



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

“IDENTIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE ZONAS DE RECARGA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA COMUNA LA ESPERANZA, PROVINCIA DEL CARCHI”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORA:

Katheryne Fernanda Herrera Jiménez

DIRECTOR:

Ing. Oscar Rosales E., MSc.

Ibarra – Ecuador

2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES

RENOVABLES

“IDENTIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE ZONAS DE RECARGA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE LA COMUNA LA ESPERANZA, PROVINCIA DEL CARCHI”

Trabajo de titulación revisada por el Comité Asesor, previa a la obtención del
Título de:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

APROBADA:

Ing. Oscar Rosales, MSc.

.....

DIRECTOR

FIRMA

Ing. Mónica León, MSc.

.....

ASESORA

FIRMA

Ing. Gladys Yaguana, MSc.

.....

ASESORA

FIRMA

Ing. Paúl Arias, MSc.

.....

ASESOR

FIRMA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	110423999-9		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Herrera Jiménez Katheryne Fernanda		
DIRECCIÓN:	La Florida, calle Tulipanes y Amapolas. Casa:1-01		
EMAIL:	ferhj22@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062 631 832	TELÉFONO MÓVIL:	0939608411

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IDENTIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE ZONAS DE RECARGA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE LA COMUNA LA ESPERANZA, PROVINCIA DEL CARCHI
AUTORA:	Herrera Jiménez Katheryne Fernanda
FECHA:	17 de enero de 2017
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	Ing. Oscar Rosales MSc.

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, **KATHERYNE FERNANDA HERRERA JIMÉNEZ**, con cédula de identidad Nro. **110423999-9**, en calidad de autora y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.


3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 03 días del mes de marzo de 2017

LA AUTORA:

ACEPTACIÓN:



.....
Katheryne Fernanda Herrera Jiménez

C.I. 110423999-9



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, KATHERYNE FERNANDA HERRERA JIMÉNEZ, con cédula de identidad Nro. 110423999-9, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **“IDENTIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE ZONAS DE RECARGA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE LA COMUNA LA ESPERANZA, PROVINCIA DEL CARCHI”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

.....
Katheryne Fernanda Herrera Jiménez

C.I. 110423999-9

Ibarra, a los 03 días del mes de marzo del 2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios, por su infinito amor por mí, por ser mi guía, y mi refugio, sin su bendición y protección no habría logrado culminar esta etapa de mi vida.

A mi director de tesis, Ing. Oscar Rosales, por su incondicional apoyo a lo largo de mi vida universitaria, por sus sabios consejos, por todos los conocimientos impartidos, por su paciencia y por su gran corazón.

A mis asesoras y asesores de tesis, Ing. Gladys Yaguana, Ing. Mónica León, e Ing. Paúl Arias, quienes con sus conocimientos y experticia supieron guiar acertadamente este trabajo.

A los señores Manuel Chenáz, Clever Puetate y a la señorita Paola Paspuezan, presidentes de la comuna Pasto La Esperanza, por su apoyo y colaboración para el desarrollo del presente estudio.

Y, agradezco de manera especial a mis padres, hermanos, y amigos, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo, para alcanzar mis sueños propuestos.

Fernanda H.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por ser mi fuerza para seguir adelante y no desmayar ante los problemas y obstáculos que se presentan en la vida. A mis padres *Marcelo* y *María*, por inculcarme principios, valores y enseñanzas, con amor y dedicación constante.

A mis hermanos y hermanas, *Edison, Diana, Angélica, Evelyn, Bryan, Israel*, y *Diego*, por motivarme siempre y por creer en mí.

A mi tía *Bertha*, por ser una gran amiga y haberme apoyado en los momentos que más la necesité...

Fernanda

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo General.....	4
1.1.2. Objetivos Específicos	4
1.2. Pregunta directriz	4
CAPÍTULO II	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Marco Legal	5
2.1.1. Constitución de la República del Ecuador.....	5
2.1.1. Ley Orgánica de los Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento.....	7
2.1.2. Plan Nacional para el Buen Vivir 2013 – 2017	8
2.2. Ciclo hidrológico en Cuencas hidrográficas	9
2.3. Páramos como reguladores del ciclo hidrológico	10
2.4. Balance hídrico climático.....	10
2.4.1. Ecuación del balance hídrico climático	13
2.5. Importancia de las aguas subterráneas en el balance hídrico.....	14
2.6. Acuíferos	14
2.6.1. Tipos de acuíferos.....	14
2.7. Recarga hídrica	15
2.8. Zonas de recarga hídrica	16
2.8.1. Clasificación de las zonas de recarga hídrica	17
2.9. Factores que afectan la recarga hídrica	18
2.10. Métodos para determinar la recarga hídrica	18

2.10.1. Modelo analítico para determinar infiltración (Schosinsky y Losilla).....	18
2.10.2. Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural ...	19
2.10.3. Método de Recarga de Agua Subterránea (RAS).....	20
2.10.4. Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica	20
2.11. Herramientas SIG en la identificación de zonas de recarga hídrica	21
2.12. Fuentes de abastecimiento de agua.....	22
2.13. Estrategias de manejo sustentable de zonas potenciales de recarga hídrica y recursos hídricos.....	23
CAPÍTULO III	24
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1. Materiales y equipos	24
3.2. Limitaciones metodológicas	25
3.3. Métodos.....	26
3.3.1. Caracterización de las condiciones biofísicas e hídricas de la comuna Pasto La Esperanza	28
3.3.2. Balance hídrico climático (BHC)	37
3.3.3. Zonas potenciales de recarga hídrica en la parte alta de la Comuna Pasto La Esperanza	39
3.3.4. Manejo de las zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento de agua	46
CAPÍTULO IV	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1. Área de estudio	48
4.2. Caracterización de los componentes biofísicos e hídricos.....	52
4.2.1. Litología.....	52
4.2.2. Cobertura vegetal y uso del suelo.....	54

4.2.3. Tipos de Suelos.....	55
4.2.4. Pendientes del terreno.....	58
4.3. Caracterización hídrica de la Comuna Pasto La Esperanza.....	60
4.3.1. Caudales aforados en la parte alta de la comuna	64
4.3.2. Balance hídrico climático	65
4.4. Identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica	68
4.4.1. Comuna Pasto La Esperanza	68
4.4.2. Parte alta de la comuna Pasto La Esperanza.....	70
4.4.3. Identificación de zonas de recarga, fuentes de abastecimiento, caudales medidos y poblados beneficiarios	77
4.5. Estrategias sustentables para el manejo de las zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento	79
4.5.1. Problemas de la parte alta de la Comuna Pasto La Esperanza, referentes al recurso hídrico.....	79
4.5.2. Plan de acción en las zonas potenciales de recarga y fuentes de abastecimiento.....	80
4.5.3. Estrategias de manejo sustentable en función de los responsables, tiempo y fuentes de financiamiento	81
CAPÍTULO V.....	85
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
5.1. CONCLUSIONES	85
5.2. RECOMENDACIONES.....	87
CAPÍTULO VI.....	88
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
7. ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formaciones geológicas	53
Tabla 2. Usos del suelo y cobertura vegetal.....	55
Tabla 3. Tipos de suelos identificados en el área de estudio	57
Tabla 4. Pendientes identificados en el área de estudio	59
Tabla 5. Ríos y quebradas de la comuna Pasto La Esperanza	61
Tabla 6. Sitios de aforo en la parte alta de la comuna.....	65
Tabla 7. Superficies de las zonas potenciales de recarga hídrica de la comuna Pasto La Esperanza	70
Tabla 8. Superficies de las zonas potenciales de recarga hídrica de la parte alta de la comuna Pasto La Esperanza	73
Tabla 9. Sitios de pruebas de infiltración en la parte alta de la comuna	75
Tabla 10. Infiltración obtenida en campo y valores de infiltración estimados en zonas de recarga	76
Tabla 11. Zonas de recarga, fuentes de abastecimiento, caudales medidos y poblados beneficiarios, identificadas en la parte alta del territorio comunal	78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadros 1. Materiales y equipos	25
Cuadros 2. Ubicación puntos de control y métodos utilizados	32
Cuadros 3. Coeficientes tipos de suelo	42
Cuadros 4. Coeficientes de pendientes.....	43
Cuadros 5. Coeficientes de usos del suelo	43
Cuadros 6. Coeficientes de correlación de Pearson	46
Cuadros 7. Características estación meteorológica El Ángel.....	61
Cuadros 8. Precipitación y temperatura medias anuales estación El Ángel	62
Cuadros 9. Características estación meteorológica San Gabriel.....	63
Cuadros 10. Precipitación y temperatura medias anuales estación San Gabriel...	63
Cuadros 11. Factores que inciden en la recarga hídrica en las zonas potenciales identificadas	74
Cuadros 12. Estrategias de manejo, responsables, tiempo, y fuentes de financiamiento.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras 1. Flujograma del proceso metodológico para el desarrollo del presente estudio	27
Figuras 2. Medición de caudales con Molinete mecánico	34
Figuras 3. Tramo recto del cauce que recorre el flotador del punto A al B.	35
Figuras 4. Medición de caudales con el método del flotador.....	35
Figuras 5. Medición de caudales con el método de aforo volumétrico.....	37
Figuras 6. Infiltrómetro Turf- Tec.....	45
Figuras 7. Mapa de ubicación de la Comuna Pasto La Esperanza.....	50
Figuras 8. Mapa base de la Comuna Pasto La Esperanza	52
Figuras 9. Mapa Litológico de la Comuna Pasto La Esperanza.	53
Figuras 10. Mapa de cobertura vegetal y uso actual del suelo.....	54
Figuras 11. Mapa de tipos de suelos de la Comuna Pasto La Esperanza.....	56
Figuras 12. Mapa de pendientes del terreno	58
Figuras 13. Diagrama ombrotérmico de la estación El Ángel	62
Figuras 14. Diagrama ombrotérmico de la estación San Gabriel.....	64
Figuras 15. Mapa de precipitación anual en la Comuna Pasto La Esperanza.....	66
Figuras 16. Mapa de temperaturas medias anuales en la Comuna Pasto La Esperanza	67
Figuras 17. Mapa de evapotranspiración media anual en la Comuna Pasto La Esperanza	68
Figuras 18. Mapa zonas potenciales de recarga hídrica de la comuna Pasto La Esperanza.	69
Figuras 19. Mapa zonas potenciales de recarga hídrica de la parte alta de la comuna	71
Figuras 20. Mapa de infiltración (mm/año) media anual del territorio comunal Pasto La Esperanza	76
Figuras 21. Correlación de valores de infiltración obtenidos en campo con valores de recarga hídrica potencial.	77

RESUMEN

La Comuna Pasto La Esperanza se encuentra ubicada en la parroquia Tufiño, provincia del Carchi. La zona cuenta con estudios sobre el recurso agua dentro de sus límites comunales; sin embargo, no se dispone de información acerca de zonas potenciales de recarga hídrica en dicho territorio. Este estudio se realizó con la finalidad de identificar zonas potenciales de recarga hídrica para establecer, participativamente, estrategias de manejo sustentable que permitan proteger estas áreas. Para esto, se delimitó y caracterizó los componentes biofísicos el área de estudio; posteriormente, se identificaron las potenciales zonas de recarga en toda el territorio comunal y en la zona de amortiguamiento (parte alta de la comuna) en una superficie total de 21764,02 ha, mediante la generación y sobreposición de información de litología, pendientes del terreno, cobertura vegetal, uso del suelo, tipos de suelo, textura del suelo, precipitación y evapotranspiración, aplicando el software ArcGIS y empleando los criterios del método RAS (Recarga de Agua Subterránea). En la caracterización hidrológica se realizaron mediciones de caudales en 4 fuentes de agua y 5 estructuras de captación en la parte alta de la comuna, empleando el molinete electrónico, obteniendo valores máximos promedios de 375,1 l/s en época lluviosa y valores mínimos promedios de 192,3 l/s en época seca. Además, se identificaron 4 categorías de zonas potenciales de recarga: Baja, Moderada, Alta y Muy Alta, siendo la categoría Baja la que ocupa mayor superficie con 4928,58 ha, en la cual se ubican las fuentes de agua y estructuras de captación. Finalmente, se elaboraron cinco estrategias de manejo sustentable de las zonas potenciales de recarga hídrica, con la participación de los actores locales, con el fin de aprovechar adecuadamente el recurso hídrico mediante la Conservación de zonas potenciales de recarga hídrica, Concienciación ambiental, Conservación de páramos, Gestión de convenios, e Integración de planes de desarrollo.

SUMMARY

The Pasto La Esperanza Commune is located in Tufiño parish, Carchi province. This area has some studies of its water resource within its communal limits. However, it does not have available information about potential areas of water recharge in that territory. This study was carried out with the purpose to identify potential areas of water recharge to establish in a participatory way, it means, sustainable management strategies to protect these areas. For this reason, the area of study was delimited and characterized biophysically. Then, potential recharge areas were identified throughout the communal territory and in the buffer zone (upper part of the commune) in an area of 21,764.02 ha, by generating and overlapping lithology information, pending terrain, vegetation cover, soil use, types of soil, soil texture, precipitation and evapo-transpiration, applying the ArcGIS software and using the criteria of the RAS (Groundwater Recharge) method. In the hydrological characterization, flow measurements were made in 4 water sources and 5 catchment structures in the upper part of the commune, using the electronic windlass, obtaining an average of maximum values of 375.1 l/s in rainy season and an average of minimum values of 192.3 l/s in the dry season. Four categories of potential recharge zones were identified: Low, Moderate, High and Very High. The low category has the largest area with 4,928.58 ha, where water sources and catchment structures are located. Finally, five strategies were developed for the sustainable management of water recharge areas with the participation of local actors, in order to take advantage adequately of the water resource. By means of the conservation of potential water recharge areas, environmental awareness, paramo conservation, management of agreements and integration of development plans.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Hoy por hoy, la planificación y ejecución de cualquier tipo de proyecto requiere de información hidrológica, debido a que el agua es un recurso finito, vulnerable y básico para sustentar la vida, el desarrollo y el ambiente. La disponibilidad de un apropiado abastecimiento de agua es considerado crítico para las áreas de salud pública, desarrollo económico y para un ambiente saludable, siendo éste uno de los desafíos más urgentes a ser atendidos (Ferreti, 2003).

En cuanto a disponibilidad de recursos hídricos, Ecuador es considerado un país privilegiado en comparación con otras regiones del mundo (SENAGUA, 2008). El país dispone de una cantidad de agua que puede variar de 4'320.000 hm³ de agua en época lluviosa hasta los 146.000 hm³ en época seca. Gran parte del agua aprovechada, proviene de los recursos superficiales y es usada principalmente para riego (82%), uso doméstico (12%) y uso industrial (6%). El conocimiento acerca de las reservas de agua subterránea es escaso, pero se estima que el país posee 10.400 hm³/año, de los cuales solo el 3% es utilizado (MAGAP, 2013).

Una de zonas productoras de agua en el Ecuador, es la Comuna Pasto La Esperanza ubicada entre las parroquias Tufiño y Maldonado en la provincia del Carchi. Históricamente, sus pobladores se han dedicado a la agricultura y

ganadería, donde las inadecuadas prácticas agropecuarias llegaron a disminuir la cantidad y calidad del agua. Las actividades que ocasionaron la reducción de los caudales, fueron la quema de pajonales, extensión de la frontera agrícola, pastoreo de ganado y presencia de especies exóticas (pino) en áreas cercanas a las fuentes de agua, especialmente en la parte alta; y la extracción de madera, en la parte baja.

Sin embargo, gracias a la intervención de actores sociales internos y externos, y a que la comuna a partir del año 2008 fue añadida al Programa Socio Bosque (ECOCIENCIA, 2008), buena parte de los problemas mencionados han sido mitigados, aunque parte de ellos aún persisten. Es importante mencionar que en opinión del presidente de la comuna (Manuel Chenáz, comunicación personal, noviembre 2015), la reciente actividad del Volcán Chiles provocó temporalmente la alteración de la calidad y cantidad de algunas fuentes de agua.

A pesar de que la comuna cuenta con algunos estudios con enfoques de protección y conservación, dando importancia a los bosques andinos y páramos, considerados áreas de conservación prioritaria por ser productores y reguladores del agua por autores como Mena y Ortiz (2002), no existen estudios que identifiquen las zonas de recarga hídrica ni su potencial. Por lo cual, tampoco se dispone de estrategias para un manejo adecuado de éstas zonas ni de las fuentes de abastecimiento de agua, para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico requerido por la sociedad y los ecosistemas.

La relevancia de las zonas de recarga, radica en ser las áreas de abastecimiento de acuíferos mediante el proceso de infiltración. Los acuíferos al saturarse se descargan en manantiales, drenajes menores, y ríos que son los espacios donde afloran las aguas subterráneas. Las fuentes de agua superficial, son la base para el desarrollo de las actividades productivas, que se llevan a cabo en los asentamientos poblacionales (Peñuela y Carrillo, 2013).

La degradación de las áreas de recarga de las cuencas hidrográficas, acelera la reducción de la disponibilidad de las fuentes de agua tanto superficial como

subterránea para diferentes usos. Esto depende de la deforestación, el grado de erosión y compactación de los suelos, especialmente en zonas con pendientes fuertes que favorecen la escorrentía. A esto se suma, el desarrollo de actividades agrícolas, industriales, extracción de leña, construcción de viviendas y actividades pecuarias, en sitios no apropiados (Faustino, 2006).

Una de las principales causas del deterioro de las zonas de recarga hídrica, es el desconocimiento de la ubicación y de las características de las áreas con infiltración de agua que proviene de las precipitaciones. La recarga hídrica depende, en gran medida, de las características físicas del suelo, permitiendo la retención de humedad y la percolación directa del agua hacia un posible acuífero existente en la zona (Blanco, 2010).

Por lo antes mencionado, el presente estudio se desarrolló para generar información cartográfica detallada de las zonas de recarga hídrica mediante el Método de Recarga Hídrica Subterránea (RAS) de Junker (2005), con el fin de elaborar participativamente estrategias de manejo sustentable de recursos hídricos de la parte alta y zona de amortiguamiento de la comuna Pasto La Esperanza, ya que es donde se originan las fuentes primarias de agua y donde se encuentran las principales captaciones de agua que abastecen para el consumo de los pobladores de parroquia de Tufiño y de la ciudad de Tulcán.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser aplicados al Plan de Manejo y Desarrollo de la Comuna Pasto La Esperanza, para fortalecer sus actividades, proyectos y programas. También pueden apoyar la toma de decisiones en futuros planes de desarrollo social, ordenamiento territorial y proyectos de conservación. Pueden orientar acciones que permitan mitigar los problemas ambientales aún existentes en la comuna. Además, se constituiría en un estudio piloto que sirva como modelo para investigaciones futuras en microcuencas, subcuencas y ecosistemas con similares condiciones ambientales y sociales.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Identificar las zonas de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento de agua en la Comuna Pasto La Esperanza, Provincia del Carchi, para establecer estrategias de manejo sustentable.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las condiciones biofísicas e hídricas de la comuna Pasto La Esperanza, para establecer áreas de recarga hídrica.
- Identificar las zonas potenciales de recarga hídrica de las fuentes de abastecimiento de agua de la comuna Pasto La Esperanza.
- Definir, de manera participativa, estrategias de manejo sustentable que permitan proteger las zonas de recarga hídrica y las fuentes de abastecimiento de agua en la parte alta y zona de amortiguamiento de la comuna Pasto la Esperanza.

1.2. Pregunta directriz

¿Dónde se localizan y cuál es el potencial de recarga de las principales zonas de recarga hídrica de las fuentes de abastecimiento de agua de la comuna Pasto La Esperanza?

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo muestra una recopilación bibliográfica que fundamenta la presente investigación, haciendo uso de estudios relacionados con el tema propuesto extraídos de libros, artículos científicos, documentos técnicos especializados y marco legal que rigen el manejo de los recursos hídricos en el Ecuador.

2.1. Marco Legal

El estudio realizado se enmarca dentro de los artículos de la Constitución de la República del Ecuador 2008, en los objetivos del Plan Nacional para el Buen Vivir 2013 – 2017, y en los artículos de la Ley Orgánica de los Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua 2014, los cuales son el fundamento legal para investigaciones en cuerpos de agua dentro del Ecuador.

2.1.1. Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador, se refiere a los recursos hídricos y zonas de recarga de agua, en los siguientes artículos:

En el Capítulo segundo de los Derechos del Buen Vivir, dentro de la sección primera de agua y alimentación, el Art. 12 señala que el derecho al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

En el Capítulo quinto de los Sectores estratégicos, servicios y empresas públicas, el Art. 318 menciona que el agua es patrimonio nacional estratégico, de uso público, dominio inalienable e imprescriptible del Estado, constituye un elemento vital para la naturaleza y para la existencia de los seres humanos y se prohíbe toda forma de privatización del agua. La gestión del agua será exclusivamente pública o comunitaria (...) El Estado, a través de la autoridad única del agua, será el responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinarán a consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, e este orden de prelación.

En el Capítulo segundo, sección tercera sobre el Patrimonio natural y ecosistemas, el Art. 406 señala que el Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos (...).

En la sección sexta que trata sobre el agua, el Art. 411 menciona que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

2.1.1. Ley Orgánica de los Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento

La regulación, control y manejo sustentable de las fuentes y zonas de recarga de agua, se enmarca en cada uno de los siguientes artículos de la Ley Orgánica de los Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua:

El artículo 21 estipula que la Agencia de Regulación y Control del Agua, será quien ejercerá la regulación y el control de la gestión integral e integrada de los recursos hídricos, de la cantidad y calidad de agua en sus fuentes y zonas de recarga, calidad de los servicios públicos relacionados al sector agua y en todos los usos, aprovechamientos y destinos del agua.

En el artículo 33 se manifiesta que la gestión pública de los recursos hídricos comprenderá la planificación, formulación de políticas nacionales, gestión integrada en cuencas hidrográficas, el otorgamiento, seguimiento y control de autorizaciones de uso y de autorizaciones de aprovechamiento productivo del agua, la determinación de caudales ecológicos, la preservación y conservación de las fuentes y zonas de recarga hídrica (...).

El artículo 41 señala que la gestión de los sistemas públicos de riego y drenaje es de corresponsabilidad entre el Gobierno Central, los Gobiernos Autónomos Descentralizados en el ámbito de sus competencias y los usuarios. Tal corresponsabilidad implica (...) el manejo sustentable de las fuentes y zonas de recarga.

En el artículo 110, se declara que será regulada toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

El artículo 111, establece que la Autoridad Única del Agua y la Autoridad Ambiental Nacional emitirán las regulaciones necesarias para garantizar la

conservación y el equilibrio de los ecosistemas, en especial de las fuentes y zonas de recarga de agua.

2.1.2. Plan Nacional para el Buen Vivir 2013 – 2017

Dentro del Plan Nacional para el Buen Vivir 2013 – 2017, elaborado por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES, 2013), se establece el control de las fuentes de agua y zonas de recarga hídrica dentro de las líneas estratégicas de los objetivos 3 y 7, que se citan a continuación:

Objetivo 3.

Política 3.10

Garantizar el acceso universal, permanente, sostenible y con calidad a agua segura y a servicios básicos de saneamiento, con pertinencia territorial, ambiental, social y cultural.

Lineamiento estratégico

c. Identificar, explotar y usar de manera sostenible y sustentable las fuentes de agua mejoradas, áreas de abastecimiento y la provisión de agua para consumo humano, de manera articulada entre niveles de gobierno.

Objetivo 7.

Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global.

Política 7.6

Gestionar de manera sustentable y participativa el patrimonio hídrico, con enfoque de cuencas y caudales ecológicos para asegurar el derecho humano al agua.

Lineamiento estratégico

f. Fortalecer la regulación, la cooperación y la coordinación para mejorar el control técnico de las actividades que afecten la calidad y cantidad del agua, especialmente en las fuentes y zonas de recarga de agua.

2.2. Ciclo hidrológico en Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es reconocida como la unidad territorial delimitada por la línea divisoria de aguas, compuesta por un sistema hídrico, donde todas las aguas superficiales desembocan en un cauce o río principal hasta llegar al mar. Dentro de dicho sistema, existe una compleja interrelación entre elementos bióticos, abióticos, antrópicos, culturales y sociales, donde uno depende de otro para su continuidad (Ordoñez, 2011).

La importancia de las cuencas hidrográficas, radica en que de ellas dependen todas las actividades socioeconómicas y ambientales que se desarrollen en un determinado lugar; por lo cual, es esencial un manejo integral de los recursos hídricos (Dourojeanni, Jouravlev, y Chávez, 2002).

El ciclo hidrológico es un conjunto de procesos de movimiento del agua entre la litósfera y la atmósfera y viceversa, en sus diferentes estados: líquido, sólido y gaseoso; donde el agua se evapora desde el suelo, mar y cuerpos de agua continentales, se condensa en nubes, se precipita, se desplaza sobre la superficie terrestre, se acumula en el suelo o cuerpos de agua y se evapora nuevamente (Ordoñez, 2011).

Estos procesos naturales pueden producirse debido a dos factores imprescindibles: el sol y la gravedad. El primero, permite que el agua ascienda a través de la evaporación; y el segundo, posibilita que el agua descienda en forma de precipitaciones (Cotler, Mazari, y de Anda , 2006). Sin embargo, dicho ciclo

puede alterarse por el deterioro de los elementos que constituyen una cuenca hidrográfica, como son los cambios de uso del suelo, erosión, deforestación de sus bosques, degradación del agua y otras actividades antrópicas (Maderey y Jiménez, 2001).

2.3. Páramos como reguladores del ciclo hidrológico

Los páramos son ecosistemas exclusivos de las altas montañas, que se encuentran entre los bosques andinos y los glaciares de los nevados. Los páramos se caracterizan por presentar bajas temperaturas y por encontrarse sobre los 3000 msnm; no obstante, sus límites varían dependiendo de la posición geográfica, la topografía, la latitud y la historia geológica y evolutiva del lugar. (Morales y Estévez, 2006; Flores, Groten, Lugo, y Mena, 2012).

La importancia de los páramos como reguladores del ciclo hidrológico, se debe básicamente a los suelos, los cuales retienen grandes cantidades de agua y la liberan paulatinamente posibilitando un aprovechamiento continuo, debido a la alta porosidad y permeabilidad. Esto se debe a que las bajas temperaturas y abundante humedad relativa influyen en la descomposición lenta de la materia orgánica, formando un horizonte profundo de suelo orgánico, cumpliendo la función de retención de agua. Por lo cual, los páramos actúan como un medio de almacenamiento y regulación del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas e hidrográficas (Mena, Josse, y Medina, 2000; Mena y Ortiz, 2002; Flores et al., 2012).

2.4. Balance hídrico climático

A causa de que en ciertas regiones del mundo la disponibilidad de agua depende de la capacidad de captación de agua de la cuenca, cada vez es mayor el uso de métodos que permitan estimar y determinar el comportamiento hidrológico, capacidad de captación, flujos de agua, procesos hidrológicos y períodos en los

cuales se presentan las precipitaciones, como son los balances hídricos (Santillán, Dávila, Sánchez, y Díaz, 2013).

El balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera, permitiendo hacer una cuantificación del recurso hídrico a diferentes escalas, ya sea una parcela, finca, cuenca o región, tomando en cuenta las modificaciones del balance por influencia de las actividades de los seres humanos (Jiménez, 2005).

Davie (2002) manifiesta que el propósito de la determinación de un balance hídrico, es establecer y analizar las entradas, salidas y cambios de humedad dentro de un área determinada. Por su parte, Faustino (2007) afirma que el balance hidrológico ayuda a determinar la disponibilidad de agua en tiempo y espacio, y se utiliza para identificar el conflicto de déficit de agua ante la necesidad que tiene el ser humano de utilizarla.

Aunque los balances hídricos parten del principio de conservar el recurso hídrico, existen también los llamados métodos directos, como el Balance Hídrico Climático (BHC), cuya característica es el uso solo de variables climáticas para su aplicación y análisis: precipitación y evapotranspiración (que depende de la temperatura). De acuerdo a Matus (2007), el BHC permite estimar la cantidad de agua disponible para que escurra o infiltre, y también estimar la disponibilidad potencial de agua para la recarga hídrica.

- **Precipitación**

Es la cantidad de agua meteórica que puede descender en estado líquido (lluvia, rocío, niebla) o sólido (nieve, escarcha, granizo) y representa la principal fuente de agua de la superficie continental (Bueso, 2010).

- **Evapotranspiración**

Es la combinación de la evaporación de la superficie terrestre y la transpiración de la vegetación. La evapotranspiración (ET) depende de tres factores: suministro de energía, transporte de valor y la humedad en la superficie. Al referirse a esta variable climática, es necesario diferenciar entre la evapotranspiración potencial (ETP) que es la ET máxima que teóricamente ocurriría desde un suelo cubierto de vegetación y constantemente abastecido de agua hacia la atmósfera; y la evapotranspiración real (ETR) que es la cantidad de que realmente de evapora o transmite hacia la atmósfera; y es inferior a la ETP a medida que el suelo se seca (Chow, Maidment, y Mays, 1988).

La estimación de la oferta hídrica a través del cálculo del balance hídrico, se realiza para determinar si hay problemas de cantidad de agua. Es decir, para señalar si hay suficiente agua para satisfacer las necesidades de los usuarios actuales y potenciales de una zona (Barsev, 2008).

- **Escorrentía**

El agua que precipita en tierra puede tener varios destinos. Una parte, es devuelta directamente a la atmósfera por evaporación; otra parte escurre sobre la superficie del terreno, y la restante se infiltra penetrando en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas (Fattorelli y Fernández, 2011).

Matus, Faustino y Jiménez (2009) indican que la escorrentía es la cantidad del agua proveniente de la precipitación, riego o deshielo, que supera la capacidad de infiltración del suelo. Cuando el exceso de agua sobrepasa la capacidad de almacenamiento del suelo, esta fluye en sentido de la pendiente (aguas abajo) hacia los arroyos, quebradas, ríos, lagos, embalses y océanos.

La escorrentía superficial se presenta siempre que hay precipitación y termina poco después de haber terminado este fenómeno. Por otro lado, el escurrimiento subterráneo, especialmente cuando se da a través de medios porosos, ocurre con gran lentitud y sigue alimentando los cursos de agua mucho después de haber terminado la precipitación que le dio origen (Fattorelli y Fernández, 2011).

- **Infiltración**

La infiltración es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo por efecto de la gravedad. El agua se acumula en los poros del suelo y así puede ser utilizada por las plantas, o puede desplazarse a capas más profundas del suelo, donde alimenta a los mantos acuíferos. La capacidad de infiltración es la cantidad de agua que el suelo es capaz de absorber por unidad de tiempo (mm/h, cm/h, o cm/min); este valor es variable en función de la humedad, la composición y la compactación del suelo (Matus et al., 2009).

2.4.1. Ecuación del balance hídrico climático

Matus (2007) sugiere que un balance hídrico climático debe ser realizado dentro de un proceso de identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, conjuntamente con los pobladores de la zona donde se realiza el estudio. Además, manifiesta que la ecuación que permite su cálculo es la siguiente:

$$BHC = P - ETP$$

En donde,

BHC = Balance hídrico climático

P = Precipitación

ETP = Evapotranspiración

2.5. Importancia de las aguas subterráneas en el balance hídrico

La precipitación en forma de lluvia, es la principal fuente de agua dulce que abastece a los cuerpos de agua del planeta, los cuales constituyen una pequeña parte dentro del ciclo hidrológico. Una parte de la precipitación, corre por la superficie terrestre (escorrentía superficial), otra parte se infiltra en el suelo, a través de las zonas de recarga hídrica, de la cual, mediante la vegetación, regresa a la atmósfera como evapotranspiración; pero aquella que logra percolar hacia las capas más profundas, alimenta a los acuíferos (Sahuquillo, 2009).

2.6. Acuíferos

Un acuífero es un estrato rocoso o formación geológica, capaz de almacenar y transmitir volúmenes significativos de agua a través de sus poros y grietas; permitiendo extraer grandes cantidades de agua económicamente aprovechables (Ávalos y Rosito, 2007).

2.6.1. Tipos de acuíferos

Dependiendo de las capas del perfil del suelo, los acuíferos pueden clasificarse de la siguiente manera (Ordoñez, 2011):

Acuíferos libres: también conocidos como acuíferos freáticos, son formaciones permeables (donde el agua circula con facilidad) en los que el nivel del agua está por debajo del límite superior de acuífero y en la base o parte inferior se presenta una capa impermeable (donde el agua no puede fluir). Se caracterizan por encontrarse con frecuencia cerca de la superficie terrestre. Además, liberan agua mediante el drenaje de sus poros, dicha agua se conoce como freática o libre.

Acuíferos semi-confinados: son formaciones permeables saturadas (los poros entre partículas están llenas de agua) donde la parte superior corresponde a una capa semipermeable y la inferior puede ser semipermeable o impermeable. En otras palabras, son acuíferos que no son totalmente impermeables, aunque presentan propiedades transmisoras de agua parcialmente limitadas.

Acuíferos confinados o cautivos: son acuíferos completamente saturados u ocupados; que tanto en la parte superior como la inferior poseen capas impermeables. Generalmente se encuentran a grandes profundidades, donde han tenido lugar la compactación, cementación y otros procesos de consolidación. El agua de un acuífero confinado se conoce como confinada o artesiana.

2.7. Recarga hídrica

Es el proceso mediante el cual una unidad hidrogeológica (acuífero) se abastece de agua procedente del área que lo limita o área de influencia; en otras palabras, es el proceso de acumulación de aguas subterráneas. Dicha agua puede provenir de varias fuentes como: la infiltración de la lluvia (la más importante), de escorrentías superficiales o de otros acuíferos adyacentes (Palacio y Betancur, 2007).

Las características más importantes de las precipitaciones que fijan la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo, estableciendo una mayor ocurrencia de recarga son: la duración, la intensidad y la distribución (Matus, 2007). Sin embargo, Veenhuizen (2000) considera que la frecuencia de las precipitaciones es otra característica determinante en el proceso de infiltración.

La recarga y las zonas de recarga de los acuíferos son la fuente de abastecimiento de agua principal de los cuerpos de agua tanto subterráneos como superficiales, los mismo que proveen de beneficios ecosistémicos, de biodiversidad y alimentarios para las poblaciones

2.8. Zonas de recarga hídrica

Las zonas de recarga hídrica son las áreas por donde el agua se infiltra, permitiendo así la recarga hídrica. Autores como Peñuela y Carrillo (2013) consideran que la identificación de estas zonas tiene mayor complejidad que la identificación de las zonas de descarga, debido a que el agua se infiltra en el suelo y las rocas y no se tiene evidencia superficial; a menos que los investigadores cuenten con presupuesto suficiente para perforar un acuífero y tomar muestras de suelo y subsuelo en condiciones específicas.

La recarga hídrica de un acuífero depende en gran medida de las características físicas del suelo, permitiendo la retención de humedad y la percolación directa del agua hacia un posible acuífero existente en la zona. Así mismo, existe una estrecha relación entre la vegetación presente en el área y el volumen potencial de agua almacenada, puesto que las zonas cubiertas de vegetación y bosques, pueden presentar mayor capacidad para almacenar humedad; mientras que, en las zonas desprovistas de vegetación boscosa, dicha capacidad puede disminuir (Matus, 2007; Blanco, 2010).

La degradación de las áreas de recarga de las cuencas hidrográficas, acelera la reducción de la disponibilidad de las fuentes de agua tanto superficial como subterránea, para múltiples usos. Esto depende de la deforestación, el grado de erosión y compactación de los suelos, especialmente en zonas con pendientes fuertes que favorecen la escorrentía. A esto se suma el desarrollo de actividades agrícolas, industriales, extracción de leña, construcción de viviendas y actividades pecuarias, en sitios no apropiados (Faustino, 2006).

El recurso agua, tanto superficial como subterráneo precisa de ciertos factores, como el conocimiento del sistema acuífero, el uso del suelo, la regulación de caudales de aprovechamiento, la identificación y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento de agua con sus respectivas evaluaciones, para asegurar la disponibilidad y sostenibilidad del agua.

2.8.1. Clasificación de las zonas de recarga hídrica

Faustino (2006) afirma que, dependiendo del movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, las zonas de recarga hídrica se pueden clasificar en:

- Zonas de recarga hídrica superficial:

Prácticamente es toda la cuenca hidrográfica, excluyendo las zonas totalmente impermeables, esta es la que se humedece después de cada lluvia, originando escorrentía superficial, según las condiciones de drenaje: relieve del suelo y saturación. La medición de este caudal se realiza en el cauce principal del río, y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.

- Zonas de recarga hídrica subsuperficial:

Es la que corresponde a las zonas de la cuenca con suelos con capacidad de retención de agua o almacenamiento superficial sobre una capa impermeable, que permite que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, también dependen de la cantidad de precipitación y la capacidad de absorción del suelo (libera lentamente el agua en su movimiento horizontal). Este caudal se mide igual que en el caso anterior y puede ocurrir después de las lluvias y en épocas secas, cuando el agua proveniente es de bosques. En esta evaluación, cuando se determina la infiltración en el movimiento del agua en el suelo o subsuelo, el flujo horizontal corresponde a esta zona de recarga y el flujo vertical corresponde a la escorrentía subterránea.

- Zonas de recarga hídrica subterránea:

Es la que corresponde a las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos y rocas permeables) en el cual el flujo vertical de la infiltración es significativo; ésta es la que forma o alimenta los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa (que viene de otra cuenca). Para la

evaluación se pueden considerar dos métodos: el directo (mediante sondeos, bombeos y prospección geofísica); y el indirecto (mediante el abalace hidrogeológico).

2.9. Factores que afectan la recarga hídrica

Para comprender el funcionamiento y las interrelaciones entre los sistemas hídricos superficiales y subterráneos, es fundamental tomar en cuenta la hidrogeología de cuencas hidrográficas e hidrológicas, es decir, es imprescindible manejar ciertos aspectos geológicos y morfológicos que condicionan la litología, el grado de pendiente del terreno, las precipitaciones, el uso actual y textura del suelo y la cobertura vegetal (Peñuela y Carrillo, 2013). A su vez, Herrera y Brown (2011) refieren que los factores que también deben tomarse en consideración son la humedad precedente del entorno, la existencia de geo-formas propicias al proceso y de las vías de escurrimiento.

2.10. Métodos para determinar la recarga hídrica

Existen diversos estudios científicos relacionados con la determinación de recarga hídrica, los cuales describen diferentes métodos, como por ejemplo el Modelo Analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual (Schosinsky y Losilla, 2000), la Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural (INAB, 2003), el Método de Recarga de Agua Subterránea (RAS) (Junker, 2005), la Metodología Participativa para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica (Matus, 2007), la Aplicación de hidrología isotópica e hidrogeoquímica (Palacio y Betancur, 2007), la Teoría de Sistemas de Flujo (TSF) (Peñuela y Carrillo, 2013).

2.10.1. Modelo analítico para determinar infiltración (Schosinsky y Losilla)

Este método también conocido como Balance Hídrico de Suelos, propone establecer una ecuación que permita determinar la infiltración de una precipitación mensual, usando datos obtenidos del análisis de bandas

pluviográficas, para obtener las intensidades de lluvias diarias, mensuales o anuales. Consiste en la correlación entre la infiltración potencial mensual, el valor de la infiltración básica del suelo y la precipitación mensual. Los valores de infiltración dependen de la pendiente topográfica, cobertura vegetal y la intercepción de la lluvia en la hojarasca. (Schosinsky y Losilla, 2000).

La ecuación que determina la infiltración es la siguiente (Schosinsky y Losilla, 2000):

$$I = 0,88 * C (k_p + k_v + k_{fc}) * P$$

Donde:

I: Infiltración

C: Coeficiente de infiltración

K_p = Fracción que infiltra por efecto de la pendiente.

K_v = Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal.

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo.

P = Precipitación.

2.10.2. Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural

Según INAB (2003), este método consiste en identificar las áreas que, por sus aportes de recarga potencial, constituyen zonas principales de recarga hídrica natural. De aquellas zonas, se identifican, las denominadas áreas críticas, que, por sus características específicas, se consideran susceptibles a disminuir su potencial de recarga al ser sometidas a un manejo contrario a su capacidad.

Los aspectos que se deben considerar para reconocer las áreas críticas son: geología, infiltración básica, recarga natural (lámina anual), pendiente y la susceptibilidad de las áreas a ser consideradas críticas de recarga hídrica natural. Las áreas deben ser evaluadas de acuerdo a los criterios de cada aspecto, donde a cada unidad de mapeo se asignan valores numéricos. La sumatoria de ellos, dará como resultado la categoría en la que se encuentran dichas zonas (INAB, 2003).

2.10.3. Método de Recarga de Agua Subterránea (RAS)

Según Junker (2005), en esta metodología los componentes biofísicos que intervienen en el proceso de recarga (pendiente del terreno, textura del suelo, litología, cobertura vegetal, uso actual del suelo) y climáticos (precipitación y evapotranspiración) se agrupan en: tipo de suelo, uso del suelo, y pendiente, para ser reclasificados con los coeficientes que otorga el método para que sea posible su aplicación.

Este método se basa en una ecuación, donde la recarga acuífera se obtiene de la multiplicación entre un coeficiente climático, para lo cual se realiza un balance hídrico climático, y se obtiene un coeficiente de infiltración. La ecuación que determina la cantidad de agua infiltrada en una zona es la siguiente (Junker, 2005):

$$R = BC * C$$

Donde:

R: Recarga acuífera

BC: Balance climático

C: Coeficiente de infiltración

2.10.4. Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica

La metodología propuesta y elaborada por Matus (2007) es de tipo participativa, que busca identificar zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, mediante la integración del conocimiento técnico-científico con el local y/o tradicional. Se basa en el análisis de cinco elementos (pendiente y micro relieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura de vegetación permanente y usos del suelo) que influyen directamente en la determinación de zonas con altas o bajas posibilidades para que ocurra la recarga hídrica.

Los cinco elementos se combinan en una ecuación lineal, donde se suman para obtener una visión integral de cómo se encuentran incidiendo en el proceso de recarga, considerándolos en conjunto y no por separado. La suma de valores de cada elemento de la ecuación, da un número que se ubica en un rango que indica la posibilidad de ocurrencia de la recarga hídrica. Es importante recalcar que este método, no determina la cantidad de recarga, sino los factores que pueden favorecer o no la recarga hídrica. La ecuación en la que se basa este método es la que se detalla a continuación (Matus, 2007):

$$ZR = 0.27 (Pend) + 0.25 (Cve) + 0.23 (Ts) + 0.13 (Us) + 0.12 (Tr)$$

Donde:

ZR = zona de recarga hídrica

Pend = pendiente y micro relieve

Cve = cobertura vegetal

Ts = tipo de suelo

Tr = tipo de roca

Us = uso del suelo

0.27, 0.25, 0.23, 0.13, 0.12 = factores de peso de cada elemento con relación a su importancia, aportes o influencia en la infiltración.

2.11. Herramientas SIG en la identificación de zonas de recarga hídrica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas informáticos para la manipulación y análisis de datos georeferenciados. Su principal ventaja es permitir la obtención de nueva información mediante la combinación o superposición de mapas; esto proporciona una visión holística e integral de los factores de interés en una investigación (FAO, 2005).

Los SIG están constituidos por subsistemas que permiten ingresar, almacenar, editar y analizar datos geográficos a bajo costo y en forma rápida. El objetivo es convertir datos en información apta y clara para la toma de decisiones, en forma

de mapas y otras bases de datos. En lo que se refiere a cuencas hidrográficas, las aplicaciones más frecuentes son los modelamientos hidrológicos, la estimación del balance hídrico, análisis integrado y planes de manejo de cuencas y definición de zonas prioritarias para la conservación del agua (Cotler, 2004).

Según Cotler (2004), la producción cartográfica moderna referente a recursos naturales y a cuencas hidrográficas, se puede dividir en dos tipos, la general y la temática. La cartografía general describe la altitud del terreno (mediante curvas de nivel), así como la red de drenaje, las localidades y la infraestructura. La temática haciendo uso de los SIG, detalla diferentes factores tanto del medio natural (suelos, vegetación, usos del suelo, precipitación, evapotranspiración) como del medio socioeconómico (distribución de la población, marginalidad, entre otros).

2.12. Fuentes de abastecimiento de agua

Las fuentes de abastecimiento de agua o zonas de descarga, son los espacios por donde afloran las aguas subterráneas como los manantiales, quebradas, y ríos. Son la evidencia más factible del funcionamiento del agua subterránea, debido a que representan la fase final del recorrido del flujo subterráneo, al regresar el agua a la superficie (Peñuela y Carrillo, 2013).

Las fuentes de agua superficial son la base para el desarrollo de las actividades productivas, que se llevan a cabo en los asentamientos poblacionales. Sin embargo, son esas mismas actividades las que deterioran y alteran la calidad y cantidad del agua de dichas fuentes; de forma natural mediante el arrastre de sedimentos y materia orgánica, y de manera antrópica por las descargas residuales domésticas, efluentes industriales y escorrentía agrícola. Esto expone a un grave riesgo a la salud pública de un lugar o los lugares que están dentro y fuera de su área de influencia directa (Torres, Cruz y Patiño, 2009; Peñuela y Carrillo, 2013).

A su vez, Faustino (2006) afirma que la acelerada reducción de la disponibilidad de las fuentes de agua, son consecuencia del deterioro de las zonas de recarga

hídrica, la baja eficiencia del uso del agua, la contaminación de ríos, y reservorios de agua.

2.13. Estrategias de manejo sustentable de zonas potenciales de recarga hídrica y recursos hídricos

Las estrategias son un conjunto de decisiones potenciales o condicionales que delimitan las acciones a realizarse, tomando en cuenta todos los escenarios posibles que pueden presentarse en el futuro. La definición de una estrategia, consiste en crear un listado de todas las situaciones a las que se podría llegar para poder seleccionar la decisión que intentará resolver cada una de ellas. Sin estrategias, no se puede pasar a la acción (Baena, 2015).

Cualquier tipo de investigación debe ser planificada y diseñada siguiendo fundamentos científicos. Por lo cual, se requieren estrategias claras sobre las interrogantes que se buscan responder, los objetivos de la investigación y el diseño deben estar aclarados y los pasos metodológicos a seguir deben ser detallados. De igual manera, se debe definir claramente el tipo de datos que se coleccionarán y la forma en cómo se analizarán (Castillo y Peña-Modragón, 2015) .

Con estas consideraciones, el manejo del recurso hídrico es uno de los desafíos prioritarios que deben ser atendidos y planificados estratégicamente. Las alternativas técnicas para el manejo de las zonas productoras de agua son varias, sin embargo, la dificultad que suele encontrarse es que los dueños de las tierras no aceptan aplicar medidas que representen una inversión económica adicional a sus actividades, reduciendo sus ingresos. Esto origina, entre otras disyuntivas, la definición y negociación de pagos (incentivos), compensaciones y hasta compra de terrenos, especialmente cuando se tiene la certeza de haber encontrado una zona de recarga importante que abastece de agua a una población o es suministrada para otros usos importantes (Faustino, 2007).

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente apartado se presentan los materiales y equipos utilizados durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se detallan los procedimientos técnicos para cumplir los objetivos planteados.

3.1. Materiales y equipos

Los materiales empleados en el desarrollo de la presente investigación han sido clasificados en materiales, equipos y recurso humano, los cuales se detallan en el Cuadro 1.

Cuadros 1. Materiales y equipos

MATERIALES	EQUIPOS	RECURSO HUMANO
<ul style="list-style-type: none"> • Software ArcGis 10.2, ArcMap con licencia del Laboratorio de Geomática • Cartas topográficas digitales de IGM a escala 1:50000 • Fotografías aéreas del Proyecto SIGTIERRAS • Datos de Estaciones Meteorológicas (INAMHI) • Libreta de campo • Poncho de aguas • Botas de caucho • Cuerda de 15 m • Mochilas de asalto • Balde de 12 L 	<ul style="list-style-type: none"> • Computadora portátil (Lenovo Y50-70 Touch Screm) • GPS GARMIN 64CSx • Molinete Global Water 800-876-1172 • Infiltrómetro Turf-Tec • Cronómetro • Cámara digital • Impresora HP 1555 • Transporte (vehículo) • Flash memory • Cinta métrica de 30 	<ul style="list-style-type: none"> • Tesista • Director • Asesores • Guías de campo • Dirigentes de la comuna • Pobladores de la parroquia Tufiño

Elaboración. Autora

3.2. Limitaciones metodológicas

Durante el desarrollo del presente estudio, se identificaron dos limitantes metodológicas, la primera en la aplicación del método RAS y la segunda en el empleo la ecuación de Thornthwaite, dichas limitaciones se describen a continuación:

- Limitaciones de la ecuación general aplicada para la identificación de zonas potenciales de recarga.

En el territorio comunal Pasto La Esperanza, se encuentran microcuencas hidrográficas que carecen de información meteorológica e hidrometeorológica, debido a que la red de estaciones del INAMHI no tiene cobertura geográfica total en el Nor-Oeste de la provincia del Carchi.

La metodología RAS, determina las zonas potenciales de recarga, mediante rangos con valores de infiltración, es decir, genera datos en rangos, dificultando el análisis de los mismos.

- Limitaciones en el empleo de la ecuación de Thornthwaite.

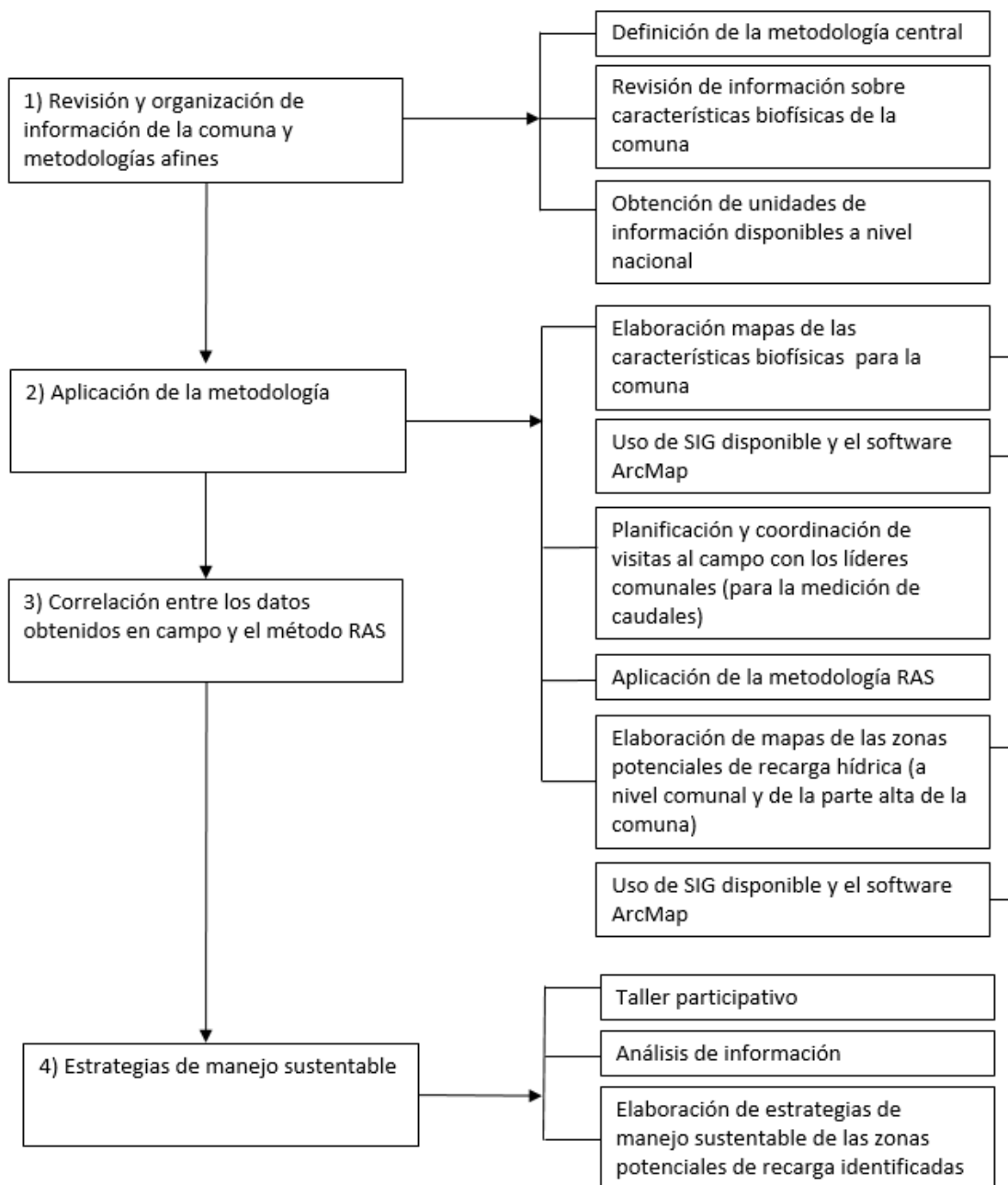
La ecuación de Thornthwaite requiere como insumos de entrada: la temperatura media mensual (°C) y el índice de calor mensual, dichos insumos no están disponibles en estaciones meteorológicas del INAMHI, por lo que fue necesario estimar datos de temperatura y calor mensual aplicando el software PETP de V2.0.0 (Gutiérrez, 2016).

3.3. Métodos

Los métodos utilizados durante la investigación se rigieron por las características propias del estudio, el problema, objetivos y pregunta directriz a la que se dio respuesta. El proceso metodológico fue dividido en cuatro etapas:

- Revisión de literatura relacionada con el método central del estudio, Recarga de Agua Subterránea (RAS), estudios afines, y obtención de capas de información de las características biofísicas a nivel nacional.
- Elaboración de mapas de los componentes biofísicos de la comuna Pasto La Esperanza, para la generación de dos mapas de las zonas potenciales de recarga hídrica a nivel comunal y de la parte alta de la comuna.
- Cálculo de recarga hídrica potencial y correlación entre los valores de infiltración obtenidos en a través del método RAS y los obtenidos en campo.
- Definición de estrategias de manejo sustentable para zonas potenciales de recarga hídrica y recursos hídricos, en base a la información obtenida en el taller participativo, y de literatura consultada sobre estudios en este contexto.

La Figura 1, indica el procedimiento metodológico para el desarrollo del presente estudio, el cual se detalla a continuación:



Figuras 1. Flujograma del proceso metodológico para el desarrollo del presente estudio
Elaboración. Autora

La metodología aplicada para el desarrollo de este estudio se basó principalmente en el Método RAS (Junker, 2005), debido a que se cuenta con la información necesaria para ser aplicada (capas de pendiente del terreno, textura del suelo, litología, cobertura vegetal, uso actual del suelo, precipitación y evapotranspiración). Asimismo, se empleó la técnica de álgebra de mapas en el software ArcGIS para identificar las zonas potenciales de recarga de agua subterránea. A continuación, se describen las bases metodológicas empleadas.

3.3.1. Caracterización de las condiciones biofísicas e hídricas de la comuna Pasto La Esperanza

La caracterización biofísica e hídrica se realizó mediante revisión de datos bibliográficos y climáticos, trabajo de campo y generación de cartografía temática en el Laboratorio de Geomática.

En la caracterización biofísica e hídrica, se consideró a delimitación del área de estudio y los siguientes componentes:

3.3.1.1. Delimitación del área de estudio

La localización de la comuna, se realizó mediante recorridos de observación dirigidos por guardabosques y el mapa que poseen los dirigentes comunales. Con esa información, se actualizaron los límites geográficos y territoriales del área comunal, obteniendo el mapa de ubicación procesado con el software ArcGIS disponible (licencia temporal).

Para delimitar el área de estudio y elaborar del mapa base, se identificaron y georeferenciaron las principales fuentes de agua tales como nacientes de agua, ríos y captaciones en la parte alta y zona de amortiguamiento (ZA) de la comuna, mediante un navegador GPS en proyección UTM, DATUM WGS84, Zona 17 Sur y el software ArcGIS disponible.

Moscoso (2003) menciona que las zonas de amortiguamiento son: “zonas adyacentes a las Áreas Naturales Protegidas (...), que por su naturaleza y ubicación requieren de un tratamiento especial para garantizar la conservación del área protegida”. Dicha zona, localizada fuera del territorio comunal, se delimitó debido a que en ella se encuentran estructuras de captación y fuentes de agua que abastecen a la ciudad de Tulcán y parte de la comuna.

Para delimitar geográficamente la zona de amortiguamiento se consideraron los drenajes, divisorias de agua y los pisos altitudinales en las fuentes de agua y estructuras de captación que abastecen de agua a la ciudad de Tulcán y a los pobladores de la comuna en los sectores de Tufiño, Los Tablones, San Ignacio y Montelodo.

El diagnóstico del área de estudio quedaba incompleto si no se incluía una zona de amortiguamiento, debido a que en la fase de campo se identificó las fuentes de abastecimiento de agua, determinándose que las fuentes de los sectores Cucurucho (quebrada Capote), Monte Redondo (captación de la vertiente Cuatza), Los Tablones (2 estructuras de captación), río Chiquito (río y estructuras de captación), se encuentran fuera del territorio de la comuna.

Por esta razón, se incrementó un área de influencia o zona de amortiguamiento en el sector de Tufiño con una superficie de 11200,96 ha, hasta la comunidad San Nicolás de Car; ésta zona de amortiguamiento permitió el análisis geográfico de la extensión de las zonas de recarga en todo el territorio comunal y en todas las fuentes de abastecimiento de agua.

El mapa del área de estudio a escala de elaboración 1:50000, incluye el límite de la comuna, el área de amortiguamiento, curvas de nivel, poblados, ríos y vías.

3.3.1.2.Elaboración de cartografía temática

Para delimitar el área de estudio, se elaboraron mapas temáticos con el software ArcGIS disponible, a escala de elaboración 1:50000 y escala de impresión 1:125000. Las unidades de mapeo requeridas para la elaboración de cada mapa se obtuvieron del Geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI, 2013). Con ésta información se generaron los mapas que se mencionan a continuación:

- Mapa de ubicación
- Mapa base
- Mapa de fuentes de agua y captaciones (sitios de aforos)
- Mapa geológico
- Mapa de pendientes
- Mapa de tipos de suelo (textura)
- Mapa de cobertura vegetal y uso actual del suelo

Los mapas de precipitación, temperatura y evapotranspiración, se realizaron a partir de información obtenida de las estaciones meteorológicas San Gabriel y El Ángel y la estación pluviométrica Tufiño localizadas en un radio de influencia de 17,45 km al área de estudio; los datos climáticos fueron solicitados al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015).

3.3.1.3.Caracterización hídrica de la comuna Pasto La Esperanza

Para caracterizar el componente hídrico se elaboraron dos diagramas ombrotérmicos para determinar las épocas seca y lluviosa, información necesaria para realizar las mediciones de caudales. Los diagramas se realizaron con los datos que dispone el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología para la zona, siendo la estación meteorológica El Ángel las más importante, al tener una influencia de 9.866,64 has (77,7%) sobre el área comunal, sin embargo, también se trabajó con los datos registrados por la estación meteorológica San Gabriel.

La caracterización hídrica del área de estudio también se realizó mediante información documentada del Plan de Manejo y Desarrollo de la Comuna La Esperanza (ECOCIENCIA, 2008) y visitas al campo. La medición de caudales se realizó en las principales fuentes de agua y captaciones que abastecen a la parroquia de Tufiño, parte de la comuna y a la ciudad de Tulcán.

Los aforos de caudales se realizaron en dos épocas del año: lluviosa que corresponde a los meses de abril y mayo; y seca que corresponde a los meses de agosto y septiembre; de acuerdo a los diagramas ombrotérmicos elaborados con datos de la estación meteorológica El Ángel, con un período de 17 años (1990 a 2007) y de la estación de San Gabriel con registros de 26 años (1987 a 2013), por disponibilidad de datos completos de información meteorológica.

En cada época se realizaron visitas de campo, y en cada salida se realizaron aforos puntuales en la quebrada Capote, sector Cucurucho (antes y después de la estructura de captación), en el río Chiquito (antes y después de la estructura de captación), en una captación de la vertiente Cuatza localizada en el sector Monte Redondo y en las captaciones en el sector Los Tablones, ver Figura 16. En el Cuadro 2 se especifican los sitios de aforo al igual que los métodos utilizados en cada punto.

Cuadros 2. Ubicación puntos de control y métodos utilizados

Punto	Sector	Método utilizado	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Altitud (msnm)
1	Cucurucho, en la quebrada Capote (antes de la captación)	Molinete mecánico Método del flotador	178981	10089052	3416
2	Cucurucho, luego de la estructura de captación	Molinete mecánico	179006	10089042	3465
3	Monte Redondo (en el canal y tubería de la captación)	Aforo volumétrico Molinete mecánico	178749	10087296	3551
4	Río Chiquito (en el río antes de la captación 1)	Molinete mecánico Método del flotador	183442	10086082	3193
5	Río Chiquito (en el canal luego de la captación 1)	Método del flotador Molinete mecánico	183447	10086114	3184
6	Río Chiquito (en el río antes de la captación 2)	Molinete mecánico Método del flotador	183446	10085833	3216
7	Río Chiquito (en el tanque luego de la captación 2)	Método del flotador Molinete mecánico	183439	10085859	3210
8	Los Tablones (en las 2 quebradas antes del tanque de captación arriba)	Aforo volumétrico	184028	10084847	3325
9	Los Tablones (en el tanque de captación abajo)	Aforo volumétrico Molinete mecánico	183893	10084901	3310

Elaboración. Autora

En cada punto se registraron datos de acuerdo al método de aforo utilizado: molinete mecánico, método del flotador y aforo volumétrico. Los resultados obtenidos y procesados en el software Excel, se detallan a continuación:

- Medición de caudales

El caudal de un río o de un canal artificial, es la cantidad o volumen de agua que pasa por una sección determinada en un tiempo establecido. El caudal se obtiene a través de la siguiente ecuación (Fernández y Duarte, 2012):

$$Q = V_m * A$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

V_m = velocidad media de la sección (m/s)

A = área de la sección transversal (m²)

Los puntos de control o medición, fueron identificados en campo y georeferenciados con un navegador GPS GARMIN con la proyección UTM, DATUM WGS84, Zona 17 Sur. Para conocer la oferta o disponibilidad de agua, se realizaron mediciones de caudales totales y captados.

El primer caudal, se refiere a la cantidad total que tiene el río o quebrada, y se midió antes de las estructuras de captación. Mientras que, el segundo aforo se realizó después de las obras de captación y se trata de la cantidad de agua captada para consumo (González, 2011). Para la medición de caudales se emplearon tres métodos: el molinete mecánico, el método del flotador y el método de aforo volumétrico dependiendo a las características del sitio, y el caudal de agua.

- Medición con molinete

El molinete tiene la función de medir la velocidad de agua en cauces naturales o artificiales, en función de las revoluciones de la hélice (el dispositivo giratorio) en un tiempo establecido. La velocidad en cada punto de aforo, se puede visualizar en un contador conectado al molinete (Tapia, Molina, Pérez, y Torres, 2012).

El molinete mecánico se utilizó en los sitios con mayor flujo de agua, es decir, con mayor velocidad de corriente. Con este método se consideró el ancho superficial o distancia del cauce natural, desde la orilla izquierda hasta la derecha, en sentido de la corriente. La sección transversal del cauce, se dividió en varias subsecciones siguiendo la misma dirección, donde se midieron la velocidad de agua y la profundidad en cada tramo como se observa en la Figura 2 (Bustamante, 2006).

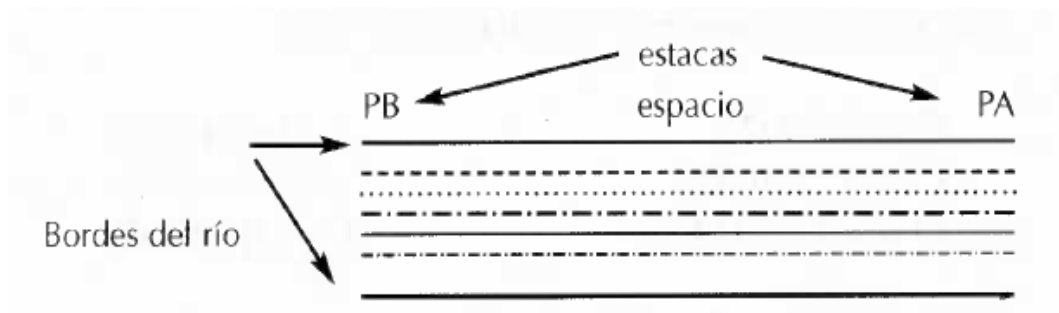


Figuras 2. Medición de caudales con Molinete mecánico
Fuente: Autora

La velocidad media de la sección transversal, se obtuvo calculando el promedio de las velocidades parciales de cada subdivisión. El área de la sección transversal (área mojada) de las fuentes de agua se determinó midiendo el ancho de la sección y las profundidades con intervalos de un metro, a lo largo de la misma (Fernández y Duarte, 2012).

- Medición con el método del flotador

El método del flotador, se utiliza como alternativa al molinete cuando los flujos de agua son mínimos o las velocidades de un cauce son excesivas, poniendo en riesgo al observador y a los equipos. Consiste en seleccionar un tramo recto en un cauce o canal con una distancia establecida (5 a 10 m), se deja caer el flotador (una hoja o cáscara de naranja) y se mide el tiempo que demora en recorrer del punto A al punto B tal como se muestra en la Figura 3 (Bustamante, 2006).



Figuras 3. Tramo recto del cauce que recorre el flotador del punto A al B.
Fuente: Bustamante (2006)

Para determinar el tiempo promedio, se realizaron 3 repeticiones (orilla izquierda, centro y orilla derecha) en ríos y quebradas; mientras que en los canales y tanques de captación se realizaron 5 repeticiones en el centro de las estructuras como se indica en la Figura 4.



Figuras 4. Medición de caudales con el método del flotador.
Fuente: Autora

Conociendo la distancia recorrida y el tiempo promedio que el flotador demora en atravesar el tramo, se calcula la velocidad media del agua, aplicando la siguiente ecuación (Bustamante, 2006):

$$V = L / T$$

Donde,

V = velocidad promedio (m/s)

L = longitud del tramo recorrido por el flotador (m)

T = tiempo recorrido por el flotador del punto A al B (s)

El área mojada o sección transversal se determinó al multiplicar el ancho del cauce por la profundidad promedio de la sección, obtenida tras dividir la sección del cauce en varias subsecciones donde se midieron las diferentes profundidades. Una vez calculada el área de la sección transversal y la velocidad promedio del cauce, se determinó el caudal, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = A * V$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

A = área de la sección transversal (m²)

V = velocidad media de la sección (m/s)

- Medición utilizando método de aforo volumétrico

Debido a la presencia de estructuras de captación en los sectores Monte Redondo y Los Tablones, se aplicó el método de aforo volumétrico, que es aconsejable para caudales mínimos o pequeños, como riachuelos o canales. Consiste en medir el tiempo requerido para llenar un recipiente de un volumen conocido (Durán, Gaidos, y España, 2008) como se indica en la Figura 5.



Figuras 5. Medición de caudales con el método de aforo volumétrico
Fuente: Autora

El aforo volumétrico se realizó cinco veces, para determinar el tiempo y volumen promedios. La ecuación que se utilizó según Villón (2002) fue:

$$Q = V / T$$

Donde:

Q = caudal, en l/s; m³/s

V = volumen del recipiente, en l; m³

T = tiempo en que se llena el recipiente, en s

3.3.2. Balance hídrico climático (BHC)

Par el cálculo del balance hídrico climático, se utilizaron los datos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio. Los datos de las dos variables climáticas, fueron promediados para cada mes con la finalidad de obtener valores confiables. Con la aplicación de herramientas SIG, los datos resultantes, fueron transformados en archivos raster para la obtención del raster de evapotranspiración; con el raster de precipitación y la ETP se procedió a la definición del BHC. A continuación, se describen las metodologías para el cálculo de las variables que intervienen en el BHC:

- **Precipitación**

El raster de precipitación se obtuvo mediante la técnica de interpolación por el método geostatístico Spline en ArcGIS con una resolución espacial de 10 m, para lo cual se emplearon datos de las estaciones El Ángel, San Gabriel y Tufiño.

- **Temperatura**

El raster de temperatura se obtuvo mediante la técnica de interpolación por el método geostatístico Spline en ArcGIS con una resolución espacial de 10 m. para lo cual se emplearon datos de las estaciones El Ángel y San Gabriel aplicando el concepto de gradiente adiabático húmedo.

- **Evapotranspiración potencial mensual por el método de Thornthwaite**

El cálculo de la evapotranspiración potencial para la comuna, se realizó aplicando la metodología de Thornthwaite, la cual se basa en los datos de temperatura media mensual registrados por las estaciones meteorológicas disponibles: El Ángel y San Gabriel, utilizando la siguiente ecuación (Montaner, 1988):

$$ETP = 16 * (10 * \frac{tm}{l})^a$$

Donde,

ETP = Evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

tm = Temperatura media mensual

l = índice de calor anual (suma de los doce índices de calor mensuales)

$$l = (\frac{tm}{5})^{1,514}$$

a = parámetro calculado en función de l

$$a = 0,000000675 * l^3 - 0,0000771 * l^2 + 0,01792 * l + 0,49239$$

El cálculo de la evapotranspiración para el territorio de la comuna Pasto La Esperanza se obtuvo mediante la sobre-posición o álgebra de mapas de los archivos raster de elevación del terreno (DEM) y temperatura media mensual; usando la ecuación de cálculo de ETP en la Calculadora Raster de ArcGIS.

Además, para validar los datos calculados se empleó el software PETP V2.0.0. El software Evapotranspiración Potencial (PETP V2.0.0) de autoría de Gutiérrez (2016), calcula la evapotranspiración potencial empleando dieciocho métodos: Thornthwaite, Hargreaves, Christiansen, Penman Monteith, Penman modificado, Turc, Jensen - Haise, Stephens - Stewart, Linacre, Papadakis, Blaney y Criddle, Radiación, Serruto, Priestley – Taylor, Makkink, Valiantzas, García – López, y Evapotranspiración anual. Para el presente estudio, se seleccionó el método de Thornthwaite ya que se adaptó a las condiciones climáticas y biofísicas del área de estudio, y reportó valores con mayor ajuste comparados con los valores obtenidos en los otros métodos. Validar

El software PETP requirió de información político-administrativo, geográfica y altitudinal del área de estudio; los datos meteorológicos mensuales ingresados para calcular la ETP fueron: temperatura media, mínima y máxima en °C, número de horas con heliofanía, humedad relativa en porcentaje, velocidad del viento en m/s, precipitación media en mm, radiación solar en cal/cm²/día y humedad relativa mínima en %. Mediante la aplicación de algoritmos del software se calculó la ETP.

3.3.3. Zonas potenciales de recarga hídrica en la parte alta de la Comuna Pasto La Esperanza

Debido a que la extensión territorial de la comuna es muy extensa contando con 21.191,84 ha, se consideró dividir el área de estudio en parte alta y parte baja, empleando criterios altitudinales, distribución de la población, y ubicación de las zonas potenciales de recarga; en la parte alta se asienta la población de residencia de los líderes comunales, además debido a las condiciones geomorfológicas,

geológicas y climáticas, se localizan las principales fuentes de abastecimiento de agua de la ciudad de Tulcán y la comuna administrativa del territorio.

Para determinar la cantidad de infiltración o potencial de recarga e identificar las zonas de recarga hídrica, se aplicó el método de Recarga de Agua Subterránea (RAS) elaborado por Junker (2005). Esta técnica, que se deriva de los principios de Schosinsky y Losilla (2000), calcula el agua que se infiltra en el subsuelo, es decir, determina la recarga de agua subterránea para una zona, considerando aspectos biofísicos y climáticos para su aplicación.

Según González (2011), el método RAS es una técnica, que puede proporcionar el potencial de recarga acuífera en una zona, si se cuenta con la información necesaria. Matus (2007), menciona que la información requerida para aplicar el método, son las unidades de información: textura del suelo, cobertura vegetal, precipitación, evapotranspiración, pendiente del terreno y uso del suelo.

De acuerdo a Junker (2005), en esta metodología los componentes biofísicos que intervienen en el proceso de recarga (pendiente del terreno, textura del suelo, litología, cobertura vegetal, uso actual del suelo) y climáticos (precipitación y evapotranspiración) se agrupan en: tipo de suelo, uso del suelo, y pendiente, para reclasificar con los coeficientes que otorga el método, mismos que fueron adaptados a la realidad del área de estudio.

La metodología propuesta se basa en una ecuación, donde la recarga acuífera se obtiene de la multiplicación entre un coeficiente climático obtenido de la determinación del balance hídrico climático, y un coeficiente de infiltración (tipo de suelo, pendiente y uso del suelo). La ecuación que determina la cantidad de agua infiltrada en una zona es la siguiente (Junker, 2005):

$$R = BC * C$$

Donde:

R = Recarga acuífera

BC = Balance climático

C = Coeficiente de infiltración

Para el presente estudio fue necesario realizar una adaptación a la metodología de Junker (2005), ya que la profundidad del suelo tiene relación directa con la cantidad de agua que puede almacenarse y contribuir a la recarga de los acuíferos. La adaptación consistió en el uso de información cartográfica del Sistema Nacional de Información (2013) en relación a la clasificación taxonómica del suelo y la profundidad.

- Balance climático (BC)

El balance climático permite obtener la cantidad de agua disponible en el área de investigación. Se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$BC = P - ETP$$

En donde,

BC = Balance climático

P = Precipitación (mm)

ETP = Evapotranspiración potencial (mm)

Aplicando la fórmula anterior, de acuerdo a la metodología propuesta por Junker (2005), en el área de estudio no se requirió la medición de la evapotranspiración real. Para determinar el balance hídrico climático, se empleó la evapotranspiración potencial, la misma que Matus (2007) define como el agua que evapora el suelo y transpira la vegetación bajo la condición de que el suelo se encuentre en capacidad de campo (suelo saturado después de la ocurrencia de la lluvia).

- Coeficiente de infiltración (C)

Este coeficiente corresponde al grado de infiltración de una zona, y se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$C = kfc + kp + kv$$

En donde:

Kfc = Coeficiente del tipo de suelo

Kp = Coeficiente de pendiente

Kv = Coeficiente del uso del suelo

- Cálculo del coeficiente del tipo de suelo (kfc)

El coeficiente del tipo de suelo, describe la permeabilidad del subsuelo (rocas impermeables o suelos arcillosos, impiden la recarga; las gravas y fallas tectónicas, la facilitan). Los valores se detallan en el Cuadro 3.

Cuadros 3. Coeficientes tipos de suelo

Tipo de suelo	Kfc
Suelos arenosos, recientes, suelo de cauce de ríos, suelos no muy compactos, zonas con muchas fallas.	0,20
Suelos de combinación de limo y arcilla, litosol y regosol de valle, zonas con fallas tectónicas.	0,15
Suelos arcillosos, latosoles de altura, zonas urbanas, suelos o rocas compactas e impermeables.	0,10

Fuente: (Junker, 2005). Metodología RAS para determinar la recarga de agua subterránea.

- Cálculo del coeficiente de pendiente (kp)

La pendiente es un factor relevante en el proceso de recarga, pues se relaciona directamente con la escorrentía superficial, agua que no llega al acuífero por infiltración. En el Cuadro 4, se indican los coeficientes de pendiente planteados.

Cuadros 4. Coeficientes de pendientes

Pendiente	Kp
Muy plano	0,40
1 – 15%	0,15
15 – 30%	0,10
30 – 50%	0,07
50 – 70%	0,05
Mayor 70%	0,01

Fuente: Junker (2005)

- Cálculo de Coeficiente del uso del suelo (kv)

El uso del suelo es un elemento importante y variable en el cálculo de la recarga. El coeficiente se obtiene de calcular la evapotranspiración sobre los suelos con diferentes usos. Por lo cual, cuando el uso del suelo es inadecuado, la recarga hídrica puede bajar hasta en un 50%. Los usos del suelo que considera el método RAS se especifican en el Cuadro 5.

Cuadros 5. Coeficientes de usos del suelo

Cobertura y Uso del suelo Categorías Método RAS/MAGAP-MAE	kv
Bosque latifoliado / Bosque nativo	0,20
Plantaciones de bosques / Bosque plantado	0,15
Sistemas agroforestales / Mosaico agropecuario	0,10
Vegetación arbustiva baja / Vegetación arbustiva y páramo	0,15
Cuerpos de agua / Cuerpos de agua	0,00

Fuente: MAGAP y MAE (2015), Adaptación de Junker (2005)

Los valores de los coeficientes de los Cuadros 2, 3 y 4 que emplea el método RAS, son valores aproximados y adaptados a las condiciones topográficas, edáficas y de uso del suelo del área de estudio.

3.3.3.1. Generación del mapa de recarga hídrica

Las variables climáticas de precipitación y evapotranspiración se emplearon para determinar el modelo del balance climático simplificado, necesario en la metodología RAS (Junker, 2005), la misma que permitió generar dos superficies raster: una de precipitación y otra de evapotranspiración. Las variables biofísicas

empleadas fueron: pendiente del terreno, litología, cobertura vegetal, uso del suelo, y textura del suelo, para adaptar la información de Ecuador a la metodología RAS.

Para la elaboración del mapa de recarga hídrica en la comuna, mediante el método RAS, se generaron los mapas de precipitación y evapotranspiración a partir de los datos obtenidos de estaciones meteorológicas y pluviométricas cercanas al área de estudio. Los datos fueron interpolados con el modelo determinístico Spline, el mismo que se adaptó de mejor manera a los tipos de relieve del área de estudio para obtener las dos variables climáticas antes mencionadas, necesarias para la determinación del balance climático. El balance se calculó mediante un álgebra de mapas entre la diferencia de los raster de precipitación y evapotranspiración.

Las capas de pendientes, tipo de suelo y uso actual del suelo, se reclasificaron con los coeficientes de las tablas que propone el método. Las tres nuevas capas (kp, kfc y kv) se sumaron mediante la herramienta Raster Calculator para obtener el coeficiente de infiltración. Al multiplicar el balance climático con el coeficiente de infiltración, se obtuvieron dos mapas de recarga potencial, uno para el territorio comunal y zona de amortiguamiento y otro para la parte alta de la comuna que también incluye la zona de amortiguamiento.

Aplicando la metodología RAS se identificaron cuatro categorías de zonas potenciales de recarga: Muy Alta, Alta, Moderada, y Baja para todo el territorio comunal; sin embargo, se realizó un análisis de zonas potenciales de recarga en los sitios de aforo en la parte alta de la comuna para mediciones de caudales en épocas seca y lluviosa.

3.3.3.2. Correlación de datos de infiltración

Para las mediciones o pruebas de infiltración superficial (básica) realizadas en campo, se utilizó el infiltrómetro Turf- Tec, el mismo que consiste de un cilindro externo de 15 cm de longitud que se introduce en el suelo (Figura 6), para medir la

cantidad de agua que satura el horizonte A del suelo y posteriormente determinar la capacidad de campo de los suelos del área de estudio. Se realizó una prueba de infiltración, en cada zona potencial de recarga hídrica clasificadas en las categorías: muy alta, alta, moderada, y baja.



Figuras 6. Infiltrómetro Turf- Tec

El cálculo de la recarga hídrica potencial en las zonas identificadas en la parte alta de la comuna, se realizó mediante el método RAS, descrito anteriormente. El análisis de correlación se realizó entre los valores de infiltración obtenidos en campo en el mes de mayo de 2016, comparando con los valores puntuales extraídos del raster anual de recarga de aguas subterráneas en las zonas identificadas: Muy alta, Alta, Moderada y Baja. Para estandarizar las unidades de infiltración diaria medida en campo con los valores anuales del RAS, en mm/año, se realizaron transformaciones de datos mensuales y anuales, considerando el número de días de lluvias del mes de mayo (16 días) y el número de meses lluviosos del año 2016 (8 meses) (INAMHI, 2016).

Para la interpretación de datos de correlación se empleó la tabla de valores del coeficiente de correlación R (Cuadro 6) de Jiménez (2016), para tres grados de

libertad (n-1), al 0,5% de intervalo de confianza. Para la correlación lineal se consideraron cuatro tratamientos, en este caso categorías de recarga: zonas potenciales de recarga hídrica muy alta, alta, moderada y baja.

Cuadros 6. Coeficientes de correlación de Pearson

Coeficiente	Interpretación
$r = 1$	Correlación perfecta
$0.80 < r < 1$	Muy alta
$0.60 < r < 0.80$	Alta
$0.40 < r < 0.60$	Moderada
$0.20 < r < 0.40$	Baja
$0 < r < 0.20$	Muy Baja
$r = 0$	Nula

Fuente: Jiménez (2016)

3.3.4. Manejo de las zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento de agua

El diseño de acciones, lineamientos o estrategias dirigidas a la mitigación del deterioro ambiental y que promuevan sociedades responsables de los ambientes naturales, requiere como primer paso, el entendimiento de las necesidades, visiones, motivaciones y entendimientos de los grupos sociales que se encuentran inmersas en el área de estudio (Castillo y Peña-Modragón, 2015).

Al trabajar con personas, es primordial que éstas conozcan y comprendan el tema de la investigación. Igualmente, siempre se debe generar confianza en la gente, a través de un continuo trato de respeto y seriedad. Al mismo tiempo, es necesario explicar sobre la confidencialidad de la información que será brindada al investigador, y con qué fines será usada. Estos principios éticos deben manejarse desde el inicio de la investigación hasta la publicación y difusión de los resultados obtenidos (Watson, 2011).

La formulación de estrategias que permitan manejar adecuadamente las zonas de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento en la Comuna Pasto La Esperanza, se definieron en base a los datos obtenidos con el mapa de recarga hídrica potencial,

el mapa de problemas en la comuna, y principalmente del taller participativo con los pobladores de la parroquia de Tufiño, dirigentes comunales, y otros actores sociales que intervienen en el territorio comunal.

3.3.4.1. Talleres participativos

La realización de talleres es una de las principales formas de construir conocimiento de manera participativa (Castillo y Peña-Modragón, 2015), en la que se unifica el conocimiento técnico con el local o tradicional (Matus, 2007). Este método, al incluir a la población ubicada en el área de estudio, en el proceso de investigación, contribuye a elevar sus niveles de conciencia sobre su propia realidad, valorar su propio conocimiento y generar nueva información que sea útil para ellos, sus familias y comunidades.

Castillo y Peña-Modragón (2015) señalan las siguientes recomendaciones generales para la preparación y facilitación de talleres participativos:

1. Definir a quiénes se invitará a participar.
2. Coordinar el equipo de trabajo (presentador, facilitadores si se trabaja por equipos, y relatores).
3. Asegurar que se utilice lenguaje accesible para los participantes. Explicar con claridad cuáles son los propósitos del taller, qué actividades se realizarán y cuánto tiempo durará el taller.
4. Ofrecer agua y/o alimentación (dependiendo de la duración del taller).
5. Si se graba en audio o video, se debe obtener con anterioridad el permiso de los participantes (consentimiento informado).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se redactaron en función de los objetivos propuestos en la presente investigación, analizando la literatura citada, y discutiendo con otras investigaciones similares, con la finalidad de validar la información generada.

4.1. Área de estudio

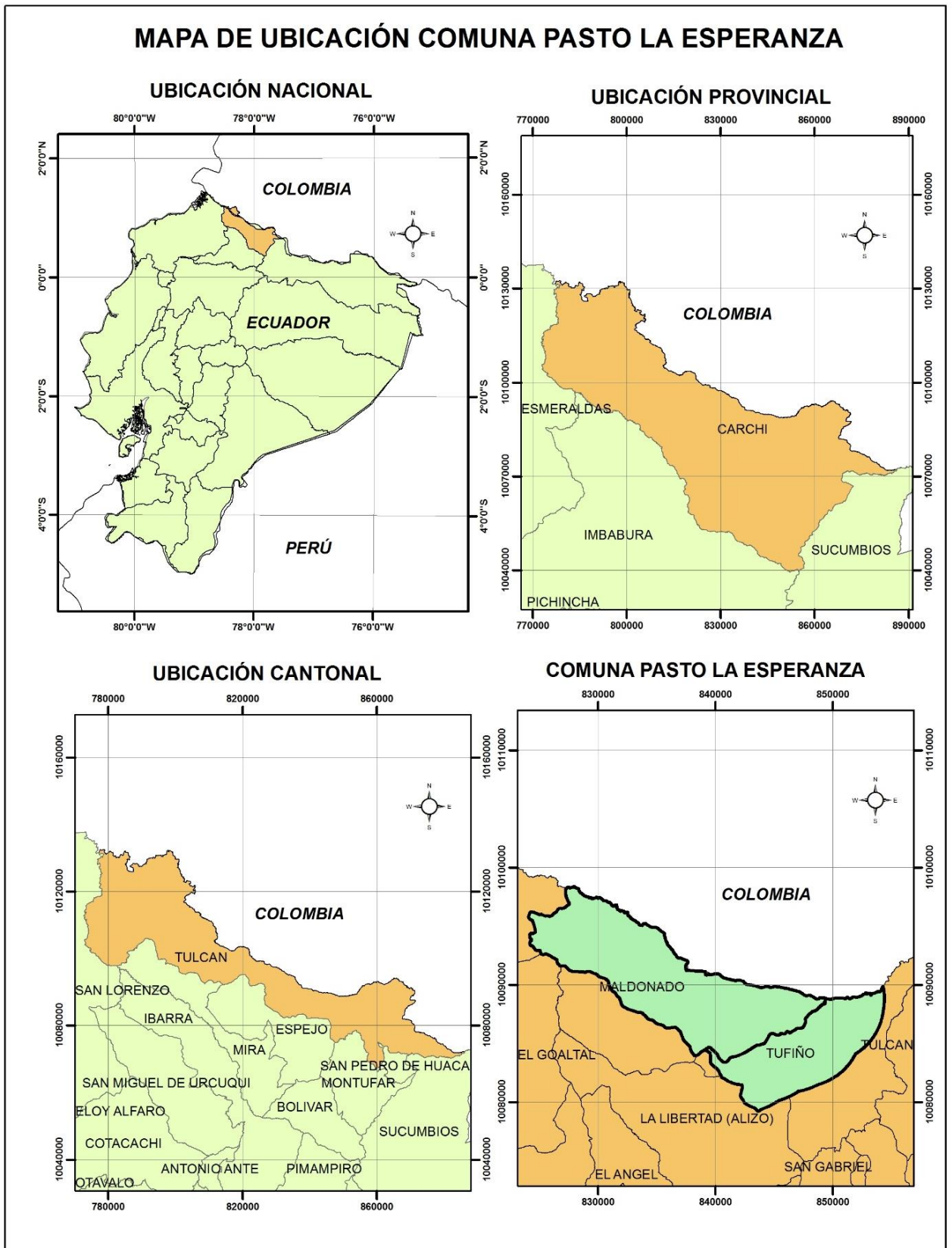
La Comuna Pasto La Esperanza se encuentra ubicada al Norte del Ecuador, entre las parroquias Tufiño y Maldonado, en el cantón Tulcán, provincia del Carchi (Figura 7). Posee una superficie de 14830,83 ha (sin zona de amortiguamiento), de las cuales 1590 ha (el 11,5 % del territorio) se encuentran dentro del ex Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) conformando la Reserva Ecológica El Ángel (ECOCIENCIA, 2008), actual Programa de Áreas Naturales del Ecuador (PANE); mientras que 8621,7 ha (60% del territorio) están en estado de conservación mediante el Programa Socio Bosque.

Según la información censal parroquial del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2010) la población de la parroquia Tufiño para ese año fue de 2339 habitantes, de los cuales 1168 son mujeres y 1671 son hombres. El 81,23% de la población de la parroquia Tufiño se autoidentifica como mestizos, el 15,82% como indígenas (Pastos), y menos del 3% como blancos, mulatos y negros.

En lo referente al nivel educativo, el 88,1% de los habitantes tiene acceso a la educación básica, el 43,1% a bachillerato, y un 14,3% a educación superior. Sin embargo, el 7,9 % de los comuneros presentan analfabetismo, mayoritariamente la población femenina. En cuanto al acceso al agua, la mayoría de la cabecera parroquial tiene acceso a agua potable, sin embargo, otras comunidades de Tufiño únicamente cuentan con sistemas de agua entubada; y en términos de productividad, predomina la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca.

En el territorio comunal Pasto La Esperanza, en base al mapa hidrológico y trabajo de campo, se identificó la presencia de numerables cursos de agua y ríos, debido a las características climáticas, geológicas y geomorfológicas. En el territorio comunal el recurso hídrico es abundante y es usado por los pobladores como fuentes de abastecimiento para consumo humano, actividades piscícolas, pecuarias y recreativas.

La zona de amortiguamiento delimitada incorpora drenajes, divisorias de agua y pisos altitudinales en las fuentes de agua y estructuras de captación que abastecen de agua a los pobladores de la ciudad de Tulcán, de la parroquia Tufiño y otros sectores aledaños, con una superficie de 6933,24 ha, obteniendo un área total de estudio de 21764,02 ha. Los sectores y poblados de referencia del área de estudio fueron: Lagunas Verdes, Cucurucho, Monte Redondo, Los Tablones, río Chiquito.

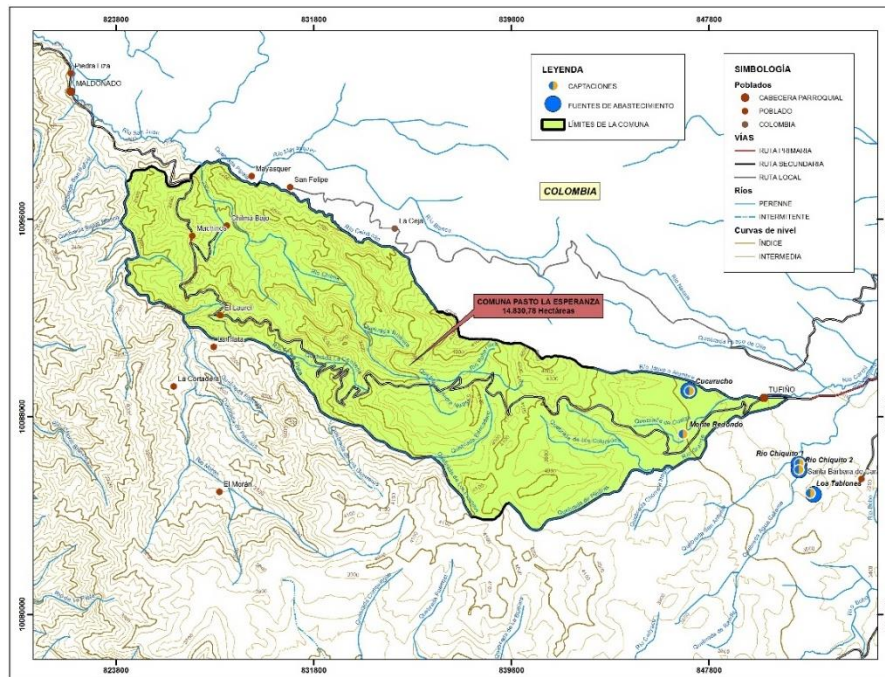


Figuras 7. Mapa de ubicación de la Comuna Pasto La Esperanza
Elaboración. Autora

La zona presenta un rango altitudinal que varía entre los 1640 msnm en Santa María hasta los 4720 msnm en el Volcán Chiles (Figura 8). Las partes altas corresponden al piso altitudinal del páramo seco, páramo de frailejones, páramo herbáceo, bosque siempreverde montano alto; mientras que, las zonas bajas presentan las formaciones vegetales de bosque siempreverde montano bajo y bosque de neblina montano (Sierra, 1999; ECOCIENCIA, 2008).

En cuanto a las condiciones climáticas INAMHI (2005) manifiesta que la parte baja correspondiente a Maldonado, presenta un clima subhúmedo con pequeño déficit de agua, mesotérmico templado frío, temperaturas de 14 a 18 °C y precipitaciones de 500 a 700 mm. Por el contrario, la parte alta correspondiente a Tufiño hasta el Volcán Chiles, presenta un clima húmedo con pequeño déficit de agua, mesotérmico semifrío, temperaturas de 8 a 10 °C y precipitaciones de 750 a 1250 mm.

La estructura social que funciona en la comuna es compleja, pues en ella se encuentran inmersos diferentes actores sociales que en total suman 65, de los cuales 27 son organizaciones internas, de ellas sobresalen el Cabildo de la comuna, la Junta de agua, el Banco comunitario y dos gobiernos parroquiales de Tufiño y Maldonado; 30 organizaciones externas entre ellas, el MAE, MIDUVI, MIES, Confederación de pueblos y nacionalidades Kiwas del Ecuador, Gobierno Provincial de Tulcán y el Carchi; 5 organizaciones no gubernamentales como EcoCiencia, Altrópico y Amigos de la Tierra. Además, se hallan tres actores privados con fines comerciales: La Industria Lechera, la Distribuidora de gas y los Intermediarios (ECOCIENCIA, 2008).



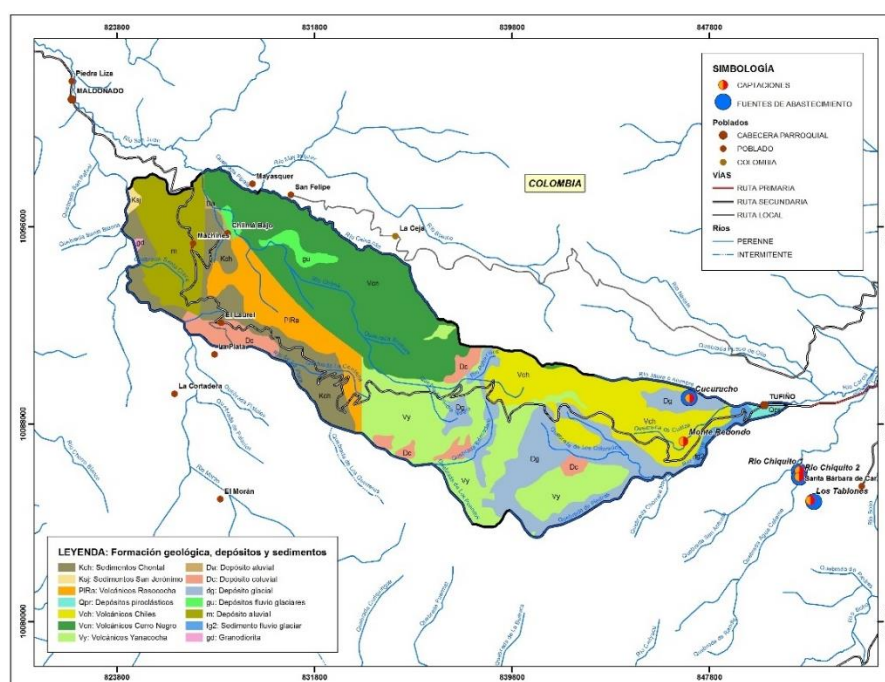
Figuras 8. Mapa base de la Comuna Pasto La Esperanza
Elaboración. Autora

4.2. Caracterización de los componentes biofísicos e hídricos

La caracterización biofísica abarca los componentes: físicos y bióticos del área de estudio, los que se detallan a continuación.

4.2.1. Litología

Las formaciones geológicas, referentes a la litología, presentes en el área de estudio según el Mapa Geológico a escala 1:50000 (Figura 9), corresponden a depósitos de flujos de lava, piroclastos, piroclastos andesíticos a riolíticos, granodiorita, diorita, pórfido, lavas basálticas, tobas y brechas, lutitas, cherts, areniscas, grauwacas y lahares.



Figuras 9. Mapa Litológico de la Comuna Pasto La Esperanza.
Elaboración. Autora

En la Tabla 1, se detalla cada formación litológica, formación geológica con su respectiva simbología, área y porcentaje de superficie del territorio en estudio.

Tabla 1. Formaciones geológicas

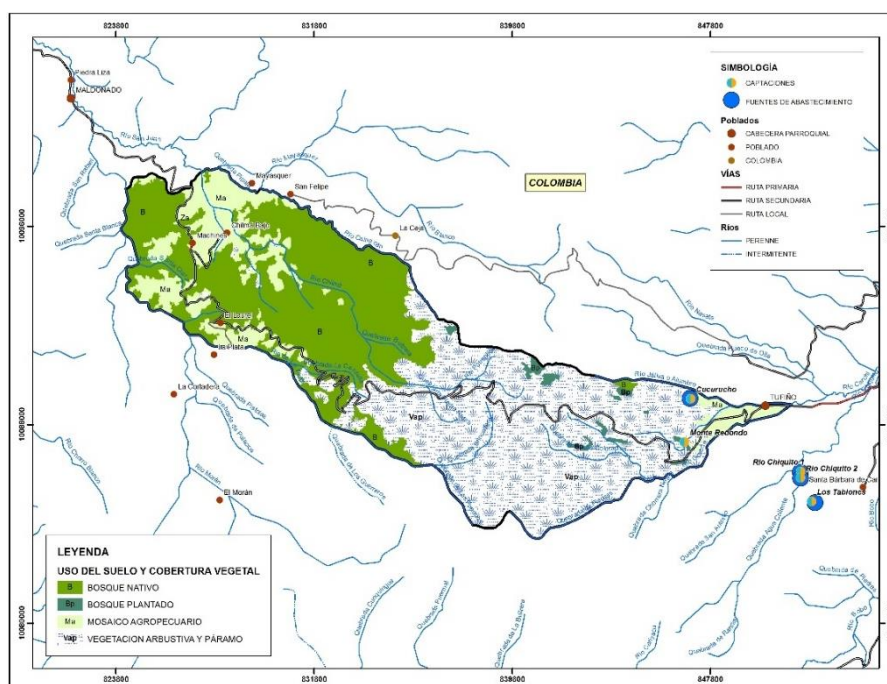
Litología	Formación geológica	Simbología	Área (ha)	Área (%)
Flujos de lava, piroclastos andesíticos a riolíticos	Volcánicos Chiles	Vch	1955,98	13,19
Granodiorita, diorita, pórfido	Volcánicos Rasococha	PIRa	1415,52	9,54
Lavas basálticas, tobas y brechas	Volcánicos Cerro Negro	Vcn	3246,07	21,89
	Volcánicos Yanacocha	Vy	2657,46	17,92
Lutitas, cherts, areniscas	Sedimentos Chontal	KCh	1076,22	7,26
	Sedimentos Chontal	Kch	2642,86	17,82
Lutitas, grauwas	Sedimentos Chontal	KCh	2642,86	17,82
	Sedimentos San Gerónimo	Ksj	42,63	0,29
Piroclastos, lahares, flujos de lava	Volcánicos Chiles	Vch	220,35	1,49
	Volcánicos Yanacocha	Vy	1376,75	9,28
No Aplica	No aplica	NA	196,79	1,33
TOTAL			14830,83	100%

Fuente: Sistema Nacional de Información (2013)
Elaboración. Autora

Autores como Faustino (2006), manifiestan que las rocas que permite mayor recarga hídrica son las areniscas y lahares; mientras que formaciones geológicas como los piroclastos pueden permitir la recarga, pero solo por fracturamiento. En el área de estudio la litología que predomina son los piroclastos, lahares y flujos de lava con un 41% de distribución tanto en la zona alta y parte de la baja; estableciendo que la parte superior de la comuna presenta formaciones geológicas que permiten la recarga hídrica.

4.2.2. Cobertura vegetal y uso del suelo

De acuerdo a la cartografía temática, a escala 1:50000 (Figura 10), en la comuna se identificaron cuatro tipos de cobertura vegetal y usos del suelo, cuyas áreas se especifican en la Tabla 2. La mayor parte de la categoría cobertura vegetal en el área de estudio, corresponde a la vegetación arbustiva y páramo y a los bosques latifoliados (bosque nativo), con un 47,93 y 37,02%, respectivamente.



Figuras 10. Mapa de cobertura vegetal y uso actual del suelo.
Elaboración. Autora

En la Tabla 2, se muestra con mayor detalle los diferentes coberturas vegetales y usos del suelo, con su respectiva simbología, área y porcentaje de superficie del territorio comunal.

Tabla 2. Usos del suelo y cobertura vegetal

Cobertura y uso Categorías Método RAS/ MAGAP-MAE	Simbología	Área (ha)	Área (%)
Bosque latifoliado / Bosque nativo	B	5490,66	37,02
Plantaciones de bosques / Bosque plantado	BP	94,42	0,64
Sistemas agroforestales / Mosaico agropecuario	TA	2137,55	14,41
Vegetación arbustiva baja / Vegetación arbustiva y páramo	VA	7108,20	47,93
TOTAL		14830,83	100

Elaboración. Autora

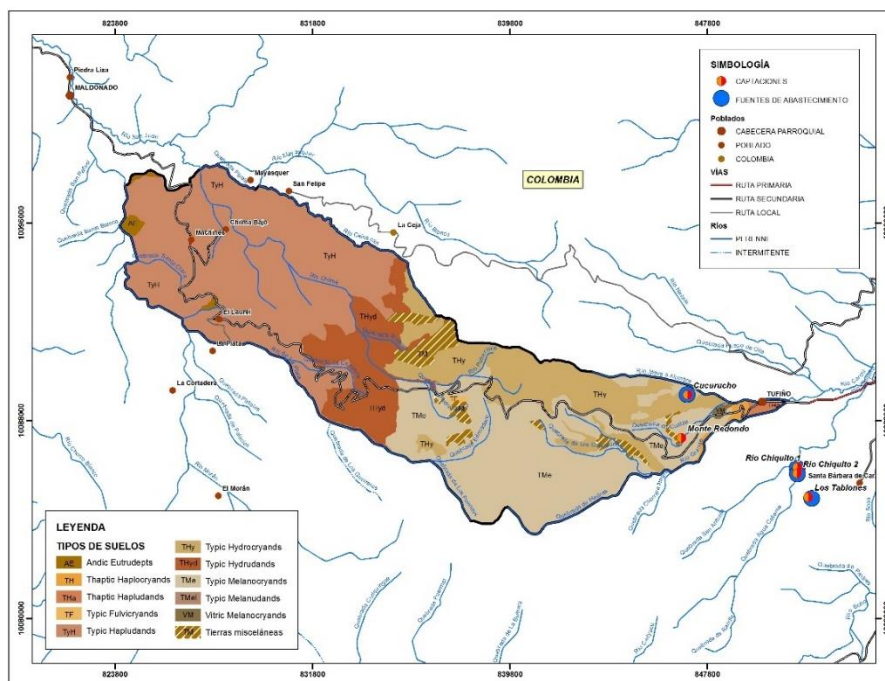
Según ECOCIENCIA (2008) y mediante las visitas de campo realizadas, se evidenció que la vegetación característica dentro de la comuna está conformada por frailejón silvestre (*Espeletia pycnophylla*), pajonal (*Calamagrostis effusa*), polylepis (*Polylepis incana*), achupalla (*Puya clava-herculis*), helechos de páramo (*Blechnum loxense*) y corta hierba (*Pentacalia andicola*).

Debido a los componentes históricos, sociales y económicos, en la comuna Pasto La Esperanza predominan la agricultura y la ganadería, hasta los 3500 msnm, (comentario del presidente de la comuna, 2016). Dentro de las tierras agropecuarias, los principales cultivos en la parte alta son de ciclo corto (papas y habas) y en la parte baja son de ciclo permanente (tomate de árbol, mora y caña de azúcar) y de ciclo corto (maíz) (ECOCIENCIA, 2008).

4.2.3. Tipos de Suelos

Los tipos de suelos identificados en el área de estudio son los subórdenes: Udans, Cryands, e Hydrandept. Sin embargo, el mayor porcentaje del área de estudio está cubierto por suelos del tipo Udans y Cryands que ocupan el 95,63%; localizados en la parte alta y baja de la comuna, cubriendo una superficie de 14227,03 ha. Estos suelos se caracterizan por ser de color negro, presentar una retención de

agua de 200% y por ubicarse en los páramos de Tufiño. En la Figura 11, se representan los tres tipos de suelo, antes mencionados.



Figuras 11. Mapa de tipos de suelos de la Comuna Pasto La Esperanza.
Elaboración. Autora

A continuación, se describen las características de cada uno de los tipos de suelo identificados, y en la Tabla 3, se detalla el orden, sub-orden, área y porcentaje que ocupan los suelos en el área de estudio.

Tabla 3. Tipos de suelos identificados en el área de estudio

Orden	Suborden	Sub-Grupo	Profundidad (cm)	Área (ha)	Área (%)
ANDISOL	Udans	Typic Hydrudands Thaptic Hapludands Typic Hapludands Typic Hydrudands Typic Melanudands	50-100	7794,51	52,56
	Cryands	Typic Hydrocryands Typic Melanocryands Thaptic Haplocryands Typic Fulvicryands Vitric Melanocryands	>100	6432,52	43,37
INCEPTISOL	Hydrandept	Andic Eutrudepts	>100	103,99	0,70
TIERRAS MISCELÁNEAS	Asociación de dos o más tipos de suelos	No aplica	No aplica	499,76	3,37
TOTAL				14830,78	100

Fuente: Sistema Nacional de Información (2013)

Elaboración. Autora

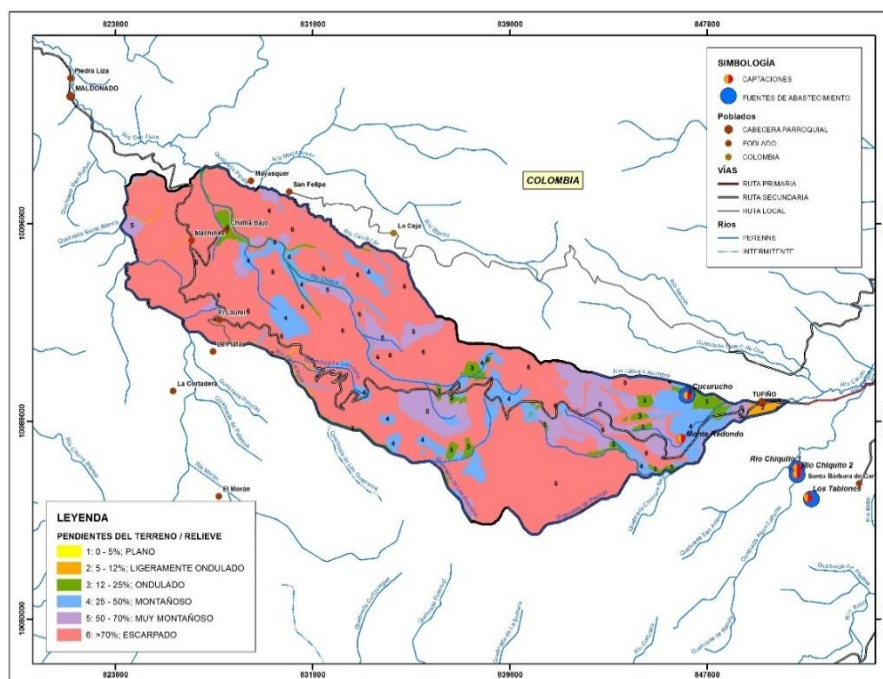
Suborden Udans: El Proyecto Generación de Geo-información para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional (2013) menciona que estos suelos son derivados de materiales piroclásticos y alofánicos. La textura varía de francos a arenosos y cuentan con gran capacidad de retención de agua (20-50%). Presentan una saturación de bases menor al 50% y poseen una densidad aparente menor a 0,85 g/cm³. Son suelos muy negros en régimen frígido y mésico; y negros en régimen térmico y con presencia de horizonte amarillo de gran espesor, en régimen hipertérmico. Se localizan en la Sierra Volcánica alta con altitudes de 3200 a 3600 msnm. De acuerdo al mapa de tipos de suelos (Figura 11) el 52,56% de los suelos de la comuna pertenecen al suborden Udans dentro del orden Andisol (Tabla 3).

Suborden Cryands: Se trata de Andisoles localizados a grandes altitudes, caracterizándose por poseer un régimen de temperatura cryico. Este tipo de suelo ocupa 6432,52 ha en la parte alta de la comuna, correspondiente al 43,37% de la superficie total.

Suborden Hydrandepht: Son suelos cuya textura varía de francos a arenosos, derivados de materiales piroclásticos y alofánicos. Posee un horizonte amarillo de gran espesor en régimen hipertérmico. Son suelos muy negros en régimen frígido y mésico; y negros en régimen térmico. Tienen una retención de agua a más del 200% y se encuentran en la Sierra volcánica alta, flanco oriental del Volcán Chiles, en el páramo de Tufiño. Se encuentran a una altitud de 3600 a 3800 msnm.

4.2.4. Pendientes del terreno

En el área de estudio se identificaron 6 categorías de pendientes, predominando en la parte alta de la comuna el relieve escarpado, seguido del relieve muy montañoso y montañoso. Por el contrario, en la parte baja se presentan los relieves escarpado, muy montañoso, montañoso y ondulado, mismos que se representan en la Figura 12.



Figuras 12. Mapa de pendientes del terreno

Elaboración. Autora

En la Tabla 4, se detalla de mejor manera cada tipo de elevación del terreno con su respectivo porcentaje de pendiente, superficie y ocupación en el terreno.

Tabla 4. Pendientes identificados en el área de estudio

Número	Relieve	Pendiente	Área (ha)	Área (%)
1	Muy plano	< 0 -5%	6,21	0,04
2	Plano y ligeramente ondulado	5 – 12%	171,13	1,15
3	Ondulado	12 – 25%	609,06	4,11
4	Montañoso	25 - 50%	1698,57	11,45
5	Muy montañoso	50 – 70%	1818,41	12,26
6	Escarpado	>70%	10527,44	70,98
	TOTAL		14830,83	100%

Fuente: Sistema Nacional de Información (2013)

Elaboración. Autora

Relieve Muy plano: El relieve muy plano tiene una pendiente menor al 5%, siendo el menos representativo en el área de estudio. La superficie que ocupa es de 6,21 ha que constituyen el 0,04% del total, encontrándose principalmente en la zona de amortiguamiento y en la parte alta de la comuna.

Relieve Plano y ligeramente ondulado: La pendiente que corresponde a este tipo de relieve va de 5 al 12% y se encuentra mayormente en las zonas altas y de amortiguamiento de la comuna, como en el caso anterior. Ocupa un área de 171,13 ha que representan el 1,15% del área de estudio.

Relieve Ondulado: Dentro de los límites comunales, este relieve se caracteriza por poseer pendientes de 12 – 25%. En el área de estudio, ocupa 609,06 ha que representan el 4,11% del territorio. Su distribución se ubica en la parte alta de la comuna, primordialmente. Sin embargo, también se encuentra presente en las zonas bajas, aunque en menor proporción.

Relieve Montañoso: El relieve montañoso es el tercero con mayor superficie ocupada dentro de la comuna con 1698,57 ha que simbolizan el 11,45% del total del área de estudio. Se presenta tanto en la parte alta como en la parte baja, con una pendiente de 25 a 50%.

Relieve Muy montañoso: Este tipo de relieve se distribuye tanto en la parte baja y alta de la comuna, con pendientes que varían desde 50 al 70%. Ocupa el 12,26% que representa 1818,41 ha de la superficie total.

Relieve Escarpado: El relieve escarpado se caracteriza por poseer pendientes muy fuertes que superan el 70%. Predomina en todo el territorio de la comuna, ocupando 10527,44 ha (70,98%).

4.3. Caracterización hídrica de la Comuna Pasto La Esperanza

La comuna Pasto La Esperanza posee importantes recursos hídricos representados por ríos, quebradas, y manantiales, siendo el río Chiquito y las quebradas Cuatza, Capote y Agua Caliente las más importantes por encontrarse en la parte alta y zona de amortiguamiento de la comuna, sitios donde se centra el estudio. Sin embargo, en la Tabla 5, se nombran todos los cuerpos de agua existentes en el territorio comunal y zona de amortiguamiento. El drenaje principal es el río La Plata que tiene una longitud de 26,86 km, seguido por el río Grande con 12,84 km. Por otro lado, los drenajes menores son la quebrada Buitrera con una longitud de 1,74 km, y la quebrada de Piedras con una longitud de 3,75 km.

Tabla 5. Ríos y quebradas de la comuna Pasto La Esperanza

Número	Nombre	Tipo	Longitud (km)
1	Río Chilmá	Perenne	11,53
2	Río Grande	Perenne	12,84
3	Río Chiquito	Perenne	11,75
4	Río Cainacán	Perenne	10,10
5	Río de la Plata	Perenne	26,85
6	Río Játiva o Alumbre	Perenne	9,89
7	Quebrada Cuatza	Perenne	5,81
8	Quebrada Capote	Perenne	4,37
9	Quebrada de Piedras	Perenne	3,75
10	Quebrada Buitrera	Perenne	1,74
11	Quebrada Negra	Perenne	3,97
12	Quebrada Brincadero	Perenne	4,6
13	Quebrada Agua Caliente	Perenne	8,27

Fuente: Sistema Nacional de Información (2013)

Elaboración. Autora

- **Estación meteorológica El Ángel**

La información que se encuentra en los anuarios acerca de la estación meteorológica El Ángel, se muestra en el Cuadro 7.

Cuadros 7. Características estación meteorológica El Ángel

Código	Nombre de la Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
M0102	El Ángel	Meteorológica	0° 37' 35" N	77° 56' 38" W	3000

Fuente: INAMHI, 2015

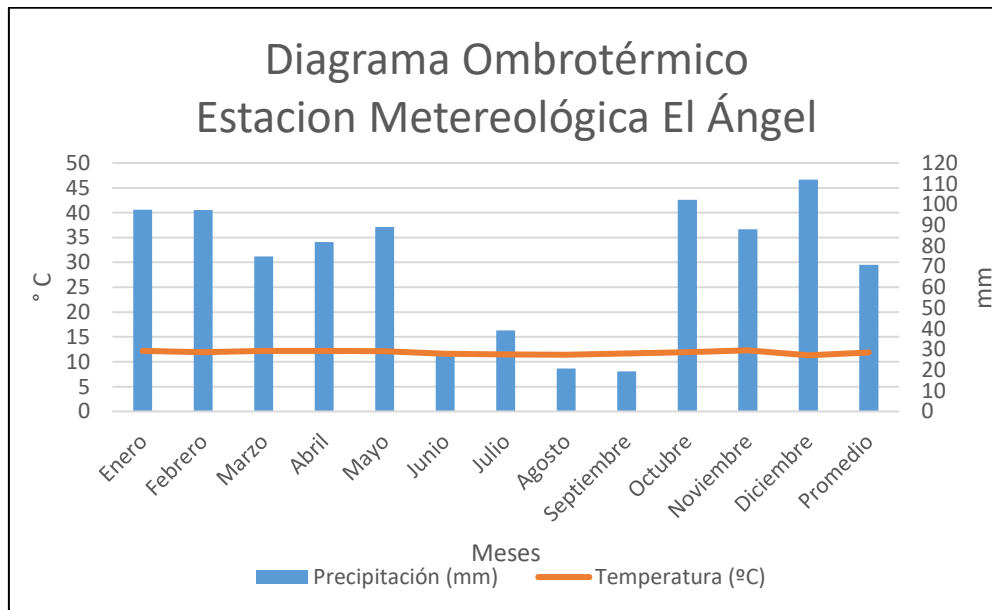
Los datos promedios mensuales de precipitación y temperatura, obtenidos por la estación El Ángel, en un período de 17 años (1990-2007), se muestran en el Cuadro 8.

Cuadros 8. Precipitación y temperatura medias anuales estación El Ángel

MES	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
Enero	97,4	12,2
Febrero	97,3	11,9
Marzo	74,9	12,2
Abril	81,8	12,2
Mayo	89,1	12,1
Junio	28,6	11,6
Julio	39,1	11,5
Agosto	20,7	11,4
Septiembre	19,4	11,7
Octubre	102,2	11,9
Noviembre	88,0	12,3
Diciembre	112,0	11,3
SUMATORIA	850,5	
PROMEDIO		11,9

Fuente: INAMHI (2015)

El diagrama ombrotérmico realizado con los datos de precipitación y temperaturas medias de la estación meteorológica El Ángel, se muestra en la Figura 13.



Figuras 13. Diagrama ombrotérmico de la estación El Ángel

Fuente: INAMHI, 2015

Elaboración. Autora

De acuerdo al diagrama ombrotérmico, construido con los datos de la estación El Ángel (Cuadro 8), en la comuna se presentan ocho meses húmedos, los correspondientes a enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre, dos meses semi-húmedos en junio y julio; y 2 meses secos en agosto y septiembre.

- **Estación meteorológica San Gabriel**

La información que se encuentra en los anuarios sobre de la estación meteorológica San Gabriel, se presentan a continuación:

Cuadros 9. Características estación meteorológica San Gabriel

Código	Nombre de la Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
M0103	San Gabriel	Meteorológica	0° 36' 15''	77° 49' 10''	2860

Fuente: INAMHI, 2015

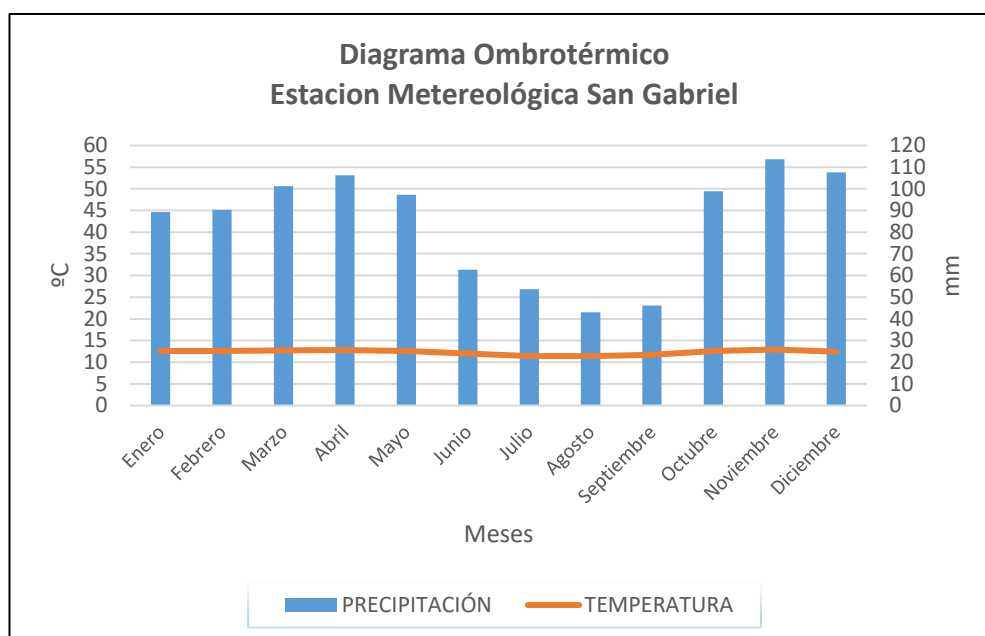
Los datos promedios mensuales de precipitación y temperatura, obtenidos por la estación San Gabriel durante el período 1986 a 2013 (26 años), se muestran en el Cuadro 10.

Cuadros 10. Precipitación y temperatura medias anuales estación San Gabriel

Meses	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
Enero	89,3	12,6
Febrero	90,3	12,6
Marzo	101,2	12,7
Abril	106,2	12,8
Mayo	97,2	12,6
Junio	62,7	12,0
Julio	53,6	11,4
Agosto	43,1	11,4
Septiembre	46,1	11,7
Octubre	98,9	12,6
Noviembre	113,7	12,9
Diciembre	107,6	12,4
SUMATORIA	1009,9	
PROMEDIO		12,3

Fuente: INAMHI (2015)

El diagrama ombrotérmico realizado con los datos de precipitación y temperaturas medias de la estación meteorológica San Gabriel, se muestra en la Figura 14.



Figuras 14. Diagrama ombrotérmico de la estación San Gabriel
Fuente: INAMHI, 2015
Elaborador. Autora

Acorde al diagrama ombrotérmico de la estación San Gabriel, la comuna Pasto La Esperanza, presenta cuatro meses semi-húmedos, los correspondientes a junio, julio, agosto y septiembre; y ocho meses húmedos en enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre, en los cuales existe una constante precipitación.

4.3.1. Caudales aforados en la parte alta de la comuna

En la Tabla 6 se observa que los caudales en la época lluviosa son medianamente altos en comparación con los caudales de la época seca; los valores de caudales en la época lluviosa se encuentran en el rango de 0,15 a 1650 l/s, mientras que los valores de caudales en época seca se encuentran en el rango 0,02 a 900 l/s. Los caudales aforados en los diferentes sitios se ubican en la zona potencial de recarga clasificada como BAJA, debido a que dichos sitios se localizan en la parte alta de

la comuna, donde el escurrimiento superficial es mayor a la infiltración por efecto de la pendiente del terreno.

Tabla 6. Sitios de aforo en la parte alta de la comuna

Sitios de aforo	Caudal (m ³ /s)		Caudal (l/s)		Potencial de recarga
	E. lluviosa	E. seca	E. lluviosa	E. seca	
Cucurucho, en la quebrada Capote (antes de la captación)	0,332 m ³ /s	0,051 m ³ /s	332,03 l/s	51,15 l/s	BAJA
Cucurucho, luego de la estructura de captación	0,938 m ³ /s	0,305 m ³ /s	938,46 l/s	305,29 l/s	BAJA
Monte Redondo (en el canal y tubería de la captación)	0,005 m ³ /s	0,003 m ³ /s	5,19 l/s	3,52 l/s	BAJA
Rio Chiquito (en el río antes de la captación 1)	0,396 m ³ /s	0,021 m ³ /s	396,42 l/s	21,57 l/s	BAJA
Rio Chiquito (en el canal luego de la captación 1)	0,095 m ³ /s	0,042 m ³ /s	95,67 l/s	42,04 l/s	BAJA
Rio Chiquito (en el río antes de la captación 2)	0,533 m ³ /s	0,419 m ³ /s	533,15 l/s	419,72 l/s	BAJA
Rio Chiquito (en el tanque luego de la captación 2)	1,630 m ³ /s	0,885 m ³ /s	1630,91 l/s	885,04 l/s	BAJA
Los Tablones (en las 2 quebradas antes del tanque de captación arriba)	0,0001 m ³ /s	0,00002 m ³ /s	0,15 l/s	0,02 l/s	BAJA
Los Tablones (en el tanque de captación abajo)	0,006 m ³ /s	0,002 m ³ /s	6,90 l/s	2,36 l/s	BAJA

Elaboración: Autora

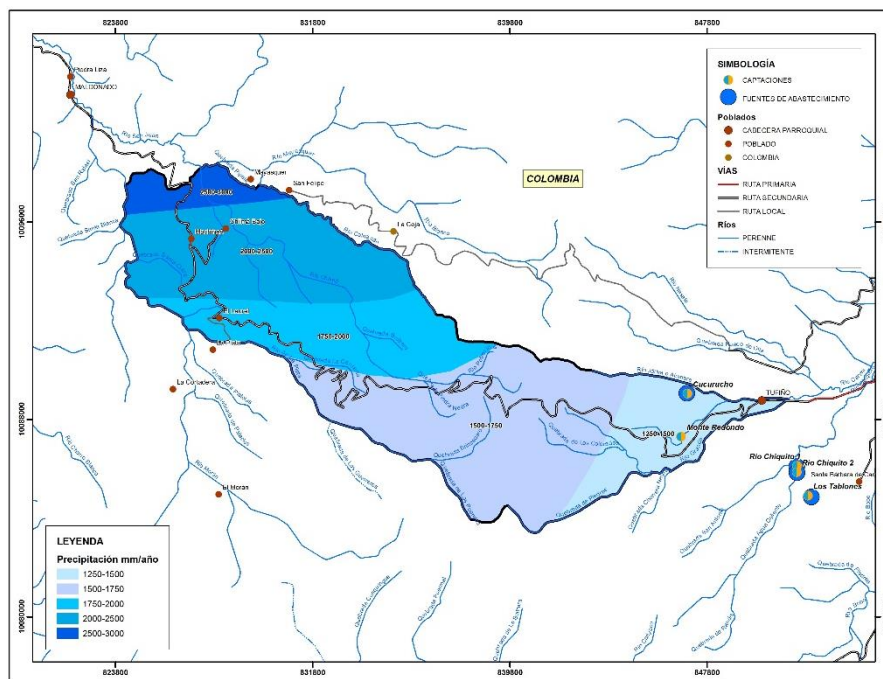
4.3.2. Balance hídrico climático

Los resultados obtenidos para el balance hídrico climático fueron los raster mensuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración, con resolución espacial de 10 m.

4.3.1.1 Precipitación

Los meses con valores altos de precipitación fueron octubre (387,99 mm), diciembre (384,03 mm), y noviembre (330,28 mm) que corresponde a la época lluviosa, mientras que los meses con valores bajos de precipitación fueron agosto (35,32 mm), julio (41,95 mm), y junio (52,70 mm) que corresponde a la época

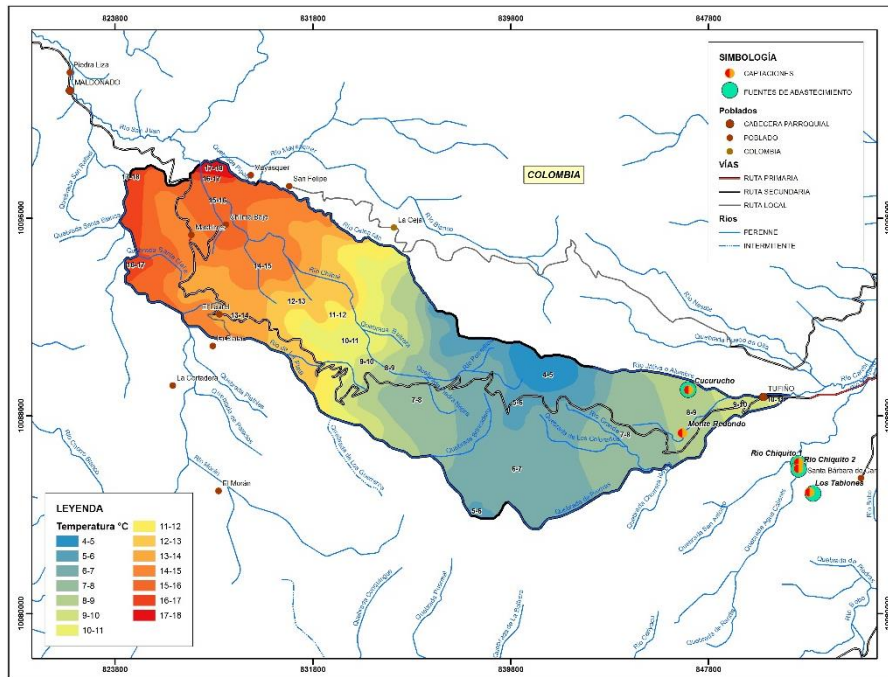
seca. Los rangos de precipitación para la comuna se indican en la Figura 15, donde se obtuvo que el valor anual más bajo es 1000 mm/año y el valor más alto es de 3000 mm/año.



Figuras 15. Mapa de precipitación anual en la Comuna Pasto La Esperanza
Elaboración: Autora

4.3.1.2 Temperatura

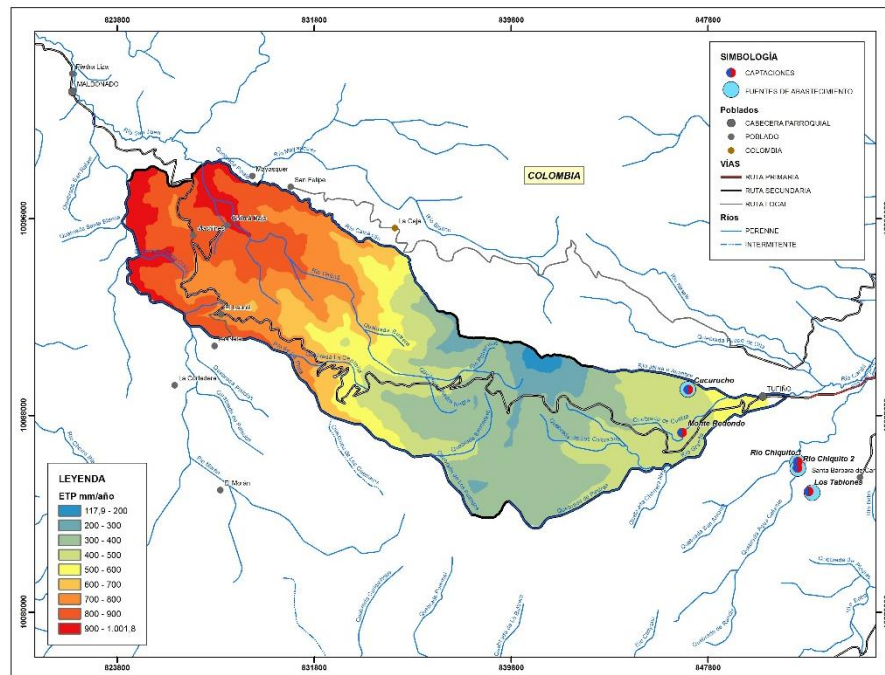
Los meses con las temperaturas más altas fueron julio a octubre, que corresponde a la época lluviosa, mientras que los meses con valores bajos de temperatura fueron diciembre a marzo, que corresponde a la época seca. Según la Figura 16, se indican los nueve rangos de temperaturas identificados para la comuna Pasto La Esperanza, siendo el valor de temperatura más alto 20,5 °C y el más bajo 1,5°C.



Figuras 16. Mapa de temperaturas medias anuales en la Comuna Pasto La Esperanza
Elaboración: Autora

4.3.1.3 Evapotranspiración

Los valores medios anuales de evapotranspiración potencial se encuentran en el rango de 117,86 a 1001,81 mm (Figura 17). Los valores más altos se encuentran en la parte baja del territorio comunal (sectores de Chilmá Bajo) registrándose 1000 mm/año, donde la temperatura media anual también registra los valores más altos; mientras que los valores más bajos se localizan en la parte alta del territorio (sectores Cucurucho, Monte Redondo) registrándose 115 mm/año, donde la temperatura media anual alcanza valores bajos.



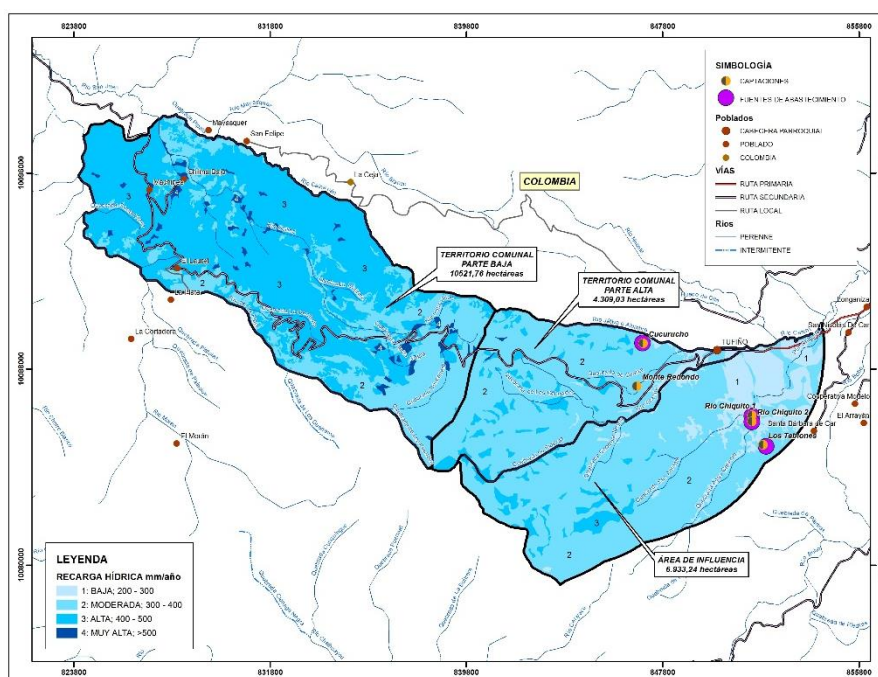
Figuras 17. Mapa de evapotranspiración media anual en la Comuna Pasto La Esperanza
Elaboración: Autora

4.4. Identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica

Para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica se elaboraron dos mapas en los que se puede observar la distribución geográfica y extensión en el territorio comunal y zona de influencia. El primer mapa describe las zonas potenciales de recarga hídrica en el territorio de la comuna Pasto La Esperanza, que se extiende desde la parroquia Tufiño (parte alta) hasta la parroquia Maldonado (parte baja); y en el segundo mapa se describen las zonas potenciales de recarga hídrica de la parte alta de la comuna Pasto La Esperanza.

4.4.1. Comuna Pasto La Esperanza

En base a la técnica de álgebra de mapas se aplicó la metodología RAS, obteniendo el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica de la comuna Pasto La Esperanza clasificada en cuatro categorías de recarga: Muy Alta, Alta, Moderada y Baja, como se observa en la Figura 18.



Figuras 18. Mapa zonas potenciales de recarga hídrica de la comuna Pasto La Esperanza.
Elaboración: Autora

En el mapa de zonas potenciales de recarga de la comuna (Figura 18), se puede observar que las zonas con mayor potencial de recarga se encuentran dispersas en la parte baja de la comuna específicamente en los sectores Machines, Chilmá Bajo y parte del río Chilmá, en un rango altitudinal de 2200 a 3400 msnm, debido a que según el balance hídrico la parte baja dispone de mayor cantidad de precipitación neta. El valor del potencial de recarga resultó ser mayor a los 500 mm/año. El tipo de suelo en estas zonas corresponde al suborden Udans que se caracteriza por presentar una textura que varía de franco a arenoso con una retención de agua a más del 200%, y una profundidad mayor a 1 m. La litología corresponde a la formación geológica lutitas y grauwas con presencia de tipo de rocas volcánicas. La cobertura vegetal y uso del suelo en estas zonas, corresponde al bosque latifoliado (bosque nativo) y a las plantaciones de bosque.

En la Tabla 7, se presenta la distribución de superficies de cada zona potencial de recarga, en porcentajes, siendo las zonas potenciales de recarga alta y moderada las más predominantes con 55,46% y 36,52%, respectivamente, y se encuentran principalmente en la parte media y alta de la comuna Pasto La Esperanza y en la

zona de influencia, y en menor grado en el extremo inferior de la comuna (parte baja). Las zonas con baja capacidad de recarga se ubican en la parte alta de la comuna, en el sector de Tufiño, con un porcentaje de área de 6,7%; dejando solo un 1,32% para las zonas de muy alta capacidad de recarga hídrica, distribuidas en la parte media y baja del territorio comunal, en la zona de Chilmá Bajo y los afluentes finales del río Chilmá.

Tabla 7. Superficies de las zonas potenciales de recarga hídrica de la comuna Pasto La Esperanza

Zonas de recarga	Recarga potencial (mm/año)	Área (ha)	Área (%)
MUY ALTA	> 500	288,07	1,32
ALTA	400 – 500	7948,37	36,52
MODERADA	300 – 400	12173,62	55,46
BAJA	200 – 600	1458,17	6,70
TOTAL		21764,02	100%

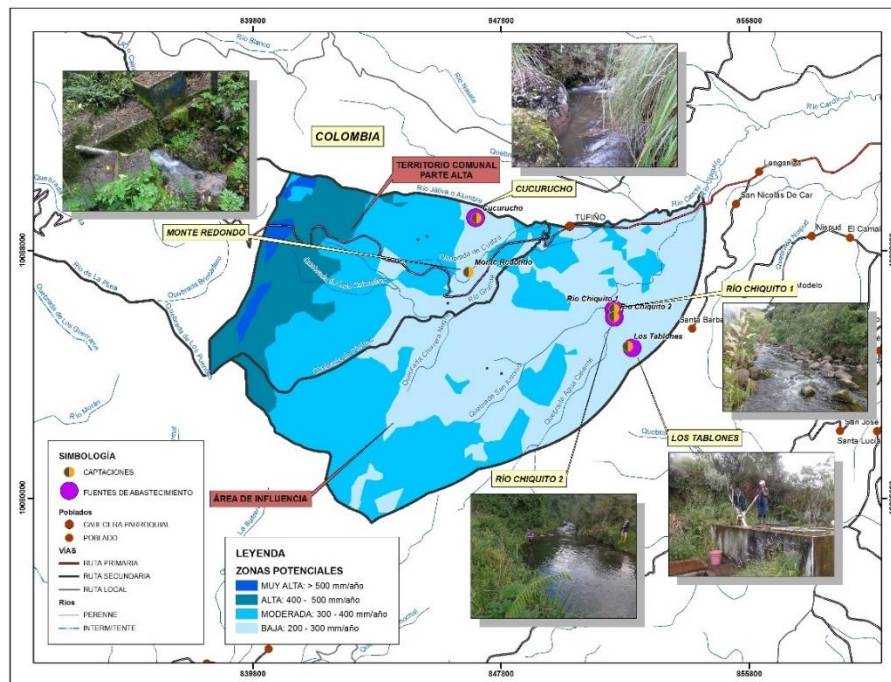
Elaboración: Autora

A nivel comunal, se encontró que las zonas potenciales de recarga con categoría muy alta se ubican en la zona baja de la comuna, en la parroquia Maldonado, lo cual coincide con lo manifestado por INAB (2003), que la infiltración es mayor cuando en las zonas de recarga además de las precipitaciones hay ocurrencia de escurrimiento superficial, principalmente cuando dichas aguas provienen de áreas montañosas, como es el caso de las fuentes de agua ubicadas en el páramo de Tufiño.

4.4.2. Parte alta de la comuna Pasto La Esperanza

En el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica de la parte alta de la comuna (Figura 19), se observa que las áreas que presentan la mayor recarga potencial con la categoría muy alta, se localizan en el sector conocido como Lagunas Verdes en un rango altitudinal de 3900 a 4000 msnm, con una superficie de 175,15 ha. Presenta un valor de recarga potencial de 508,15 mm/año; y un tipo de suelo correspondiente al suborden Cryands y al orden Andisol caracterizado por tener una textura que varía de franco a arenoso con una retención de agua a más del

200%, y una profundidad mayor a 1 m. Los tipos de roca pertenecen a las formaciones geológicas son: piroclastos, lahares, flujos de lavas y piroclastos andesíticos a riolíticos. En lo referente a cobertura vegetal y uso del suelo, estas zonas corresponden vegetación arbustiva baja o páramo.



Figuras 19. Mapa zonas potenciales de recarga hídrica de la parte alta de la comuna
Elaboración. Autora

Las zonas categorizadas con una recarga potencial alta (408,45 mm/año), se encuentran en las partes altas de la Quebrada Agua Blanca y río Grande, a una altitud de 3800 a 4080 msnm, en una superficie de 1365,45 ha. Presentan un tipo de suelo perteneciente al suborden Cryands caracterizado por tener una textura que varía de franco a arenoso con una retención de agua a más del 200%, y una profundidad mayor a 1 m. La litología corresponde a las mismas formaciones geológicas de la categoría muy alta: piroclastos, lahares, flujos de lavas y piroclastos andesíticos a riolíticos. La cobertura vegetal y uso del suelo existente en estas zonas corresponde a la vegetación arbustiva baja o páramo y a las plantaciones de bosques (pino).

Las zonas con categoría moderada, presentan una recarga potencial de 307,24 mm/año, se encuentran en la parte media de las quebradas: Capote, Cuatza, y Santa Rosa, en un rango altitudinal de 3600 a 3700 msnm, sin embargo, en la parte sur de la comuna la altitud alcanza los 3800 msnm; además, ocupan una superficie de 4658,18 ha. Los tipos de suelo en estas zonas corresponden al suborden Cryands a los caracterizado por tener una textura que varía de franco a arenoso con una retención de agua a más del 200%, y una profundidad mayor a 1 m; y a las tierras misceláneas, que se caracterizan por ser suelos poco profundos y erosionados, de texturas arenosas, arcillo-arenosas y arcillosas. Su coloración varía de rojiza a pardo amarillenta. La litología corresponde a las formaciones geológicas: piroclastos, lahares, flujos de lavas y piroclastos andesíticos a riolíticos. La cobertura vegetal y uso del suelo existente en estas zonas corresponde a la vegetación arbustiva baja o páramo, sistemas agroforestales.

Las zonas potenciales de recarga con categoría baja (250,43 mm) se encuentran en los sectores de Monte Redondo, Cucurucho, Río Chiquito y Los Tablones, con una superficie de 5002,18 ha. Presentan suelos de los tipos Hapludands y Melanudands que se caracterizan por tener una textura franco arcillosa, son moderadamente profundos, bien drenados, el pH alcanza valores de 6, y la saturación de bases (SB) tiene valores de 45%. La litología corresponde a las mismas formaciones geológicas de la categoría muy alta, alta y moderada: piroclastos, lahares, flujos de lavas y piroclastos andesíticos a riolíticos. En cuanto a cobertura vegetal y uso del suelo, estas zonas presentan vegetación arbustiva baja o páramo, sistemas agroforestales, y remanentes de bosque latifoliado (bosque nativo).

En la Tabla 8 se presenta la distribución de superficies de cada zona potencial de recarga, en porcentajes, siendo las zonas potenciales de recarga baja y moderada las más predominantes con 44,66% y 41,59%, respectivamente, y se encuentran principalmente en la parte media y alta de la comuna Pasto La Esperanza y en la zona de influencia, y en menor grado en el extremo inferior de la comuna (parte baja). las zonas de alta y muy alta capacidad de recarga hídrica, distribuidas en la

parte baja del territorio comunal, en la zona de Chilmá Bajo y los afluentes finales del río Chilmá, cubren un 12,19% y un 1,56% de superficie, respectivamente,

Tabla 8. Superficies de las zonas potenciales de recarga hídrica de la parte alta de la comuna Pasto La Esperanza

Zonas de recarga	Recarga potencial (mm/año)	Superficie (ha)	Superficie (%)
MUY ALTA	> 500	175,15	1,56
ALTA	400 – 500	1365,45	12,19
MODERADA	300 – 400	4658,18	41,59
BAJA	200 – 300	5002,18	44,66
TOTAL		11200,96	100

Elaboración. Autora

En el Cuadro 11, se muestra la incidencia de los factores: tipos de suelo, textura del suelo, profundidad del suelo, y cobertura vegetal y uso del suelo; donde se determina que la profundidad del suelo, la cobertura vegetal y el uso del suelo son los factores con mayor influencia en la potencialidad de cada una de las zonas de recarga. En la zona potencial de recarga Muy Alta, la textura del suelo y la cobertura vegetal aumentan la recarga; mientras que, en la zona potencial de recarga Baja, el tipo de suelo, la textura del suelo, la cobertura vegetal intervenida y el uso del suelo, disminuyen la infiltración de agua y, por consiguiente, la posibilidad de recarga.

Cuadros 11. Factores que inciden en la recarga hídrica en las zonas potenciales identificadas

Zonas potenciales de recarga	Tipos de suelo	Textura del suelo	Profundidad del suelo (cm)	Cobertura vegetal y uso del suelo
Muy alta	CRYANDS	Franco arenoso, Franco limoso	Profundo (>100)	Vegetación arbustiva y páramo
Alta	CRYANDS,	Franco arenoso, Franco limoso, Franco arcilloso, Arcillo arenoso, Arcillo limoso	Profundo (>100)	Bosque nativo, vegetación arbustiva y páramo, bosque plantado
Moderada	CRYANDS, UDANS TIERRAS MISCELÁNEAS	Franco arenoso, Franco limoso, Franco arcilloso, Arcillo arenoso, Arcillo limoso	-Moderadamente profundo (50-100) -Profundo (>100)	Bosque nativo, vegetación arbustiva y páramo, bosque plantado, mosaico agropecuario,
Baja	CRYANDS completar	Franco arenoso, Franco limoso, Franco arcilloso, Arcillo arenoso, Arcillo limoso	-Moderadamente profundo (50-100) -Profundo (>100)	Bosque plantado, mosaico agropecuario, vegetación arbustiva y páramo

Fuente: (SNI, 2013)

Elaboración. Autora

En la Tabla 9, se muestra la localización geográfica de los sitios de pruebas de infiltración, calibrando el equipo empleado en un tiempo de 15 minutos; los valores de infiltración medidos se encuentran en el rango de 7 a 11 mm, los mismos que corresponden a la infiltración en el horizonte A del suelo, dando como resultado la cantidad de agua que satura el suelo y no la infiltración hacia las capas más profundas, es decir estos valores indican la cantidad de agua necesaria para que el suelo se encuentre en capacidad de campo inmediatamente después de una lluvia.

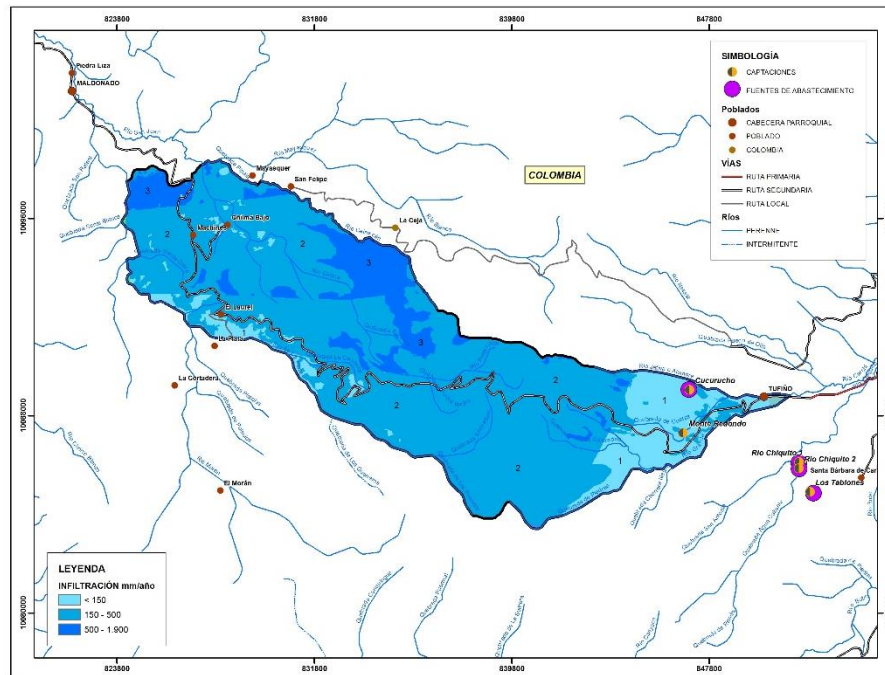
Las pruebas de infiltración se realizaron en las zonas potenciales de recarga Muy alta, Alta, Moderada y Baja, las recargas potenciales muy altas se ubican en el sector de Lagunas Verdes; las recargas potenciales altas se localizan en las partes altas de la Quebrada Agua Blanca y río Grande; las recargas potenciales moderadas en la parte media de las quebradas: Capote, Cuatza, y Santa Rosa; y las recargas potenciales bajas en los sectores Monte Redondo, Cucurucho, Río Chiquito y Los Tablones.

Tabla 9. Sitios de pruebas de infiltración en la parte alta de la comuna

Sitios de pruebas de infiltración	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Altitud (msnm)	Tiempo de infiltración (min)	Valor de infiltración (mm)	Potencial de recarga
Divisoria de aguas de la microcuenca	173778	10088514	3985	15	7	MUY ALTA
Parte alta de la comuna	174843	10088202	3922	15	7	ALTA
Parte alta de la comuna	178158	10087254	3692	15	11	MODERADA
Sector Cucurucho	178972	10089055	3479	15	11	BAJA

Elaboración. Autora

De acuerdo al mapa de infiltración (Figura 20), en el territorio comunal se identificaron 3 rangos de valores: menos de 150, de 150 a 500 y de 500 a 1000 mm/año. Los valores más bajos de infiltración se localizan en los sectores de Tufiño, Cucurucho y Monte Redondo, mientras que los valores más altos se ubican en la vertiente derecha del río Chilmá. Los valores moderados de infiltración se distribuyen en gran parte del territorio, tanto en la parte baja como en la parte alta del mismo.



Figuras 20. Mapa de infiltración (mm/año) media anual del territorio comunal Pasto La Esperanza
Elaboración. Autora

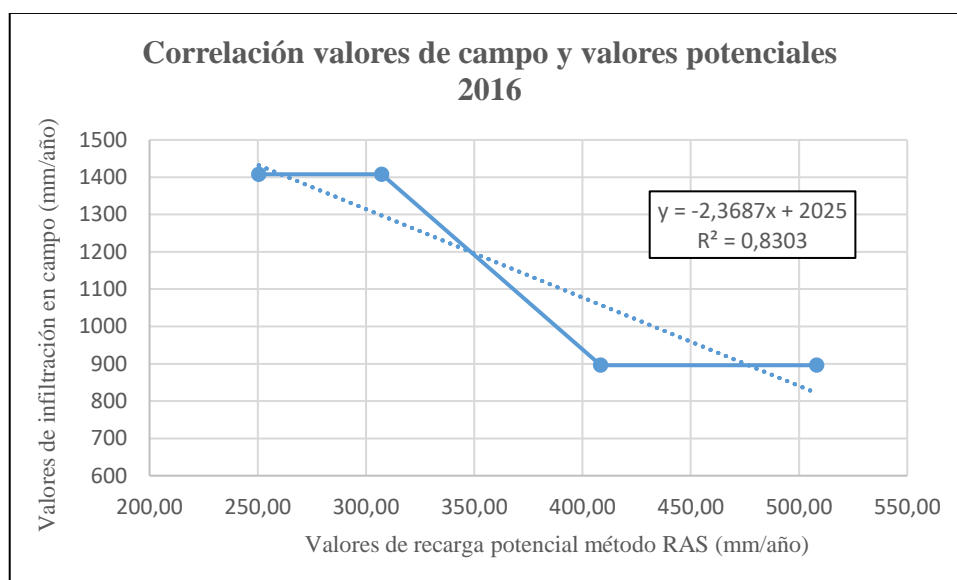
En la Tabla 10 se indican los valores puntuales diarios de infiltración obtenidos en campo en cada una de las zonas potenciales de recarga identificadas (Muy alta, Alta, Moderada y Baja), también se muestran los valores anuales de recarga potencial calculados con el método RAS. Los valores de infiltración medida en campo expresados en mm/año fueron de 896 para las zonas potenciales de recarga muy alta y alta, mientras que en las zonas potenciales de recarga moderada y baja los valores de infiltración fueron de 1408.

Tabla 10. Infiltración obtenida en campo y valores de infiltración estimados en zonas de recarga

Zonas potenciales de recarga	Recarga potencial (mm/año)	Infiltración medida en campo (mm/día)	Infiltración medida en campo (mm/mes)	Infiltración medida en campo (mm/año)
MUY ALTA	508,15	7	112	896
ALTA	408,45	7	112	896
MODERADA	307,24	11	176	1408
BAJA	250,43	11	176	1408

Fuente: Autora

En la Figura 21, se presenta el gráfico de correlación lineal de la variable independiente (infiltración medida en campo) con la variable dependiente (recarga hídrica potencial anual estimada con el método RAS); la línea de tendencia tiene un valor mínimo estimado en el eje X de 510 mm/año y un valor máximo estimado de 1430 mm/año. La curva de mejor ajuste para la correlación y regresión entre las dos variables fue la función lineal, obteniendo un valor de $R^2 = 0,8303$; al ser comparado el valor de R^2 calculado con el valor de R^2 tabular, se obtuvo un coeficiente de determinación de 83,03% que equivale a un valor estadístico significativo (alto: $0.60 < r < 0.80$), es decir, la infiltración de agua en el suelo se correlaciona con la recarga potencial anual del modelo RAS.



Figuras 21. Correlación de valores de infiltración obtenidos en campo con valores de recarga hídrica potencial.

4.4.3. Identificación de zonas de recarga, fuentes de abastecimiento, caudales medidos y poblados beneficiarios

En la Tabla 13, se presenta un resumen sobre las zonas de recarga hídrica, con las fuentes de abastecimiento, los caudales medidos y los poblados que se abastecen del recurso hídrico.

Tabla 11. Zonas de recarga, fuentes de abastecimiento, caudales medidos y poblados beneficiarios, identificadas en la parte alta del territorio comunal

Zonas de recarga hídrica	Fuentes de abastecimiento de agua	Caudales medidos		Poblados beneficiarios
		Época lluviosa (l/s)	Época seca (l/s)	
Baja	Quebrada Capote	332,03	51,15	Tulcán
Baja	Captación Quebrada Capote	938,46	305,29	Tulcán
Baja	Captación vertiente Cuatza	5,19	3,52	Tufiño, Panecillo
Baja	Río Chiquito	396,42	21,57	Tulcán
Baja	Captación Río Chiquito	95,67	42,04	Tulcán
Baja	Quebrada sin nombre	533,15	419,72	Tulcán
Baja	Captación Quebrada sin nombre	1630,91	885,04	Tulcán
Baja	Quebrada menor Los Tablones	0,15	0,02	Tufiño, Barrio 30 de Mayo
Baja	Captación Quebrada menor Los Tablones	6,90	2,36	Tufiño, Barrio 30 de Mayo

Elaboración. Autora

Matus (2007), elaboró una propuesta metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, en la subcuenca del río Jucuapa en Nicaragua. El estudio se basa en la determinación de las zonas más aptas para la recarga hídrica en función del análisis de cinco elementos (pendiente y microrelieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo) que tienen relación directa en la determinación de zonas con altas o bajas posibilidades de recarga. Las zonas identificadas por los actores locales, fueron evaluadas con criterios técnicos, obteniendo que los factores más importantes para que ocurra la infiltración son: pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo; ubicando las zonas con mayor potencial de recarga en las parte alta y media de la subcuenca del río Jucuapa. Para el presente estudio, en la parte alta de la comuna Pasto La Esperanza, se determinó que los componentes biofísicos con mayor influencia en la potencialidad de las zonas de recarga son la cobertura vegetal y el uso del suelo, concordando con los resultados obtenidos por Matus (2007), sin embargo, en el presente estudio se encontró que la profundidad del suelo influye significativamente en el aumento de la recarga.

Es importante recalcar que el método desarrollado por Matus (2007) no determina la cantidad de recarga, más bien determina los factores que pueden favorecer en mayor o menor grado la recarga hídrica; situación contraria a la del método RAS elaborado por Junker (2005), que calcula la cantidad de agua que se infiltra en el subsuelo, y en función de ello, se identifican las zonas potenciales de recarga.

4.5. Estrategias sustentables para el manejo de las zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento

Con base al taller participativo realizado en la parroquia de Tufiño, donde se identificaron y determinaron los problemas presentes en la comuna Pasto La Esperanza, también se plantearon propuestas de solución. Con la información obtenida a partir de los informantes que asistieron al taller y con aplicación de criterios técnicos, se establecieron las estrategias y acciones para el manejo sustentable de las zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de abastecimiento de agua de la parte alta de la comuna.

4.5.1. Problemas de la parte alta de la Comuna Pasto La Esperanza, referentes al recurso hídrico

Tras realizar visitas al área de estudio, entrevistas a los dirigentes comunales y ejecutar un taller participativo dirigido a los comuneros de la parroquia de Tufiño y líderes de la comuna, se identificó que los principales problemas relacionados con el recurso hídrico presentes en la parte alta de la comuna Pasto La Esperanza son los siguientes:

- Falta del recurso agua en los sectores San Ignacio, Montelodo y Tablones.
- Falta de charlas de concienciación ambiental, donde se señale la importancia del recurso hídrico y se identifiquen todos los recursos naturales que posee la comuna.
- No hay respeto en concesiones.
- No cuentan con agua de riego en la comuna Pasto La Esperanza.
- No cuentan con agua potable, solo agua entubada.

- No existen aportes de cuidado de las fuentes de agua, por parte de los beneficiarios externos a la comuna como instituciones públicas y empresa de eléctrica y empresa de agua potable de la ciudad de Tulcán.
- Insuficiente abastecimiento de agua en época seca (julio, agosto y septiembre).
- Presencia de desechos químicos en las orillas de los ríos.
- Falta de protección de las fuentes de agua.
- Falta de asesoría legal y capacitación a los dirigentes comunales para atender de manera adecuada las solicitudes de adjudicaciones por derecho al uso del agua por organizaciones externas (pobladores del cantón Espejo).
- Uso excesivo de los recursos hídricos.

Esta situación podría empeorar, debido a que, mediante el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica, se determinó que los 9 sitios de análisis, 4 fuentes de agua y 5 estructuras de captación, se ubican en la categoría de potencial de recarga baja, por lo que se requieren urgentes medidas de manejo, conservación y protección de recursos naturales.

4.5.2. Plan de acción en las zonas potenciales de recarga y fuentes de abastecimiento

El plan de acción para las zonas potenciales de recarga hídrica, debe ejecutarse en las siguientes zonas prioritarias:

- a) La zona potencial de recarga categorizada como Muy Alta, debido a que estas áreas regulan el ciclo hidrológico superficial y subterráneo, además en estos sitios no se evidencia intervención antrópica y se encuentran cubiertas de vegetación herbácea (pajonal) y arbustiva. En esta zona no se localiza ninguna fuente de captación, geográficamente pertenece a la zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica El Ángel (REA).

- b) La zona potencial de recarga categorizada como Baja, por la importancia que tiene como sitio de ubicación de las fuentes de captación de agua para los pobladores de la comuna y ciudad de Tulcán. En esta zona se localiza la parroquia de Tufiño y poblados aledaños, que son beneficiarios directos del recurso hídrico; se evidencia intervención antrópica que consiste en presencia de cultivos, pastos y bosques plantados

4.5.3. Estrategias de manejo sustentable en función de los responsables, tiempo y fuentes de financiamiento

En el Cuadro 12, se indican las estrategias de manejo sustentable con los actores responsables, para proteger y conservar las zonas de recarga y fuentes de captación, a través de la participación de entidades gubernamentales y no gubernamentales. Para aplicar las estrategias propuestas, se estimó un rango de tiempo de 6 meses a 5 años, debido a que las estrategias incorporan los contextos ambiental, social y económico. Para ejecutar la propuesta se requiere disponer de fuentes de financiamiento, mediante aplicación de convenios y ejecución del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia de Tufiño.

Cuadros 12. Estrategias de manejo, responsables, tiempo, y fuentes de financiamiento

Estrategia	Responsables	Tiempo	Posibles fuentes de financiamiento
1. Protección y conservación de zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de captación			
1.1 Capacitación a las autoridades comunales y pobladores, en temas relacionados a los riegos volcánicos y disposición de desechos sólidos generados por actividades turísticas y pecuarias 1.2 Delimitación de áreas de amortiguamiento alrededor de las fuentes de agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) • Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) • Ministerio del Ambiente (MAE) • Guardaparques comunales 	6 meses	<ul style="list-style-type: none"> • Gobierno Nacional • Gobierno Provincial • Gobiernos Locales (GADs) • Organismos No Gubernamentales (ONGs) • Junta Parroquial
2. Concienciación sobre el manejo del recurso hídrico			
2.1 Capacitaciones permanentes a los líderes e integrantes de la comuna sobre temas de utilización adecuada del agua 2.2 Campañas de educación ambiental para el manejo adecuado del recurso hídrico y al uso de las tres "R": reducir, reciclar y reutilizar.	<ul style="list-style-type: none"> • Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) • Gobierno Provincial del Carchi • Dirección de Ambiente del GAD Municipal del Cantón Tulcán • Ministerio de Educación 	1 año	<ul style="list-style-type: none"> • Gobierno Provincial • Gobiernos Locales (GADs)
3. Conservación de páramos, bosque nativo y área protegida comunal			
3.1 Aplicación del Plan de Manejo y Desarrollo de la Comuna La Esperanza 3.2 Plantación de especies nativas <i>Oreopanax sp.</i> (pumamaqui), <i>KBidens alba</i> (romerillo), <i>Alnus glutinosa</i> (aliso), <i>Sapium glandulosum</i> (lechero verde), <i>Polylepis incana</i> (polylepis), en los sitios de influencia de las fuentes de abastecimiento de agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Ministerio del Ambiente (MAE) • Junta Parroquial • Junta de Aguas • Dirigentes comunales 	5 años	<ul style="list-style-type: none"> • Gobierno Nacional • Gobierno Provincial • Gobiernos Locales (GADS) • Organismos No Gubernamentales (ONGs)
4. Gestión de convenios con instituciones públicas y privadas vinculadas al manejo de los recursos naturales			
4.1 Acercamiento con instituciones públicas 4.2 Formulación de convenios con universidades, GADs parroquiales. 4.3 Firma de convenios interinstitucionales e interdisciplinarios relacionados con el manejo de recursos naturales.	<ul style="list-style-type: none"> • Dirigentes comunales • Junta Parroquial • Centros de Educación Superior • GADs Parroquiales 	1 año	<ul style="list-style-type: none"> • Dirigentes comunales • Centros de Educación Superior • GADs Parroquiales
5. Inclusión del Plan de Desarrollo Comunal en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia Tufiño			
5.1 Gestión y asesoramiento en temas legales sobre concesiones hídricas	<ul style="list-style-type: none"> • SENAGUA • Dirigentes comunales 	1 año	<ul style="list-style-type: none"> • GADs • Dirigentes comunales

Elaboración: Autora

En función de las alternativas propuestas por los comuneros y líderes comunales de la parroquia de Tufiño y criterios técnicos, se elaboraron estrategias y acciones para el manejo adecuado de las zonas potenciales de recarga hídrica (ZPRH) en la comuna Pasto La Esperanza, orientadas al aprovechamiento adecuado del recurso hídrico mediante la conservación de zonas potenciales de recarga hídrica, concienciación ambiental, conservación de páramos, gestión de convenios, e integración de planes de desarrollo. Gonzáles (2011) elaboró un estudio para identificar de manera participativa, con actores locales, las principales fuentes de agua y zonas potenciales de recarga hídrica comparando con criterios técnicos; en el cual se establecieron como medidas para mejorar las condiciones de protección de las ZPRH, el fortalecimiento de leyes y normas relacionadas explícitamente con dichas zonas, coordinación interinstitucional local, el ordenamiento territorial y mejoramiento de las condiciones socioeconómicas de la población. Analizando estos aspectos, el presente estudio concuerda con Gonzáles (2011) en establecer medidas para mejorar las condiciones de protección de las ZPRH, coordinación interinstitucional tanto con entidades locales como externas, y aunque no se propone mejorar las leyes sobre las ZRPH vigentes en Ecuador, se determinó que los pobladores de Tufiño no tienen conocimiento sobre: la función hidrológica de las zonas de recarga, localización en el territorio comunal y la existencia de leyes o normas para la protección. En este punto Matus (2007), sugiere que es necesario contar con ciertos conocimientos en el aspecto legal para garantizar la eficacia de prácticas para mejorar la cantidad y calidad de los recursos hídricos.

Tomando en cuenta las condiciones de la comuna La Esperanza, en el presente estudio se establecieron como actividades fundamentales la capacitación de los comuneros y líderes locales en temas relacionados a los riegos volcánicos, disposición de desechos sólidos, uso adecuado del agua, educación ambiental y asesoramiento en temas legales sobre concesiones hídricas. Mostrando cierta similitud con el estudio de Rodríguez y Álvarez (2014) para determinar la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara en Cuba, en el que los autores mencionan que una de las acciones importantes para aplicar en las áreas de recarga hídrica son las que están enfocadas a fortalecer las capacidades humanas e

institucionales, a través de programas de educación ambiental para asegurar el cumplimiento de las medidas propuestas con la intervención continua de la comunidad beneficiaria.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Los componentes biofísicos que influyeron en las condiciones hídricas del territorio de la comuna Pasto La Esperanza y zona de amortiguamiento, fueron: tipos de suelo, profundidad del suelo, textura del suelo, cobertura vegetal, uso del suelo y las pendientes del terreno. La influencia del suelo Cryands, correspondiente a los Andisoles, con una profundidad mayor a 1m y con texturas franco arenoso, y franco limoso, con cobertura vegetal de bosque nativo, páramo y vegetación arbustiva, aumentan la recarga; mientras que, la combinación de suelos Cryands, Udans (Andisoles) y Tierras misceláneas con texturas franco (arenoso, limoso, arcilloso), arcillo arenoso, y arcillo limoso, con una profundidad de 50 a 100 cm y presencia de vegetación arbustiva, páramo intervenido y cultivos de ciclo corto disminuyen la infiltración de agua y, por tanto, la posibilidad de recarga es menor.
- Se determinaron nueve sitios de medición de caudales, cuatro drenajes menores o quebradas y cinco obras civiles o estructuras para captación de agua. En estos drenajes y estructuras, las mediciones de caudales superficiales y captados durante la época lluviosa más intensa (abril y

mayo) y seca moderada (agosto y septiembre) alcanzaron valores máximos promedios de 375,1 l/s y mínimos de 192,3 l/s, respectivamente.

- La metodología Recarga de Agua Subterránea (RAS) permitió identificar cuatro zonas potenciales de recarga hídrica, dentro del territorio comunal: zona de recarga Muy Alta, zona de recarga Alta, zona de recarga Moderada, y zona de recarga Baja las mismas que se localizan en las partes baja y alta del territorio, todas de importancia, porque permiten el almacenamiento de agua.
- Las altas precipitaciones de la zona baja de la comuna y el tipo de suelo arcilloso, favorecen la infiltración hacia los acuíferos confinados y superficiales, especialmente en los sectores de Maldonado, Chilmá Bajo y El Laurel.
- En la parte alta de la comuna se identificaron cuatro zonas potenciales de recarga hídrica con cuatro categorías de recarga: Muy Alta, Alta, Moderada, y Baja; siendo la última la más extensa en superficie y donde se localizan las fuentes de abastecimiento de agua y estructuras de captación. Los caudales generados en estas zonas potenciales de recarga se usan para el abastecimiento del recurso agua a los sectores de Tufiño y ciudad de Tulcán, lo que hace indispensable la formulación y aplicación de estrategias de conservación.
- Las estrategias de manejo sustentable propuestas de manera participativa, permitirán manejar el recurso hídrico de manera organizada con participación comunitaria, y con ello garantizar su sostenibilidad ambiental. Las mismas fueron las siguientes: Protección y conservación de zonas potenciales de recarga hídrica y fuentes de captación, Concienciación sobre el manejo del recurso agua y Conservación de páramos, bosque nativo y área protegida comunal.

5.2. RECOMENDACIONES

- Difundir entre los pobladores de la comunidad Pasto La Esperanza, la influencia de las condiciones biofísicas de la zona en la recarga hídrica potencial, mediante las capacitaciones propuestas en el presente estudio.
- Debido a que las zonas con recarga Baja permiten el abastecimiento del recurso agua a la ciudad de Tulcán y pobladores de la comuna Pasto La Esperanza (91 000 habitantes), se requiere aplicar estrategias de manejo sustentable de las zonas potenciales de recarga y fuentes de captación, de forma participativa, para garantizar el suministro de agua a los pobladores beneficiarios.
- Para manejar adecuadamente los caudales superficiales generados durante la época lluviosa, se debe mantener la cantidad de agua captada para evitar escasez en el suministro del recurso, especialmente en la época seca.
- Considerar las estrategias de manejo sustentable del recurso hídrico obtenidas de forma participativa en el presente estudio, para fortalecer el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Tulcán y la provincia del Carchi.

CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A., y Navarrete, F. (2004). *Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico*. México D. F.: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) - Oficina Regional para América Latina y el Caribe (ORPALC).
- Arellano, J. (2005). *Apropiación territorial, deterioro ambiental y gestión de recursos hídricos en la cuenca superior del río Custepec, Chiapas (Tesis de maestría)*. Universidad Autónoma de Chapingo, Dirección de Centros Regionales Universitarios, Chapingo, México.
- Ávalos, O., y Rosito, J. C. (2007). *Evaluación hidrológica de las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo*. Programa de Comunicaciones WWF Centroamérica. Obtenido de http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2473.pdf
- Baena, G. (2015). *Planeación prospectiva estratégica: teorías, metodologías y buenas prácticas en América Latina*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Blanco, H. (2010). Áreas de recarga hídrica de l aparte media - alta d elas microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica. *Cuadernos de Investigacion Universidad Estatal a Distancia*, 2(2), 181-204.
- Bueso, M. (2010). *Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó, y Shusho*,

- Municipio de Chiquimula*. Guatemala: Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT).
- Bustamante, O. (2006). *Manual básico para medir caudales*. Quito: Fondo para la protección del agua (FONAG).
- Castillo, A., y Peña-Modragón, J. (2015). Métodos de investigación social: fundamentos, técnicas y aportaciones para el entendimiento de las relaciones sociedad-vida silvestre. En S. (. Gallina, *Manual de técnicas del estudio de la fauna* (pág. 194). Xalapa, Veracruz, México: Instituto de Ecología, A.C.
- Chow, V., Maidment, D., y Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. United States of America: McGraw-Hill.
- Cotler, H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Cotler, H., Mazari, M., y de Anda , J. (2006). *Atlas de la cuenca Lerma - Chalapa: construyendo una visión conjunta*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Davie, T. (2002). *Fundamentals of hydrology. Routledge fundamentals of physical geography*. New York.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., y Chávez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Duque, J. (2008). Modelación cartográfica hidrológica de la cuenca hidrográfica del río La Chimba para determinar la potencialidad del aprovechamiento del recurso agua mediante herramientas SIG en la cuenca y el área de influencia del proyecto de riego Cayambe-Tabacundo.
- Durán, R., Gaidos, M., y España, R. (2008). Evaluación de la eficiencia hidráulica de mangas de riego en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el Estado Portuguesa. *Unellez de Ciencia y Tecnología*, 26, 1-5.
- ECOCIENCIA. (2008). *Plan de manejo y desarrollo de la Comuna La Esperanza*. Tulcán: Ecociencia.

- ECOCIENCIA. (2008). *Plan de manejo y desarrollo de la comuna La Esperanza*. Quito. Obtenido de <http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/Plan%20de%20manejo%20y%20desarrollo%20de%20la%20Comuna%20La%20Esperanza.pdf>
- FAO. (2003). Declaración de Arequipa III. Congreso Latinoamericano de Cuencas Hidrográfica. Arequipa.
- FAO. (2005). *Aplicación de los Sistemas de Información Geográficos en la epidemiología de fiebre aftosa en Argentina*. Argentina: Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
- Fattorelli, S., y Fernández, P. (2011). *Diseño hidrológico*. Obtenido de http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf
- Faustino, J. (2006). *Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica (Notas de clase)*. San Salvador: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Faustino, J. (2007). *Identificación, evaluación y manejo de áreas de recarga hídrica*. Cartago, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Faustino, J. (2007). *Notas de clase para el taller "Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica"*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Fernández, F., y Duarte, J. (2012). Desarrollo de un caudalímetro digital para la medición de caudales en ríos. *Investigación, Desarrollo e Innovación*, 3(1), 44-51.
- Flores, S., Groten, U., Lugo, S., y Mena, P. (2012). *Gente, vida y agua en los cerros. Una Sistematización del Proyecto Páramo Andino en el Ecuador*. Quito: Ecociencia.
- González, W. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá (Tesis de maestría)*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.

- Greenpeace. (2013). *Páramo en peligro. El caso de la minería de Carbón en Pisba*. Colombia.
- Gutiérrez, C. (2016). Evapotranspiración potencial (ET_o) PETP V2.0.0. Ayacucho, Perú.
- INAB. (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico*. Guatemala: Instituto Nacional de Bosques.
- INAMHI. (2016). *Boletín meteorológico del mes de mayo, 2016*.
- Jiménez, D. (2016). *Uso e interpretación de la información estadística*. España.
- Junker, M. (2005). *Metodología RAS para determinar la recarga de agua subterránea*. San Salvador: FORGAES.
- Maderey, L., y Jiménez, A. (2001). Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*(45), 24-38.
- MAGAP. (2013). *Plan nacional de riego y drenaje 2012 - 2026*. Quito: Subsecretaría de riego y drenaje.
- MAGAP, y MAE. (2015). Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo. Quito, Ecuador.
- Matus, O. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua (Tesis de maestría)*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Matus, O., Faustino, J., y Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica, Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Mena, P., y Ortiz, D. (2002). *El manejo comunitario de los páramos. Serie Páramo 11*. Quito: Abya Yala.
- Mena, P., Josse, C., y Medina, G. (2000). *Los suelos del páramo. Serie Páramo 5*. Quito : Abya Yala.

- Miklos, T., y Tello, M. (2007). *Planificación prospectiva: una estrategia para el diseño del futuro*. México: Limusa.
- Montaner, M. S. (1988). Aproximación, por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil. *Papeles de Geografía*(14), 223-235.
- Morales, J., & Estévez, J. (2006). El Páramo: Ecosistema en vía de extinción. *Luna Azul*(22), 39-51.
- Moscoso, A. (2003). Desarrollos legales e instituciones sobre áreas protegidas y zonas de amortiguamiento en Bolivia, Ecuador y Perú. En J. Blanes, R. Navarro, U. Drehwald, T. Bustamante, A. Moscoso, F. Muñoz, & A. Torres, *Las zonas de amortiguamiento: un instrumento para el manejo de la biodiversidad. El caso de Ecuador, Perú y Bolivia* (págs. 35-105). Quito: RISPGRAF.
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- Palacio, P., y Betancur, T. (2007). Identificación de fuente y zonas de recarga a un sistema acuífero a partir de isótopos estables del agua. Caso de estudio bajo Cauca Antioqueño. *Gestión y Ambiente*, 10(1), 167-181.
- Peñuela, L., y Carrillo, J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*(81), 18-32.
- Perevochtchikova, M., y Arellano, J. (2008). Gestión de cuencas hidrográficas: experiencias y desafíos en México y Rusia. *Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(3), 313-325.
- PRONAREG. (Abril de 1983). Mapa de suelos de Tulcán. Ecuador. Registro oficial, 305 (6 de Agosto de 2014).
- Rodríguez, D., y Álvarez, P. (2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara, de Cuba. *Aqua-LAC*, 6(2), 58-70.
- Sahuquillo, A. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 97-114.
- Santillán, E., Dávila, G., Sánchez, J., y Díaz, J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas,

- Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 104-117.
doi:10.4136/1980-993X
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 13(10), 34-35.
- Schosinsky, G., y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55. Obtenido de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/viewFile/8579/8102>
- SENAGUA. (2008). *Informe de Rendición de cuentas 2008 - 2009*.
- SENPLADES. (2013). *Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017*. Quito: SENPLADES.
- Sierra, R. (. (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Quito, Ecuador: Proyecto INEFAN/GEF-BIRF, EcoCiencia.
- Silva, O. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua*. Matagalpa, Nicaragua: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- SNI. (2013). *Sistema Nacional de Información*. Obtenido de <http://sni.gob.ec/mapa-cobertura-uso>
- Tapia, G., Molina, J., Pérez, G., y Torres, A. (2012). *Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. México: Sanfandila.
- Viviroli, D., Weingartner, R., y Messerli, B. (2003). Assessing the hydrological significance of the World's mountains. *Mountain Research and Development*, 23(1), 32-40.

- Watler, W. (2008). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en la subcuenca del río Siquirres, Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Watson, C. (2011). Ethical issues in research. En H. Newing, *Conducting research in conservation. A social perspective* (págs. 226-237). London: Routledge.

7. ANEXOS

ANEXO 2

AFOROS

- *Punto de aforo 1*

Se localiza en el sector del Cucurucho, en la Quebrada Capote. El aforo se realizó antes de la estructura de captación, en una sección de la quebrada para determinar el caudal total antes de ser captado. Los aforos se realizaron con molinete mecánico y método del flotador, y mostraron que el caudal promedio en época lluviosa fue de 332,03 l/s, mientras que en época seca fue de 51,15 l/s. En este punto, el área mojada corresponde a 0,49 m² en época lluviosa, disminuyendo a 0,34 m² en época seca, como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos del punto de aforo 1

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	332,03 l/s	51,15 l/s
	0,332 m ³ /s	0,051 m ³ /s
Área mojada en sección transversal	0,49 m ²	0,34 m ²
Espejo de agua	0,86 m	1,04 m
Velocidad media	0,69 m/s	0,15 m/s

Elaboración. Autora

- *Punto de aforo 2*

Está ubicado en el mismo sector del Punto 1, pero el aforo se realizó después de la estructura, en el tanque de captación para conocer el caudal captado. El método utilizado en este punto fue el molinete mecánico, y registró un caudal promedio de 938,60 l/s en época lluviosa y un caudal de 305,29 l/s en época seca. (Tabla 7).

Tabla 7. Datos del punto de aforo 2

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	938,46 l/s	305,29 l/s
	0,938 m ³ /s	0,305 m ³ /s
Ancho del tanque	2,47 m	2,46 m
Profundidad (nivel de agua)	0,76 m	0,71 m
Velocidad media	0,5 m/s	0,1 m/s
Tiempo de aforo	30 s	30 s

Elaboración. Autora

Este caudal resultó ser mayor al caudal registrado antes de la estructura de captación (punto 1), debido a las medidas del tanque 3,96 m y a que el agua captada de la quebrada se almacena en la estructura mencionada (para ser conducida hacia la planta de tratamiento), por esta razón el caudal registrado después de la captación es mayor al caudal registrado en la quebrada, como se observa en la Figura 18.



Figura 20. Tanque de captación (i) y sección de la Quebrada Capote, Sector Cucurucho (d).
Fuente: Autora

- *Punto de aforo 3*

La tercera medición de caudales, se realizó en una estructura de captación de la quebrada Cuatza, ubicada en el sector de Monte Redondo. Dadas las características del sitio, el aforo se realizó en el cauce de la tubería, y en el canal

de desvío; los dos caudales equivalen a la cantidad de agua que retorna a la quebrada luego de la captación. Los resultados obtenidos mediante el método de aforo volumétrico y molinete mecánico se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos del punto de aforo 3

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio	5,19 l/s	3,52 l/s
	0,005 m ³ /s	0,003 m ³ /s
Volumen medio	7,15 l	
Tiempo de aforo medio	10,94 s	
Velocidad media	0,4 m/s	0,4

Elaboración: Autora

- *Punto de aforo 4*

El punto corresponde a una sección del Río Chiquito, ubicado después de la primera captación (junto al puente); para determinar la cantidad de agua del río antes de ser captada para consumo humano de la ciudad de Tulcán. El caudal promedio estimado con el molinete mecánico y el método del flotador, para la época de lluvias fue de 396,42 l/s, que para la época seca disminuye a 21,57 l/s. El área mojada calculada en la época lluviosa es de 1,38 m², mientras que en la época seca es de 0,09 m², tal como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos del punto de aforo 4

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	396,42 l/s	21,57 l/s
	0,396 m ³ /s	0,021 m ³ /s
Área mojada en sección transversal	1,38 m ²	0,09 m ²
Espejo de agua	6,80 m	0,74 m
Velocidad media	0,28 m/s	0,1 m/s
Distancia recorrida promedio		

Elaboración: Autora

En la época seca se observó que el espejo del agua se redujo considerablemente de 6,80 m de ancho a 0,74 m (Figura 21).



Figura 21. Sección transversal del Río Chiquito antes de la captación 1 en época lluviosa (i) y sección transversal del Río Chiquito antes de la captación 1 en época seca (d).

Fuente: Autora

- *Punto de aforo 5*

Se sitúa en la captación que se encuentra antes del Río Chiquito. El aforo fue realizado en el canal de desvío de agua, que está después de la estructura de captación. Con los datos recopilados durante el período de lluvias, el caudal promedio que se determinó fue de 95,67 l/s, mientras que el caudal determinado en época seca fue de 42,04 l/s (Tabla 10). La obtención de caudales se obtuvo con el método del flotador y molinete mecánico.

Tabla 10. Datos del punto de aforo 5

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	95,67 l/s	42,04 l/s
	0,095 m ³ /s	0,042 m ³ /s
Área mojada en sección transversal	0,14 m ²	0,09
Espejo de agua	1 m	1 m
Velocidad media	0,74 m/s	0,5
Distancia recorrida promedio	4,38 m	

Elaboración: Autora

- *Punto de aforo 6*

En el Río Chiquito se encuentran dos estructuras de captación, por lo cual, se aforó dos veces en cada época, antes y después de cada captación. El punto de aforo 6, corresponde al río antes de la segunda captación. El caudal promedio registrado para la época lluviosa fue de 533,1 l/s, y para la época seca de 419,72 l/s mediante la combinación de los métodos: molinete mecánico y del flotador. El área mojada calculada en la época lluviosa es de 2,66 m², mientras que en la época seca es de 1,74 m², tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos del punto de aforo 6

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	533,15 l/s	419,72 l/s
	0,533 m ³ /s	0,419 m ³ /s
Área mojada en sección transversal	2,66 m ²	1,74 m ²
Espejo de agua	7,59 m	7,60 m
Velocidad media	0,2 m/s	0,09 m/s
Distancia recorrida promedio		

Elaboración: Autora

- *Punto de aforo 7*

Este punto corresponde al aforo realizado después de la segunda estructura de captación ubicada junto al Río Chiquito, en el tanque de almacenamiento, río arriba. De acuerdo a los datos obtenidos en campo, los caudales promedios para la época lluviosa y seca fueron: 1630,91 l/s y 885,04 l/s, respectivamente. La obtención de caudales se obtuvo combinando el método del flotador y molinete mecánico. Los datos de aforo se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Datos del punto de aforo 7

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	1630,91 l/s	885,04 l/s
	1,630 m ³ /s	0,885 m ³ /s
Área mojada en sección transversal	4,62 m ²	4,43 m ²
Espejo de agua	3 m	2,99 m
Velocidad media	0,36 m/s	0,2 m/s
Distancia recorrida promedio		

Elaboración: Autora

- *Punto de aforo 8*

Se encuentra en el sector de Los Tablones, ubicado dentro de la zona de amortiguamiento. El aforo se realizó en dos cauces mínimos de agua que desembocan en un tanque de almacenamiento, por lo cual se utilizó el método de aforo volumétrico para estimar los caudales para época lluviosa (0,15 l/s) y seca (0,02 l/s). Los datos de este punto de aforo, registrados en campo se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Datos del punto de aforo 8

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	0,15 l/s	0,02 l/s
	0,0001 m ³ /s	0,00002 m ³ /s
Volumen medio	10 l	5 l
Tiempo de aforo medio	66 s	222 s

Elaboración: Autora

- *Punto de aforo 9*

En el sector de Los Tablones, se encuentran dos estructuras de captación. Este punto corresponde al tanque de almacenamiento número 2, ubicado antes de la captación de la parte superior. Este tanque es alimentado por 2 tuberías, una se encuentra al lado lateral del tanque y la segunda se encuentra en la parte superior del tanque. Debido a la accesibilidad de la segunda tubería, fue donde se realizó el

aforo aplicando el método electrónico en época lluviosa y el método volumétrico en época seca. Los detalles del aforo se indican en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos del punto de aforo 9

Datos de aforo	Época lluviosa	Época seca
Caudal medio en sección transversal	6,90 l/s 0,006 m ³ /s	2,36 l/s 0,002 m ³ /s
Velocidad media	0,1 m/s	
Volumen medio		9,2 l
Diámetro de tubería		
Tiempo de aforo medio		4 s

Elaboración: Autora

En la siguiente tabla, se observa que los sitios de aforo se localizan en zonas de recarga clasificadas en categoría baja, donde el caudal aforado más alto se registró en el sitio Cucurucho, mientras que el caudal aforado más bajo se registró en el sitio Los Tablones. Debido a que las fuentes de abastecimiento de agua potable para la población tienen baja potencialidad de recarga, es necesario implementar medidas de conservación, manejo y protección de dichas fuentes para garantizar el aprovisionamiento de agua a los pobladores de la parroquia Tufiño, sector Los Tablones y la ciudad de Tulcán, cuya población total actual según INEC (2010) es de 86498 habitantes.

ANEXO 3

REGISTRO DE ASISTENCIA SOCIALIZACIÓN



REGISTRO DE ASISTENTES

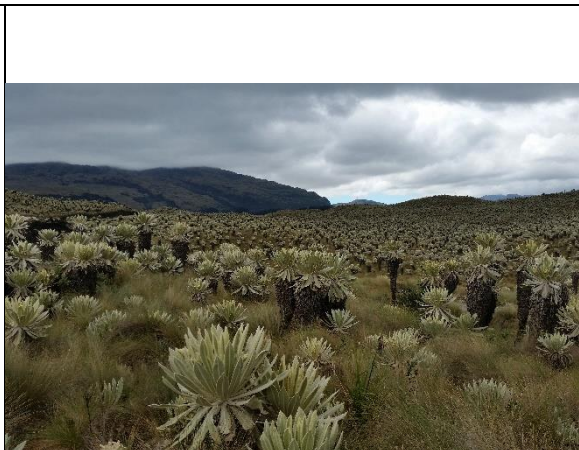
N°	NOMBRE	C.I	FIRMA
1	Andrés Chiguilan	0407745024	Andrés Chiguilan
2	Marlon Chiles	090206977-6	Marlon Chiles
3	Saida L. Chiles	040206496-8	Saida L. Chiles
4	Mirna Arcos	040206600-5	Mirna Arcos
5	Cliver Puetate	040093895-4	Cliver Puetate
6	Sigfredo Injano	041076782-8	Sigfredo Injano
7	Segundo elag	0400433804-	Segundo elag
8	Andrés Puetate	0402065387	Andrés Puetate
9	Yosenia Puetate Pivano	0402065379	Yosenia Puetate
10	Hector Nazate Lopez	0902063257	Hector Nazate Lopez
11	Guillermo Chiles	12102110678	Guillermo Chiles
12	José Chiles	04010534-1	José Chiles
13	Agustín Pasparán	0400555454	Agustín Pasparán
14	Claudia Pasparán	090474365-3	Claudia Pasparán
15	Fernando Herrera	110423999-9	Fernando Herrera
16	Diego Morales	0400933529	Diego Morales
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			

ANEXO 4
FOTOGAFÍAS

FASE DE CAMPO



Fotografía 1. Quebrada Capote y estructura de captación, Sector Cucurucho



Fotografía 2. Bosque de frailejones (nc), sector Monte Redondo



Fotografía 3.



Fotografía 4. Perfil del suelo, sector Los Tablones



Fotografía 5. Cultivos en favor de la pendiente.



Fotografía 6. Presencia de ganadería, sector Los Tablones.



Fotografía 7. Lagunas verdes.



Fotografía 8. Presencia de desechos sólidos



Fotografía 9. Tanque de captación N°1, Sector Los Tablones.



Fotografía 10. Presencia de llamas (nc), sector Monte Redondo

AFOROS ÉPOCA LLUVIOSA



Fotografía 11. Punto de aforo 1: Quebrada Capote, Sector Cucurucho



Fotografía 12. Punto de aforo 2: Estructura de captación, Sector Cucurucho



Fotografías 13-14. Punto aforo 3: cauce de tubería (i) canal de desvío (d).



Fotografía 15. Punto aforo 4: Río Chiquito, antes de la estructura de captación.



Fotografía 16. Punto aforo 5: Canal de captación, Sector Río Chiquito



Fotografía 17. Punto aforo 6: Quebrada sin nombre, antes de la estructura de captación.



Fotografía 18. Punto aforo 7: Estructura de captación, Quebrada sin nombre.



Fotografía 19. Punto aforo 8: Quebradas que desemboca en el tanque de captación N°1, Sector Los Tablones.



Fotografía 20. Punto aforo 9: Tanque de captación N°2, Sector Los Tablones.

AFOROS ÉPOCA SECA



Fotografía 21. Punto aforo 1: Quebrada Capote



Fotografía 22. Punto aforo 2: Estructura de captación



Fotografía 23 - 24. Punto aforo 3



Fotografía 25. Punto de aforo 4: Río chiquito (abajo)



Fotografía 26. Punto de aforo 5: Río chiquito (canal)



Fotografía 27. Punto de aforo 6: Quebrada afluente del Río Chiquito (arriba)



Fotografía 28. Punto de aforo 7: Captación afluente del Río Chiquito (arriba)



Fotografía 29. Punto de aforo 8: Quebradas, Sector Los Tablones.

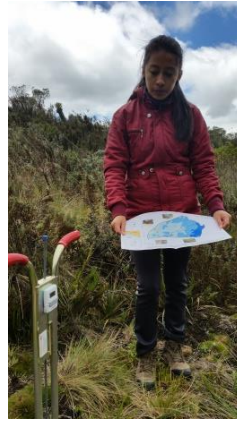


Fotografía 30. Punto de aforo 9: Captación Los Tablones

PRUEBAS DE INFILTRACIÓN



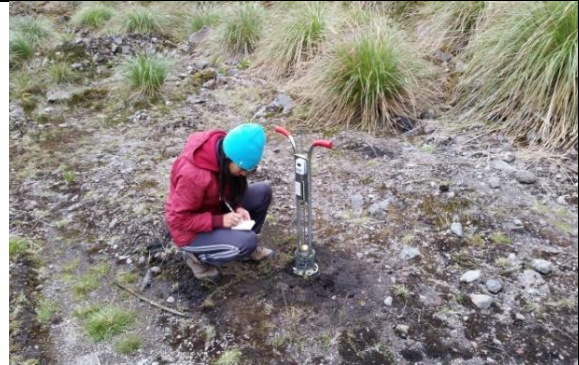
Fotografía 31. Zona potencial de recarga, categoría Baja



Fotografía 32. Zona potencial de recarga, categoría Moderada

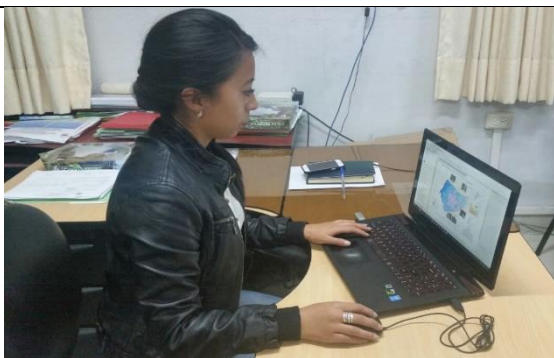


Fotografía 33. Zona potencial de recarga, categoría Alta



Fotografía 34. Zona potencial de recarga, categoría Muy Alta

FASE DE LABORATORIO



Fotografía 35. Elaboración de cartografía



Fotografía 36. Redacción informe final

SOCIALIZACIÓN



Fotografía 37. Presentación de resultados



Fotografía 38. Presentación de resultados



Fotografía 39. Pobladores de la parroquia de Tufiño



Fotografía 40. Taller participativo