

AUXILIAR DE INGENIERIA EN EL PROYECTO DE CONSULTORÍA “ESTUDIOS
Y DISEÑOS DE DETALLE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA
EN 48 ACUEDUCTOS RURALES INVIABLES SANITARIAMENTE Y EN RIESGO
ALTO DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ”

CARLOS EDUARDO PERDOMO PALMA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019

AUXILIAR DE INGENIERIA EN EL PROYECTO DE CONSULTORÍA “ESTUDIOS
Y DISEÑOS DE DETALLE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA
EN 48 ACUEDUCTOS RURALES INVIABLES SANITARIAMENTE Y EN RIESGO
ALTO DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ”

CARLOS EDUARDO PERDOMO PALMA

Trabajo de grado en modalidad de pasantía para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Directora. Ing. Laura Natalia Garavito Rincón
Ingeniera Civil, Magister en Ingeniería Ambiental - Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia - UPTC.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2019

DEDICATORIA

Primero a Dios y a María Auxiliadora por permitirme culminar esta etapa de mi vida; a mi hijo Nicolás Perdomo Benítez, quien es y siempre será el motor que me impulse a mejorar como persona y profesionalmente para ser su mejor ejemplo de vida; para mi ángel guardián, mi padre, Carlos Hernán Perdomo Ramos (Q.E.P.D), quien siempre ha estado a mi lado y desde el cielo me ha orientado de la mejor manera. A mi hermana, mujer llena de valores y virtudes que con sus consejos me inspiro a terminar mi carrera; de igual manera, a mi madre, Olga Lucia Palma Luna, mi bastón, que nunca dejo que cayera y cuando lo hice siempre me cobijo bajo su amor y con su inmensa sabiduría supo poner en su boca las palabras que hicieron que me levantara con más fuerza para obtener este logro; finalmente, y no menos importante a todos y cada uno de los miembros de mi familia, en cabeza de mi Abuela Rosa Tulia Luna de Palma, mujer que nos enseñó que la familia es lo primero y lo más importante.

Carlos Eduardo Perdomo Palma

AGRADECIMIENTO

Gracias a la Universidad Santo Tomás, que con sus pedagogos, me otorgaron el conocimiento, las habilidades y la formación necesaria para convertirme en un mejor ser humano y excelente Ingeniero Civil; a mi tutora y directora de proyecto, Ingeniera Laura Natalia Garavito Rincón, por su disposición, orientación y discusión crítica para lograr un buen trabajo de grado; y finalmente, a todos y cada uno de los integrantes de la empresa Ingeniería de Negocios y Construcciones S.A.S., en cabeza del Ingeniero Eduardo Contreras, quien me brindó la oportunidad de llevar a cabo mi práctica profesional, adquiriendo la experiencia y experticia para desarrollar de la mejor manera los conocimientos adquiridos a lo largo de mi formación como Ingeniero Civil.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Tunja, 5 de Febrero del 2019

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	3
1. OBJETIVOS	5
1.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. DESARROLLO	6
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DONDE SE DESARROLLÓ EL PROYECTO	6
3. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS	8
3.1 SOLICITUD DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS AL IDEAM	8
3.2 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	10
3.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS CUENCAS AFERENTES A LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO	11
3.4 ANÁLISIS DE CAUDALES	12
3.5 INFORME FINAL	17
4. APORTES DEL TRABAJO	19
4.1 COGNITIVOS	19
5. IMPACTOS DEL TRABAJO DESEMPEÑADO	25

6. CONCLUSIONES	27
7. RECOMENDACIONES	29
GLOSARIO	30
BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	34

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Acueductos beneficiados

6

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Localización de cuencas	7
Ilustración 2. Flujograma de actividades	8
Ilustración 3. Ejemplo cálculo de caudal máximo	13
Ilustración 4. Ejemplo de curva de caudales	14
Ilustración 5. Ejemplo de pruebas de ajuste	15
Ilustración 6. Ejemplo del calculo de recarga potencial de un acuífero	16

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación espacial de las estaciones utilizadas	9
Figura 2. Datos atípicos de las variables analizadas	11
Figura 3. Capacidad de abastecimiento de las fuentes hídricas	17

RESUMEN

En el presente trabajo se documentan las actividades ejecutadas como auxiliar en Ingeniería Civil en el desarrollo de los estudios hidrológicos, en el contrato de consultoría de los estudios y diseños de detalle para la construcción de la infraestructura en 48 acueductos rurales inviables sanitariamente y en riesgo alto del departamento de Boyacá; por consiguiente, las labores ejecutadas fueron: descripción general de la zona de estudio; caracterización climática en función de las variables hidrometeorológicas de precipitación y temperatura; al igual que los cálculos de los caudales máximos, medios y mínimos con el objeto de determinar la capacidad de captación que se puede realizar en cada fuente de abastecimiento. Dentro de las metodologías usadas para la caracterización hidrometeorológica y la evaluación para las fuentes de abastecimiento superficial se trabajó el método de la SCS apoyado del software Hec-Hms y el del cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante un balance hidrológico de suelos propuesto por Gunter Schosinsky, generando sus respectivos formatos GIS, hojas de cálculos dinámicas en formato XLS e informes individuales.

Palabras claves: hidrología, hidrometeorología, caudal, escorrentía, acuífero.

ABSTRACT

The present work documents the activities carried out as auxiliary in Civil Engineering in the development of the hydrological studies, in the consulting contract of the studies and detailed designs for the construction of the infrastructure in 48 rural aqueducts not sanitarily viable and in high risk of the department of Boyacá; therefore, the executed works were: general description of the study area; climatic characterisation based on hydrometeorological variables of precipitation and temperature; as well as calculations of maximum, average and minimum flows in order to determine the collection capacity that can be carried out at each supply source. Within the methodologies used for the hydrometeorological characterization and the evaluation for the sources of superficial supply the SCS method was worked supported by the Hec-Hms software and the calculation of potential recharge of aquifers by means of a hydrological balance of soils proposed by Gunter Schosinsky, generating their respective GIS formats, dynamic spreadsheets in XLS format and individual reports.

Keywords: hydrology, hydrometeorology, flow, runoff, aquifer.

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Civil, aborda diferentes áreas con bases teóricas y prácticas del diseño, dirección, planeación, construcción y mantenimiento de infraestructura para el desarrollo y bienestar de la sociedad; en consecuencia, la responsabilidad de los ingenieros es alta, debido a que de su trabajo depende la vida y seguridad de los ciudadanos, por lo que se hace necesario adaptar continuamente nuevos desarrollos tecnológicos con criterios éticos, técnicos y eficientes para preservar no solo los conceptos estéticos y estructurales, sino ambientales, y así minimizar los impactos que se pueden generar.

Dicho lo anterior, una de las ramificaciones que tiene la ingeniería civil, es la hidrología, *“ciencia que se define como el estudio del agua existente en la tierra y de su comportamiento dentro del ciclo hidrológico, así como su relación con el medio natural”*¹; debido a esto, la importancia de los estudios hidrológicos para el uso y manejo del agua disponible para el ser humano, al permitir el mejor aprovechamiento en función de la disponibilidad de cada una de las fuentes de abastecimiento, permitiendo que el diseñador hidráulico pueda proyectar las estructuras presenten y al horizonte de diseño, garantizando un suministro continuo y de calidad del recurso a cada usuario beneficiado por estas obras ingenieriles.

Por otra parte, la constructora Ingeniería de Negocios y Construcciones S.A.S., es una sociedad comercial con alta experiencia en el sector de consultorías y en la construcción; actualmente, ejecuta el proyecto es asocio con INALCON, una empresa con enfoque en consultoría y construcción de obras hidráulicas y ambientales, en especial en el ámbito de los sistemas de agua potable, saneamiento básico y planeación del

¹ La enseñanza de la hidrología, editorial de la UNESCO

recurso hídrico; de esto modo, el Consorcio Aguas de los Andes, cuenta con un excelente equipo de trabajo crítico, solidario, innovador, pragmático e interdisciplinar y contribuyendo en la educación del país, estas firmas, aceptan integrar a sus nóminas pasantes para los diferentes proyectos, ayudando a la formación íntegra y profesional de la nueva generación de Ingenieros y arquitectos, aceptando los conceptos, críticas y aportes que ellos realicen para el crecimiento de las empresas, sin olvidar, el aumento en la productividad, debido a que el estudiante se puede ocupar de una parte importante dentro de los contratos, apoyados de los profesionales de la empresa, y pueden brindar un trabajo eficiente, eficaz y de buena calidad.

Finalmente, el contenido de este documento, abordara cada uno de los aportes hechos por el pasante como auxiliar de Ingeniería Civil en el proyecto de consultoría a los estudios y diseños de detalle para la construcción de infraestructura en 48 acueductos rurales inviables sanitariamente y en riesgo alto del departamento de Boyacá, relacionando los procedimientos y cálculos del componente hidrológico, así como los estudios y resultados obtenidos para las fuentes de captación con el fin de identificar la disponibilidad del recurso hídrico para las demandas estimadas actuales y de proyección para los sistemas de acueducto beneficiados en el contrato.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el apoyo de los estudios hidrológicos en la consultoría 01 del 2018 para la Empresa Departamental de Servicios Públicos de Boyacá S.A. ESP PAP - PDA, para planificar el uso del recurso hídrico de los acueductos inviables sanitariamente y en riesgo alto del departamento de Boyacá beneficiados en el contrato.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Organizar, analizar y homogenizar los datos hidrometeorológicos de precipitación y temperatura influyentes en las zonas de estudio.
- Caracterización del comportamiento climático de las cuencas aferentes a las fuentes de captación, en función de las series históricas de las variables hidrometeorológicas de precipitación y temperatura disponibles en el IDEAM.
- Evaluación de las fuentes de abastecimiento, a partir de los aportes de agua que se generan en las cuencas, para determinar la capacidad de suministrar del recurso hídrico a la población de diseño.

2. DESARROLLO

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DONDE SE DESARROLLÓ EL PROYECTO

Con fundamento en el hallazgo en los informes del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para consumo Humano (IRCA), presentado por la Secretaría de Salud y Empresa de Servicios Públicos de Boyacá, en asocio con la Secretaría de Infraestructura Departamental a través de la Dirección de Medio Ambiente, Agua Potable y Saneamiento Básico, se adelantó la selección de los municipios y sistemas de acueducto a beneficiar con el desarrollo del proyecto, los cuales fueron:

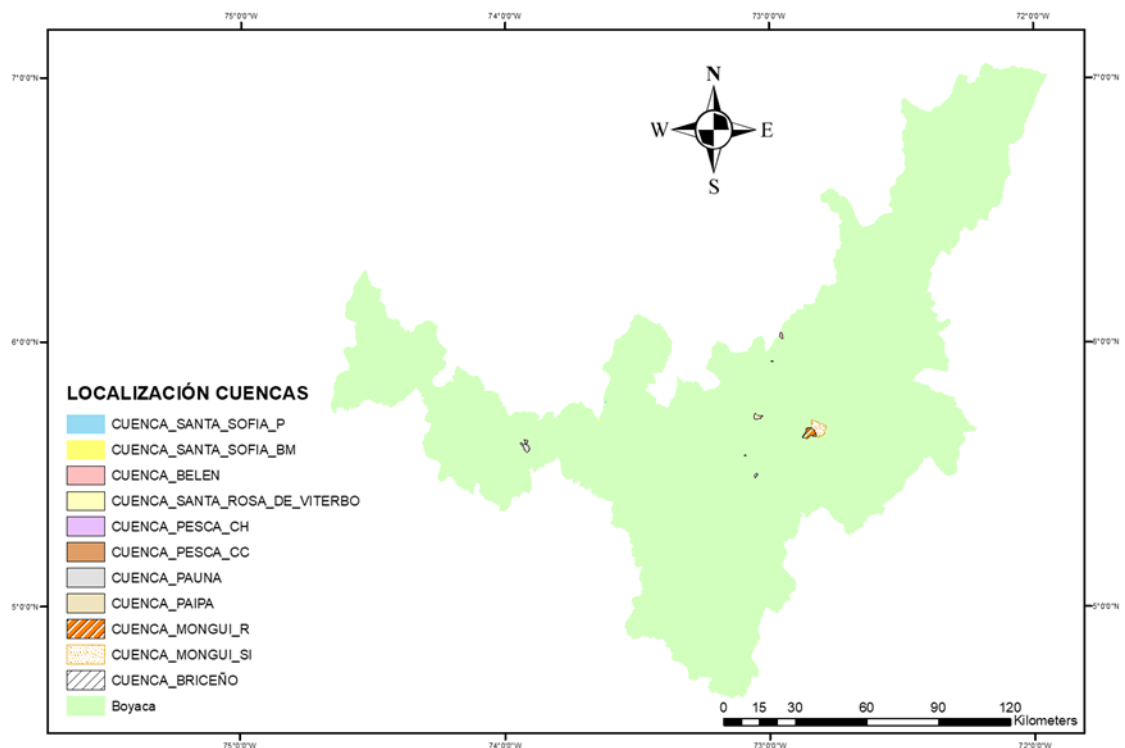
Tabla 1. Acueductos beneficiados

NÚMERO	MUNICIPIO	ACUEDUCTO
1	Briceño	Acueducto vereda Moray
2	Monguí	Acueducto vereda Tebgua, Reginaldo y San Antonio
3		Acueducto del barrio San Isidro
4		Acueducto sector Varguitas y centro
5	Pauna	Acueducto Rural y Piedra gorda
6	Pesca	Acueducto vereda Comunidad parte corazón
7		Pro-Acueducto vereda Chaviga
8		Acueducto veredas San Victorino y Donación
9	Santa Rosa de Viterbo	Acueducto vereda Portachuelo
10	Santa Sofia	Acueducto veredas Barbilla y Mané
11		Acueducto vereda Pantanillo

Fuente. Propia, Consorcio Aguas de los Andes, 2019

Los acueductos relacionados en la Tabla 1, fueron los desarrollados durante el periodo de la pasantía, apoyando las diferentes actividades destinadas a realizar los estudios hidrológicos, buscando entregar a los municipios una idea clara de la delimitación de las cuencas aferentes a sus fuentes abastecedoras del recurso hídrico (Ver Anexo 1) y del uso sostenible del mismo recurso, con el propósito de proteger los ecosistemas de vegetativos e hídricos, garantizando hacia el futuro la sostenibilidad de estas cuencas hidrográficas las cuales abastecen de agua para consumo cada uno de estos proyectos beneficiados en esta consultoría.

Ilustración 1. Localización de cuencas



Fuente. Propia, 2019

3. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Durante la pasantía de apoyo al análisis y ejecución de los estudios hidrológicos, se llevaron a cabo las siguientes actividades (Ver anexo 1):

Ilustración 2. Flujograma de actividades



Fuente. Propia, 2019

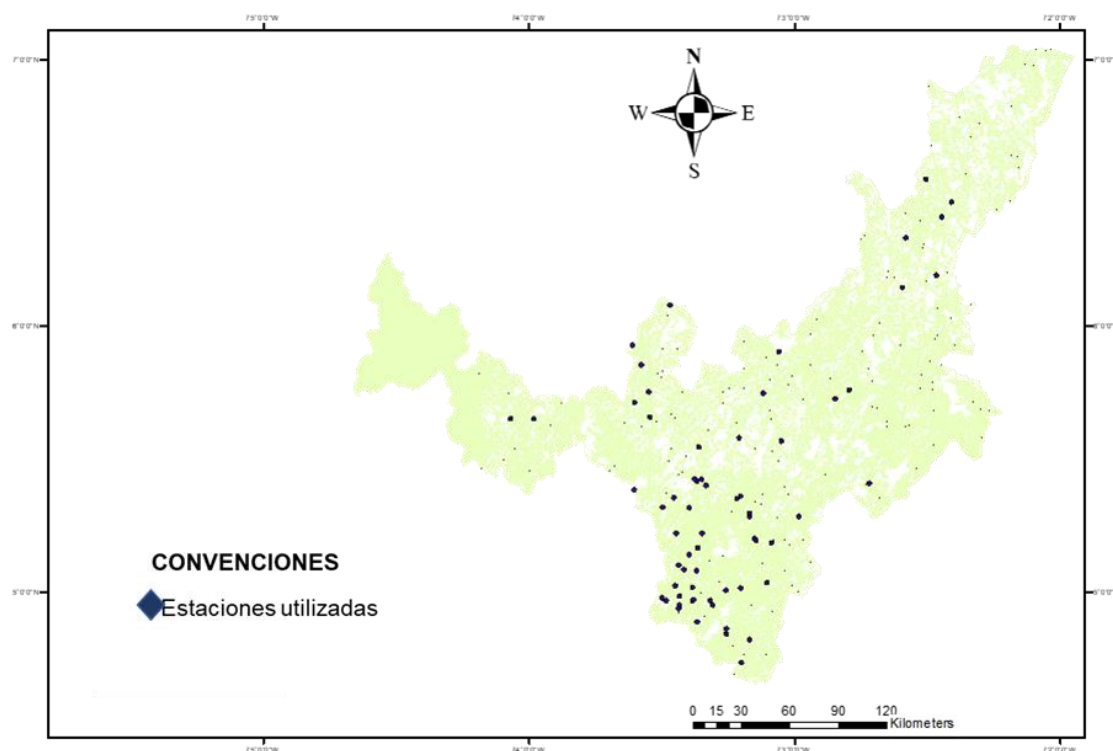
Las actividades que se hicieron en cada parte del proceso de acompañamiento en los estudios hidrológicos para el cumplimiento de los compromisos establecidos en el contrato suscrito entre la Universidad Santo Tomas y la constructora Ingeniería de Negocios y Construcciones S.A.S. se iniciaron el día Lunes 13 de Agosto del 2018 con la solicitud de información de los datos hidrometeorológicos para la caracterización climática y finalizaron con la entrega del informe final de estos estudios el 20 de Noviembre del mismo año, incluyendo procesos intermedios como el procesamiento de la información solicitada y el análisis de los caudales.

3.1 SOLICITUD DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS AL IDEAM

Según el IDEAM, se entiende como estación meteorológica, *“al equipo de medición con el que se hacen observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos en un sitio determinado, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas*

de un territorio”; de manera que, y con la ayuda de la topografía realizada, se solicitó la información de los datos hidrometeorológicos de precipitación y temperatura de setenta y cuatro (74) estaciones hidrometeorológicas como se muestra en la figura 1, por medio del correo electrónico en la página web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (Ver anexo 1), entidad encargada de los diferentes tipos de estaciones climáticas en el país.

Figura 1. Ubicación espacial de las estaciones utilizadas

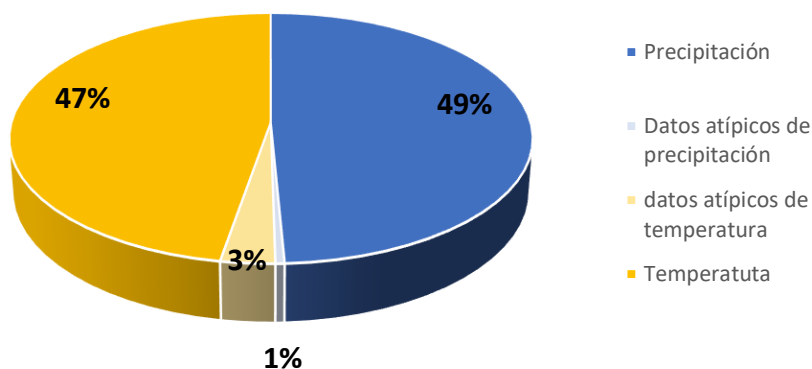


Fuente. Propia, 2019

3.2 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En comienzo se debe entender la noción del procesamiento de información, como el proceso y resultado de recolectar y almacenar un dato o una información que permita generar un cierto conocimiento que genere una guía clara de fórmulas de una manera expresa y ordenada de lo que se va a analizar; dicho lo anterior, y como las estaciones presentan datos incompletos, se utilizó el método de razón de valores normales, el cual se aplica cuando se desconoce un valor de una serie finita de datos, pero se conoce el número de su media aritmética, reemplazando el valor faltante por el estimado del promedio de los datos cuantitativos conocido. De esta manera, para realizar la caracterización climática, se obtuvo información a resolución diaria de las variables de precipitación con un total de 44.617 datos analizados , la cual se constituye en el componente principal del ciclo hidrológico, pues es en general, la principal fuente de abastecimiento de agua; y la temperatura con un total de 7.440 datos analizados, que desempeña un papel fundamental ya que altera la composición del agua generando la evaporación y la evapotranspiración en los ecosistemas (Ver anexo 2).

Figura 2. Datos atípicos de las variables analizadas



Fuente. Propia, 2019

3.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS CUENCAS AFERENTES A LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

Partiendo del conocimiento climático que tenemos, es posible observar que durante los distintos periodos geológicos han ocurrido diferentes cambios climáticos, cambios que se han agudizado en el último periodo como lo evidencia el cuarto Informe de evaluación del panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) publicado en el año 2007² y los diferentes informes del IDEAM; debido a estos cambios y a pesar que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda que para este tipo de estudios se haga un análisis de un periodo mínimo de 20 años para cada una de las variables hidrometeorológicas³, en conjunto con la interventoría, se llegó al común

² <https://www.ipcc.ch>

³ Hidrología – De la medición a la información hidrológica, Volumen I, OMM-N° 168

acuerdo de hacer el análisis de un periodo de 10 años a cada una de las medidas de precipitación y temperatura, teniendo en cuenta los fenómenos climáticos que se presentan en nuestro país como son el del niño y la niña, fenómenos que afectan directamente los ecosistemas de las diferentes regiones de Colombia.

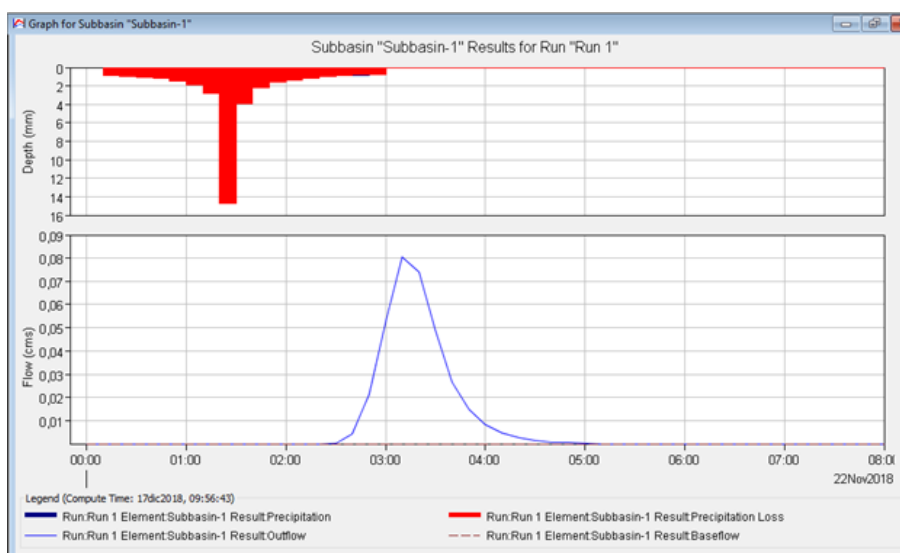
Basados en estos estudios y disponiendo del conocimiento suficientemente sustentado sobre el cambio climático que se ha presentado en la última década en el país, se hizo un análisis de las variables climatológicas de precipitación y temperatura de manera estacionaria y sin variación climática, clasificando 74 estaciones hidrometeorológicas del departamento de Boyacá que presentaran información representativa con una serie de datos como mínimo de 20 años continuos de registros a la escala de medición diaria, y se realizó el análisis estadístico a los patrones temporales de las variables mediante una descripción en formato XLS para caracterizar las cuencas aferentes a las fuentes de abastecimiento, y posteriormente, para el cálculo de cada uno de los escenarios de los caudales se analizó el componente morfométrico para comprender e interpretar la velocidad con la que van a circular las aguas sobre la superficie y el comportamiento de la cuenca ante la presencia de lluvias excepcionales (Ver anexos 2).

3.4 ANÁLISIS DE CAUDALES

Teniendo en cuenta el artículo 49 de la resolución 0330 de 2017, cuyo texto es el siguiente, *“Capacidad de la fuente donde indica que el caudal correspondiente al 95% de excedencia de la curva de duración de caudales diarios, Q95, debe ser superior al caudal máximo diario (QMD) más el caudal ecológico. Si una fuente es insuficiente deberá cumplir el requisito anterior durante algunas épocas del año, deben plantearse*

soluciones complementarias”, y en relación a las fuentes superficiales, se calcularon los caudales máximos con ayuda del software Hec-Hms, que por ser un modelo conceptual estacional, posee menos solicitudes en lo que a información de entrada respecta y permite utilizar una variedad de métodos para simular las pérdidas por infiltración entre los que se destacan el de pérdidas desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), el cual representa las hidrográficas de respuesta basado en la estimación de la precipitación efectiva o escorrentía directa en el área aportante, teniendo en cuenta el número de curva, que es una medida del potencial de escorrentía del suelo, al igual que la abstracción inicial que es la pérdida de agua por la escorrentía directa y que está definida en el Título D, 4.4.2.2, del RAS 2000 (Ver anexo 3).

Ilustración 3. Ejemplo cálculo de caudal máximo

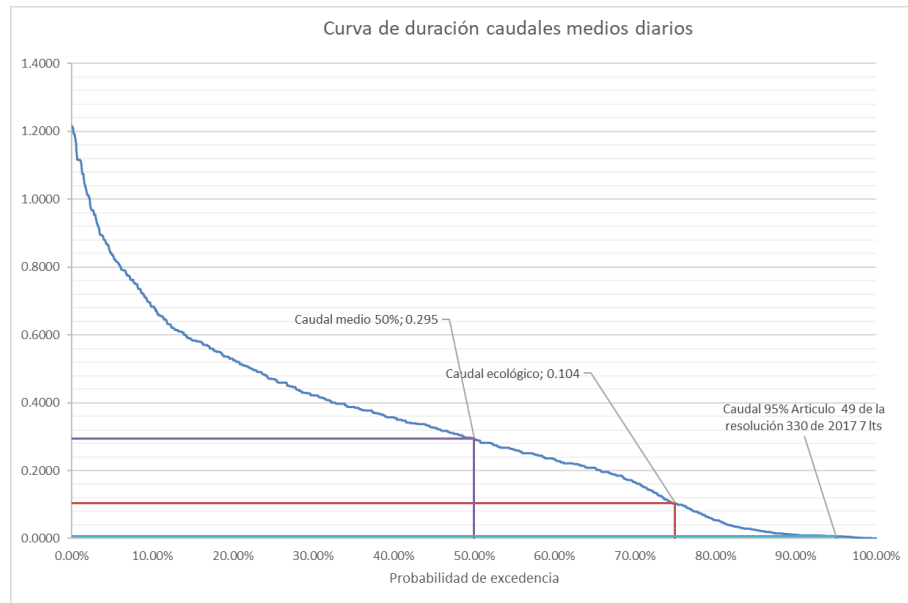


Fuente. Propia, 2019

Seguido a esto, se hizo el cálculo de los caudales medios, ecológico y de excedencia del 95%, creando una hoja dinámica en formato XLS, donde

se debe ingresar los datos de la homogenización de los datos de manera ordenada para relacionar las ecuaciones de evapotranspiración potencial desarrollada por Penman – Monteith para la zona andina de Colombia y la de la evapotranspiración real de Budyko, basada en la precipitación y la altura sobre el nivel del mar de la estación hidrometeorológica analizada, y finalmente generar una curva de duración de caudal donde se pueda ver de una manera clara estos caudales (Ver anexo 4).

Ilustración 4. Ejemplo de curva de caudales

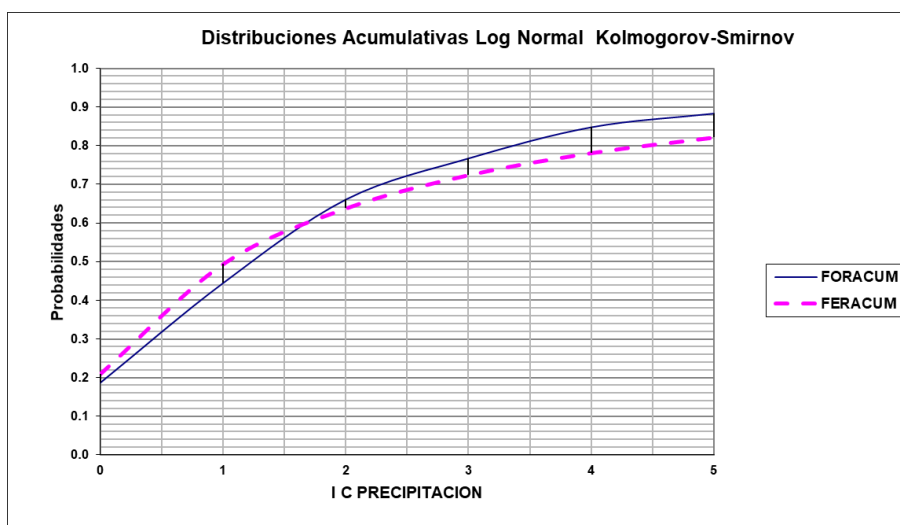


Fuente. Propia, 2019

Después de obtener estos datos, se procedió a realizar el cálculo de los caudales mínimos, implementando otra hoja dinámica en formato XLS, ingresando los datos obtenidos de la hoja dinámica anterior y por medio de la metodología del estudio “Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of

Colombia”, ser sometidos al proceso de análisis estadístico de frecuencias para diferentes modelos de distribución entre los que se destacan Gumbel, Normal y Pearson III; y finalmente, con pruebas de ajuste Kolmogorov – Smirnov y Chi - cuadrado, relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia (periodo de retorno), obteniendo la que menor error tenga de los datos analizados (Ver anexo 5).

Ilustración 5. Ejemplo de pruebas de ajuste



Fuente. Propia, 2019

Por otra parte, para para el estudio de las fuentes subterráneas se desarrolló un modelo en formato XLS siguiendo los estudios realizados por Gunther Schosinsky, con el propósito de determinar estadísticamente la recarga potencial de los acuíferos mediante un balance de suelos considerando múltiples variables, tales como: la precipitación, retención de lluvia por follaje, infiltración pluvial, escorrentía superficial,

temperatura, porcentaje de horas luz solar, la evapotranspiración, los coeficientes de humedad del suelo y la pendiente del terreno; así mismo, y teniendo en cuenta la Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambientales de acuíferos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, se encontraron las reducciones de caudales del 10% para épocas veraniegas, el caudal ecológico del 30%, los caudales disponibles en épocas de verano y los caudales con excedencia del 95% (Ver anexo 6).

Ilustración 6. Ejemplo del calculo de recarga potencial de un acuífero

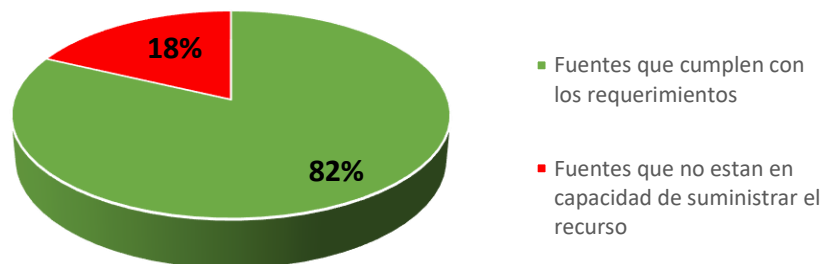
CONCEPTO	SÍMBOLO	UNIDADES	TOTAL
Precipitación	P	mm	268.980
Retención de lluvia en follaje	Ret	mm/mes	62.336
Infiltración pluvial mensual	Pi	mm/mes	190.357
Escorrentía superficial	ESC	mm/mes	16.287
Temperatura	T	°C	233.030
Porcentaje de hora luz solar	Ps	%	144.000
Evapotranspiración potencial	ETP	mm/mes	2451.941
Coeficiente humedad antes de la evapotranspiración	C1	Adimensional	7.813
Evapotranspiración potencial real, considerando C1	ETR1	mm/mes	1605.895
Coeficiente humedad después de la evapotranspiración	C2	Adimensional	0.000
Humedad disponible	HD	mm/mes	369.600
Evapotranspiración real tentativa	ETPR	mm/mes	802.948
Evapotranspiración real	ETR	mm/mes	369.600
Humedad del suelo final	Hsf	mm	252.000
Humedad del suelo inicial	Hsi	mm	252.000
Recarga potencial del acuífero	Rp	mm/mes	179.243
Déficit de capacidad de campo	DCC	mm	268.800
Necesidad de Riego	NR	mm/mes	2351.141
Recarga potencial del acuífero (m³/s)	Rp	m ³ /s	0.029
Recarga potencial del acuífero (L/s)	Rp	L/s	29.044

Fuente. Propia, 2019

Finalmente, se determinaron que fuentes de abastecimiento eran capaces de suministrar el recurso hídrico a la población actual y futura, y las que no, procediendo a recomendar la búsqueda y concesión de nuevas fuentes de abastecimiento que cumplan con todos los requisitos y puedan proveer el recurso con calidad y continuidad; de igual manera, se

entregaron los resultados a los modeladores hidráulicos para que estos simularan la situación reales que se producen en los acueductos y a los diseñadores estructurales para que estos pudieran diseñar las estructuras pertinentes conociendo los picos máximos y mínimos de cada fuente de captación.

Figura 3. Capacidad de abastecimiento de las fuentes hídricas



Fuente. Propia, 2019

3.5 INFORME FINAL

Se implementó un informe final individual, en el que se documentan los procedimientos y cálculos del componente hidrológico con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en el contrato de consultoría, ampliando toda la información climatológica y morfológica, con el fin de identificar la disponibilidad del recurso hídrico para las demandas estimadas para el cual se está realizando el análisis; de igual manera, se extiende la información sobre la metodología de análisis y cálculos necesarios para realizar estos estudios hidrológicos, aplicando el método computacional

HEC – HMS⁴ y/o el del cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante un balance hidrológico de suelos de Gunter Schosinsky; por último, se muestran los resultados obtenidos y se determina analítica y estadísticamente la viabilidad de la fuente para suministrar el recurso hídrico al acueducto que actualmente opera en el área de estudio y el de su horizonte de diseño (Ver anexo 7).

⁴ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

4. APORTES DEL TRABAJO

4.1 COGNITIVOS

4.1.1 Análisis de los caudales en las fuentes superficiales

Debido al poco tiempo de ejecución del contrato y a la poca información que presenta nuestro país con referencia a los registros de caudales en las diferentes fuentes hídricas, inicialmente, se presentó un proyecto piloto a la interventoría, para la estimación de los caudales de diseño utilizando el método racional por medio de unas hojas de cálculo en formatos XLS, las cuales calculan el caudal de aguas lluvias con base en la intensidad media de un evento de precipitación con una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje y un determinado coeficiente de escorrentía; sin embargo; por las restricciones que tiene este modelo en proporcionar solo un caudal pico, analizando las lluvias de manera uniforme en un periodo de tiempo, y tomando la escorrentía de forma proporcional a la precipitación ignorando todos los efectos de retención, y que asume todos los periodos de retorno iguales, el interventor rechazo este método.

En consecuencia, y por recomendación de la supervisión del contrato, se procedió a presentar una nueva guía con nuevas hojas dinámicas en formato XLS, utilizando la metodología de la transferencia de caudales, la cual establece que si dos cuencas son climatológica y morfológicamente similares se puede hacer una homologación de los caudales entre diferente corrientes hídricas. Este sistema refiere una homogeneidad entre los datos de precipitación, temperatura, áreas, tiempos de concentración, curva número, entre otras, para generar la intención de estimar ecuaciones de transferencia para calcular caudales

entre las fuentes hídricas que están instrumentadas y las que no; no obstante, cuando se presentó este modelo ante la ventanilla de mecanismo departamental para la evaluación y la viabilización de proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico, fue rechazado, debido a que este sistema posee una restricción importante en cuanto a la igualdad de las áreas, ya que en relacionan a la superficie de drenaje, los coeficientes de determinación en los métodos estadísticos que conllevaban a encontrar una o varias ecuaciones para el cálculo de los caudales para los sitios no medidos a partir de la información existente, presentaban una variación alta de heterogeneidad lo que producía una tendencia a que no existiese relación para las cuencas en estudio.

Por consiguiente, después de varios análisis metódicos, en conjunto con la interventoría y la ventanilla departamental, se estableció implementar el modelo de lluvia – escorrentía apoyado en el software Hec-Hms, y de esta manera establecer la importancia que tiene la demanda del agua para satisfacer las múltiples necesidades, la conservación aguas abajo después de la captación y el manejo adecuado y sustentable del recurso hídrico, pues existe una desigualdad de riqueza entre las diferentes cuencas y entre los diferentes actores sociales que están estrechamente vinculadas al acceso al agua; sin olvidar, que estos estudios hidrológicos hacen parte fundamental de este proyecto porque son los antecesores al diseño de las modelación y obras hidráulicas, debido a que se utilizan modelos matemáticos que representan el comportamiento de toda la cuenca en relación a los eventos excepcionales como inundaciones al considerar el caudal máximo y de sequías al tener presente el caudal mínimo que se puedan presentar en el punto de captación; además, que estos estudios permitieron conocer e interpretar de manera estadística el comportamiento hidrológico de los ríos, quebradas, arroyos y/o acuíferos

que aportan a las cuencas aferentes al punto de captación, fundamentales para poder establecer y evaluar la suficiencia de estas fuentes de abastecimiento con respecto a la dotación del recurso hídrico para la población actual y la del horizonte de diseño.

Dicho lo anterior, estos trabajos tienen una gran importancia al dar a conocer a todos los actores involucrados, especialmente a las autoridades ambientales que cumplen una misión muy importante al controlar el uso del recurso hídrico; por tanto, es deber de los diseñadores de los sistemas de acueducto revisar los caudales de oferta y demanda de las cuencas, especialmente en épocas de estiaje para limitar y poder abastecer a la población beneficiada sin que ello signifique un perjuicio para el medio ambiente.

Finalmente, estos estudios hidrológicos permitieron establecer el caudal ecológico de cada una de las aguas a captar, el cual permite mantener, como mínimo, la vida de la fauna y la flora que de manera natural habitan perimetralmente a estas fuentes hídricas; de este modo, en aras de la protección del medio ambiente, se establece la obligación de regular el recurso hidrológico de las diferentes cuencas en estudio, estableciendo un régimen de caudales específico para cada sistema en función de sus características particulares.

4.1.2 Análisis de los caudales en los acuíferos

Dado que el desarrollo de metodologías estadísticas para el cálculo de recarga de acuíferos en Colombia son escasas y por la premura del contrato, se tuvo que hacer una investigación exhaustiva de diferentes sistemas para la evaluación de los acuíferos que son fuentes de abastecen en los acueductos beneficiados; ya que para tomar decisiones

con certeza de la explotación de aguas subterráneas se deben realizar proyectos con objetivos específicos de hidrogeología y estudios geoelectrónicos para el reconocimiento de las aguas subterráneas y para la explotación del recurso hídrico que satisfagan las necesidades para el consumo humano.

Dentro de esta búsqueda realizada, se encontró un artículo desarrollado por Gunther Schosinsky N., para la Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, donde plantea un estudio del balance de suelos basado en el principio de la conservación de la materia, es decir, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él y que las entradas son debidas a la precipitación e infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evaporación, evapotranspiración de las plantas y la descarga de los acuíferos. Dicho lo anterior y teniendo en cuenta que la recarga potencial de un acuífero está íntimamente relacionada con la infiltración y la escorrentía, para el estudio de las fuentes subterráneas se desarrolló un modelo en formato XLS siguiendo los estudios realizados por Gunther Schosinsky, con el propósito de determinar estadísticamente la recarga potencial de los acuíferos mediante un balance de suelos, debido a que el agua que penetra a través de la superficie del terreno se dice que se ha infiltrado; sin embargo, una parte es retenida por el suelo, hasta alcanzar el valor máximo que puede retener el suelo, es decir, la capacidad de campo, y una vez superada esta retención máxima, el resto del agua escurre por gravedad hasta el nivel freático, es decir hasta la zona saturada generando la recarga del acuífero.

Finalmente, esta investigación permitió entender el comportamiento del sistema de flujo del agua subterránea de las áreas en estudio, con resultados estadísticos de mucho interés, especialmente porque esclarece las distintas interrelaciones existentes entre las unidades

geológicas, morfológicas e hídricas, además de entender el mecanismo de transporte que puede tener el agua a lo largo del sistema; ya que no todas las formaciones geológicas poseen la misma facilidad para transmitir y almacenar el recurso hídrico, por lo que la identificación de las características hidrogeomorfológicas por donde puede fluir el agua da resultados para el entendimiento de la recarga potencial del acuífero.

4.1.3 A la comunidad

Se estructuro un informe detallado con los estudios y resultados hidrológicos para cada una de las junas administrativas de los acueductos beneficiados con el proyecto, que incluye las charlas y recorridos de campo, antecedentes del proyecto, los objetivos del contrato, y las expectativas a satisfacer; así mismo, se hace referencia a la recopilación de la información existente relacionando las fuentes de información consultadas para la estructuración del proyecto, por parte de las entidades ambientales y los diferentes entes gubernamentales. De igual manera, se presenta la caracterización integral del área de influencia del proyecto, la cual comprende los conceptos de antecedentes, reseña histórica y minorías, conociendo el terreno que se va a trabajar; también se hace una caracterización de otros parámetros físicos y demográficos como lo son cartografía, geografía del lugar, áreas protegidas, entre otras características requeridas para el estudio y realización del proyecto y así generar proyecciones a mediano y largo plazo teniendo en cuenta las zonas de expansión; posteriormente, se enfoca en la selección y la metodología para la realización del estudio hidrológico y la obtención de los caudales obtenidos para el proyecto, con base en la identificación de usuarios realizada para el mismo.

Con el propósito de entregar un documento bien estructurado, se establece la evaluación hidrológica de la zona, definiendo los parámetros de evaluación de la misma y el estado en el que se encuentran las fuentes de abastecimiento, estableciendo el funcionamiento del sistema de acueducto actual y presentando las principales falencias por las cuales no ha sido posible la puesta en marcha del sistema y/o su optimización; finalmente, se presenta el planteamiento de las alternativas para cada componente, dando solución a las problemáticas expuestas y las posibles alternativas para cada fuente hídrica, concluyendo y recomendando las propuestas para integrar el proyecto con los requisitos de presentación, viabilización y aprobación de proyectos del sector de saneamiento básico que soliciten el apoyo financiero de la nación; así como aquellos que han sido priorizados en el marco de los Planes Departamentales de Agua y de los Programas que implemente el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

5. IMPACTOS DEL TRABAJO DESEMPEÑADO

Como Ingenieros civiles, debemos estar en la capacidad de aportar nuestros conocimientos a la sociedad de una manera eficaz y eficiente; implementando, constituyendo y aportando nuevas formas de aplicar la ingeniería civil, cumpliendo con toda la normatividad existente y manejando todas las habilidades y destrezas en las diferentes áreas, para que así las actividades desarrolladas sean confiables y salvaguarden la vida de las personas que se van a ver beneficiadas por nuestros conceptos en las obras ingenieriles; dicho lo anterior, uno de los principales impactos durante el apoyo a los estudio hidrológicos, fue definir y generar sobre la interventoría el reconocimiento de los modelos utilizados para la obtención de los diferentes resultados, debido a que por el poco tiempo de ejecución del contrato, se buscó generar resultados confiables; de igual manera, con la vinculación laboral como pasante, las actividades desarrolladas fueron de un impacto significativo para la ejecución del proyecto, puesto que estos estudios, definieron la modelación hidráulica de cada acueducto, precisaron los diseños estructurales, evaluaron las fuentes de abastecimiento, minimizaron los tiempos para el desarrollo del cronograma e identificaron algunas falencias que se estaban presentando con respecto a los análisis de las variables hidroclimatológicas.

De igual manera, estos estudios fueron de gran importancia, debido a que se evaluaron la capacidad de las cuencas para abastecer las necesidades de las comunidades beneficiadas conservando el caudal ecológico mínimo necesario para sostener la flora y la fauna silvestre, pues el 90% de los acueductos beneficiados no poseen ningún estudio hidrológico referente, a lo que respecta a la demanda hídrica que se tiene que tener en cuenta para la población beneficiada actual y futura, proyectada para

un periodo de 25 años; por otra parte, el implementar metodologías para buscar el balance hídrico de las cuencas fue fundamental para el conocimiento del afluente, porque desde el punto de vista teórico el análisis que se hizo en este proyecto de consultoría, permitirá realizar juicios para el uso del agua y la racionalización de este recurso en el espacio y en el tiempo.

Enfatizando en estos, el trabajo desarrollado tuvo un gran impacto en los estudios de las fuentes de abastecimiento y la caracterización climática de sus cuenca aferentes, ya que se debieron identificar, plantear y evaluar las alternativas de la fuentes basándose en la calidad del agua, el caudal de excedencia del 95%, la ocurrencia de eventos de sequía escogiendo aquella que permitan la construcción de una captación económica y segura; además, que los estudios hidrológicos realizados para las cuencas de los acueductos beneficiados, buscan minimizar los impactos sobre el medio ambiente, el ecosistema y el hábitat natural de diferentes especies; paralelamente, se generó un impacto significativo en la reducción de tiempos para el Consorcio Aguas de los Andes, con el desarrollo de las diferentes hojas dinámicas en formatos XLS, permitiendo una reducción aproximada de un 40% en el análisis de las variables hidrometeorológicas, consecución de caudales y análisis de frecuencias.

Finalmente y no menos importante, el análisis hidrológico que se entregó, formula un impacto significativo en las comunidades beneficiadas por el proyecto, debido a que el informe que se genera comunica a los organismos que manejan los acueductos, llámense juntas, suscriptores, empresas de servicios públicos, etc., que tengan en cuenta las normas complementarias para la regulación de sus fuentes de abastecimiento y de este modo prevenir posibles desastres como inundaciones o sequias por fenómenos climáticos atípicos.

6. CONCLUSIONES

- Durante el proceso de recolección de datos, se evidencio que la red hidrometeorológica que posee el IDEAM sobre el departamento de Boyacá, se encuentra en su mayoría suspendidas o fuera de servicio, por lo que se dificulta contar con los datos suficientes de las diferentes variables hidrometeorológicas y no permiten desarrollar un proyecto de esta magnitud de una forma más fácil, sin olvidar, la tardanza en obtener los diferentes block de notas con la información necesaria de estos parámetros, pues estas tienen un tiempo de respuesta por parte de esta entidad de 15 días hábiles.
- Con respecto a la caracterización climática de las cuencas aferentes a las fuentes de abastecimiento, podemos concluir, que todos y cada uno de los métodos de investigación, implementados, aprobados o no, son válidos en la medida que se cuente con la información hidrometeorológica suficiente para poder ponerlos en práctica; y que a largo plazo, debido a los cambios climáticos, los datos de las variables climáticas, hídricas y meteorológicas no proporcionaran una representación exacta del clima, pues se hará necesario implementar herramientas de medición en cada una de las fuentes hídricas y métodos de investigación que constituyan parámetros reales en cada escenario que se pretenda analizar.
- En definitiva, los estudios hidrológicos para este tipo de proyectos tienen una relevancia importante, ya que de estos estudios se define todo el proyecto debido a que evalúa la capacidad de la fuente en otorgar o no el recurso hídrico, y por ende debe recomendar a las corporaciones autónomas, en caso de no cumplir con la normatividad actual, la búsqueda y concesión de una nueva fuente de

abastecimiento la cual cumpla con todos los requisitos y pueda proveer la población actual y futura con calidad y continuidad.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la Universidad Santo Tomás, profundice en el vínculo teórico - práctico relacionado con los sistemas informáticos (AutoCad, ESAP, ArcGis, HEC-HMS, WaterGems, etc.), debido a que actualmente, la mayoría de las empresas se apoyan en estos software para agilizar sus tiempos de desarrollo en los proyectos en ejecución.
- Con la interpretación de los datos obtenidos, se recomienda que el caudal ecológico sea mayor, haciendo un análisis representativo de la flora y la fauna del área en estudio y no un porcentaje “establecido” para toda Colombia; esto, porque cada región y cada área tienen diferente especies nativas que pueden o no solicitar mayor cantidad de agua para su supervivencia.
- Se recomienda al Consorcio Aguas de los Andes, para un próximo contrato de consultoría, que los resultados estadísticos obtenidos de los caudales, estén sustentados por muestras en campo como aforos, registros fotográficos, fichas técnicas y demás.
- Se recomienda, que la Universidad impulse las prácticas como único requisito de grado, pues la formación competitiva que se genera por medio de estas experiencias profesionales, son contribuciones importantes para terminar de constituir unos buenos Ingenieros Civiles con criterio en la toma de decisiones eficientes, eficaces y certeras en el ámbito laboral.

GLOSARIO

Acuífero: término empleado en geología para definir a las estructuras geológicas subterráneas son aptas para el almacenaje y transmisión de agua en abundancia.

Bimodal: si tiene o implica dos modos, en particular (de una distribución estadística) que tiene dos máximos.

Caracterización: determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás.

Caudal: la cantidad de fluido, medido en volumen, que se mueve en una unidad de tiempo.

Climatología: es la ciencia o rama de la geografía y por ende de las ciencias de la tierra que se ocupa del estudio del clima y sus variaciones a lo largo del tiempo cronológico.

Concesión: es un término se refiere como la acción y resultado de conceder, adjudicar, otorgar, entregar, conferir, dispensar, entregar, proporcionar o asignar en algo.

Cuenca: es un accidente de carácter geográfico que supone una depresión en la superficie de la tierra, en medio de alturas o un terreno cuyas aguas se dirigen hacia el mismo mar, río o lago.

Delimitación: determinar y marcar con claridad los límites de un país o de un terreno, o establecer los límites que existen entre dos cosas.

Ecosistema: sistema biológico constituido por una comunidad de seres vivos y el medio natural en que viven.

Escorrentía: agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno.

Estadística: ciencia que utiliza conjuntos de datos numéricos para obtener, a partir de ellos, inferencias basadas en el cálculo de probabilidades.

Evaporación: proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

Evapotranspiración: cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas

Follaje: conjunto de hojas y ramas de árboles y plantas.

Hidrograma: gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica como el caudal.

Hidrología: estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del agua continental y marítima, su distribución y circulación en la superficie de la tierra, en el suelo y en la atmósfera.

Hidrometeorológica: ciencias de la atmósfera (Meteorología) y de la hidrografía que estudia la transferencia de agua y energía entre la superficie y la atmósfera.

Hietograma: gráfico de la representación de distribuciones de frecuencias, en el que se emplean rectángulos dentro de unas coordenadas.

Homogenización: que está formado por elementos con características comunes referidas a su clase o naturaleza, lo que permite establecer entre ellos una relación de semejanza y uniformidad.

Infiltración: acción de introducir suavemente un líquido entre los poros de un sólido.

IRCA: Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para consumo humano.

Metodología: conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica, un estudio o una exposición doctrinal.

Morfología: la morfología en la rama de las matemáticas estudia las formas y medidas geométricas, en el área de la geografía estudia la morfología de la tierra y en el área de la física se encarga de estudiar los procesos y movimientos físicos.

Precipitación: en meteorología, la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no incluye, neblina ni rocío, que son formas de condensación y no de precipitación.

Q95%: corresponde al caudal igualado o excedido el 95% del tiempo a partir de la construcción de una curva de duración de caudales medios diarios.

QMD: caudal máximo diario, es el máximo consumo que se espera realice la población en un día.

Recesión: disminución o pérdida de un producto durante un período de tiempo significativo.

Secuencia: orden o disposición de una serie de elementos que se suceden unos a otros y guardan una relación entre sí.

Veraniegas: con la llegada del verano, la tradicional escasez de agua.

Viabilidad: que se puede hacer, es factible, real.

BIBLIOGRAFÍA

- BUTLER, S. (1957). *Engineering Hydrology*. EE.UU.: Prentice Hall INC.
- CALVO, J. (1999). *Principios de hidrología forestal tropical*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico e Costa Rica.
- Chow, V. T.-H. (s.f.).
- GRASSI, C. (1976). *Resumen de propiedades físicas del Suelo, metodos de riego*. Merida, Venezuela: CIDIAT.
- HERAS, R. (1972). *Manual de hidrología, hidrologí agrícola*. Madrid, España.
- LINSLEY, R. K. (1958). *Hydrology for engineers*. New York: McGraw Hill.
- ONU. (1972). *Manual de instrucciones, estudios hidrológicos*. San José, Costa Rica.
- SCHOSINSKY N., G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 13-30.
- SCHOSINSKY, G. &. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltracion con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 43-45.

ANEXOS

Anexo A. DVD

El DVD contiene:

- Anexo 1: bitácoras y convenio.
- Anexo 2: Programación y datos IDEAM.
- Anexo 3: Procesamiento y homogenización datos.
- Anexo 4: Resultados Hec-Hms y Schosinsky.
- Anexo 5: Curva de caudales.
- Anexo 6: Análisis de frecuencias y caudales mínimos.
- Anexo 7: Resultados recarga de acuíferos.
- Anexo 8: Informes finales.