

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ANALIZAR EL IMPACTO AMBIENTAL QUE
OCASIONARÍA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA PARA OPERAR A
FILO DE AGUA EN EL RÍO SUMAPAZ, MUNICIPIO DE ICONONZO, DEPARTAMENTO DE
TOLIMA, REGIÓN CENTRAL DE COLOMBIA**

**ESTEBAN HENAO REYES
FORERO IBAÑEZ ARNOLD LUBIN**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ANALIZAR EL IMPACTO AMBIENTAL QUE
OCASIONARÍA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA PARA OPERAR A
FILO DE AGUA EN EL RÍO SUMAPAZ, MUNICIPIO DE ICONONZO, DEPARTAMENTO DE
TOLIMA, REGIÓN CENTRAL DE COLOMBIA**

**ESTEBAN HENAO REYES
FORERO IBAÑEZ ARNOLD LUBIN**

**Proyecto de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
ingeniero Civil**

ASESOR DISCIPLINAR

Alberto Sánchez de la Calle, Ingeniero Civil, MSc.

Asesora metodológica

Laura Cala Cristancho, Lic. Química.

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

AGRADECIMIENTOS

El autor Esteban Henao Reyes expresa su agradecimiento:

Al ingeniero Alfonso Estrada Sánchez por el apoyo y dirección brindada durante el inicio de este proyecto, y al ingeniero Alberto Sánchez de la Calle por ser la guía durante el desarrollo de este proyecto y por compartir su experiencia para terminar el trabajo con éxito este trabajo.

A la Profesora Laura Cala Cristancho que fue guía de este proyecto y quien realizó correcciones importantes para el desarrollo y culminación del proyecto.

A mi mamá, Luz Elena Reyes quien me apoyo, acompañó y madrugó cada día de mi carrera.

A mi Papá, Carlos Henao, quien con esfuerzo y dedicación me apoyó para culminar este proyecto profesional.

A mis hermanos, por su cariño y confianza brindada, en especial a mi hermano Diego Henao quien me acompaña siempre.

A mi novia Daniela, por su apoyo y cariño durante gran parte de mi carrera.

A todas aquellas personas que dieron su aporte indirecto y/o directo para lograr culminar el desarrollo de este proyecto profesional.

CONTENIDO

	pág.
CONTENIDO	4
ÍNCIDE DE GRÁFICAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
INTRODUCCIÓN.....	1
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
2 JUSTIFICACIÓN	4
3 OBJETIVOS	5
3.1 OBJETIVO GENERAL	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4 ANTECEDENTES	6
5 MARCO DE REFERENCIA	8
5.1 MARCO CONCEPTUAL	8
5.1.1 <i>Tipos de pequeñas Centrales hidroeléctricas</i>	<i>8</i>
5.1.2 <i>Generalidades de las PCH.....</i>	<i>8</i>
5.1.3 <i>Estudios básicos de PCH.....</i>	<i>9</i>
5.1.4 <i>Obras civiles</i>	<i>9</i>
5.1.5 <i>Hidrología</i>	<i>11</i>
5.1.6 <i>Precipitación</i>	<i>11</i>
5.1.7 <i>Temperatura</i>	<i>12</i>
5.1.8 <i>Evapotranspiración.....</i>	<i>12</i>
5.1.9 <i>Cálculo del modelo de probabilidad</i>	<i>14</i>
5.1.10 <i>Caudal ecológico</i>	<i>15</i>
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	18
5.2.1 <i>Aspectos Fisiográficos.....</i>	<i>19</i>
5.3 MARCO LEGAL	20
6 DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
6.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	23
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	23
6.3 DISEÑO MUESTRAL	23
6.3.1 <i>Población.....</i>	<i>23</i>
6.3.2 <i>Muestra.....</i>	<i>23</i>
6.3.2.2 <i>Dependiente</i>	<i>24</i>
6.3.3 <i>FASES DE INVESTIGACIÓN</i>	<i>24</i>
7 RESULTADOS.....	25
7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL RÍO SUMAPAZ EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DIRECTA DE LA AFECTACIÓN.	25
7.1.1 <i>Generalidades del proyecto – Hidroeléctrica</i>	<i>25</i>
7.1.2 <i>Hidrología estación Municipio de Pandi</i>	<i>31</i>
7.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO SUMAPAZ	54

7.2.1	INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EXISTENTE.....	54
7.2.2	Métodos de cálculo del Q_e con enfoque hidrológico	55
7.3	ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL AFECTADA Y LOS VOLÚMENES DE EXCAVACIÓN POR LAS OBRAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA.	62
7.3.1	Obras de captación	64
7.3.2	Obras de conducción.....	65
7.3.3	Casa de máquinas.....	65
7.3.4	Subestación y línea de transmisión.....	66
7.3.5	Vías de acceso	66
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
8.1	HIDROLOGÍA ESTACIÓN MUNICIPIO DE PANDI	69
8.1.1	Precipitación	69
8.1.2	Temperatura	69
8.1.3	Humedad relativa	69
8.1.4	Balance hídrico	70
8.1.5	Caudales	70
8.1.6	Curvas IDF	70
8.2	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO SUMAPAZ	71
8.3	ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL AFECTADA Y LOS VOLÚMENES DE EXCAVACIÓN POR LAS OBRAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA	71
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	74

ÍNCIDE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva IDF para un tiempo de retorno de 2 años.....	45
Gráfica 2. Curva IDF para un tiempo de retorno de 5 años.....	46
Gráfica 3. Curva IDF para un tiempo de retorno de 10 años.....	46
Gráfica 4. Curva IDF para un tiempo de retorno de 25 años.....	46
Gráfica 5. Curva IDF para un tiempo de retorno de 50 años.....	47
Gráfica 6. Curva IDF para un tiempo de retorno de 75 años.....	47
Gráfica 7. Curva IDF para un tiempo de retorno de 100 años.....	47
Gráfica 8. Caudales en función de su frecuencia acumulada (serie de 42 años)...	52
Gráfica 9. Prueba de Smirnov – Kolmogorov para caudales medios mensuales. .	54
Gráfica 10. Variación histórica de caudales cuenca media del río Sumapaz	55
Gráfica 11. CDC río Sumapaz-distribución normal.....	59
Gráfica 12. Q medio vs Caudal ecológico por varios métodos hidrológicos	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Localización de infraestructura.....	26
Ilustración 2. Localización general de las tres cadenas de generación.....	27
Ilustración 3. Área de las centrales con divisiones municipales	29
Ilustración 4. Localización de infraestructura.....	31
Ilustración 5. Marcha anual de la precipitación estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio multianual 1972 – 2013.....	32
Ilustración 6. Marcha anual de la precipitación estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio multianual 1972 – 2013.....	33
Ilustración 7. Marcha anual de la temperatura estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio Multianual 1972 – 2013.....	33
Ilustración 8. Variación interanual de la temperatura media estación meteorológica Municipio de Pandi.	34
Ilustración 9. Marcha anual de la humedad relativa estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio Multianual 1972 – 2013.....	35
Ilustración 10. Variación interanual de la humedad relativa estación meteorológica Municipio de Pandi	35
Ilustración 11. Balance hídrico estacional Municipio de Pandi.	39
Ilustración 12. Marcha anual de caudales medios estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio Multianual 1969 – 2013.....	40
Ilustración 13. Variación interanual de caudales medios mensuales estación meteorológica Municipio de Pandi.....	40
Ilustración 14. Estimación de los parámetros de la Función de Gumbel.	42
Ilustración 15. Curva IDF (Estación Municipio de Pandi).	50
Ilustración 16. Puntos de muestreo de cobertura vegetal y fauna.....	62
Ilustración 17. Esquema de las obras civiles del proyecto El Paso	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. clasificación climática según Thornthwaite	14
Tabla 2. Rango de valores recomendados para caudal ecológico (Qe)	16
Tabla 3. Área de la cuenca hidrográfica del Río Sumapaz-CAR	28
Tabla 4. Construcciones que se realizarán en Icononzo.	30
Tabla 5. Obras en el área de influencia directa	30
Tabla 6. Cálculo de índice de calor mensual y ETR	36
Tabla 7. Factor de corrección Ka dependiendo de la latitud	37
Tabla 8. Balance hídrico multianual- Estación Municipio de Pandi.	38
Tabla 9. Registros pluviométricos Estación Pandi- Método Gumbel-desviación cuadrática.	41
Tabla 10. Cálculo de las láminas para distintas frecuencias	43
Tabla 11. Valores concluidos para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas	43
Tabla 12. Precipitaciones máximas probables diarias para diferentes tiempos de duración de lluvias.	44
Tabla 13. Intensidades de lluvia para diferentes tiempos de duración	44
Tabla 14. Cálculo del valor de regresión	48
Tabla 15. Intensidades de precipitación (mm/hr). Estación Municipio de Pandi.	49
Tabla 16. Coeficiente de determinación R^2	49
Tabla 17. Tabla de frecuencias acumuladas de caudales medios mensuales de la estación Municipio de Pandi.	51
Tabla 18. Tabla de valores de $D\alpha$ en función del nivel de significancia y del tamaño de la muestra.	53
Tabla 19. Resumen de caudales medios mensuales estación municipio de Pandi, Cundinamarca (m^3/s)	57
Tabla 20. Ecuaciones empíricas de probabilidad	58
Tabla 21. Valores de a para la ecuación de Gringorten	58
Tabla 22. Descripción de los caudales propuestos por el método de índices	59
Tabla 23. Resultados del cálculo del porcentaje del tiempo empleando diferentes ecuaciones empíricas.	60
Tabla 24. Resultados Qe río Sumapaz - método de índices de la CDC	61
Tabla 25. Resumen de valores de Qe	61
Tabla 26. Actividades a realizar en lo que respecta al proyecto en la jurisdicción del municipio de Icononzo.	64
Tabla 27. Demanda de recursos para el municipio de Icononzo	67
Tabla 28. Relación de áreas entre cada una de las Unidades de Ordenación Forestal	67
Tabla 29. Área de cobertura vegetal afectada debido a las diferentes obras.	68
Tabla 30. Estimación de volúmenes de tierra.	68
Tabla 31. Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno	70

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se desarrolla una propuesta metodológica para analizar el impacto ambiental en la cuenca media del río Sumapaz, debido a la construcción del proyecto denominado El Paso, el cual pretende desarrollar una hidroeléctrica para operar a filo de agua. En el proyecto se incluye descripción a nivel hidrológico, estimación del caudal ecológico, cálculo de volúmenes de extracción de tierras y estimación del área de cobertura vegetal que se va a ver afectado por el desarrollo del proyecto, tomando específicamente el municipio de Icononzo como objeto de estudio para el desarrollo de la investigación. Así mismo se presenta la normatividad existente al respecto, para finalmente proceder a explicar detalladamente las características físicas a nivel hidrológico de la cuenca media, posteriormente determinar el valor del caudal ecológico de acuerdo con los datos disponibles.

Debido a que Colombia es un país tropical, es necesaria la realización de estudios hidrológicos para cualquier tipo de proyecto, ya que en el país se presentan cambios climáticos continuos y las precipitaciones presentan mayor intensidad y duración, por ello es de vital importancia la realización de dichos estudios.

El marco conceptual presentado sirve como guía de estudio para una correcta comprensión de la información que se va a exponer en el documento. En el capítulo 5 se expone el marco conceptual donde se presentan algunas definiciones básicas de conceptos hidrológicos que se van a tener en cuenta, la estimación del caudal ecológico y algunos de los métodos de cálculo existentes a nivel hidrológico para su determinación.

Además en el capítulo 7 se expone, de acuerdo con la información disponible, los resultados obtenidos para establecer características físicas a nivel hidrológico, posterior a ello la determinación del caudal ecológico, mediante métodos de enfoque hidrológico; y la afectación por el desarrollo de obras civiles en el municipio de Icononzo. Así mismo, el capítulo 8 muestra el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo 7.

Finalmente el capítulo 9, presenta las conclusiones del impacto ambiental que ocasionaría la construcción de la hidroeléctrica en el municipio de Icononzo, Tolima.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación de energía eléctrica, es un trabajo de ingeniería muy habitual en Colombia. La principal fuente energética para este objetivo es la que se genera a través de las caídas de agua en un río o una quebrada. Gracias a la fuerza de gravedad ejercida sobre esas corrientes de agua, se puede generar energía eléctrica.¹

La construcción de hidroeléctricas pueden incrementar los niveles de contaminación ambiental, afectando a las comunidades que habitan territorios ricos en recursos naturales en todo el país. El agua es un bien nacional estratégico de uso público, es un patrimonio de la sociedad, un componente fundamental de la Naturaleza, y es vital para todo ser humano, animales y plantas². Debido a esto, todas las personas deben tener la posibilidad de acceder al recurso hídrico, ya que sin agua no hay vida. La actividad extractiva y las grandes obras de infraestructura provocan la contaminación de la naturaleza.

“EMGESA es una empresa generadora y comercializadora de energía eléctrica. Fue constituida el 23 de octubre de 1997 como resultado de la reestructuración de la Empresa de Energía de Bogotá (EEB), que se alió estratégicamente con el grupo Endesa de Chile, que a su vez forma parte del grupo Enersis de España. De igual manera, Endesa es controlada por la primera compañía eléctrica italiana ENEL, la cual tiene presencia en 40 países a nivel mundial.”³

La multinacional EMGESA tiene proyectado estudios de factibilidad para generar energía con aguas del río Sumapaz, en lo que se conoce como "a filo de agua", se pretende captar agua en un determinado punto, desviarlo a través de un túnel que moverá unas turbinas y luego devolver las aguas al río, se harán 3 captaciones y 8 puntos de generación⁴.

El caudal ecológico del río el cual “en ríos y humedales es un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos, que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad”⁵. Dicho caudal debe ser manejado de forma que la integridad y la sostenibilidad de los recursos hídricos del río perduren, estableciendo la calidad y cantidad de agua requerida para mantener el régimen de flujo

¹ MORA NAVARRO, Diego Camilo y HURTADO LIÉVANO, Jorge Mauricio. GUÍA PARA ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS COMO PARTE DE SISTEMAS HÍBRIDOS, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería civil, Bogotá 2004, pag13.[en línea](citado el 8 de agosto de 2015). Disponible en : <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis15.pdf>.

² INSTITUTO LATINOAMERICANO PARA UNA SOCIEDAD Y UN DERECHO ALTERNATIVO-ILSA, El río Sumapaz proyecto hidroeléctrico “el paso”: agua y vida campesina en riesgo.[en línea](citado el 8 de agosto de 2015). Disponible en :<http://www.colectivodeabogados.org/IMG/pdf/sumapaz.pdf>

³ Ibíd., , pág. 12

⁴ Ibíd., , pág. 14

⁵ BARRIOS, Eugenio. Caudal ecológico, salud al ambiente agua para la gente, En: WWF Factsheet (World Wide Fund for Nature. 2010. Col. Hipódromo, México. D.F. [en línea]. [citado en 2014]. Disponible en: http://awsassets.panda.org/downloads/fs_caudal_ecologico.pdf.

del río necesario para aprovechar sus características de manera que se pueda generar energía por medio en la construcción de centrales hidroeléctricas a filo de agua.

Dentro de los impactos que se podrían presentar durante la construcción de la hidroeléctrica sobre el cauce del río Sumapaz, municipio de Icononzo, Tolima, por la desviación del río es la disminución del régimen de caudal que se encuentra en la zona de influencia directa de la construcción de la hidroeléctrica, se contempla la afectación de la cobertura vegetal; movimientos de tierra, el secamiento de las aguas subterráneas, nacederos y aljibes. Cabe resaltar que la región del Sumapaz posee el páramo más grande del mundo, dicho recurso se vería afectado por la construcción de la hidroeléctrica.

De acuerdo a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué impactos ambientales preliminares ocasionaría la construcción de una hidroeléctrica para operar a filo de agua en el río Sumapaz, municipio de Icononzo, departamento de Tolima, región central de Colombia?

2 JUSTIFICACIÓN

En proyecto de EMGESA afectaría a los Municipios de Cabrera, Venecia, Pandi e Icononzo, de los cuales 32 veredas que se encuentran en la ribera del río serán las más afectadas. La construcción traería grandes impactos ambientales, como cambios en los niveles freáticos del agua, causando escases del recurso hídrico en período de verano, donde el río Sumapaz y las quebradas aledañas se verán afectadas significativamente, a tal punto que el agua no pueda ser consumible o simplemente escasee. Así mismo desaparecerá gran parte de flora y fauna, debido al cambio del ecosistema.⁶

Por medio de esta investigación se pretende realizar una metodología para estimar el impacto ambiental causado por la construcción de una central hidroeléctrica ubicada en el río Sumapaz específicamente en el municipio de Icononzo Tolima; donde se construirá una obra de ingeniería que permita la desviación del cauce para conducirlo hacia las turbinas de la central hidroeléctrica y de esta manera generar electricidad.

De acuerdo con lo anterior dicha desviación del cauce generaría una serie de impactos ambientales, como la reducción del caudal aguas abajo de la construcción, desertificación del terreno, pérdida de vegetación, pérdida de velocidad, entre otros, debido a la reducción del caudal. Dicho estudio es necesario porque así se generará más conciencia en la forma como se intervenga constructivamente el río Sumapaz.

⁶ INSTITUTO LATINOAMERICANO PARA UNA SOCIEDAD Y UN DERECHO ALTERNATIVO-ILSA, Op Cit., Pág. 4.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una propuesta metodológica para analizar el impacto ambiental que ocasionaría la construcción de una hidroeléctrica para operar a filo de agua en el río Sumapaz, municipio de Icononzo, departamento de Tolima, región central de Colombia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades físicas del río Sumapaz en el área de influencia directa de la afectación del caudal.
- Contrastar el valor del caudal ecológico del río Sumapaz calculado a través métodos hidrológicos y el valor oficial del proyecto.
- Estimar el área de cobertura vegetal afectada y los volúmenes de excavación por las obras en el área de influencia.

4 ANTECEDENTES

En la Universidad Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito en el año 2013 el investigador Claudio S. M. Consuegra Martínez realizó el proyecto titulado “Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias”. El autores expresa en una de sus conclusiones, “referido a los métodos de cálculo del caudal ecológico, existe una gran variedad de formas para su cálculo, enmarcándose en 4 grandes enfoques: hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico, cada uno de los cuales es un complemento del anterior, toda vez que los métodos hidráulicos requieren de información hidrométrica para relacionarla con la geometría de un cauce, cúmulo de información que sirve de sustento para los métodos hidrológicos”⁷.

El aporte de este trabajo frente a la investigación presente son los diferentes métodos que se pueden aplicar para el cálculo del caudal ecológico en una fuente agua, en este caso del río Sumapaz.

Sobre análisis de impactos ambientales ocasionados por hidroeléctricas cabe mencionar algunos aportes en el ámbito nacional como Mora Navarro, Diego y Hurtado Liévano, Jorge Mauricio. Según los autores el estudio del impacto ambiental del caudal ecológico es de vital importancia para proyectos hidroeléctricos, puesto que la disminución del caudal de la fuente de agua a intervenir, es de vital importancia y es necesaria en este tipo de proyectos⁸.

El aporte de esta investigación para el proyecto se orienta en implementar una estimación del caudal ecológico de la fuente de agua en este caso el río Sumapaz, frente a la construcción del proyecto “El Paso”.

En la Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería, en el año 2013, se realizó la investigación titulada “Análisis ambiental de las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia aplicando metodología multiobjetivo”; en la cual se planteó como uno de sus objetivos específicos identificar los impactos ambientales que se generan con mayor frecuencia en proyectos hidroeléctricos y proponer medidas de solución. La metodología se dividió en tres fases la cuales consiste en recopilar información básica de cada uno de los proyectos, la evaluación de los mismos y por último el análisis de impactos ambientales que generan estos proyectos. Por otra parte, una de las conclusiones de los autores fue que el recurso más afectado es el agua, ya que es la materia prima para la generación de energía en este tipo de actividad, seguido por el suelo en razón a que se presenta susceptibilidad a la erosión y afecta la cobertura vegetal⁹.

⁷ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias. Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito Posgrados En Ingeniería Civil, Bogotá 2013. (Citado en septiembre de 2015). [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/75/1/DOCUMENTO%20-%20FINAL.pdf>.

⁸ MORA NAVARRO, Diego Camilo y HURTADO LIÉVANO, Jorge Mauricio. Op. cit., Pág. 161.

⁹ HERNANDEZ TORRES, Camilo Andrés. Análisis ambiental de las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia aplicando metodología multiobjetivo. Universidad De La Salle Facultad De Ingeniería. Bogotá 2011. Tesis de grado (citado en agosto de 2015) [En línea]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14037/T41.11%20H430a.pdf?sequence=2>.

Además en la Universidad La Gran Colombia en el año 2011 el investigador Sergio Iván Rueda Rincón realizó un estudio sobre la Actualidad y Perspectiva de la Pequeña Generación Hidroeléctrica. Como objetivo planteó tener una visión clara del estado actual y las perspectivas de las pequeñas centrales hidroeléctricas instaladas o en proyecto de instalación en el mundo y en Colombia. Su metodología se basó en una exploración descriptiva y explicativa basada en análisis documental con el fin de definir las características del problema recolectaron información por medio de visita a entidades, consulta a expertos. Concluyeron que una pequeña central hidroeléctrica tiene la ventaja de no emitir gases de tipo invernadero causantes del calentamiento global.¹⁰

¹⁰ RUEDA RINCON, Sergio Iván. Actualidad y perspectiva de la pequeña generación hidroeléctrica. Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011. 104 h.

5 MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Tipos de pequeñas Centrales hidroeléctricas

5.1.1.1 Las Microcentrales

Estas poseen una capacidad instalada entre 10 y 100 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta característica corresponde a una central de 50 kW¹¹.

5.1.1.2 Las Minicentrales

Poseen una capacidad instalada entre 100 y 1000 kW, a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas. La planta típica corresponde a una central de 1000 kW¹².

5.1.1.3 Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH)

Este tipo de centrales hidroeléctricas posee una capacidad instalada entre 1.000 y 20.000 kW, a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas interconectadas. “Aunque hay varias técnicas para la captación del agua, con mucha frecuencia se emplea el Sistema a filo de agua. En este sistema parte del agua embalsada en el río se desvía a un canal de generación que se vuelve a unir con el río más adelante aguas abajo. La central de máquinas se localiza después de la cámara de carga y cerca del retorno del agua al río. La gran mayoría de los sistemas de PCH’s son de este tipo”¹³.

5.1.2 Generalidades de las PCH

“Los impactos generados en su construcción son fácilmente minimizables, incluso muchos se pueden evitar si se toman las medidas adecuadas (escalas para peces, caudal ecológico, entre otros). Otro punto importante desde el punto de vista ambiental es el uso no consuntivo del agua, ya que ésta se recoge del río en un punto y se devuelve al cauce en una cota inferior sin sufrir contaminación alguna”¹⁴.

¹¹ TORRES QUINTERO, Ernesto. Investigación en pequeñas centrales en Colombia. Tesis de grado pág. 2. (citado en agosto de 2015). [En línea]. Disponible en: <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-12/ar9.pdf>.

¹² Ibíd., pág. 2.

¹³ Ibíd., pág. 2.

¹⁴ MORALES, Sergio *et al.* Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria. Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. (citado en agosto de 2015). [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000200024&script=sci_arttext.

5.1.3 Estudios básicos de PCH

5.1.3.1 Estudio Cartográfico y Topográfico

“En una PCH la energía potencial del agua se transforma en energía cinética y posteriormente en energía eléctrica, esto hace que para disponer de una potencia, se necesite una caída de agua (cabeza), la cual se determina con base en mapas cartográficos de la región en estudio. Por lo general, las zonas aisladas no disponen de mapas cartográficos adecuados al estudio, de ahí que se realice un estudio topográfico que permita obtener los datos necesarios de la zona y conocer la caída aprovechable, para determinar la potencia del recurso hidroenergético”¹⁵.

5.1.3.2 Estudio Geotécnico

“El estudio geotécnico permite conocer las características del terreno en el cual se va a realizar el proyecto. El origen geológico de los materiales del suelo en el aprovechamiento desempeña un papel esencial pues éste determina sus características físicas. Esto es muy importante para definir la localización de las obras del proyecto”¹⁶.

5.1.3.3 Estudio Hidrológico y Pluviométrico

“Determina los caudales disponibles en el río recolectando datos estadísticos de caudal durante un tiempo (generalmente varios años). Debido a que en la mayoría de los casos no se cuenta con datos hídricos suficientes para seleccionar el caudal, debe recurrirse a información pluviométrica para determinar el caudal de manera aproximada”¹⁷.

5.1.4 Obras civiles

5.1.4.1 Turbina hidráulica

“La turbina hidráulica es el principal componente de una PCH, responsable de transformar la energía cinética y potencial contenida en la caída de agua, en un movimiento rotacional que se transfiere al generador eléctrico. Existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas. Los criterios más importantes a tener en cuenta para la selección del tipo de turbina óptimo de un proyecto dado, son las condiciones topográficas e hidrológicas del sitio. Las condiciones de mayor impacto sobre la selección son el caudal y la caída de agua disponibles”¹⁸.

¹⁵ Ibíd., pág. 182.

¹⁶ Ibíd., pág. 182.

¹⁷ Ibíd., pág. 182.

¹⁸ Ibíd., pág. 180.

- **Turbinas más utilizadas a nivel Colombia**

“Entre los diversos tipos de turbinas utilizados por las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, las más utilizadas son las tipo Francis (el 31,61% de las centrales utilizan esta turbina) y las tipo Pelton (utilizadas por el 27,98% de las centrales). Las turbinas Kaplan son las menos comunes; solo una pequeña central cuenta con este tipo de turbina; las bombas centrífugas son utilizadas como turbinas especialmente en las microcentrales”¹⁹.

Las turbinas Francis son las utilizadas en las centrales pequeñas y minicentrales, en tanto que, las turbinas Michell-Banki son las más utilizadas en las centrales tipo minicentrales²⁰.

5.1.4.2 Bocatoma

“Son las ventanas que permiten tomar el caudal de agua necesario y encausarlo en unos canales, es de anotar que la bocatoma se compone de unas rejas metálicas que filtran el material sólido de gran tamaño (mayor a 35 milímetros)”²¹.

5.1.4.3 Azudes

“Son muros en concreto y puestos transversalmente al cauce del agua que permiten desviar parte del caudal hacia la toma”²².

5.1.4.4 Canales de conducción

“Permiten conducir el caudal de la bocatoma hacia el tanque de carga; el canal debe contar con una leve pendiente que permita que el agua circule con poca velocidad hacia su destino”²³.

5.1.4.5 Desarenador

“Es un tanque de mayor dimensión a los canales de conducción, donde el agua pierde velocidad y las partículas en suspensión presentes en el agua son decantadas en el fondo del tanque, este está provisto de compuertas de lavado que permiten realizar mantenimientos periódicos según lo determinen las condiciones de operación”²⁴.

5.1.4.6 Tanque de carga

“Esta estructura se encarga de recibir el agua desde el canal de conducción y desde este se controla el ingreso de agua al túnel de carga”²⁵.

¹⁹ TORRES QUINTERO, Ernesto. Op. cit. pág. 12.

²⁰ Ibíd., pág. 12.

²¹ VALENCIA VELEZ, Alejandro y RINCON CASTRO, Cristian Camilo. Criterios De Diseño Y Montaje Para Una Central Hidroeléctrica Con Capacidad De Generación De 20 MW. Universidad Autónoma De Occidente Facultad De Ingeniería Departamento De Mecánica Y Energética Programa De Ingeniería Mecánica Santiago De Cali 2013. Tesis de grado. (citado en agosto de 2015). [En línea]. Disponible en: <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/5732/1/T03765.pdf>.

²² Ibíd., pág. 28.

²³ Ibíd., pág. 28.

²⁴ Ibíd., pág. 28.

²⁵ Ibíd., pág. 28.

5.1.4.7 Aliviadero

“Se utilizan para eliminar el exceso de caudal en la bocatoma o tanque de carga y así poder devolverlo al cauce natural del afluente”²⁶.

5.1.4.8 Tubería de presión

“Es la tubería encargada de contener y conducir el caudal hasta las turbinas, su instalación se realiza desde el interior del túnel y se le llama blindaje, la longitud del blindaje depende de las condiciones geológicas del terreno excavado por el túnel. En su recorrido expuesto cuenta con diferentes tipos de soportes que garantizan la resistencia a todas las fuerzas de empuje hidráulico y están diseñados adsorber los desplazamientos que se presentan debido a los cambios de temperatura”²⁷.

5.1.4.9 Casa de máquinas

“Es la edificación donde se localizan todos los equipos principales para la generación (turbina, generador, protecciones, válvula de admisión, sistemas de regulación y de conexión a la red eléctrica, y demás accesorios); allí se hace la transformación de energía hidráulica en mecánica y a su vez esta se transforma a energía eléctrica”²⁸.

5.1.5 Hidrología

Esta puede ser definida como “el estudio del movimiento, de la distribución, y de la calidad de agua a través de la tierra. La hidrología versa sobre el agua de la Tierra, su existencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas, y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. El dominio de la hidrología abarca la historia completa del agua sobre la Tierra”²⁹.

5.1.6 Precipitación

Esta puede ser definida como “el agua en cualquiera de los tres estados físicos en que alcanza la superficie terrestre, proveniente de la atmosfera”³⁰.

²⁶ Ibíd., pág. 28.

²⁷ Ibíd., pág. 28.

²⁸ Ibíd., pág. 28.

²⁹ ESTRADA GÓMEZ, Yuri Andrea y ROJAS HERRERA, Diego Alexis. Comparación entre el método racional y el método del número de curva para la estimación de caudales, caso de estudio puente vehicular del proyecto residencial refugio de Bassedonia Tesis de grado Pág. 27 (citado el 12 de agosto de 2015) [en línea]. Disponible en: <http://goo.gl/Ojk8x9>.

³⁰ RÍOS CANDO, Luis Enrique. Incidencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador. Escuela Politécnica nacional, Facultad de ingeniería civil y ambiental. (Citado en septiembre de 2015)[En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1538/1/CD-2721.pdf>.

- **Representación de la precipitación**

1. Pluviograma: “Registro obtenido de un pluviógrafo, que en el eje horizontal consta el tiempo, y en el vertical altura de agua acumulada. Presenta descensos debidos a que cuando el nivel de agua llega a 10 mm de precipitación se desaloja el agua”³¹.
2. Curva de masa: “Es una gráfica de precipitación acumulada y por tanto siempre es creciente, y su pendiente representa la intensidad de la lluvia (altura de precipitación acumulada por unidad de tiempo) en un intervalo de tiempo”³².
3. Hietograma: “A partir de una curva de precipitación acumulada se genera el diagrama de barras verticales, que representa las variaciones de la altura de precipitación o de su intensidad en lapsos o intervalos de tiempo determinados”³³.

5.1.7 Temperatura

“En meteorología e hidrología, el término temperatura se refiere a la cantidad de calor presente en la capa baja de la atmosfera, y para su medición, se emplean termómetros, mismos que se colocan en sitios donde”³⁴:

- No se obstruya la circulación de aire
- Estén protegidos de los rayos directos del sol
- No se mojen en caso de precipitación

5.1.8 Evapotranspiración

Se define como “la cantidad de agua que retorna a la atmósfera en forma de vapor, debido tanto a la evaporación en la superficie del suelo como a la transpiración de la vegetación, y cuya magnitud depende del agua realmente disponible, es decir, la que el suelo ha logrado retener para el consumo de vegetación (en la zona no saturada y saturada del suelo).”³⁵

Para otros autores, la evapotranspiración es la unión de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración vegetal. Los mismos elementos que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte de vapor, además, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un tercer factor que se debe tener en cuenta.³⁶

³¹ Ibíd., pág. 10.

³² Ibíd., pág. 10.

³³ Ibíd., pág. 10.

³⁴ Ibíd., pág. 11.

³⁵ Ibíd., pág. 15.

³⁶ ESTRADA GÓMEZ, Yuri Andrea y ROJAS HERRERA, Diego Alexis. Op cit. Pág. 24.

El Método de Thornthwaite es uno de los métodos más usados en Colombia para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) es el propuesto por Thornthwaite, como el máximo de evapotranspiración que depende únicamente del clima³⁷.

El método de Thornthwaite fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escurrimiento para diversas cuencas de drenaje. El resultado es básicamente una relación empírica entre la ETP y la temperatura del aire. A pesar de la simplicidad y las limitaciones obvias del método, funciona bien para las regiones húmedas.

La ecuación de Thornthwaite para la obtención de la Evapotranspiración Potencial (ETP)³⁸ es:

$$ETP = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^a \text{ Ecuación 1}$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración Potencial en mm

I: Índice Calórico, constante para la región dada, es la suma de los índices calóricos mensuales i , donde i es función de la temperatura media normal mensual.

$$I = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \text{ Ecuación 2}$$

T: temperatura media mensual en °C.

a: Exponente empírico, función de I.

$$a: (6,75 \times 10^{-7})(I^3) - (7,71 \times 10^{-5})(I^2) + (1,79 \times 10^{-2})(I) + 0,49239 \text{ Ecuación 3.}$$

Teniendo en cuenta que estas condiciones varía con cada época del año y con la latitud del lugar, se debe realizar una corrección a la ETP por medio de un factor correctivo K, aplicado a cada uno de los valores de ETP obtenidos. La siguiente ecuación muestra cómo se determina el factor de corrección K:

$$ETP = (ETP_{Sin \text{ Corregir}}) \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{d}{30}\right) \text{ Ecuación 4.}$$

Dónde: N: Número máximo de horas de sol, depende del mes y de la latitud del lugar.

d: Número de días del mes.

La clasificación climática de Thornthwaite se basa en la determinación del índice hídrico (Im), el cual viene dado por:

- Ecuación 5 $I_m = (100.E - 60.D)/ETP$

³⁷ Ibid., p. 24

³⁸ APARICIO MIJARES, Francisco Jair. Fundamentos de hidrología de superficie, Ed Limusa, SA, Cap. 4. Probabilidad y estadística en hidrología, pág. 56.

Donde E, D y ETP son, respectivamente, los excesos, déficit y Evapotranspiración Potencial acumuladas durante el año.

Tabla 1. clasificación climática según Thornthwaite

Índice Hídrico	Símbolo	Tipo Climático Hídrico
> 100	A	Excesivamente Húmedo
80,1 a 100	B4	Muy húmedo
60,1 a 80	B3	Húmedo
40,1 a 60	B2	Moderadamente húmedo
20,1 a 40	B1	Ligeramente húmedo
0,1 a 20	C2	Sub Húmedo húmedo
-19,9 a 0	C1	Sub Húmedo Seco
-39,9 a -20	D	Semiárido
< -40	E	Árido

Fuente: <https://joseguerreroa.wordpress.com/2011/10/21/clasificacion-climatica-segun-thornthwaite-cc/>

5.1.9 Cálculo del modelo de probabilidad

Según el estudio de miles de estaciones - año de datos de lluvia, realizado por L. L. Welss³⁹ los resultados de un análisis probabilístico realizado con lluvias máximas anuales tomadas en un único y fijo intervalo de observación, al ser incrementados en un 13% conducían a magnitudes más aproximadas a las conseguidas en el análisis basado en lluvias máximas auténticas. Por tanto el valor representativo adoptado para la cuenca será multiplicado por 1.13 para ajustarlo por intervalo fijo y único de observación.

A pesar de que existe un número significativo de distribuciones de probabilidad empleadas en hidrología, tan sólo unas algunas son las comúnmente empleadas, debido a que los datos hidrológicos de diversos tipos han probado en repetidas ocasiones ajustarse satisfactoriamente a un cierto modelo teórico. Las lluvias máximas horarias o diarias por lo común se ajustan bien a la distribución de valores extremos tipo I o Gumbel, a la Log-Pearson tipo III y a la gamma incompleta. En este estudio se empleó la distribución Gumbel.⁴⁰

5.1.9.1 Construcción de Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), son una de las herramientas más usadas en la estimación de caudales de diseño, estas se usan fundamentalmente en el diseño de obras de drenaje de vías y alcantarillados pluviales en las zonas urbanas, rurales y en la estimación de las tormentas de diseño en sitios donde, debido a la falta de

³⁹ CÓRDOBA, Marco Curvas Idf – Mac. (Citado el 10 de agosto de 2015) [en línea]. disponible en: <http://es.scribd.com/doc/100240254/Curvas-Idf-Mac#scribd>.

⁴⁰ Ibíd., P. 49.

información de caudales, es necesario recurrir a los modelos lluvia escurrentía para el cálculo de los caudales máximos⁴¹." Las intensidades máximas de la lluvia en distintos intervalos de tiempo en un mismo sitio y con distintas probabilidades de excedencia o períodos de retorno, se resumen en las IDF⁴². Usualmente las curvas IDF se establecen por medio de un análisis del mayor número posible de registros pluviográficos. En las cartas pluviográficas están asignados los perfiles de cada tormenta, en otras palabras, la profundidad de precipitación acumulada en función del tiempo. "El problema que se presenta, es la escasez de estaciones que registran información de este tipo, probablemente debido a su alto costo de instalación y mantenimiento. La estimación de curvas IDF a partir de información pluviométrica, se presenta como una alternativa para resolver este problema"⁴³.

5.1.10 Caudal ecológico

Este puede ser definido como: "caudal o flujo de agua requerido para mantener las necesidades mínimas de los ecosistemas acuáticos existentes en un área de influencia antrópica que modificará los caudales naturales de un río o quebrada. Los caudales ecológicos son escurrimientos que se dejan fluir por el río para preservar la integridad ecológica sin menoscabo del desarrollo de los habitantes"⁴⁴.

Entre otras definiciones se puede destacar el caudal ecológico, o el caudal mínimo ecológico, "es aquel que nos asegura unas condiciones que permitan al menos la conservación de las poblaciones fluviales existentes antes del aprovechamiento hidráulico"⁴⁵. Para la adecuada estimación de este régimen de caudales ecológico se debe realizar un complejo estudio del tramo de río. Sin embargo, existen algunos criterios de sentido común que, aplicados con conocimientos biológicos, que permiten orientar y fijar la cuantía de este caudal mínimo⁴⁶. El criterio de aplicar en todos los ríos de las cuencas hidrográficas como caudal ecológico un 10%, o cualquier otro porcentaje, del caudal medio anual, no posee ninguna base científica o técnica, puesto que para cada río

⁴¹ VÉLEZ, Jaime, *et al.* Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas intensidad – frecuencia – duración en Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, [citado el 10 de agosto de 2015]. (en línea). Disponible en: http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero06/06_10.pdf

⁴² *Ibíd.*, pág. 92.

⁴³ *Ibíd.*, pág. 92.

⁴⁴ PARRA RODRIGUEZ, Emerson A. Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos. (citado en septiembre de 2015). [en línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/8391/>.

⁴⁵ GARCÍA DE JALÓN, Diego. La regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad. Universidad Politécnica de Madrid, España. [En línea] (citado el 1 de septiembre de 2015). Disponible en: https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/6B-S2-P1_Diego%20G%20JalonACC.pdf.

⁴⁶ *Ibíd.*, pág. 16.

el caudal deberá depender de la distribución de frecuencias a lo largo de las estaciones del año y de la estructura física del cauce. “En un río de régimen torrencial con grandes crecidas y largas sequías, el caudal ecológico podrá ser del 15, del 10 o del 5% de su caudal medio anual; pero en uno de régimen uniforme será del 20, del 30 o del 40% dependiendo de sus características ecológicas”.

Algunas de las características que el caudal ecológico posee son las siguientes:

- “Caudal mínimo requerido para el normal funcionamiento de un ecosistema acuático – Cantidad”⁴⁷
- “Caudal que garantiza una calidad específica del recurso hídrico para el normal desarrollo del ecosistema acuático así como para su uso en actividades de índole socioeconómica – Calidad”⁴⁸
- “Caudal que no es estático sino que por el contrario debe ser dinámico respecto a la variación del régimen hídrico – Variabilidad temporal y espacial”⁴⁹

5.1.10.1 Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico

- **Método Montana (Tennat 1976)**

Este método implica determinar para un registro multianual de caudales medios mensuales, el caudal promedio y a partir de éste se determina un porcentaje el cual deberá ser respetado en la corriente de acuerdo con el estado esperado y que se expone en la tabla (ver descripción). Para establecer el periodo húmedo o seco se emplean las gráficas de variación interanual de caudales la cual se muestra en la ilustración 12 (remitirse al subcapítulo 7.1.2.6), a partir de la cual se establece un periodo de caudales máximos o húmedo y uno de caudales de estiaje o seco⁵⁰.

Tabla 2. Rango de valores recomendados para caudal ecológico (Qe)

DESCRIPCIÓN	VALORES RECOMENDADOS PARA EL Qe (%)	
	Periodo húmedo	Periodo seco
Lavado o máximo	200	
Rango óptimo	60 – 100	
Excepcional	40	60
Excelente	30	50
Bueno	20	40
Regular	10	30
Pobre o mínimo	10	10
Degradación severa	10 del caudal promedio al caudal mínimo	

Fuente: <http://goo.gl/IINQUV>.

⁴⁷ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Op. cit., Pág. 77.

⁴⁸ Ibíd., pág. 26.

⁴⁹ Ibíd., pág. 26.

⁵⁰ Ibíd., pág. 26.

- **Legislación Asturiana – Principado de Asturias**

“Esta legislación, que se fundamenta en la legislación Suiza con especial atención en la migración y potenciación de la producción de salmónidos (*Salmo trutta* y *Salmo salar*), define el caudal ecológico como el mayor valor de caudal dado por las siguientes cuatro ecuaciones que se expresan en L/s”.⁵¹

- $Q_{ec} = 50$ Ecuación 5.

- $Q_{ec} = \frac{150Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2}$ Ecuación 6.

- $Q_{ec} = 0.35Q_{347}$ Ecuación 7.

- $Q_{ec} = 0.25Q_{347} + 75$ Ecuación 8.

En caso de no contar con información de caudales medios diarios el Q347 se calcula de la siguiente manera⁵²:

- $Q_{347} = \frac{a_o Q_{ma}}{10}$ Ecuación 9.

a_o : coeficiente que puede tomar los valores 0.5, 1, 1.5 y 1.8 sin especificar en qué casos se emplea uno u otro.

El caudal mínimo cuantitativo deberá ser de por lo menos 50 l/seg. A partir de esta cantidad los caudales se definen en función del Q_{347} , debiéndose conservar una profundidad mínima de 20 cm, para permitir el movimiento migratorio de los peces, si el caudal es mayor a 50 l/s. Para el cálculo del valor de Q_{347} la ley suiza propone, para simplificar el cálculo, el uso de la ecuación 15.⁵³

- **Método del IDEAM**

Propone efectuar la estimación de un Q_e constante igual a un porcentaje de descuento o porcentaje del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente que se encuentra en estudio. El porcentaje de descuento que establece el IDEAM es del 25%.⁵⁴

Este método de cálculo lo ha presentado el IDEAM y es ampliamente reconocido en el país, siendo el método de cálculo más ampliamente utilizado y aceptado en Colombia.⁵⁵

- **Método escocés**

Consiste en tomar el 20% del caudal medio mensual de 3 meses críticos sucesivos, es usado también por varios países de América Latina⁵⁶. El método escocés considera la

⁵¹ Ibíd., pág. 40.

⁵² Ibíd., pág. 40.

⁵³ Ibíd., pág. 40.

⁵⁴ Ibíd., pág. 30.

⁵⁵ Ibíd., pág. 90.

importancia del elemento ecológico, como la conservación de las especies de la zona, a fin de preservar el ecosistema.

- **El método ecuatoriano**

Consiste en: “tomar el 5% del caudal medio anual de los últimos 10 años, este método es muy usado por varios países de América Latina. En este método se reconoce que la variación hidrológica juega un papel importante en la estructura de la diversidad biótica, además de controlar las condiciones de hábitat dentro del canal, llanuras de inundación y humedales”⁵⁷.

- **Método de índices con la CDC (CDC)**

La Curva de Duración de Caudales (en adelante CDC), o de permanencia, puede ser definida para caudales diarios, mensuales, anuales, etc., este método es considerado uno de los mejores procedimientos para representar la variabilidad de caudales a lo largo del año. Tomando como base esta curva se puede conocer la duración del período en el que el río proporciona unos caudales mínimos o máximos; por ejemplo, por medio de la curva se puede saber qué porcentaje del año el río lleva unos caudales por encima de un valor específico, o cuántos días del año desciende por debajo de un determinado caudal⁵⁸.

“Se da el nombre de curva de duración o de permanencia de caudales a la representación gráfica en orden decreciente de los caudales observados Q_i , duración normalmente expresada en porcentaje. Como cada dato de caudal corresponde a un intervalo de tiempo (hora, día, mes, año), hay una correspondencia entre aquel porcentaje y el periodo total de datos”⁵⁹.

“Para la construcción de esta curva se grafican los valores de Q_i en el eje de las ordenadas, contra su frecuencia acumulada relativa correspondiente en el eje de las abscisas o porcentaje del tiempo en el que el caudal es igualado o superado”⁶⁰.

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

El Municipio de Icononzo se encuentra situado al oriente del departamento del Tolima, a una altura de 1.304 msnm; con latitud norte de 4°11'04'' y con longitud 70°27'20'', su temperatura media es de 21°C. Hace parte de la subregión del Sumapaz, junto con los Municipios de Melgar, Carmen de Apicala, Villarrica y Cunday. El municipio posee un área de 23.886 ha, de las cuales corresponde 24.2 ha a la zona urbana y 23.841.8 a la zona rural. Está delimitado: al norte, con los municipios de Fusagasugá y Pandi

⁵⁶ VILLANUEVA URE, Justo Reynaldo y ALATA REY, Josue Eliezer. Análisis Y Propuesta De Una Metodología Para La Determinación Del Caudal Ecológico En Centrales Hidroeléctricas Del Perú, Aplicación A Un Caso Típico. Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Ingeniería Mecánica. Lima-Perú. (citado en septiembre de 2015). [en línea]. Disponible en: http://www.osinerg.gob.pe/newweb/uploads/Estudios_Economicos/Reynaldo-Alata.pdf.

⁵⁷ *Ibíd.*, pág. 19.

⁵⁸ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Op. cit., Pág. 67.

⁵⁹ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Op. cit., Pág. 67.

⁶⁰ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Op. cit., Pág. 68.

(Cundinamarca); por el oriente, con los municipios de Venecia y Cabrera (Cundinamarca); por el sur, con los municipios de Villarrica y Cunday y finalmente por el Occidente, con el municipio de Melgar.⁶¹

Mapa 1. Localización general del Municipio de Icononzo, Tolima.



Fuente: Google Earth.

La zona urbana de Icononzo está conformada por 8 barrios: La zona rural lo constituyen 30 veredas: Alto de Icononzo, Balconcitos, Basconta, Boquerón, Buenos Aires, Canfrería, Canadá – Escocia, Cuba, Chaparro, Dos Quebradas, El Mesón, El Páramo, El Santuario, El Triunfo, Guamitos, Hoya Grande, La Esperanza, La Fila, La Georgina, La Laja, La Maravilla, Montecristo, Mundo Nuevo, Paramitos, Parroquia Vieja, Paticuinde, Piedecuesta, Portachuelo, San José de Guatimbol, Yopal.⁶²

5.2.1 Aspectos Fisiográficos

“El perfil fisiográfico del río Sumapaz se caracteriza por presentar un paisaje montañoso que ocupa el 98.5% del área,⁶³ el resto, es un paisaje aluvial, conformado por abanicos terraza de tipo torrencial como los de Chinauta y Fusagasugá, caracterizados por su topografía plana, pero con abundante piedra en superficie y en el perfil del suelo⁶⁴, que

⁶² INSTITUTO LATINOAMERICANO PARA UNA SOCIEDAD Y UN DERECHO ALTERNATIVO-ILSA, Op Cit., Pág. 19.

⁶³ Ibíd., p.10.

⁶⁴ Ibíd., p.16.

limita de manera severa la profundidad radicular de los suelos. No obstante la gran homogeneidad del paisaje montañoso, a nivel de tipo de relieve, la fisiografía de la zona presenta una gran variabilidad, que se muestra en la Tabla 1, de los cuales se describen los más representativos.

5.3 MARCO LEGAL

Directiva Marco del Agua (DMA). Esta Directiva plantea como objetivo prioritario que la gestión de los recursos hídricos debe salvaguardar el buen estado ecológico de los ecosistemas vinculados. Para alcanzar este objetivo es necesario disponer de protocolos.

La Constitución Política de Colombia de 1991, establece principios y valores, así como derechos y deberes del Estado y de los particulares en relación con el medio ambiente. Donde es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.

Constitución ecológica de Colombia (1991)

Título I: De los principios fundamentales

- Artículo: 8

Descripción: “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación”⁶⁵.

Capítulo 3. De los derechos colectivos y del ambiente

Título II: De los derechos las garantías y los deberes

- Artículo: 79

Descripción: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”⁶⁶.

- Artículo: 80

Descripción: “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o

⁶⁵ COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Proyecto de Acuerdo 122 (2010). Por El Cual Se Establecen Los Lineamientos Para La Formulación De La Política Publica Distrital De Cultura Ciudadana. Anales del concejo. Bogotá D.C.2010.

⁶⁶ COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Decreto-Ley 1421 (1993) y la ley 1259 (2008). Por medio de la cual se instaura la aplicación del Comparendo ambiental. Anales del Concejo Bogotá D.C. 1993 y 2008.

sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”⁶⁷.

TITULO XII: del régimen económico y de la hacienda pública.

CAPITULO 1: De las disposiciones generales

- Artículo: 334

Descripción: “Este intervendrá, por mandato de la ley, en la explotación de los recursos naturales, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes, y en los servicios públicos y privados, para racionalizar la economía con el fin de conseguir en el plano nacional y territorial, en un marco de sostenibilidad fiscal, el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, la distribución equitativa de las oportunidades y los beneficios del desarrollo y la preservación de un ambiente sano. Dicho marco de sostenibilidad fiscal deberá fungir como instrumento para alcanzar de manera progresiva los objetivos del Estado Social de Derecho. En cualquier caso el gasto público social será prioritario”.⁶⁸

Normas colombianas

Descripción: Según la Política Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (PNGIRH), los fundamentos de la política ambiental colombiana especificados en la Ley 99 de 1993 con mayor correspondencia con la gestión ambiental del recurso hídrico son⁶⁹:

- “Las zonas de páramo, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos eran objeto de protección especial (numeral 4, artículo 1 del Título I)”⁷⁰.
- “En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso (numeral 5, artículo 1 del Título I)”⁷¹.
- “Establecer técnicamente las metodologías de valoración de los costos económicos del deterioro y de la conservación del ambiente y de los recursos naturales renovables (numeral 43, artículo 5 del Título I)”⁷².

⁶⁷ COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Proyecto De Acuerdo No. 186 (2008). Por El Cual Se Ordena La Creación Del Estándar Único De Construcción Sostenible Para El Distrito Capital Y Se Dictan Otras Disposiciones. Anales del Concejo. Bogotá D.C. 2008.

⁶⁸ COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. ACTO Legislativo (01/07/2011). por el cual se establece el principio de la sostenibilidad fiscal. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2011. 48117

⁶⁹ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Op. cit., Pág. 78.

⁷⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución N° 0769 (05/08/2002). Por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. Bogotá 2002.

⁷¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto n° 1429 (7/08/2002).Diario oficial. Bogotá 2002. N. 44893.

⁷² COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. ley 99 (22, 12, 1993). por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá D.C. 1993.N 41146.

Norma: Resolución 104 de 2003 (IDEAM)

Descripción: Por la que se establecen los criterios y parámetros para la clasificación y priorización de cuencas hidrográficas.⁷³

Norma: decreto 1541 de 1978

TÍTULO I

Disposiciones generales

Artículo 1.

“La conservación de las aguas y sus cauces, en orden a asegurar la preservación cualitativa del recurso y a proteger los demás recursos que dependan de ella”.⁷⁴

⁷³ CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Op. cit., Pág. 78.

⁷⁴ COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Decreto 1541 (28/07/1993). por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.

6 DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se busca analizar el impacto que se produce en la zona de afectación por la construcción del proyecto “El Paso” y su afectación al régimen de caudal del río Sumapaz.

Para ello es indispensable tomar y analizar datos oficiales del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) y la Corporación autónoma regional (CAR) del departamento de Tolima y Cundinamarca, para identificar características propias del río, para ello es necesario datos oficiales de precipitaciones, caudales y otros datos que son necesarios para establecer el comportamiento hidrológico de la zona, en estaciones que fueron previamente establecidas, con esto se busca establecer el cambio y fases de cada una de las variables que afecta la zona. Obtener dicha información oficial permitirá obtener datos reales de caudales máximos, medios y mínimos del río Sumapaz y así establecer cuál es la afectación que se presentará en el cuerpo de agua.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se plantea un enfoque cualitativo⁷⁵ y cuantitativo⁷⁶, ya que se busca analizar el impacto que se produce en la zona de afectación por la construcción del proyecto “El Paso” y su afectación al régimen de caudal del río Sumapaz.

6.3 DISEÑO MUESTRAL

6.3.1 Población

Área de influencia directa de la hidroeléctrica del río Sumapaz específicamente en municipio de Icononzo, Tolima.

6.3.2 Muestra

Son todos los datos oficiales del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) y la Corporación autónoma regional (CAR) del departamento de Tolima y Cundinamarca para determinar posibles alteraciones de características naturales del río Sumapaz.

6.3.2.1 Independiente

La construcción de obras civiles como, muros, túneles, tuberías.

⁷⁵ UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA, VICERRECTORIA ACADEMICA, Guía unificada para la presentación de proyecto y anteproyectos de investigación, Bogotá- Colombia, Sede Centro Universidad la Gran Colombia, Dirección de Investigaciones, Pagina 22, Guía Unificada 1.

⁷⁶ Ibid.,p 22

6.3.2.2 Dependiente

El caudal, ya que al construir las obras civiles, en este caso una estación hidroeléctrica genera una alteración del caudal natural debido a la construcción de diques, túneles y líneas de aducción o tuberías, en el tramo escogido del río Sumapaz.

6.3.3 FASES DE INVESTIGACIÓN

6.3.3.1 FASE 1

Caracterización de las propiedades físicas del río Sumapaz en el área de influencia directa de la afectación.

- **Actividad 1.1** Descripción del área del proyecto.
- **Actividad 1.2** Recopilación y validación de información secundaria actualizada suministrada por parte de entidades gubernamentales como el IDEAM, la CAR, AGUSTIN CODAZZI y la Alcaldía de Icononzo, Tolima, sobre régimen de caudal en estaciones ya establecidas, sobre el río Sumapaz.
Asimismo se realizará la Identificación de propiedades físicas por medio de estudios hidrológicos (curvas IDF, variación de caudales medios mensuales y series multianuales de precipitación, humedad relativa, temperatura etc.), en los tramos de estudio río Sumapaz, en el municipio de Icononzo Tolima.

6.3.3.2 FASE 2

Contraste del valor del caudal ecológico del río Sumapaz calculado a través métodos hidrológicos y el valor oficial del proyecto.

- **Actividad 2.1** Determinar el caudal ecológico utilizando varios métodos hidrológicos, en el tramo de la zona de influencia directa y contrastarlo con el valor oficial del proyecto.

6.3.3.3 FASE 3

Estimación del área de cobertura vegetal afectada y los volúmenes de excavación por las obras en el área de influencia.

- **Actividad 3.1.** Determinar el área de cobertura vegetal y los volúmenes de tierra de las diferentes obras que serán construidas en el municipio de Icononzo, Tolima.

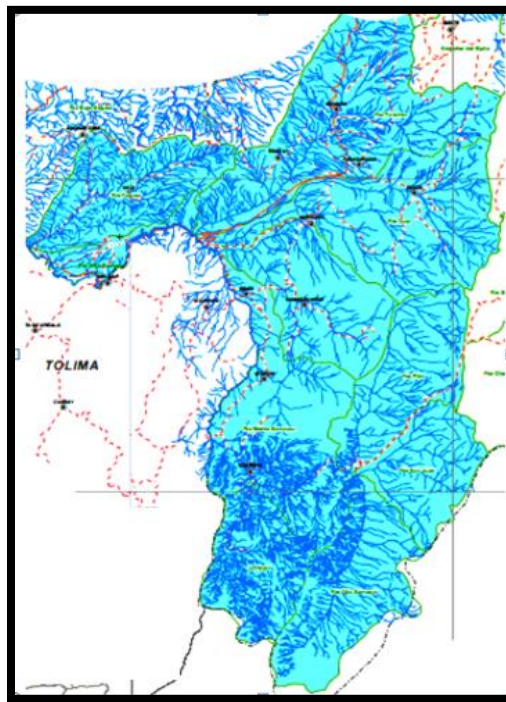
7 RESULTADOS

7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL RÍO SUMAPAZ EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DIRECTA DE LA AFECTACIÓN.

7.1.1 Generalidades del proyecto – Hidroeléctrica

El río Sumapaz es uno de los ríos más importantes de departamento de Tolima y Cundinamarca. Se encuentra localizado a 98 km al sur occidente de la capital Bogotá, muy cerca de la desembocadura en el río Magdalena, este tiene una cota máxima de 323 msnm, en el Cerro el Salero y Boquerón y una cota mínima de 00,00 msnm en la vereda La Cascada, con una longitud de cauce de 42 km, pendiente mínima de 15% y gasto medio de 1,23 m³/s. su cuenca se encuentra entre las coordenadas 63 ° 45 ' 30 " y 63 ° 19 ' 20 " longitud Oeste y 10 ° 05 ' 30 " y 10 ° 29 ' 20 " latitud Norte.⁷⁷ En el mapa 2 se observa la delimitación de la cuenca del río Sumapaz señalada en color azul claro.

Mapa 2. Delimitación de la cuenca del río Sumapaz

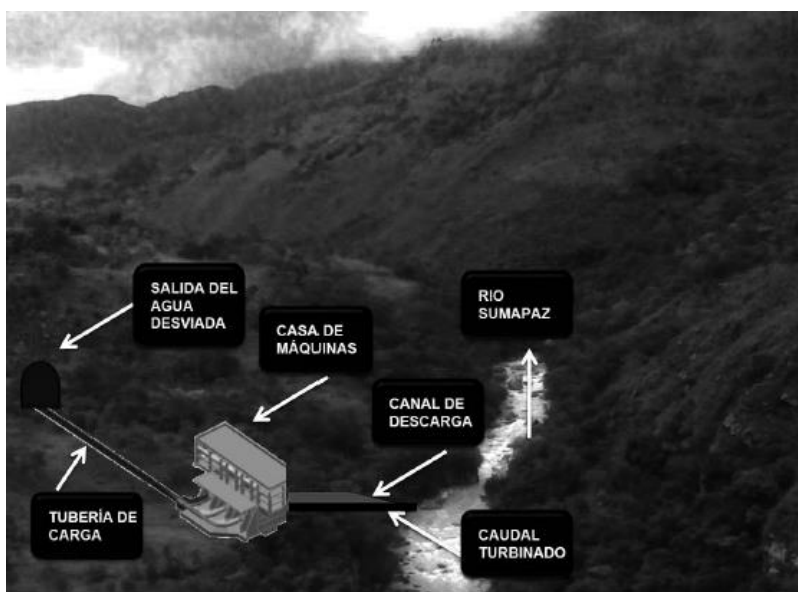


Fuente: <http://goo.gl/nnF43D>

⁷⁷ LOPEZ, Julián y RINCON, Diego. Cuenca rio Sumapaz. [Citado en enero de 2015] disponible en: <http://julianlopezivanruiz.blogia.com/2011/032501-cuenca-rio-sumapaz.php>.

En la ilustración 1 se puede observar la localización de la construcción de las mini centrales proyectadas por EMGESA. Se puede observar que en un principio el río Sumapaz es desviado desde uno de los puntos de captación, llegando a través de túneles a la casa de máquinas, donde ocurre el proceso de transformación de energía y posteriormente, es devuelto a su cauce natural a través del canal de descarga.⁷⁸

Ilustración 1 Localización de infraestructura



Fuente: <http://www.colectivodeabogados.org/IMG/pdf/sumapaz.pdf>

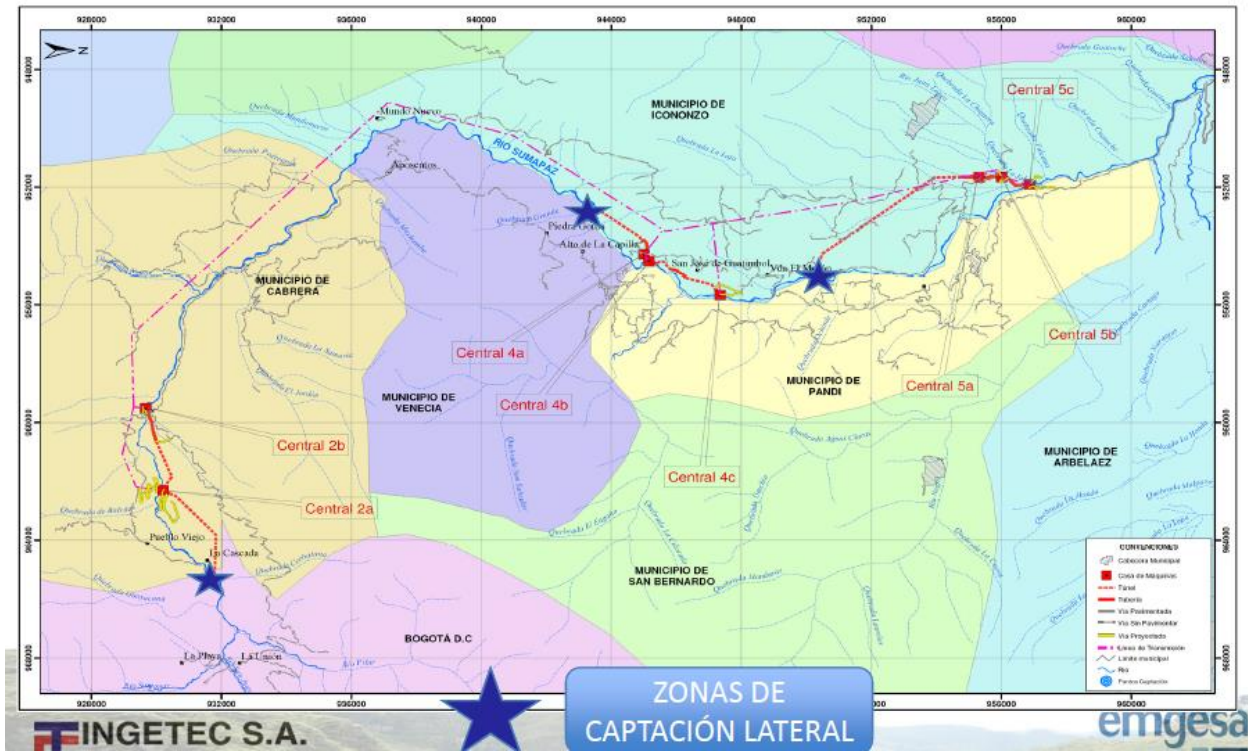
Dicho proceso es mucho más complejo de lo que se observa en la ilustración anterior (ilustración 1), ya que la construcción de una mini central hidroeléctrica desarrolla varios elementos o partes que hacen posible la transformación de energía, y que pueden impactar de maneras distintas al río y a los ecosistemas. La construcción de las ocho mini-centrales a filo de agua (sin embalse) prevista para el río Sumapaz, debe generar una media anual esperada cercana a 1.000 GWh/año⁷⁹. Para lo anterior, se utilizarán tres cadenas de generación divididas de la siguiente manera (Ilustración 2):

- Cadena 2: centrales de generación 2A y 2B;
- Cadena 4: centrales de generación 4A, 4B y 4C;
- Cadena 5: centrales de generación 5A, 5B y 5C.

⁷⁸ INSTITUTO LATINOAMERICANO PARA UNA SOCIEDAD Y UN DERECHO ALTERNATIVO-ILSA, Op. cit., pág. 13.

⁷⁹ INSTITUTO LATINOAMERICANO PARA UNA SOCIEDAD Y UN DERECHO ALTERNATIVO-ILSA, Op. cit., pág. 14.

Ilustración 2. Localización general de las tres cadenas de generación.



Fuente: EMGESA, Proyecto hidroeléctrico El Paso.2013.

Las estrellas que se pueden observar en la ilustración 2. (Localización general de las tres cadenas de generación), representan los puntos, cadenas o zonas de captación en donde se construirán las bocatoma, construcciones de grandes dimensiones que indican el punto de partida para la desviación del río. La bocatoma desvía el río para conducirlo a la casa de máquinas por medio de los túneles de conducción y de la tubería. La primera se encuentra en el Municipio de Cabrera (vereda La Cascada) y se denomina cadena 2 Bocatoma; la segunda está ubicada en el Municipio de Icononzo (vereda La Esperanza) y se denomina cadena 4 Bocatoma; la tercera y última se ubica en el Municipio de Icononzo (vereda El Mesón) y recibe el nombre de cadena 5 Bocatoma.⁸⁰

Además, el proyecto incluye una línea de transmisión de 115 kV, con 40 km en circuito doble y 11 km en circuito sencillo, elementos que impedirán la producción agropecuaria y la vivienda en estas zonas, porque esa parte de los predios pasan a ser propiedad de EMGESA. El proyecto ocupará 50 kilómetros de largo del río, y las mini-centrales están diseñadas para producir un total de 156 megavatios de energía con un promedio de 20 megavatios por mini-central.⁸¹

⁸⁰ Ibíd., pág. 30.

⁸¹ Ibid., pág. 30.

Por otra parte en la tabla 3 se puede observar el área de la cuenca hidrográfica del río Sumapaz, la cual cuenta con un área aproximada de 215 hectáreas.

Tabla 3. Área de la cuenca hidrográfica del Río Sumapaz-CAR

PRINCIPALES CUENCAS	CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL	ÁREA (ha)	PRINCIPALES CUENCAS	CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL	ÁREA (ha)
Río Tocaria	Corpoboyaca	62.856	Río Bogotá	CAR	590.349
Río Bojaba	Corpoboyaca	68.061	Río Magdalena**	CAR	214.710
Río Cobugon	Corpoboyaca	44.489	Río Negro**	CAR	423.524
Río Úpia	Corpoboyaca	208.514	Río Minero	CAR	100.102
Río Chicamocha	Corpoboyaca	611.577	Río Ubate - Suárez	CAR	197.727
Río Fonse	Corpoboyaca	31.889	Río Blanco	CAR	49.521
Río Cusiana	Corpoboyaca	29.225	Río Gacheta	CAR	9.662
Río Casanare	Corpoboyaca	14.517	Río Macheta	CAR	51.123
Río Pauto	Corpoboyaca	48.309	Río Amoya	Cortolima	143.530
Río Garagoa	Corpoboyaca	11.437	Río Coello	Cortolima	184.257
Río Carare	Corpoboyaca	152.875	Río Guamal	Cortolima	99.906
Río Negro	Corpoboyaca	39.822	Río Guayuriba	Cortolima	70.014
Río Magdalena **	Corpoboyaca	94.397	Río Ocoa	Cortolima	29.758
Río Ermitaño	Corpoboyaca	36.158	Río Prado	Cortolima	169.827
Río Suárez **	Corpoboyaca	192.375	Río Totare	Cortolima	142.875
Río Sumapaz	CAR	251.960	TOTAL		4.375.344

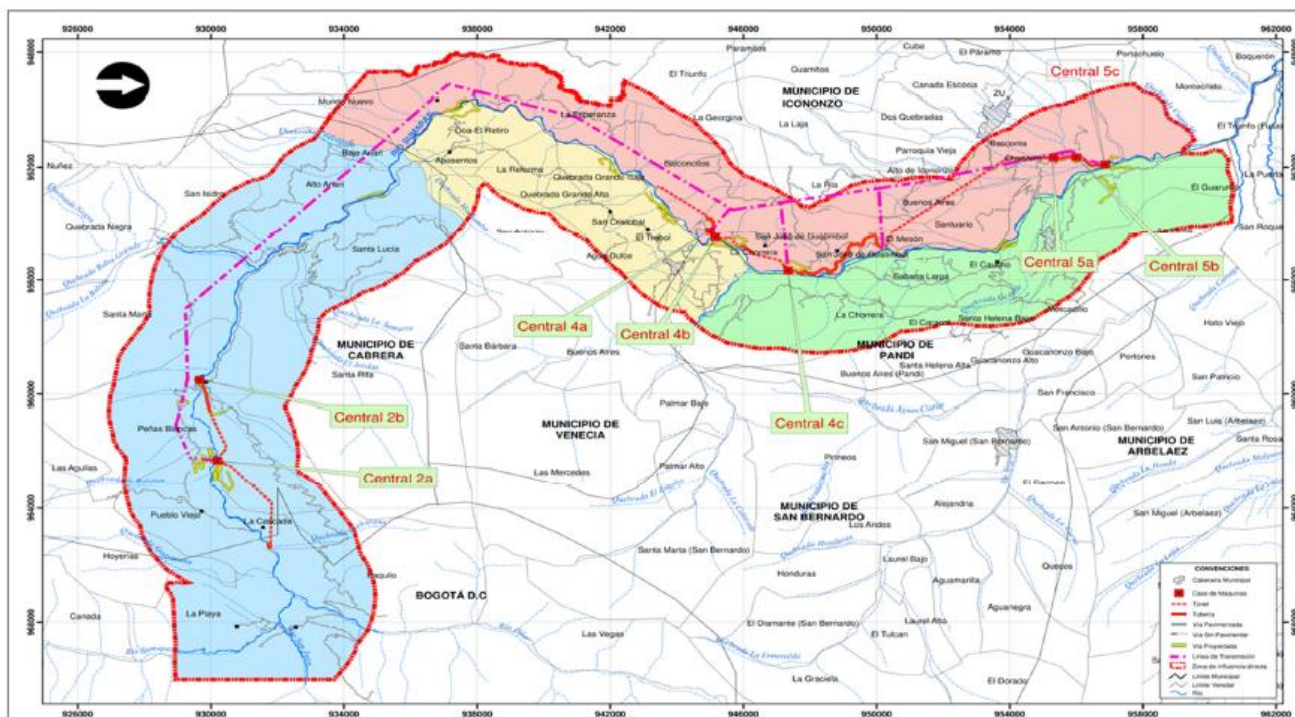
** Cuencas compartidas entre corporaciones autónomas regionales.

Fuente: <http://goo.gl/cY2wAk>

En la ilustración 3 se puede observar los municipios que se verán afectados directamente por la construcción. Según EMGESA, en el Municipio de Cabrera se verán afectadas 9 veredas: Peñas Blancas, La Cascada, Santa Rita, Santa Lucía, Pueblo Viejo, Santa Marta, San Isidro, Alto Aríari y Bajo Aríari. En el Municipio de Venecia se verán afectadas seis veredas: El Retiro, La Reforma, Quebrada Grande-Baja, San Cristóbal, El Trébol y La Chorrera. En el Municipio de Pandi: San Miguel, Sabana Larga, El Caucho, El Guarumo. En el Municipio de Icononzo: Mundo Nuevo, La Esperanza, Balconcitos, La Georgina, San José de Guatimol, La Fila, El Mesón, Alto de Icononzo, Santuario, Chaparro, Boscontá, Portachuelo y Montecristo.⁸²

⁸² Ibíd., pág. 30.

Ilustración 3. Área de las centrales con divisiones municipales



Fuente: EMGESA, Proyecto hidroeléctrico El Paso.2013.

De la ilustración anterior también se puede inferir que el municipio de Icononzo resulta ser el más afectado, puesto que allí se construirán 6 mini-centrales, además de ello se ubicará una de las tres zonas de captación. Además, las mini-centrales no solo abarcarán un municipio, sino que en varias ocasiones se encontrarán en dos o más.⁸³

Se puede observar en la ilustración 3, que el Municipio de Icononzo es uno de los más afectados. Ya que en este se ven involucradas 13 veredas directamente, también, la mayoría de las construcciones se realizarán en dicho municipio. La imagen 3, indica claramente que las centrales 4 A, B y C y 5 A, B y C serán construidas en el Municipio de Icononzo, también 6 casas de máquinas y un punto de captación.⁸⁴

En la tabla 4, se puede observar las diferentes construcciones que se llevarán a cabo en el municipio de Icononzo y su afectación por número de veredas, se puede observar que la línea de transmisión atravesará 11 de las 13 veredas pertenecientes al municipio, lo que reitera que este es el más afectado de los cinco municipios comprendidos por el proyecto.

Asimismo, en la tabla 5 se pueden visualizar las diferentes obras que se realizarán en cada una de las veredas del municipio de Icononzo.

⁸³ Ibíd., pág. 14.

⁸⁴ Ibíd., pág. 42.

Tabla 4. Construcciones que se realizarán en Icononzo.

CONSTRUCCIÓN	No. DE VEREDAS
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	11
TUBERÍA	7
CASA DE MÁQUINAS	5
ZONAS DE EXTRACCIÓN	1
BOTADEROS	3
TÚNELES	5
VÍAS	4
AGUAS ABAJO	2

Fuente: <http://www.colectivodeabogados.org/IMG/pdf/sumapaz.pdf>

Tabla 5. Obras en el área de influencia directa

MUNICIPIO		VEREDA	OBRAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO	MINICENTRAL
ICONONZO	1	BALCONCITOS	Líneas de transmisión, tubería, túnel.	Central 4A
	2	LA GEORGINA	Vía, tubería, líneas de transmisión, casas de máquinas.	Central 4B y Central 4C
	3	SAN JOSÉ DE GUATIMBOL	Botadero, tubería, vías, túnel, casas de máquinas, líneas de transmisión	Central 4C
	4	EL MESÓN	Tubería, botadero, zonas de extracción, líneas de transmisión, túnel, casas de máquinas.	Central 4D y Central 5A
	5	SANTUARIO	Tubería, vías, líneas de transmisión, túnel, casas de máquinas.	Central 5A y Central 5B
	6	CHAPARRO	Túnel, tubería, vía, botadero, líneas de transmisión, casas de máquinas.	Central 5A y Central 5C
	7	BASCONTA	Líneas de transmisión, tubería.	Central 5A y Central 5B
	8	MUNDO NUEVO	Líneas de transmisión.	
	9	LA ESPERANZA	Líneas de transmisión.	Central 4A
	10	LA FILA	Líneas de transmisión.	
	11	ALTO DE ICONONZO	Líneas de transmisión.	
	12	PORTACHUELO	Aguas abajo centrales.	
	13	MONTECRISTO	Aguas abajo centrales.	

Fuente: <http://www.colectivodeabogados.org/IMG/pdf/sumapaz.pdf>

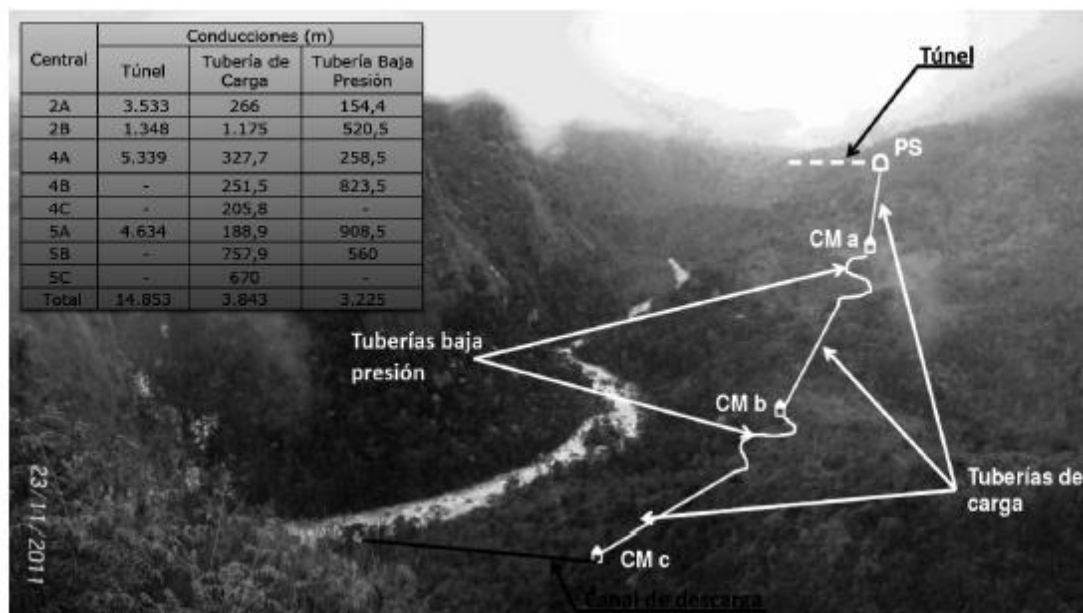
Municipio de Icononzo

La mini-central 4B ubicada en el municipio de Icononzo, en la vereda La Georgina. La mini-central 4C también está ubicada en el municipio de Icononzo en las veredas la Georgina y San José de Guatimbol. Además las mini-centrales 5A y 5B también se encuentra en Icononzo en las veredas El Mesón, Santuario, Basconta y Chaparro; y las

veredas de Santuario y Basconta, respectivamente Y por último, la mini-central 5C en Icononzo en la vereda Chaparro y en Pandi en la vereda El Caucho⁸⁵.

En la ilustración 4 se puede observar las longitudes de las diferentes construcciones que se realizarán para el proyecto El Paso.

Ilustración 4. Localización de infraestructura



Fuente: <http://www.colectivodeabogados.org/IMG/pdf/sumapaz.pdf>

7.1.2 Hidrología estación Municipio de Pandi

Para realizar las variaciones mensuales multianuales e interanuales de precipitación, temperatura, humedad relativa y caudales fue necesario el uso de datos oficiales otorgados por el IDEAM, en este caso en particular se tomó un registro histórico de 42 años, este periodo está comprendido desde 1972-2013 (Los datos se pueden detallar en el anexo 1). A continuación se analiza cada una de las variables.

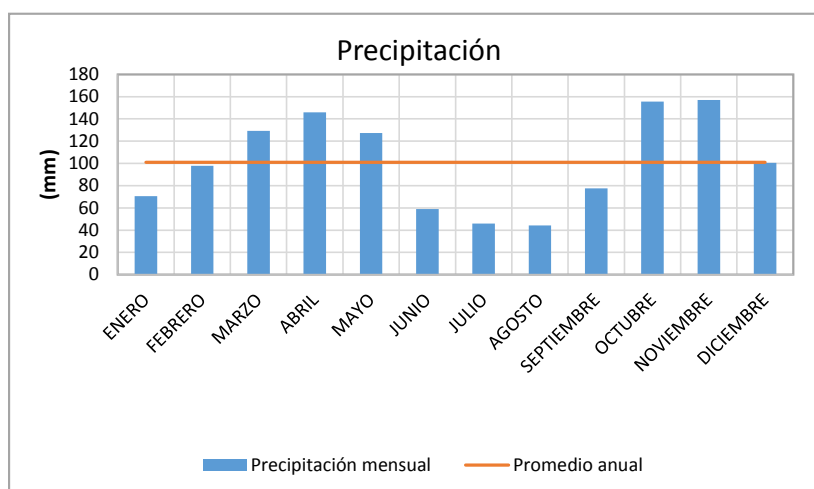
⁸⁵ Ibíd., pág. 14.

7.1.2.1 Precipitación

El estudio de las precipitaciones es fundamental en cualquier estudio hidrológico regional para cuantificar los recursos hídricos, ya que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca⁸⁶.

De acuerdo a la información suministrada por el IDEAM y los cálculos realizados, el régimen de distribución de lluvias es del tipo bimodal, con un monto anual de 1183.33 mm y un promedio mensual multianual de 100.88 mm, con variaciones entre 44.2 mm, para el mes de agosto y 156.9 mm para el mes de noviembre, tal como se puede observar en la ilustración 4. Por otra parte, los periodos de mayor pluviosidad se presentan desde marzo hasta mayo, con un valor de 402.5 mm que representa el 33.25% del total de lluvia, y del mes de octubre a diciembre, con un valor de 412.9 mm que corresponde al 34.10% de la pluviosidad total. Los valores máximos son 155.6 mm y 156.9 mm para octubre y noviembre respectivamente. Los periodos de menor concentración van desde junio hasta septiembre, los meses que presentan mínimos valores son julio y agosto con 45.9 mm y 44.2 mm respectivamente (ilustración 5).

Ilustración 5. Marcha anual de la precipitación estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio multianual 1972 – 2013.

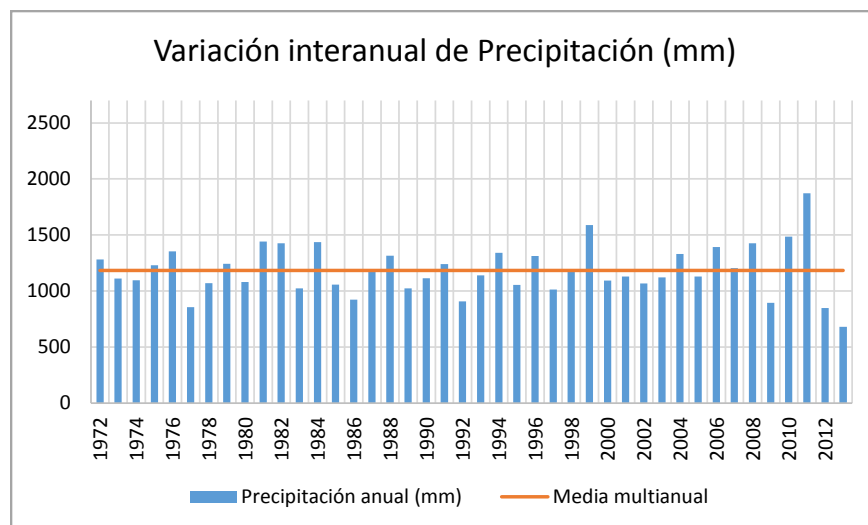


Fuente: autores

En la serie de 42 años el promedio multianual es 1183.33 mm. Los años 2000, 2001 y 2003 son calificados como periodos con expresión del fenómeno de El Niño en la región, pues el promedio de dicho años es de 1102.47 mm, dicho valor se encuentra por debajo de la media multianual (con un valor de 1183.33 mm), sin embargo, los años con mayor presencia del fenómeno de El Niño son los años de 2009, 2012 y 2013, pues estos presentan un promedio de tan sólo 807.9 mm, calificados como años con expresión del fenómeno de El Niño, dichos años presentan valores de precipitación muy por debajo de la media multianual, es decir son años secos.

⁸⁶ RÍOS CANDO, Luis Enrique. Op cit. Pág. 9.

Ilustración 6. Marcha anual de la precipitación estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio multianual 1972 – 2013.

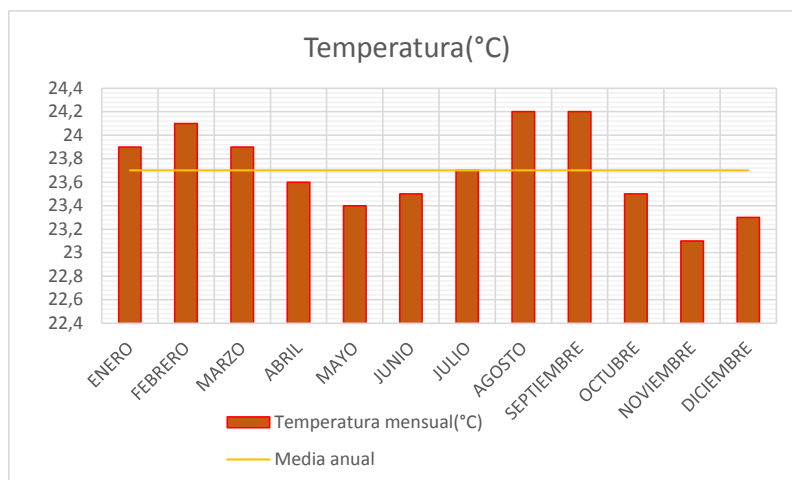


Fuente: autores

7.1.2.2 Temperatura

El valor promedio fue 23.7 °C; el mayor valor, 26.2 °C, se obtuvo en el mes de septiembre y el menor, 21.5 °C, en el mes de diciembre (ilustración 7). La amplitud entre los valores extremos es de 2.23 °C. El año con el registro más alto fue 2004, con una temperatura promedio de 24.8 °C; el año con el menor valor registrado fue el año 2000, con una temperatura promedio de 24.4 °C.

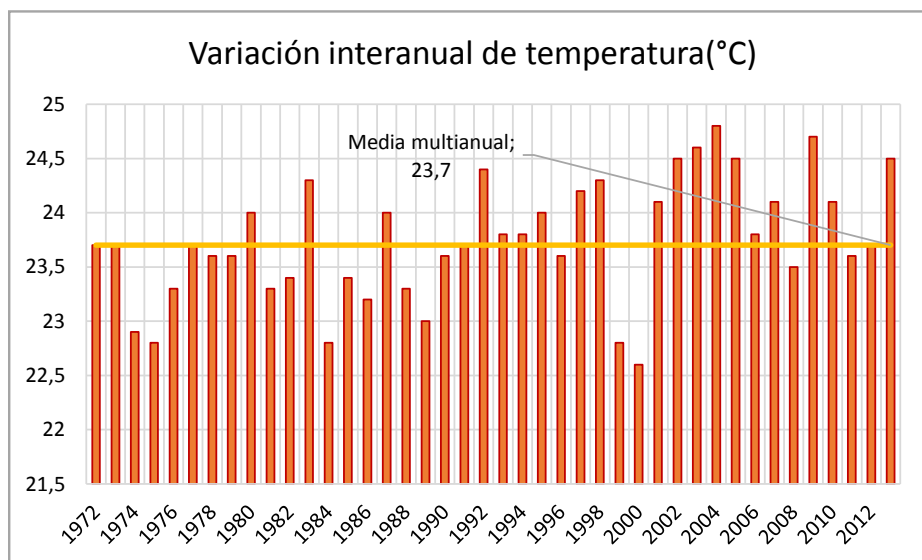
Ilustración 7. Marcha anual de la temperatura estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio Multianual 1972 – 2013.



Fuente: autores

Dentro de la variación multianual desde el año 1972 hasta el año 2013 se puede apreciar que la media multianual es de 23.7 °C y la temperatura máxima alcanzada durante dicho periodo fue en el año de 2004 con una temperatura de 24.8 ° C aproximadamente.

Ilustración 8. Variación interanual de la temperatura media estación meteorológica Municipio de Pandi.



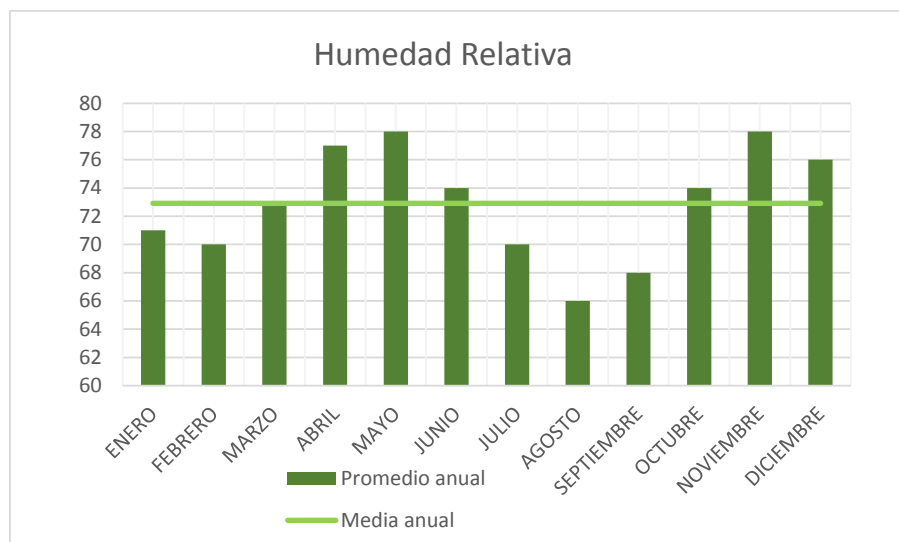
Fuente: autores

Se puede observar que entre el 2001 y 2013 representa el periodo cálido, debido a que la mayoría de años están por encima de la media multianual (ilustración 7), tan solo el año de 2008 y de 2011 están por debajo de la media multianual. El valor más bajo se registró en 2000 (22.6 °C). Las temperaturas más altas se registraron en los años de 2004, 2009, y 2013, con una temperatura de 24.8°C, 24.7°C y 24.5°C, respectivamente.

7.1.2.3 Humedad relativa

El valor promedio de humedad relativa en la zona es de 73%. El máximo valor registrado fue de 78%, en los meses de mayo y noviembre, y el mínimo de 66%, en el mes de agosto (Ilustración 9). La marcha mensual del meteoro guarda relación con la oscilación de las temperaturas y con los meses de mayor y menor valor de precipitación, por lo menos en el mes de noviembre donde las precipitaciones fueron altas la humedad relativa presentaba un valor alto. Según la variación interanual el año con mayor humedad relativa fue el 2008, con una humedad promedio de 85%; los años con menor valor de humedad relativa fueron 1992, 2001 y 2004 con una humedad promedio del 68.6%.

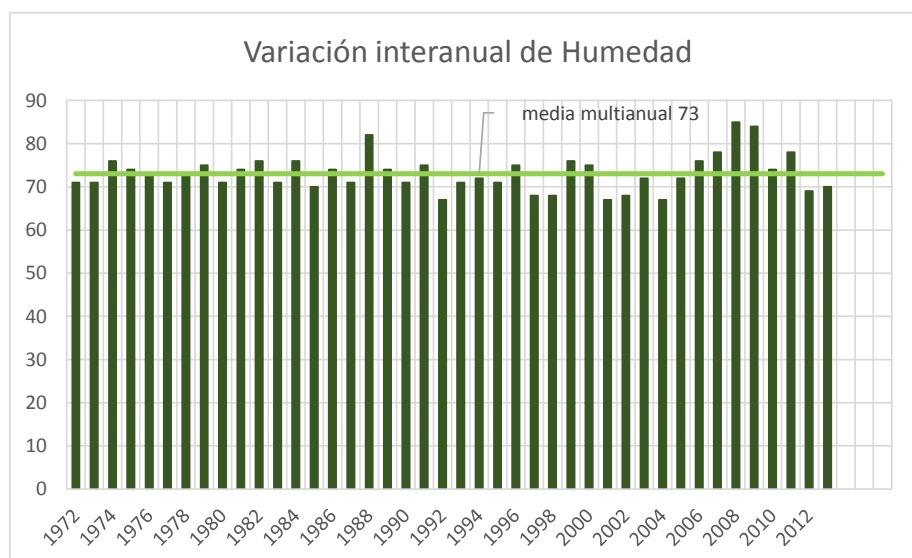
Ilustración 9. Marcha anual de la humedad relativa estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio Multianual 1972 – 2013.



Fuente: autores

La variación interanual de la humedad relativa muestra para el periodo 1972 – 1980 tres años por debajo de la media, 1972, 1973, 1977 y 1980; el año de 1969 presentó la humedad más baja con un valor de 71%. Los años que se encontraron por encima de la humedad relativa media (73%) fueron, 1974 y 1979, siendo 1974 el mayor registro para el periodo, con una humedad de 76%. El valor registrado para los años 1997 y 1998 es posible que se deba al Fenómeno de El Niño, donde las altas temperaturas y la disminución de las precipitaciones hacen que la humedad que retiene el aire descienda (Ver ilustración 10).

Ilustración 10. Variación interanual de la humedad relativa estación meteorológica Municipio de Pandi



Fuente: autores.

El periodo de 2006 – 2013 es considerado un periodo húmedo, debido a que sólo dos años, 2012 y 2013, están por debajo de la media (73%), con valores de 69%, y 70.0% respectivamente. Los años con mayor humedad relativa fueron 2008 y 2009, con montos de 85% y 84.0% respectivamente, lo que supera en más de 10% la media multianual. El año 1979, se puede considerar como un año típico del Fenómeno de La Niña, dado que se presentó baja humedad en el aire.

7.1.2.4 Balance hídrico

El concepto de evapotranspiración real (ETR), que se define como la suma de las cantidades de agua evaporadas desde el suelo y transpiradas por las plantas bajo las condiciones meteorológicas, atmosféricas y de cultivo reales existentes en el lugar, durante un periodo de tiempo definido.⁸⁷

Para el cálculo de índice de calor mensual y de la evapotranspiración es necesario utilizar la ecuación 1 y la ecuación 2. Para ello son necesarios los datos de precipitaciones medias anuales y la temperatura media mensual (anexo 2). Estos valores son resumidos en la tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de índice de calor mensual y ETR

mes	Precip.(mm)	Temp(°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP (mm)	a
enero	70,6	23,9	10,68	100,54	2,89
febrero	97,9	24,1	10,82	102,99	2,89
marzo	129,3	23,9	10,68	100,54	2,89
abril	145,9	23,6	10,48	96,93	2,89
mayo	127,3	23,4	10,35	94,58	2,89
junio	59	23,5	10,41	95,75	2,89
julio	45,9	23,7	10,55	98,13	2,89
agosto	44,2	24,2	10,89	104,23	2,89
septiembre	77,5	24,2	10,89	104,23	2,89
octubre	155,6	23,5	10,41	95,75	2,89
noviembre	156,9	23,1	10,15	91,11	2,89
diciembre	100,4	23,3	10,28	93,41	2,89
		Σ	126,57		

Fuente: autores

Para el cálculo de la ETP de un mes determinado es necesario corregir ETP mediante un coeficiente o factor de corrección que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. (Véase tabla 7).

⁸⁷ MARÍN VALENCIA, Valentina. Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y valle del cauca. Pontificia Universidad Javeriana. pág. 29. (Citado el 10 de agosto de 2015) [en línea]. disponible en: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/7128/1/tesis369.pdf>.

Tabla 7. Factor de corrección Ka dependiendo de la latitud

Latitud Grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Fuente: Fundamentos de hidrología y superficie pág.57.

Para estimar el balance hídrico se asume una capacidad máxima de almacenamiento del suelo que corresponde a un valor de 100 mm y con base en ésto, de acuerdo a la diferencia algebraica ($E - ETP$) entre la precipitación efectiva (P) y la ETP, se establece primero el almacenamiento medio mensual del suelo, y posteriormente se calculan los excesos mensuales de agua en la atmósfera.⁸⁸

Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) de todos los meses están por encima de los 90 mm. La clasificación climática según Thorthwaite es un clima sub húmedo húmedo. (Remitirse a la tabla 1).

La ETP presenta un monto anual de 1202.23 mm, en la síntesis anual los mayores valores se presentaron entre agosto y septiembre con un valor promedio de 107.7 mm; se presenta un déficit de agua con un valor de 209.71 mm. De acuerdo a lo anterior, esto demuestra que existe déficit potencial, eso se debe a que la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación, por lo tanto no hay disponibilidad de agua en el suelo durante todo el año, indicando que se presentan problemas de escasez en algunos periodos del año.

El valor total de exceso de agua es 231.71 mm, el mes con el mayor exceso es noviembre con 66.00 mm. Por otra parte el mes con mayor presencia de déficit de agua es el mes de agosto este presente un valor de 65.49 mm

Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) de los periodos secos (desde el mes de junio hasta septiembre remitirse a la ilustración 5), se encuentran por encima de los valores de precipitación, lo cual indica un déficit de agua en estos meses del año. En noviembre se alcanza la mayor acumulación de agua y es el mes con mayor precipitación del segundo periodo de alta pluviosidad; agosto y septiembre presentan los valores máximos de ETP (109.69 y 105.70 mm) y el valor mínimo (90.90 mm) se registra en noviembre (Tabla 8).Este comportamiento puede ser visto en la ilustración 11.

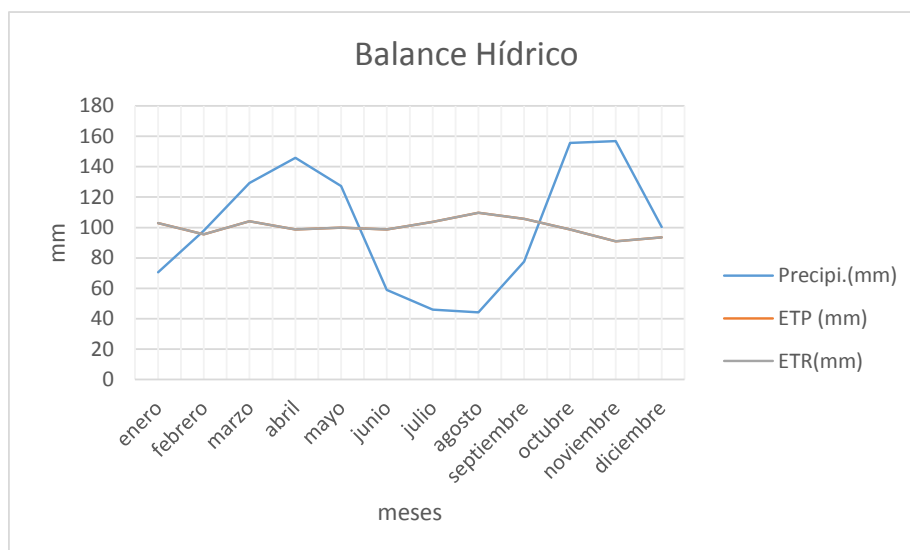
⁸⁸ GUERRERO, José. Clasificación climática según Thornthwaite: C/C++.pág. 1. (Citado el 10 de agosto de 2015) [en línea]. disponible en: <https://joseguerreroa.wordpress.com/2011/10/21/clasificacion-climatica-segun-thornthwaite-cc/>.

Tabla 8. Balance hídrico multianual- Estación Municipio de Pandi.

Municipio: Departamento:		<table><tr><td>Pandi</td></tr><tr><td>Cundinamarca</td></tr></table>		Pandi	Cundinamarca	Lat.	Long.	A	Grados	minutos	Cardinal	(N,S,E,W)	F= factor de correc. según latitud E= Exceso de agua I= índice calórico mensual D= deficiencia de agua ETP = Evapotranspiración potencial ETR= evapotranspiración real A= Almacenaje RH= relación de humedad			
				Pandi												
				Cundinamarca												
				4	11				N							
74	29	W														
100																
	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	anual			
T(°C)	23,9	24,1	23,9	23,60	23,4	23,5	23,7	24,2	24,2	23,5	23,1	23,3	23,7			
P(mm)	70,6	97,9	129,3	145,9	127,3	59	45,9	44,2	77,5	155,6	156,9	100,4	1210,5			
Fact.corecc	1,02	0,93	1,04	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	1,00	1,00				
i	10,68	10,82	10,68	10,48	10,35	10,41	10,55	10,89	10,89	10,41	10,15	10,28	126,57			
ETP	102,91	95,54	104,15	98,70	99,92	98,68	103,67	109,69	105,70	98,79	90,90	93,58	1202,23			
P-ETP	-32,31	2,36	25,15	47,20	27,38	-39,68	-57,77	-65,49	-28,20	56,81	66,00	6,82				
dif. P-ETP	32,31	2,36	25,15	47,20	27,38	39,68	57,77	65,49	28,20	56,81	66,00	6,82	66,00			
Ai cal.	67,69	70,05	95,20	147,20	100,00	100,00	42,23	34,51	6,31	100,00	100,00	100,00				
A	100,00	100,00	100,00	100	100,00	100	42,23	34,51	6,31	100,00	100,00	100,00				
E	0,00	2,36	25,15	47,20	27,38	0,00	0,00	0,00	0,00	56,81	66,00	6,82	231,71			
D	32,31	0,00	0,00	0,00	0,00	39,68	42,23	65,49	28,20	0,00	0,00	0,00	207,91			
ETR(mm)	102,91	95,54	104,15	98,70	99,92	98,68	103,67	109,69	105,70	98,79	90,90	93,58	1202,23			

Fuente: autores

Ilustración 11. Balance hídrico estacional Municipio de Pandi.



Fuente: autores

La precipitación nunca alcanza valores por debajo del valor de la temperatura, además la temperatura tiende a ser constante, presentándose un clima húmedo, con dos periodos, el primero comprendido entre el mes de marzo hasta mayo y el segundo comprendido entre octubre a noviembre, al superar los 125 mm de precipitación en estos meses, es decir superando la media mensual multianual (presenta un valor promedio de 100.8mm).

El mes con mayor pluviosidad fue noviembre, con 156.9 mm, coincidiendo con ser uno de los meses de menos temperatura, con 23.1°C.

Aplicando la ecuación 5 se obtiene un valor de 8.89, lo cual indica según la clasificación climática de Thornthwaite que el tipo de clima es Sub húmedo húmedo.

7.1.2.5 Caudales

El régimen de caudales medios mensuales presenta un monto anual de 26.42 m³/s y un promedio mensual multianual de 26.42 m³/s, con variaciones entre 11.23 m³/s, para el mes de enero, y 41.57 m³/s, para el mes de mayo, este último muestra un claro efecto del Fenómeno de La Niña, ya que el periodo de mayor pluviosidad se presenta desde marzo hasta mayo.

Los periodos de mayor concentración de caudal se presentan desde abril hasta junio, este último, a pesar de que no evidencie gran presencia del fenómeno de La Niña, presenta valores de temperatura bajos por lo que el caudal sigue siendo alto debido al periodo de lluvias presentado desde marzo a mayo, el mayor valor es de 41.57m³/s. Los periodos de menor concentración van desde agosto hasta septiembre, en este ciclo se presenta un

claro fenómeno de El Niño, pues las temperaturas están por encima de la media mensual y se evidencia poca concentración de lluvias en este periodo. Los meses que presentan mínimos valores son enero y febrero con $11.23\text{m}^3/\text{s}$ y $12.54\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente, estos presentan valores muy por debajo de la media multianual (ilustración 12).

Ilustración 12. Marcha anual de caudales medios estación meteorológica Municipio de Pandi. Promedio Multianual 1969 – 2013.

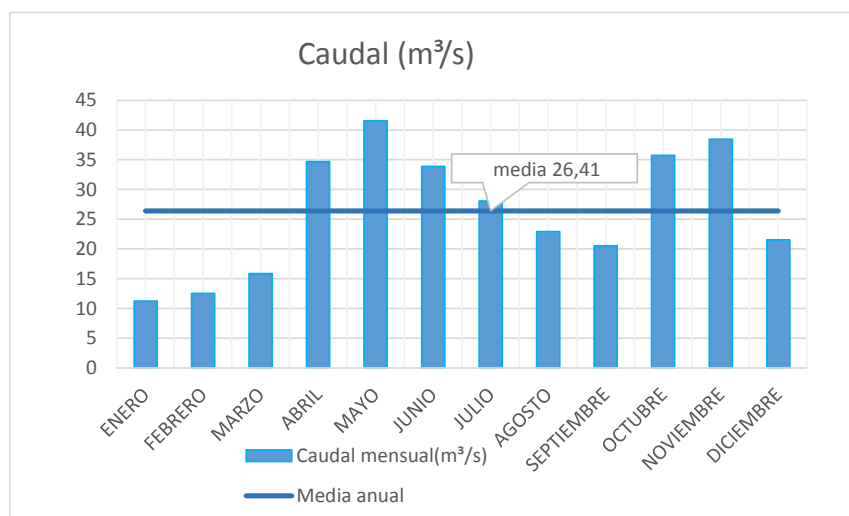
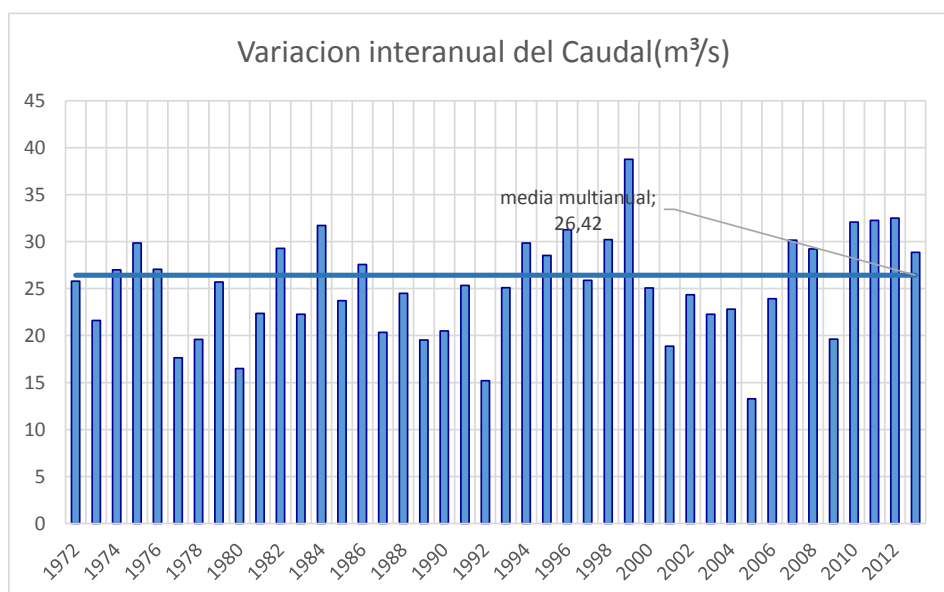


Ilustración 13. Variación interanual de caudales medios mensuales estación meteorológica Municipio de Pandi.



En el periodo de 1994 – 1999, está altamente influenciado por el Fenómeno de La Niña, ya que el único año que se encuentra por debajo de media multianual es el año de 1997,

con un valor registrado de 25.89m³/s, en el año de 1999 se presenta el pico máximo de caudal con un valor de 38.78 m³/s valor por encima de la media multianual (26.42 m³/s).

7.1.2.6 Construcción de Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Para este caso en particular se tomó un registro histórico 42 años (este periodo está comprendido desde 1972-2013), anual de máximos correspondiente a la estación municipio de Pandi. Para ello es necesario tomar los meses que presentan máxima precipitación como se registra en la tabla 9 (véase anexo 4).

Tabla 9.Registros pluviométricos Estación Pandi- Método Gumbel-desviación cuadrática.

No	Año	Mes	Precipitación (mm)	
		Max. Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1972	septiembre	53,50	0,002
2	1973	abril	69,80	267,105
3	1974	Mayo	67,10	186,141
4	1975	Octubre	51,60	3,447
5	1976	Diciembre	55,20	3,039
6	1977	Noviembre	62,20	76,446
7	1978	febrero	66,40	167,530
8	1979	agosto	43,00	109,342
9	1980	abril	85,00	994,982
10	1981	Abril	48,50	24,569
11	1982	octubre	48,40	25,570
12	1983	febrero	85,00	994,982
13	1984	Diciembre	47,60	34,301
14	1985	Octubre	66,80	178,045
15	1986	abril	77,80	592,598
16	1987	enero	59,20	32,986
17	1988	Noviembre	49,20	18,119
18	1989	enero	84,00	932,895
19	1990	Mayo	46,30	51,218
20	1991	Diciembre	49,80	13,371
21	1992	marzo	47,40	36,683
22	1993	Noviembre	69,80	267,105
23	1994	marzo	72,50	362,649
24	1995	Noviembre	45,40	64,910
25	1996	enero	66,60	172,747
26	1997	Noviembre	71,20	314,826
27	1998	mayo	56,20	7,526
28	1999	marzo	43,60	97,154
29	2000	enero	95,30	1750,865
30	2001	Octubre	75,30	477,131
31	2002	febrero	57,00	12,555
32	2003	enero	63,80	106,985
33	2004	Diciembre	22,82	938,605
34	2005	abril	13,28	1614,165
35	2006	Diciembre	23,94	871,234
36	2007	Octubre	30,16	542,735
37	2008	abril	29,21	587,901
38	2009	Noviembre	19,61	1145,597
39	2010	Noviembre	32,07	457,390
40	2011	Noviembre	32,25	449,723
41	2012	Abril	32,49	439,601
42	2013	Noviembre	28,85	605,488
		suma	2245,18	16030,26

Fuente: autores

- **Cálculo de variables Probabilísticas**

Para este caso en particular el cálculo de la media aritmética para la construcción de curvas –IDF arroja un valor de 53.46 mm y la desviación estándar por su parte muestra un valor de 19.77 mm (tomando como base la tabla 9).

Por otra parte los parámetros: α, μ de Gumbel arrojan valores de 15.42 mm y de 44.56 mm.

Ilustración 14. Estimación de los parámetros de la Función de Gumbel.

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{\sum x_i}{n} = \boxed{53,46} \text{ mm} \\ S &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \boxed{19,77} \text{ mm} \\ \alpha &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S = \boxed{15,42} \text{ mm} \\ u &= \bar{x} - 0.5772 * \alpha = \boxed{44,56} \text{ mm} \\ F_{(x)} &= e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}\end{aligned}$$

Fuente: autores

- Para el modelo de probabilidad: Ecuación 10.

- Ecuación 10.

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Tabla 10. Cálculo de las láminas para distintas frecuencias

<i>Período</i>	<i>Variable</i>	<i>Precip.</i>	<i>Prob. de</i>	<i>Corrección</i>
<i>Retorno</i>	<i>Reducida</i>	<i>(mm)</i>	<i>ocurrencia</i>	<i>intervalo fijo</i>
<i>Años</i>	<i>YT</i>	<i>XT'(mm)</i>	<i>F(XT)</i>	<i>XT (mm)</i>
2	0,3665	50,2085	0,5000	56,7356
5	1,4999	67,6827	0,8000	76,4814
10	2,2504	79,2521	0,9000	89,5549
25	3,1985	93,8702	0,9600	106,0733
50	3,9019	104,7147	0,9800	118,3276
75	4,3108	111,0179	0,9867	125,4502
100	4,6001	115,4791	0,9900	130,4914
500	6,2136	140,3540	0,9980	158,6000

Fuente: Autores

• ECUACIÓN DE INTENSIDAD

Las relaciones o cocientes a la lluvia de 24 horas se emplean para duraciones de varias horas. D. F. Campos A. propone los siguientes cocientes⁸⁹:

Tabla 11. Valores concluidos para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Estos datos serán obtenidos como un porcentaje de los resultados de la precipitación máxima probable para 24 horas, para cada período de retorno, diferentes porcentajes de este valor según los tiempos de duración de lluvia adoptados.

⁸⁹ Ibíd., P. 49.

Tabla 12. Precipitaciones máximas probables diarias para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tiempo de Duración	Cociente	P.M.P. (mm) para diferentes tiempos de duración Sg. Periodo de Retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años
24 hr	X24	56,7356	76,4814	89,5549	106,0733	118,3276	125,4502	130,4914
18 hr	X18 = 91%	51,6294	69,5981	81,4950	96,5267	107,6781	114,1597	118,7471
12 hr	X12 = 80%	45,3885	61,1851	71,6439	84,8586	94,6621	100,3602	104,3931
8 hr	X8 = 68%	38,5802	52,0074	60,8973	72,1298	80,4627	85,3061	88,7341
6 hr	X6 = 61%	34,6087	46,6537	54,6285	64,7047	72,1798	76,5246	79,5997
5 hr	X5 = 57%	32,3393	43,5944	51,0463	60,4618	67,4467	71,5066	74,3801
4 hr	X4 = 52%	29,5025	39,7703	46,5686	55,1581	61,5303	65,2341	67,8555
3 hr	X3 = 46%	26,0984	35,1815	41,1953	48,7937	54,4307	57,7071	60,0260
2 hr	X2 = 39%	22,1269	29,8278	34,9264	41,3686	46,1477	48,9256	50,8916
1 hr	X1 = 30%	17,0207	22,9444	26,8665	31,8220	35,4983	37,6351	39,1474

Fuente: autores

Basándose en los resultados de la anterior tabla, y los tiempos de duración adoptados, se calculará la intensidad equivalente para cada uno de los casos, según: ecuación 11.

- Ecuación 11.

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duración}[hr.]}$$

La tabla 13, entrega los valores de las intensidades de precipitaciones calculadas para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación pluviométrica del municipio de Pandi.

Tabla 13. Intensidades de lluvia para diferentes tiempos de duración

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años
24 hr	1440	2,3640	3,1867	3,7315	4,4197	4,9303	5,2271	5,4371
18 hr	1080	2,8683	3,8666	4,5275	5,3626	5,9821	6,3422	6,5971
12 hr	720	3,7824	5,0988	5,9703	7,0716	7,8885	8,3633	8,6994
8 hr	480	4,8225	6,5009	7,6122	9,0162	10,0578	10,6633	11,0918
6 hr	360	5,7681	7,7756	9,1047	10,7841	12,0300	12,7541	13,2666
5 hr	300	6,4679	8,7189	10,2093	12,0924	13,4893	14,3013	14,8760
4 hr	240	7,3756	9,9426	11,6421	13,7895	15,3826	16,3085	16,9639
3 hr	180	8,6995	11,7272	13,7318	16,2646	18,1436	19,2357	20,0087
2 hr	120	11,0634	14,9139	17,4632	20,6843	23,0739	24,4628	25,4458
1 hr	60	17,0207	22,9444	26,8665	31,8220	35,4983	37,6351	39,1474

Fuente: autores

La representación matemática de las curvas Intensidad - Duración - Período de retorno, Según. Bernard es⁹⁰:

En la cual:

I = Intensidad (mm/hr)

t = Duración de la lluvia (min)

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duración}[hr.]}$$

⁹⁰ Ibíd., p.49.

T = Período de retorno (años)

a, b, c = Parámetros de ajuste

Realizando un cambio de variable: ecuación 12.

- Ecuación 12.

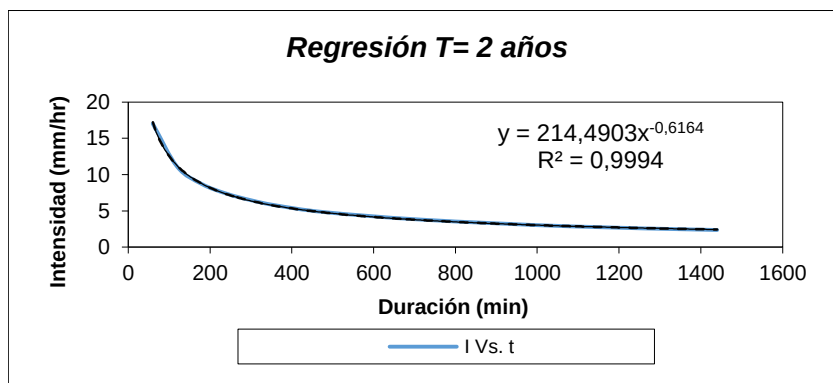
$$d = a * T^b$$

De donde: ecuación 13.

- Ecuación 13.

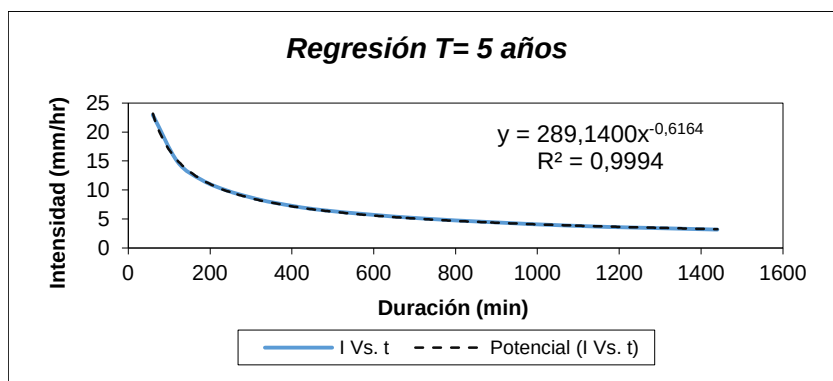
$$I = \frac{d}{t^c} \Rightarrow I = d * t^{-c}$$

Gráfica 1. Curva IDF para un tiempo de retorno de 2 años



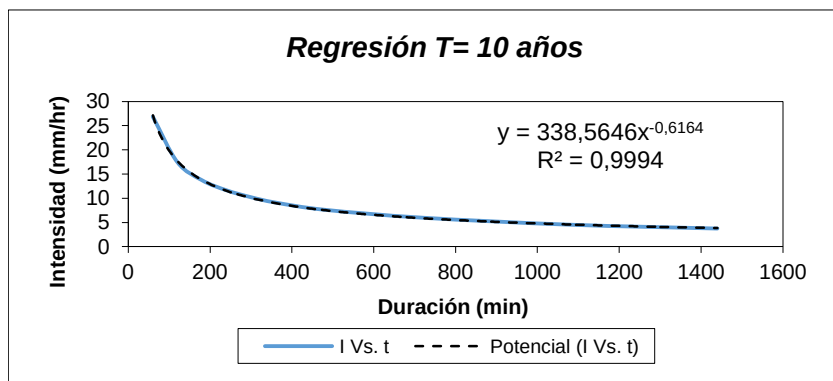
Fuente: autores

Gráfica 2. Curva IDF para un tiempo de retorno de 5 años



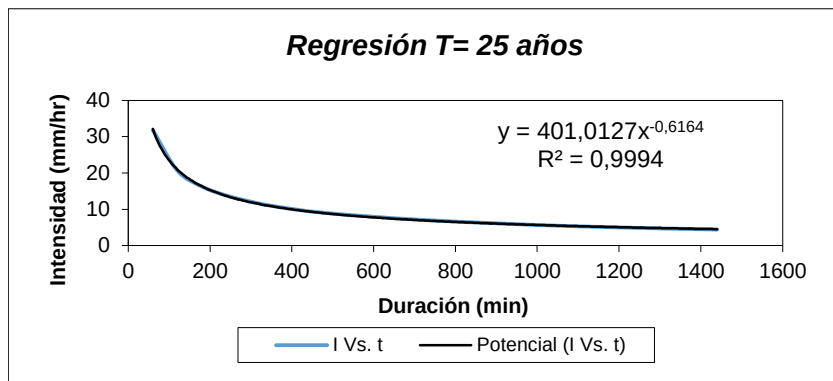
Fuente: autores

Gráfica 3. Curva IDF para un tiempo de retorno de 10 años



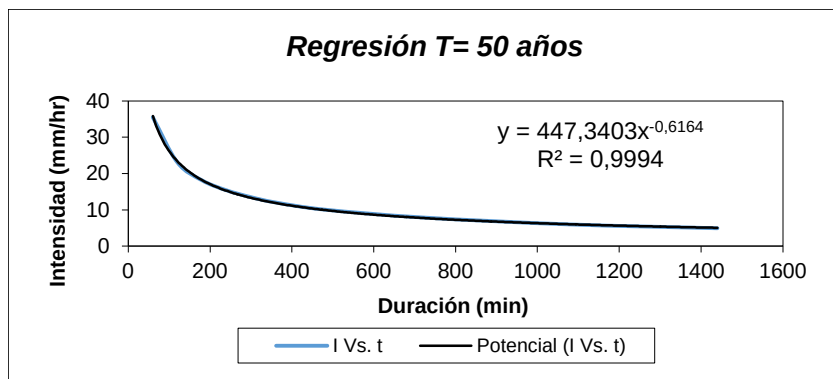
Fuente: autores

Gráfica 4. Curva IDF para un tiempo de retorno de 25 años



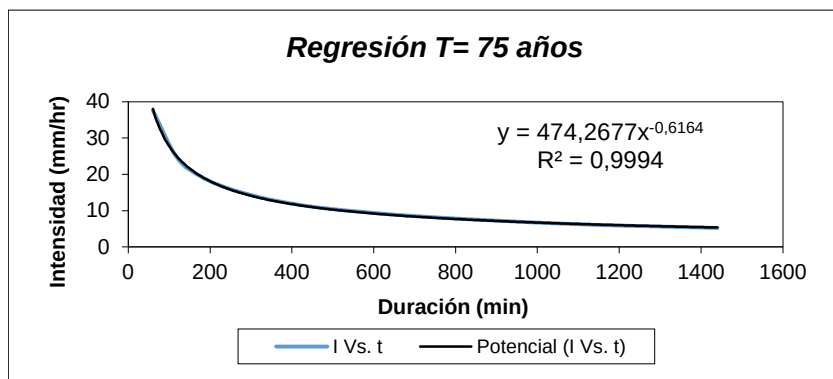
Fuente: autores

Gráfica 5. Curva IDF para un tiempo de retorno de 50 años



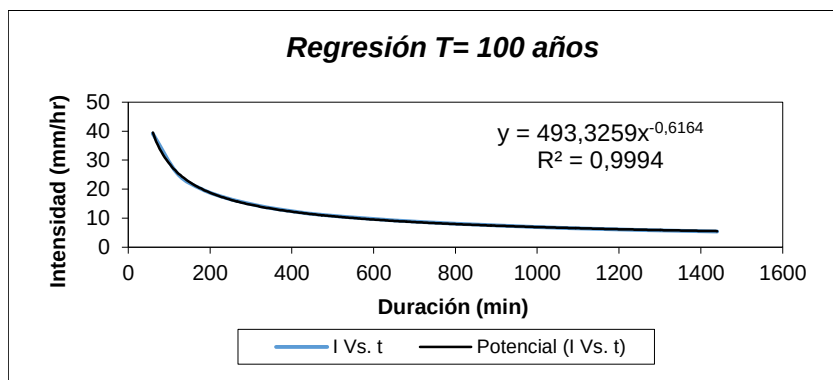
Fuente: autores

Gráfica 6. Curva IDF para un tiempo de retorno de 75 años



Fuente: autores

Gráfica 7. Curva IDF para un tiempo de retorno de 100 años



Fuente: autores

Tabla 14. Cálculo del valor de regresión

Retorno (años)	regresión (d)	regresión [c]
2	214,49026872840	-0,6163860881
5	289,13999754990	-0,6163860881
10	338,56461351697	-0,6163860881
25	401,01274681348	-0,6163860881
50	447,34033948950	-0,6163860881
75	474,26770261105	-0,6163860881
100	493,32585649327	-0,6163860881
Promedio =	379,73450360037	-0,6163860881

Fuente: autores

En función del cambio de variable elaborado, se realiza otra regresión de potencia entre las columnas del periodo de retorno (T) y el término constante de regresión (d), para conseguir valores de la ecuación: ecuación 12.

$$d = a * T^b$$

Término constante de regresión (a) =200.3420

Coef. de regresión (b) =0,204270

Finalmente se obtiene la ecuación de intensidad válida para la cuenca: ecuación 13.

- Ecuación 13.

$$I = \frac{200,3420 * T^{0,204270}}{t^{0,61639}}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de Retorno (años)

t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Tabla 15. Intensidades de precipitación (mm/hr). Estación Municipio de Pandi.

Frecuencia	Duración en minutos					
años	5	10	15	20	25	30
2	85,59	55,83	43,48	36,42	31,74	28,37
5	103,21	67,32	52,44	43,92	38,27	34,20
10	118,91	77,56	60,41	50,59	44,09	39,41
25	143,38	93,53	72,85	61,01	53,17	47,52
50	165,19	107,75	83,93	70,29	61,26	54,74
75	179,46	117,06	91,17	76,36	66,55	59,47
100	190,32	124,14	96,69	80,98	70,57	63,07
<i>Tabla de intensidad - Tiempo de duración - Periodo de retorno</i>						
Frecuencia						
años	35	40	45	50	55	60
2	25,79	23,76	22,09	20,70	19,52	18,50
5	31,10	28,65	26,64	24,96	23,54	22,31
10	35,83	33,00	30,69	28,76	27,12	25,70
25	43,21	39,80	37,01	34,68	32,70	31,00
50	49,78	45,85	42,64	39,96	37,68	35,71
75	54,08	49,81	46,32	43,41	40,93	38,79
100	57,35	52,82	49,12	46,04	43,41	41,14

Fuente: autores

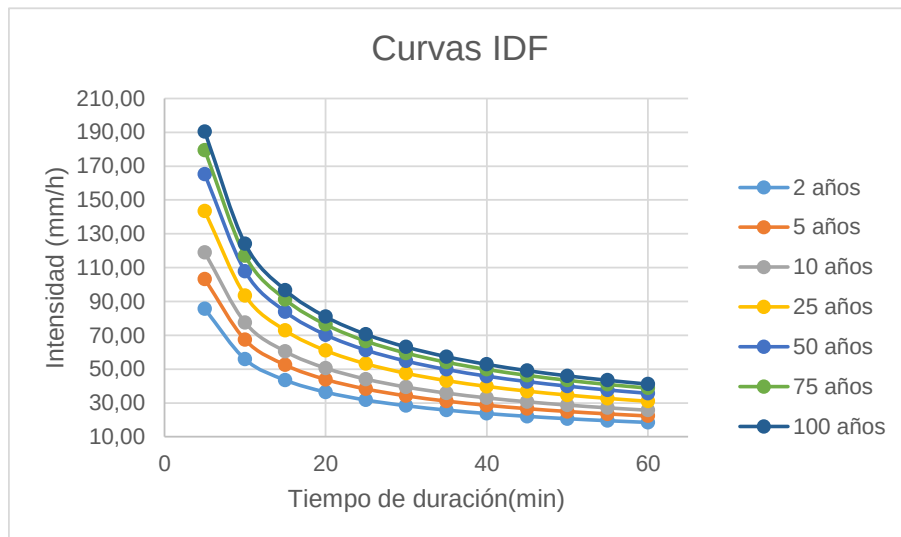
Así, con la información obtenida para la estación del municipio de Pandi, relacionada con intensidades máximas de precipitación asociadas a distintos períodos de retorno y duraciones, se ajustaron modelos de regresión potencial, dando valores de coeficiente de determinación (R^2) del 99.94% para seis periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).véase tabla 16.

Tabla 16. Coeficiente de determinación R^2

Periodo de retorno(años)	Coef. R^2 (%)
2	99,94
5	99,94
10	99,94
25	99,94
50	99,94
75	99,94
100	99,94

Fuente: autores

Ilustración 15. Curva IDF (Estación Municipio de Pandi).



Fuente: autores

- **Pruebas de Bondad de ajuste**

En la tabla 17 (tabla de frecuencias acumuladas de caudales medios de la estación Municipio de Pandi), se registraron los datos en orden cronológico, en este caso los datos de caudales medios anuales tomados de la estación del Municipio de Pandi, los cuales fueron ordenados de menor a mayor, luego para la columna A se indicó el número de orden que es también la frecuencia absoluta acumulada, la Columna C es la frecuencia relativa acumulada, en este caso como existen 42 datos (N) y entre ellos 6 caudales tienen un valor igual o menor a 19.54 m³/s, calculando $6/42=0.1428$ es decir el 14.28% de los datos disponibles son iguales a menores que 19.54 m³/s. Pero este cálculo intuitivo presenta un problema al llegar al valor más alto $42/42=1.00$ (columna C, parte inferior). La frecuencia de 100% nos induce a suponer que todos los caudales en este punto de aforo son siempre iguales o menores que 38.78 m³/s (valor mayor disponible), lo cual es una suposición falsa.

Para solucionar este problema se han ideado varios procedimientos, para este caso en particular se calculan las frecuencias relativas por el método de Weibull y Hazen⁹¹, ya que como se explica anteriormente si se consiguen medidas de más años, seguramente se producirá algún caudal mayor a 38.78 m³/s, ahora se puede observar que por el método de frecuencias de Weibull se obtiene un valor del 97.7% mientras que la frecuencia de Hazen arroja un valor del 99.81% para una serie de 42 años de registros de caudales.

En la gráfica 8 (Curva de valores acumulados) se pueden realizar evaluaciones aproximadas, por ejemplo para el caso de un caudal de 28.85 m³/s, este no es superado

⁹¹ SANCHEZ F., Javier. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA (España). Gráficos de probabilidad. [en línea, disponible en: <http://hidrologia.usal.es/Complementos/estadistica/Graficos-de-probabilidad.pdf>.

el 69.8% de los años con el método de Weibull y un 70.2% de los años con el método de Hazen (remitirse a la tabla 17.)

Tabla 17. Tabla de frecuencias acumuladas de caudales medios mensuales de la estación Municipio de Pandi.

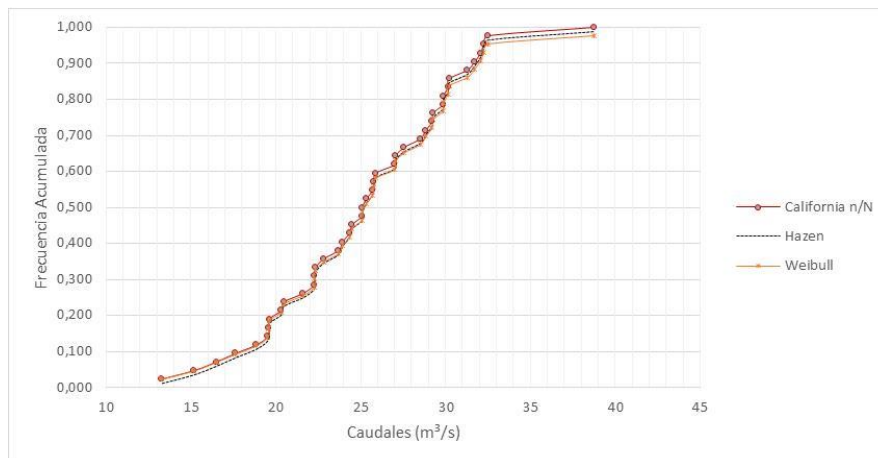
A	B	C	D	E
n	Q medios(m ³ /s)	n/N	n/(N+1)[Weibull]	(n-0,5)/N[Hazen]
1	13,28	0,024	0,023	0,0119
2	15,19	0,048	0,047	0,0357
3	16,49	0,071	0,070	0,0595
4	17,64	0,095	0,093	0,0833
5	18,87	0,119	0,116	0,1071
6	19,54	0,143	0,140	0,1310
7	19,6	0,167	0,163	0,1548
8	19,61	0,190	0,186	0,1786
9	20,33	0,214	0,209	0,2024
10	20,49	0,238	0,233	0,2262
11	21,62	0,262	0,256	0,2500
12	22,27	0,286	0,279	0,2738
13	22,28	0,310	0,302	0,2976
14	22,35	0,333	0,326	0,3214
15	22,82	0,357	0,349	0,3452
16	23,71	0,381	0,372	0,3690
17	23,94	0,405	0,395	0,3929
18	24,34	0,429	0,419	0,4167
19	24,5	0,452	0,442	0,4405
20	25,08	0,476	0,465	0,4643
21	25,09	0,500	0,488	0,4881
22	25,34	0,524	0,512	0,5119
23	25,71	0,548	0,535	0,5357
24	25,79	0,571	0,558	0,5595
25	25,89	0,595	0,581	0,5833
26	27,01	0,619	0,605	0,6071
27	27,06	0,643	0,628	0,6310
28	27,56	0,667	0,651	0,6548
29	28,52	0,690	0,674	0,6786
30	28,85	0,714	0,698	0,7024
31	29,21	0,738	0,721	0,7262
32	29,28	0,762	0,744	0,7500
33	29,86	0,786	0,767	0,7738
34	29,87	0,810	0,791	0,7976
35	30,16	0,833	0,814	0,8214
36	30,21	0,857	0,837	0,8452
37	31,28	0,881	0,860	0,8690
38	31,72	0,905	0,884	0,8929
39	32,07	0,929	0,907	0,9167
40	32,25	0,952	0,930	0,9405
41	32,49	0,976	0,953	0,9643
42	38,78	1,000	0,977	0,9881

Fuente: autores

En la determinación de valores extremos (caudales máximos o mínimos, niveles máximos o mínimos, etc.) esenciales para el análisis y solución de problemas hidráulicos es usual utilizar las distribuciones probabilísticas para el estudio de problemas hidrológicos, Así, a

partir de un registro histórico de valores extremos, se infiere aquellos valores máximos y mínimos relacionados a un periodo de retorno (en este caso para valores de caudales de una serie histórica de 42 años en la Estación Municipio De Pandi).

Gráfica 8. Caudales en función de su frecuencia acumulada (serie de 42 años).



Fuente: autores

La Prueba de Kolmogorov-Smirnov, es un test no paramétrico que permite establecer si dos muestras se ajustan al mismo modelo probabilístico, es válido para distribuciones continuas y sirve para muestras grandes.⁹² Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F_o(x_m)$ ⁹³

$$D = \max |F_o(x_m) - F_o(x_m)|$$

La prueba requiere que el valor D calculado con la ecuación anterior sea menor que el tabulado D_α para un nivel de significancia requerido. El valor crítico D_α de la prueba se obtiene de la tabla 18.⁹⁴

⁹² GARCÍA NARANJO, Manuel, La importancia de las pruebas de bondad de ajuste, Septiembre de 2011 pág. 28. (citado el 10 de agosto de 2015)[en línea] disponible en: <http://es.slideshare.net/mgarcianaranjo/pruebas-de-bondad-de-ajuste-vfinal>.

⁹³ APARICIO MIJARES, Op. cit, pág. 279.

⁹⁴ GARCÍA NARANJO, Manuel. Op Cit., pág. 64.

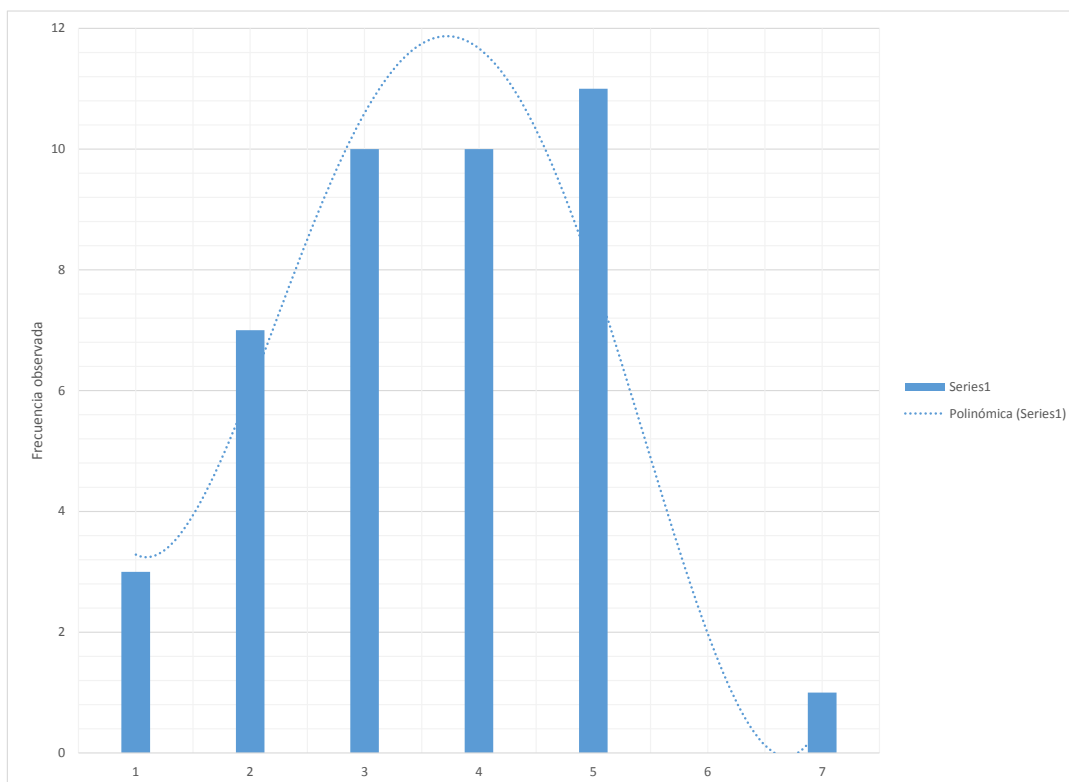
Tabla 18. Tabla de valores de D_α en función del nivel de significancia y del tamaño de la muestra.

TAMAÑO DE MUESTRA	NIVEL DE SIGNIFICANCIA α				
n	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
1	0.9	0.1	0.975	0.99	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.9	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.689	0.829
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.829
5	0.477	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.41	0.468	0.519	0.577	0.617
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
8	0.359	0.41	0.454	0.507	0.542
9	0.339	0.387	0.43	0.48	0.513
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.486
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
12	0.295	0.338	0.375	0.419	0.449
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
14	0.275	0.314	0.349	0.39	0.418
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352
25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
30	0.19	0.218	0.242	0.27	0.29
40	0.165	0.189	0.21	0.235	0.252
n grande	$1.07/n^{1/2}$	$1.22/n^{1/2}$	$1.36/n^{1/2}$	$1.52/n^{1/2}$	$1.63/n^{1/2}$

Fuente: <http://es.slideshare.net/mgarcianaranjo/pruebas-de-bondad-de-ajuste-vfinal>

Para este caso en particular se obtiene un grado de libertad de 42, ya que como se puede ver en la tabla 17 se tiene un registro de 42 años de caudales. Para realizar la prueba es necesario el cálculo de la media, la varianza y los valores máximos y mínimos (véase anexo 3), y un nivel de significancia para este caso con un valor de 0.05 tomando en cuenta este valor se utilizó la ecuación $1.36/n^{1/2}$ tomando como referencia la tabla 18, para hallar el valor estadístico teórico; el cual arrojó un valor de 0.210 (remitirse al anexo 3), en este caso dicho valor es mayor al valor estadístico de Smirnov – Kolmogorov, por lo cual se aprueba que los datos de caudales medios anuales siguen una distribución normal como se puede ver en la gráfica 9.

Gráfica 9. Prueba de Smirnov – Kolmogorov para caudales medios mensuales.



Fuente: autores

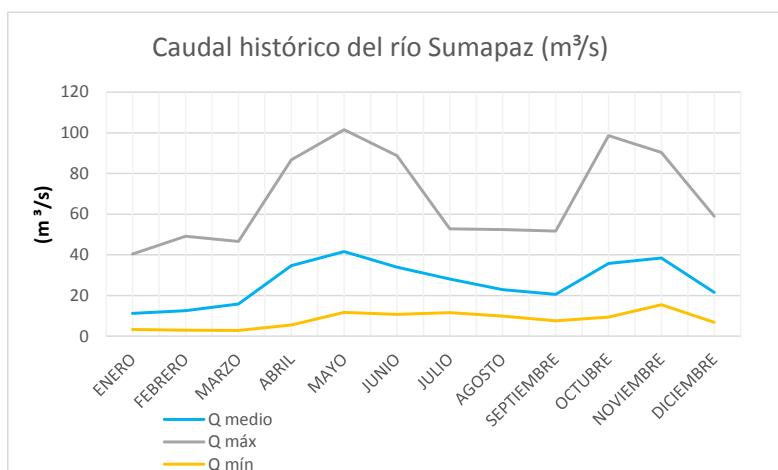
7.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO SUMAPAZ

7.2.1 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EXISTENTE

Para el presente estudio se ha desarrollado en forma exhaustiva la hidrología de la cuenca media del río Sumapaz entre los que se destacan la determinación de las características propias de la zona, como humedad, variación de caudales medios mensuales, precipitación, entre otras características analizadas previamente en el numeral 7.1.2 del presente documento. Sin embargo, es preciso aclarar que la información hidrológica para este caso es escasa, ya que sólo se cuenta con información completa de una estación (la estación del municipio de Pandí), puesto que las demás presentan periodos muy cortos entre 10 y 15 años de registros de datos (haciendo la excepción con los datos de precipitación de la estación del municipio de Venecia, Cundinamarca, pues esta si otorga una serie de 42 años de registro de precipitaciones, únicamente). Para la cuenca media del río Sumapaz se ha utilizado las series históricas de los caudales mensuales del río.

En la gráfica 10 se presentan los caudales máximos, medios y mínimos del río Sumapaz en la cuenca media, esta presenta los valores desde 1972 hasta el año de 2013; y se obtiene una descarga media anual de 26.46 m³/s.

Gráfica 10. Variación histórica de caudales cuenca media del río Sumapaz



Fuente: autores

7.2.2 Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico

Para fines de estudio se adoptará el método del IDEAM como valor teórico real para el cálculo del caudal ecológico del proyecto El Paso, ya que no se cuenta con la información exacta de la metodología, por ello se opta por aplicar el método propuesto por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM, empleado en el proyecto hidroeléctrico del río Chili, departamento de Tolima ya que el proyecto hidroeléctrico del río Chilí, “consiste en la construcción y operación de una planta de generación de energía a filo de agua, utilizando las aguas del río Chilí”⁹⁵, dicho proyecto cuenta con características similares a las del proyecto El Paso.

7.2.2.1 Método Montana (Tennat 1976)

Para establecer el periodo húmedo o seco se emplean las gráficas de variación interanual de caudales la cual se muestra en la ilustración 12 (remitirse al numeral 7.1.2.6), a partir de la cual se establece un periodo de caudales máximos o húmedo y uno de caudales de estiaje o seco.

Basados en la tabla 2 (Rango de valores recomendados para caudal ecológico (Qe) numeral 5.1.10), se puede decir que para la media multianual de caudal tomado de la ilustración 12, serie realizada a partir de la estación del municipio de Pandi y tomando un rango bueno, se deberá garantizar para un periodo húmedo en la corriente un caudal de 5.3 m³/s aproximadamente y de 10.56 m³/s para el periodo seco.

⁹⁵ GENERADORA UNIÓN S.A. E.S.P. Proyecto hidroeléctrico del río Chilí, Estudio de impacto ambiental, noviembre de 2010 pág. 91. (Citado el 10 de agosto de 2015)[En línea] disponible en: <https://goo.gl/c0UBDU>.

7.2.2.2 Legislación Asturiana – Principado de Asturias

Para el cálculo del caudal ecológico (Q_e) por el método de la Legislación Asturiana – Principado de Asturias se hace necesario tomar como referencia las ecuaciones 5, 6, 7, 8 y la ecuación 9.

Aplicando la ecuación 9 para determinar el Q_{347} y tomando un valor $a_0=0.5$

$$Q_{347} = \frac{0.5 * 26.42 m^3/s}{10} = 1.32 m^3/s$$

- Aplicando las ecuaciones 5, 6, 7 y 8.

$$Q_{ec} = 50 L/s$$

$$Q_{ec} = \frac{150 * \frac{1320 L}{s}}{\ln(100)^2} = 9336.27 L/s$$

$$Q_{ec} = 0.35 * \frac{1320 L}{s} = 462 L/s$$

$$Q_{ec} = 0.25 * \frac{1320 L}{s} + 75 = 405 L/s$$

- Aplicando el método de la Legislación Asturiana – Principado de Asturias el caudal se puede asumir un valor de caudal ecológico de 9.33 m³/s.

7.2.2.3 Método del IDEAM

La selección de este método se estableció de acuerdo a las series históricas de caudal medios mensuales tomados de la estación del municipio de Pandi con un registro de 42 años y que es analizada a nivel mensual multianual.

En la tabla 19, es señalado en color marrón el caudal medio mensual más bajo, en este caso corresponde al mes de enero, la marcha mensual de caudales guarda relación con la oscilación de las temperaturas y con los meses de mayor y menor valor de precipitación, esto se evidencia en la ilustración 5 e ilustración 12, ilustraciones de marcha anuales de la precipitación y caudales, puesto que en el mes de enero se presentan bajos valores de precipitación y de caudales.

Tabla 19. Resumen de caudales medios mensuales estación municipio de Pandi, Cundinamarca (m³/s)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	junio	Julio	Agosto	septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	VR Anual
MEDIOS	11,23	12,54	15,86	34,69	41,57	33,87	28,07	22,92	20,52	35,74	38,44	21,55	26,42
MAXIMOS	40,4	49,18	46,6	86,73	101,5	88,71	52,74	52,44	51,73	98,55	90,3	59,03	101,5
MINIMOS	3,339	2,936	2,835	5,53	11,67	10,77	11,6	9,855	7,53	9,406	15,42	6,793	2,84

Fuente: IDEAM

Según la información expuesta en las anteriores tablas, el Qe por el método del IDEAM sugiere un valor de 2.80m³/s.

7.2.2.4 Método Escoces

De acuerdo con el concepto del método Escocés obtenemos que los valores más bajos corresponden a los meses de enero, febrero y marzo con valores de 11.23 m³/s, 12.54 m³/s y 15.86 m³/s, respectivamente.

$$Q_{Prom\ 3\ meses} = \frac{11.23 + 12.54 + 15.86}{3} = 13.21m^3/s$$

$$Q_{Prom\ 3\ meses} = 13.21m^3/s$$

$$Q_{eco} = 0.20 * \frac{13.21m^3}{s} = 2.64\ m^3/s$$

$$Q_{eco} = 2.64\ m^3/s$$

El valor del caudal ecológico mínimo que se deberá dejar pasar por la hidroeléctrica del proyecto “El Paso” en el río Sumapaz, según el método escocés cuyo valor establecido es de 2.64 m³/s.

7.2.2.5 Método Ecuatoriano

Para el cálculo del caudal ecológico por el método Ecuatoriano se tomó el valor del caudal promedio mensual multianual que corresponde a un valor de 26.42 m³/s.

Aplicando el método Ecuatoriano, el cual aplica el 5% del caudal medio anual, arroja un valor de caudal ecológico de 1.321 m³/s

$$Q_{Prom\ 3\ meses} = 5\% * Q_{media\ anual}$$

$$Q_{medio\ anual} = 26.42\ m^3/s$$

$$Q_{ecol} = 0.05 * 26.42\ m^3/s$$

$$Q_{ecol} = 1.321\ m^3/s$$

7.2.2.6 Método de índices con la CDC

Tomando como referencia la información presentada en el numeral 5.1.10.1 relacionada con los métodos de cálculo del caudal ecológico, se referencia como se realiza la construcción de las CDC. A continuación se encuentran las CDC para el río Sumapaz, tomando en cuenta los datos suministrados por la estación del municipio de Pandi, esta permite determinar el Q_e de acuerdo con los índices establecidos en el método hidrológico de índices con la CDC.

La CDC para el río Sumapaz se construyó con los registros de caudal de la estación del municipio de Pandi, cuyo resultado se observa en la gráfica 11, no obstante, para este caso en particular se graficó la CDC con la ecuación de distribución normal, ya que esta es la que mejor se ajusta; sin embargo, se presenta como resumen en la tabla 23, los demás métodos de cálculo de la probabilidad de excedencia y sus respectivas variables descritas en la tabla 20, el valor del parámetro a para el desarrollo de la ecuación de Gringorten se presenta en la tabla 21. Para este caso en particular se emplearon las ecuaciones de Weibull, Hazen, y Gringorten, además de la de distribución normal.

Tabla 20. Ecuaciones empíricas de probabilidad

Ecuacion	Probabilidad de excedencia
Hazen	$(n-0,5)/N$
Weibull	$n/(N+1)$
Gringorten	$\frac{n-a}{N+1-2a}$

Fuente: <http://goo.gl/oFljVH>.

Donde,

N: número de años de registro o de elementos de la muestra.

n: número de orden de los valores ordenados de mayor a menor.

a: parámetro que depende de N como se observa en la Tabla 21.

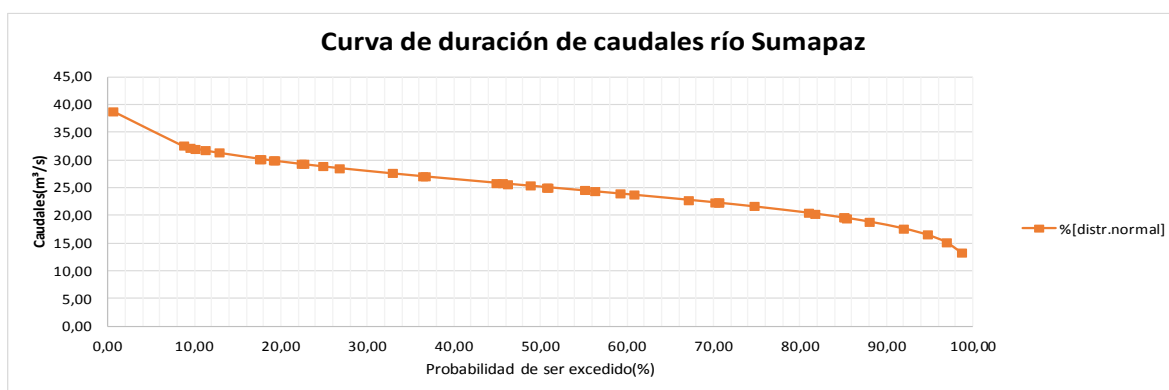
Tabla 21. Valores de a para la ecuación de Gringorten

n	10	20	30	40	50
a	0.448	0.443	0.442	0.441	0.440

Fuente: <http://goo.gl/oFljVH>

En la gráfica 11 se observa el comportamiento de la curva de duración de caudales empleando la ecuación de distribución normal.

Gráfica 11.CDC río Sumapaz-distribución normal



Fuente: autores

En la tabla 22 se realiza una descripción del uso de los caudales que deben ser determinados por el método de índices con la CDC.

Tabla 22. Descripción de los caudales propuestos por el método de índices

ÍNDICE DE FLUJO	USO
Q ₉₅	Usado como índice de caudal mínimo o indicador de condiciones mínimas extremas.
	Condición mínima mensual en los puntos de descarga.
	Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual.
	Usado para mantener la variación estacional mensual.
Q ₉₀	Usado como índice de caudal base.
	Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable.
	Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático.
	Caudal crítico considerado como el caudal mínimo limitante.
Q ₅₀ Mensual	Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un estimador conservativo de caudal base.
	Caudal base para el manejo y planeación del recurso.
	Usado para proteger la biota acuática.
	Mínimo caudal recomendado en río con represas.

Fuente: <http://goo.gl/oFIjVH>

Tabla 23. Resultados del cálculo del porcentaje del tiempo empleando diferentes ecuaciones empíricas

Orden	PORCENTAJE DE EXCEDENCIA DEL TIEMPO ($X \geq x$)					Caudal(m ³ /s)
	%[distr.normal]	%[Gringorten]	%[Weibull]	% [Hazen]	%[Gumbel]	
1	0,57	1,33	2,33	1,19	1,74	38,78
2	8,70	3,70	4,65	3,57	6,48	32,49
3	9,43	6,08	6,98	5,95	6,81	32,25
4	10,00	8,45	9,30	8,33	7,07	32,07
5	11,20	10,82	11,63	10,71	7,59	31,72
6	12,84	13,20	13,95	13,10	8,31	31,28
7	17,49	15,57	16,28	15,48	10,33	30,21
8	17,73	17,95	18,60	17,86	10,43	30,16
9	19,17	20,32	20,93	20,24	11,06	29,87
10	19,22	22,70	23,26	22,62	11,08	29,86
11	22,31	25,07	25,58	25,00	12,45	29,28
12	22,70	27,44	27,91	27,38	12,62	29,21
13	24,77	29,82	30,23	29,76	13,56	28,85
14	26,76	32,19	32,56	32,14	14,47	28,52
15	32,94	34,57	34,88	34,52	17,45	27,56
16	36,38	36,94	37,21	36,90	19,22	27,06
17	36,73	39,32	39,53	39,29	19,40	27,01
18	44,81	41,69	41,86	41,67	23,96	25,89
19	45,55	44,06	44,19	44,05	24,41	25,79
20	46,14	46,44	46,51	46,43	24,77	25,71
21	48,88	48,81	48,84	48,81	26,51	25,34
22	50,74	51,19	51,16	51,19	27,74	25,09
23	50,81	53,56	53,49	53,57	27,79	25,08
24	55,11	55,94	55,81	55,95	30,82	24,50
25	56,28	58,31	58,14	58,33	31,70	24,34
26	59,20	60,68	60,47	60,71	33,98	23,94
27	60,85	63,06	62,79	63,10	35,34	23,71
28	67,05	65,43	65,12	65,48	40,98	22,82
29	70,15	67,81	67,44	67,86	44,17	22,35
30	70,60	70,18	69,77	70,24	44,66	22,28
31	70,66	72,56	72,09	72,62	44,73	22,27
32	74,69	74,93	74,42	75,00	49,39	21,62
33	80,92	77,30	76,74	77,38	57,97	20,49
34	81,72	79,68	79,07	79,76	59,21	20,33
35	85,06	82,05	81,40	82,14	64,85	19,61
36	85,10	84,43	83,72	84,52	64,93	19,60
37	85,36	86,80	86,05	86,90	65,40	19,54
38	88,04	89,18	88,37	89,29	70,61	18,87
39	92,01	91,55	90,70	91,67	79,64	17,64
40	94,74	93,92	93,02	94,05	86,92	16,49
41	96,87	96,30	95,35	96,43	93,17	15,19
42	98,67	98,67	97,67	98,81	98,23	13,28

Fuente: autores

De acuerdo con las CDC presentadas previamente, el caudal ecológico para los diferentes índices que propone el método de cálculo, optando por el uso de la ecuación de distribución normal (Q50, Q90 y Q95) se consigna en la tabla 24.

Tabla 24.Resultados Qe río Sumapaz - método de índices de la CDC

Caudal ecologico	resultado Q(m ³ /s)
Q50	25.19
Q90	17.98
Q95	15.78

Fuente: autores

Para este caso se tomará el valor del Q₉₅ como referencia del caudal ecológico, en este caso adopta un valor de 15,78 m³/s, como se muestra en la tabla anterior.

A partir de la tabla 23 se puede deducir que las máximas variaciones en el cálculo de los porcentajes del tiempo de excedencia o igualación se van a presentar para los mayores órdenes de magnitud de caudal o para los datos iniciales del registro, y a medida que se presente un aumento en la lista de registros, se puede observar que el resultado del cálculo comienza a ser similar, comportamiento que se presenta a partir del orden 4 a 5, aproximadamente, mientras que para los valores finales de la muestra se presentan resultados similares (orden 41 y 42), dado el caso que la muestra fuese mayor los últimos resultados empezarían a mostrar cada vez más similitud, resultados que ratifican la poca influencia que tiene realizar el cómputo del porcentaje del tiempo en que los caudales son igualados o excedidos haciendo uso de la ecuación de distribución normal, Hazen, Weibull, Gringorten, etc.

En la tabla 25 se consignan los valores del caudal ecológico calculado por cada uno de los métodos y se evalúa si el método es aplicable o no a nivel nacional.

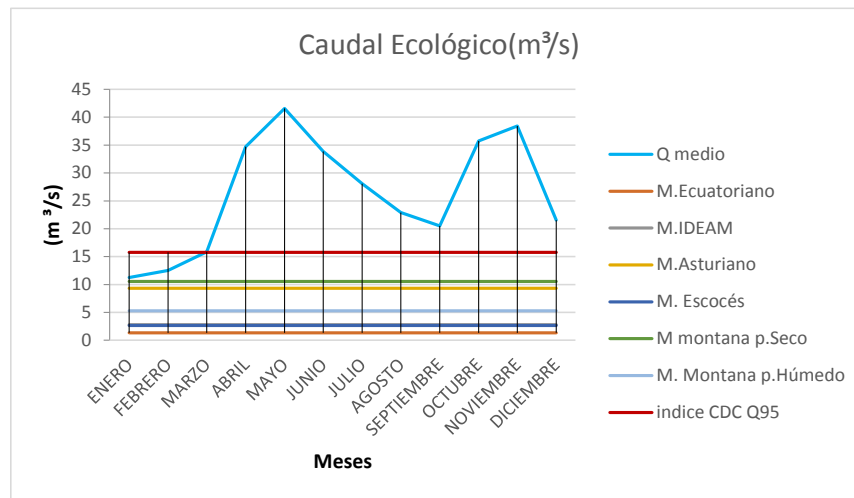
Tabla 25.Resumen de valores de Qe

Nº	MÉTODO	VALOR DEL Q _e (m ³ /s)	Es aplicable en Colombia
1	M. Montana	5,3*-10,56	No
2	M. Legislación Asturiana	9,33	No
3	M. IDEAM	2,8	Si
4	M. Escocés	2,64	No
5	M. Ecuatoriano	1,32	Si
6	M. de índices con CDC	15,78	Si
promedio	$\bar{X}$ (valores 3 5 y 6)	6,63	

Fuente: autores

En la gráfica 12, se observa el comportamiento del caudal ecológico calculado por diferentes métodos de enfoque hidrológico contrastado frente al caudal medio mensual de la cuenca media del río Sumapaz.

Gráfica 12. Q medio vs Caudal ecológico por varios métodos hidrológicos

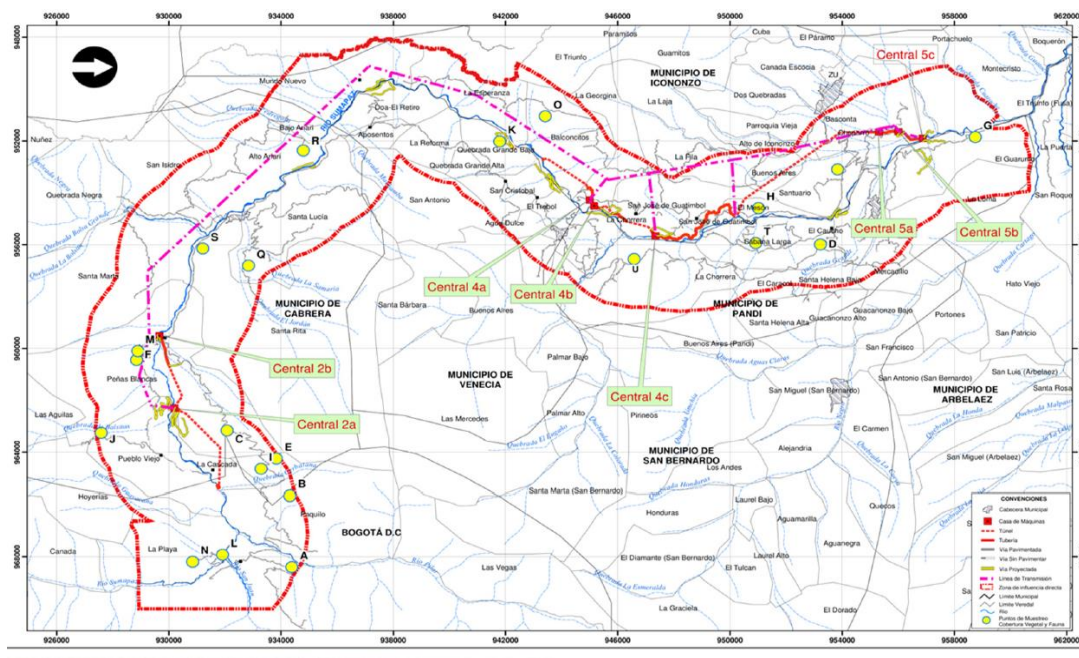


Fuente: autores

7.3 ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL AFECTADA Y LOS VOLÚMENES DE EXCAVACIÓN POR LAS OBRAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA.

La empresa EMGESA instaló 22 puntos de muestreo para la cobertura vegetal y la fauna (referenciados con círculos de color amarillo), de los cuales 3 están sobre el municipio de Icononzo (véase ilustración 16).

Ilustración 16. Puntos de muestreo de cobertura vegetal y fauna

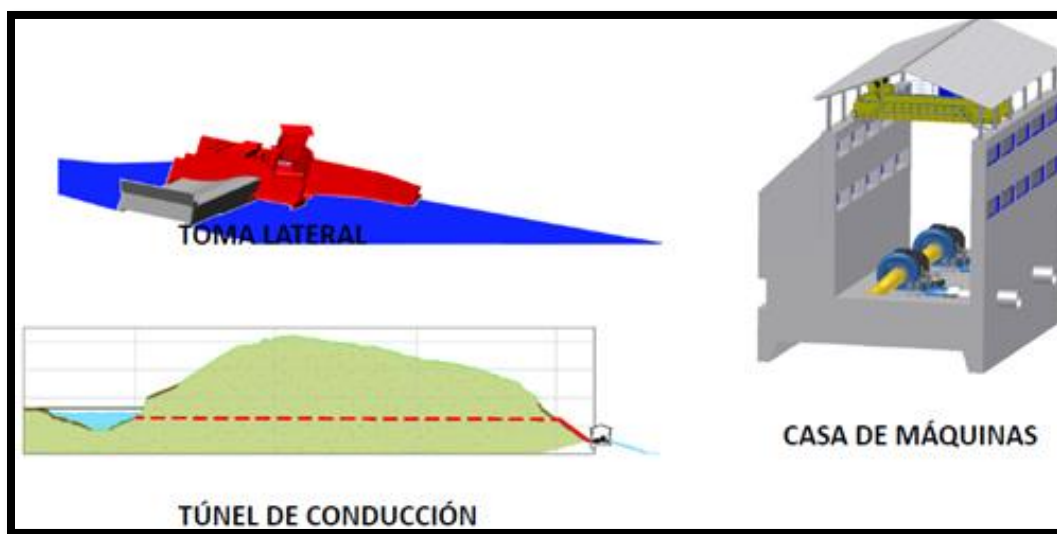


Fuente: EMGESA, Proyecto hidroeléctrico El Paso. 2013

“En el municipio de Icononzo se reportan las siguientes especies vegetales Carbonero (*Calliandra* sp.), Sauce (*Salix humboldtiana*), Chagualo (*Rapanea Guianensis*), Cedrillo (*Guarea* sp.), Duraznillo (*Abatia vebascifolia*) y Encenillo (*Weinmannia* sp.)”⁹⁶.

En la ilustración 17 se puede observar un esquema general del túnel de conducción a la casa de máquinas, como se realizará la toma de agua y por último un esquema de las casas de máquinas que se van a desarrollar en el proyecto El Paso.

Ilustración 17. Esquema de las obras civiles del proyecto El Paso



Fuente: EMGESA, Proyecto hidroeléctrico El Paso.2013

Para el cálculo de volúmenes de tierra se deberá tener en cuenta cada una de las obras y sus dimensiones, que se desarrollarán en el municipio de Icononzo las cuales son descritas en la tabla 26.

⁹⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución Número (0252) (13-02-2009). Por la cual se resuelve un conflicto de competencias para el trámite de una Licencia Ambiental. 5 p.

Tabla 26. Actividades a realizar en lo que respecta al proyecto en la jurisdicción del municipio de Icononzo.

Obras a desarrollar en el municipio de Icononzo, Tolima (CORTOLIMA)
• Obras de captación sobre el río Sumapaz
• Túnel de desviación de 200 m. de longitud
• Túnel de conducción de 4700 m. de longitud
• Tubería a presión de 1600 m. de longitud
• Casa de máquinas
• Adecuación de la vía de acceso existente hasta quebrada La Laja 700 m. y construcción de la vía nueva hasta punto de casa de máquinas longitud 850m.
• Construcción de la Subestación de Conexión

Fuente: <http://goo.gl/yMcTUa>

De acuerdo con la resolución número (0252) se describen las obras que se llevarán a cabo en el municipio de Icononzo, tales como obras de captación, obras de conducción, casa de máquinas, subestación y línea de transmisión, y vías de acceso. A continuación se presenta dicha información tomada de la resolución:

7.3.1 Obras de captación

De acuerdo con las condiciones del cauce del río Sumapaz y las laderas adyacentes a éste, se definió que las obras de derivación se ubicarán aproximadamente en la cota 850 msnm.

La derivación de caudales se realizará a partir de la construcción de un azud en concreto con características de 5 m de altura y 30 m de largo sobre el lecho del río, el cual contará en la lado izquierdo con una descarga de fondo la cual está conformada por una compuerta radial con dimensiones de 5 m de alto y 5 m de ancho, cuando la compuerta este totalmente abierta permitirá la evacuación de sedimentos que periódicamente se acumulan en la captación. La compuerta podrá ser operada manual y mecánicamente.

Para la captación se dispondrá una toma de tipo lateral en el lado izquierdo del azud, conformado por aberturas rectangulares dimensionadas para derivar el caudal hacia el sistema de conducción. Pasadas las aberturas de ingreso se llegará a un tanque con trampa de sedimentos que conecta con la estructura de conducción.

En el azud de derivación se colocará una descarga independiente para la entrega permanente hacia aguas abajo del caudal de garantía ambiental.

El sistema del desarenador, contará con dos cámaras independientes y el tramo inicial del desarenador tendrá un vertedero de excesos para retornar al río las aguas captadas excedente que pasen en épocas de crecientes⁹⁷.

7.3.2 Obras de conducción

Se prevé la necesidad de proyectar muros de contención para proteger la zona del desarenador de los procesos erosivos del río. A la salida del desarenador se continuará por un box culvert, el cual se conectará directamente con el túnel de conducción.

El túnel será por la margen izquierda del río, será excavado parte en roca, material de triturado o consolidado, con blindaje, soportes de acero, concreto reforzado con pernos de anclaje y concreto lanzado o neumático donde se requiera.

Tendrá un diámetro efectivo de 3,1 m., una pendiente del 2 % y una longitud aproximada de 4700 m., con un alineamiento paralelo al río Sumapaz.

En los últimos 100 m. de la salida del túnel habrá un tapón de concreto, en el cual se embebe la tubería de acero a presión. Se construirá una almenara aguas arriba del tapón (municipio de Icononzo) para regular las sobre presiones producidas por el arranque y la parada de las unidades generadoras.

A la salida del túnel se ubicará una válvula mariposa, a la cual se conectará la tubería a presión en GRP de 1600 m. la cual deberá cruzar la quebrada la Laja (municipio de Icononzo) por medio de un paso elevado y continuará por el cerro que separa la quebrada la Laja del río Sumapaz hasta llegar al sitio de Casa de máquinas.

En el extremo final la tubería se empalmará mediante una bifurcación para las unidades de generación en la casa de máquinas. En los quiebres de alineamiento horizontal o vertical la tubería tendrá anclajes en concreto para controlar las fuerzas de empuje hidráulico que se producen en los cambios de alineamiento⁹⁸.

7.3.3 Casa de máquinas

La casa de máquinas del proyecto será superficial de tipo convencional y estará localizada sobre la margen izquierda del río Sumapaz en jurisdicción del municipio de Icononzo, unos 80 metros aguas arriba de la confluencia de la quebrada la Laja con el río Sumapaz

La casa de máquinas alojará dos unidades generadoras de eje horizontal, equipadas con turbinas tipo Francis, las cuales se conectarán a generadores del tipo sincrónico con una capacidad instalada de 20 MW.

En la casa de máquinas se ubicarán las válvulas esféricas antes de cada turbina, también un puente grúa para el montaje y mantenimiento de las

⁹⁷ Ibíd., p 6.

⁹⁸ Ibíd., p 6.

unidades generadoras, los tableros de control, la sala de montaje, oficinas, servicios sanitarios, equipos auxiliares, habitación para operador etc.

Al exterior de la casa de máquinas, se localizarán los transformadores de potencia, el patio de conexiones y la subestación⁹⁹.

7.3.4 Subestación y línea de transmisión

La subestación eléctrica se construirá en inmediaciones de la casa de máquinas, el patio de la subestación contará con dos transformadores elevadores y el equipo de maniobra requerida para la conexión a 115 kV. a la red de 12,5 MVA, 13,8/115 kV.

Se ha considerado que la central se conectará al sistema existente mediante la construcción de una línea a 115 kV de 44 Km. hasta la subestación de Fusagasugá.

Los estudios de conexión eléctrica a realizar más adelante indicarán si hay otras opciones posibles para permitir la conexión con el sistema¹⁰⁰.

7.3.5 Vías de acceso

La vía de acceso al sitio de captación del proyecto, se localiza en jurisdicción del municipio de Icononzo, en la vereda Santuario.

De la vía que conduce de Pandi a Icononzo, aproximadamente en el kilómetro 3,7, se toma el desvío que conduce en dirección a la vereda El Mesón y se recorren aproximadamente 2,4 Km. para llegar al sitio de captación.

En este punto la vía se encuentra adyacente al río y existe actualmente un carreteable que desciende hasta el río; este sería el acceso al portal de entrada del túnel y al sitio de captación.

Para poder transportar los equipos y materiales involucrados con la construcción del proyecto, puede requerirse adecuar parte de la vía que conduce hacia la vereda El Mesón desde la vía que conduce de Pandi a Icononzo.

Para tener acceso al portal de salida del túnel y a la cámara de válvulas se toma la vía que conduce de Pandi a Icononzo y aproximadamente en el kilómetro 3,2, se toma la carretera que conduce hacia el río Juan López en dirección Noroeste. Se debe conducir aproximadamente 1,8 Km. por esta vía para llegar al sitio de casa de válvulas y al portal de salida del túnel. Estos dos sitios, se encuentran muy cerca de la vía.

Para llegar al sitio de casa de máquinas, se tiene previsto utilizar la misma vía que conduce a la casa de válvulas, sin embargo, cerca de este sitio ya existe un camino de cuatro metros de ancho que baja hasta la quebrada la Laja. Se pretende utilizar este camino como trazado para una nueva vía que conducirá al sitio de casa de máquinas y tiene una longitud de 1,6 Km.

⁹⁹ Ibíd., p 7.

¹⁰⁰ Ibíd., p 7.

Adicionalmente se debe construir un pequeño puente, para poder cruzar la quebrada y poder llevar los equipos hasta el lugar de emplazamiento de la casa de máquinas¹⁰¹.

En la tabla 27 se describe la demanda de recursos que se utilizarán en el municipio de Icononzo, para realizar el proyecto.

Tabla 27. Demanda de recursos para el municipio de Icononzo

Recurso	Icononzo
Captación de agua	14,1m ³ /s
Aprovechamiento forestal	12 Ha.
Generación de residuos industriales y domésticos	1 m ³ /s apróx

Fuente: <http://goo.gl/yMcTUa>

Tabla 28. Relación de áreas entre cada una de las Unidades de Ordenación Forestal

UNIDAD	NOMBRE DE LA UNIDAD	AREA DE LA UNIDAD (has)	RELACION % CON EL ÁREA DEL DEPARTAMENTO
I	Mariquita-Armero	107.590	4,49
II	Herveo-Libano	71.271	2,97
III	Sta. Isabel-Anzoategui	64.120	2,67
IV	Venadillo-Alvarado	68.273	2,85
V	Cajamarca-Ibagué	123.197	5,14
VI	Icononzo-Villarica	85.332	3,56
VII	San Antonio-Chaparral	176.223	7,35
VIII	Rioblanco-Planadas	128.211	5,35
TOTAL DE LAS UNIDADES		824.219	34,37

Fuente: <http://goo.gl/YspmqO>

En la tabla 29, se puede observar el cálculo de las áreas que se van a ver afectadas debido a las obras que se van a desarrollar en el municipio de Icononzo. El área afectada en el proyecto El Paso que abarca las veredas San José de Guatimbol, El Santuario, El Mesón y el Chaparro, muestra un valor estimado de cobertura vegetal que se verá afectado debido a las obras en el municipio de Icononzo, de aproximadamente de 12.87 hectáreas. Cabe resaltar que este municipio tiene un área estimada de cobertura vegetal de 85.332 hectáreas como se muestra en la tabla 28.

¹⁰¹ Ibíd., p 7.

Tabla 29. Área de cobertura vegetal afectada debido a las diferentes obras.

Estimación de áreas de cobertura vegetal afectada	
Descripción de la obra	Área(m ²)
ÁREA CASA DE MÁQUINAS	2504
ADECUACIÓN DE LAS VÍAS	2800
ÁREA AFECTADA VÍA NUEVA	3400
ÁREA DE BOTADEROS	120000
TOTAL AREA AFECTADA	128704

Fuente: autores

En la tabla 30, se puede evidenciar el cálculo de volumen estimado que afectará la zona de Icononzo, el valor de extracción de tierras que se estimó es de aproximadamente de 36983.61 m³, todo ello haciendo precisión únicamente en el movimiento de tierra para realizar los túneles, el cual afecta un total de cuatro veredas como los son San José de Guatimbol, el Santuario, el Mesón y el Chaparro.

Tabla 30. Estimación de volúmenes de tierra.

Estimación de extracción de Volúmenes	
Descripción de la obra	Volumen(m ³)
VOLUMEN TUNEL DESVIACION EN (m ³)	1509,54
VOLUMEN TUNEL CONDUCCION (m ³)	35474,08
VOLUMEN TOTAL EN (m ³)	46229,52

Fuente: autores

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 HIDROLOGÍA ESTACIÓN MUNICIPIO DE PANDI

8.1.1 Precipitación

Los valores de precipitación más altos se presentan en los meses de marzo y abril, con 129.3 mm y 145.9 mm respectivamente, y se presenta un segundo periodo de altas precipitaciones en octubre y noviembre, con valores de 155.6 mm y 156.9 mm respectivamente. Se presentó un tipo de distribución bimodal, con épocas secas en enero, junio, julio agosto y septiembre. Los meses más húmedos son octubre y noviembre y el mes más seco es agosto.

Cuando se analizó la variación interanual en una serie de 42 años (periodo comprendido desde 1972 hasta 2013) se detectó cierto patrón asociado a los Fenómenos del Niño y de la Niña. En los años 1977, 1986, 1992, 2009, 2012 y 2013, donde se puede inferir que el Fenómeno de El Niño se acentuó. El Fenómeno de La Niña aparece levemente en los años 1972, 1976, 1981, 1982, 1988 y 1998. Los años 2000, 2010 y 2011 se pueden considerar como años húmedos, calificándose como años típicos del Fenómeno de la Niña, todos estos pasando los 1150 mm de lluvia anual.

8.1.2 Temperatura

En la serie histórica de 1972 al 2013 la temperatura registró valores promedios de temperatura máxima igual a 26.2 °C, de temperatura media de 23.7 °C y temperatura mínima de 21.5 °C.

Las altas temperaturas se asocian con el Fenómeno de El Niño en los periodos de 2001 hasta el año 2005, superando los 24 °C, en el año 2000 es un año típico del Fenómeno de La Niña ya que se presentan altas precipitaciones una temperatura muy baja con un valor de tan sólo 22.6 °C, siendo este el año con menor temperatura

Se consideran periodos fríos de 1974, 1975, 1984, 1999 y 2000. Las altas temperaturas, por encima de la media multianual, se asocian con el Fenómeno de El Niño (desde 2001 a 2005, y en los años 1983, 2009 y 2010).

8.1.3 Humedad relativa

La humedad relativa registró un valor promedio de 72.92%, siendo 78% el más alto en el mes de mayo y noviembre, guardando así estrecha relación con los meses de mayor pluviosidad del año, y 66% el más bajo en el mes de agosto (siendo este el mes que presenta valor más bajo de precipitación). Según la variación interanual el año con mayor humedad relativa fue, el 2008, con una humedad de 85%, asociado con el Fenómeno de la Niña. Los años con menor valor de humedad relativa fueron 1992 y 2001, con una humedad promedio del 67%, siendo considerado estos años como típicos del Fenómeno del Niño. En el año 2008 la humedad relativa con mayor valor 85 % en este caso, guarda relación con el descenso de la temperatura y un aumento significativo de las precipitaciones para este año.

8.1.4 Balance hídrico

La clasificación climática según Thornthwaite para esta estación es C₂, clima Sub húmedo-húmedo, con un déficit potencial, eso se debe a que la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación, y por ende no existe una disponibilidad de agua en el suelo durante todo.

8.1.5 Caudales

Para el periodo comprendido entre 2012 y 2013 se presentan algunas anomalías en los datos, ya que estos años son asociados con el Fenómeno de El Niño, en estos años se presentan valores bajos de precipitaciones y un claro aumento en las temperaturas siendo el 2013 uno de los años más calientes con un valor registrado de 24.5 °C, sin embargo tanto el 2012 como el 2013 presentaron valores representativos de caudal.

Por otra parte, el año de 1999 está claramente asociado con el fenómeno de La Niña, ya que se presentaron precipitaciones por encima de 1500 mm, y con una temperatura muy por debajo de la media interanual, siendo este el año que presenta como pico en los valores de caudales con un valor de 38.78 m³/s; por otra parte son considerados los años de 1984, 1999, 2010, 2011 y 2012 como periodos húmedos ya que representan el 15.82% del caudal interanual. Los años 2010, 2011 y 2012 presentan un valor casi constante de caudal, como un valor promedio de 32.27 m³/s.

8.1.6 Curvas IDF

Dentro de los cálculos de las curvas de intensidad-duración-frecuencia, se tomaron periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años y se identificaron los valores de precipitaciones máximas en 24 horas, obteniéndose así, valores de 56.73, 76.48, 89.55, 106.07, 118.32, 125.45, y 130.49 mm, respectivamente, estos datos fueron resumidos en la tabla 26.

Tabla 31. Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno

Tiempo de retorno (años)	P. máx. en 24 hrs. (mm)
2	56.73
5	76.48
10	9.55
25	106.07
50	118.32
75	125.45
100	130.49

Fuente: autores

8.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO SUMAPAZ

Es evidente la pluralidad de resultados, en cuanto a los valores que ofrece un método de cálculo a otro, dentro de los métodos utilizados para la determinación de caudal ecológico se escogieron 6 métodos de los cuales son aplicables en Colombia 3 de ellos. Los métodos aplicados son el método del IDEAM, el método Ecuatoriano y el método de índice calculado con la curva de duración de caudales (CDC), estos métodos pueden ser observados resumidos en la tabla 25.

De acuerdo con los métodos de cálculo empleados, es evidente que el método que aporta el mayor valor de caudal ecológico es el método de índice con CDC, pues este presenta un valor de 15,78 m³/s, siendo este un valor generoso en cuanto a la magnitud del caudal ecológico se refiere, esto se debe a que el menor valor de caudales medios mensuales registrados en la serie de los 42 años, es de 13,28 m³/s. Por otra parte, el método oficial utilizado para el cálculo del caudal ecológico en este proyecto fue el método del IDEAM el cual otorga un valor de 2.80 m³/s, este valor contrastado con los valores aplicados en Colombia es aceptable, pues el valor del método Ecuatoriano representa un 47,14% referente al método del IDEAM, el método de índices no es contrastado, ya que representa un valor muy alto respecto al método del IDEAM. Por otra parte, contrastado con métodos europeos el valor se puede suponer como bajo, ya que para el método de Legislación Asturiana se obtiene un valor de 9,33 m³/s, y por el método de Montana se obtiene valores de 5,3 m³/s y 10,56 m³/s, para periodo húmedo y seco respectivamente; tan sólo un método europeo está por debajo del valor del caudal ecológico definido para este proyecto, tomando como referencia el método de cálculo escocés, ya que este representa un 94.28% respecto al valor oficial.

No obstante, cabe resaltar que el valor promedio de los métodos que son aplicables en Colombia otorga un valor de caudal ecológico de 6.63 m³/s.

8.3 ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL AFECTADA Y LOS VOLÚMENES DE EXCAVACIÓN POR LAS OBRAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA

La estimación del área de cobertura afectada se estimó en un total de 12.87 hectáreas aproximadamente para este caso en particular (véase la tabla 29). Si se toma como referencia la Tabla 28, en la cual se muestra el valor de relación de áreas de cobertura vegetal para el municipio de Icononzo, descrita como la unidad VI, se puede afirmar que al menos un 0.015% de cobertura vegetal del municipio se verá afectada debido a las obras que se llevarán a cabo.

Por otra parte, el volumen de tierras que se va a excavar para el desarrollo de las obras arroja un valor aproximado de 46229.52 m³ tomando como referencia un factor de expansión de un 25% dicho valor de volumen excavado no constituye un valor representativo.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-Se presenta escasez de agua en algunos periodos del año, específicamente en los meses enero, junio julio agosto y septiembre, esto se debe a las altas temperaturas y las bajas precipitaciones que se presentan en esos meses a excepción del mes de junio en el cual la temperatura no es tan alta pero no se presenta un valor de precipitación considerable. Por otra parte, los periodos con exceso de agua se presentan en dos periodos el primero comprendido desde el mes de febrero hasta el mes de mayo y el segundo desde octubre a diciembre, esto se debe por la relación entre la temperatura y los valores de precipitación, ya que en estos periodos se presentan valores altos de pluviosidad y bajas concentraciones de temperatura, a excepción de febrero; asimismo estos periodos guardan estrecha relación con la variación de los valores de caudales en la cuenca media del río Sumapaz.

-El valor oficial para este proyecto se obtuvo aplicando el método del cálculo de caudal ecológico (Qe) propuesto por el IDEAM, siendo este aproximadamente de $2.80 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual es un valor bajo comparado con el promedio obtenido de los métodos aplicados en Colombia, el cual otorga un valor aproximado de $6.63 \text{ m}^3/\text{s}$, por otra parte el valor también es bajo frente a valores calculados por métodos europeos, a excepción del método escoces.

No obstante cabe resaltar que el valor es aceptable, ya que el cálculo del valor ecológico por el método Ecuatoriano, siendo un método aplicable en Colombia arroja un valor de $1.32 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa que el valor es inferior en por lo menos un 52% si se compara con el valor definido para el proyecto, además algunos autores proponen tan sólo el 5 o 10% del caudal medio anual. Por último, es evidente que se presenta pluralidad en los datos, ya que cada método expone una manera particular de calcular el caudal ecológico (Qe).

-El área de cobertura estimada que se verá afectada para el municipio de Icononzo debido a las obras civiles realizadas para el desarrollo de la hidroeléctrica otorga un valor aproximado de 12.87 hectáreas lo que representa por lo menos un 0.015% de afectación a la cobertura vegetal del municipio de Icononzo, lo cual representa un valor bajo.

Finalmente, el cálculo de volúmenes de tierra a extraer para el desarrollo de las obras civiles que se llevarán a cabo, teniendo en cuenta únicamente el municipio de Icononzo Por otra parte, el volumen de tierras que se va a excavar para el desarrollo de las obras arroja un valor aproximado de 46229.52 m^3 teniendo en cuenta un valor de expansión de un 25% lo cual no constituye un valor representativo. En general se puede afirmar que en cuanto a la afectación de la cobertura vegetal y de extracción de tierras no es muy alto si se compara con proyectos de gran envergadura.

-A pesar de que las autoridades ambientales deben fijar el caudal ecológico mediante estudios técnicos, es evidente que se deben implementar esquemas de trabajo más sofisticados para realizar propuestas que permitan una aproximación a un valor más confiable de caudales ambientales en Colombia.

-Algunas de las metodologías para el cálculo del caudal ecológico que se emplearon en este documento, no son aplicables en Colombia ya que estas han surgido en países donde sus ríos y ecosistemas presentan características muy particulares. Se debe tener en cuenta las consideraciones anteriores a la hora de efectuar estas metodologías en Colombia.

-Por último se recomienda que en periodos de escasez de agua, específicamente en el periodo comprendido desde el mes de junio hasta el mes de septiembre el proyecto hidroeléctrico El Paso, no debería entrar en funcionamiento para evitar mayor impacto ambiental, no sólo en la zona donde opera el proyecto, sino aguas abajo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

APARICIO MIJARES, Francisco Jair. Fundamentos de hidrología de superficie, Ed Limusa, SA, Cap. 9. Probabilidad y estadística en hidrología, pág. 279.

BARRIOS, Eugenio. Caudal ecológico, salud al ambiente agua para la gente, En: WWF Factsheet (World Wide Fund for Nature. 2010. Col. Hipódromo, México. D.F. [en línea]. [Citado en 2014]. Disponible en: http://awsassets.panda.org/downloads/fs_caudal_ecologico.pdf.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución N° 0769 (05/08/2002). Por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. Bogotá 2002.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto n° 1429 (7/08/2002).Diario oficial. Bogotá 2002. N. 44893.

COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. ACTO Legislativo (01/07/2011). Por el cual se establece el principio de la sostenibilidad fiscal. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2011. 48117

COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Decreto 1541 (28/07/1993). Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.

COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Decreto-Ley 1421 (1993) y la ley 1259 (2008). Por medio de la cual se instaure la aplicación del Comparendo ambiental. Anales del Concejo Bogotá D.C. 1993 y 2008.

COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. ley 99 (22/12/1993). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá D.C. 1993.N 41146.

COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Proyecto de Acuerdo 122 (2010). Por El Cual Se Establecen Los Lineamientos Para La Formulación De La Política Publica Distrital De Cultura Ciudadana. Anales del concejo. Bogotá D.C.2010.

COLOMBIA.CONCEJO DE BOGOTÁ D.C. Proyecto De Acuerdo No. 186 (2008). Por El Cual Se Ordena La Creación Del Estándar Único De Construcción Sostenible Para El Distrito Capital Y Se Dictan Otras Disposiciones. Anales del Concejo. Bogotá D.C. 2008.

CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M. Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias. Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito Posgrados En Ingeniería Civil, Bogotá 2013. [En línea. Disponible en: <http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/75/1/DOCUMENTO%20-%20FINAL.pdf>.

ESTRADA GÓMEZ, Yuri Andrea y ROJAS HERRERA, Diego Alexis. Comparación entre el método racional y el método del número de curva para la estimación de caudales, caso de estudio puente vehicular del proyecto residencial refugio de Bassedonia Tesis de grado Pág. [en línea] disponible en: <http://goo.gl/Ojk8x9>.

GARCÍA DE JALÓN, Diego. La regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad. Universidad Politécnica de Madrid, España. [En línea]. Disponible en: https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/6B-S2-P1_Diego%20G%20JalonACC.pdf.

GARCÍA NARANJO, Manuel, La importancia de las pruebas de bondad de ajuste, Septiembre de 2011 pág. 28. [En línea] disponible en: <http://es.slideshare.net/mgarcianaranjo/pruebas-de-bondad-de-ajuste-vfinal>.

GENERADORA UNIÓN S.A. E.S.P. Proyecto hidroeléctrico del río Chilí, Estudio de impacto ambiental, noviembre de 2010 pág. 91. [En línea] disponible en: <https://goo.gl/c0UBDU>.

HERNANDEZ TORRES, Camilo Andrés. Análisis ambiental de las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia aplicando metodología multiobjetivo. Universidad De La Salle Facultad De Ingeniería. Bogotá 2011. Tesis de grado. [En línea]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14037/T41.11%20H430a.pdf?sequence=2>.

INSTITUTO LATINOAMERICANO PARA UNA SOCIEDAD Y UN DERECHO ALTERNATIVO-ILSA, El río Sumapaz proyecto hidroeléctrico “el paso”: agua y vida campesina en riesgo. [En línea]. Disponible en: <http://www.colectivodeabogados.org/IMG/pdf/sumapaz.pdf>.

LEPE, José Luis, Diseño de Pequeñas Centrales. En: United State Departament of the interior of Breads. Washington D.C. 1974 120p.

MORA NAVARRO, Diego Camilo y HURTADO LIÉVANO, Jorge Mauricio. Guía para estudio de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería civil, Bogotá 2004, pag 13. [En línea]. Disponible en: <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis15.pdf>.

MORALES, Sergio et al. Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria. Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000200024&script=sci_arttext.

PARRA RODRIGUEZ, Emerson A. Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos. [En línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/8391/>.

RÍOS CANDO, Luis Enrique. Incidencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador. Escuela Politécnica nacional, Facultad de ingeniería civil y ambiental. (Citado en septiembre de 2015) [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1538/1/CD-2721.pdf>.

RUEDA RINCON, Sergio Iván. Actualidad y perspectiva de la pequeña generación hidroeléctrica. Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011. 104 h.

SANCHEZ F., Javier. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA (España). Gráficos de probabilidad. [En línea]. Disponible en: <http://hidrologia.usal.es/Complementos/estadistica/Graficos-de-probabilidad.pdf>.

TORRES QUINTERO, Ernesto. Investigación en pequeñas centrales en Colombia. Tesis de grado pág. 2. [En línea]. Disponible en: <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-12/ar9.pdf>.

VALENCIA VELEZ, Alejandro y RINCON CASTRO, Cristian Camilo. Criterios De Diseño Y Montaje Para Una Central Hidroeléctrica Con Capacidad De Generación De 20 MW. Universidad Autónoma De Occidente Facultad De Ingeniería Departamento De Mecánica Y Energética Programa De Ingeniería Mecánica Santiago De Cali 2013. Tesis de grado. [En línea]. Disponible en: <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/5732/1/T03765.pdf>.

VÉLEZ, Jaime, *et al.* Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas intensidad – frecuencia – duración en Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. (En línea). Disponible en: http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero06/06_10.pdf

VILLANUEVA URE, Justo Reynaldo y ALATA REY, Josue Eliezer. Análisis Y Propuesta De Una Metodología Para La Determinación Del Caudal Ecológico En Centrales Hidroeléctricas Del Perú, Aplicación A Un Caso Típico. Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Ingeniería Mecánica. Lima-Perú. (Citado en septiembre de 2015). [En línea]. Disponible en: http://www.osinerg.gob.pe/newweb/uploads/Estudios_Economicos/Reynaldo-Alata.pdf.

ZURITA RUIZ. José. Obras capítulo 4.En: Obras Hidráulicas. 4. ed. Peru.1982.p.80-81.