

Master Thesis | Tesis de Maestría

submitted within the UNIGIS MSc programme
presentada para el Programa UNIGIS MSc
at/en

Interfaculty Department of Geoinformatics- Z_GIS
Departamento de Geomática – Z_GIS
University of Salzburg | Universidad de Salzburg

**Aplicación de los sistemas información geográfica para el análisis
de la oferta y demanda de agua en la cuenca del rio Pisque -
Ecuador**

**Application of geographic information systems for the analysis of
water supply and demand in the Pisque river basin-Ecuador**

by/por

Ing. Catalina Elizabeth Sandoval Montenegro

01322636

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of
the degree of

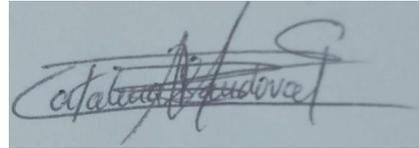
Master of Science– MSc
Advisor | Supervisor:

Leonardo Zurita Arthos PhD

Quito-Ecuador, Junio 2019

Compromiso de Ciencia

Por medio del presente documento, incluyendo mi firma personal certifico y aseguro que mi tesis es completamente el resultado de mi propio trabajo. He citado todas las fuentes que he usado en mi tesis y en todos los casos he indicado su origen.

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink. The signature is cursive and appears to read 'Catalina Elizabeth Sandoval Montenegro'.

Quito, septiembre 2019

Catalina Elizabeth Sandoval Montenegro

Resumen

La presente investigación tiene por objetivo aplicar los sistemas de información geográfica mediante el análisis de la oferta y demanda de agua con la información existente, para estimar la disponibilidad del recurso en la cuenca del Río Pisque, donde se localizan los territorios de los cantones Cayambe, Pedro Moncayo y una parte del cantón Quito (Ecuador).

Junto a las herramientas de la SIG, se utilizó información del INAMHI, SENAGUA, INEC, UPS, IEE, fórmulas para caracterizar morfométricamente la cuenca, el método Pfafstetter y parte de la metodología de IDEAM para estimar el índice de escasez. Del desarrollo de la metodología se calcularon las características morfométricas de la cuenca relacionadas con la forma, el relieve y la red hídrica. Se determinó la oferta hídrica de la cuenca calculando el escurrimiento superficial total en $m^3/año$ y la demanda hídrica de la cuenca, con las concesiones otorgadas para diferentes usos igual en $m^3/año$. Con esta información se realizó la relación para calcular el índice de escasez de la cuenca.

Los resultados obtenidos para las características morfométricas de la cuenca del Río Pisque indican que la cuenca no puede captar demasiada agua debido a su forma y que el agua captada tiende a realizar recorridos cortos debido a la pendiente, y provocando un escurrimiento rápido. La cuenca del Río Pisque tiene un índice de escasez elevado debido a que la demanda hídrica es alta y la mayor parte del agua es utilizada en el riego. Finalmente, se recomienda monitorear tanto la oferta como en la demanda del recurso hídrico, para que a futuro se pueda realizar una mejor distribución del agua en la cuenca.

Palabras calves

Sistemas de información geográfica, características morfométricas, oferta hídrica, demanda hídrica, Índice de escasez, cuenca hidrográfica.

Abstract

The main objective of this work is to apply geographic information systems through the analysis of offer and demand of water with existing information, to estimate the availability of the resource in the Pisque River basin, where the territories of the Cayambe, Pedro Moncayo and a part of the Quito cantons are located (Ecuador).

Along with GIS tools, information from INAMHI, SENAGUA, INEC, UPS, IEE, formulas to morphometrically characterize a water basin, the Pfafstetter method and part of the IDEAM methodology to estimate scarcity index were used. From the development of the methodology, the morphometric characteristics of the basin related to the shape, relief and water network were calculated. The water supply of the basin was determined by calculating the total surface runoff in m³ / year and the water demand of the basin, according to the concessions granted for different uses in m³ / year as well. With this information, the relationship was made to calculate the scarcity index of the basin.

The obtained results for Pisque River Basin morphometric characteristics, indicates that the basin can not capture too much water due to its shape and that the water collected tends to make short runs along its slope, and causing a rapid runoff. The Pisque River basin has a high scarcity index because water demand is high and most of the water is used for irrigation. Finally, it is recommended to monitor both supply and demand of water resources, so that in the future a better distribution of water in the basin can be made.

Key words

Geographic information systems, morphometric characteristics, water offer, water demand, scarcity index, hydrographic basin.

Tabla de Contenido

Resumen	2
Abstract.....	3
1. Introducción	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo general	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Hipótesis	16
1.4 Preguntas de investigación.....	16
1.5 Justificación	16
1.6 Alcance	17
2. Revisión literaria	19
2.1 Marco teórico	19
2.1.1 Características morfométricas de la cuenca	19
2.1.1.1 Área de la cuenca (A)	19
2.1.1.2 Perímetro de la cuenca (P)	20
2.1.1.3 Coeficiente de compacidad o índice de gravelius (Kc)	20
2.1.1.4 Coeficiente de masividad (Km).....	21
2.1.1.5 Longitud de cuenca (L).....	21
2.1.1.6 Longitud de cauce (Lc)	21
2.1.1.7 Factor de forma (Kf).....	22
2.1.1.8 Índice de alargamiento (Ia).....	22
2.1.1.9 Orden de corriente de una cuenca	23
2.1.1.9.1 Densidad de drenaje (Dd).....	24
2.1.1.10 Elevación máxima	24
2.1.1.11 Elevación media	24

2.1.1.12	Elevación mínima.....	24
2.1.1.13	Pendiente media	25
2.1.1.14	Curva hipsométrica	25
2.1.2	Clases texturales de suelos	26
2.1.3	Índice de escasez.....	28
2.1.3.1	Escala de valoración del índice de escasez	29
2.1.3.2	Dominio espacial del índice de escasez	31
2.1.3.3	Agregación temporal del índice de escasez	31
2.1.3.4	Componentes del índice de escasez.....	31
2.1.3.4.1	Oferta hídrica superficial total.....	31
2.1.3.4.2	Generalización espacial de la oferta hídrica superficial	32
2.1.3.4.3	Oferta hídrica superficial neta	33
2.1.3.4.4	Demanda hídrica.....	33
2.2	Marco metodológico	34
2.2.1	Delimitación de una cuenca hidrográfica	34
2.2.1.1	Método tradicional.....	34
2.2.1.2	Método digital - método Pfafstetter.....	35
2.2.2	Metodología para el estado de la disponibilidad del agua en una cuenca.....	37
2.2.2.1	Metodología IDEAM para la determinación del índice de escasez para aguas superficiales	37
2.2.2.2	Método WEAP	39
2.2.2.3	Método SWAT	40
2.3	Marco histórico	41
3.	Metodología	45
3.1	Zona de estudio.....	45
3.1.1	Características biofísicas de la cuenca del Río Pisque.....	46
3.1.1.1.1	Temperatura.....	46

3.1.1.1.2	Precipitación.....	48
3.1.1.1.3	Tipos de suelo de la cuenca del Río Pisque	49
3.1.1.1.4	Uso de Suelo de la cuenca del Río Pisque	52
3.1.2	Demografía.....	54
3.2	Fases de la metodología.....	56
3.2.1	Recopilación de la información.....	57
3.2.2	Procesamiento de la información para la caracterización de la cuenca	58
3.2.3	Cálculo de la Oferta Hídrica de la Cuenca Utilizando los SIG.....	63
3.2.4	Cálculo de la Demanda Hídrica de la Cuenca.....	65
3.2.5	Aplicación de los SIG en el cálculo del índice de escasez.....	65
4.	Resultados y Discusión	66
4.1.1	Resultados	66
4.1.2	Caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Pisque	66
4.1.3	Oferta y Demanda Hídrica de la Cuenca del Río Pisque	71
4.1.3.1.1	Oferta Hídrica de la Cuenca del Río Pisque.....	71
4.1.3.1.2	Demanda Hídrica de la Cuenca del Río Pisque.....	75
4.1.3.1.3	Relación Oferta y Demanda Hídrica de la Cuenca del Río Pisque.....	76
4.2	Discusión.....	77
4.2.1	Características morfométricas de la cuenca del Río Pisque	77
4.2.2	Oferta hídrica de la cuenca del Río Pisque	79
4.2.3	Demanda hídrica de la Cuenca del Río Pisque	79
4.2.4	Índice de escasez de la cuenca del Río Pisque	80
5.	Conclusiones	83
5.1	Recomendaciones	85
6.	Referencias.....	87

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las cuencas de acuerdo a la superficie	19
Tabla 2. Clases de valores de compacidad	21
Tabla 3. Clases de masividad	21
Tabla 4. Clases de valores de forma	22
Tabla 5. Clases de valores de alargamiento.....	23
Tabla 6. Escala de valoración del índice de escasez.....	30
Tabla 7. Parroquias de la Cuenca del río Pisque	46
Tabla 8. Temperatura Media Mensual y Anual (°C)	47
Tabla 9. Estaciones Meteorológicas en la Cuenca del Río Pisque	48
Tabla 10. Tipo de suelo en la cuenca del Río Pisque	51
Tabla 11. Uso Actual de las tierras en la cuenca del río Pisque	53
Tabla 12. Superficie de la cuenca del río Pisque	53
Tabla 13. Demografía en la cuenca del Río Pisque	55
Tabla 14. Información de la cuenca del río Pisque	57
Tabla 15. Longitud de la Cuenca del Río Pisque	67
Tabla 16. Ancho de la Cuenca del Río Pisque	67
Tabla 17. Parámetros de la Cuenca del Río Pisque	68
Tabla 18. Coeficiente de Masividad de la Cuenca del Río Pisque	69
Tabla 19. Longitud del cauce principal de la Cuenca del Río Pisque	69
Tabla 20. Densidad de drenaje de la Cuenca del Río Pisque	70
Tabla 21. Tiempo de concentración de la Cuenca del Río Pisque	70
Tabla 22. Oferta Hídrica Total de la Cuenca del Río Pisque	74
Tabla 23. Demanda de agua en la Cuenca del Río Pisque	75
Tabla 24. Índice de escasez de la Cuenca del Río Pisque	76

Lista de Figuras

Figura 1. Fases de una cuenca representadas por la curva hipsométrica.....	25
Figura 2. Temperatura Media Mensual (°C).....	47
Figura 3. Variación Estacional de la Precipitación de las Estaciones de la Cuenca del Río Pisque.....	49
Figura 4. Distribución de la población de la cuenca del Río Pisque	55
Figura 5. Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Pisque	69
Figura 6. Porcentaje de la demanda de agua en la Cuenca del Río Pisque	76

Lista de Mapas

Mapa 1. Ubicación de la Cuenca del Río Pisque.....	45
Mapa 2. Tipos de suelo en la cuenca del Río Pisque.....	51
Mapa 3. Uso de suelo en la cuenca del Río Pisque	54
Mapa 4. Área de la Cuenca del Río Pisque	66
Mapa 5. Perímetro de la Cuenca del Río Pisque	67
Mapa 6. Cotas de la Cuenca del Río Pisque.....	68
Mapa 7. Orden de la Red Hídrica.....	70
Mapa 8. Precipitación de la Cuenca del Río Pisque	71
Mapa 9. Temperatura de la Cuenca del Río Pisque.....	72
Mapa 10. Evapotranspiración Real de la Cuenca del Río Pisque.....	73
Mapa 11. Escurrimiento Superficial Total de la Cuenca del Río Pisque	74
Mapa 12. Oferta Hídrica de la Cuenca del Río Pisque.....	75

Lista de Fórmulas

Fórmula 1. Coeficiente de compacidad	20
Fórmula 2. Coeficiente de masividad	21
Fórmula 3. Factor de forma	22
Fórmula 4. Factor de forma	23
Fórmula 5. Densidad de drenaje	24
Fórmula 6. Índice de escasez	28
Fórmula 7. Oferta hídrica superficial neta	28
Fórmula 8. Escorrentía superficial	32
Fórmula 9. Balance Hídrico	32
Fórmula 10. Balance Hídrico	33
Fórmula 11. Balance Hídrico	33
Fórmula 12. Temperatura media	48
Fórmula 13. Turc	64
Fórmula 14. Esguerrimiento superficial en mm	64
Fórmula 15. Esguerrimiento superficial en m ³ /año	65

Lista de Acrónimos

£	Término residual de convergencia
A	Área de la cuenca
AG	Agrometeorológica
Al	Altura Media
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CO	Climatológica Ordinaria
D	Demanda de agua
Dd	Densidad de drenaje
DT	Demanda total de agua
DUA	Demanda de agua para uso agrícola
DUD	Demanda de agua para uso doméstico.
DUI	Demanda de agua para uso industrial
DUP	Demanda de agua para uso pecuario
DUS	Demanda de agua para el sector servicios
E/ERT	Evapotranspiración Real
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FONAG	Fondo para la Protección del Agua
GPS	Sistemas de Posicionamiento Global
HLPE	Grupo de Alto Nivel de Expertos en Seguridad Alimentaria y Nutrición
Hm	Altura media de la cuenca
HRU	Unidades de Respuesta Hidrológica
Ia	Índice de alargamiento
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
Ie	Índice de escasez
IEE	Instituto Espacial Ecuatoriano
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC	Instituto de Estadística y Censo
Kc	Coefficiente de compacidad o índice de gravelius
Kf	Factor de forma
Km	Coefficiente de masividad
km	Kilómetros
km ²	Kilómetros cuadrados
l	Ancho máximo de la cuenca
L	Longitud de la cuenca
Lc	Longitud del cauce
Lm	Longitud máxima de la cuenca
MUSLE	Ecuación Universal de Perdida de Suelos Modificada
On	Oferta hídrica superficial neta
ONG	Organización no Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
Ot	Oferta hídrica superficial total
OV	Pluviométrica

P	Perímetro de la cuenca
Q	Caudal modal para el periodo de agregación seleccionado
Qx	Escurrimiento superficial
Re	Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje
Rf	Factor de reducción para protección de fuentes frágiles
SCS	Servicio de Conservación de los Suelos
SENAGUA	Secretaría de Agua de Ecuador
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIN	Sistema Nacional de Información
SWAT	Herramienta de evaluación de suelo y agua
T	Temperatura Media
t	Cantidad de segundos en el periodo de agregación
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura
UPS	Universidad Politécnica Salesiana
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
W	Volumen de los almacenamientos durante el periodo de cálculo del balance hídrico
WEAP	Sistema de Evaluación y Planificación del Agua
X	Precipitación
Y	Escorrentía superficial expresada en términos de lámina

1. Introducción

1.1 Antecedentes

El recurso hídrico es esencial para el desarrollo de los seres vivos. De acuerdo al informe del grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición (HLPE, 2015), las fuentes de abastecimientos de agua dulce existentes en el planeta provienen de la precipitación, aguas superficiales y aguas subterráneas. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO) menciona que el planeta tiene solamente el 2.6% de agua dulce, del cual el 70% se utiliza en la agricultura principalmente en el riego, el 20% se emplea en la industria y 10% es para el uso doméstico (UNESCO, 2018). Según Campos (2014), América del Sur y las islas de Oceanía, tienen la mayor cantidad de agua dulce, siendo Ecuador uno de los países afortunados de contar con cifras globales positivas de este recurso, pero teniendo escasez de agua en la época de estiaje. El agua es uno de los recursos naturales más importantes del cual dependen la alimentación y salud de las personas, la agricultura, la ganadería, la industria, la energía, los ecosistemas, el mantenimiento de la paz y estabilidad social (UNESCO, 2016).

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los países de América Latina y el Caribe tienen el desafío de diseñar e implementar estrategias y acciones eficientes para la gestión sostenible del agua, aunque las regiones cuenten con una gran cantidad de agua, la distribución anual temporal y espacial de la lluvia ocasiona periodos y zonas con déficit hídrico prolongado y fuertes, en donde también se incrementa por el consumo humano, áreas agrícolas irrigadas, contaminación del recurso y la falta de políticas y acciones concretas para enfrentar el problema (CEPAL, 2014).

Ecuador tiene dos vertientes, la del Pacífico y la del Amazonas y, según la delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Ecuador con el método de Pfafstetter (Rosas, 2009), Ecuador cuenta con 711 unidades hidrográficas en el nivel 5. En el plan nacional de riego (Subsecretaría de Riego y Drenaje, 2013), se establece que aproximadamente el 55% del país presenta exceso hídrico en la región Amazónica, mientras que el 44%, presenta un déficit hídrico, que corresponde a las regiones Costa y Sierra del país. La disponibilidad del agua en el Ecuador puede variar de acuerdo a la estación climática, pero la distribución espacial y temporal es muy diversa, y más ahora que hay evidencias de los efectos del cambio climático. En el Ecuador, la mayor parte del agua que proviene de los recursos superficiales

está siendo utilizada en riego el 82%, en consumo doméstico el 2% y en la industria el 6%. (Subsecretaría de Riego y Drenaje, 2013, p.39)

De acuerdo con la resolución 2011-245 de la Secretaría de Agua de Ecuador (SENAGUA, 2011), se resuelve aprobar la metodología de Pfafstetter, para la delimitación y codificación de las unidades hidrográficas del Ecuador; determinando el área de estudio como una cuenca que es un área que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero que contribuye con flujo a otra unidad de drenaje y con el código 15246. La zona de estudio del presente trabajo es la cuenca del Río Pisque, la misma que está formada por los cantones Cayambe, Pedro Moncayo y una parte del cantón Quito, que luego forma parte de la cuenca hidrográfica del Guayllabamba y finalmente del sistema hidrográfico del río Esmeraldas, que desemboca en el océano Pacífico (Rosas, 2009). De acuerdo a De Bievre y Bert Coello (2008), la mayor demanda de agua en la cuenca del Río Guayllabamba es para riego con el 54% de los usos consuntivos, seguido del uso para agua potables del 24% y para la industria el 22%, mientras que la oferta de agua de la cuenca del Río Guayllabamba se da por las precipitaciones que, a nivel mensual, son muy variables. En los meses más secos se ha observado precipitaciones con valores de alrededor de 7 mm/mes, que tiende inclusive a 0 mm/mes en las zonas media y baja de la cuenca, mientras que las precipitaciones en la zona alta de la cuenca oscilan entre 65 mm/mes y 160mm/mes, dándose que la mayor producción de agua de la cuenca del Río Guayllabamba está en la cuenca del Río Pita (FONAG, 2014). De acuerdo al Fondo para la Protección del Agua (FONAG, 2014), la cuenca del río Guayllabamba es una zona con abundantes recursos hídricos, donde existe conflicto entre la oferta de agua y la demanda humana del recurso que afecta a su cantidad y calidad. Esto hace referencia a la cuenca del Río Guayllabamba de la que hace parte la cuenca del Río Pisque, pero hasta la fecha no se cuenta con información particular sobre la cuenca del Río Pisque.

La cuenca del río Pisque, que está ubicada en la parte Noreste de la Cuenca del Río Guayllabamba tiene una superficie aproximada de 1,128.64 km² (Rosas, 2011). Entre las fuentes de agua y afluentes de la cuenca del Río Pisque se encuentra el Nevado del volcán Cayambe, los páramos del Parque Nacional Cayambe-Coca, los principales ríos son: La Chimba, San José, Granobles, Blanco, Guachalá y Cangahua; y también se encuentran varias acequias, cuyas aguas son utilizadas para la agricultura, ganadería, consumo humano e industria de la población de los tres cantones.

Comentan Aguilar (2017) y Céspedes y Pachacama (2012) que a partir de los años ochenta, los cantones Cayambe y Pedro Moncayo constituyen la región con más altos niveles de inversión en la producción de flores para exportación. La demanda de esta industria ha provocado no solo el incremento de la población, sino también de la demanda de agua y la contaminación. El crecimiento poblacional, el desarrollo de la actividad agropecuaria y en menor escala la industrialización en la cuenca del Río Pique, depende mucho de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca (Aguilar, 2017; Céspedes y Pachacama, 2012). La presión ejercida por la demanda de agua sobre las fuentes hídricas alteran sus condiciones tanto en la calidad como cantidad, conllevando a varios investigadores a utilizar herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, que contribuyen con el estudio de los fenómenos al interior de una cuenca hidrográfica, bien sea describiendo y/o explicando, a través una representación esquemática, conceptual y numérica, lo que permite realizar un análisis detallado de los resultados relacionándolos con el territorio y dando insumos al momento de tomar decisiones para el presente y futuro (Aguilar, 2017; Céspedes y Pachacama, 2012).

Para generar una orientación en la gestión pública y comunitaria del recurso hídrico, es necesario analizar la relación entre la oferta hídrica disponible y la demanda hídrica de las actividades socioeconómicas de la cuenca del Río Pisque. Con el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica se va a consolidar toda esta información existente, y a conocer el estado actual del recurso hídrico de la cuenca, con la finalidad de saber la disponibilidad y dar recomendaciones para su conservación, planificación y uso sostenible de este recurso importante.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estimar la disponibilidad del recurso agua en la cuenca del Río Pisque (Ecuador).

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar morfológicamente la cuenca del río Pisque.
- Determinar la demanda y oferta hídrica superficial de la cuenca del río Pisque.
- Evaluar las relaciones oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Pisque.

1.3 Hipótesis

La oferta hídrica en la cuenca del río Pisque responde en su totalidad a las demandas de agua requeridas en las actividades sociales, y agro-productivas por los usuarios de este territorio.

1.4 Preguntas de investigación

¿Qué características morfométricas presenta la cuenca del Río Pisque?

¿Qué factores inciden en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Pisque?

¿Cuál es la disponibilidad de agua en la Cuenca de estudio, de acuerdo a la oferta y demanda de agua?

1.5 Justificación

Al tener la cuenca del Río Pisque varias fuentes de agua, afluentes, ríos y acequias, se convierte en una zona potencial para la agricultura, ganadería, industria conllevando así al aumento de la población. La cuenca del Río Pisque no cuenta con un estudio específico de lo que sucede con los recursos hídricos y en qué estado se encuentran, no hay estrategias de corto, mediano y largo plazo para el ordenamiento territorial de las actividades que se realizan en la cuenca de estudio. El tema de la planificación del uso de los recursos hídricos está tomando cada vez mayor importancia, y su escasez en cantidad y calidad es cada vez más notoria. Incluso esto se refleja en algunos estudios realizados por separados de las cuencas internas pertenecientes a la Cuenca del Río Pisque, donde se puede observar que el caudal existente. Por ejemplo en la microcuenca del río Blanco el recurso hídrico disponible no abastece el 100% de los requerimientos hídricos de los cultivos predominantes en esta zona (Sandoval y Cachipundo, 2011). Esto puede generar conflictos cuando la cantidad de agua no logra abastecer los requerimientos por parte de la población para sus diferentes usos. Es así que se ha observado que la cuenca del Río Pisque sufre un deterioro ambiental por el avance de la frontera agrícola, la quema del pajonal, los incendios forestales, la carga animal en los páramos, el aumento de la población, todo esto repercutiendo en la cantidad y calidad del agua, fertilidad del suelo, etc.

La connotación del problema de escasez de agua afecta a la mayoría de los habitantes de la cuenca, y se vuelve más crítico con el paso del tiempo. Con este estudio se pretende aplicar herramientas y metodologías que han sido utilizado en otras investigaciones que permitan aportar en el conocimiento de la situación del recurso hídrico de la cuenca que permita la

identificación de los problemas del estado de disponibilidad de agua como son los sistemas de información geográfica, las metodologías de Pfafstetter y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Además, que sirva de soporte técnico en las posibles acciones y decisiones que puedan tomar las autoridades locales como a las 12 juntas parroquiales, a los 2 gobiernos municipales, al gobierno provincial de Pichincha, la Organización no Gubernamental (ONG) y a las mismas comunidades que están dentro del territorio de la cuenca del río Pisque y tienen que ver con el manejo y gestión de los recursos hídricos. También que sirva como aporte para el fortalecimiento de las políticas de manejo de los recursos que garantice la sostenibilidad de la población y del ecosistema. Asimismo, que sea utilizado como un medio para la formulación y ejecución de proyectos actuales y futuros que tengan que ver con de este recurso de la naturaleza, y del mismo modo, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección.

En la cuenca del Río Pisque, las mayores reservas del recurso hídrico están en los páramos, y en el nevado Cayambe, recurso que es utilizada para el consumo humano, riego, agricultura, ganadería e industria; siendo de importancia el manejo adecuado y equitativo del recurso hídrico para no ocasionar conflictos entre usuarios.

La cuenca del río Pisque es un territorio donde predomina la agricultura, ganadería e industria, por lo cual es necesario conocer la disponibilidad del recurso para fortalecer las políticas de uso y manejo.

La escasez del recurso hídrico no solo es un problema local, sino mundial, por lo tanto, es primordial para la gestión del recurso hídrico conocer el índice de escasez. En el caso particular de la cuenca del Río Pisque, se utilizó información cartográfica e hidrográfica que permitió realizar el análisis de la oferta y demanda del recurso, y a la vez que sirva como base para la planificación hidrológica, es decir, como un medio necesario para formular y considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros, también que permita establecer lineamientos a seguir para su protección o preservación, y apoyar a las diversas decisiones que se tomen, sean directas o indirectas relacionados con el uso y aprovechamiento del recurso agua.

1.6 Alcance

El presente trabajo de investigación se desarrolló para la cuenca del río Pisque ubicada al noreste de la provincia de Pichincha, para lo cual se empleando información climática,

cartográfica, demográfica, hidrográfica, en su mayoría de acceso libre de las instituciones públicas del Ecuador y de la Universidad Politécnica Salesiana, a escalas de 1: 50,000, 1: 25,000, 1: 5,000 y 1: 1,000. Con esta información se llegó a realizar la caracterización morfométrica de la cuenca en estudio, calcular la oferta hídrica, demanda hídrica e índice de escasez de la cuenca. Además, generar mapas temáticos de la ubicación, del área, perímetro, cotas, pendiente, orden de la red hídrica, longitud de la red hídrica, precipitaciones, temperatura, evapotranspiración y escurrimiento superficial, tipo de suelos, usos de suelo de la cuenca del Río Pisque. Los resultados del presente estudio pueden ser utilizado por las instituciones locales como las juntas parroquiales, gobiernos municipales y el gobierno provincial de Pichincha, además por ONG, universidades y estudiantes que están trabajando los temas de producción, riego, sustentabilidad, en la cuenca del río Pisque.

2. Revisión literaria

2.1 Marco teórico

2.1.1 Características morfométricas de la cuenca

Menciona Aparicio (1992) que el ciclo hidrológico visto a nivel de una cuenca, se esquematiza como un estímulo, construido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controlados por las características morfométricas de la cuenca y su urbanización. Las características antes mencionadas se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corriente, pendientes de la cuenca y los cauces. Para el presente estudio se describe las siguientes características morfométricas.

2.1.1.1 Área de la cuenca (A)

También llamada magnitud de cuenca, es el área plana en proyección horizontal incluida dentro del parteaguas o línea divisoria de la cuenca (Campos Aranda, 1998). El área se expresa en km^2 (kilómetros cuadrados), a excepción de las cuencas pequeñas, las cuales se expresan en hectáreas. En la tabla 1, se clasifican las cuencas, tomando en cuenta la superficie, según Campos Aranda (1998).

Tabla 1. Clasificación de las cuencas de acuerdo a la superficie

Tamaño de la cuenca	Descripción
(Km²)	
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – Pequeña
500 a 2500	Intermedia – Grande
2500 a 50000	Grande
>50000	Muy grande

Fuente: Campos Aranda (1998)

Otros autores como Hebert Gonzalo, Dominguez, Marin, y Vanegas (2004) toman la misma clasificación de las cuencas, pero en este caso le llama a la clasificación “muy pequeña” como “microcuencas”.

2.1.1.2 Perímetro de la cuenca (P)

“El perímetro de la cuenca es la longitud del parteaguas en proyección horizontal, es decir, el contorno de la superficie de la cuenca, se expresa en unidades de kilómetros (km). Entiéndase por parteaguas de la cuenca a la línea imaginaria que une los puntos de mayor altitud entre dos ríos, y que divide el flujo de las aguas en direcciones opuestas, hacia uno u otro lado” (Huamán, 2015, p.35).

2.1.1.3 Coeficiente de compacidad o índice de gravelius (Kc)

Albarracín, Alvarenga, Sosa, Iwasita, y Barbaro (2009) mencionan que el coeficiente de compacidad es el cociente entre el perímetro de la cuenca y la longitud de una circunferencia con un área igual a la de la cuenca y se representa mediante la fórmula 1.

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}}$$

Fórmula 1. Coeficiente de compacidad

Donde:

P: es el perímetro de la cuenca en (Km).

A: es el área de la cuenca (Km²).

Como lo menciona Fuentes (2004), si el valor de Kc llegará hacer igual a 1, la cuenca tendría una forma exactamente circular. Además, el valor de Kc es imposible que llegue a ser inferior a 1. Mientras este coeficiente de compacidad se acerque a la unidad demuestra la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento, por lo que, si el valor de Kc es más bajo, habrá una alta concentración de agua en la cuenca. Entre más circular sea la forma de la cuenca el coeficiente de compacidad será cercano a un valor de 1 y la respuesta hidrológica será más rápida.

Por lo tanto, en la tabla 2 se indica la clase de forma de las cuencas por el índice de compacidad.

Tabla 2. Clases de valores de compacidad

Rangos de Kc	Clases de compacidad
1.00 – 1.25	Casi redonda a oval redonda (compacta)
1.25 – 1.50	A oval oblonga
1.50 – 1.75	A rectangular oblonga
>1.75	A casi rectangular (alargada)

Fuente: Campos Aranda (1998)

2.1.1.4 Coeficiente de masividad (Km)

El coeficiente de masividad es la relación entre la altura media de la cuenca y el área de la misma, para el cálculo se emplea la fórmula 2 (Breña y Jacobo, 2006).

$$K_m = \frac{Hm}{A}$$

Fórmula 2. Coeficiente de masividad

Donde:

K_m : Coeficiente de masividad.

Hm : Altura media de la cuenca.

A : Área de la cuenca.

A continuación, en la tabla 3, se especifica las clases de masividad de la cuenca.

Tabla 3. Clases de masividad

Rango de Km	Clase de masividad
0 – 35	Muy montañosa
35 – 70	Montañosa
70 - 105	Moderadamente montañosa

Fuente: Campos Aranda (1998)

2.1.1.5 Longitud de cuenca (L)

De acuerdo a Breña y Jacobo (2006), la longitud de la cuenca es también llamada longitud axial y se define la distancia de una línea recta en proyección horizontal que va desde la salida de la cuenca hasta el parteaguas en su punto más alejado, esta línea es paralela al cauce principal.

2.1.1.6 Longitud de cauce (Lc)

Es la longitud del cauce más largo dentro de la cuenca, es decir, el cauce principal; se

expresa en unidades de metros y que es medido desde la parte más altas de la cuenca hasta la salida (Breña y Jacobo, 2006).

2.1.1.7 Factor de forma (Kf)

El factor de forma tiene relación con la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la forma de la misma. Dicho factor se define como se muestra en la fórmula 3, la relación entre el ancho medio (B) y la longitud de cuenca (L). El ancho medio se obtiene al dividir el área (Km²) por la longitud de cuenca (Km) (Fuentes, 2004).

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Fórmula 3. Factor de forma

Donde,

L: es la longitud de la cuenca (Km).

A: es el área de la cuenca (Km²).

Por lo expuesto por Fuentes (2004), el factor de forma de la cuenca se relaciona con la de un cuadrado, siendo que el valor de Kf sea igual a 1. Cuando el valor de Kf es superior a la unidad indica el grado de achatamiento de la cuenca o el de un río principal corto, por ende, la tendencia es a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecientes. En la tabla 4, indica la clasificación de la cuenca por el rango de forma.

Tabla 4. Clases de valores de forma

Forma de la cuenca	Rangos de Kf
Muy poco achatada	0.01 – 0.18
Ligeramente achatada	0.18 – 0.36
Moderadamente achatada	0.36 – 0.54

Fuente: Campos Aranda (1998)

2.1.1.8 Índice de alargamiento I_a

Horton propuso el índice de alargamiento que es la relación de la longitud máxima del río principal de la cuenca y el ancho máximo de la misma medido perpendicularmente y se calcula con la fórmula 4 (Farfán, Urbina, Ferrerira, y Brandan, 2010).

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

Fórmula 4. Factor de forma

Donde:

I_a : Índice de alargamiento.

L_m : Longitud máxima de la cuenca.

l : Ancho máximo de la cuenca.

Se menciona que una cuenca es alargada cuando el índice de alargamiento es superior a la unidad y cuando los valores de I_a son cercanos a 1, es una cuenca donde la red de drenaje tiene la forma de abanico y el río principal tiende a ser pequeño (Fuentes, 2004).

En la tabla 5, se presente las clases de alargamiento de una cuenca dependiendo del índice que se calcule.

Tabla 5. Clases de valores de alargamiento

Índice de Alargamiento	Clases de alargamiento
0.61 – 1.56	Poco alargada
1.57 – 2.52	Moderadamente alargada
2.53 – 3.48	Muy alargada

Fuente: Campos Aranda (1998)

2.1.1.9 Orden de corriente de una cuenca

Campos Aranda (1998) dice que el orden de corriente es una clasificación que muestra el grado de ramificación o bifurcación de las corrientes dentro de una cuenca y se especifica de la siguiente forma:

- Corrientes de primer orden: son aquellas que no están ramificadas.
- Corrientes de segundo orden: solo tienen ramificaciones o corriente tributarias de primer orden.
- Corrientes de tercer orden: aquellas con dos o más corrientes tributarias de segundo orden o menores.
- Corrientes de n orden: las corrientes con dos o más corrientes tributarias de n-1 orden o menores.

El orden de corriente de la cuenca tendrá el orden más alto de todas las corrientes que

componen la red de drenaje. Cruz, Gaspari, Rodríguez, Carrillo, y Téllez (2015) dicen que mientras más alto sea el orden de corriente, la cuenca drenará más eficientemente que una de orden menor.

2.1.1.9.1 Densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje se define como el resultado de dividir la sumatoria de las longitudes de las corrientes de la cuenca ($\sum l$) entre el área (A) de la misma (Fuentes, 2004).

$$Dd = \frac{\sum l}{A}$$

Fórmula 5. Densidad de drenaje

Donde:

$\sum l$: es la sumatoria de las longitudes de las corrientes de la cuenca (Km).

A: es el área de la cuenca (Km²).

La densidad de drenaje está relacionada con la geología, la topografía, las condiciones climatológicas y las actividades antropogénicas. Los valores mayores corresponden a cuencas con rocas blandas de baja permeabilidad y en regiones con escasa cobertura vegetal, sobre todo allí donde la precipitación se distribuye en aguaceros intensos y espaciados, también aumenta su valor cuando las corrientes tienen un alto grado de ramificación (Fuentes, 2004).

2.1.1.10 Elevación máxima

La elevación máxima de una cuenca se refiere a la cota más alta de la cuenca, la cual forma parte del parteaguas de la misma (Fuentes, 2004).

2.1.1.11 Elevación media

La elevación media de una cuenca es el promedio de los valores de las cotas de la misma, puede representarse de forma gráfica mediante un SIG y un modelo digital de elevación. Este parámetro es representativo en zonas montañosas (Fuentes, 2004).

2.1.1.12 Elevación mínima

La elevación mínima es el valor de la cota con la altitud más baja en la cuenca, suele ser el

valor donde se encuentra el punto de salida de la cuenca (Fuentes, 2004).

2.1.1.13 Pendiente media

La pendiente media representa el promedio de las pendientes de la cuenca y está relacionado con la velocidad de los escurrimientos, el arrastre de sedimentos y el potencial de erosión de la cuenca (Fuentes, 2004).

2.1.1.14 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica está relacionada directamente con las elevaciones, proporciona información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, y se refiere a una representación gráfica de la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura (Breña y Jacobo, 2006). La gráfica presenta en las ordenadas (eje y), las distintas cotas de altura de la cuenca, y en las abscisas (eje x), el porcentaje acumulado de la superficie de la cuenca. Con la curva hipsométrica se puede determinar la fase en la que se encuentra una cuenca dada, como se observa en la Figura 1 (Domínguez, 2015).

- Fase de juventud (curva A): refleja una cuenca con un gran potencial erosivo.
- Fase de madurez (curva B): representa una cuenca en equilibrio.
- Fase de vejez (cueva C): es representativa de una cuenca sedimentaria.

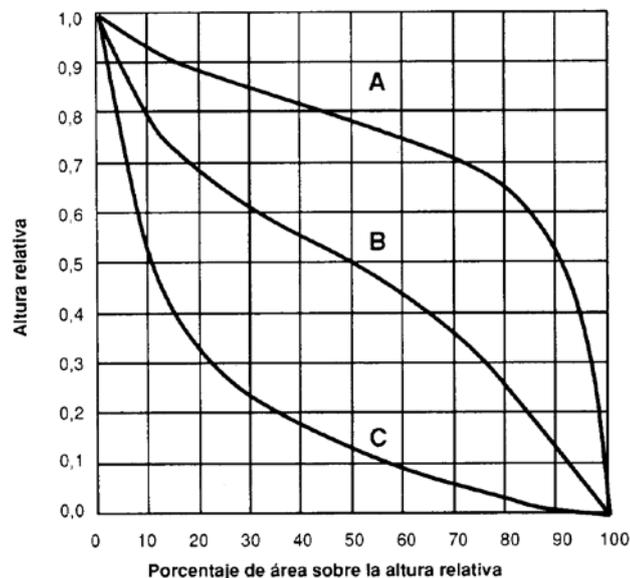


Figura 1. Fases de una cuenca representadas por la curva hipsométrica
Fuente: Domínguez (2015)

2.1.2 Clases texturales de suelos

Franco: Este suelo se divide en tres subclases texturales: Franco arenoso, franco y franco limoso, se caracterizan por ubicarse en pendientes suaves a fuertes, tiene un drenaje bueno a moderado, tiene una profundidad superficial en unos casos y profunda en algunos otros casos. Tienen un ph ácido a medianamente ácido, siendo un suelo no salino. Las rocas características de este suelo son Clastos subredondeados a subangulares, Toba andesítica de color café claro, ceniza y lapilli, microconglomerados con matrices limo-arenosas asociadas al material limoso y arenoso (GADIPC, 2015, p.32).

Franco Arcillo arenoso: Este suelo tiene dos subclases texturales: Franco, arena y franco arcillo arenoso, se encuentra en pendientes suaves, fuertes y muy fuertes, presentando poca pedregosidad, es un suelo poco profundo, con una toxicidad nula, no salino o presenta un ph casi neutro en la mayoría y ligeramente ácido en algunas proporciones, denotando una fertilidad media a baja. El tipo de roca que forma este suelo es: lava andesíticas, brechas volcánicas con aglomerados y piroclastos, toba andesítica de color café claro, ceniza y lapilli, microconglomerados con matriz limo arenosa, areniscas gruesas con intercalaciones de tobas (GADIPC, 2015, p.32).

Franco arcilloso: Este suelo se divide en tres subclases texturales que son: franco, franco arenoso y franco arcilloso, se caracteriza por ubicarse en pendientes suaves, fuertes y muy fuertes, presentando un drenaje bueno a moderado y un poco pedregosidad, es un suelo profundo en algunos lugares y superficial en otros, presenta un ph alcalino y moderadamente ácido en pocas proporciones, presentando una saturación media y una fertilidad media en la mayoría de superficie del suelo y alto en pocas proporciones. El tipo de roca que forma este suelo es: clastos subredondeados a subangulares, asociados a material limoso y arenoso, lavas andesitas, brechas volcánicas con aglomerados y piroclastos, toba andesita de color café claro, ceniza y lapilli (GADIPC, 2015, p.32).

Franco arenoso: Este suelo se divide en tres sub clases texturales que son franco, franco limoso y franco arenoso, se caracteriza por estar en pendientes muy suaves, medianas y fuertes y tener un drenaje bueno, además en un suelo poco profundo en su mayoría y medianamente profundo en algunos lugares, presenta una toxicidad nula, sin pedregosidad, con un ph ácido en algunos lugares y prácticamente neutro en otros, en un suelo no salino, con una saturación de media a baja, denotando muy poca fertilidad en

algunos sitios y de mediana a alta fertilidad en otros. Las rocas que forman este suelo son: tilitas, arenas, gravas y bloques de composición variable, lavas andesitas, brechas volcánicas con aglomerados y piro clastos, toba andesita de color café claro, ceniza y lapilli (GADIPC, 2015, p.33).

Franco limoso: Este suelo se divide en dos clases texturales franco y franco limoso, se caracteriza por encontrarse en pendientes medias fuertes y muy fuertes, son suelos bastante profundos y tienen un drenaje bueno. Además, la pedregosidad y la toxicidad de este suelo es nula. Son suelos medianamente ácidos, no salinos, con una saturación media, presentando una fertilidad media a baja. Las rocas que forman este suelo son: lavas andesitas, brechas volcánicas con aglomerados y piro clastos, clastos subredondeados a subangulares, asociados a material limoso y arenoso, tilitas, arenas, gravas y bloques de composición variable (GADIPC, 2015, p.33).

Arena: Este tipo de suelo presenta una clase textura que es areno franco, un drenaje excesivo, es un suelo superficial, sin pedregosidad, prácticamente neutro y no salino, tienen una alta saturación y presenta una fertilidad baja. Este suelo se forma de microconglomerados con matriz limo arenosa, areniscas gruesas con intercalaciones de tobas (GADIPC, 2015, p.33).

Arcillo arenoso: Este suelo presenta la clase textural franco arcillo arenoso, se encuentra en pendientes fuertes presentado un drenaje bueno y una profundidad moderada. Además, no tiene pedregosidad, la pedregosidad es nula, presentando un ph medianamente ácido, con una salinidad nula, una situación media, denotando una fertilidad media. Las rocas que forman este suelo son: toba andesita de color café claro, ceniza y lapilli (GADIPC, 2015, p.33).

Arcillo limoso: Este suelo presenta la subclase textura franco arcillo limoso, se encuentra en pendientes medias, fuerte a muy fuertes, con un drenaje bueno y con una profundidad media. No presenta pedregosidad, tiene una toxicidad nula, con un ph medianamente ácido, tiene una saturación media y es un suelo altamente fértil. El tipo de roca que forma este suelo es: clastos subredondeados a subangulares, asociados a material limoso y arenoso lavas andesitas y basálticas columnares, brechas y aglomerados (GADIPC, 2015, p.34).

Arcilloso: Este suelo presenta la subclase textural franco arcilloso, se encuentra en pendientes suaves, fuertes y muy fuertes, presentando un drenaje bueno y es moderadamente profundo. Además, no presenta pedregosidad y es un suelo con una toxicidad nula y medianamente ácido sin salinidad, presentando una saturación media, lo que denota una fertilidad media. Las rocas que forman este suelo son: toba andesita de color café claro, ceniza y lapilli, lavas andesitas y basálticas columnares, brechas y aglomerados (GADIPC, 2015, p.34).

2.1.3 Índice de escasez

Las actividades sociales y productivas en un territorio afectan directamente en la cantidad y calidad de los recursos hídricos. Por lo tanto, llegar a realizar una planificación sostenible del agua en una cuenca es necesario conocer a través del índice de escasez la relación porcentual entre la cantidad de agua utilizada en las actividades sociales, productivas y ambientales y la cantidad de agua disponible en una cuenca (Hebert Gonzalo et al., 2004; Costa, Dominguez, Gonzalo, y Venegas, 2005). A continuación, se describe la fórmula del índice de escasez:

$$I_e = \frac{D}{O_n}$$

Fórmula 6. Índice de escasez

Donde:

I_e = Índice de escasez [%].

D = Demanda de agua [m³].

O_n = Oferta hídrica superficial neta [m³].

Para obtener la oferta hídrica superficial neta resulta de la siguiente fórmula:

$$O_n = O_t \times R_e \times R_f$$

Fórmula 7. Oferta hídrica superficial neta

Donde:

O_t : Oferta hídrica superficial total [m³].

R_e : Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje.

R_f ; Factor de reducción para protección de fuentes frágiles.

2.1.3.1 Escala de valoración del índice de escasez

La categorización del índice de escasez con sus respectivos porcentajes es el resultado de varios trabajos, estudios e investigaciones sobre la gestión del agua y que recoge las recomendaciones del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, es así, que se establece 4 categorías alta, media, moderado y baja, en la tabla 6 se describe cada una de ellas (Costa et al., 2005; Hebert Gonzalo et al., 2004).

Tabla 6. Escala de valoración del índice de escasez

Categoría del índice de escasez	Porcentaje de la oferta hídrica utilizada	Color	Explicación
Alto	> 40%	Rojo	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad de agua es un factor limitador del desarrollo económico.
Medio	20 – 40 %	Naranja	Cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. Se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos
Moderado	10 – 20 %	Amarillo	Indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo
Bajo	<10%	Verde	No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico

Fuente: IDEAM (2004)

2.1.3.2 Dominio espacial del índice de escasez

El índice de escasez se puede obtener en los territorios que están abastecidos del recurso hídrico a través de ríos, acequias, canales, y en los cuales se puede cuantificar la disponibilidad y usos en las actividades económicas y productivas. Por lo que el índice de escasez como indicador para la gestión del recurso hídrico se emplea en varios dominios espaciales que va desde un sistema de riego, el tramo de un río, una cuenca, una región hidrológica e incluso al territorio de una nación (Hebert Gonzalo et al., 2004).

2.1.3.3 Agregación temporal del índice de escasez

Se puede calcular el índice de escasez con una agregación diaria, semanal, mensual, estacional y anual. Esto va a depender del propósito del estudio, del alcance al que se desea llegar y con qué frecuencia se obtiene la información tanto de la oferta como de la demanda del recurso hídrico.

En estudios de alta resolución el índice de escasez puede ser calculado con una agregación diaria e incluso horaria sí esto se requiere por el sistema productivo y sí se dispone de la información horaria de caudales y del régimen de producción horario. La agregación multianual se recomienda para horizontes de planificación de largo plazo, evaluaciones sobre efectos de cambio climático y para evaluar el marco de referencia de escenarios extremos (Hebert Gonzalo et al., 2004, p.11).

Por lo tanto, las agregaciones temporales son importantes para los análisis de riesgo y vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento.

2.1.3.4 Componentes del índice de escasez

A continuación, se describe los componentes que se requieren para obtener el índice de escasez.

2.1.3.4.1 Oferta hídrica superficial total

La oferta hídrica superficial total es la cantidad de agua que circula por el trayecto de un cauce, una vez que las precipitaciones al caer sobre la superficie abastecen los requerimientos del sistema suelo-planta, dotan a lagos, lagunas, reservorios, y que sus aguas desembocan en el mar por su mismo cauce o por la unión de otras corrientes. Para obtener la oferta hídrica superficial total continua para el cálculo del índice de escasez, es necesario utilizar las técnicas de generalización de la escorrentía superficial. Hebert Gonzalo et al.

(2004) expresan que “La escorrentía puede ser expresada en términos de lámina de agua, en milímetros, lo que permite una comparación rápida con la precipitación y la evapotranspiración que tradicionalmente también se expresan en milímetros” (p.11).

En este caso la escorrentía se calcula como:

$$Y = \frac{Q \times t}{A \times 10^3}$$

Fórmula 8. Escorrentía superficial

Donde:

Y: Escorrentía superficial expresada en términos de lámina [mm].

Q: Caudal modal para el periodo de agregación seleccionado [m³/s].

t: Cantidad de segundos en el periodo de agregación [s].

A: Área aferente al nodo de mediciones [km²].

Además, Hebert Gonzalo et al. (2004) manifiestan que “la escorrentía superficial en términos de lámina refleja la cantidad de agua escurrida por el nodo de mediciones durante el periodo de agregación en análisis distribuida uniformemente sobre el área aferente al nodo de mediciones” (p.12). Para expresar la escorrentía superficial en metros cúbicos o kilómetros cúbicos, se utiliza la fórmula 8.

2.1.3.4.2 Generalización espacial de la oferta hídrica superficial

Entre los métodos para obtener una generalización de la escorrentía superficial están: la interpolación, la relación escorrentía versus parámetros morfométricas, balance hídrico y el modelo lluvia-escorrentía, siendo la interpolación el método óptimo, pero para el cual se requiere de datos de alta calidad y cantidad, se eligió el método indirecto como el balance hídrico que permitirá calcular la escorrentía superficial a partir de registros de precipitación, evaporación, información sobre la cobertura vegetal y uso del suelo de la zona de estudios. Para esto se aplicará la siguiente fórmula del balance hídrico (Hebert Gonzalo et al., 2004):

$$X - Y - E \pm \epsilon = \frac{dW}{dt}$$

Fórmula 9. Balance Hídrico

Donde,

X = Precipitación [mm].

Y = Escorrentía Superficial [mm].

E = Evapotranspiración Real [mm].

£=Término residual de convergencia [mm].

W = Volumen de los almacenamientos durante el periodo de cálculo del balance hídrico [mm].

Siguiendo las normas internacionales se asume que el volumen de los almacenamientos para el periodo de cálculo del balance hídrico es cero ($dW/dt \rightarrow 0$), por lo que la fórmula para el cálculo del balance hídrico sería:

$$X - Y - E = \pm \epsilon$$

Fórmula 10. Balance Hídrico

De la fórmula 10, al despejar la escorrentía superficial se obtiene la siguiente expresión:

$$Y = X - E \pm \epsilon$$

Fórmula 11. Balance Hídrico

2.1.3.4.3 Oferta hídrica superficial neta

La oferta hídrica superficial neta toma en cuenta la disponibilidad de agua que debe existir en los cauces para que siga funcionando los ecosistemas acuáticos (Jaramillo, Molina, y Betancur, 2011).

2.1.3.4.4 Demanda hídrica

La demanda hídrica es la suma total de las cantidades de agua que se utiliza para las actividades socioeconómicas principalmente para la agricultura, industria, ganadería, uso doméstico y de servicio y que se expresa en millones de metros cúbicos. A nivel de la cuenca en estudio, no existe un registro riguroso que contabilice los consumos de agua para cada sector señalado. Seguidamente, se presenta el cálculo de la demanda hídrica (Hebert Gonzalo et al., 2004).

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP$$

Donde:

DT = Demanda total de agua.

DUD = Demanda de agua para uso doméstico.

DUI = Demanda de agua para uso industrial.

DUS = Demanda de agua para el sector servicios.

DUA = Demanda de agua para uso agrícola.

DUP = Demanda de agua para uso pecuario.

2.2 Marco metodológico

2.2.1 Delimitación de una cuenca hidrográfica

Varios son los procedimientos para la delimitación de cuencas, cuya diferencia radica en la precisión que requiere el trabajo y el objetivo que se desea alcanzar, de ahí la importancia de la información base y metodología que se utilice. Es así que puede ser una delimitación manual a partir de planos topográficos o sobre una pantalla hasta métodos digitales en base a herramientas SIG e información geoespacial base.

2.2.1.1 Método tradicional

Este método básicamente define una cuenca hidrográfica en función de las líneas cumbre, el procedimiento se da de la siguiente manera: luego de obtener una carta nacional o levantamiento topográfico a una escala conveniente, lo primero es establecer el punto de interés sobre el cual se definirá una cuenca, subcuenca o microcuenca (la desembocadura o confluencia del río). Se traza de manera preliminar la red de drenaje, principal y los tributarios luego se identifica en los extremos de la red los puntos más altos (mayor cota), cerros, colinas o montañas. Marcar estas referencias con la red de drenaje, los puntos de referencia más elevados en el contorno de la cuenca y se procede a trazar la divisoria de las aguas para lo cual se debe tener en cuenta el valor de las curvas de nivel y cuando ellas indican el drenaje fuera o dentro de la cuenca, como producto final se obtiene la cuenca delimitada (Delgado y Gaspari, 2010).

2.2.1.2 Método digital - método Pfafstetter

De acuerdo a Rosas (2009), la metodología ha sido propuesta para la delimitación y codificación de cuencas a nivel mundial y en 1997 fue adoptada como un estándar internacional por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El método consiste en asignar a las unidades de drenaje identificadores únicos en orden de jerarquía, basados en la topología de la superficie o área de una unidad geográfica o de drenaje, en función de la unidad de mayor nivel que lo contiene, del tipo de unidad geográfica y de la ubicación de la misma, las unidades son delimitadas a partir de puntos de confluencia de los ríos o desde el punto de desembocadura de un sistema de drenaje a nivel costero (Rosas, 2009).

Rosas (2009) describe en su trabajo que el Sistema Pfafstetter toma en cuenta tres tipos de unidades hidrográficas: (i) Cuenca, considerada así el área que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye a otra unidad de drenaje o al curso principal del río. (ii) Intercuenca, es considerada una unidad de drenaje de tránsito del río principal es decir corresponde al área que recibe drenaje de otra unidad aguas arriba, mediante el curso del río considerado como principal y permite el paso de este a la unidad contigua hacia aguas abajo. (iii) Cuenca Interna, es el área que no recibe drenaje de ninguna otra cuenca externa ni aporta con flujo de agua a otra unidad de drenaje o cuerpo de agua.

Para la determinación de las unidades de drenaje, el método establece que la importancia de un río se da en función del área de su cuenca hidrográfica, es decir distingue un río principal de un afluente como una función de la superficie drenada así que, en cualquier confluencia, el río principal será aquel cuya área drenada sea mayor. La codificación consiste en dividir una cuenca hidrográfica, sin importar su tamaño, en cuatro unidades tipo cuenca determinando los cuatro afluentes mayores del río principal, Rosas y Quispe (2009) determinan que “en función del área de drenaje, los códigos asignados a estas denominadas cuencas afluentes son dígitos pares (2, 4, 6 y 8), iniciando en sentido de la desembocadura de la cuenca hacia la naciente del río principal y cinco tipo intercuenca en las que los tributarios del río principal restantes son agrupados y en el mismo sentido se les asigna dígitos impares (1, 3, 5, 7, 9)” (p.10), así mismo cada una de las cuencas e intercuenas resultantes de esta división inicial pueden ser subdivididas de manera que cada una genere cuencas e intercuenas propias.

En el Ecuador se ha utilizado el sistema de codificación Pfafstetter, que ha determinado que en el país existe los tres tipos de unidades hidrográficas: cuenca, intercuenca y cuenca interna.

De acuerdo a Delgado y Gaspari (2010); Rosas y Quispe (2009); Ruiz y Torres (2008), se describe a continuación el procedimiento para el proceso semiautomático de delimitación basado en la metodología Pfafstetter:

1- Generación de las áreas de drenaje (*watersheds*), que a su vez consiste en varios subprocesos:

- Generación del MDT, en base al criterio Pfafstetter se debe generar un modelo digital de elevación, para lo cual se utiliza el método de triangulación TIN basado en el criterio de Delaunay aplicado por el software ArcGis, que permite generar una superficie más ajustada a la realidad debido a que no realiza procesos de suavizado, utilizando como datos de entrada puntos acotados y curvas de nivel se construyen cuantos triángulos pequeños y equiláteros sean posibles para posteriormente ajustar una superficie plana a cada triángulo de manera que la superficie queda modelada como una colección de facetas triangulares que posteriormente se convierte en un objeto raster para su posterior uso.
- Generación de la dirección de flujo, para generar la dirección del flujo es necesario el ingreso del modelo digital de elevación del terreno y el relleno de todas las depresiones, lo que a su vez posteriormente permitirá la generación de la acumulación del flujo.
- Determinación del umbral de acumulación de flujo específico, se refiere a establecer el flujo de acumulación adecuado que permita a obtener las unidades de drenaje (*watersheds*) planteadas por la metodología de Pfafstetter, en este caso se debe procurar que la asignación de flujos permita identificar claramente el flujo principal y cuatro tributarios.
- Una vez obtenido el umbral de acumulación, se debe crear un nuevo tema temporal, con el fin de almacenar datos relevantes en una nueva clase que representan el río principal y sus cuatro principales afluentes.
- Enlace de corrientes o *stream link*, se realiza para obtener un tema que represente solo los cursos de agua con las confluencias de los tributarios con el río principal, a

partir de la red de drenaje que se determine se generara las respectivas unidades de drenaje o *watersheds*.

- Generación de las unidades de drenaje (*watersheds*), con la dirección de flujo definida y el enlace de corrientes usando puntos de desembocadura se procede a la generación de *watersheds* automática de manera controlada por el usuario.
- 2- Generación vectorial de las Unidades Hidrográficas: Este punto se trata de la conversión de las unidades hidrográficas en formato raster a una capa tipo vector. Para lo cual se debe analizar con la cobertura de curvas de nivel y con la red hidrológica base, el fin es determinar algunos errores los mismo que en esta fase deben ser corregidos en su totalidad y una vez terminada las correcciones se procede a generar los polígonos correspondientes de las unidades hidrográficas.
 - 3- Introducción de códigos a las unidades hidrográficas, la información ingresada cuenta principalmente con los códigos Pfafstetter de las unidades hidrográficas y demás información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

2.2.2 Metodología para el estado de la disponibilidad del agua en una cuenca

2.2.2.1 Metodología IDEAM para la determinación del índice de escasez para aguas superficiales

Según Hebert Gonzalo et al. (2004), el índice de escasez fue desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y fue adoptado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. El índice representa la relación porcentual entre la demanda potencial de agua de diferentes actividades con la oferta hídrica disponible luego de aplicar factores de reducción por calidad del agua y el caudal ecológico, es importante mencionar que este factor esta dado en forma global debido a que no se disponen valores específicos para sector o para cada región.

Esta relación se calcula para condiciones hidrológicas medias y secas permitiendo una visión de la situación de disponibilidad actual y su proyección futura de abastecimiento de manera que es útil dentro de la planificación y gestión del recurso hídrico. Una vez determinada la oferta de agua, así como su calidad se contrasta con la demanda estableciendo si su disponibilidad en tiempo y cantidad es suficiente o no (Hebert Gonzalo et al., 2004).

El método de cálculo de la oferta hídrica depende directamente de la información disponible en cuanto a caudal del río, confiabilidad y extensión de los registros históricos. La disponibilidad de la información define el método de estimación de la oferta. Es decir, en el caso de tener cuencas hidrográficas con un registro de las variables climatológicas e hidrológicas mayor de 10 años, es posible estimar la oferta hídrica media anual mediante un balance hídrico. Esta metodología se “aplica en cuencas instrumentadas y con un área de drenaje mayor (más de 250 km²). Por otra parte, en el caso de contar con cuencas cuyos registros de caudal generen series cortas o poco confiables (series anuales menores de dos años)” (Ortiz, Vélez, y Villegas, 2006, p.106), se debe aplicar un cálculo del caudal medio puntual en las corrientes de interés, además en cuencas menores cuyas áreas de drenaje sean inferiores a 250 km² o cuencas no instrumentadas que no cuenten con registros de caudal para la estimación de la oferta superficial mensual, se aplica la relación lluvia – escorrentía.

Como manifiesta Hebert Gonzalo et al. (2004), el cálculo de la demanda hídrica debe basarse en volúmenes de agua contabilizada para cada actividad humana proveniente de mediciones efectuadas por los usuarios y reportadas a las autoridades competentes. Bajo este contexto, el método plantea 3 posibles escenarios de disponibilidad de información. Un primer escenario planteado se refiere a la existencia de información medida y registrada en donde la demanda total de la cuenca está dada por la sumatoria de todas las demandas sectoriales utilizadas en cada una de las actividades socioeconómicas desarrolladas, es decir uso doméstico, industrial, y del sector servicios. El segundo escenario plantea la disponibilidad de información medida pero insuficiente. En este caso se plantea su agrupación en una base de datos y es complementada mediante la estimación potencial del volumen de agua basada en la asociación de dos variables, el volumen de producción sectorial y un factor de consumo de agua en función del tipo de bien, con la limitación de que no considera ningún tipo de pérdida. Y el tercer escenario es cuando no existe información. En este caso la estimación del volumen de agua es a nivel sectorial, tomando en cuenta dos variables: el volumen de producción sectorial y el consumo de agua por tipo de bien.

Utilizando un software SIG es posible asociar datos del área de estudio sobre cultivos, precipitación, evapotranspiración y coeficientes de uso de agua en función del tipo de cultivos. Una vez establecidos estos parámetros es posible la estimación de la demanda de agua, aunque debido a la calidad de la información el método presenta algunas limitantes que afectan directamente a su determinación.

Una vez definida la oferta y la demanda, es posible la estimación del índice de escasez en porcentaje y cuya categorización e interpretación se agrupa en cinco categorías: alto, medio alto, medio, mínimo, no significativo (Infante y Ortiz, 2008).

2.2.2.2 Método WEAP

El modelo WEAP, según Salinas y Paz (2011), permite la modelación para la planificación y distribución del agua con prioridades asociadas utilizando diferentes escenarios de distribución mediante la integración entre la oferta, la demanda, calidad del agua y consideraciones ecológicas. El modelo WEAP permite la planificación del recurso hídrico mediante un balance entre la oferta, dada por aspectos hidrológicos de la cuenca, y la demanda caracterizada por la distribución variable espacial y temporal prioritaria.

Quintanilla, Spickenbom, Calderón, y Larrea (2009) describen que WEAP es un modelos forzado por condiciones climáticas a diferencia de otros modelos que se basan en la modelación hidrológica extrema, por lo cual resulta ser un modelo útil en la planificación debido a la gama de herramientas que presenta para analizar un amplio rango de incertidumbres y temas que pueden presentarse en la planificación y distribución de los recursos incluyendo temas de cambio climático, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible, cambios en la oferta y/o demanda del recurso.

Salinas y Paz (2011) manifiestan que el modelo hidrológico integrado de WEAP es espacialmente continuo conformado por varias subcuencas contiguas, que se encuentran divididas en diferentes tipos uso/cobertura de suelo, que cubren la totalidad de la cuenca de análisis en donde a cada una de estas se les asigna un set homogéneo de datos climáticos. Mediante un modelo cuasi físico dimensional se asigna el agua a cada proceso hidrológico, escorrentía, infiltración, evaporación, flujo base y percolación.

De manera general la manera de aplicación del modelo WEAP se da de la siguiente forma (i) definición del marco temporal, límites espaciales y componentes del sistema (ii) recolección de información diaria acorde a los requerimientos del estudio (iii) realización del modelo, corridas para su posterior calibración así como identificación de inconsistencias o errores en la modelación (iv) calibración del modelo (v) uso del modelo, en esta etapa se pueden asignar diferentes escenarios de análisis e ir explorando los diferentes impactos que

se tendrían al aplicar diferentes aspectos futuros como ofertas, demandas o cambio en la calidad del agua (Quintanilla et al., 2009; Salinas y Paz, 2011; SEI, 2015).

2.2.2.3 Método SWAT

De acuerdo a Quintanilla et al. (2009), el modelo SWAT permite la simulación continua, diaria y a escala de la producción de agua y sedimentos de una cuenca hídrica en un ambiente de ArcGis mediante la herramienta ArcSwat. El modelo fue desarrollado por Departamento de Agricultura de los Estados Unidos juntamente con la Universidad de Texas para predecir el impacto del manejo del suelo y vegetación en la producción de agua, así como el impacto que tienen las prácticas agronómicas en la calidad del agua en periodos de tiempo largos.

El modelo está conformado por varios sub modelos empleados para la simulación de los distintos procesos hidrológicos, el modelo se basa en forma general en un Balance hídrico para determinar el agua que ingresa, sale y se almacena en la cuenca, para lo cual se realiza un cruce de componentes asociados en ocho divisiones principales, hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de los cultivos. Dentro de los componentes hidrológicos uno de los más importantes es el cálculo de la escorrentía la cual en el modelo se desarrolla en dos fases: (i) la fase terrestre del ciclo hidrológico, que se basa en la técnica de la curva numérica del Servicio de Conservación de los Suelos (SCS), para la tasa máxima de escurrimiento y en el Método Racional Modificado para la simulación de la escorrentía máxima. Además, el modelo SWAT realiza también la simulación de producción de sedimentos a través de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos Modificada (MUSLE) permitiendo la predicción de la erosión total anual de la cuenca y (ii) la fase de enrutamiento del agua a partir un modelo de movimiento de los sedimentos a lo largo de la red de drenaje de la cuenca. La estimación de estos parámetros hidrológicos como evapotranspiración, escorrentía superficial, velocidad de escurrimiento, flujo de agua subterránea y producción de sedimentos se logra al trabajar con unidades de respuesta hidrológica (HRU) las cuales a partir de datos climáticos, cruce de las diferentes variables como tipos de suelo, uso, cobertura, permiten su estimación (Galván, Olías, Fernández, y Domingo-Santos, 2007; Palazón y Navas, 2012; Quintanilla et al., 2009).

2.3 Marco histórico

La Geomática, a través de los Sistemas de información geográfica, la teledetección y los Sistemas de posicionamiento global (GPS), ha pasado a ser una herramienta importante dentro del manejo de los recursos hídricos al conjugar la dimensión espacial con la presentación precisa de los componentes territoriales, generando escenarios que favorezcan al análisis y comprensión de los diferentes componentes que intervienen en el manejo de los recursos hídricos dentro de un territorio permitiendo dinamizar y solucionar problemas así como generar conocimientos nuevos debido a su amplio campo de aplicación.

Dentro de la aplicación de los SIG en el manejo de los recursos hídricos se han desarrollado varias investigaciones entre las que se puede mencionar la realizada en Chile por Mena, Ormazábal, Llanos y Díaz (2007) con el objetivo de desarrollar un sistema de información geográfica para mejorar la gestión del agua de riego del embalse convento viejo. Se basó en utilizar recursos de la geomática con el fin de establecer varios escenarios en donde se permita el análisis de múltiples variables que determinen el potencial productivo y se establezca una tipología de explotación agrícola que oriente a la creación de líneas de acción llegando a mejorar la disponibilidad del recurso hídrico. Realizaron la confección de la base de datos digital, determinaron los sectores geográficamente homogéneos de intervención, establecieron la tipología de las explotaciones agrícolas y finalmente la creación del sistema de información geográfica para el área de estudio. Además, obtuvieron cuatro zonas homogéneas de intervención, con características particulares del suelo, clima, uso de suelo y tamaño de explotaciones; identificaron cuatro conglomerados de explotación agrícola tipificados de acuerdo a variables sociales, productivas, financieras y comerciales. La consulta y análisis de la información fue más fácil, llegando al mejoramiento de la gestión y planificación del recurso hídrico al conocer la situación real los recursos ambientales y sociales (Mena et al., 2007).

Para poseer una planificación hídrica y una correcta gestión de los recursos hídricos es importante conocer con exactitud la demanda agrícola. En el artículo escrito por Martínez, Rodríguez y Montesinos (2013) sobre el uso de técnicas de información geográfica para la discriminación de superficies regadas, se presenta la necesidad de combinar el componente técnico y metodológico con un conocimiento práctico y operativo de las características, dinámica y calendario de riego del cultivo, para optimizar el potencial de las técnicas de información geográfica en la discriminación del riego en las siembras, dejando de considerar

solamente fuentes de datos y metodologías que no se ajustan a los escenarios reales y resultan en inconsistencias. La metodología empleada en este estudio se basa en la integración de datos territoriales en un contexto multitemporal, multispectral y multicriterios, usando datos tomados en campo como referencia. Su desarrollo inició con la segmentación de las parcelas utilizando cartográfica a detalle, luego se aplicaron criterios relacionados con la probabilidad de existencia del riego y con la identificación de cultivos ayudando a cuantificar el uso del suelo, se caracterizó la probabilidad de la existencia de riego o de la tipología de cultivos, y finalmente se tomó decisiones asociadas a la identificación de tipos de cultivos o de la existencia de riego, donde se realizó la evaluación de las alternativas posibles. Los resultados obtenidos demuestran la importancia de trabajar con mapas en escalas adecuadas y de calidad suficiente, no asociados a una sola fuente de datos, con resultados fiables para la toma de decisiones relacionadas con el uso del agua, que permitan la localización del riego y la identificación fiable de los tipos de cultivos (Martínez et al., 2013).

Dentro del manejo de los recursos hídricos es importante conocer la condición de los suelos, debido a que influyen directamente la hidrológica de un territorio, además de ser necesario para el manejo integral de los recursos naturales. De ahí la importancia de la determinación de la erosión hídrica de los suelos. Mencionan Gaspari, Delgado y Senisterra (2009) que la aplicación de los SIG en la investigación llevada a cabo en Argentina, en donde realizaron la simulación espacio – temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana bonaerense. Se demostró mediante la zonificación de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial utilizando SIG, que es necesaria la implementación de medidas conservacionistas en las áreas críticas afectadas por erosión hídrica superficial para evitar la remoción del recurso suelo. En este caso se realizó el análisis de dos situaciones potenciales con y sin implementación de medidas conservacionistas comparándolas con la situación actual.

Además, en 2015 se realizó un estudio de riesgo de la erosión hídrica del suelo utilizando el modelo Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (U.S.L.E) mediante herramientas SIG, aplicado en la subcuenca río Portoviejo, Ecuador, en donde se obtuvieron los rangos y ubicación de las zonas potencialmente erosionables. El uso del modelo U.S.L.E junto con los sistemas de información geográfica permitieron la combinación de una base de datos espacial, estadística y de factores propios del método para la presentación temática de cada uno y su combinación final para generar un solo mapa representativo de la erosión del suelo en la cuenca (Jaramillo, 2015). Además en 2017 se plantea una propuesta de la evaluación

del riesgo de erosión hídrica, utilizando sistemas de información geográfica y teledetección para solucionar la falta de información en el cálculo cuando se utilizan metodologías establecidas por organismos como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO-, con la ayuda de los SIG se realiza la modelación digital del terreno MDT, el análisis espacial SIG aplicado permite calcular un modelo digital del terreno con énfasis hidrológico en donde se toma en cuenta la escorrentía y cuerpos de agua permitiendo estimar la erosión en las diferentes actividades y uso del suelo en el cantón Cayambe, Ecuador (Ortega, Morillo, Jacome, Ibaza, y Nieto, 2017).

La elaboración del balance hídrico en combinación con estudios de oferta y demanda conforma un estudio básico para la planificación de los recursos hídricos. Dentro de este campo, Grimaldos (2014) menciona que la investigación llevada a cabo en Colombia para la creación de una herramienta computacional que permite la estimación del balance hídrico de largo plazo utilizando ArcGis 10.1, presenta avances informáticos acordes a las tecnologías actuales de la ciencia de la Geomática, su creación ayuda para cálculos hidrológicos en el entorno de ArcGis 10.1 y ofrece funciones para automatizar los procesos de generación de insumos intermedios y cálculo de caudales. La validación de la herramienta fue empleada en un estudio de caso en la Cuenca Arroyo las Ánimas, donde se utilizó pruebas de agitación ensayo - error, para depurar el desarrollo del código fuente de programación hasta su consecución.

Otra de las investigaciones es el cálculo del balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. En el trabajo Coral, Garcia, y Leal (2015) presentan el desarrollo de la metodología clásica propuesta por Thornwaite y Mather, enfocado en la importancia de la cobertura vegetal en la dinámica hídrica. En este caso las herramientas SIG permitieron el balance hídrico aplicando álgebra de mapas a superficies continuas llegando a obtener capas ráster que representan la condición hídrica a un escala temporal y espacial para el periodo de un año. Posteriormente se realizó la validación del método mediante un muestreo de los resultados permite concluir que con la metodología propuesta se logra obtener resultados satisfactorios.

En cuanto a la aplicación de los SIG en estudios de disponibilidad y demanda del agua se puede mencionar la investigación realizada en el sistema de riego Campana Malacatos, Ecuador, como un caso práctico de su aplicación. El trabajo se basó en contrarrestar la disponibilidad con la demanda de agua para riego en la cuenca del río Campana con el fin

de determinar la posibilidad de ampliación de cobertura del sistema de riego. La estimación de la demanda fue realizada mediante métodos empíricos indirectos. Mediante el uso de los SIG, se simuló un modelo de oferta y demanda de agua de riego que consideró cobertura vegetal, tipo de cultivos, requerimientos hídricos y coeficientes de escorrentía propios del sistema de riego, dando como resultado mapas temáticos de cobertura de suelo, cultivo y factores hidrológicos además de determinar que la cantidad agua disponible cubre en su totalidad la demanda e incluso con un correcto manejo del recurso hídrico la cobertura del sistema podría ser ampliada (Gonzalez y Cañar, 2016). Con un enfoque más completo en donde la disponibilidad de agua es un componente más para la planificación de los recursos hídricos se puede mencionar un estudio de aplicación del modelo de planificación hídrica de cuencas WEAP al proyecto aducción de recursos hídricos Mururata, WEAP es un modelo hidrológico, de administración y planificación de los recursos hídricos que se ajusta adecuadamente a las características hidrogeológicas de la cuenca. Dentro de la modelación haciendo uso de los SIG se crean nueve escenarios de análisis: (i) demanda de agua, (ii) proyección poblacional, (iii) demandas agrícolas; (iv) demanda desagregada, (v) manejo de demandas, (vi) clima, (vii) cambio de prioridad de demanda, (viii) calidad de agua y (iv) costos. Los resultados obtenidos permiten la simulación de propuestas de mejoramiento permitiendo así estimar el impacto de las decisiones para intervenir en la planificación de manera más acertadas (Salinas y Paz, 2011).

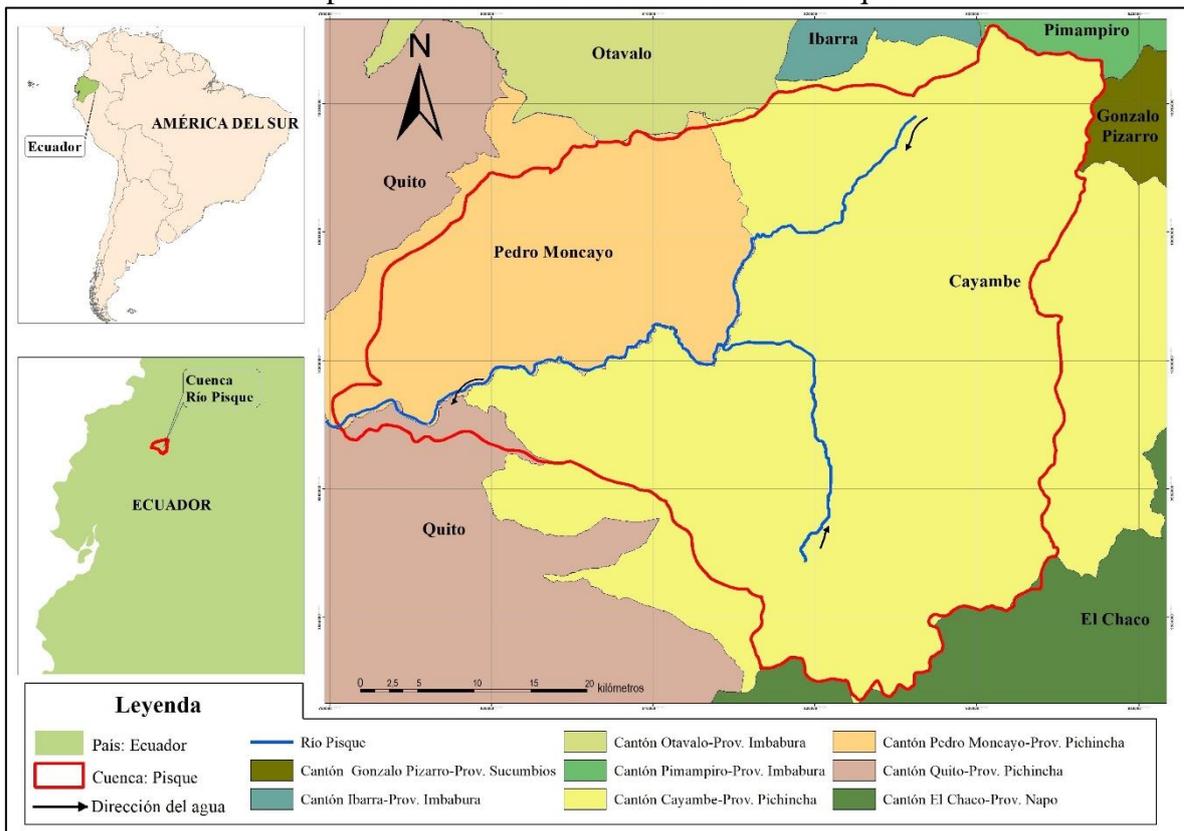
De esta manera se evidencia como las técnicas geoespaciales se muestran como la mejor alternativa para aquellas aplicaciones operativas relacionadas con la estimación de la demanda hídrica en un territorio. La comparación con los otros métodos disponibles muestra que el uso de técnicas geoespaciales debe considerarse como la alternativa más adecuada para la estimación de la demanda hídrica para la agricultura.

3. Metodología

3.1 Zona de estudio

El presente estudio se realizó en la cuenca del Río Pisque, que está ubicada al norte de la provincia de Pichincha aproximadamente a 75 km de la capital del Ecuador. La cuenca abarca a tres cantones: Cayambe, Pedro Moncayo, y un parte de Quito. Dentro de la cuenca están 10 parroquias rurales y 5 parroquias urbanas. En el mapa 1 se presenta la ubicación de la zona de estudio y en la tabla 7, las parroquias rurales y urbanas de la cuenca en estudio.

Mapa 1. Ubicación de la Cuenca del Río Pisque



Basada en datos de: INEC (2012) y SENAGUA (2014).

Tabla 7. Parroquias de la Cuenca del río Pisque

Cantón	Parroquias	
	Rurales	Urbanas
Cayambe	Olmedo	Cabecera Cantonal Cayambe
	Ayora	
	Cangahua	Juan Montalvo
	Otón	
	Santa Rosa de Cuzubamba	
	Ascázubi	
Pedro Moncayo	Tupigachi	Tabacundo
	La Esperanza	
	Tocachi	
	Malchingui	
Quito	Parte de Guayllabamba	

Basada en datos de: INEC (2010).

3.1.1 Características biofísicas de la cuenca del Río Pisque

3.1.1.1.1 Temperatura

La temperatura influye en el desarrollo de los cultivos desde su siembra hasta su cosecha. Por lo que es importante conocer el estado de la temperatura en la zona de estudio. El Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE, 2013b) manifiesta que “Las estaciones de registros de temperatura presentan información discontinua y periodos de registros distintos, lo que obligó a plantear diferentes períodos de análisis de este parámetro climático” (p.11). Se calcularon para cada estación climática considerada, las temperaturas medias mensuales y anuales de todo el período histórico de registros, los mismos que se presentan en la tabla 8. Se seleccionaron estaciones que proporcionen valores de temperatura media y que están dentro o cerca de la cuenca del río Pisque.

Tabla 8. Temperatura Media Mensual y Anual (°C)

CÓDIG O DE LA ESTACI ÓN	NOMBR E DE LA ESTACI ÓN	EN E	FE B	MA R	AB R	MA Y	JU N	JU L	AG O	SE P	OC T	NO V	DI C	TOTA L
M022	TABACUNDO H.MOJANDA	12,8	12,7	12,8	12,8	12,9	12,6	12,5	12,8	12,8	12,9	12,9	13,0	12,8
M111	MALCHINGUI INAMHI	14,3	14,5	14,7	14,8	15,0	14,7	14,9	15,7	15,0	14,9	14,5	14,5	14,8
M605	COCHASQUI- HDA. INAMHI	12,5	12,2	12,3	12,5	12,8	12,4	12,3	12,7	12,8	12,4	12,4	12,4	12,5
MA2T	TOMALON- TABACUNDO	14,7	14,6	14,7	14,7	14,8	15,0	15,1	15,4	15,3	15,1	14,7	14,6	14,9
M023	OLMEDO- PICHINCHA	11,6	11,7	11,8	12,0	12,1	11,7	11,4	11,5	11,7	12,2	12,0	11,9	11,8
M168	ASCAZUBI INAMHI	14,9	15,1	15,0	15,0	15,3	15,1	15,7	15,5	15,2	14,6	14,5	15,2	15,1

Basada en datos de: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2013).

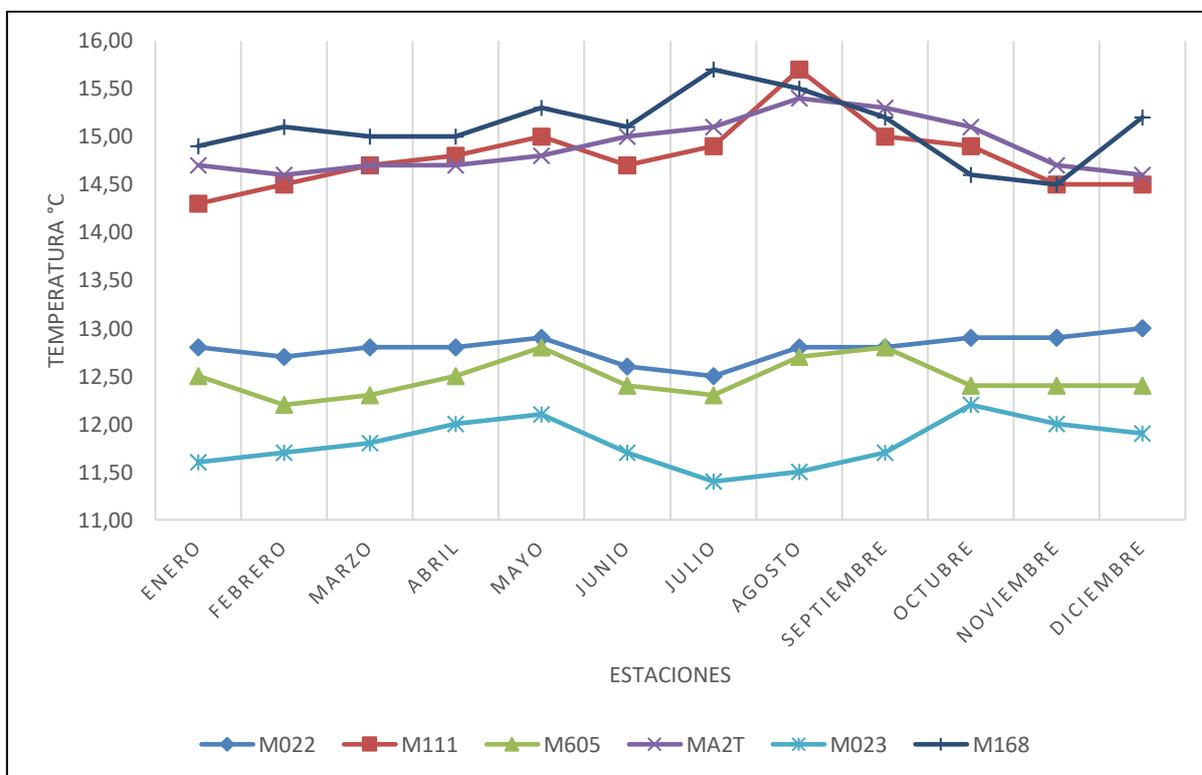


Figura 2. Temperatura Media Mensual (°C)

Basada en datos de: INAMHI (2013).

Con la información descrita en la tabla de temperatura, se determinó que la temperatura promedio anual de la cuenca es de 13,65 °C.

En la figura 2, se observa que en las estaciones M022, M111, M605, MA2T, y M168 presentan el mayor valor de temperatura en los meses de agosto y septiembre, mientras que los meses de enero y febrero son los que presentan valores ligeramente más bajos con respecto a la media anual. Las variaciones mensuales de las temperaturas no son significativas ya que su amplitud (diferencia entre los valores máximos y mínimos) está alrededor de 3°C.

Con la finalidad de estimar el perfil vertical de la temperatura (disminución de la temperatura con la altura), se efectuó una correlación lineal de los valores de temperatura media anual vs altitud. El gradiente térmico de la zona es aproximadamente de 1°C por cada 100 metros de elevación, el mismo que está representado por la siguiente fórmula:

$$T^{\circ}\text{C} = 25.125 - (0,00308 \times \text{Al})$$

Fórmula 12. Temperatura media

T = Temperatura Media (° C).

Al = Altura Media (m).

3.1.1.1.2 Precipitación

La caracterización pluviométrica de la cuenca del río Pisque fue realizada con la información de los anuarios del INAMHI de seis estaciones (ver tabla 9), y los datos rellenados y homogenizados por el método de correlación-regresión empleado en la investigación de Valencia (2014).

Tabla 9. Estaciones Meteorológicas en la Cuenca del Río Pisque

N°	Estación	Código	Ubicación Geográfica			TIPO
			Este	Norte	Cota	
1	Olmedo	M023	828654	10016386	3120	CO
2	Cayambe	M359	818441	9994036	2840	PV
3	Cangahua	M344	815346	9993667	3140	PV
4	Tomalón	MA2T	807981	10003689	2790	AG
5	La victoria	M009	811633	9993391	2262	CO
6	Angla	M321	815468	10023394	2860	PV

CO=Climatológica Ordinaria, OV= Pluviométrica, AG= Agrometeorológica.

Basada en datos de: INAMHI (2013).

El periodo de datos tomados de los anuarios del INAMHI se extiende desde el año 1976 al 2010. Dichos datos presentan una precipitación bimodal, con dos estaciones lluviosas durante el año, esto se puede observar en la figura 3.

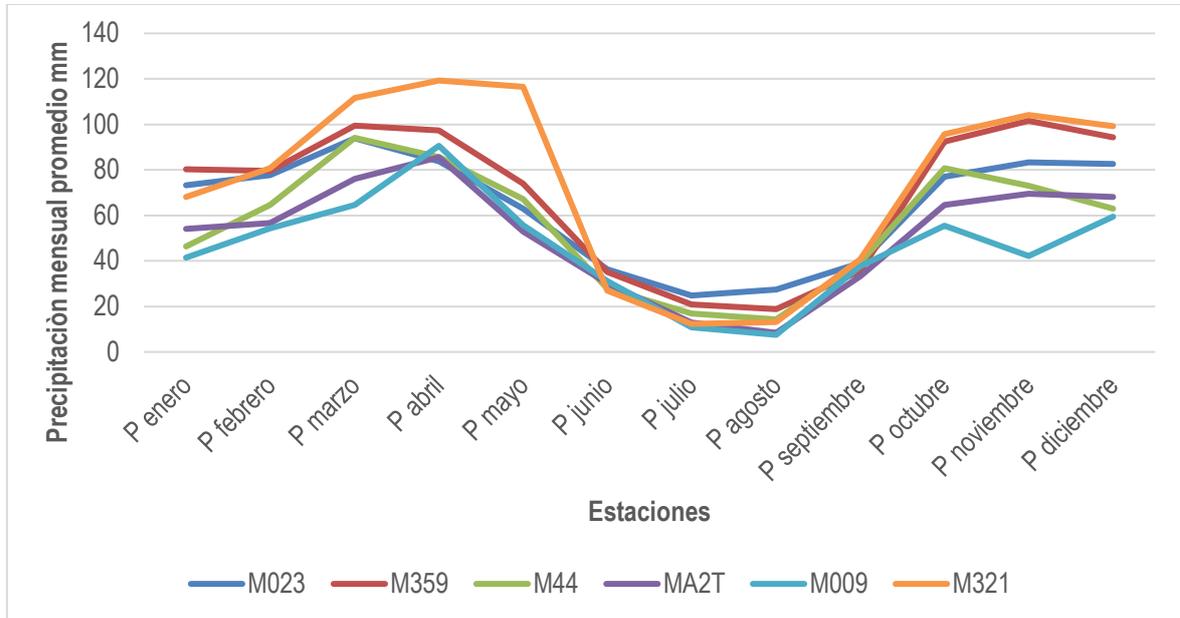


Figura 3. Variación Estacional de la Precipitación de las Estaciones de la Cuenca del Río Pisque
Basados en datos de: INAMHI (2013).

3.1.1.1.3 Tipos de suelo de la cuenca del Río Pisque

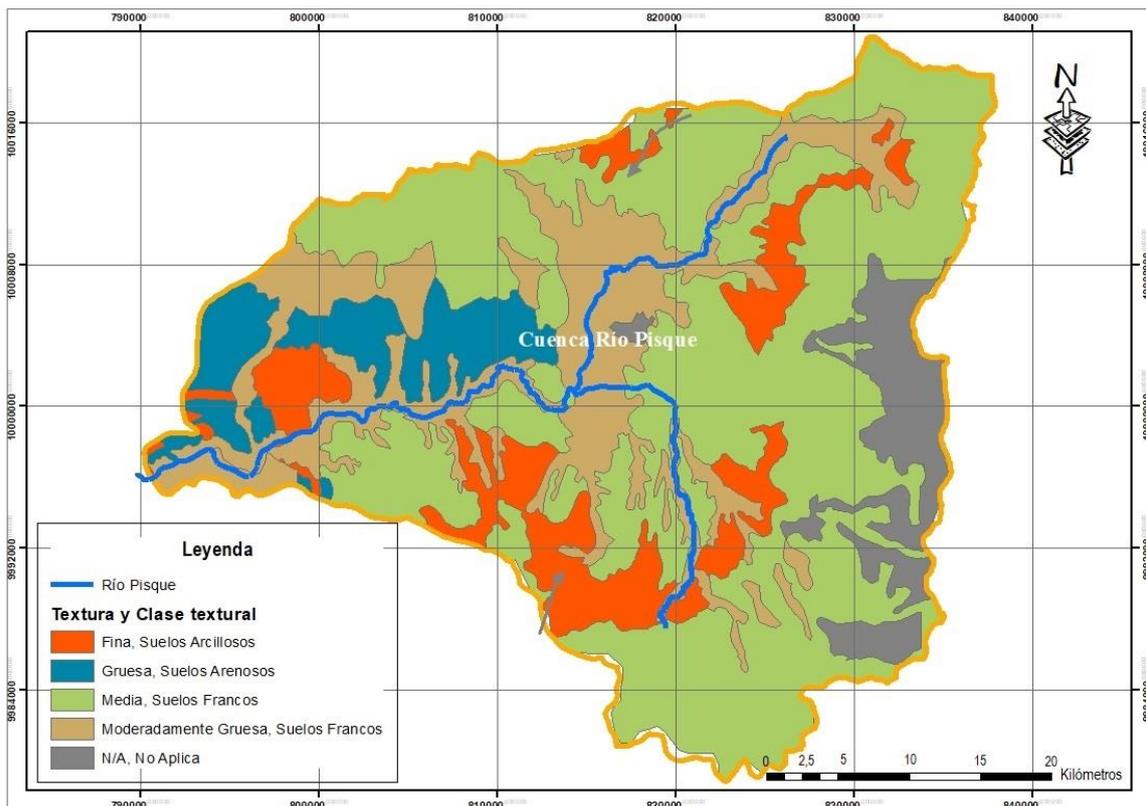
El principal tipo de textura que se encuentra en la mayor parte de la cuenca del Río Pisque es la textura media que corresponde a la clase textural suelo franco que abarca el 51.83 % de la superficie total de la cuenca y que corresponde aproximadamente 58,862.50 hectáreas. Luego está la textura moderadamente gruesa que también corresponde a la clase textural suelo franco, con el 21.43 % de la superficie total de la cuenca y abarcando una superficie de 24,335.39 hectáreas, siendo un tipo de suelo poco desarrollado eluvial el mismo que está continuamente perdiendo materiales (sílice, aluminio, hierro y bases). El tipo de suelo franco es muy importante para la actividad agrícola, pero en zonas con pendientes fuertes existe constantes cambios del perfil del suelo impidiendo una meteorización intensa (IEE, 2013a). En las zonas con este tipo de suelo, hay que implementar mecanismos de conservación, ya que son suelos fértiles y esenciales para la actividad agrícola.

Seguidamente están los suelos con textura fina, que se encuentran dentro de la clasificación textural de suelos arcillosos con 12,984.58 hectáreas correspondiente al 11.43% de la

superficie total de la cuenca, y el tipo de suelo con textura gruesa que corresponde a suelos arenosos, que abarcan 8,324.03 hectáreas y equivale al 7.33% de la superficie total de la cuenca. Estos tipos de suelo no son recomendados para la actividad agrícola, debido a que son suelos que no retienen la suficiente humedad en el suelo o por su contextura no permite la filtración adecuada del agua hacia el suelo, provocando una baja productividad de los cultivos. Sin embargo, estos suelos también se encuentran utilizados por la población para actividades agrícolas, son suelos que requieren una atención tanto por el agricultor y las instituciones del estado que tiene la función de mejorar, proteger y conservar el suelo y el agua (Andrades y Martinez, 2014).

En el mapa 2 y la tabla 10, se muestra la distribución de la textura y clase textural que tiene la cuenca del Río Pisque, que sirve como un indicador para reafirmar que la rugosidad de la cuenca es baja debido a que el porcentaje de suelo arenoso es inferior y se encuentra en la parte baja de la cuenca. Esto indica que la cuenca tiene un proceso de infiltración adecuado y que depende del manejo que se le dé para mantenerse y evitar pérdidas del suelo, y además el parámetro de densidad de drenaje que tiene la cuenca que es alto.

Mapa 2. Tipos de suelo en la cuenca del Río Pisque



Basados en datos de: UPS (2015).

Tabla 10. Tipo de suelo en la cuenca del Río Pisque

TEXTURA	CLASE TEXTURAL	SUPERFICIE (HECTÁREA)	Porcentaje (%)
Gruesa	Suelos Arenosos	8 324,03	7,33
Moderadamente Gruesa	Suelos Francos	24 335,39	21,43
Media	Suelos Francos	58 862,50	51,83
Fina	Suelos Arcillosos	12 984,58	11,43
N/A	No Aplica	9 064,48	7,98
Total		113 570,98	100,00

Basados en datos de: UPS (2015).

3.1.1.1.4 Uso de Suelo de la cuenca del Río Pisque

La vegetación que se encuentra presente en la cuenca del Río Pisque es muy importante para la retención, infiltración y almacenamiento del agua en el suelo. Es así que, según la tabla 11 y el mapa 3, en la cuenca del Río Pisque, existen 109,442.23 hectáreas con diferentes usos, estando 53,397,49 hectáreas destinadas a conservación y protección, 5,294.68 hectáreas destinadas a la conservación y producción, 8,007.55 hectáreas para la protección y producción. Estas coberturas se encuentran en la parte alta de la cuenca y cubren el 60.95 % del total de la superficie y son de las de mayor importancia para el mantenimiento del recurso hídrico y como hábitat de algunas especies. Dentro de la superficie productiva se encuentra el sector pecuario con 24,113.24 hectáreas (UPS, 2015). Este tipo de uso del suelo es el resultado de las actividades ganaderas que realizan en la parte media y con mayor intensidad en la parte alta de la cuenca, representa el 22.03 % de la superficie total, siendo este la principal fuente de trabajo para las familias campesinas, en especial para las familias del sector norte del cantón Cayambe y Pedro Moncayo (ya que tienen acceso al recurso agua) que se caracterizan por la producción lechera que abastecen a las principales fábricas de los dos Cantones (Cerrada, 2014). Seguido se encuentra el sector agrícola con una superficie de 10,912.98 hectáreas, que comprende a las tierras con cobertura de cultivos andinos entre papas, habas, hortalizas, etc. Este tipo de cobertura se concentra en pequeñas áreas de la parte media y baja de la cuenca, que corresponde al 9.97 % de la superficie total y finalmente está el sector agropecuario que ocupa 7,716.29 hectáreas, encontrando misceláneos de cultivos, pasto, bosque..., que ocupa áreas pequeñas en la parte alta, media y baja de la cuenca, cubriendo un 7.05 % de la superficie total de la cuenca del Río Pisque (UPS, 2015).

Si se contrarresta el mapa 2 de tipos de suelo y el mapa 3 del uso de suelo de la cuenca del Río Pisque, se tiene que el tipo de Suelo Franco está siendo utilizado para conservación y protección, y que colindan con el uso pecuario, agrícola y agropecuario. Al apoyarse en el indicador calculado de la curva hipsométrica de la cuenca del Río Pisque, es un riesgo que actualmente no se tenga delimitado la frontera agrícola de la cuenca del Río Pisque ya que, al no existir esta delimitación, conlleva a que los agricultores sigan desmontando el páramo y cultivando en este tipo de suelo, que conlleva a una baja recarga de agua de los páramos.

En el informe realizado por la Universidad Politécnica Salesiana (UPS, 2015), se describe que la cuenca del río Pisque tiene una superficie de 113,570.98 hectáreas, de las cuales 109,442.23 hectáreas son utilizadas para alguna actividad pecuaria o agrícola, 4,128.75

hectáreas se encuentran cubiertas por las poblaciones de los cantones. También dentro de estas se puede apreciar que existen suelos que se encuentran improductivos y esto se puede deber principalmente a que no se tiene acceso al recurso agua especialmente en el Cantón Pedro Moncayo y además, se suman los suelos que se encuentran erosionados (sin cobertura) (UPS, 2015), ver tabla 12.

Tabla 11. Uso Actual de las tierras en la cuenca del río Pisque

Uso	Superficie (hectárea)	Porcentaje (%)
Pecuario	24 113,24	22,03
Agrícola	10 912,98	9,97
Agropecuario	7 716,29	7,05
Conservación y Protección	53 397,49	48,79
Conservación y Producción	5 294,68	4,84
Protección y Producción	8 007,55	7,32
Total	109 442,23	100,00

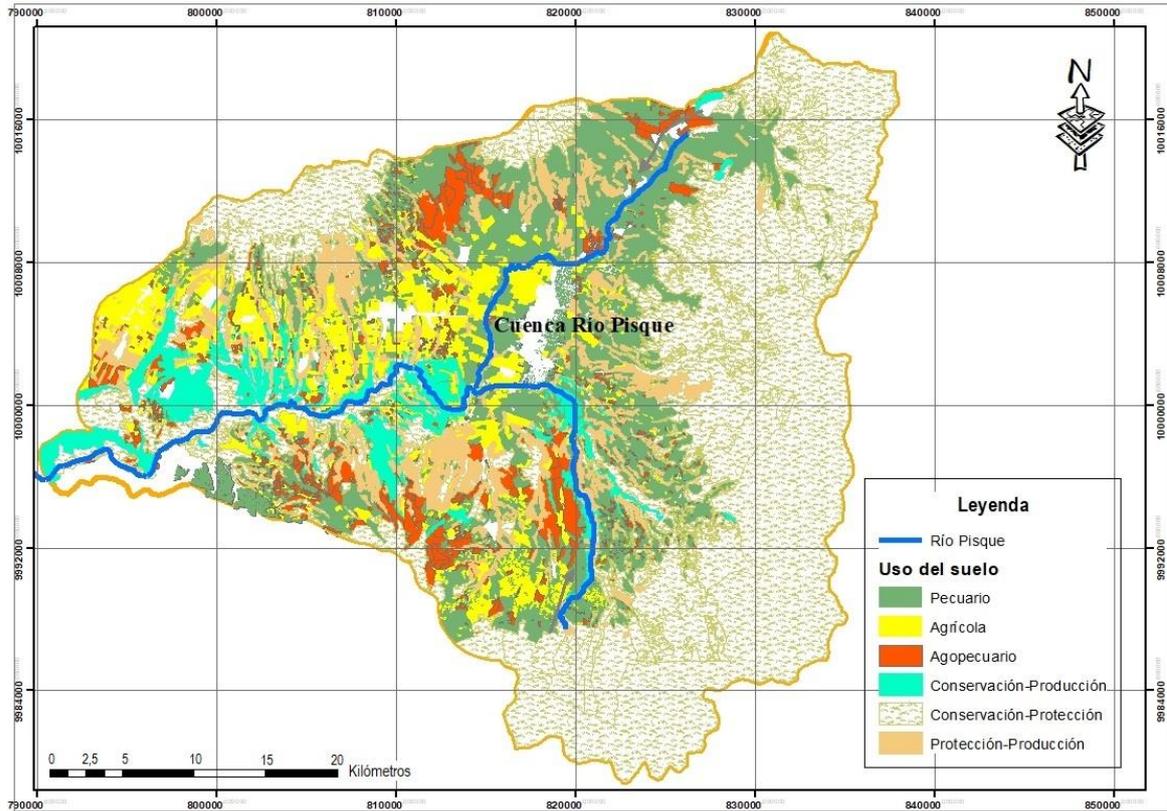
Basados en datos de: UPS (2015).

Tabla 12. Superficie de la cuenca del río
Pisque

Superficie	hectáreas
Con uso del suelo	109 442,23
Zona poblada, tierras improductivas, sin cobertura	4 128,75
Total	113 570,98

Basados en datos de: UPS (2015).

Mapa 3. Uso de suelo en la cuenca del Río Pisque



Basados en datos de: UPS (2015).

3.1.2 Demografía

En la tabla 13 y figura 4, se muestra la cantidad de habitantes en la zona urbana y rural de las parroquias que forman los cantones de la cuenca del Río Pisque, con una población total en la cuenca de aproximadamente 135180 habitantes (INEC, 2010).

Tabla 13. Demografía en la cuenca del Río Pisque

Cantón	Parroquia	Urbano	Rural	Cantidad
Cayambe	Ascazubi	-	5.050	5.050
	Cangahua	-	16.231	16.231
	Cayambe	39.028	11.801	50.829
	Olmedo	-	6.772	6.772
	Otón	-	2.766	2.766
	Santa Rosa	-	4.147	4.147
	Cuzubamba			
	Total	39.028	46.767	85.795
Pedro Moncayo	La Esperanza	-	3.986	3.986
	Malchingui	-	4.624	4.624
	Tabacundo	10.059	6.344	16.403
	Tocachi	-	1.985	1.985
	Tupigachi	-	6.174	6.174
	Total	10.059	23.113	33.172
Quito	Guayllabamba	-	16.213	16.213
	Total	-	16.213	16.213
Cuenca	Total	49087	86093	135180

Basados en datos de: INEC (2010).

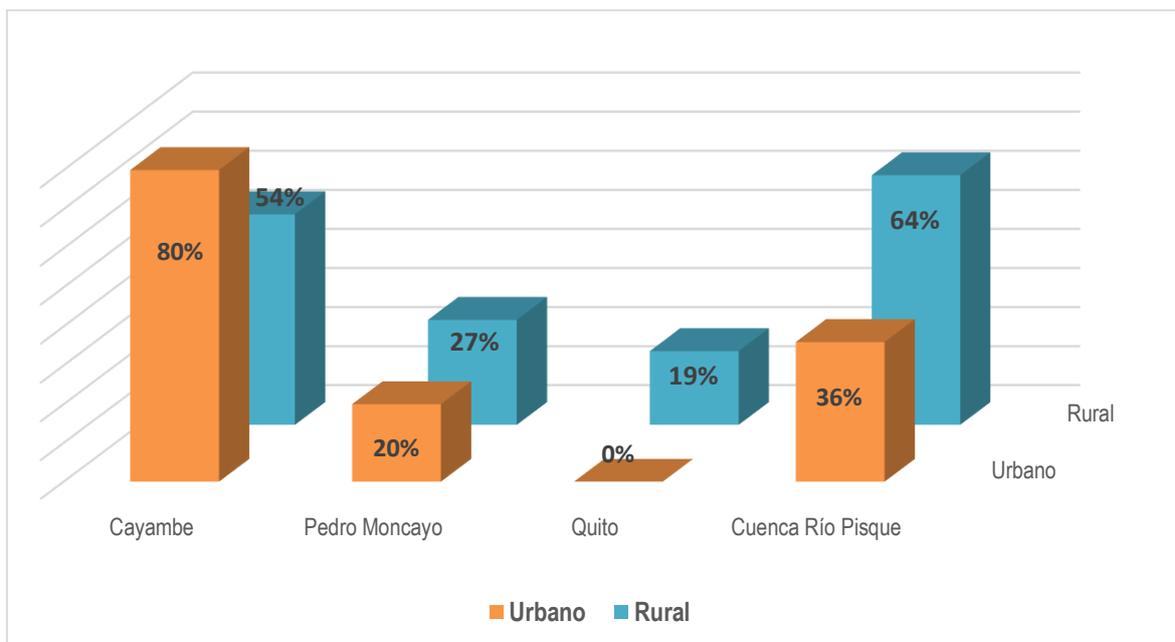


Figura 4. Distribución de la población de la cuenca del Río Pisque

3.2 Fases de la metodología

En el diagrama 1, se muestra la metodología general de trabajo para la obtención de los objetivos propuestos en la investigación. Además, la metodología seleccionada para el cálculo del índice de escasez de la cuenca del Río Pisque fue la propuesta por IDEAM (2004), ya que permite obtener el índice de escasez de cualquier territorio con las ventajas de contar o no con la suficiente información disponible del monitoreo de caudales, precipitación, temperatura tanto para la oferta como la demanda hídrica. En los cálculos para los parámetros requeridos del índice de escasez se utilizó información de concesiones de agua para la demanda hídrica y la información cartográfica, climática y teóricas para la oferta hídrica. Toda la información fue procesada y analizada con software como: Microsoft Excel, ArcGis 10.4 y sus extensiones.

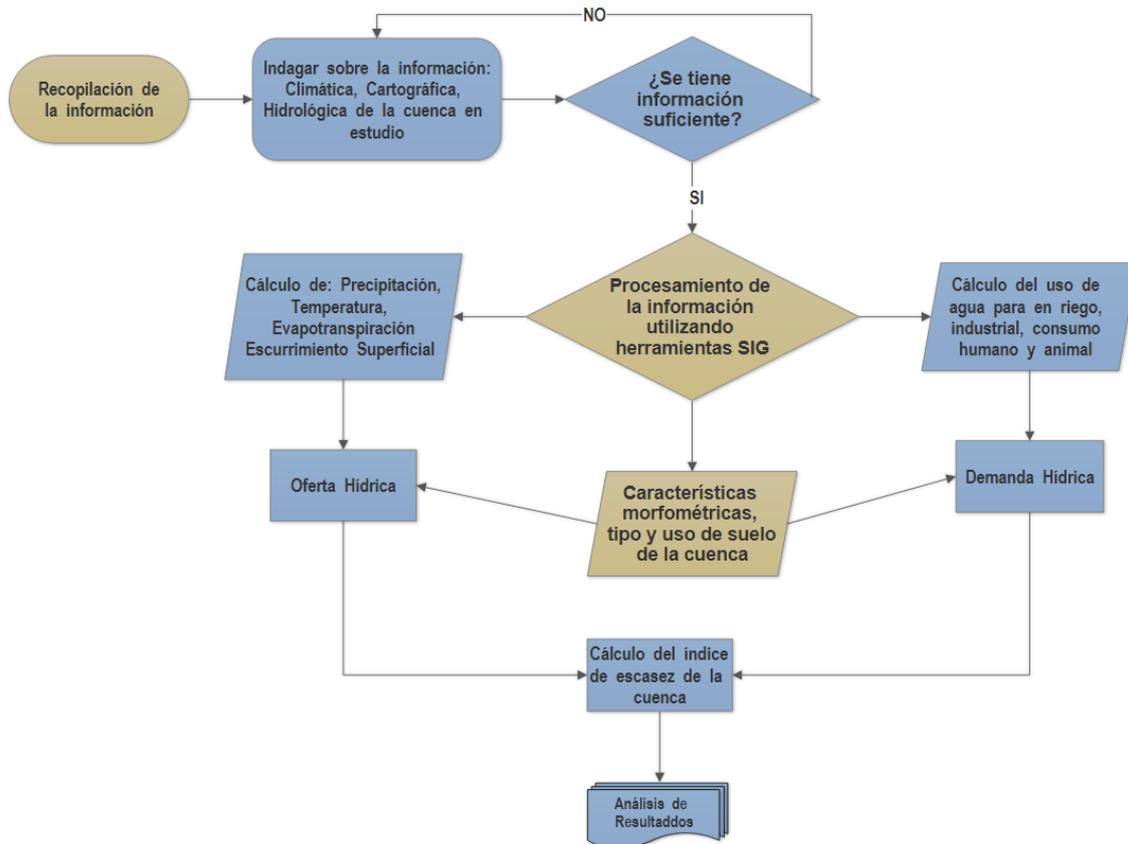


Diagrama 1. Metodología para el cálculo del índice de escasez de la cuenca del Río Pisque

3.2.1 Recopilación de la información

La recopilación de la información para el desarrollo de la presente investigación se realizó a través de los portales web de las instituciones y en reuniones directas con los responsables de las instituciones. En la tabla 14, se describe el tipo de información, año de producción y las respectivas las fuentes de información.

Tabla 14. Información de la cuenca del río Pisque

Tipo de información		Año de producción	Fuente
Información climática	Precipitación	1976 al 2010	-INAMHI
	Temperatura	2014 al 2015	- UPS
	Delimitación administrativa	2014	- Valencia, 2014
Información Cartográfica	Tipo de suelo	2013	-SNI
	Uso de suelo	2014-2015	- UPS
	Cobertura vegetal	2014	- SENAGUA
	Curvas de nivel		
Información de Concesiones de Agua	de Lista de las concesiones de agua	2013	-SENAGUA
Demográfica	Población por parroquias	2010	-INEC

3.2.2 Procesamiento de la información para la caracterización de la cuenca

En el presente trabajo se utilizó el método Pfafstetter porque permite obtener de una manera semiautomática varios parámetros que permitan determinar las características morfométricas de la cuenca del río Pisque.

En el diagrama 2, se describe el proceso de la generación del modelo digital de terreno para el territorio donde se encuentra la cuenca del río Pisque, para lo cual, se utilizó las curvas de nivel, en el sistema de coordenadas WGS_1984_UTM_Zone_17S y las herramientas del 3D analyst tools.

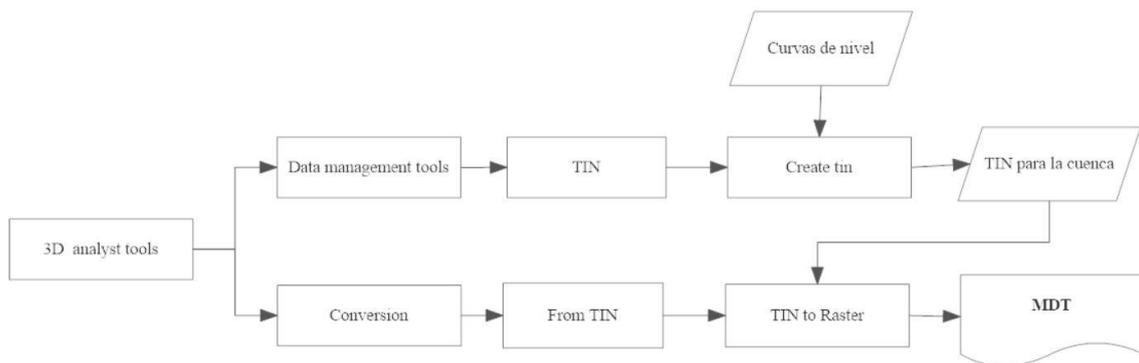


Diagrama 2. Modelo digital de terreno del territorio donde se sitúa la cuenca del río Pisque
Con el modelo digital producido en el diagrama 2, se procedió a rellenar las zonas donde existieran pixeles vacíos o sin datos con la herramienta *Fill* de *spatial analyst tolos*, con esto se consiguió el modelo digital del terreno corregido. Para determinar el flujo de dirección se empleó la herramienta *Flow direction*. Con el resultado de *Flow direction*, se continuó con la identificación de los afluentes presentes en el territorio que se encuentra la cuenca empleando la herramienta *Flow acumulatior* (ver diagrama 3).

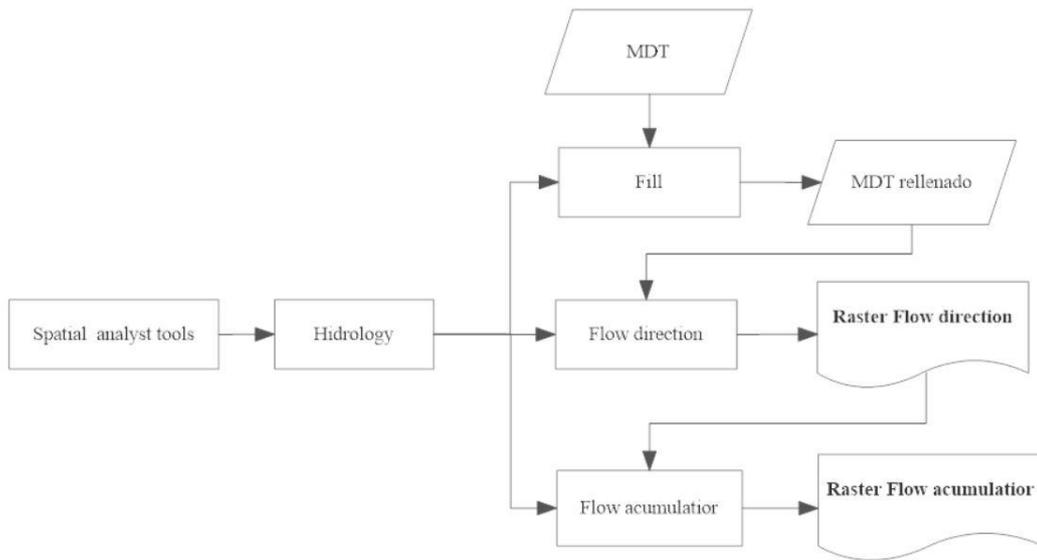


Diagrama 3. Dirección y acumulación del flujo de la cuenca

Con el shapefile de la delimitación de las unidades hidrográficas del Ecuador de donde se extrajo solamente la cuenca de interés realizando un *export data* y el MDT generado en el diagrama 1, se extrae exclusivamente el MDT para la cuenca en estudio utilizando las herramientas de *spatial analyst tools*. El proceso se presenta en el diagrama 4.

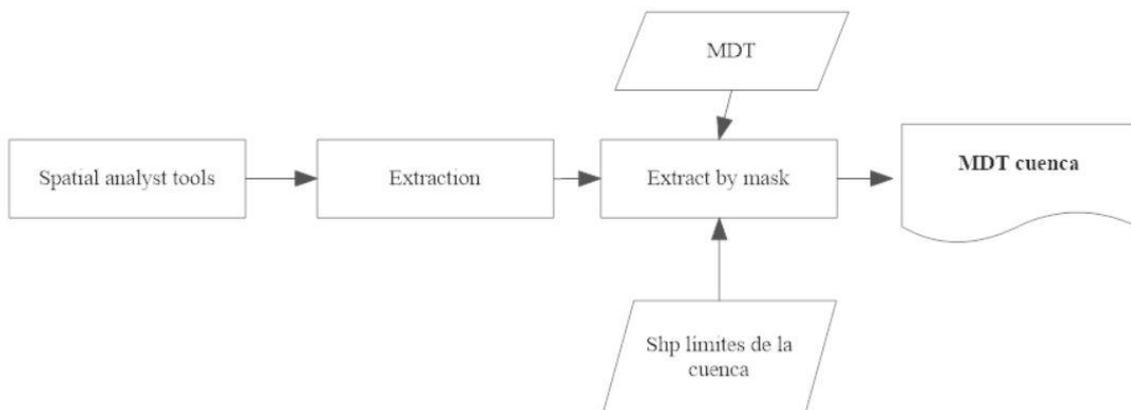


Diagrama 4. Modelo digital de terreno para la cuenca del río Pisque

Luego se asignó la distribución de alturas al *shapefile* de la cuenca del río Pisque utilizando las herramientas de *3D analyst tools* y el MDT (ver diagrama 5).

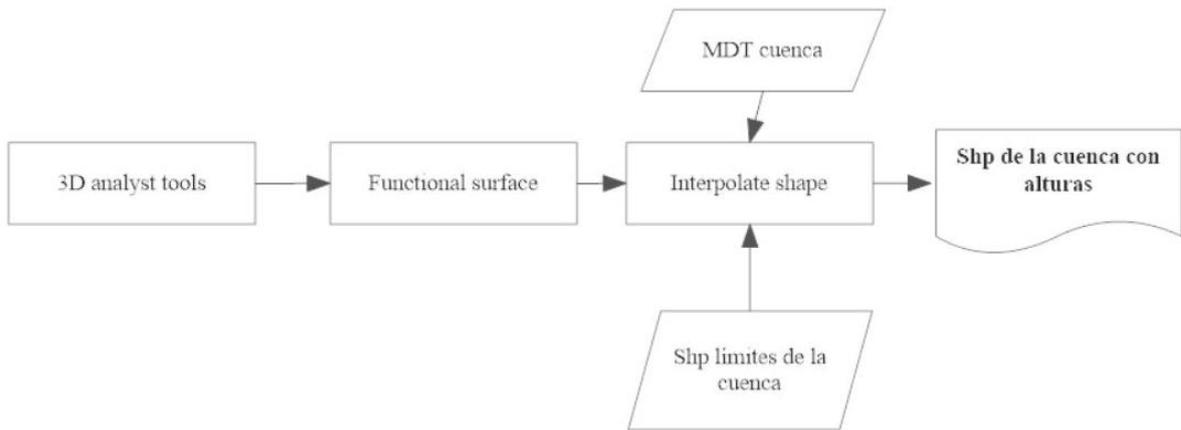


Diagrama 5. Alturas de la cuenca del río Pisque

Con el *shapefile* de la cuenca con alturas obtenido anteriormente y utilizando la herramienta *calculate geometry* de ArcGis, se calculó los parámetros morfométricos de la superficie de la cuenca como: el área, el perímetro, las cotas mínima y máxima, las coordenadas y altura del centro de la cuenca.

Con los resultados del diagrama 3 y el *shapefile* de la delimitación de cuenca del río Pisque, en diagrama 6, se indica el proceso de extracción de los raster de dirección y acumulación de flujo para la cuenca en estudio.

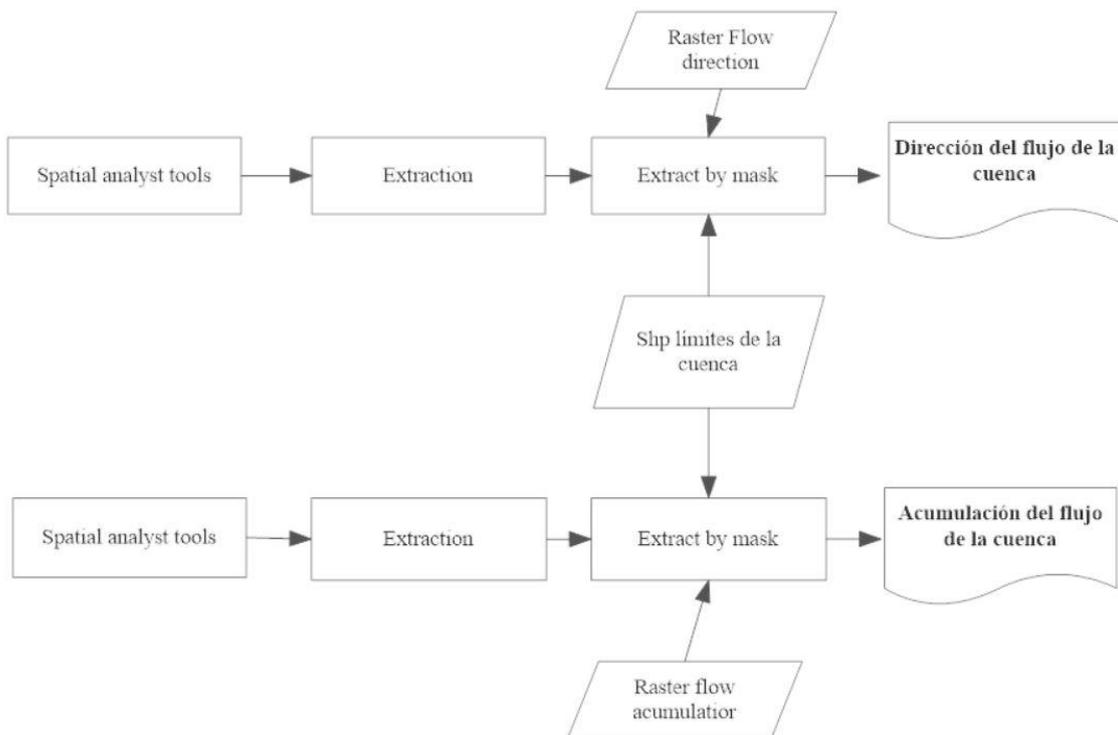


Diagrama 6. Dirección y acumulación de flujo de la cuenca del río Pisque

Para llegar a calcular la curva hipsométrica de la cuenca, se obtuvo 10 áreas entre curvas de nivel con intervalos iguales, utilizando el archivo MDT de la cuenca y las herramientas de *spatial analyst tools*, este proceso se describe en el diagrama 7.

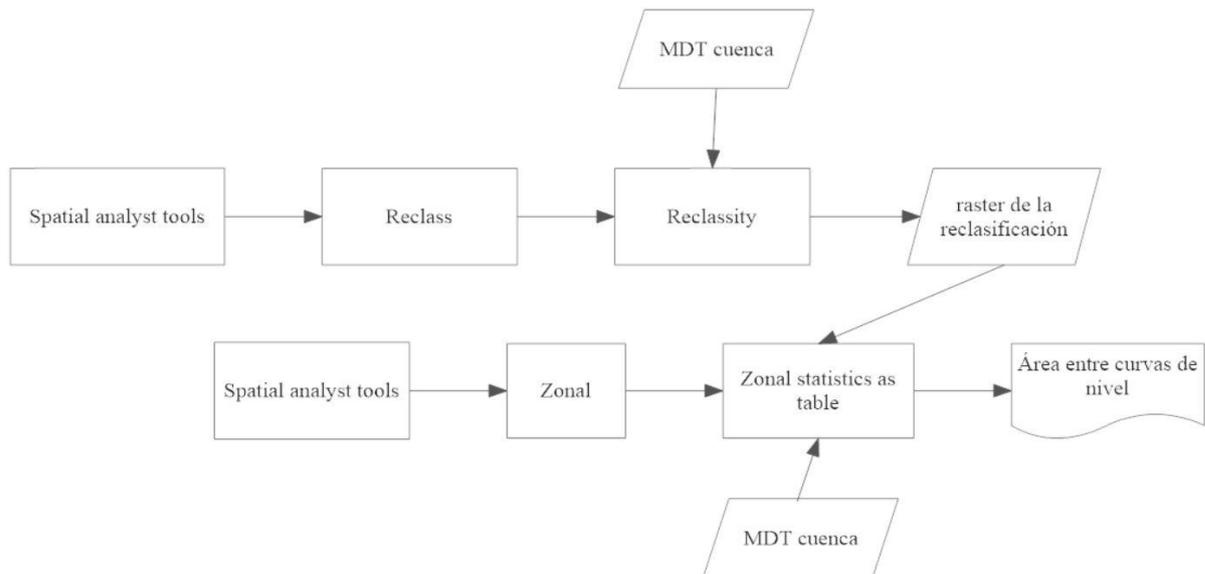


Diagrama 7. Cálculo del área entre curvas

En el diagrama 8, se presenta el proceso para determinar la pendiente media de la cuenca del río Pisque, calculando 10 rangos de pendiente con intervalos iguales y el número de frecuencias de cada rango. Para obtener estos datos se utilizó los archivos del MDT cuenca y las herramientas de *spatial analyst tools*, a continuación, se describe el proceso.

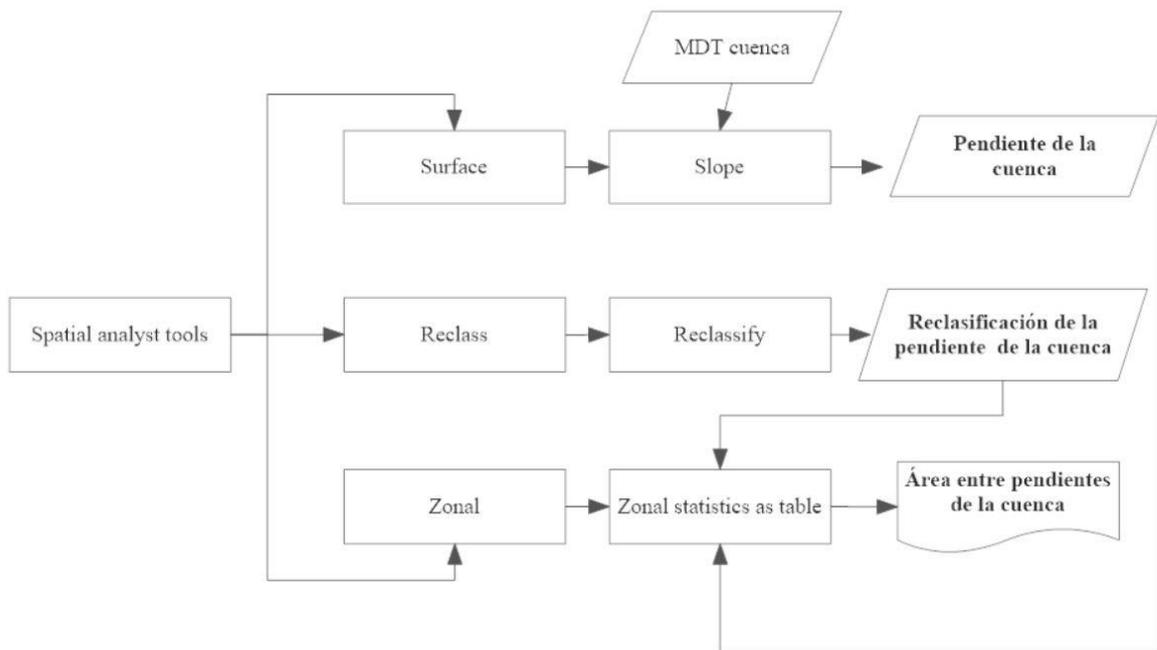


Diagrama 8. Cálculo del área entre pendientes de la cuenca

Seguidamente se presenta el proceso para obtener los parámetros morfométricos de la red hídrica de la cuenca en estudio. En el diagrama 9, se calcula la longitud del curso principal de la cuenca del río Pisque empleando la herramienta de *hidrology* y el archivo raster de dirección de flujo de la cuenca.

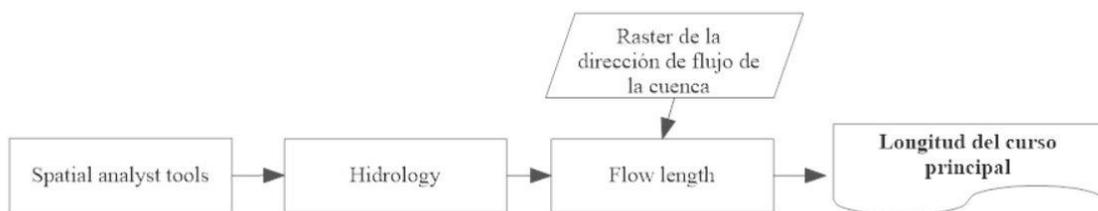


Diagrama 9. Cálculo de la longitud del curso principal

Con los raster de la acumulación y dirección de flujo obtenidos anteriormente y las herramientas de *spatial analyst tools*, se inicia el proceso para obtener el *shapefile* de la red hídrica de la cuenca del río Pisque, los pasos seguidos se describen en el diagrama 10.

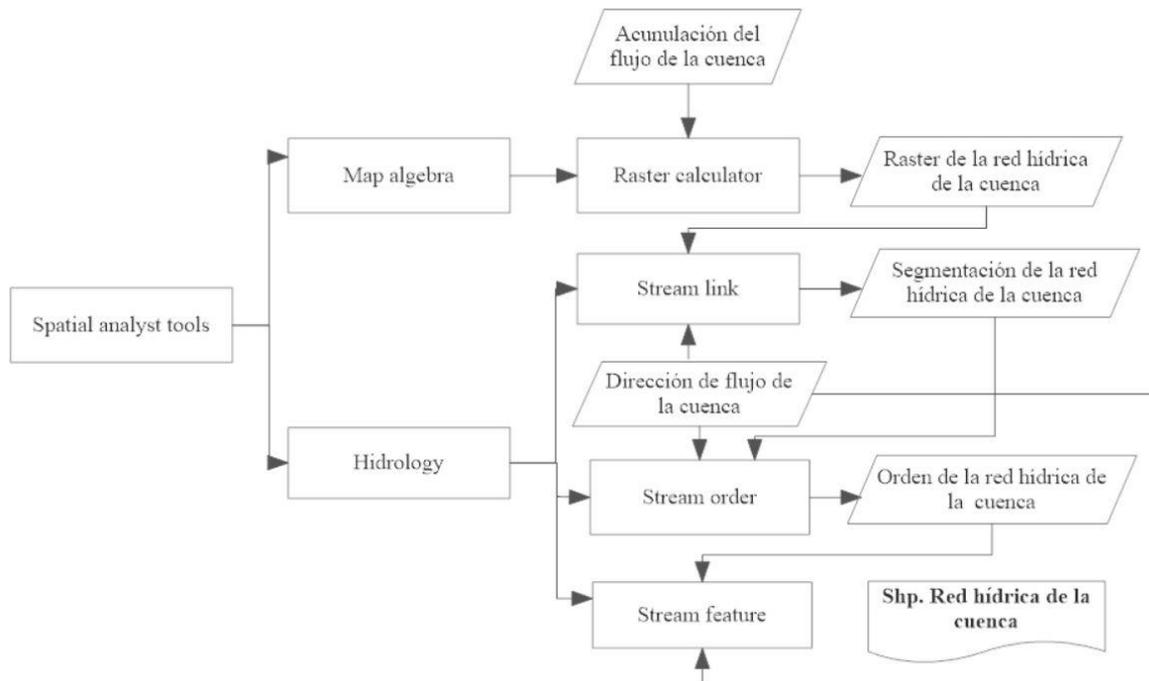


Diagrama 10. Cálculo de la red hídrica de la cuenca

3.2.3 Cálculo de la Oferta Hídrica de la Cuenca Utilizando los SIG

La oferta hídrica de la cuenca del Río Pisque está dada por la cantidad de agua precipitada restándole el agua evaporada. Para obtener el raster de la precipitación anual confiable es necesario contar con información de mínimo 10 años (Cifuentes, 2016), por lo cual se utilizó la información mensual desde los años 1973 hasta el 2012 de las estaciones meteorológicas (ver tabla 9), datos que han sido rellenados y homogenizados a través del modelo de Correlación-Regresión. Para este modelo, se requirió que la mayoría de las series de datos estén completas y que las estaciones de donde se adquirió los datos sean cercanas (Valencia, 2014). Para estimar la precipitación en toda la zona de estudios y obtener un raster de precipitación, se utilizó el modelo de Kriging debido a que no incluyen errores en los valores esperados, por su fácil manejo son los más utilizados dando buenos rendimientos o mejores que los modelos estocásticos (Alzate, Araujo, Rojas, Gomez, y Martínez, 2017).

Otro de los parámetros requeridos en el cálculo de la oferta hídrica, es el raster de la temperatura de la zona de estudio, para lo cual se utilizó el mismo modelo de interpolación Kriging, con datos de la tabla 8.

Y finalmente se obtuvo el raster de la evapotranspiración real de la zona de estudio. Entre las fórmulas para su cálculo se utilizó la fórmula de Turc, por disponer de información de sus variables (Pereyra, Cruz y Pérez, 2011) y la herramienta *raster calculator* del algebra de mapas.

De acuerdo a la fórmula de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9^2 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$$

Fórmula 13. Turc

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año.

P = Precipitación en mm/año.

T = Temperatura media anual en °C.

A continuación, se detalla el cálculo de cada parámetro de la fórmula.

L: Para el raster de L, se utilizó la algebra de mapas donde se aplicó la fórmula 13 anteriormente descrita.

Para obtener el mapa del escurrimiento superficial total de la cuenca, se trabajó con la herramienta *raster calculator* del algebra de mapas y con los datos generados en los mapas de precipitación y evapotranspiración real, y aplicando la fórmula 14.

$$Qx = P - ETR$$

Fórmula 14. Escurrimiento superficial en mm

Donde

Qx= Escurrimiento superficial

P= Precipitación

ETR= Evapotranspiración real

Como el dato obtenido del mapa de escurrimiento superficial total de la cuenca está en lámina de agua, se transformó a m³/año, empleando la fórmula 15 propuesta por el IDEAM.

$$Qx = \frac{(A * 10^4) * Q}{t}$$

Fórmula 15. Escurrimiento superficial en m³/año

Donde

Qx= Escurrimiento superficial en m³/año

A= Área de la cuenca

t=Tiempo de agregación

3.2.4 Cálculo de la Demanda Hídrica de la Cuenca

En la recopilación de la información, se obtuvo los caudales concesionados de la cuenca del río Pisque para el uso agrícola, industrial, consumo humano (agua potable, uso doméstico), abrevadero de animales (SENAGUA, 2014). Se convirtió el vector de la concesión de agua de la cuenca a raster utilicé la herramienta *Feature to Raster del Arctoolbox* del software ArcGis 10.4.

3.2.5 Aplicación de los SIG en el cálculo del índice de escasez

Con los resultados obtenidos de la oferta hídrica y demanda hídrica de la cuenca en estudio, se aplicó la fórmula 6, para el cálculo del índice de escasez de la cuenca del Río Pisque.

4. Resultados y Discusión

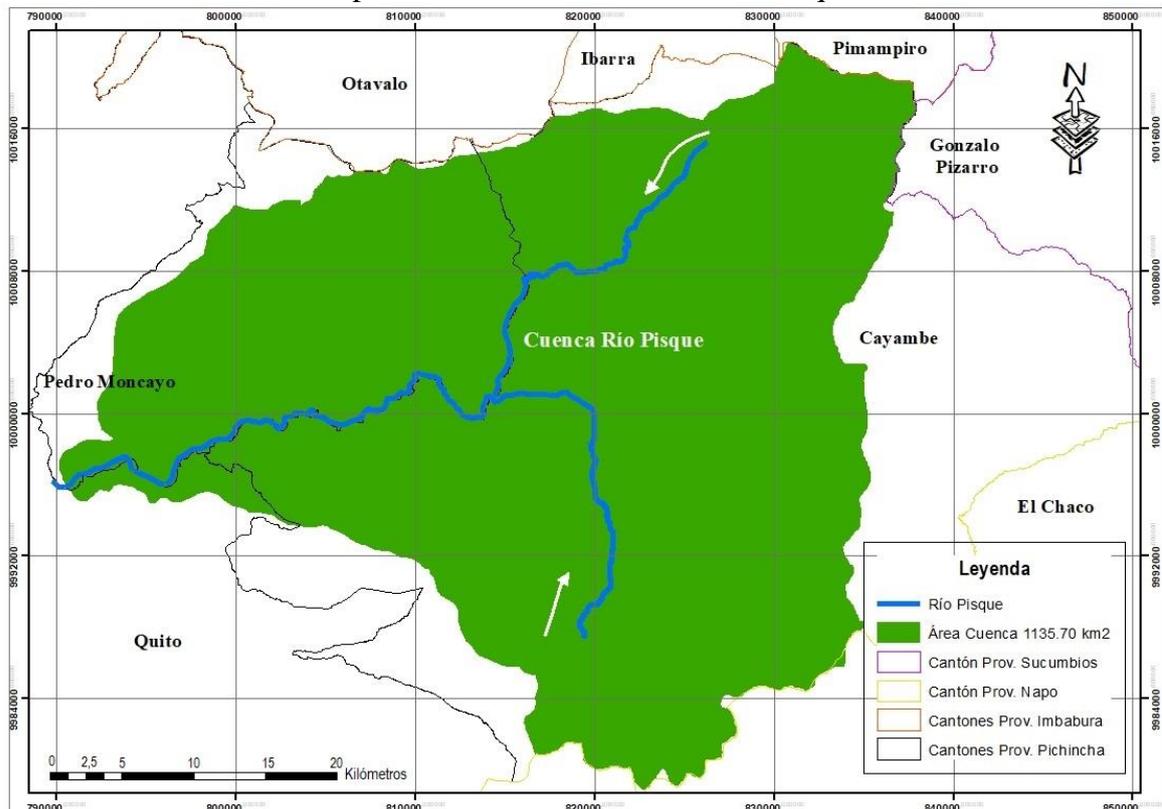
4.1.1 Resultados

4.1.2 Caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Pisque

A través del análisis y procesamiento con herramientas de los sistemas de información geográfica se obtuvo resultados de las características de los parámetros de forma, relieve y comportamiento del flujo hídrico de la cuenca del Río Pisque.

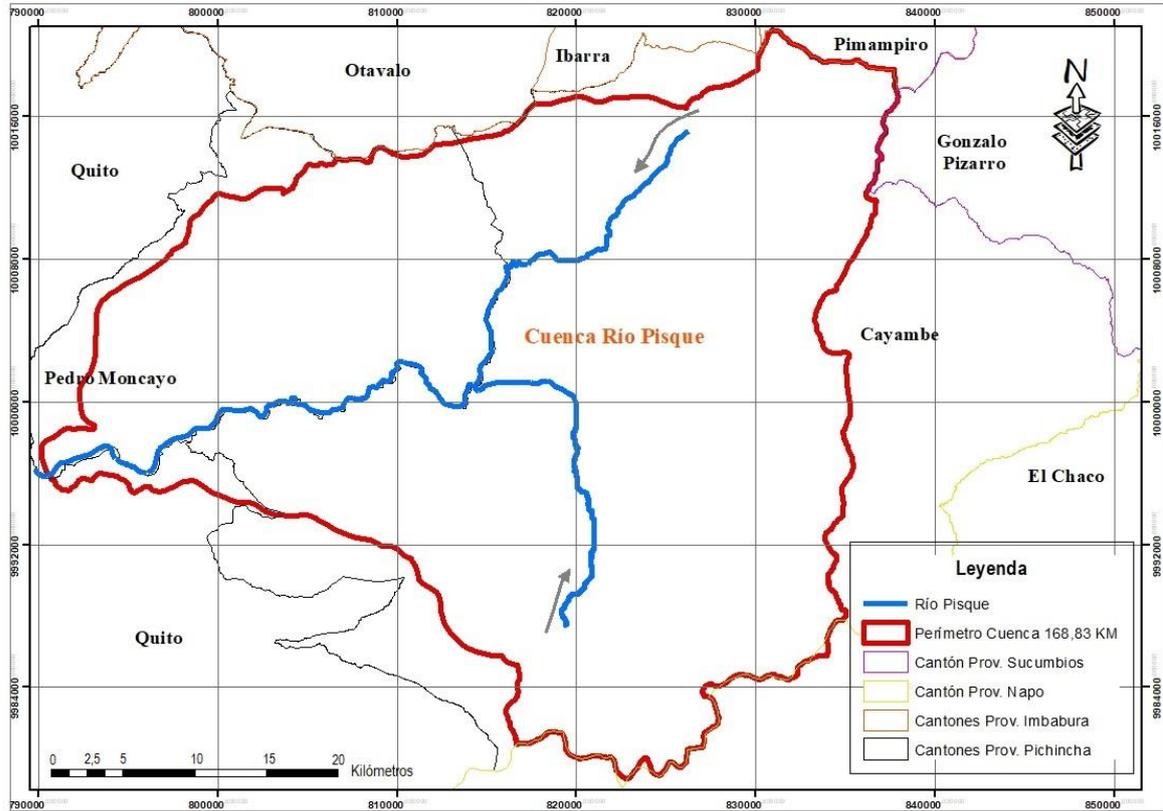
En el mapa 4, se presenta el área total de la cuenca del Río Pisque con una superficie de 1,135.70 km².

Mapa 4. Área de la Cuenca del Río Pisque



En el mapa 5 se presenta el perímetro de la cuenca del Río Pisque que es de 168.83 km.

Mapa 5. Perímetro de la Cuenca del Río Pisque



Para continuar con el análisis morfométrico de la cuenca en estudio, en las tablas 15 y 16, se encuentran la longitud de la cuenca que es de 52.32 km y la anchura de la misma con una dimensión de 21.71 km.

Tabla 15. Longitud de la Cuenca del Río Pisque

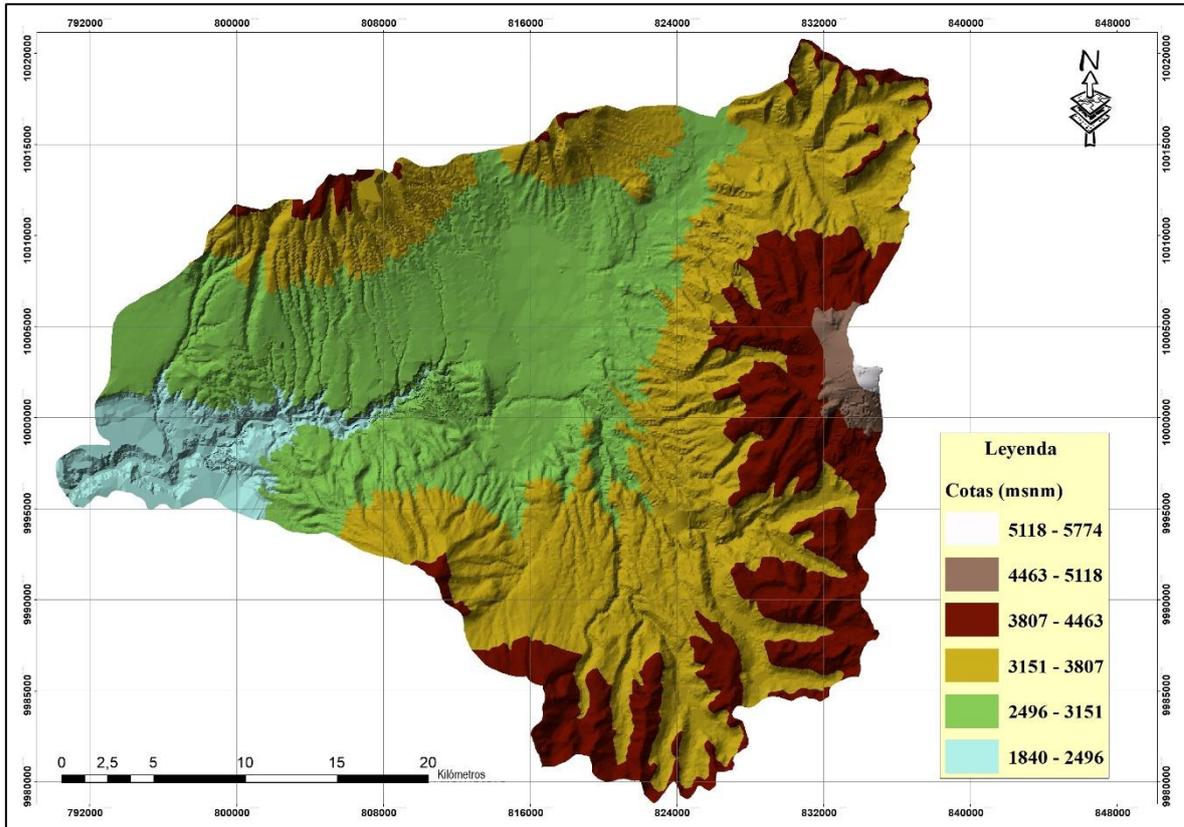
Parámetro	Magnitud
Longitud de la Cuenca	52.32 km

Tabla 16. Ancho de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Ancho de la Cuenca	21.71 km

En el mapa 6, se obtuvo 8 zonas altitudinales de la cuenca del Río Pisque, teniendo como la cota más baja de 1,840 metros sobre el nivel del mar, llegando a la cota más alta de 5,774 metros sobre el nivel del mar.

Mapa 6. Cotas de la Cuenca del Río Pisque



En la tabla 17, se presenta los parámetros de la cuenca del Río Pisque como: la diferencia de nivel de la cuenca que es 3,934 metros sobre el nivel del mar, el coeficiente de compacidad de 1.41, el factor de forma de la cuenca de 0.04 y el índice de alargamiento de la cuenca de 2.41.

Tabla 17. Parámetros de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Diferencia de Nivel	3934.20 msnm
Coeficiente de compacidad	1.41
Factor de Forma	0.04
Índice de Alargamiento	2.41

En la figura 5, se construyó en un sistema de coordenadas para obtener la curva hipsométrica de la cuenca del Río Pisque, en donde el eje de las abscisas es el área acumulada en porcentaje y en el eje de las ordenadas la altura en metros sobre el nivel del mar.

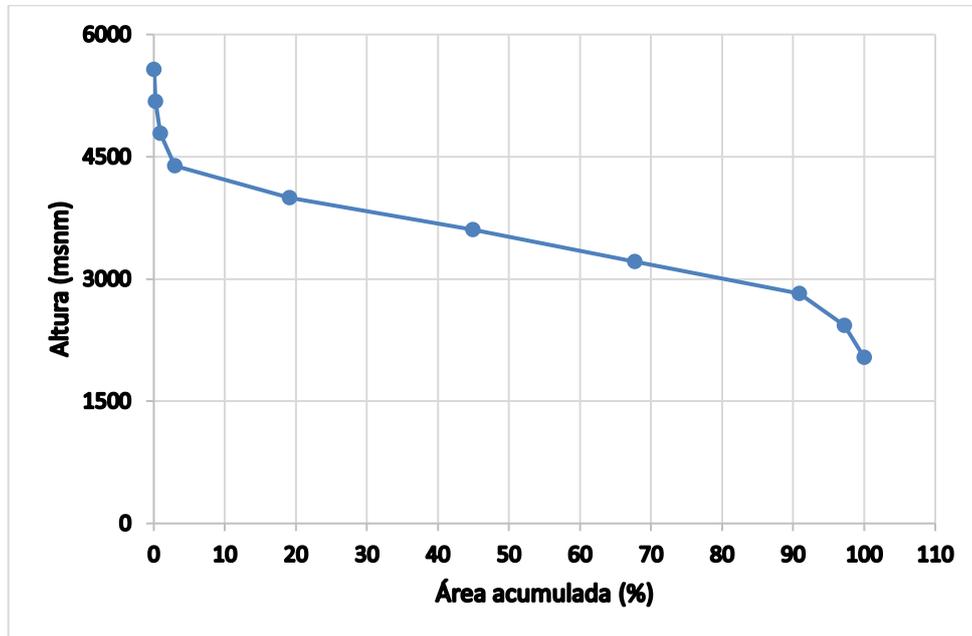


Figura 5. Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Pisque

El coeficiente de masividad de la cuenca del Río Pisque, se especifica en la tabla 18.

Tabla 18. Coeficiente de Masividad de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Coeficiente de Masividad	3.05 Km

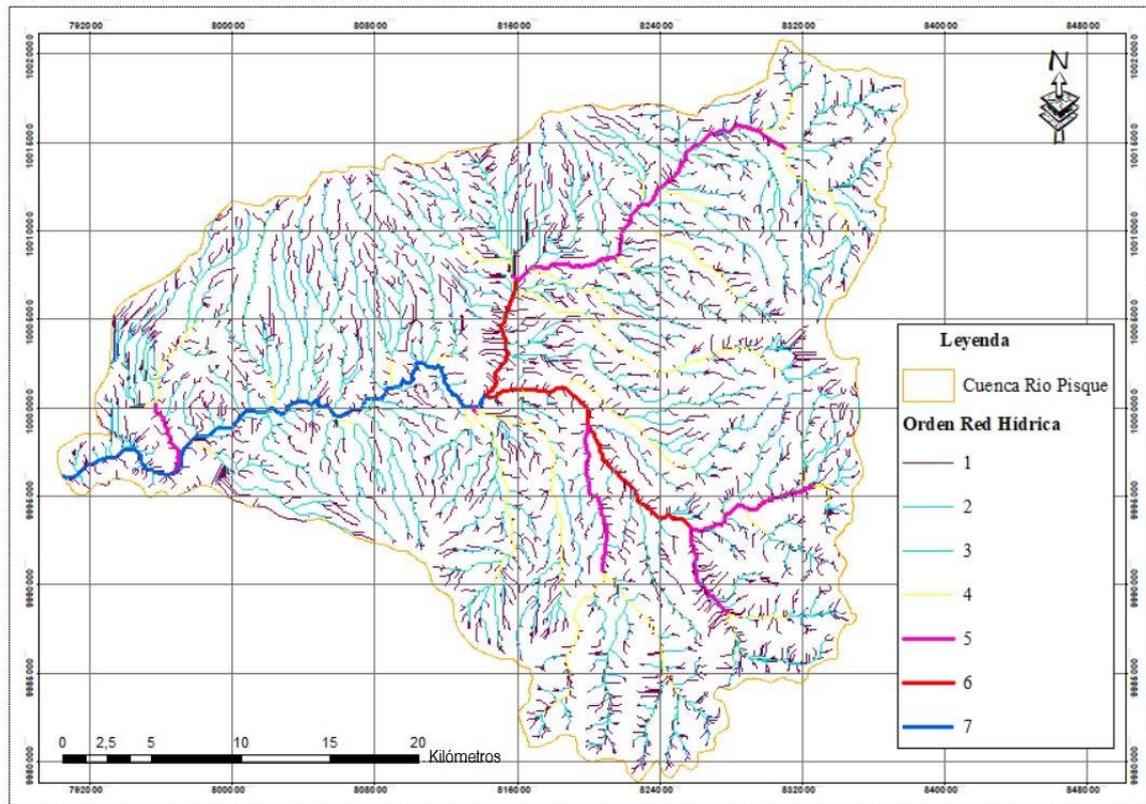
En la tabla 19, se presenta la longitud del río Pisque, que es el cauce principal de la cuenca en estudio.

Tabla 19. Longitud del cauce principal de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Longitud del cauce principal	78031.9 m

En el mapa 7, se indica la orden de la red hídrica de la cuenca del Río Pisque, y según la clasificación de la orden de corrientes de agua, la cuenca en estudio es de orden siete, ya que son corrientes que se forman por la unión de dos o más tributarios de orden seis.

Mapa 7. Orden de la Red Hídrica



Las tablas 20 y 21 muestran la densidad de drenaje y el tiempo de concentración respectivamente de la cuenca del Río Pisque.

Tabla 20. Densidad de drenaje de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Densidad de drenaje	2.31

Tabla 21. Tiempo de concentración de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Tiempo de concentración	19 min.

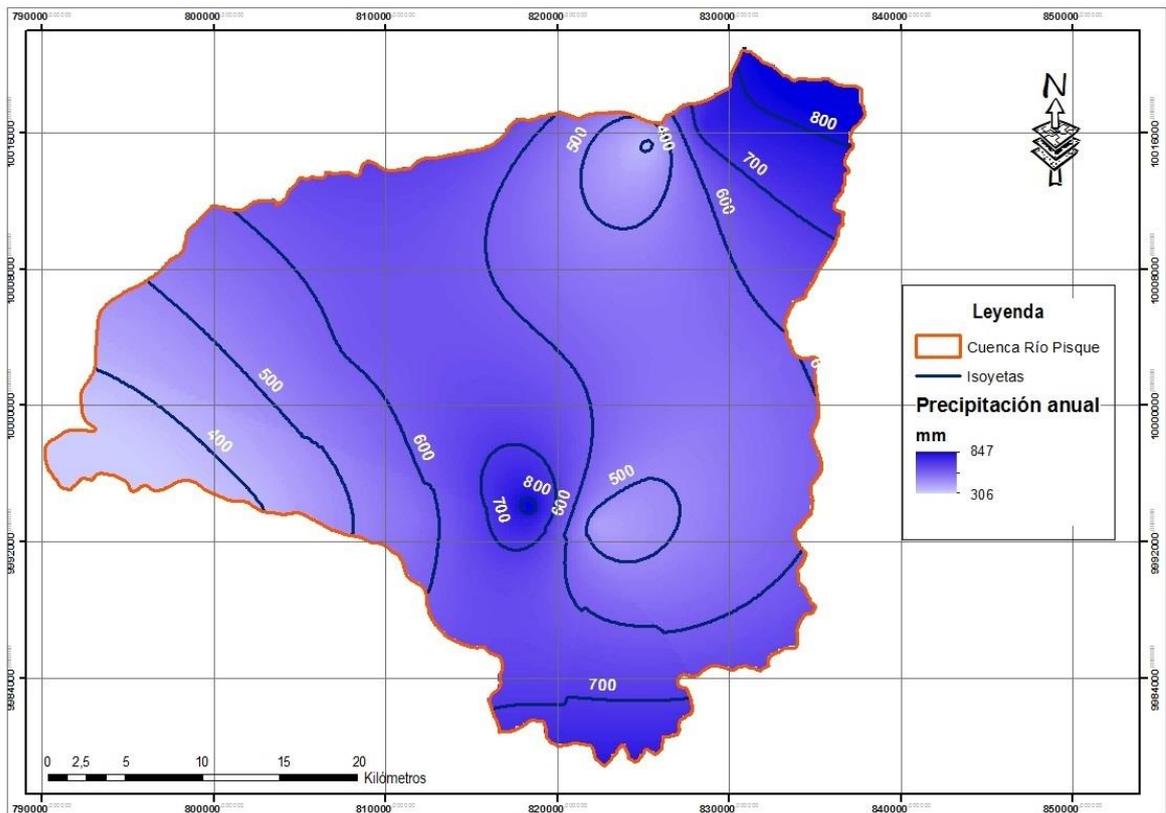
4.1.3 Oferta y Demanda Hídrica de la Cuenca del Río Pisque

4.1.3.1.1 Oferta Hídrica de la Cuenca del Río Pisque

La oferta hídrica fue calculada siguiendo la metodología recomendada por el IDEAM, que se basa en el cálculo del balance hídrico usando análisis y procesos de los SIG para obtener los mapas de precipitación, temperatura, evapotranspiración y escurrimiento superficial de la cuenca del Río Pisque; que se presentan en los siguientes mapas y tablas.

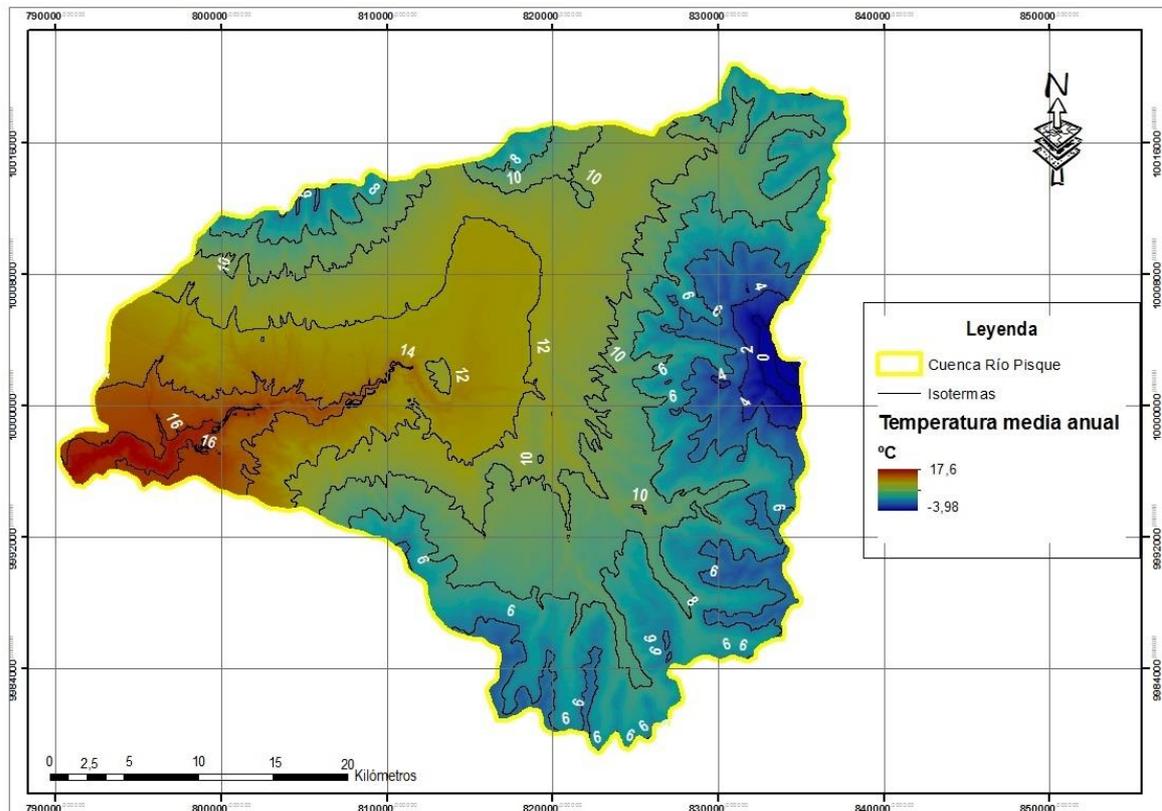
En el mapa 8, espacialmente la precipitación varía de este a oeste con valores desde 306.316 mm/año, aumentando a 847.328 mm/año.

Mapa 8. Precipitación de la Cuenca del Río Pisque



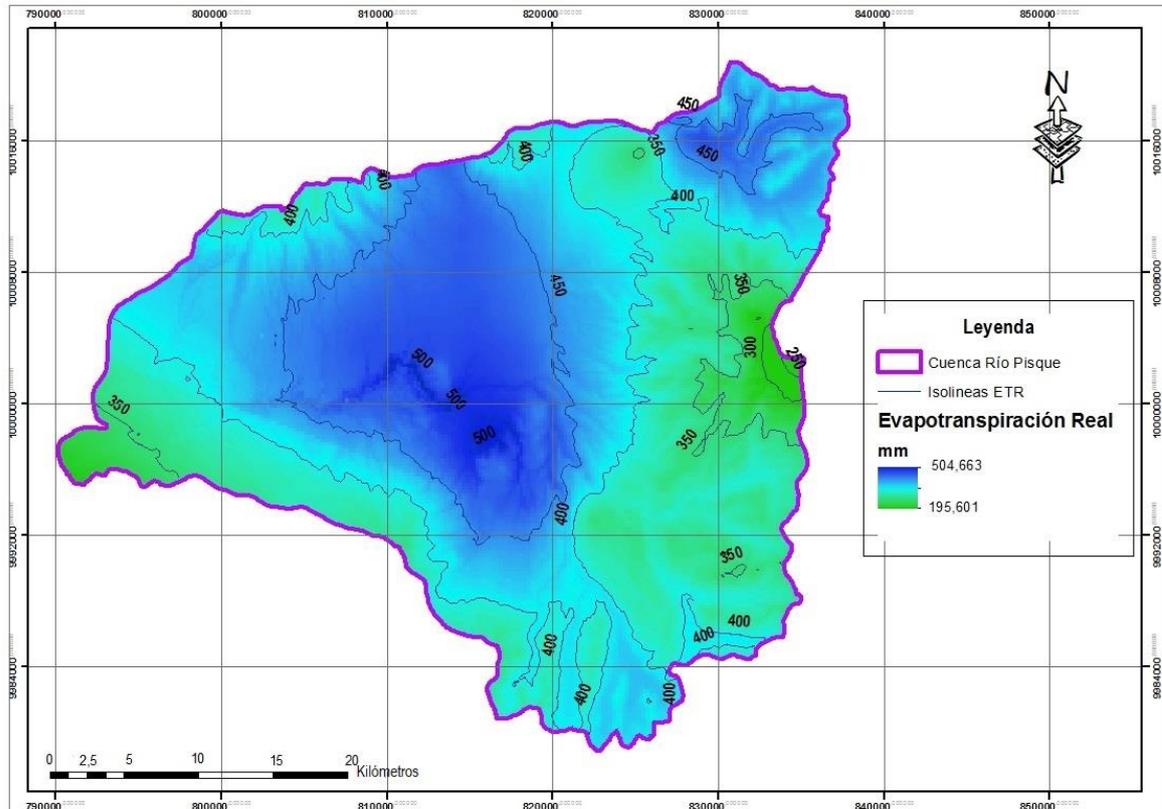
De acuerdo con el mapa 9, la temperatura varía desde el nor-este hacia el sur-oeste, en las zonas altas de la cuenca con mayor elevación que corresponde a la zona nor-este se tiene valores de Temperaturas bajas hasta los -3.98°C , mientras que en la zona sur-este, donde las elevaciones son menores se tiene valores de temperatura de 17.6°C .

Mapa 9. Temperatura de la Cuenca del Río Pisque



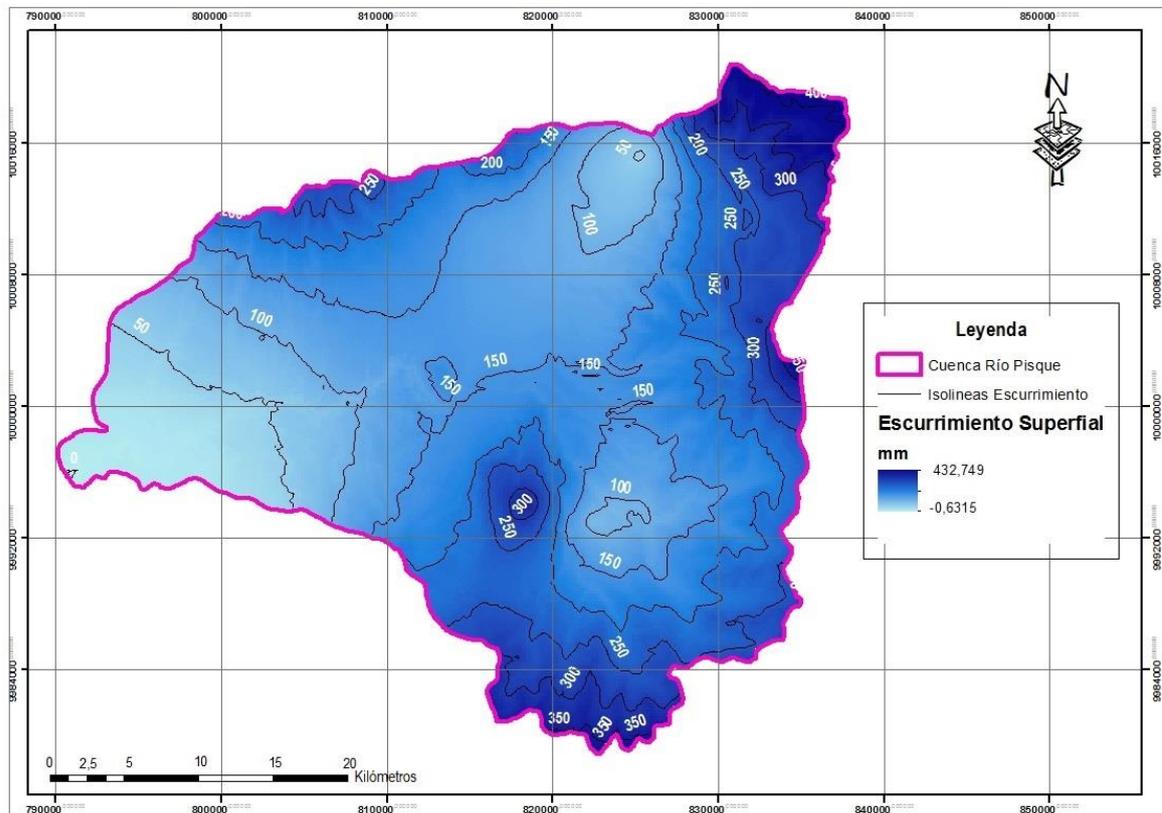
En el mapa 10, se muestra el comportamiento de la evaporación y transpiración que experimentan las zonas de la cuenca en estudio, varía de este a oeste y de sur a norte, registrando los valores menores en las zonas este y sur de 195.601 mm y valores mayores en las zonas oeste y norte de 504.663 mm.

Mapa 10. Evapotranspiración Real de la Cuenca del Río Pisque



En el mapa 11, se observa la escorrentía superficial total de la cuenca que varía de manera considerable, existiendo mayor escurrimiento en las partes altas de la cuenca con valores de 432.749 mm.

Mapa 11. Escurrimiento Superficial Total de la Cuenca del Río Pisque

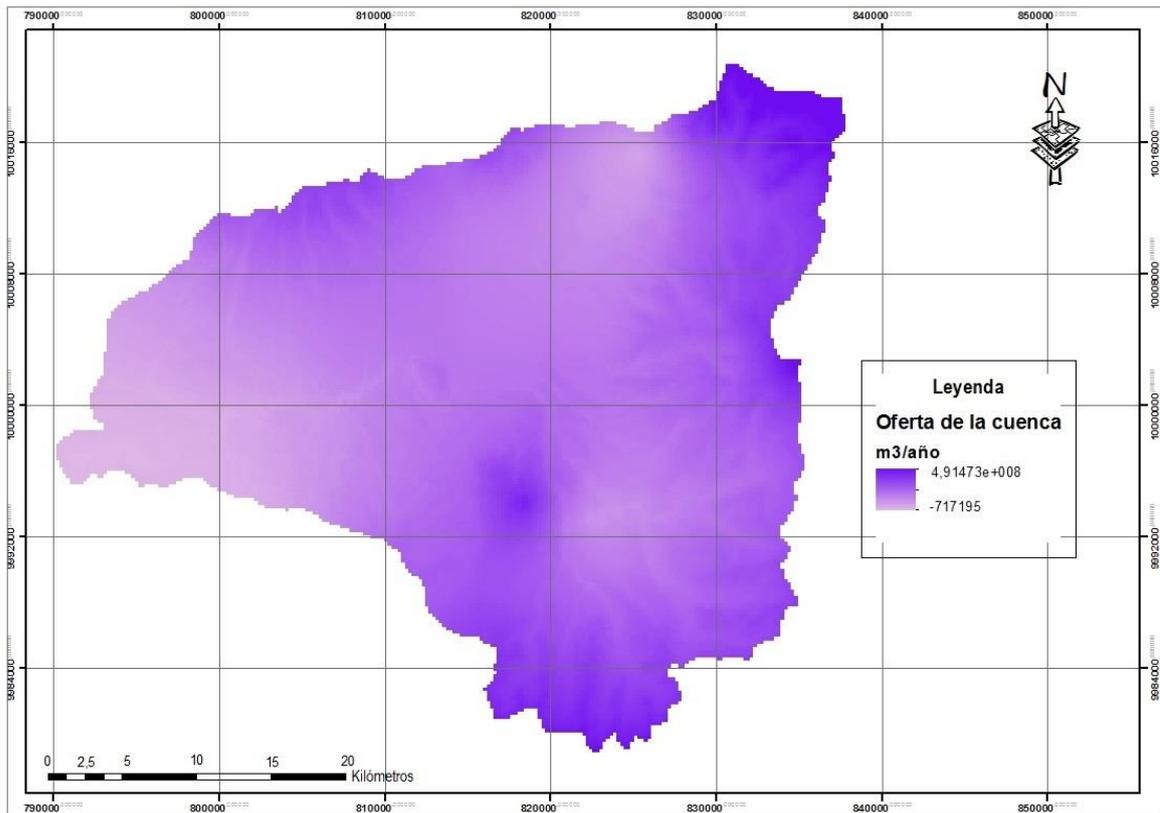


Como para el cálculo del índice de escasez se requiere en unidades de $m^3/año$ la oferta hídrica, este dato se obtuvo para la cuenca del Río Pisque y se encuentra representada en la tabla 22 y en el mapa 12.

Tabla 22. Oferta Hídrica Total de la Cuenca del Río Pisque

Parámetro	Magnitud
Oferta Hídrica Total $m^3/año$	491,473,039.3

Mapa 12. Oferta Hídrica de la Cuenca del Río Pisque



4.1.3.1.2 Demanda Hídrica de la Cuenca del Río Pisque

En la tabla 23 y la figura 6, se muestra la demanda de agua para diferentes usos que se realiza dentro de la cuenca del Río Pisque, teniendo el menor consumo de agua en el parámetro de abrevadero de animales con el 1 % y el máximo consumo es para el parámetro de riego con el 82 %.

Tabla 23. Demanda de agua en la Cuenca del Río Pisque

Parámetro/uso	Magnitud m ³ /seg
Abrevadero	0.121
Agua potable	0.736
Domestico	0.468
Industrial	0.179
Riego	6.670
Total, m3/seg	8.18
Total, m3/año	254,430,720

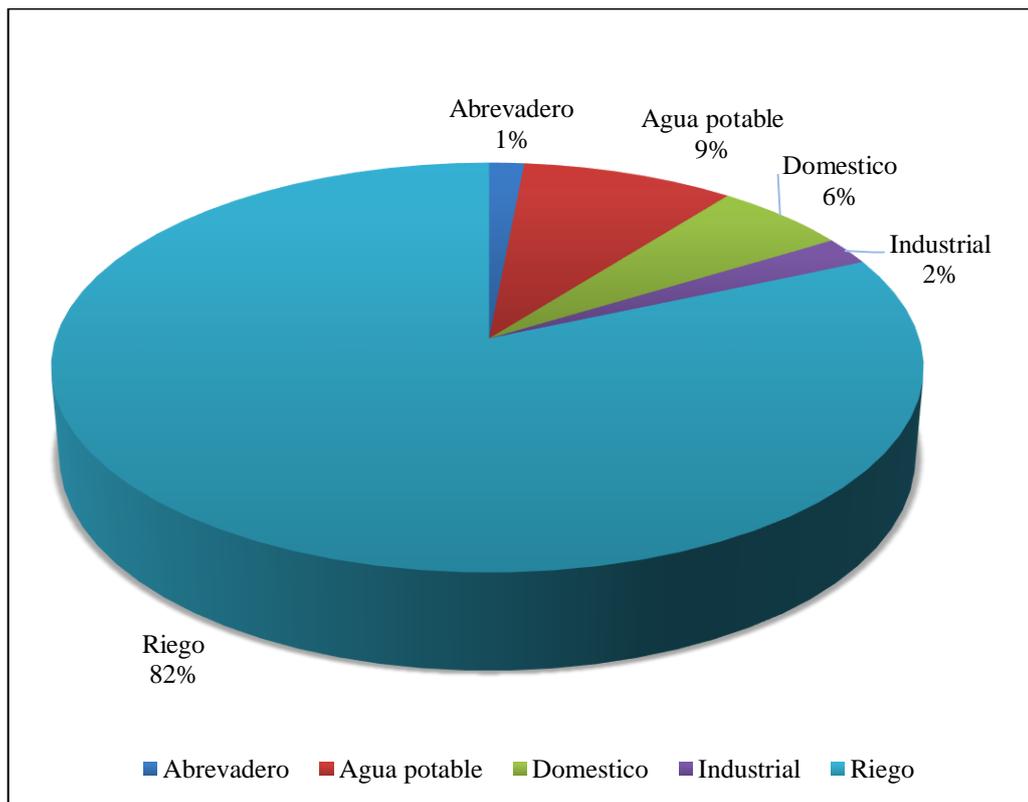


Figura 6. Porcentaje de la demanda de agua en la Cuenca del Río Pisque

De igual manera para el cálculo del índice de escasez se requiere en unidades de m^3 /año la demanda hídrica, por lo que en la tabla 23 se muestra esta información.

4.1.3.1.3 Relación Oferta y Demanda Hídrica de la Cuenca del Río Pisque

En la tabla 24, se presenta la oferta hídrica y la demanda hídrica anual de la cuenca en estudio con $491,473,039.3 m^3$ y $254,430,720 m^3$ respectivamente, obteniendo un índice de escasez del 51.76 % calificando a la cuenca en una categoría alta.

Tabla 24. Índice de escasez de la Cuenca del Río Pisque

Cuenca	Oferta Hídrica ($m^3/año$)	Demanda Hídrica ($m^3/año$)	Índice de Escasez (%)	Categoría
Río Pisque	491,473,039.3	254,430,720	51.76	Alto

4.2 Discusión

4.2.1 Características morfométricas de la cuenca del Río Pisque

Para el cálculo de los parámetro morfométricos de la cuenca y responder así a la primera pregunta de investigación, se inició con la delimitación de la cuenca para la cual se optó por la metodología semiautomática usando sistemas de información geográfica, que además es adaptada por el Ecuador mediante la resolución de la Secretaria Nacional del Agua en el año 2011 (Rosas, 2011) y que es utilizada en América del sur (Ruiz y Torres, 2008). Las características morfométricas son importantes para entender e interpretar el comportamiento morfodinámico y el funcionamiento hidrológico de la cuenca, que se completa con las caracterización del tipo, uso y cobertura del suelo (Delgado y Gaspari, 2010). La base para el análisis geoespacial de los parámetros morfométricos en esta investigación se dio a partir de un modelo digital del terreno. A continuación, se realiza el análisis de la forma, relieve y drenaje de la cuenca del Río Pisque.

Forma de la cuenca del Río Pisque

La cuenca del Río Pisque tiene una superficie de 1135.70 km², que de acuerdo a Campos Aranda (1998), se determina que es una cuenca Intermedia-Grande, el área de la cuenca del Río Pisque se puede observar en el mapa 4, la cuenca tiene un perímetro de 168.83 km, una longitud de 52.32 km, y un ancho de 21.71 km. La cota más alta de la cuenca es de 5774.795 msnm y la cota más baja es de 1840 msnm. De acuerdo con los datos obtenidos del coeficiente de compacidad que es 1.41, la cuenca del Río Pisque es oval redonda a oval oblonga (más larga que ancha) con la tendencia a menor concentración de agua de escurrimientos; con el dato del factor de forma que es 0.04. El grado de achatamiento del río Pisque es poco achatada, por lo que no hay mucha concentración de agua por efecto del escurrimiento luego de una lluvia intensa; y con el dato del índice de alargamiento igual a 2.41, el alargamiento de la cuenca del Río Pisque es moderadamente alargada. La forma obtenida de la cuenca del Río Pisque es igual a la que se encuentra en el geoportal de la Secretaria Nacional del Agua.

Relieve de la cuenca del Río Pisque

Mediante la curva hipsométrica adimensional se determina el potencial evolutivo de la cuenca. Con esta caracterización del relieve de la cuenca se determina las superficies con pendientes fuertes, mostrando el comienzo de la cuenca y las superficies planas con pendientes inferiores. La curva hipsométrica calculada para la cuenca del Río Pisque indica que el 5% de la cuenca tiene alturas sobre los 4,500 msnm y el 95% de la cuenca tiene alturas sobre los 1,800 msnm. De acuerdo a la curva hipsométrica de la cuenca en estudio, se determina que la cuenca se encuentra en una fase de madurez y que está en equilibrio. Además, con los datos calculados del coeficiente de masividad igual a 30 km, y una pendiente promedio de 25%, la cuenca en estudio es muy montañosa, con cotas elevadas y el relieve inclinado (Díaz, Iturbe, y Esteller, 1999)

Drenaje de la cuenca del Río Pisque

Como se observa en el mapa 8, la red hídrica de la cuenca del Río Pisque tiene un tipo de drenaje dendrítico, que está formado por corrientes pequeñas transitorias, quebradas, canales, cauces que se originan en la parte alta de la cuenca, también con el cálculo de la orden de la red hídrica igual a 7, la cuenca del Río Pisque presenta pendientes pronunciadas, dando como resultado que exista mayor erosión en la zona. Con los resultados de la densidad de drenaje igual a 2.31 y el tiempo de concentración de 19 minutos, en la cuenca en estudio, la densidad es moderada y el tiempo de concentración es rápido, por lo que, la respuesta de la cuenca ante una fuerte lluvia será rápida, permitiendo la evacuación del agua en menor tiempo a diferencia de otras cuencas con densidad baja, provocada por la “presencia de materiales geológicos duros y resistentes en la cabecera, lo que origina una baja densidad de drenaje” (Gaspari et al., 2012, p.11), y con los resultados obtenidos la cuenca del Río Pisque tiende a tener una baja rugosidad debido a que la forma de la cuenca no es alargada.

La cuenca del Río Pisque muestra parámetros morfométricos estableciendo que es un paisaje serrano, con presencia de pendientes inclinadas en varias zonas con un gran desnivel que se apoya en la moderada - alta altimétrica y pendiente media – alta.

4.2.2 Oferta hídrica de la cuenca del Río Pisque

La metodología aplicada para la obtención de la oferta hídrica permite calcular este parámetro dependiendo de la disponibilidad de datos e información, lo que no sucede con otras metodologías SWAT y WEAP (Quintanilla et al., 2009) que requieren de datos e información climática, hidrométrica e hidrológica diaria y de más de 10 años con serie de datos continuos. Para esta investigación la oferta hídrica calculada es solo a base de las precipitaciones que se registran en las estaciones dentro y fuera de la cuenca, y no de un registro de caudales, que sería otra fuente de ingreso de información para tener un dato más real de la cantidad de agua que dispone la cuenca. Pero la metodología utilizada permite tener un panorama de la cantidad de agua que oferta la cuenca para las diversas actividades que realiza la población.

La oferta hídrica de la cuenca del Río Pisque, se obtuvo aplicando el balance hídrico acompañado de los sistemas de información geográfica y sus herramientas, donde se obtuvieron los mapas de precipitación (mapa 9), temperatura (mapa 10), y evapotranspiración (mapa 11), y se generó el mapa de escurrimiento superficial (mapa 12), en donde se puede observar que la Cuenca del Río Pisque presenta un gradiente de 432.749 mm en las partes altas, que en términos de volumen la oferta hídrica de la cuenca del Río Pisque es de 491,473,039.3 metros cúbicos por año. Aplicando esta metodología en función de las herramientas de sistemas de información geográfica se puede observar que la mayor disponibilidad de agua superficial en la cuenca está en las partes altas y medias y con escasas en la parte baja. Es por ello que se encuentra la mayor actividad agrícola y pecuaria en la zona alta.

4.2.3 Demanda hídrica de la Cuenca del Río Pisque

Se evidencia que en la cuenca del Río Pisque la principal actividad y demanda del recurso hídrico es el riego con el 82 % del total de la demanda cuantificada en base a las concesiones otorgadas. El riego está siendo usado en las actividades pecuarias y agrícolas que de acuerdo al mapa 3 tienen la mayor superficie de la cuenca dedicada a estas actividades. Para la actividad pecuaria el cultivo con mayor superficie es el pasto y en la actividad agrícola son las flores. Al contar con alrededor de 135,180 habitantes en la cuenca del Río Pisque se ha cuantificado que su demanda es del 15% del total registrado en las concesiones otorgadas por la SENAGUA, y de acuerdo al censo del INEC, la mayor población se encuentra en la zona rural de la cuenca y en específico en el cantón Cayambe. Quedando el 2 % para el uso

del sector industrial y el 1 % para abrevadero de animales. Con esta investigación e información recopilada se puede dar un estimado del uso del agua que se está consumiendo dentro de la cuenca y que es un parámetro fundamental para establecer el estado de los recursos hídricos.

4.2.4 Índice de escasez de la cuenca del Río Pisque

Entre las metodologías existentes para conocer la oferta hídrica de una cuenca, se encuentran las propuestas por SWAT. Esta metodología se basa en un balance hídrico que define la producción hídrica en un sistema hidrológico natural, establecidas por relaciones cuantificables que representan un equilibrio entre las variables de entrada, salida y de almacenamiento del sistema. Los requerimientos son datos continuos de mínimo 10 años de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento (Quintanilla et al., 2009). Y también se considera la metodología propuesta por el IDEAM, gracias a la cual se puede calcular la oferta hídrica en base a las relaciones escorrentía versus parámetros morfométricos, modelos lluvia-escorrentía o balance hídrico. Para el cálculo del balance hídrico solamente se requiere de información mensual de precipitación y la evapotranspiración que puede ser calculada por varios métodos de acuerdo a la información existente y requerida.

Para el análisis de la demanda hídrica de una cuenca en la metodologías WEAP, se requiere de una detallada información agrícola (cultivos, parámetros agronómicos), social, económico que dificulta su implementación al no contar con este tipo de información, mientras que para la metodología propuesta por IDEAM sobre el cálculo de la demanda hídrica se puede trabajar con información más general y menos detallada como son las concesiones de uso del agua, con esta información sí se cuenta para la cuenca del Río Pisque.

Para conocer la situación del recurso hídrico de una cuenca aplicando las herramientas de los sistemas de información geográfica, se tiene la metodología del modelo WEAP, que requiere de información difícil y costosa de obtener para el modelo. Entre la información requerida son los registros diarios del clima, lo que conlleva a implementar redes de estaciones agroclimáticas dentro de la cuenca; información más precisa de consumo de agua, para lo cual se debería capacitar a los operadores de las juntas de agua potable y riego además de implementar sistemas automatizados para la obtención de este tipo de información.

Mientras que con la metodología IDEAM utilizando la aplicación de los sistemas de información geográfica en la relación de la oferta y demanda hídrica es más accesible para tener un escenario general de la situación del agua en una cuenca hidrográfica. La mayoría de los datos e información necesaria ya se encuentra para el uso libre y el acceso a información que tal vez no se encuentre en los portales web de las instituciones, con un acercamiento personal y en virtud de que la información es para una investigación es accesible. Y por otra parte el aprendizaje de herramientas como son los sistemas de información geográfica en donde existe software libre y comercial permite el aprendizaje y aplicación en diferentes escenarios.

La metodología aplicada ha sido probada de manera eficaz para el cálculo del índice de escasez en otras cuencas de Colombia, Perú, México (Infante y Ortiz, 2008) excepto en la cuenca de estudio, por lo que, es la primera vez que se aplica esta metodología para evaluar la relación entre la oferta y demanda hídrica de la cuenca del Río Pisque. A nivel de cuenca no hay un estudio que indique el estado de los recursos hídricos con ninguna metodología, existen estudios realizados para las microcuencas que forman parte de la cuenca en estudio, pero un estudio que incluya todo el territorio de la cuenca no.

Las fuentes de donde se obtuvieron información sobre la cuenca son confiables ya que provienen de las instituciones que se dedican al manejo de este tipo de información a nivel del país y son las fuentes de donde la mayoría de los investigadores, academia, técnicos cuentan para actuales y futuros proyectos, parte de la información para la oferta hídrica ha sido validada estadísticamente por Valencia (2014). Cualquier metodología que permita ayudar a conocer el estado de los recursos hídricos dentro de una cuenca, va a depender del tipo, cantidad y calidad de la información con la que se pueda contar, es por eso que la mejor metodología que se acopla con la información existentes es la propuesta por IDEAM con la ayuda de los sistemas de información geográfica. Con eso, se ha tenido los resultados presentados en la tabla 24, donde se relacionan la oferta hídrica y la demanda hídrica de la cuenca del Río Pisque, obteniendo el índice de escasez calculado del 51.76 % poniéndole en una categoría Alta a la cuenca. Lo que significa que la oferta hídrica llega a cubrir la demanda hídrica de la cuenca, pero también que la cuenca presente fuertes presiones sobre el recurso hídrico, teniendo como resultado baja disponibilidad en cantidad y calidad del recurso para satisfacer las necesidades de los sectores productivos y de consumo humano. Este índice obtenido también pone de manifiesto que se requiere poner atención en las acciones que se

toma al momento de la planificación y ordenamiento del territorial en el momento de involucrar los usos de este recurso y que permita garantizar la conservación de los ecosistemas, además indica que se pone en riesgo el desarrollo económico y la calidad de vida de la población en general de la cuenca.

En este estudio, el índice de escasez sólo corresponde a la esorrentía superficial con datos climáticos, por lo que, para estudio posteriores se debería analizar que sucede con las aguas subterráneas, con el agua que retiene y almacenan los páramos, por lo que se recomienda que las instituciones locales, provinciales, estatales generen programas para el monitoreo del clima a través de la implementación de estaciones agro meteorológicas, el monitoreo de caudales por medio de la instalación de estaciones hidrométricas, ubicadas estratégicamente que se pueda contabilizar la mayor cantidad de información referente a la oferta hídrica de la cuenca.

5. Conclusiones

Con el apoyo de las herramientas geoespaciales de los sistemas de información geográfica utilizando el software ArcGis y la información base disponible de la cuenca se pudo realizar una caracterización morfométrica de la cuenca del Río Pisque, obteniendo los parámetros y las principales características físicas de la cuenca, como la superficie de 1,135.70 km² cuadrados con una cota máxima y mínima de 5,774 msnm y 1,840 msnm, respectivamente. Además, por los parámetros como el factor de forma, el coeficiente de compacidad y el índice de alargamiento se concluye que la cuenca del Río Pisque tiene una forma alargada con poca tendencia a concentrar grandes cantidades de agua de escurrimiento pudiendo amortiguar las crecientes. Los parámetros de relieve dan como resultado que la cuenca en estudio es montañosa lo que hace que tenga mayores precipitaciones. Además, las características morfométricas como las del relieve definen la incidencia que presentan sobre la respuesta hidrológica y que pueden ser útil al momento de una planificación del ordenamiento del territorio. Y por los parámetros calculados de la red hídrica, el tipo de drenaje que tiene la cuenca es dendrítico, conformado por sub cuencas pequeñas. El análisis general de las características morfométricas de la cuenca como la forma, el relieve y la red de drenaje del sistema montañoso puede servir en la toma de decisiones cuando se trata de tener un manejo sustentable de la cuenca.

La oferta hídrica de la cuenca del Río Pisque se calculó a partir de los datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración proporcionados por el INAMHI y utilizando los sistemas de información geográfica a través del software ArcGis, con lo que se obtuvo que la oferta hídrica total de la cuenca en estudio es de alrededor de 491,473,039.30 metros cúbicos por año. La metodología empleada para el cálculo de la oferta hídrica permite ser realizada también en territorios más pequeños por ejemplo en una junta de regantes, donde pueden tener información solamente para la zona de influencia del canal de riego.

Para la obtención de la demanda hídrica de la cuenca, se trabajó con las concesiones de agua otorgadas para diferentes usos, determinando 254,430,720 metros cúbicos por año de agua para la demanda hídrica, siendo utilizado el 82 % del recurso hídrico en el riego para las actividades agrícolas, pecuarias y agropecuarias de la zona. La determinación de la demanda de agua para las diferentes actividades de uso proporciona información de apoyo para una gestión sustentable de los recursos hídricos a nivel local y nacional.

El conocimiento del estado de los recursos hídricos en un territorio en este caso en una cuenca, ayudaría a evitar su desaparición, impulsando una planificación sustentable en el cuidado, distribución..., del recurso estando al tanto de su oferta, demanda y calidad.

Respondiendo a la segunda pregunta de investigación, los factores que indican en la disponibilidad de agua en la cuenca del Río Pisque es la oferta hídrica para este caso de estudio son las precipitaciones y la demanda hídrica que, de acuerdo a los usos encontrados, el agua está siendo utilizada para el consumo humano, el riego en la agricultura, la industria, y abrevadero de animales.

Finalmente respondiendo a la tercera pregunta de investigación, la disponibilidad de agua de acuerdo a la relación entre la oferta hídrica y demanda hídrica para la cuenca del Río Pisque se representa por medio del cálculo del índice de escasez, dando como resultados un alto índice de escasez de 51.76 %. Por lo tanto, acorde a la tabla 6 de la escala de valoración del índice de escases, la cuenca en estudio está en una categoría alta, explicando así, que la cuenca tiene una alta presión en el recurso hídrico por disminución en la oferta y calidad del recurso y una explotación en los diferentes usos, pudiendo ocasionar problemas dentro del territorio como por ejemplo: conflictos entre usuarios durante la repartición del agua para sus parcelas agrícolas.

Respecto a la hipótesis planteada, por medio de este estudio se acepta la hipótesis, que la oferta hídrica en la cuenca del río Pisque responde en su totalidad a las demandas de agua requeridas en las actividades sociales, y agro-productivas por los usuarios del territorio de la cuenca.

Un aporte de la investigación a la sociedad a parte de determinar el estado de la cuenca en relación a la disponibilidad de los recursos hídricos es presentar una metodología que puede ser aplicada a un territorio reducido como por ejemplo una junta de regantes, una comunidad, una parroquia. Llegar a conocer la situación del recurso hídrico y emprender proyectos que ayuden a la conservación, recuperación del recurso y reducción de la demanda de agua. Los proyectos deben ser orientados a la implementación de nueva tecnología en el campo de la agricultura, capacitación del personal que está al frente del manejo y gestión de agua. Siendo la agricultura uno de los principales consumidores de agua se debería iniciar fortaleciendo de los conocimientos a los agricultores sobre cómo hacer un uso más eficiente y sustentable del recurso hídrico.

A partir de esta investigación surge la necesidad de contar con un sistema de información continuo y homogéneo para generar un sistema de seguimiento del estado de la disponibilidad del recurso dentro de la cuenca del río Pisque y contar con más elementos técnicos que contribuyan en la toma de decisiones en todos los sectores productivos, industriales y de subsistencia en el territorio.

5.1 Recomendaciones

Con los resultados obtenidos de la cuenca del Río Pisque se recomienda realizar un estudio meticuloso del estado de las concesiones de agua e implementar un monitoreo de la cantidad y calidad de agua, a través de un sistema de contadores automáticos de agua en las redes principales de los sistemas de abastecimientos de las juntas existentes en la cuenca, para llegar en el futuro a realizar una mejor distribución del agua en la cuenca.

Además, se recomienda generar información actualizada y detallada sobre la superficie, usos y cobertura del suelo, mediante los recursos que ofrecen los sistemas de información geográfica y la teledetección.

Se debería realizar un plan de integral del manejo de la cuenca del Río Pisque, posteriormente implementarlo con todos los actores involucrados de la cuenca y finalmente evaluar los resultados de dicho plan, para en el futuro seguir ejecutando el plan o ir mejorando las actividades necesarias para tener una cuenca sustentable. Sería importante contar con un plan general de manejo para la cuenca del río Pisque, en donde estén involucrados todos los actores del sector público, comunitario y privado que se encuentren dentro y fuera de la cuenca y que el presente estudio sirva para conocer la situación del estado de los recursos hídricos y ser el apoyo técnico para la presentes y futuras mediadas a realizarse en beneficio de todos.

Además, las instituciones locales que se encuentran en la cuenca del Río Pisque deberían crear un geo portal, donde la población del territorio en estudio (investigadores, estudiantes...) conozca sobre la cuenca, sus recursos, la situación del riego, las necesidades y en base a ello crear nuevos proyectos e investigaciones para apoyar al manejo eficiente de la cuenca.

Las entidades públicas deben realizar un proyecto de recuperación de suelos a nivel provincial ya que este problema de erosión cada vez va tomando mucha fuerza y a futuro

este va a ser uno de los problemas más grandes al que se sumaría el problema de la escasez del agua de riego y de esta manera el estado no podría garantizar el buen vivir a de las familias campesinas y de ninguna manera fortalecerían la agricultura familiar campesina.

6. Referencias

- Aguilar, Á. (2017). *Propuesta de utilización paneles solares, en florícolas de la parroquia Tabacundo, cantón Pedro Moncayo, como mitigación al cambio climático*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Albarracín, F., Alvarenga, F., Sosa, A., Iwasita, B., y Barbaro, S. (2009). Aspectos morfométricos de la cuenca del arroyo Itacaruaré, Misiones, Argentina. *Jornadas de Investigación Desarrollo Tecnológico Extensión y Vinculación - FI – UNaM – 01* (2018) 1-8
- Alzate, D., Araujo, G., Rojas, E., Gomez, D., y Martínez, F. (2017). Interpolacion Regnie para lluvia y temperatura en las regiones andina, caribe y pacífica de Colombia. *Colombia forestal*, 21(1), 102. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11601>
- Andrades, M., y Martinez, E. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. *Agricultura y alimentación*, 16-34. Recuperado el 17 de marzo de 2019 de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267902&info=resumen&idioma=SPA>
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. (G. Noriega, Ed.) (LIMUSA). Recuperado de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf
- Breña, A., y Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. (U. A. Metropolitana, Ed.). Ciudad de México. Recuperado el 15 de febrero de 2019 de http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf
- Campos, A. (2014). Disponibilidad de los recursos hídricos en el Ecuador, 1-13.
- Campos Aranda, D. (1998). *Proceso del Ciclo Hidrológico*. UASLP.
- CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2014). *El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe*.
- Cerrada, P. (2014). *Análisis de sistemas de producción agroecológica y sus implicaciones económicas en explotaciones campesinas de la Región Sierra de Ecuador*. Universidad Politécnica de Valencia-Madrid. Recuperado el 17 de febrero de 2019 de <http://www.upv.es/entidades/CCD/infoweb/ccd/info/U0657936.pdf>
- Céspedes, J., y Pachacama, I. (2012). *Situación socio económica de la parroquia La Esperanza del cantón Pedro Moncayo, provincia de Pichincha sobre la base de cadena corta*. Universidad Central del Ecuador.
- Cifuentes, A. (2016). *Interpolación de lluvia anual para el departamento de Caldas-Colombia*. Colombia. Recuperado el 10 de marzo de 2019 de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2652/17_Cifuentes_Adriana_2016r.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Coral, A., Garcia, J., y Leal, A. (2015). Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. *Formação (Online)*, 1, 119-137.
- Costa, C., Dominguez, E., Gonzalo, H., y Venegas, R. (2005). El índice de escasez de agua ¿un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingeniería*, 22, 104-111.
- Cruz, B., Gaspari, F., Rodríguez, A., Carrillo, M., y Téllez, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 64, 26-34.
- De Bievre, Bert Coello, X. (2008). Caracterización de la demanda hídrica. Estudio sobre el sector de la nieve en Aragón. Octubre 2009. Recuperado el 10 de septiembre de 2018 de http://aragonparticipa.aragon.es/sites/default/files/estudio_del_sector_de_la_nieve_2.pdf
- Delgado, M., y Gaspari, F. (2010). Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina. *Tecnociencia Chihuahua*, IV(3), 154-163.
- Díaz, C.; Iturbe, A.; Esteller, M. (1999). Estimación de las Características fisiográficas de una Cuenca con la Ayuda de SIG y MEDT: Caso del Curso Alto del Río Lerma, Estado de México, 124-134.
- Domínguez, M. (2015). Qué es una curva hipsométrica. Recuperado 19 de marzo de 2019, de <https://www.ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- Farfán, F., Urbina, L., Ferrerira, S., y Brandan, M. (2010). Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, 5, 7-21.
- FONAG, Fondo para la Protección del Agua. (2014). Caracterización biofísica y socioeconómica de la cuenca alta del río Guayllabamba , con énfasis en las subcuencas de los ríos Pita y San Pedro y las microcuencas de los ríos orientales Papallacta y Antisana.
- Fuentes, J. de J. (2004). Análisis Morfométrico de Cuencas: Caso de Estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. Instituto Nacional de Ecología. México.
- GADIPC, Gobierno Autónomo Descentralizado Intercultural y Plurinacional de Cayambe. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cayambe 2015-2025
- Galván, L., Olías, M., Fernández, R., y Domingo-Santos, J. (2007). Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Meca (Huelva , España). *Geogaceta*, (1), 63-66. Recuperado el 10 de septiembre de 2018 de <http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo42/Art16.pdf>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., y Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *7mo Congreso de Medio Ambiente*, 1-25.

- Gasparin, F., Delgado, I., y Senisterra, G. (2009). Simulación espacio-temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana Bonaerense. Argentina. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (1578-5157), 67-82.
- Gonzalez, y Cañar, A. (2016). Análisis De La Disponibilidad Y Demanda De Agua, Con Fines De Riego, En El Sistema Campana- Malacatos, Utilizando Los Sistemas De Información Geográfica (Sig).
- Hebert Gonzalo, H., Dominguez, E., Marin, R., y Vanegas, R. (2004). Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Documento elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM). Bogotá: IDEAM.
- Grimaldos, M. (2014). Herramienta Computacional para la Estimación del Balance Hidrológico de Largo Plazo Utilizando Argis 10.1, 1-17.
- HLPE, Grupo de Alto Nivel de Expertos en Seguridad Alimentaria y Nutrición. (2015). *Contribución del agua a la seguridad alimentaria y la nutrición*. Roma.
- Huamán, G. (2015). *Análisis morfométrico e hidrológico de la subcuenca hidrográfica Arasá, departamento de Cusco, Perú*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2004). *Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial*. Lima.
- IEE, Instituto Espacial Ecuatoriano. (2013a). Generación de geoinformación para la gestión de los sistemas productivos.
- IEE, Instituto Espacial Ecuatoriano. (2013b). *Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1: 25 000 - clima e hidrología*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2013). Boletín Climatológico Anual. Recuperado 10 de marzo de 2017, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
- INEC, Instituto de Estadística y Censo. (2010). Banco de información. Recuperado 19 de marzo de 2019, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/banco-de-informacion/>
- INEC, Instituto de Estadística y Censo. (2012). Registro de descargas cartográficas. Recuperado 19 de marzo de 2019, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/registro-de-descargas-cartograficas/>
- Infante, H., y Ortiz, L. (2008). Ajustes metodológicos al índice de escasez de agua propuesto por el IDEAM en el plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del Río Pamplonita, norte de Santander. *Revista Colombia Forestal*, 11, 165-173. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2008.1.a11>
- Jaramillo, C., Molina, F., y Betancur, T. (2011). Índice de escasez y de calidad de agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(19), 33-45. Recuperado el 15 de octubre de 2018 de

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=74642423&lang=es&site=ehost-live>

- Jaramillo, J. (2015). *Estudio Del Riesgo Por Erosión Hídrica Del Suelo Utilizando El Modelo U.S.L.E, Mediante Herramientas S.I.G, Aplicado En La Subcuenca Río Portoviejo, Provincia De Manabí.*
- Martínez, M., Rodríguez, J. A., y Montesinos, S. (2013). Uso de técnicas de información geográfica para la discriminación de superficies regadas. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 13, 220-245.
- Mena, C., Ormazábal, Y., Llanos, J. L., y Díaz, J. (2007). Desarrollo de un sistema de información geográfica para mejorar la gestión del agua de riego del embalse convento viejo, Chile., 67, 49-59.
- Ortega, S. A., Morillo, K., Jacome, A., Ibaza, D., y Nieto, D. (2017). Propuesta metodológica para evaluación del riesgo de erosión hídrica , utilizando sistemas de información geográfica y teledetección , Cantón Cayambe Methodological proposal for evaluation of the risk of water erosion , using geographic information system, 18(3), 274-282.
- Ortiz, C., Vélez, M. V., y Villegas, C. I. (2006). Consideraciones técnicas sobre la metodología para el cálculo de las tasas por uso del agua (TUA). *Avances en recursos hidráulicos*, 13, 99-110. Recuperado el 20 de noviembre de 2018 de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/download/9342/9985>
- Palazón, L., y Navas, A. (2012). Aplicación del modelo SWAT a una cuenca acarcavada del Pirineo., (1), 1-4.
- Pereyra, D., Cruz, D., y Pérez, J. (2011). *La evapotranspiración real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. Investigaciones geográficas.* México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Recuperado el 10 de enero de 2019 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Quintanilla, M., Spickenbom, J., Calderón, N., y Larrea, D. (2009). *Disponibilidad hídrica y demanda de agua en la cuenca Pipaí: situación actual y escenarios de cambio climático.* Samaipata-Bolivia.
- Rosas, L. (2009). Manual de procesamiento de delimitación y codificación de unidades hidrográficas, caso Ecuador. UICN SUR, Quito, Ecuador, 34.
- Rosas, L. (2011). Propuesta de delimitación y codificación de unidades hidrográficas de la cuenca del río Esmeraldas, escala 1:50 000, por el método de Pfafstetter, mediante el uso de sistemas de información geográfica SANGOLQUI/ESPE.
- Rosas, L., y Quispe, M. (2009). *Delimitación y codificación dde unidades hidrográficas del Ecuador.* Quito-Ecuador.
- Ruiz, R., y Torres, H. (2008). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas.* Uicn Sur.

- Salinas, A., y Paz, O. (2011). Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto : Aducción de Recursos Hídricos Mururata, 6, 27-38.
- Sandoval, C., y Cachipuendo, C. (2011). Balance hídrico para riego en la microcuenca del río Blanco
- SENAGUA, Secretaria de Agua de Ecuador. (2014). Servicios de Descarga SENAGUA. Recuperado 19 de marzo de 2019, de <https://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/>
- SENAGUA, Secretaria de Agua de Ecuador. (2011). *Resolucion 2011-245*. Quito-Ecuador.
- SEI, Stockholm Environment Institute (2015). *Water Evaluation And Planning System. Weap*. U. S. C.
- Subsecretaria de Riego y Drenaje. (2013). Plan nacional de riego y drenaje 2012 - 2027, 605.
- UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura. (2016). *Agua y empleo*. Recuperado el 19 de marzo de 2019 de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura. (2018). *Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*.
- UPS, Universidad Politécnica Salesiana. (2015). *Documento de caracterización de la cuenca del río Pisque en el proyecto "Determinación de la eficiencia del uso del agua en cultivos de pasto con sistemas comunitarios "*. Cayambe.
- Valencia, R. (2014). *Análisis de la disponibilidad de los recursos hídricos en la microcuenca del río Blanco(nevado Cayambe), utilizando el modelo oferta-demanda en ArcGis*. Escuela Politécnica Nacional.