **E**) y los datos iniciales de la estación El Lago (anexo **C**) del año 1998 el cual presentaba datos incompletos. Se realizó una regresión lineal con la mayoría de datos existentes y que estuvieran seguidos. Los datos de la estación Polindara se tomaron como la variable INDEPENDIENTE y los datos de la estación El Lago como la variable DEPENDIENTE ya que en esta se presentaba la ausencia de datos. En la siguiente tabla se observa en color verde a los valores con los cuales se realizó la gráfica y se halló la ecuación de la recta; de color gris se encuentra el dato que fue hallado mediante dicha ecuación.

Tabla 10. Regresión Lineal para estación El Lago con la estación Polindara en el año 1998.

Precipitación 1998		
Mes	El Lago (Y)	Polindara (X)
Ene	154,3	101,0
Feb	152,1	99,0
Mar	154,3	101,0
Abr	92,5	44,0
May	269,0	207,0
Jun	65,5	19,0
Jul	37,0	19,0
Ago	94,0	24,0
Sep	59,0	33,0
Oct	241,0	197,0
Nov	374,0	328,0
Dic	310,0	180,0

FUENTE. Propia

Figura 8. Regresión Lineal Precipitación Polindara vs El Lago



FUENTE. Propia

A continuación, se muestra el cálculo para obtener los valores de los recuadros grises. Los dos datos son del año 1998 y corresponden a los meses de Enero a Junio respectivamente.

1. $y = 1.0829(101.0) + 44.879 = 154.3$ (Ecu 14.3.2.2)
2. $y = 1.0829(99.0) + 44.879 = 152.1$
3. $y = 1.0829(101.0) + 44.879 = 154.3$
4. $y = 1.0829(44.0) + 44.879 = 92.5$
5. $y = 1.0829(207.0) + 44.879 = 269.0$
6. $y = 1.0829(19.0) + 44.879 = 65.5$

Nota. El año 2004 no se tomó ya que solo presenta un dato, por lo cual no se podría hacer una regresión.

En el anexo **R** se encuentran las tablas y figuras completa, para los años restantes que se calcularon de la misma manera que para la precipitación de la estación El Lago.

En el anexo **S** se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la Precipitación de la estación El Lago.

9.3.2.3. Estimación de datos faltantes de precipitación de la estación San Pedro a partir de los datos de la estación Coconuco ubicada en el municipio de Coconuco y Arrayanales ubicada en la cuenca del río Las Piedras, mediante el método de regresión lineal.

Para completar los datos de la estación San Pedro se escogió la estación de Coconuco ubicada el municipio de Coconuco la cual tiene una elevación similar a la

de Arrayanales y además se encuentran a una distancia de 9.2 km por lo tanto podemos suponer que conllevan una información de circulación atmosférica similar.

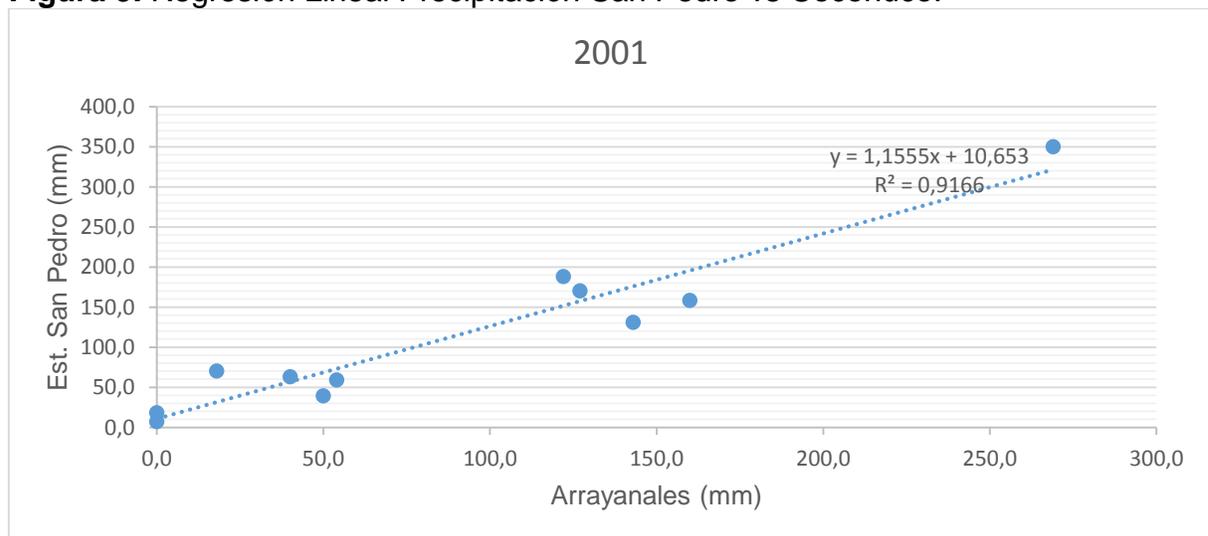
Se tomaron los datos de la estación Coconuco (anexo F) y los datos iniciales de la estación San Pedro del año 2001 el cual presentaba datos incompletos. Se realizó una regresión lineal con la mayoría de datos existentes y que estuvieran seguidos. Los datos de la estación Coconuco se tomaron como la variable INDEPENDIENTE y los datos de la estación San Pedro como la variable DEPENDIENTE ya que en esta se presentaba la ausencia de datos. En la siguiente tabla se observa en color verde a los valores con los cuales se realizó la gráfica y se halló la ecuación de la recta; de color gris se encuentra el dato que fue hallado mediante dicha ecuación.

Tabla 11. Regresión Lineal para estación San Pedro con la estación Coconuco en el año 2001.

Precipitación 2001		
Mes	San P. (Y)	Arrayanales (X)
Ene	170,0	127,0
Feb	131,0	143,0
Mar	188,0	122,0
Abr	63,0	40,0
May	59,0	54,0
Jun	70,0	18,0
Jul	18,0	0,0
Ago	7,0	0,0
Sep	39,0	50,0
Oct	158,0	160,0
Nov	350,0	269,0
Dic	283,4	236,0

FUENTE. Propia

Figura 9. Regresión Lineal Precipitación San Pedro vs Coconuco.



FUENTE. Propia

A continuación, se muestra el cálculo para obtener los valores de los recuadros grises. El dato corresponde al mes de Diciembre del 2001

$$1. \quad y = 0.9986(137.7) + 21.418 = 158.9 \text{ (Ecu 14.3.2.3)}$$

Nota. El año 2004 no se tomó ya que solo presenta un dato, por lo cual no se podría hacer una regresión.

En el anexo **T** se encuentran las tablas y figuras completa, para los años restantes que se calcularon de la misma manera que para la Precipitación de la estación San Pedro.

En el anexo **U** se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la Precipitación de la estación de San Pedro.

9.4. APLICAR FORMULA DE POLIGONOS DE THIESSEN

Es necesario conocer la precipitación y temperatura media en toda la cuenca y no en puntos determinados, como lo es la información de las estaciones en la cuenca, para ello se halla la precipitación y temperatura media areal mensual.

Para conocer esta precipitación y temperatura (precipitación areal y temperatura areal) disponemos de una serie de estaciones distribuidas por la cuenca que son únicamente una muestra de la precipitación y temperatura que recibe la cuenca (Gonzales.2015).

La fórmula de Thiessen se puede aplicar tanto para precipitación como para temperatura y con ella poder obtener los valores medios de la cuenca, teniendo en cuenta sus áreas de influencia, teniendo las siguientes áreas:

Tabla 12. Área (Ha) de influencia de cada estación sobre la cuenca, obtenidos de QGIS.

ESTACION	Área (Ha)
EL LAGO	1863,05
SAN PEDRO	3088,28
ARRAYANALES	1600,53
total	6551,86

9.4.1. Precipitación media areal

Para hallar la precipitación media areal con el método de los polígonos de Thiessen se deben unir las estaciones y medir el área de influencia de cada una y así poder calcularla por medio de la fórmula 10.3:

$$P_{areal} = \frac{\sum A_i * P_i}{\sum A_i}$$

Donde:

A_i = Área de la estación.

P_i = Precipitación (anual, mensual) media de la estación.

Para el mes de Enero del año 1998 la precipitación total de la cuenca fue:

Tabla 13. Precipitación areal para el mes de Enero de 1998

Estación	Precipitación (mm)	Área (Ha)	$A_i * P_i$
Arrayanales	68	1600,53	108836,04
El Lago	154,3	1863,05	287468,62
San Pedro	58	3088,28	179120,24
TOTAL		6551,86	575424,90

$$\therefore \sum A_i * P_i = 575335,2 \text{ mm} * \text{Ha}$$

$$P_{areal} = \frac{575335,2 \text{ mm} * \text{Ha}}{6551,86 \text{ Ha}}$$

$$P_{areal} = 87,8 \text{ mm}$$

NOTA. En el anexo **V** se encuentran las tablas de precipitación areal para los meses restantes que se calcularon de la misma.

En el anexo **W** se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la Precipitación media areal total.

9.4.2. Temperatura media areal

En este caso se usa misma fórmula pero ahora con temperatura, se hará lo mismo para el mes de Enero de 1998.

Tabla 14. Temperatura areal para el mes de Enero de 1998

Estación	Temperatura (°C)	Área (Ha)	$A_i * T_i$
Arrayanales	15,0	1600,53	24007,95
El Lago	19,4	1863,05	36061,66
San Pedro	13,9	3088,28	42791,98
TOTAL		6551,86	102861,59

$$\therefore \sum A_i * T_i = 102861,59 \text{ } ^\circ\text{C} * \text{Ha}$$

$$T_{areal} = \frac{102861,59 \text{ } ^\circ\text{C} * Ha}{6551,86 Ha}$$

$$T_{areal} = 15,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

NOTA. En el anexo **X** se encuentran las tablas de temperatura areal para los meses restantes que se calcularon de la misma forma.

En el anexo **Y** se encuentra la tabla completa, incluidos los datos estimados para la temperatura media areal total.

9.5. CÁLCULO DE APORTACIONES

Ya teniendo el valor de la precipitación y temperatura areal, se hallan las aportaciones por los dos métodos precipitación-escorrentía a estudiar para cada uno de los años.

9.5.1. Formula empírica de Turc

Para calcular el aporte por medio del modelo de Turc para un determinado año, se usara la fórmula 10.2

$$Esc = P - D$$

Lo primero es hallar el déficit hidrológico o evapotranspiración, el cual está sujeto al valor L y se calcula con la temperatura:

$$D = \frac{P}{\left(0.9 + \left(\frac{Pm^2}{L^2}\right)\right)^2}$$

$$L = 300 + 25Ta - 0.05Ta^3$$

Donde =

D = déficit hidrológico o evaporación.

Pm = Precipitación media en mm (anual o mensual).

Ta = temperatura media en °C (anual o mensual).

Para el año 1998 la escorrentía es:

$$L = 300 + 25(14,5) - 0.05(14,5)^3$$

$$L = 816,57$$

Reemplazando este valor en el déficit:

$$D = \frac{1990,9 \text{ mm}}{\left(0,9 + \left(\frac{1990,9 \text{ mm}^2}{814,93^2}\right)\right)^2}$$

$$D = 42,5 \text{ mm}$$

Y como último, hallar la escorrentía superficial para el año 1998:

$$Esc = 1990,9 - 42,5$$

$$Esc = 1948,37 \text{ mm}$$

Ya con la escorrentía se puede calcular el aporte total, convirtiendo las unidades y dividiendo sobre 31536000 segundos lo que equivalente a un año:

$$Q = \frac{6551,9 \text{ Ha} * \frac{10^4 \text{ m}^2}{1 \text{ Ha}} * 1948,37 \text{ mm} * \frac{10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ mm}}}{31536000 \text{ s}}$$

$$Q = 4,05 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se hace el mismo procedimiento para los años restantes.

NOTA. En el anexo **Z** se encuentran las tablas para los meses restantes que se calcularon de la misma.

9.5.2. Formula empírica de Grunsky

Como la precipitación media anual de la cuenca en todos los años del periodo de estudio es mayor a 1,250 m, se toma la fórmula 10.1.2

$$Esc = \frac{((P - Dmax) * S)}{31536000 \text{ s}}$$

Donde:

Esc = Escorrentía media anual en m³ / s

P = Precipitación media anual en la cuenca en m

S = área de la cuenca en m²

Grunsky considera que la precipitación sobre 1,25 m escurre toda Dmax = 0,625 m, para una precipitación mayor a 1,25 m (GONZÁLEZ, 2008), siendo la escorrentía real mayor al límite en todo el periodo de estudio y teniendo un promedio de 2,08 m.

El aporte para el año 1998 es:

$$Esc = \frac{((1,991 \text{ m} - 0,625 \text{ m}) * 6551,9 \text{ Ha} * \frac{10^4 \text{ m}^2}{1 \text{ Ha}}}{31536000 \text{ s}}$$

$$Esc = 2,8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se hace el mismo procedimiento para los años restantes.

NOTA. En el anexo **AA** se encuentran las tablas para los meses restantes que se calcularon de la misma.

9.6. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R²)

El Coeficiente de Determinación es una medida estadística de la bondad del ajuste o fiabilidad en periodos anuales de los modelos de Turc y Grunsky a los datos de caudal reales.

Usando la fórmula 11.1:

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \right]$$

Donde:

y = caudal real

\bar{y} = Promedio caudal real = $2,95 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

\hat{y} = Caudales modelados

Y Siendo:

$$\sum (y - \bar{y})^2 = 9,61 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\sum (y - \hat{y}_{Grunsky})^2 = 21,03 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\sum (y - \hat{y}_{Turc})^2 = 44,81 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Obteniéndose el coeficiente de correlación para los dos modelos:

$$R^2_{Grunsky} = 1 - \left[\frac{21,03}{9,61} \right] = -1,19$$

$$R^2_{Turc} = 1 - \left[\frac{44,81}{9,61} \right] = -3,66$$

NOTA. En el anexo **AB** se encuentran las tablas para los cálculos

9.7. ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACIÓN (EEE)

Este valor indica la viabilidad de los modelos con respecto a la realidad, usando la fórmula 11.2:

$$EEE = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{(n - r)}}$$

Siendo:

$n = \text{el número de datos} = 14$

$r = \text{variables a estudiar} = 1$

$$\sum (y - \hat{y}_{\text{Grunsky}})^2 : 21,03 \frac{m^3}{s}$$

$$\sum (y - \hat{y}_{\text{Turc}})^2 : 44,81 \frac{m^3}{s}$$

Reemplazando en la fórmula se obtiene:

$$EEE_{\text{Grunsky}} = \sqrt{\frac{21,03}{(14 - 1)}} = 1,27 \frac{m^3}{s}$$

$$EEE_{\text{Turc}} = \sqrt{\frac{44,81}{(14 - 1)}} = 1,86 \frac{m^3}{s}$$

NOTA. En el anexo **AB** se encuentran las tablas para los cálculos

9.8. TEST DE BLAND Y ALTMAN

XLSTAT es un software estadístico como complemento integrado a Microsoft Excel usado para solucionar diferentes problemas estadísticos como la validación de métodos comparándolos entre sí y así poder observar la similitud o no entre los dos modelos.

Para la generación del test de Bland y Altman, se siguen los siguientes pasos:

1. Buscar el fichero con las herramientas avanzadas.
2. Seleccionar la herramienta a usar, en nuestro caso validación de métodos.
3. Seleccionar la comparación de métodos de Bland y Altman.

4. Seleccionar los datos correspondientes:
 - Método 1: Modelo real
 - Método 2: Modelo a comparar (Turc o Grunsky)

Figura 10. Fichero de Herramientas avanzadas



Figura 11. Validación de métodos

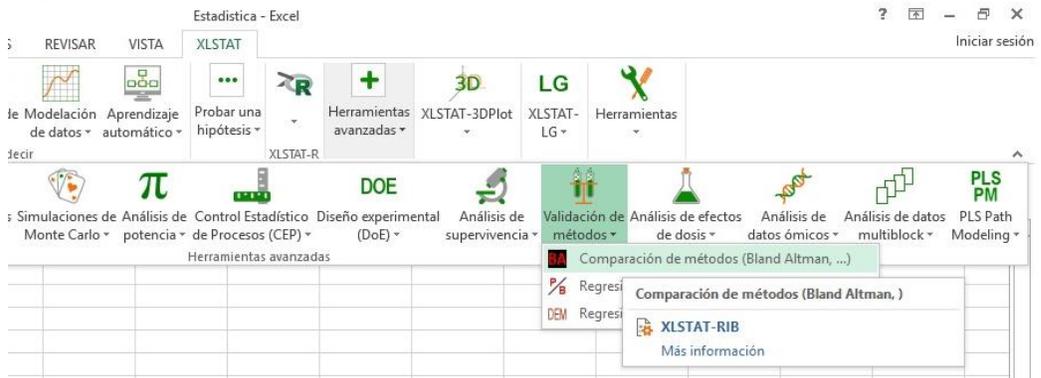


Figura 12. Bland y Altman

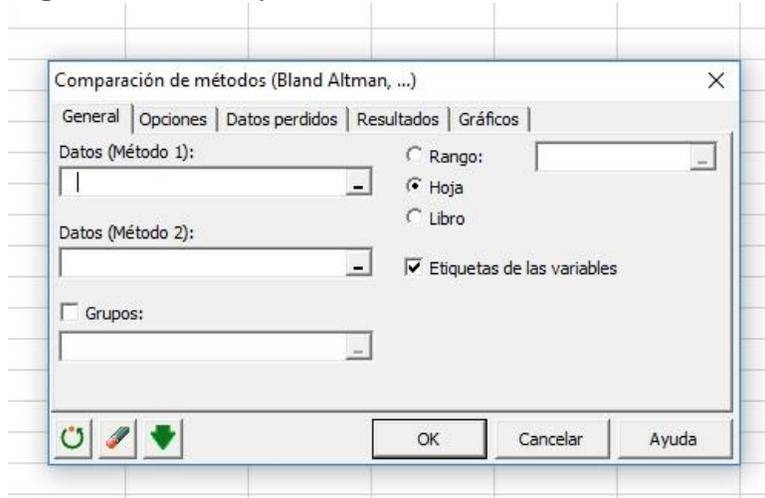


Figura 13. Modelo real

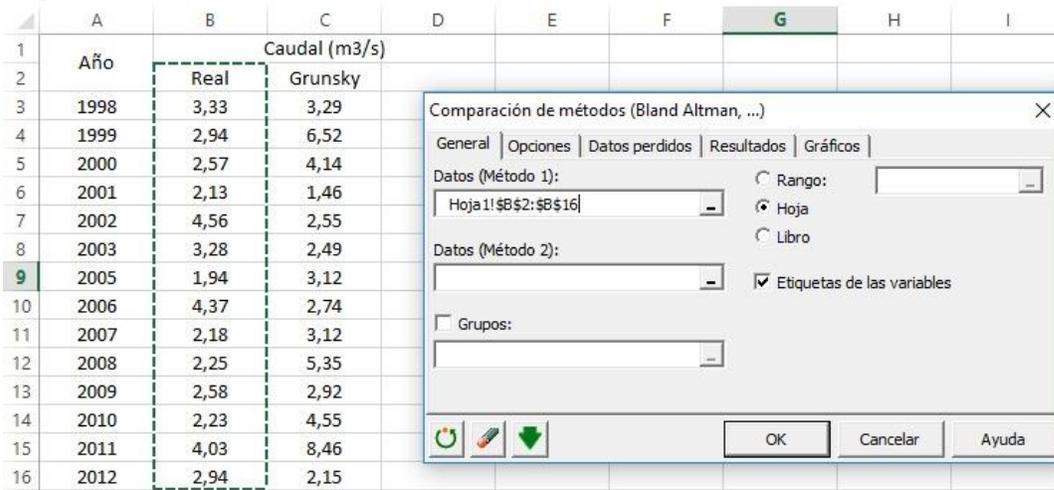


Figura 14. Grunsky.

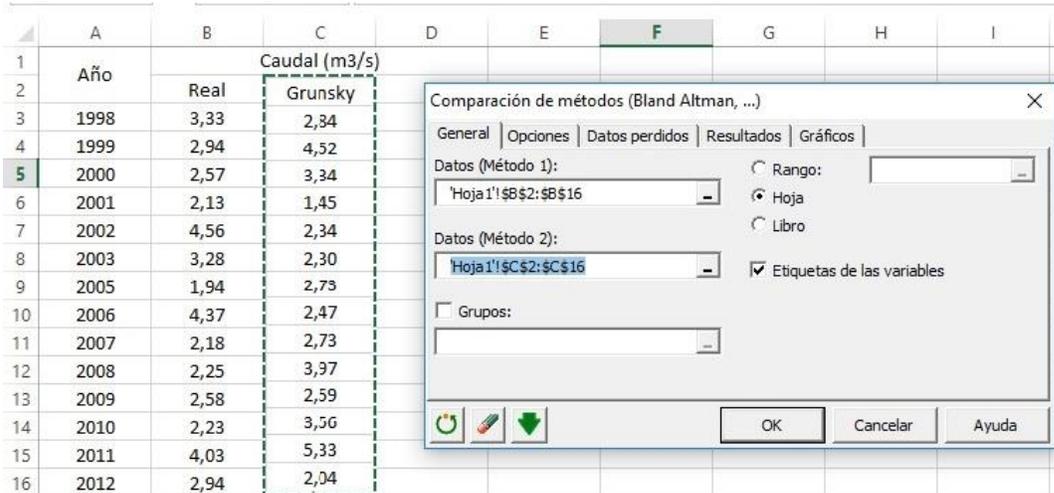
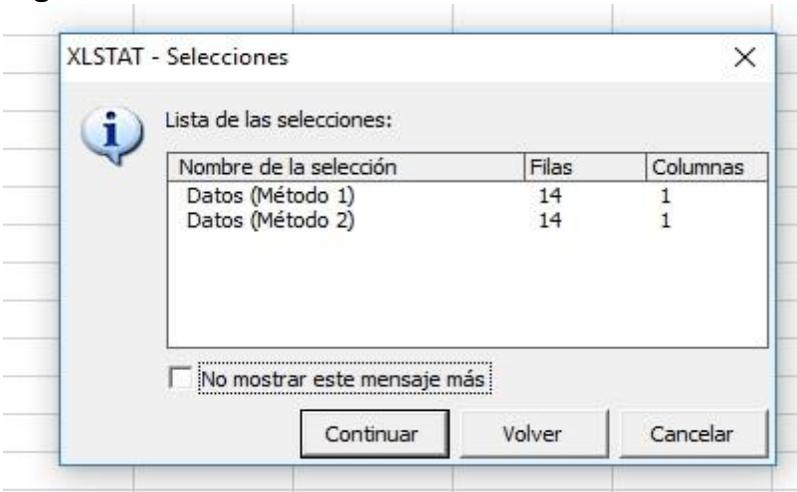
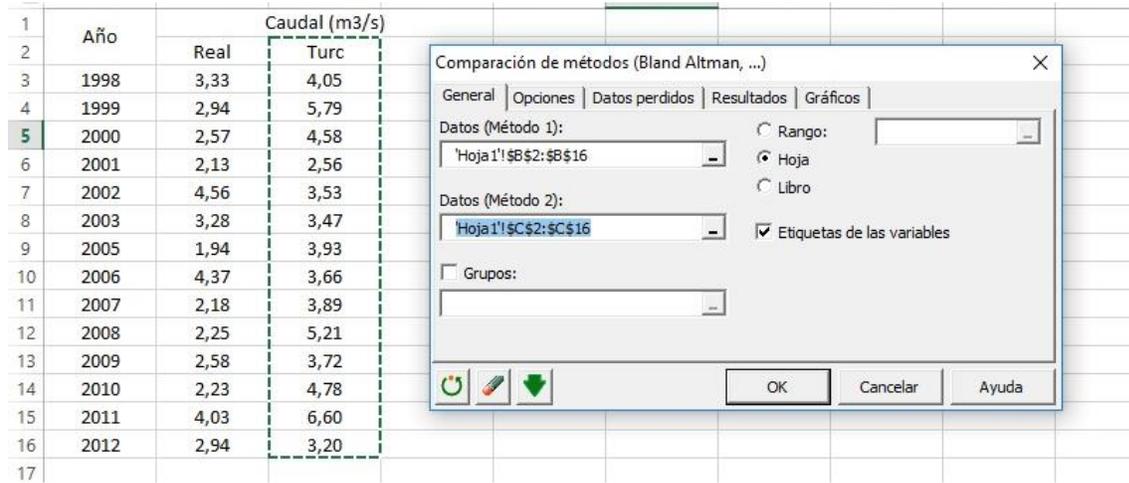


Figura 15. Lista de selecciones



De igual forma se hace para la comparación con Turc.

Figura 16. Turc

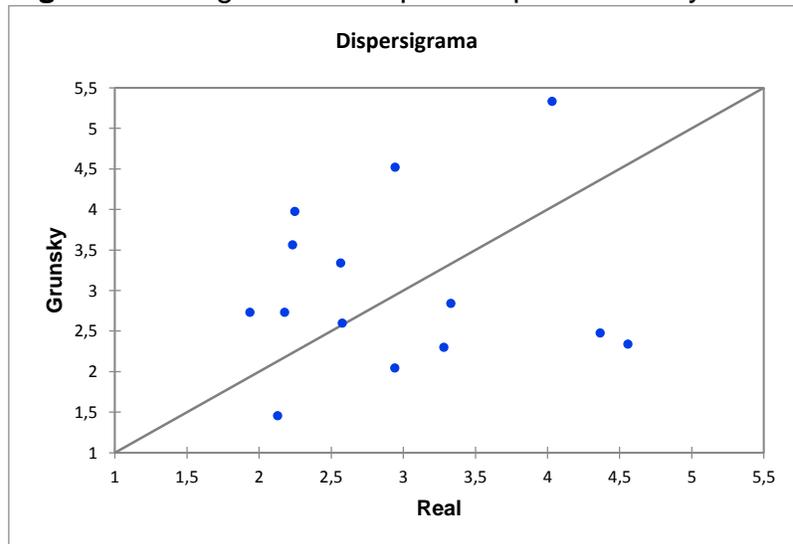


En el presente estudio de investigación se realizó esta función para las siguientes tablas y figuras de datos, las cuales fueron obtenidas por los procedimientos anteriormente expuestos.

- Prueba T-Student
- Diagrama de dispersión
- Tabla de prueba t para dos muestras relacionadas / Prueba bilateral

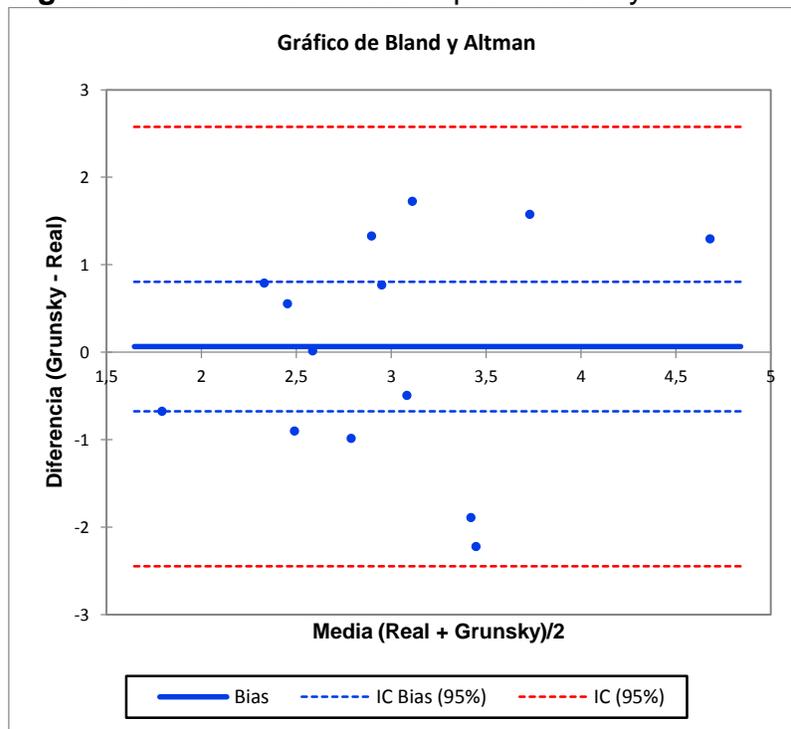
Para que haya una buena correlación entre los modelos y el valor real, en un caso ideal en que los dos métodos condujeran exactamente a los mismos resultados, los datos se ajustarían a esa línea.

Figura 17. Diagrama de dispersión para Grunsky



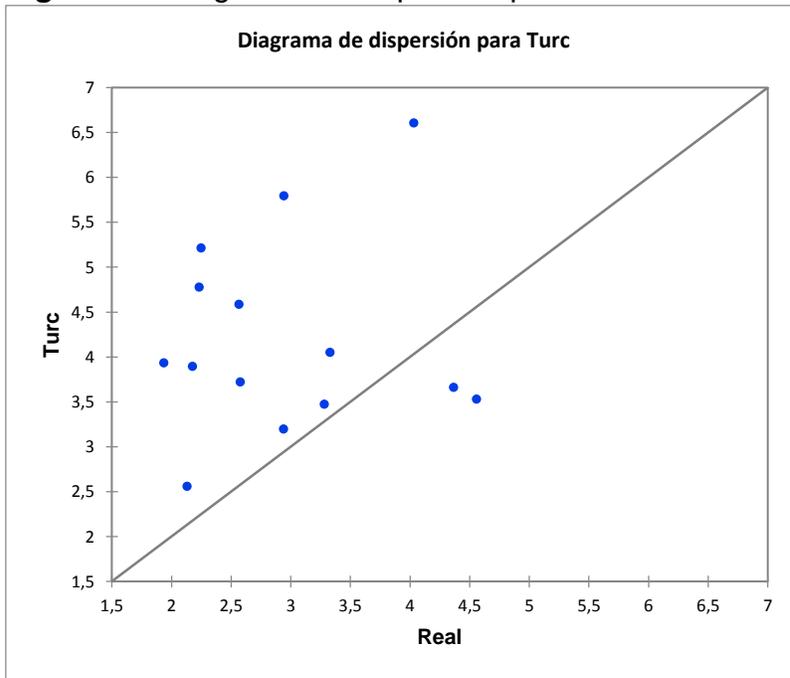
El diagrama de dispersión de Grunsky indica que hay una relación débil al no tienen una dispersión notable conforme a algún patrón entre el valor real y los valores calculados por este modelo, además de que más de la mitad de los puntos están por encima del valor real (línea de identidad) lo que indica que existe un sesgo positivo.

Figura 18. Gráfico de residuos para Grunsky



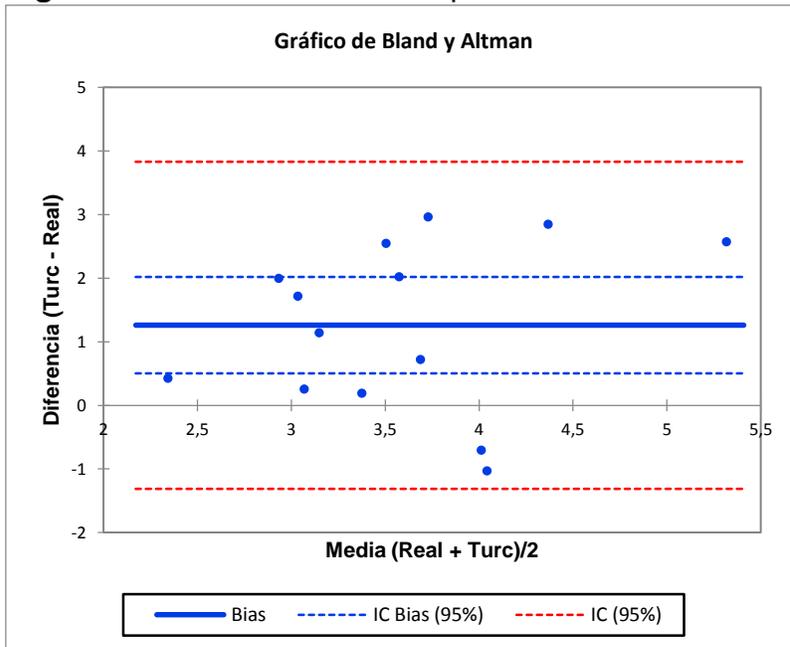
En el grafico 18 se confirma que el sesgo (línea azul) que se esperaba realmente si es positivo, siendo este de 0,063 con un intervalo de confianza al 95% (línea azul punteada) el cual es [-0,677; 0,803] el cual incluye en valor 0 lo que significa que en algún momento el valor esperado puede llegar a ser el valor real, el siguiente intervalo (línea roja punteada) es un sesgo de diferencia individual y está comprendido entre [-2,449; 2,575] e indica que cualquier diferencia entre las dos medias que tenga una distribución normal se encuentra en este intervalo.

Figura 19. Diagrama de dispersión para Turc



A diferencia del diagrama de dispersión de Grunsky, el de Turc presenta una menor correlación pero también presenta un sesgo positivo al tener la gran mayoría de los datos por encima del valor real (línea de identidad).

Figura 20. Gráfico de residuos para Turc



En este caso el sesgo (línea azul) de Turc está mucho más alejado del valor 0, lo que indica que la diferencia entre medias es mayor al del esperado al ser este de

1,260, además su intervalo de confianza [0,502; 2,017] no incluye el valor 0 lo que indica que el sesgo es positivo ya que solo se encuentra en primer cuadrante del plano cartesiano, el siguiente intervalo (línea roja punteada) [-1,311; 3,831] da un rango de confianza un poco mayor al de Grunsky, admitiendo valores más alejados al real.

El coeficiente de correlación de Pearson indica que tan similares son los métodos, entre más cerca estén del valor 0 más correlación tendrán con el valor real, XLSTAT calcula un valor de 0,186 y 0,227 para Grunsky y Turc respectivamente, lo que significa que Grunsky está mucho cerca a la realidad.

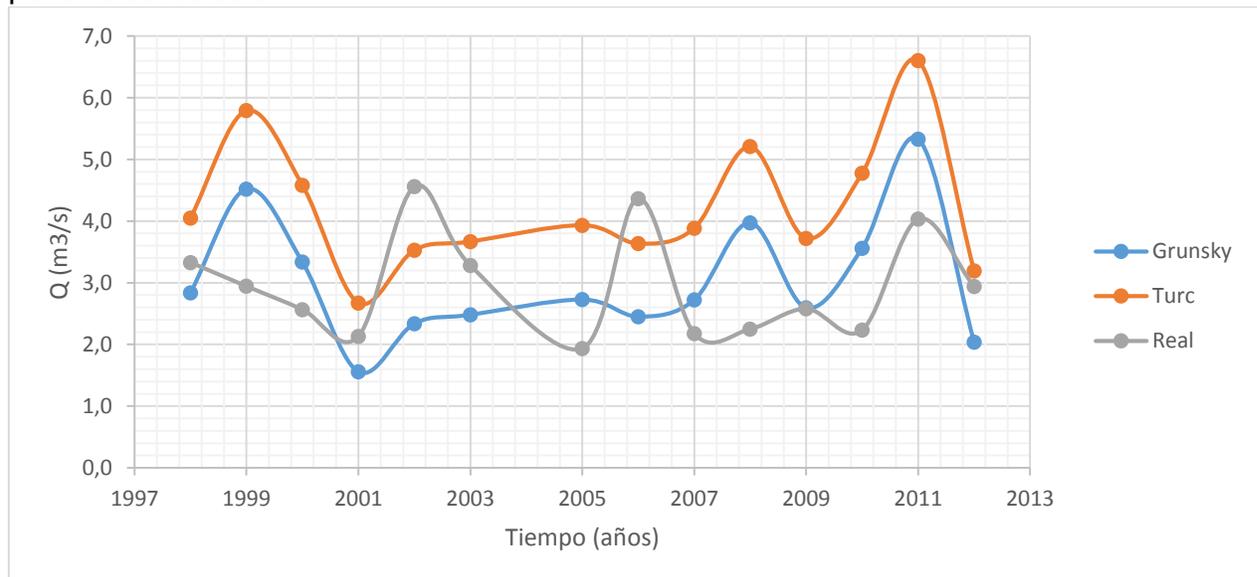
Tabla 15. Resultados prueba de Bland y Altman

	Grunsky	Turc
Valor p	0,856	0,003
Bias (Diferencia Promedio)	0,063	1,260
Error estándar	1,282	1,312
IC Bias (95%)	[-0,677 ; 0,803]	[0,502 ; 2,017]
Intervalo de confianza	[-2,449 ; 2,575]	[-1,311 ; 3,831]
Correlación Pearson	0,186	0,227

9.9. CONTRASTACIÓN GRAFICA DEL CAUDAL ESTIMADO POR LOS MODELOS EN ESTUDIO VERSUS EN CAUDAL REAL.

El siguiente gráfico describe el comportamiento de los caudales estimados por cada modelo precipitación-escorrentía con respecto al caudal medio real anual en la cuenca del río Las Piedras.

Figura 21. Caudales estimados por cada modelo en estudio y caudal real para periodo de estudio.



10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de datos del capítulo anterior se discuten a continuación en una serie de aspectos que se consideran importantes.

- En relación con la temperatura, se tomaron estaciones cercanas para el cálculo de esta ya que hay datos faltantes de estos datos en las estaciones de El Lago y San Pedro, por lo que se calcularon con respecto a la estación del aeropuerto Guillermo León Valencia de la ciudad de Popayán, lo que pudo influir en los resultados del método de Turc ya que utiliza la temperatura para hallar el caudal aportado.
- Un aspecto a destacar son los valores de caudal promedio de 3,02 m³/s y 4,21 m³/s para Grunsky y Turc respectivamente en comparación del valor real de 2,95 m³/s, ya que estos dos valores están por encima del valor esperado, esto se puede deber a que ningún modelo de precipitación-escorrentía presenta alguna relación con la vegetación además de la morfología de la cuenca lo que causaría represamiento de la escorrentía, generando pérdidas en el caudal y disminuyendo las aportaciones hídricas de la cuenca lo que limita los métodos.
- Ya que muchos datos faltantes de precipitación y temperatura fueron calculados con datos de estaciones aledañas, estos podrían estar sujetos a sesgos, afectando las estimaciones de los caudales medios anuales correspondientes.

Una vez se obtuvieron los resultados, se pudo analizar el comportamiento de cada modelo en cada periodo estudiado y así poder conocer cuál de ellos se acerca más al valor real. Los fundamentos estadísticos en los cuales se basó este estudio para elegir el modelo más adecuado son básicamente cinco:

- Mayor Coeficiente de Determinación (R^2).
- Menor valor de Error Estándar de Estimación (EEE).
- Menor valor de las diferencias promedios (Bland y Altman)
- Menor desviación estándar (Bland y Altman)
- Menor coeficiente p

Tabla 16. Resultados de los modelos

Modelo estadístico	Turc	Grunsky	Modelo a elegir
R^2	-3,66	-1,19	Grunsky
EEE	1,86	1,27	Grunsky
Diferencia promedio	1.260	0,063	Grunsky
Error estándar	1,312	1,983	Turc
Valor p	0,003	0,856	Turc

10.1. ERROR ESTÁNDAR DE ESTIMACION (EEE)

Según los resultados arrojados por este test, el mejor modelo es el de Grunsky ya que tiene un error de 1,28 m³/s en comparación con el de Turc, al cual obtuvo un

error de $1,85 \text{ m}^3/\text{s}$; esto pudo deberse a que el modelo de Turc utiliza dos variables (temperatura y precipitación) para el cálculo de la escorrentía, por lo que la temperatura no representaría de forma adecuada de los fenómenos que se desarrollan en la cuenca. Además, esto también se puede deber a los diferentes errores que conlleva el cálculo de la temperatura de una estación a otra y de la insuficiencia de muchos datos.

10.2. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)

El valor negativo se debe a que la diferencia de caudales entre el real y los diferentes modelos de Grunsky y Turc es menor, siendo este de $9,61 \text{ m}^3/\text{s}$, $21,03 \text{ m}^3/\text{s}$ y $44,81 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, donde se puede observar que los aportes generados por esos dos modelos son mucho mayor al esperado, siendo estos dos y cuatro veces mayores que la diferencia real, dejando a Grunsky como mejor opción de modelo para la cuenca, ya que este tiene un coeficiente mucho menor al de Turc siendo de $-1,19$ y $-3,66$ respectivamente, aunque este resultado deja dudas sobre el uso de Grunsky ya que este sobreestima en un 19% al caudal real.

10.3. TEST DE BLAND Y ALTMAN

De acuerdo con los resultados de este test, el modelo que más se asemeja a la realidad en la subcuenca del río Las Piedras es el de Grunsky ya que tuvo la diferencia de promedio más baja con respecto al valor real siendo esta de $0,063 \pm 0,74$, estando muy cercano del valor cero, lo que indica que se aproxima mucho al valor real, pero teniendo un pequeño sesgo sobre este valor.

Como se observa en la figura 21, se puede apreciar que hay algunos años en los que existe una diferencia importante en la estimación, como fueron los años de 1999, 2000 y 2006, donde se invierten las relaciones entre el caudal real y los modelos, es decir que mientras el caudal real aumenta, los modelos disminuyen las aportaciones, además de que la mayoría de estas están por encima de lo esperado. Esto se pudo dar por las estimaciones calculadas con respecto a otras estaciones aledañas, lo que generaría fluctuaciones en los cálculos, aumentando las diferencias entre los modelos y el valor real.

El error estándar nos indica que el mejor modelo es el de Grunsky, al presentar un menor valor (tabla 15), pero el comportamiento en los dos valores es muy similar, por lo que no se considera una herramienta para la elección del mejor modelo; ya que este valor resulto alto en comparación con el modelo de Grunsky, lo que significa que hay una alta variabilidad en las estimaciones.

En cuanto al coeficiente de correlación de Pearson, los resultados indicaron que Grunsky está más cerca de la realidad presentando un valor más cercano a cero que el de Turc, siendo este valor de $0,227$ en comparación con el de Grunsky el cual fue de $0,186$.

La prueba t para los dos métodos nos da los intervalos de confianza IC 95% de $[-0,677; 0,803]$ con una diferencia de promedios de $0,063$ y un valor de p de $0,856$ para Grunsky y un IC 95% $[0,502; 2,017]$ con una diferencia de promedios de 1.260

y un valor p 0,003 de lo que nos indica que hay una diferencia entre Turc y el valor real, siendo mayor el valor calculado por el modelo pero teniendo una mejor relación con el patrón real al ser mucho menor el valor p entre los dos modelos pero deja a Grunsky como mejor modelo para la cuenca.

Se escoge el modelo de precipitación-escorrentía de Grunsky como el modelo que más se acercó a la realidad, ya que cumple con la mayor parte de los cálculos estadísticos de esos dos modelos.

11. CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos en este estudio, las conclusiones son las siguientes:

- De acuerdo a la metodología utilizada el modelo de Grunsky fue el mejor evaluado en la cuenca del río Las Piedras, el cual obtuvo un error porcentual máximo de -76,67 y un mínimo de -0,61 con respecto al valor real (Anexo AC) con un Coeficiente de Determinación de -1,19, por lo que se puede considerar un modelo confiable, a pesar de la pequeña sobreestimación, sin embargo hay que tener en cuenta la desviación estándar la cual resulto alta para ambos modelos.
- Los modelos precipitación-escorrentía no son muy buenas herramientas para la predicción de las aportaciones ya sea en escala anual o mensual, ya que se nota una marcada variación entre los resultados en la subcuenca del río Las Piedras.
- Los mejores resultados se obtuvieron en el modelo de Grunsky el cual solo utiliza la precipitación como variable de entrada, mientras que el modelo de Turc, el cual tiene dos variables (precipitación y temperatura) para estimar las aportaciones obtuvo resultados con mayores diferencias promedio.
- Los registros usados en este estudio se consideran válidos para estimar el caudal ya que fueron obtenidos de una fuente confiable y procesados de acuerdo a los patrones establecidos, sin embargo, hubieron meses en los cuales no habían datos de temperatura como en las estaciones de San Pedro y El Lago y la falta de estos es un generador de errores posteriores en el cálculo de la escorrentía y caudales.

12. RECOMENDACIONES

- Existe la necesidad de extender las series de registros pluviométricos, pluviométricos y termométricos, para trabajar con herramientas como estos modelos precipitación-escorrentía se debe contar con una gran fuente de datos por lo menos de 30 años consecutivos, pero por la falta de estos se

recomienda iniciar una buena recolección de datos por parte de los entes pertinentes como la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, la CRC y el IDEAM, con la implementación de mantenimiento o mejora a las estaciones pluviométricas presentes en la cuenca pero no solo a nivel departamental, sino también a nivel nacional con ayuda del gobierno, para así poderle hacer un buen seguimiento a las diferentes cuencas hídricas que abastecen el país.

- Hacer futuros estudios con más datos para revalidar o refutar las conclusiones aquí mencionadas, lo cual daría un mejor respaldo a estos estudios mejorando la calidad de estos y ver la posibilidad de su uso en monitoreos o simulaciones futuras para el estudio de la cuenca del río Las Piedras.
- Se recomienda usar los modelos estudiados a escala anual, ya que son modelos de baja complejidad tanto en sus variables de entrada como en la aplicación, siendo herramientas de rápido desarrollo lo que ayuda a mejorar la gestión de los recursos hídricos.

13. CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- Auge, M. 2007. Agua fuente de vida. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias y Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas.
- BATEMAN, A., 2007. Hidrología básica y aplicada. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
- CARDONA, D, GONZALES, J., 2013. Inferencia estadística. Módulo de regresión lineal simple.
- Colombia. Corporación Autónoma Regional Del Cauca. (2006). *Plan de ordenación y manejo de la subcuenca hidrográfica del río las piedras.*
- Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.
- CUERVO, M. P., GOMEZ, C. E., OLARTE, C. P., VARGAS, N. O., MOSQUERA, I. C., DUNOYER, M., ALVAREZ. C. M., OJEDA. E. 2010. *Guía para orientación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia segunda versión.* IDEAM. Tesis de grado. Programa de ingeniería ambiental, Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad del Cauca.
- DELGADO VIVEROS. A. M., GÓMEZ FRANCO. E.A. 2017. *Efectos del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en la subcuenca del río las piedras departamento del cauca.*

- El estado del clima. (2013). Un decenio de fenómenos climatológicos extremos informe resumido. (OMM-N°1119). Suiza. Organización meteorológica Mundial (OMM).
- ESCOBAR, J. C., PRADA. J. A., CORREA. G. 2006. *Estudio del componente hidrológico para el desarrollo del “plan de ordenamiento y manejo de la subcuenca hidrográfica del río alto sambimgo”*. Fundación Mamaskato. CRC. Mercaderes. Popayán.
- Fernández, A. (11 de Diciembre de 2012). El agua: un recurso esencial. Química viva. Número 3.
- GONZÁLEZ, D., SORDO. A., GARROTE. L., IGLESIAS. A. 2011. *Evaluación de la escorrentía media anual obtenida por fórmulas climáticas y modelos regionales de clima. II Jornadas de Ingeniería del Agua Modelos Numéricos en Dinámica Fluvial*. CD-ROM Proceedings of II Jornadas de Ingeniería del Agua Modelos Numéricos en Dinámica Fluvial. Barcelona, España.
- GONZÁLEZ, L. J. 2008. *Hidrología*. Departamento de hidrología. Facultad de ingeniería civil. Universidad del Cauca. Popayán. Cauca.
- GONZÁLEZ TORO. C., (Agosto, 2009). *Manejo y control de las aguas de escorrentía para mantener la calidad del agua*. Servicio de extensión agrícola. Colegio de ciencias agrícolas. Universidad de Puerto rico.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (Ed.), 2002. Perfil del Estado de los Recursos y del Medio Ambiente en Colombia 2001. Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC. Tomo 3. Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2001. Estudio Nacional del agua. IDEAM. Bogotá, Colombia
- MARÍN VALENCIA, V. 2010. *Evaluación de la relación entre evapotranspiración potencial teórica y evapotranspiración registrada en los departamentos de Cundinamarca y valle del cauca*. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá. Colombia.
- MONFORME, G. Y CANTÚ, P.C. 2009. Escenario del agua en México. CULCyT. Recursos Hídricos.
- OROZCO MORALES, M.C. 2015. *Cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río las piedras, departamento del cauca*. Trabajo de grado. Universidad de Manizales. Facultad de ciencias e ingeniería. Programa de especialización en sistemas de información geográfica.
- RUIZ, O. A., ACOSTA, J. J., LEON, J. D. 2005. *Escorrentía superior en bosques montañosos naturales y plantados de piedras blancas, Antioquia (Colombia)*. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*. Vol.58, No.1. p.2635-2649.2005.

- SANCHEZ ARAVENA, F. A. 2001. *Análisis y evaluación comparativa de siete modelos precipitación-escorrentía (Budyko, Coutagne, Grunsky, Peñuelas, Pizarro, Turc, Turc-Pike), en la cuenca del río Malleco, IX región*. Trabajo de grado. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Talca. Chile.
- SÁNCHEZ, S. F. 1995. *Una aproximación al proceso de planificación de cuencas hidrográficas*. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Agronómica. Ibagué. Colombia.
- SANDOVAL OSSES, C. D. 2000. *Análisis comparativo de los modelos precipitación-escorrentía de, Grunsky, Peñuelas, Coutagne, y Turc, en la cuenca del río Achibueno y en la cuenca del río Purapel, VII región*. Trabajo de grado. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Talca. Chile.

13.1. REFERENCIAS DE INTERNET

- http://aquabook.agua.gob.ar/1014_0 Consultado por última vez Febrero 20 de 2018
- <https://www.infobae.com/america/mundo/2017/06/02/asi-ha-aumentado-la-temperatura-en-la-tierra-desde-1950-hasta-2017/> Consultado por última vez Febrero 23 de 2019
- NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for 2018, published online January 2019, retrieved on August 19, 2019 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201813/supplemental/page-5>.
- <http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuencia-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/> Consultado por última vez Febrero 24 de 2019
- <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/deforestacion-colombia>. Consultado ultima vez Febrero 24 de 2019
- <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-aumento-de-la-concentraci3n-de-gases-de-efecto-invernadero-alcanza-un> Consultado por última vez Febrero 24 de 2019.
- <https://www.medwave.cl/link.cgi/Medwave/Series/TyC-Estadistica/6852.act> Análisis de comparación y aplicaciones del método de Bland-Altman: ¿concordancia o correlación? Consultado por última vez Abril 26 de 2019.
- www.hrc.es/bioest/errores_8.html Concordancia de variables continuas. Consultado ultima vez Abril 26 de 2019.

- http://diccionarioempresarial.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4slAAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAASMjM0sTtbLUouLM_DxblwMDS0NDA1OQQGZapUt-ckhIQaptWmJOcSoAQ9XICzUAAAA=WKE Coeficiente de determinación. Consultado ultima vez Abril 20 de 2019.
- <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html> Coeficiente de determinación (R cuadrado). Consultado ultima vez Abril 20 de 2019.