



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES**

**“IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE
RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS
ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y
SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE
APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE
IBARRA”**

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

AUTORA

Katherine Mishell Chamorro Castillo

DIRECTOR:

Ing. Oscar Rosales E.

Ibarra – Ecuador
2016

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

TEMA:

“IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA”

Trabajo de Grado revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su presentación como requisito parcial para obtener el Título de:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

APROBADA:

Director:	Ing. Oscar Rosales, M.Sc.
Asesor:	Ing. Jorge Granja
Asesor:	Ing. Elizabeth Velarde
Asesor:	Ing. Tania Oña

Ibarra – Ecuador
2016

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Katherine Mishell Chamorro Castillo, bajo mi supervisión



Ing. Oscar Rosales Enríquez
C.I 0400933529



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

2.

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:	100382356-2		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Chamorro Castillo Katherine Mishell		
DIRECCIÓN:	Av. 17 de Julio y Flores		
EMAIL:	mishurnr_92@outlook.com		
TELÉFONO FIJO:	06 2952076	TELÉFONO MÓVIL:	0995543375
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	“IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA”		
AUTOR (ES):	Chamorro Castillo Katherine Mishell		
FECHA:	2016/04/25		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> Pregrado	<input type="checkbox"/> Posgrado	
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Oscar Rosales E.		

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Chamorro Castillo Katherine Mishell, con cédula de identidad Nro. 100382356-2, en calidad de autor (es) y titular (es) 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 (es) manifiesta (n) 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 (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de abril de 2016

La autora:

...CHAMORRO MISHELL.....

Chamorro Castillo Katherine Mishell

C.I 100382356-2



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
GRADO

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Chamorro Castillo Katherine Mishell, con cédula de identidad Nro. 100382356-2, 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 (es) de la obra o trabajo de grado denominado: "IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA" 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.

Ibarra, a los 25 días del mes de abril de 2016

La autora:

.....CHAMORRO CASTILLO KATHERINE MISHELL.....

Chamorro Castillo Katherine Mishell

C.I 100382356-2

DEDICATORIA

Esta investigación va dedicada a Dios y al Divino Niño, por ser mis guías espirituales, en todo momento y por ser mi fuerza para lograr culminar mis estudios.

A mi madre Patricia Castillo, mi mejor ejemplo de vida, lucha, fortaleza y perseverancia quien me ha apoyado constantemente en todo el transcurso de esta etapa; mi respeto y gracias mamita por haberme dado la oportunidad de vivir, por su amor y esfuerzo que me han permitido llegar hasta aquí.

Con todo mi amor este trabajo es para ustedes, el cual es la muestra de la finalización de una etapa más de mi vida, la misma que no hubiese logrado culminar sin su ayuda.

Mishell

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento más sincero primeramente a Dios, con el permiso y bendición de él he logrado terminar esta importante etapa de mi vida.

Al ingeniero Óscar Rosales, docente de la FICAYA y Director de esta investigación, gracias a su sencillez, conocimientos y dedicación, con los cuales me ha apoyado constantemente he podido finalizar este trabajo

A mis tutores ingenieras Elizabeth Velarde y Tania Oña, e ingeniero Jorge Granja gracias a su guía, sabios consejos, sugerencias, aportes y ayuda brindada he logrado culminar esta investigación de una manera adecuada.

A la Universidad Técnica del Norte, por ser mi segundo hogar y haberme brindado todos los conocimientos, con los cuales me desempeñaré como una profesional a carta cabal.

A la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (EMAPA-I), por todo el apoyo y colaboración durante la fase de campo e información que brindaron para hacer posible esta investigación.

A mis padres Hugo y Paty por su amor, sus consejos, apoyo incondicional y por enseñarme siempre a salir adelante.

A mi tía Jenny Castillo, gracias por ser mi amiga, guía, pero sobre todo mi segunda madre sin su apoyo no lo habría logrado, gracias por confiar en mí.

A mi compañera y amiga Nathy Tixilima, con quien compartí momentos muy lindos e inolvidables y quien me brinda su amistad y apoyo incondicional.

A todos ustedes muchas gracias.

Mishell

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xv
SUMMARY	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Preguntas directrices	5
CAPÍTULO II.....	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Cuencas hidrográficas	6
2.1.1 Función hidrológica de la cuenca hidrográfica	7
2.1.2 Función ecológica	8
2.1.3 Función ambiental.....	9
2.1.4 Función socioeconómica.....	10
2.2 Procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas.....	11
2.2.1 Proceso de la recarga hídrica.....	12
2.2.2 Factores que determinan la recarga hídrica.....	13
2.3 Factores de la infiltración.....	17
2.4 Capacidad de Infiltración	18
2.4.1. Pruebas de infiltración del suelo	18
2.4 Fuentes de agua	19
2.5 Acuíferos	21
2.7 Zonas de recarga en cuencas hidrográficas.....	23
2.7.1 Recarga y zonas de recarga	24
2.7.2 Factores que afectan la recarga hídrica	26
2.7.3 Clasificación de las zonas de recarga hídrica.....	27
2.8 Protección de zonas de recarga hídrica	29
2.9 Evaluación de las zonas de recarga hídrica	30
2.10 Determinación de la recarga hídrica potencial	30

2.11	Determinación del potencial de recarga de las zonas y elementos biofísicos para la evaluación de la zona de recarga	31
2.12	Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica	33
2.13	Aplicación de herramientas SIG en la identificación de zonas de recarga	34
2.14	Situación de los recurso hídricos aprovechados por EMAPA-I.....	35
2.15	Captación de agua de EMAPA-I	37
2.16	Sistema Ibarra.....	38
2.17	Constitución política del Ecuador	39
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.2	Materiales	44
3.3	Metodología.....	45
3.3.1	Identificación cartográfica de las zonas de recarga hídrica.	45
3.3.2	Análisis de las principales características de las zonas de recarga hídrica, en base a las variables: pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y velocidad de infiltración del suelo.	46
	Se realizaron las siguientes actividades:	46
3.3.3	Aplicación de la metodología para identificar las zonas de recarga hídrica	47
3.3.4	Pruebas de infiltración en los acuíferos	52
3.3.5	Lineamientos generales para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra	53
	Se realizaron las siguientes actividades:	53
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1	Delimitación y localización del área de estudio	55
4.2	Caracterización morfométricas y biofísicas de los acuíferos	56
4.2.1	Tipos de Clima	56
4.2.2	Aspectos Hidrológicos	60
4.2.3	Temperatura	62
4.2.4	Precipitación.....	64
4.2.5	Zonas de vida según Holdridge.....	66
4.2.6	Uso Potencial	68

4.2.7	Evapotranspiración.....	70
4.3	Caracterización morfométrica y biofísica de los acuíferos para las zonas de recarga	72
4.3.1	Pendiente del terreno.....	72
4.3.2	Tipos de suelo	76
4.3.3	Litología	80
4.3.4	Uso del suelo y cobertura vegetal	84
4.4	Zonas de recarga hídrica en los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería	88
4.5	Análisis de los acuíferos.....	95
4.5.1	Acuífero de Yuyucocha.....	96
4.5.2	Acuífero Santa Clara	97
4.5.3	Acuífero Guaraczapas	98
4.5.4	Acuífero La Carbonería.....	99
4.6	Lineamientos de Manejo y Conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería, que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra	101
4.6.1	Desarrollo de la metodología empleada.....	102
4.7.2	Problemática	103
4.7.3	Estructura de los lineamientos	103
4.7.4	Plan de acción en los acuíferos	103
4.7.5	Matriz de Lineamientos de Manejo y Conservación de los Acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería	104
4.7.6	Capacitación.....	107
4.7.7	Gerenciamiento de la cuenca	109
CAPÍTULO V		113
5.1	Conclusiones	113
5.2	Recomendaciones	114
CAPÍTULO VI.....		115
CAPÍTULO VII		119
BIBLIOGRAFÍA		88
ANEXOS		92

TABLA DE CUADROS

Cuadro 2.1.- Contenido de humedad del suelo de acuerdo a la textura.....	18
Cuadro 2.2.- Tipos de pendientes en la cuenca	19
Cuadro 2.3.- Efecto de la actividad antrópica sobre los acuíferos.....	30
Cuadro 2.4.- Inventario de caudales del Sistema de Ibarra	36
Cuadro 3.1.- Coordenadas de referencia de la zona de estudio	43
Cuadro 3.2.- Materiales y equipos utilizados en el desarrollo de la investigación	45
Cuadro 3.3.- Ponderación de la posible recarga hídrica según el tipo de relieve y pendiente	48
Cuadro 3.4.- Tipos de suelos dentro de la cuenca río Tahuando	49
Cuadro 3.5.- Ponderación de la capacidad de recarga hídrica de suelos	49
Cuadro 3.6.- Ponderación de la capacidad de recarga hídrica según la litología de la cuenca del Río Tahuando	50
Cuadro 3.7.- Ponderación de la capacidad de recarga hídrica según la cobertura vegetal y uso del suelo de la cuenca del río Tahuando	51
Cuadro 3.8.- Potencial de recarga hídrica según el modelo.....	52
Cuadro 4.1.- Ubicación política y geografía de los acuíferos.....	55
Cuadro 4.2.- Características cuantitativas de la cuenca río Tahuando	56
Cuadro 4.3.- Acuíferos del área de estudio.....	60
Cuadro 4.4.- Descripción de las acuíferos con respecto a cada acuífero.....	62
Cuadro 4.5.- Precipitación dentro de la cuenca del río Tahuando	66
Cuadro 4.6.- Detalle de las pendientes de cada uno de los acuíferos	74
Cuadro 4.7.- Detalle de las características del suelo de cada uno de los acuíferos	78
Cuadro 4.8.- Ponderación del tipo de suelo	80
Cuadro 4.9.- Ponderación de la litología del área de estudio	84
Cuadro 4.10.- Ponderación de la cobertura vegetal y uso de suelo.	88
Cuadro 4.11.- Ponderación de los acuíferos para identificar las zonas de recarga	88
Cuadro 4.12.- Potencial de recarga de cada uno de los acuíferos.....	89
Cuadro 4.13.- Determinación de la posibilidad de recarga de los acuíferos	89
Cuadro 4.14.- Superficies de las zonas de recarga de la cuenca hidrográfica	92
Cuadro 4.15.- Determinación de la infiltración en el acuífero Yuyucocha	97
Cuadro 4.16.- Determinación de la infiltración en el acuífero Santa Clara.....	98

Cuadro 4.17.- Determinación de la infiltración en el acuífero Guaraczapas	99
Cuadro 4.18.- Determinación de la infiltración en el acuífero La Carbonería ...	100
Cuadro 4.19. Matriz de lineamientos.....	105
Cuadro 4.20- Contenidos de temas de cursos, talleres y conferencias propuestos para los comuneros, usuarios y técnicos del Sistema de Agua Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería.....	108

TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1.- Ciclo hidrológico y aguas subterráneas.....	12
Figura 2.2.- Infiltrómetro Turf Tec	20
Figura 2.3.- Relaciones entre el agua superficial y el agua subterránea	21
Figura 3.1.- Localización de los acuíferos	44
Figura 3.2.- Modelo Cartográfico para la identificación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Tahuando.....	47
Figura 3.3.- Prueba de infiltración en vegetación arbustiva	53
Figura 4.1.- Mapa del clima	58
Figura 4.2.- Mapa hidrológico	61
Figura 4.3.- Mapa de la temperatura	63
Figura 4.4.- Mapa de la precipitación	65
Figura 4.5.- Mapa de zonas de vida	67
Figura 4.6.- Mapa de uso potencial.....	69
Figura 4.7.- Mapa de evapotranspiración.....	71
Figura 4.8.- Mapa de pendientes del terreno.....	73
Figura 4.9.- Mapa de RH según la pendiente.....	75
Figura 4.10.- Mapa de tipo de suelo.....	77
Figura 4.11.- Mapa de RH según la textura	79
Figura 4.12.- Mapa de la litología.....	81
Figura 4.13.- Mapa de RH según la litología.....	83
Figura 4.14.- Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal	85
Figura 4.15.- Mapa de RH según la cobertura vegetal y uso del suelo.....	87
Figura 4.16.- Mapa de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos.....	91
Figura 4.17.- Mapa de recarga hídrica potencial	94

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Mapa ubicación de la zona de estudio	124
Anexo 2.- Mapa base de la zona de estudio.....	125
Anexo 3.- Mapa de las pendiente del área de estudio.....	126
Anexo 4.- Mapa de texturas del área de estudio	127
Anexo 5.- Mapa de la litología del área de estudio.....	128
Anexo 6.- Mapa cobertura vegetal y uso del suelo del área de estudio	129
Anexo 7.- Mapa pruebas de infiltración	130
Anexo 8.- Mapa de las zonas de recarga hídrica	131
Anexo 9.- Mapa de la recarga hídrica potencial	132

RESUMEN

La cuenca del río Tahuando actualmente se encuentra intervenido por las actividades antrópicas, especialmente en la parte baja y media debido a la existencia de prácticas agrícolas y pecuarias sin las debidas medidas de conservación de suelos; la parte baja, media y alta de la cuenca tienen alta importancia hidrológica como fuentes de aprovisionamiento de agua potable para la ciudad de Ibarra, ya que en esta unidad hidrográfica se encuentran las vertientes y pozos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara, las mismas que son administradas y manejadas por la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (EMAPA-I). El objetivo del presente trabajo fue caracterizar las zonas de recarga hídrica de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara, que proveen de agua potable a la zona urbana de Ibarra mediante herramientas Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se aplicaron metodologías para identificar cartográficamente las zonas de recarga hídrica de los acuíferos, analizar las principales características de estas zonas de recarga, en base a la metodología propuesta por Matus (2007) en función de las variables: pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y velocidad de infiltración del suelo y posteriormente se proponen lineamientos generales para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra; mediante el empleo de herramientas de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos mostraron que existen cinco categorías de recarga, la zona de recarga con mayor superficie corresponde a *moderada*, con una superficie de 19.650,24 hectáreas, en esta zona están ubicados los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas y la zona de menor superficie corresponde a *muy alta* con 330,30 hectáreas, ya que comprende las partes más altas con pendientes fuertes y pronunciadas, permitiendo así que el agua escurra con facilidad y no se retenga en el suelo, la zona de recarga categorizada como *nula*, corresponde a la zona urbana de la cuenca, donde se asienta la población urbana de Ibarra. Con los resultados obtenidos se plantean lineamientos de manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos que abastecen de agua a los poblados urbanos de Ibarra, San Antonio, Priorato y poblados rurales de Aloburo y La Esperanza.

SUMMARY

Basin of Tahuando River is currently intervened by anthropoid activities especially in its lower and middle part due to the existence of agricultural and livestock practices without proper soil conservation measures. Lower, middle and upper parts of the basin have abundant hydrological importance as sources of clean water supply for Ibarra city since in this hydrographic unit are located the wellsprings La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha and Santa Clara which are managed by the Municipal Company of Water and Sewerage (EMAPA-I). The aim of this study was to identify water recharging areas in the previous described aquifers using Geographic Information System (GIS) tools. The application of methodologies for the identification of cartographic areas of water recharge of aquifers as well as the analysis of their main characteristics was done based on those proposed by Matus (2007). This methodology is subject to the variables: slope, geology, soil type, vegetation covering and soil infiltration speed. As a result, general guidelines for the management and conservation of water recharge areas of aquifers that supply water to the city of Ibarra are proposed through the use of GIS tools. The results showed that there are five categories of recharge. The recharge zone with the largest area corresponds to *moderate*, with an area of 19,650.24 hectares. In this category are located the aquifers Yuyucocha, Santa Clara and Guaraczapas. The zone with lower surface corresponds to *very high* with 330.30 hectares due to the inclusion of the highest parts with strong and abrupt slopes allowing the water to drain easily and not to be retained in the soil. Recharge zone categorized as *null* corresponds to the urban area of the basin where the urban population of Ibarra is located. Finally, with the obtained results, management and conservation guidelines are proposed for water recharge areas of aquifers that supply water to urban towns of Ibarra, San Antonio and Priorato, as well as the rural villages of Aloburo and La Esperanza.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El agua dulce y los ecosistemas conexos que suministran y renuevan el agua que necesita la humanidad se han venido deteriorando y el ciclo hidrológico se ha alterado debido, entre otras causas, a la impermeabilización del suelo en las principales zonas de recarga hídrica. (CATIE, 2009).

La población mundial ha alcanzado índices elevados de crecimiento y cada vez los recursos hídricos superficiales comienzan a ser deficitarios para satisfacer las necesidades de ésta población, ya sea por agotamiento de las fuentes o por contaminación de las mismas, las aguas subterráneas se convierten en fuentes para las actividades del ser humano. Por lo tanto, es importante para la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra emprender acciones encaminadas a conservar y proteger los acuíferos y las áreas de recarga (EMAPA-I, 2005).

Según Ruiz (2012), en Ecuador los ecosistemas más susceptibles a desaparecer por efectos del cambio climático (variación en precipitación y temperatura) son los de alta montaña y páramos, en donde se sitúan las principales fuentes hídricas. De hecho, en el Ecuador las principales fuentes de agua están ubicadas en la Cordillera de Los Andes, específicamente en las cordilleras oriental y occidental, desde donde se origina la mayor oferta hídrica que abastece a la población.

Los factores por los cuales las fuentes están disminuyendo en caudal y presentan contaminación tienen múltiples orígenes. “Por una parte, existe un antecedente histórico: la deforestación de los bosques andinos que se encuentran sobre los 2.000 msnm. La alteración de los páramos se debe a la ampliación de la frontera

agrícola para el desarrollo de cultivos de diferentes productos, especialmente la papa, y el desplazamiento de comunidades en las partes altas de la montaña”, asegura Ruiz.

La cantidad de agua disponible en todos los sistemas hidrográficos del país, es de 432 km³/año. El país tiene 31 sistemas hidrográficos de los cuales 24 pertenecen a la vertiente del Pacífico, con una superficie total de 124.644 km² (49%) y siete a la vertiente del Amazonas con una superficie de 131.726 km² (51%). Estos sistemas hidrográficos a la vez se encuentran divididos en 79 cuencas hidrográficas: 72 cuencas pertenecen a la vertiente del Océano Pacífico, de las cuales una parte pertenece a áreas costaneras con 123.216 km² (48%) y otra parte pertenece a los territorios Insulares aledaños cubriendo 1.428 km² (1%). Estas cuencas contienen el 88% de la población. Siete cuencas pertenecen a la vertiente del Amazonas con 131.726 km² (51%) y el 12% de la población. (FAO, 2015)

El crecimiento y desarrollo de la ciudad de Ibarra en las últimas décadas ha originado una demanda de agua potable que ha rebasado la disponibilidad actual del recurso dentro del área, realidad que ha motivado a la Empresa de Agua Potable la prospección de las aguas subterráneas, para lo cual es indispensable contar con un estudio hidrogeológico para conocer las condiciones del subsuelo, precipitación, infiltración y escorrentía; y por ende el aprovechamiento sostenible del recurso (EMAPA-I, 2005).

La precipitación en las zonas de recarga de los acuíferos es la principal y más importante en las fuentes de abastecimiento La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara, localizadas en la parte media y alta de la cuenca del río Tahuando, que son las fuentes primordiales de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Ibarra. Sin embargo, muchas de las prácticas en actividades como la agricultura, ganadería, producción forestal y el desarrollo urbanístico alteran las características de las zonas de recarga hídrica, por lo que dificultan la infiltración del agua al erosionar, compactar, impermeabilizar y dejar descubierto el suelo, lo cual genera una mayor escorrentía superficial y disminuye la recarga de los

acuíferos. Esto reduce el nivel de las aguas subterráneas (acuíferos) y afecta la calidad y cantidad del agua, que con frecuencia se vuelve inadecuada para el consumo humano, identificar adecuadamente las zonas de recarga es necesario para establecer estrategias de protección y preservación de las mismas hacia el manejo del recurso agua, ya que el deterioro de las zonas de recarga hídrica y la disminución de la misma se deben, por una parte, a que no se conoce dónde se ubican las principales zonas de recarga y, por otra, a que los actores locales u organismos responsables del manejo de las cuencas no disponen de metodologías prácticas necesarias de caracterización de estas zonas.

En la actualidad el sistema de agua potable municipal abastece a la ciudad de Ibarra, la parroquia de La Esperanza y alrededor del 50% de la población de San Antonio (133.000 habitantes aproximadamente) y utiliza alrededor de 533,5 l/s de agua subterránea (EMAPA-I, 2005).

La ciudad de Ibarra tiene importantes fuentes de abastecimiento que garantizan el 93,8% de cobertura de agua potable. Estas son las fuentes subterráneas de Guaraczapas, con 158l/s; las vertientes de Yuyucocha, que aportan 60 l/s, y los pozos profundos cercanos a Yuyucocha, que suministran 205 l/s; en la parroquia San Antonio se encuentra la captación Santa Clara, pozo profundo que aporta 4,5 l/s y en el sistema Aloburo- Priorato se encuentran tres vertientes de La Carbonería que suministran 17 l/s de agua. Estos acuíferos abastecen con el recurso hídrico para el uso y consumo humano en la ciudad de Ibarra (EMAPA-I, 2005).

Los acuíferos son la principal y más importante fuente de abastecimiento de agua para los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara, localizados en la parte media y alta del río Tahuando. Existen muchas actividades como la agricultura, la ganadería, la frontera agrícola, la explotación forestal indiscriminada y el desarrollo urbanístico alteran las características de las zonas de recarga hídrica, por lo que dificultan la infiltración del agua al erosionar, compactar e impermeabilizar, lo cual genera una mayor escorrentía superficial y

disminuye la recarga de los acuíferos. Esto reduce el nivel de las aguas subterráneas (acuíferos) y afecta la calidad de las aguas, que con frecuencia se vuelven inadecuadas para el consumo humano.

Dentro del Plan del Buen Vivir en el Objetivo 7. se menciona que “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global”, donde la política 7.6 indica que “ Gestionar de manera sustentable y participativa el patrimonio hídrico, con enfoque de cuencas y caudales ecológicos para asegurar el derecho humano al agua”, y además los lineamientos establecen que “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”.

Se necesita seguir de una metodología para identificar las zonas de mayor recarga hídrica natural dentro de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara. Al identificar las principales zonas de recarga hídrica se pretende dar una herramienta de aporte mediante SIG, para la reducción del deterioro de los recursos naturales causado por el uso de la tierra, ya que incentivará y promoverá el cuidado y la sostenibilidad de los recursos naturales.

El propósito del presente estudio es aplicar una metodología práctica que permita a la Empresa Municipal de Agua Potable y alcantarillado (EMAPA-I) identificar las zonas potenciales de recarga hídrica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Identificar y caracterizar mediante herramientas SIG las zonas de recarga hídrica de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara, para la

protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar cartográficamente las zonas de recarga hídrica de los acuíferos.
- Analizar las principales características de las zonas de recarga hídrica, en base a la metodología propuesta por Matus (2007) en función de las variables: pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y velocidad de infiltración del suelo.
- Proponer lineamientos generales para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra.

1.3 Preguntas directrices

¿Cuál variable ambiental tiene mayor influencia en la recarga hídrica de los acuíferos en el aprovisionamiento de agua de la zona urbana de Ibarra?

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Es un contraste y análisis de teorías e investigaciones referidas al estudio. Estas van de lo general a lo particular. Las bases teóricas o marco teórico, dependiendo exclusivamente del tipo de estudio que ha realizado, así por lo general incluyen aspectos teóricos, legales y/o conceptos que se relacionan con el tema de investigación.

2.1 Cuencas hidrográficas

Según Cano (2011), la cuenca hidrográfica está constituida por el territorio que delimita el curso de un río y el espacio donde se colecta el agua que converge hacia un mismo cauce, es por decirlo de una manera más clara es toda aquella superficie que cuando llueve el agua cae a un cauce o a una cuenca como la de la mano; esa área o vaso de captación es una cuenca o es el área drenada por un río.

Cada cuenca hidrográfica, sus recursos naturales y habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que les confieren características particulares a cada una, importantes para considerarlas como unidades de planificación. (Senra, 2005).

Estas deberían ser los límites naturales por los cuales regirse los hacedores de leyes al momento de crear entidades federales, municipios, comunas o cualquier otra forma de organización, lo cual permitiría planificar de forma integrada el espacio, considerando el sistema como un todo.

Cada cuenca es como un ser vivo, porque aparte de ser única, podemos decir que tiene, para los ríos que la forman un área de nacimiento (cuenca alta), un sector

donde crece y reproduce (cuenca media: el río adquiere mayor grosor y hasta se bifurca) y un sitio donde muere o desemboca (cuenca baja), (Cano, 2011).

2.1.1 Función hidrológica de la cuenca hidrográfica

Los procesos de los ecosistemas que describen el intercambio de materia y flujo de energía, a través de la vinculación de los elementos estructurales del ecosistema pueden ser vistos como un sistema dentro de la cuenca, el aporte del agua desde el punto de inicio hacia la distribución en el sistema, se realiza de las siguientes formas:

- Captación de agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar el escurrimiento de manantiales, ríos y arroyos.
- Almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración.
- Descarga del agua como escurrimiento.

Una de las principales características de las cuencas hídricas, es la cantidad y disponibilidad de agua que cada una contiene, debido a factores como relieve, clima y acciones antrópicas.

Algunas cuencas sólo tienen agua durante ciertos períodos de tiempo, como es el caso de las cuencas de invierno.

Las cuencas hídricas cubren un área específica de la superficie de la tierra, en donde el agua lluvia y del deshielo de los glaciares confluyen hacia un mismo punto, es así como las cuencas captan agua y la retienen según su función. (Rachel, 2013).

Las entradas de agua a la cuenca hidrográfica pueden darse de las siguientes formas:

- Precipitaciones: lluvia; nieve; granizo; condensaciones;
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto, los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los partidores de aguas que separan las cuencas hidrográficas.
- Transvase de agua desde otras cuencas, estas pueden estar asociadas a: Descargas de centrales hidroeléctricas cuya captación se sitúa en otra cuenca,

esta situación es frecuente en zonas con varios valles paralelos, donde se construyen presas en varios de ellos, y se interconectan por medio de canales o túneles, para utilizar el agua en una única central hidroeléctrica. Descarga de aguas servidas de ciudades situadas en la cuenca y cuya captación de agua para uso humano e industrial se encuentra fuera de la cuenca, esta situación es cada vez más frecuente, al crecer las ciudades, el agua limpia debe irse a buscar cada vez más lejos, con mucha frecuencia en otras cuencas. (UNESCO, 2006).

De acuerdo al estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), en el año 2006, las salidas de agua pueden darse de las siguientes maneras:

- Evapotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego;
- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.;
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos;
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas;
- Derivaciones para consumo humano y en la industria;
- Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.

El establecimiento del balance hídrico completo de una cuenca hidrográfica es un problema muy complejo, que involucra muchas mediciones de campo. Con frecuencia, para fines prácticos, se suelen separar el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas.

2.1.2 Función ecológica

Provee diversidad de sitios y rutas a lo largo de la cual se llevan a cabo interacciones entre las características de calidad física y química del agua.

Provee de hábitat para la flora y fauna que constituyen los elementos biológicos del ecosistema y tienen interacciones entre las características físicas y biológicas del agua.

Siendo parte fundamental del ciclo hidrológico, ya que se conoce que el agua está siempre en movimiento. A veces, como en el caso de los ríos, fluye, y a veces se

transforma del estado líquido (agua) al gaseoso (vapor) ó al sólido (hielo o nieve). Pero la cantidad total de agua en el mundo nunca cambia. Toda el agua que hay cae del cielo a la tierra, se entra en ella y fluye luego en los ríos, lagos y océanos para evaporarse de nuevo y retornar a la atmósfera.

La mayor parte del agua de una cuenca no está en los ríos y lagos, sino en el suelo mismo. Una cuenca con buen estado de conservación tiene un buen abastecimiento de agua limpia y una tierra rica en nutrientes. Los árboles y plantas, especialmente los pastos ubicados en la parte más alta de la cuenca y a lo largo de las riberas de los ríos y arroyos, mejoran la calidad y cantidad de las aguas subterráneas. (Guides, 1976)

2.1.3 Función ambiental

- Constituyen sumideros de CO₂.

En términos generales, un sumidero de carbono o sumidero de CO₂ es un depósito natural o artificial de carbono, que absorbe el carbono de la atmósfera y contribuye a reducir la cantidad de CO₂ del aire. Los principales sumideros eran los procesos biológicos de producción de carbón, petróleo, gas natural, los hidratos de metano y las rocas calizas. Hoy día son los océanos, y en especial las cuencas, ya que con su constitución integral, hacen que mico organismos interactúen y se de la producción de CO₂. (Martino, 1993).

- Alberga bancos de germoplasma.

- Conserva la biodiversidad.

- Mantiene la integridad y la diversidad de los suelos

Por su misma naturaleza, las cuencas hidrográficas constituyen un aporte de biodiversidad de gran importancia, los recursos ícticos, agrícolas, silvestres que en ellas se encuentran son de gran valía, los recursos son alimentados constantemente por gran cantidad de agua, lo que dificulta que estos se pierdan, más bien tienden

a que se realice el desarrollo de los mismos. Es así como asociaciones vegetales dentro de una división natural de clima, las cuales toman en cuenta las condiciones edáficas y las etapas de sucesión de la cuenca, presentan una fisonomía diversa y variada. (Guerra, 2011).

- Regula la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos.

De acuerdo a Guerra (2011), los ciclos biogeoquímicos son ciclamentos de elementos que confluyen con la finalidad de recibir y proporcionar energía, las cuencas hidrográficas pueden ayudar a regularlos, ya que el ciclo hídrico es la base de los ciclos sedimentarios y gaseosos que se dan en forma continua en la naturaleza, uno de los ciclos que está directamente relacionado a las cuencas hidrográficas es el ciclo sedimentario del fósforo (P).

2.1.4 Función socioeconómica

Suministra recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población. Provee de un espacio para el desarrollo social y cultural de la sociedad. (Dourojeanni, 2004)

El descuidar la contabilización total de las cuencas hidrográficas, plantea un grave dilema de política, tradicionalmente el manejo del agua se ha centrado en atender la demanda humana del agua potable, mediante tecnificación de la purificación de esta, pero este enfoque no estimula una debida relación entre el agua potable de calidad y las funciones ecológicas e hidrológicas naturales de una cuenca. La contabilidad del valor económico total de las cuencas hidrográficas y la integración de variables de las etapas primarias en las prácticas de manejo vigentes, hace pensar en otra opción de manejo, desde un punto de vista económico neoclásico, las comunidades tienden a marginar los beneficios marginales y los costos marginales, para formular y ejecutar las políticas, de manera que el sistema de manejo económico resulte rentable. Sin embargo, actualmente el valor económico total que se asigna a las cuencas hidrográficas tiende a ser inexacto. (Sega, 2013).

2.2 Procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas

El ciclo hidrológico (figura 2.1), se denomina al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, entre otros.). Como todo ciclo, su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre, ríos, lagos y mares, se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor resultante es transportado por las masas de aire en movimiento.

En determinadas condiciones, el vapor se condensa formando las nubes, que a su vez, pueden ocasionar precipitaciones que caen a la tierra. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse, o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes, o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otras forman grandes masas de agua como los lagos. El agua que se infiltra satisface la humedad del suelo y abastece los depósitos subterráneos, de donde puede fluir hacia las corrientes de los ríos, o bien descargar en los océanos, la que queda detenida en la capa vegetal del suelo es regresada a la atmósfera por transpiración (Villón, 2004).

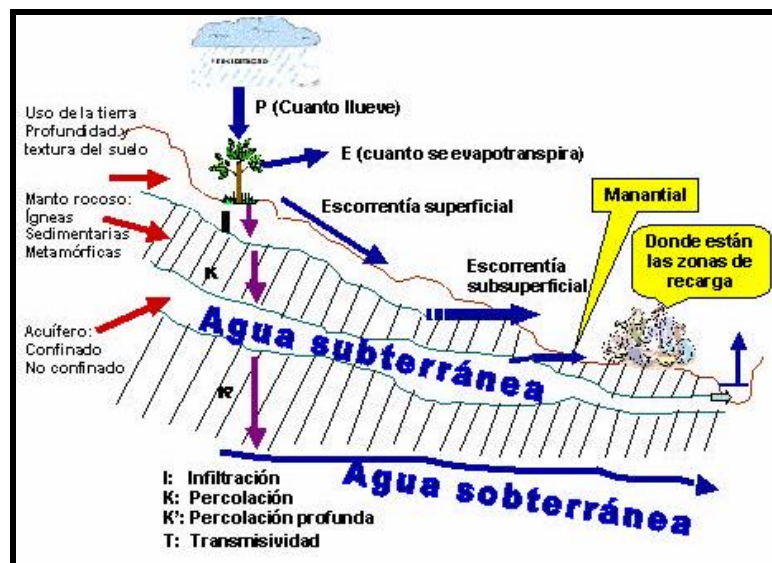


Figura 2.1: Ciclo hidrológico y aguas subterráneas, (Faustino 2006)

García *et al.* (2005) mencionan cinco enfoques básicos de una cuenca hidrográfica para el manejo y gestión de los recursos naturales, estos son: la cuenca como sistema, el enfoque socio-ambiental o antrópico, la cuenca como unidad de planificación y evaluación de impactos, el agua como recurso integrador de la cuenca y manejo de recursos naturales para la reducción de vulnerabilidad y riesgo a desastres naturales.

Para abordar la temática de las zonas de recarga hídrica necesariamente se tiene que hacer énfasis en algunos de los enfoques citados por García *et al* (2005), principalmente el enfoque de la cuenca como sistema, el agua como recurso integrador, el enfoque socio-ambiental. La relación del enfoque de sistema con el tema abordado en este documento, radica en que la cuenca es concebida como un sistema conformado por las interrelaciones dinámicas en el tiempo y el espacio de diferentes subsistemas (social, económico, político, institucional, cultural, legal, tecnológico, productivo, físico y biológico); por lo tanto, implica no solo ver a las zonas de recarga hídrica de manera aislada sino ver las interacciones que forma con los otros elementos de la cuenca.

2.2.1 Proceso de la recarga hídrica

El agua proveniente de las precipitaciones y que alcanza la superficie de la cuenca, después de saturar los espacios vacíos; poros y/o fisuras de la superficie, y que se llenen de agua las pequeñas depresiones superficiales, da inicio a dos tipos de movimiento: uno superficial siguiendo las líneas de máximo gradiente de energía y otro a través de los espacios vacíos del suelo y subsuelo de acuerdo con el gradiente piso-métrico y con la permeabilidad del medio (Muñoz, 1998).

El agua cuando se infiltra en la superficie terrestre y que no es retenida por la humedad se mueve hacia las corrientes sub superficiales o se infiltra hacia el manto freático. Otra de las fuentes que alimentan la recarga hídrica son los

volúmenes de agua que se almacenan sobre la superficie de una cuenca, concentrándose los corrientes de agua (Custodio & Llamas, 2001).

2.2.2 Factores que determinan la recarga hídrica

La capacidad que tiene un acuífero de infiltrar depende de las interacciones que se pueden suscitar entre el tipo de suelo, la formación geológica existente, el tipo de vegetación, la topografía y el régimen de lluvias, principalmente, que pueden presentar interacciones para favorecer o perjudicar la recarga de un acuífero. Entre los factores que determinan la recarga hídrica se encuentran (Padilla, 2003):

a) Precipitación.- La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 1997).

La precipitación es la cantidad de agua meteórica total, líquida o sólida, que cae sobre una superficie horizontal determinada, llamada sección pluviométrica. En general, es la superficie colectora del pluviómetro. Las precipitaciones agrupan todas las aguas meteóricas recogidas en una cuenca vertiente o una zona determinada. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha). (Castany, 1971).

Según Villón (2004), las precipitaciones se clasifican en relación al factor que provoca la elevación del aire en la atmósfera en: *Precipitación convectiva*: en tiempo caluroso, se produce una abundante evaporación a partir de la superficie del agua, formando grandes masas de vapor de agua, que, por estar más calientes, se elevan sufriendo un enfriamiento de acuerdo a la adiabática seca o húmeda. Generalmente viene acompañada de rayos y truenos, propias de las regiones tropicales, donde las mañanas son muy calurosas, el viento es calmo y ha y una predominancia de movimiento vertical del aire. *Precipitación orográfica*: se producen cuando el vapor de agua que se forma sobre la superficie de agua es empujado por el viento hacia las montañas, aquí las nubes siguen por las laderas

de las montañas, y ascienden a grandes alturas, hasta encontrar condiciones para la condensación y la consiguiente precipitación. *Precipitación ciclónica*: se producen cuando hay un encuentro de dos masas de aire, con diferente temperatura y humedad, las nubes más calientes son violentamente impulsadas a las partes más altas, donde pueden producirse la condensación y precipitación. Están asociadas con el paso de ciclones o zonas de baja presión. La *precipitación efectiva* según INAB (2003) es la porción de la precipitación que puede infiltrarse en el perfil del suelo y estar de forma disponible para ser aprovechada por las raíces de las plantas o bien alcanzar estratos más profundos como los acuíferos. Para Calvo (2005) la precipitación efectiva es la porción de lluvia que puede llegar a estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas, por lo que el aprovechamiento de la lluvia depende de factores tales como, la intensidad, duración y distribución de las lluvias, la velocidad de infiltración del suelo, la cobertura vegetal y la topografía de la superficie. Para efectos del estudio entenderemos por precipitación efectiva la cantidad de lluvia que infiltra y pueda efectuar una recarga hídrica o acuífera.

a) Evapotranspiración.- Monsalve citado por Fuentes (2005), define la evapotranspiración como la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas. El agua subterránea puede volver a la atmósfera por evapotranspiración cuando el nivel saturado queda próximo a la superficie del terreno. El mismo autor define evapotranspiración potencial y real de la siguiente manera: *Evapotranspiración potencial*: pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y transpiración de las plantas, que ocurriría en el caso que hubiera un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento. *Evapotranspiración real*: pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de evaporación y transpiración de las plantas.

b) Escorrentía: El agua de lluvia satisface inicialmente las demandas hídricas del suelo y el ambiente atmosférico que rodea los cultivos: la temperatura,

humedad relativa, lluvia, radiación solar y viento. Por efecto de estas cinco variables, se produce la transpiración de las plantas vía estomas y la evaporación del agua de la superficie del suelo. Simultáneamente, ocurre infiltración de agua en el suelo, parte de la cual se almacena en sus horizontes y otra recarga los acuíferos subterráneos, dependiendo de la textura, estructura, tipos de poros y contenido de materia orgánica del suelo. Cuando la precipitación pluvial ha cubierto todas las demandas, ocurre la esorrentía superficial.

La esorrentía es la cantidad del agua de lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo. Cuando el exceso de lluvia supera la capacidad de almacenamiento del suelo, el agua fluye en sentido longitudinal de la pendiente (aguas abajo), el exceso de agua escurre hacia los arroyos, quebradas, ríos, lagos y océanos (Núñez, 2001).

Según Villón (2004), el escurrimiento se clasifica en tres tipos: *Escurrimiento superficial*: es aquel que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo, el efecto sobre el escurrimiento total es inmediato y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que esta termine. *Escurrimiento subsuperficial*: es aquel que proviene de una parte de la precipitación infiltrada, el efecto sobre el escurrimiento total, puede ser inmediato o retardado. Si es inmediato se le da el mismo tratamiento que al escurrimiento superficial, en caso contrario, como escurrimiento subterráneo. *Escurrimiento subterráneo*: es aquel que proviene del agua subterránea, la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado.

d) Infiltración: Es el ingreso vertical descendente del agua de lluvia a través de la superficie de un suelo no saturado con agua. Decece con el tiempo de registro de una tormenta. Es influenciada por las propiedades físicas del suelo: textura, estructura, contenido de materia orgánica, grado de humedad inicial y presencia de grietas causadas por la condición mineralógica de suelo que tiene arcillas 2:1 expandibles. También es influenciada por la presencia de canalículos remanentes a causa de raíces muertas, cuya mineralización y humificación deja espacios huecos en el suelo -usualmente macroporos (Núñez 2001).

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. La conductividad hidráulica, la porosidad del suelo, la condición de la superficie y la capa vegetal son factores que afectan la tasa de infiltración (Faustino 2006). Maderey (2005) señala que la infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo; el agua infiltrada provee casi a todas las plantas terrestres y muchos animales, alimenta al agua subterránea y a la vez a la mayoría de las corrientes en el período de estiaje, reduce las inundaciones y la erosión del suelo. En el proceso de infiltración se pueden distinguir tres fases: **a.** Intercambio. Se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera a través de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas; **b.** Transmisión. Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable; **c.** Circulación. Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

La proporción de infiltración respecto al total de las precipitaciones depende de varios factores. La litología (la naturaleza del material geológico que aflora la superficie) influye a través de su permeabilidad, la cual depende de la porosidad, del diaclasamiento (agrietamiento) y de la mineralogía del sustrato. Por ejemplo, los minerales arcillosos se hidratan fácilmente, hinchándose siempre en algún grado, lo que da lugar a una reducción de la porosidad que termina por hacer al sustrato impermeable. Otro factor desfavorable para la infiltración es una pendiente marcada. La presencia de vegetación densa influye de forma compleja, porque reduce el agua que llega al suelo (interceptación), pero extiende en el tiempo el efecto de las precipitaciones, desprendiendo poco a poco el agua que moja el follaje, reduciendo así la fracción de escorrentía y aumentando la de infiltración. Otro efecto favorable de la vegetación tiene que ver con las raíces, especialmente las raíces densas y superficiales de muchas plantas herbáceas, y con la formación de suelo, generalmente más permeable que la mayoría de las rocas frescas (Faustino 2006).

2.3 Factores de la infiltración

La razón de recarga de un depósito de agua subterránea varía de acuerdo con la permeabilidad del suelo y de los otros materiales a través de los cuales debe percolar para alcanzar la zona de saturación. La oportunidad de infiltrar depende en mucho de la condición del suelo en cuanto al tamaño de sus partículas y la textura, en el cuadro 2.1, se determina el tipo de texturas clasificada según Cadena, 2012.

Cuadro 2.1.- Contenido de humedad del suelo de acuerdo a la textura

Texturas	Velocidad de infiltración (mm/hora)
Gruesa- arenoso	>30
Arenoso franco	15 – 30
Franco arenoso	12 – 18
Franco	8 – 14
Franco limoso	6 – 10
Areno limoso	20 – 30
Limoso	10 – 20
Arcillo limoso	5 – 8
Arcilloso	3 – 6

Fuente: Cadena, 2012.

Así mismo, la pendiente (cuadro 2.2) de la superficie constituye un factor importante, puesto que, si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración. En algunas áreas pareciera que las pendientes moderadas ofrecen condiciones mejores para infiltración que las enteramente planas. Una lluvia moderada de larga duración favorece también la infiltración.

Cuadro 2.2.- Tipos de pendientes en la cuenca

Pendientes	Tipo
0 – 12%	Relieve plano o ligeramente ondulado
12 – 25%	Relieve ondulado
25 – 50%	Relieve montañoso
50 – 70%	Relieve muy montañoso
>70%	Relieve escarpado

Fuente: Instituto geográfico militar, 2014

2.4 Capacidad de Infiltración

Es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hora.

La capacidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un valor casi constante a medida que la precipitación se prolonga, y es entonces cuando empieza el escurrimiento (Vélez, 2002).

2.4.1. Pruebas de infiltración del suelo

Una vez identificadas los puntos de muestreo, estos se establecen a nivel de campo con la ayuda de un sistema GPS. Para las pruebas de infiltración se debe utilizar el método de Cilindro invertido.

El Infiltrómetro: es un dispositivo que permite medir la capacidad de infiltración de los suelos, formado por un anillo de un diámetro de 6,03 cm, y un anillo exterior de 10,79 cm, además cuenta con un reloj temporizado con alarma de zumbador que indica las escalas de agua en milímetros en un tiempo de calibración del equipo por fabricación de 15 minutos.



Figura 2.2. Infiltrómetro de Turf Tec

Fuente: Autora

2.4 Fuentes de agua

Agua subterránea: Es la que ocupa todos los vacíos dentro del estrato geológico, comprende toda el agua que se encuentra por debajo del nivel freático. Es de gran importancia especialmente en aquellos lugares secos, donde el escurrimiento se reduce mucho en algunas épocas del año. Esta agua proviene de la infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirectas de los ríos o lagos (Villón 2004).

El agua procedente de las precipitaciones atmosféricas penetra en el terreno por gravedad, favorecida por la existencia de grietas o fisuras en las rocas, y por la misma porosidad de los materiales que forman el subsuelo, constituyendo así el agua subterránea también llamada “freática” (Meléndez y Fuster 1972).

Las aguas subterráneas constituyen las fases o etapas del ciclo del agua, no tienen necesariamente un origen magmático o profundo. A veces se olvida esta obviedad y se explotan las aguas de una cuenca hidrológica como si nada tuviera que ver con las precipitaciones o la escorrentía superficial, con resultados indeseables (Faustino 2006).

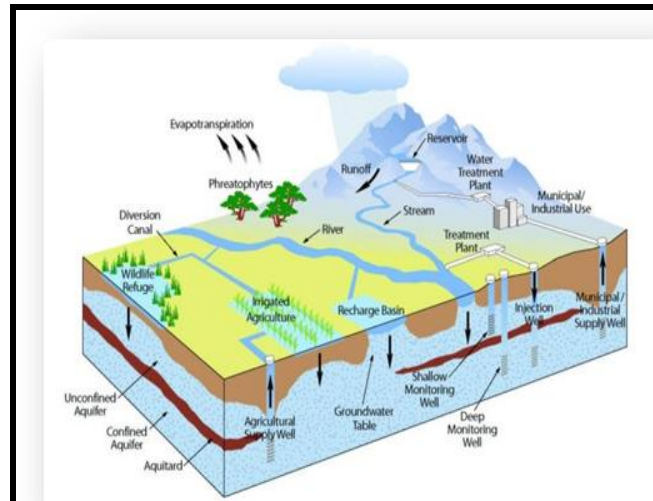


Figura 2.3.- Relaciones entre el agua superficial y el agua subterránea.

Fuente: Departamento de Recursos Hídricos de California.

En general, *agua superficial* son cuerpos como las quebradas, ríos, lagunas o lagos y subterráneo (acuífero, pozo), disponible o potencialmente disponible para utilizarla en cantidad suficiente y de calidad aceptable (Figura 2.4), en un emplazamiento determinado y durante un período de tiempo adecuado para satisfacer una demanda identificable (UNESCO, 1998).

Para Faustino 2006, describe que los *Manantiales* es la salida natural de agua de un acuífero a la superficie terrestre en un punto localizado. Estos se localizan en una discontinuidad del estrato impermeable, ladera, cauce de río, falla o diaclasa, dando origen a manantiales cuyo nombre recoge la situación: manantiales de ladera, de falla, de diaclasa, entre otros. Custodio y Llamas (2001), citado por INAB (2003), define los manantiales como zonas de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de los acuíferos o embalses subterráneos. Es decir que los manantiales son desagües o aliviaderos por los cuales sale la infiltración o recarga que reciben los embalses subterráneos y pueden ser locales o regionales. Así mismo para RAMSAR (2005), los manantiales superficiales que brotan de acuíferos son la fuente visible de agua de muchos ríos y otros tipos de humedales.

2.5 Acuíferos

Es aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Custodio 1998).

Se denomina acuífero a una masa de agua existente en el interior de la corteza terrestre debido a la existencia de una formación geológica que es capaz de almacenar y transmitir el agua en cantidades significativas, de tal forma que permiten extraer cantidades de agua, de una forma que es económicamente rentable (Faustino 2006).

Como acuífero se entiende la parte saturada del perfil del suelo y que tiene la facilidad de almacenar y transmitir el agua. El perfil del suelo está formado de sedimentos no consolidados o débilmente consolidados, depositados horizontalmente o simplemente estructurados, en capas mejor o peor definidas. Una característica común de estas capas es la de ser de poco espesor en relación con su extensión horizontal. Estas capas se clasifican en: permeables, semipermeables e impermeables (Villón 2004).

Capa permeable: Se dice que una capa es permeable cuando sus propiedades transmisoras de agua son favorables o, al menos favorables en comparación con los estratos superiores o inferiores. En una capa de este tipo la resistencia al flujo vertical es pequeña y puede ser generalmente despreciada de forma que únicamente deben tenerse en cuenta las pérdidas de energía causadas por el flujo horizontal.

Capa semipermeable: Una capa se considera semipermeable si sus propiedades transmisoras de agua son relativamente desfavorables. El flujo horizontal a lo largo de una distancia significativa es despreciable, pero el flujo vertical no puede despreciarse ya que la resistencia hidráulica del flujo es pequeña debido al espesor relativamente pequeño de las capas. Por consiguiente, el flujo de agua en las capas semipermeables se considera esencialmente vertical.

Capa impermeable: Una capa se considera impermeable si sus propiedades transmisoras de agua son tan desfavorables que solamente fluyen a través de ella, sea vertical u horizontal, cantidades de agua despreciables. Capas completamente impermeables son poco frecuentes cerca de la superficie del suelo, pero son comunes a mayores profundidades, donde han tenido lugar la compactación, cementación y otros procesos de consolidación.

De acuerdo a la combinación que tengan las capas del perfil del suelo que contienen aguas subterráneas los acuíferos pueden ser (Villón 2004):

Acuífero libre: llamado también acuífero freático o capa freática, es una formación permeable saturada limitada en su parte inferior por una capa impermeable. El límite superior está formado por la tabla de agua, la que se encuentra en equilibrio con la presión atmosférica. El agua en un acuífero libre se llama agua freática o libre.

Acuífero confinado: es una formación permeable completamente saturada de agua y cuyos límites superiores e inferiores son capas impermeables. En los acuíferos confinados, la presión del agua en ellos, es generalmente mayor que la atmosférica, por tal razón, el agua en pozos que penetran en tales acuíferos permanecen por encima del nivel superior de las capas permeables.

Acuífero semi confinado: es una formación permeable saturada, cuyo límite superior está constituido por una capa semipermeable y cuyo límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable. En la capa superior se encuentra la tabla de agua, cuya altura difiere a menudo a la carga piezométrica y al agua confinada en la capa permeable.

Acuífero semilibre: es en realidad una formación casi semiconfinada, en la cual la conductividad hidráulica de la capa semipermeable es tan grande que el componente horizontal de flujo de esta capa no puede ser despreciada. Este tipo de acuífero es una forma intermedia entre el tradicional, acuífero semiconfinado y el acuífero libre.

2.7 Zonas de recarga en cuencas hidrográficas

Se denomina recarga al proceso por el cual se incorpora a un acuífero el agua procedente de fuera del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (en general, la más importante) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero (Custodio, 1998). El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga y son sitios donde la capacidad de infiltración es alta.

Cuando una corriente o un tramo aportan con agua a la zona de saturación, se dice que es una corriente afluyente respecto del agua subterránea. Si por el contrario el agua subterránea se halla a una elevación superior a la de un río y percola hacia éste, se dice que la corriente es efluente de aquella. Algunas secciones de una corriente superficial son afluentes en tanto que otras pueden ser efluentes.

Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en “suelos de alta capacidad de infiltración” o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son utilizados (Losilla, 1986). Factores que afectan la recarga hídrica La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos, así como de la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que los terrenos muy inclinados favorecen la escorrentía superficial; por el contrario, los terrenos con poca pendiente retienen por más tiempo el agua, lo que favorece la infiltración (INAB, 2003).

Las áreas de mayor recarga son las que más interesa conservar, tanto en sus características físicas de permeabilidad, que afectan la magnitud de la recarga como en actividades que produzcan contaminación que fácilmente se puedan

infiltrar al acuífero, afectando la calidad de sus aguas (Losilla, 1986 citado por Castro, 2009).

2.7.1 Recarga y zonas de recarga

Para Benfelt (2000) citado por INAB (2005) recarga es el nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un acuífero. Este proceso ocurre de manera natural cuando la lluvia se filtra hacia un acuífero a través del suelo o roca. El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga.

La recarga es el proceso de incorporación de agua a un acuífero producido a partir de diversas fuentes: de la precipitación, de las aguas superficiales y por transferencias de otro acuífero o de un acuitardo. Los métodos para estimarla son de variada naturaleza entre los que se destacan los balances hidrológicos, el seguimiento de trazadores ambientales o artificiales (químicos e isotópicos), las mediciones directas en piezómetros, la cuantificación del flujo subterráneo y las fórmulas empíricas entre los más comunes. Los resultados son inseguros debido a la incertidumbre de los componentes considerados en las ecuaciones, la naturaleza empírica o semiempírica de las fórmulas utilizadas, la simplificación de las variables y de los procesos y errores en las mediciones de calibración (Carrica *et al*, 2004).

En términos generales se denomina recarga al proceso por el cual se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero, si los mismos son externos al acuífero o sistema acuífero en consideración (Custodio, 1998).

Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en “suelos de alta capacidad de infiltración” o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son explotados (Losilla, 1986).

Los fenómenos más importantes concernientes a los acuíferos desde el punto de vista de la hidrología son la recarga y descarga de ellos. Normalmente los acuíferos se van recargando de forma natural con la precipitación que se infiltra en el suelo y en las rocas. En el ciclo geológico normal el agua suele entrar al acuífero en las llamadas zonas de recarga, atraviesa muy lentamente el manto freático y acaba saliendo por las zonas de descarga, formando manantiales y fuentes que devuelven el agua a la superficie (Faustino 2006).

La descarga de un acuífero a un río es un fenómeno habitual como también es normal el contrario, la recarga de un acuífero por un río. Existiendo una relación acuífero-río-acuífero muy importante en la cual el sentido del flujo depende básicamente de los niveles de agua en el río y en el acuífero, así como de la geomorfología de la zona (Faustino 2006).

Por otra parte, la recarga natural tiene el límite de la capacidad de almacenamiento del acuífero de forma que en un momento determinado el agua que llega al acuífero no puede ser ya almacenada y pasa a otra área, superficie terrestre, río, lago, mar o incluso a otro acuífero. La capacidad de almacenamiento de un acuífero dependerá del espesor y profundidad, esto se refiere a la “geometría de los acuíferos solos, en conjunto o interconectados” (Faustino 2006).

La cantidad de recarga de un acuífero, depende en cierto modo de la extensión del área de entrada o de captación. De hecho, los acuíferos más productivos son los lechos permeables situados en áreas extensas. Así mismo, también se tiene que la infiltración es mayor cuando en la zona de recarga o entrada se da además de la precipitación local el escurrimiento superficial de alguna área tributaria. Esto sucede principalmente en pendientes aluviales que reciben aguas superficiales provenientes de áreas montañosas con fuerte precipitación (INAB, 2003).

Las áreas de mayor recarga son las que más interesa conservar, tanto en sus características físicas de permeabilidad, que afectan la magnitud de la recarga como en actividades que produzcan contaminación que fácilmente se puedan

infiltrar al acuífero afectando la calidad de sus aguas. Debido a que gran parte de la precipitación es de origen orogénico, las montañas y zonas altas, principalmente si su suelo y subsuelo son permeables, debido a su mayor constancia de precipitación son por lo general áreas de recarga importantes (Losilla 1986).

2.7.2 Factores que afectan la recarga hídrica

La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial, y del caudal de los ríos; así mismo varía o depende de acuerdo a la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que las muy inclinadas favorecen la escorrentía superficial y, si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración (INAB 2003).

Los acuíferos recargan en cualquier área en que se presentes las siguientes condiciones: a) exista suelo o roca permeable en superficie, b) que esté en comunicación hidráulica con los acuíferos, y c) que esté temporalmente en contacto con agua. Todos estos factores definen la recarga, ocurren en diferentes grados relativos en las capas que sobreyacen a los acuíferos. Para conocer y delimitar las principales zonas de recarga de un acuífero y su mecánica de funcionamiento, se necesitan muy variados y específicos estudios hidrogeológicos (Losilla 1986).

Según INAB (2003) los factores que afectan la recarga hídrica son:

El clima: dentro de este los factores que afectan la recarga hídrica son, la evapotranspiración, debido a las pérdidas de agua por la transpiración de las plantas y la evaporación del agua y la precipitación pluvial.

El suelo: debido a que suelos impermeables o compacto impiden o dificultan la infiltración o recarga hídrica, mientras que suelos permeables facilitan a garantizan la recarga en los acuíferos. Las características del suelo que influyen en

la recarga son, la textura, la densidad aparente, grado de saturación del suelo (contenido de humedad) y la capacidad de infiltración.

Topografía: esta influye debido al tiempo de contacto que permite entre el agua con la superficie, pendientes fuertes favorecen la escorrentía superficial, disminuyen el tiempo de contacto del agua con la superficie y reducen la infiltración del agua o recarga de los acuíferos.

Estratigrafía geológica: es muy importante estudiar la estratigrafía de la zona, es decir conocer la disposición de los diferentes materiales geológicos en los distintos estratos o capas del suelo hasta llegar a la zona saturada (agua subterránea), ya que estos pueden afectar grandemente la cantidad de recarga hídrica.

Cobertura vegetal: esta disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie y facilitando el proceso de infiltración del agua, por otra parte, una gran cantidad de la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intersección; en este factor es necesario considerar la profundidad radicular y la capacidad de retención vegetal.

Escurrimiento: el agua que cae proveniente de las precipitaciones forma flujos superficiales, sub superficiales y subterráneos los cuales son captados por los cauces de los ríos.

2.7.3 Clasificación de las zonas de recarga hídrica

De acuerdo con el movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, las zonas de recarga hídrica se clasifican en (Faustino 2006):

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 su 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 el efecto “esponja” 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).

El mal manejo de los recursos naturales consecuentes del desarrollo, el crecimiento demográfico, urbanístico, industrial y la expansión de las fronteras agropecuarias conducen a los siguientes efectos e implicaciones en los acuíferos (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3.- Efecto de la actividad antrópica sobre los acuíferos

Actividades	Implicaciones en el acuífero
Mayor explotación de las aguas subterráneas	Descenso del nivel de agua Mejoramiento del drenaje en tierras bajas (control de inundaciones). Aumento en costos de bombeo. Intrusión de aguas salinas en zonas costeras (degradación). Disminución de descargas naturales (manantiales, flujos base).
Impermeabilización de suelos (en zonas de recarga). Deforestación (compactación de los suelos por lluvia y erosión por mayor escorrentía superficial) Construcciones (urbanizaciones, carreteras)	Menor recarga (menor potencial de los acuíferos, aumento de la escorrentía superficial y erosión en zonas de recarga)
Intensificación de actividades humanas	Contaminación de agua y suelo

Fuente: Losilla, 1986

2.8 Protección de zonas de recarga hídrica

González (2011), realizó el estudio Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la sub-cuenca del río Zaratí. En este estudio se analizó el marco legal e institucional existente en la sub-cuenca del río Zaratí; relacionado con las zonas de recarga hídrica y el agua para consumo humano, dando como resultado el desconocimiento de las leyes y la no existencia de normas relacionadas explícitamente sobre zonas de recarga hídrica (ZRH), por lo que se hace necesario seguir profundizando en el tema. Se identificaron de manera participativa, con actores locales, las principales fuentes de agua y las zonas potenciales de recarga hídrica (ZPRH) y se compararon con las evaluadas bajo los criterios técnicos y climáticos, dando como resultado que las mejores condiciones geomorfológicas y climáticas para que ocurra una buena recarga hídrica están en la parte alta de la sub-cuenca del río Zaratí.

2.9 Evaluación de las zonas de recarga hídrica

Ramírez y Vargas (2010), en Honduras realizó la investigación Delimitación y evaluación de las zonas de recarga hídrica para las Montañas de El Volcán y La Chorrera. En esta investigación se menciona que Honduras es un país montañoso, contiene grandes cuencas hidrográficas con importantes zonas de recarga hídrica localizadas en las partes más altas de las cordilleras. Tales zonas están conformadas esencialmente por áreas impactadas por nubes y neblinas. Los sistemas montañosos de El Volcán y La Chorrera, tienen en sus porciones más altas zonas de recarga que abastecen de agua a importantes centros poblados y de enriquecer los mantos freáticos subterráneos en las tierras bajas. El presente estudio muestra claramente que las zonas de recarga se inician a partir de los 1.450 o 1.500 msnm. En estas zonas la biotemperatura media anual oscila entre los 12 y 18 °C y la precipitación promedio total anual entre los 2.000 y 4.000 mm. En términos hidrológicos estas zonas deberían estar cubiertas con bosque latifoliado en estado maduro multiestratificado, cobertura que maximiza el proceso de la precipitación horizontal u oculta. El uso actual de la tierra en la zona de recarga de El Volcán posee 51% de bosque latifoliado, 32% de bosques de pino y 12% sistemas agroforestales. La Chorrera tiene 39% de pino, 28% de barbecho forestal y sólo un 22% de bosque latifoliado lo que indica que está más degradada. También se explica que el avance de la frontera agrícola ha sido y continua siendo una fuerte amenaza para los bosques latifoliados, ante tan crítica situación se sugiere legalizar las zonas de recarga como áreas protegidas, gestionar la protección y manejo y en el caso concreto de la zona La Chorrera proceder a la restauración.

2.10 Determinación de la recarga hídrica potencial

Rodríguez y Pérez (2014), determinaron la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara de Cuba empleando la metodología de balance hídrico de Schosinsky, (2006); mediante un Sistema de Información Geográfica

identificando las áreas de recarga hídrica del acuífero de la cuenca hidrográfica Guara. Se estableció un procedimiento para la identificación de las principales zonas de recarga hídrica. También se proponen acciones de protección y manejo de la cobertura vegetal, hídrico, conservación de suelos y educación ambiental para la población comunitaria que reside en dichas áreas lo que contribuyó al ordenamiento del territorio de este ecosistema. Para determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, se realizó un balance hídrico de la cuenca. Con el uso de cartografía en formato digital, mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generó cartografía digital que representan el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la precipitación en el área de estudio y con la base de datos se determinaron los coeficientes de las variables: textura del suelo (k_{fc}), pendiente (K_p) y tipo de cobertura vegetal (K_v). La superposición de estos mapas permitió identificar 29 Polígonos Biofísicos (PB), que son áreas con valores iguales de: evapotranspiración potencial (ETP), humedad inicial (H_{si}), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), densidad aparente (DA), infiltración básica del suelo (f_c), intercepción de la lluvia y profundidad de las raíces extractoras de agua. En general, en la cuenca se determinó que se recargan aproximadamente 79 millones de m^3 de agua anualmente.

2.11 Determinación del potencial de recarga de las zonas y elementos biofísicos para la evaluación de la zona de recarga

Para la identificación de las áreas con mayor potencial de recarga hídrica, se aplicó la ecuación desarrollada por Matus Silva (2007); la cual considera cinco variables y las respectivas ponderaciones que a cada una deben ser asignadas. La ecuación general de Matus se aplica para determinar las zonas de recarga (Z_r) es la siguiente:

$$\mathbf{ZR} = [0,27(\text{Pend}) + 0,23(\text{Ts}) + 0,12(\text{Tr}) + 0,25(\text{Cve}) + 0,13(\text{Us})]$$

Dónde:

- Zr: Potencial de Recarga
- Pend: Pendiente
- Ts: Tipo de suelo
- Tr: Litología (Tipo de roca)
- Cve: Cobertura vegetal
- Us: Usos del suelo

- a) *Pendiente* (Pend).- En el relieve se pueden identificar superficies planas e inclinadas donde la trayectoria del agua sigue direcciones paralelas; las superficies cóncavas el agua se desplaza concentrándose en el lugar más bajo y en las superficies convexas el agua se mueve en diferentes direcciones (UNESCO, 2006). En relieves con elevaciones altas y escarpados, el proceso de infiltración y recarga disminuye y se aceleran procesos de erosión y compactación del suelo, en relieves planos ligeramente ondulados, se favorece el proceso de infiltración y recarga hídrica al permitir un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo (Matus, 2007).
- b) *Tipo de suelo* (Ts).- según Matus (2007); el análisis del tipo de suelos importante ya que refleja la textura, porosidad, permeabilidad y compactación. Cuando la porosidad es mayor la capacidad de infiltración incrementa. Las zonas de recarga hídrica deben ser muy permeables para asegurar una alta capacidad de infiltración; es decir que en suelos de textura gruesa, porosos y permeables se dan buenos niveles de recarga. Por el contrario, los suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados impiden o dificultan la recarga hídrica.
- c) *Litología* (Tr).- del análisis y del estudio de las rocas permite determinar si la recarga es sub superficial (recarga hídrica) o profunda de aguas subterráneas (acuífero). Se puede tener una zona con buenas características climáticas, de pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y buen uso del suelo que

favorezcan la recarga del acuífero, pero si existe una capa de material rocoso o arcilla impermeable que no permite el paso del agua hacia las capas profundas del suelo, no habrá recarga de las aguas subterráneas sino que se formará un flujo de agua sub superficial, con movimiento horizontal, que saldrá a la superficie a través de un manantial o alimentará a un río (INAB, 2003).

- d) *Cobertura vegetal* (Cve).- es el porcentaje del suelo ocupado por comunidades vegetales permanentes, es un factor que influye en la infiltración del agua, ya que permite un mayor contacto con el suelo, disminuye la velocidad de escorrentía, la erosión, el impacto de la gota de lluvia y la sequedad causada por los rayos del sol. Todo esto contribuye a conservar las características del suelo que favorece la recarga hídrica. La cobertura vegetal puede facilitar la infiltración del agua aún en suelos duros y arcillosos (Matus, 2007).

- e) *Usos del suelo* (Us).- Es necesario encontrar los usos que, por sus características, favorecen la infiltración del agua, como los sistemas silvopastoriles y agroforestales, el uso e incorporación de materia orgánica, o los asociados de cultivos. Además, hay que reconocer aquellos cultivos que afectan las características de suelo, dificultan la infiltración y favorecen la evaporación, la compactación y el escurrimiento superficial del agua, como la agricultura intensiva sin obras de conservación, la ganadería extensiva, la labranza convencional, o el uso de maquinaria agrícola (Matus, 2007).

2.12 Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica

Matus (2007) Elaboró una metodología participativa para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, en Nicaragua. En esta investigación se realizó con el objetivo de elaborar una propuesta metodológica para la

identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, la cual combine el conocimiento técnico-científico con el local y/o tradicional. Se aplicó la propuesta metodológica en conjunto con los comités locales de cuenca. De igual manera, se validó la propuesta mediante la aplicación de mapas y el software ArcView, aplicando el modelo propuesto, el método RAS (Recarga de Agua Subterránea) y comparando los resultados de las tres aplicaciones. Con base en el conocimiento local de comunitarios y técnicos, se propusieron estrategias y acciones para el manejo adecuado y sostenible de las zonas de recarga hídrica. En el cumplimiento de los objetivos se utilizaron talleres participativos donde a la vez se usaron herramientas participativas, revisión de literatura, diálogo semi-estructurado y visitas de campo. Los resultados mostraron que:

- a) no existen diferencias significativas entre la opinión de comunitarios, técnicos y especialistas con relación a los criterios (pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y tipo de roca) a usar en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica;
- b) los actores locales disponen del conocimiento y experiencia para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica en su territorio.
- c) no existen diferencias significativas entre los resultados de aplicar la metodología con los comunitarios y los obtenidos de aplicar el modelo propuesto con la aplicación del software ArcView.
- d) hay bastante similitud o concordancia entre los resultados del método RAS (mapa de recarga), con los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto (mapa potencial de recarga).
- e) se sugieren estrategias y/o acciones para el manejo adecuado y sostenible de zonas de recarga hídrica.

2.13 Aplicación de herramientas SIG en la identificación de zonas de recarga

Los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** constituyen una tecnología para gestionar y analizar la información espacial y temporal. Entre muchas aplicaciones, representan una herramienta muy útil en la integración de la

información necesaria para el manejo y procesamiento de datos hidrológicos y de calidad del agua de una cuenca o región.

El conjunto de datos que se originan con el análisis de los recursos y actores que intervienen en una micro cuenca hidrográfica, pueden ser almacenados y representados en los SIG, permitiendo la especialización de los mismos, teniendo como resultado final los mapas en los cuales se encuentra la información detallada de cada uno de los parámetros de la zona de estudio. Las aplicaciones de ArcView, en elaboración de mapas temáticos para realizar balance climático y análisis de recarga hídrica, análisis espacial de las zonas potenciales de recarga hídrica, SIG como herramientas de apoyo en la determinación de zonas de recarga hídrica (metodologías), análisis espacial de las variables que intervienen en las diferentes metodologías, zonificación de áreas potenciales de recarga hídrica.

2.14 Situación de los recursos hídricos aprovechados por EMAPA-I

De acuerdo a los informes del estudio “Diagnóstico Ambiental de la Micro Cuenca del Río Tahuando”, elaborado por PROFAVOR en 2005 y los actuales informes de las captaciones aprovechadas por EMAPA – I para abastecer los sistemas Ibarra y Sur oriental se identifican los siguientes:

Cuadro 2.4.- Inventario de caudales del Sistema de Ibarra

INVENTARIO CAUDALES DE VERTIENTES Y BOMBEO					
NOMBRE	TIPO	USUARIO	CAUDAL 2005 lt/s	CAUDAL 2015 lt/s	ALTITUD
Yuyucocha	Vertiente	EMAPA I y Otros	300.0	220.0	2320
Pozo 1 Yuyucocha	Pozo somero	EMAPA I	85.0	72,59	2340
Pozo 2 Yuyucocha	Pozo somero	EMAPA I	55.0	56,9	2330
Pozo 3 Yuyucocha	Pozo somero	EMAPA I	60.0	57,5	2325
POZO LA QUINTA	Pozo somero	EMAPA I	40.0	--	2290

Pozo Santa Clara	Pozo somero	EMAPA I	15.0	15.0	--
La Palestina	Vertiente	EMAPA I	53.2	--	
Guaraczapas	Vertiente	EMAPA I	140.0	142.0	2890
La Carbonería 1	Vertiente	EMAPA I	-	2,2	
La Carbonería 2	Vertiente	EMAPA I	-	3,5	
La Carbonería 3	Vertiente	EMAPA I	-	4	
El Estanco	Vertiente		1.2	--	3349
La Merced Baja	Vertiente		3.0	--	2996
El Milagro (Junta de Aguas)			3.0	--	
20 de Octubre			3.0	--	
Chorlaví			6.0	--	
		Total	764.4	573, 69	

Fuente: EMAPA – I, 2005-2015.

En el informe de EMAPA-I, sobre las captaciones de Ibarra en el 2010, se detalla que el Sistema Ibarra, abastece la ciudad de Ibarra, la parroquia de La Esperanza y alrededor del 50% de la población de San Antonio (133.000 personas aproximadamente) y utiliza alrededor de 533,5 l/s de agua subterránea.

Del caudal total de la vertiente de Guaraczapas (158 l/s), abastece la totalidad de las parroquias La Esperanza y Caranqui (Ibarra urbano) y alrededor del 50% de la población de San Antonio y la parroquia urbana de Caranqui. Se captan 11 afloraciones naturales localizadas en las laderas del cerro Cunrru.

Los pozos Yuyucocha 1, 2 y 3 y la vertiente Yuyucocha se ubican en el sector sur de la ciudad de Ibarra en el área urbana, en terrenos propiedad de EMAPA Ibarra. El pozo 1 tiene una profundidad aproximada de 50 m; el 2 (31 m) y el 3 (42 m); estos se construyeron en los años 1985, 1996 y 2003 respectivamente. Los pozos 1, 2 y 3 se utilizan las 24 horas del día, los 365 días del año, solamente dejan de operar cuando se realizan labores de mantenimiento.

2.15 Captación de agua de EMAPA-I

Imbabura está entre las cinco provincias que superan el 80% de abastecimiento de agua a su población. Eso revela los indicadores del último censo de población del 2010. Las otras provincias son Galápagos, Pichincha, Carchi y Azuay.

La mayor cobertura de Imbabura está en la ciudad de Ibarra, se abastece de agua subterránea que mediante sistemas de bombeo se extrae el agua del pozo Yuyococha I, ubicado al sur de Ibarra. Se trata de un sistema electromecánico, compuesto por motores y bombas sumergibles, que succiona el líquido desde 90 m de profundidad. Este es uno de los 6 pozos que abastecen de agua potable a los pobladores de la capital provincial.

Según el señor Milton Franco, técnico de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra, el líquido es de buenas características por lo que solo requiere aireación y desinfección. Ese proceso se ejecuta en la planta de tratamiento de Caranqui. El 90% de agua que se consume en la zona urbana de Ibarra es de origen subterráneo. En el cantón hay 37 captaciones entre pozos profundos, vertientes y quebradas que producen un total de 680 l/s. Guaraczapas, situada en la comuna de Zuleta, es la fuente natural más grande con 158 l/s. La empresa EMAPA-I distribuye en promedio 1 millón de m³/mes. Según los moradores del Barrio Los Ceibos manifiestan que el agua de dotación es fresca, aunque con mucho cloro en horas de la mañana. Este barrio se abastece con agua de la fuente de Guaraczapas y de la planta de Caranqui.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en Imbabura el 81,87% de las 101.086 viviendas tiene el servicio de una red pública de agua potable. El resto recurre a pozos, ríos y carro repartidor del líquido. Los cantones Ibarra y Otavalo son los mejor atendidos. Sin embargo, la cobertura no es total. En el primero cubre al 93,09% de los 181.175 habitantes, en el segundo llega al 98% de 52.753 pobladores del área urbano.

Patricio Aguirre, ex gerente de la EMAPA-Ibarra, manifiesta que el sector rural es el más vulnerable al no tener agua de calidad, además señala falencias en los sistemas, porque son administrados por las comunidades. Se refiere a 45 juntas de agua potable de Ibarra catastradas por el Ministerio de la Vivienda (MIDUVI). En Imbabura hay en total 165. Hace tres años, la Dirección de Salud de Imbabura realizó una evaluación a la calidad del servicio del agua que ofertan esas organizaciones comunitarias. "Solo en el 25,5% había rasgos seguros de cloración, mientras que el 74,5% no se ajusta a las medidas de seguridad establecida en la norma INEN". Las cifras corresponden al Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Ibarra (Diario El Comercio, 2013).

2.16 Sistema Ibarra

El Sistema que abastece la ciudad de Ibarra, la parroquia de La Esperanza y alrededor del 50% de la población de San Antonio (133.000 personas aproximadamente), utiliza alrededor de 533,5 l/s de agua subterránea.

El sitio donde se ubica Guaraczapas es parte de la Hacienda Zuleta. Las afloraciones se encuentran distribuidas en un área de aproximadamente 4 hectáreas, la cual se encuentra cercada como medida de protección. Guaraczapas, con un caudal de 158 l/s, abastece la totalidad de las parroquias La Esperanza y Caranqui (Ibarra urbano) y alrededor del 50% de la población de San Antonio y la parroquia urbana de Caranqui. Se capta 11 afloraciones naturales localizadas en las estribaciones del cerro Cunro.

El sistema se construyó entre 1968 y 1969. Para su captación fue necesario realizar obras de drenaje a base de galerías de infiltración y drenes (IMI, 1974).

Los pozos Yuyucocha 1, 2 y 3 y la vertiente se ubican en el sector sur de la ciudad de Ibarra, en el área urbana, en terrenos de propiedad de EMAPA-I. El pozo 1 tiene una profundidad aproximada de 50 m, el 2 de 31 m y el 3 de 42 m; estos se construyeron en los años 1985, 1996 y 2003 respectivamente. Los pozos 1, 2 y 3 se utilizan las 24 horas del día, los 365 días del año, solamente se dejan de

funcionar cuando se realizan labores de mantenimiento (Franco, D. 2005, comunicación personal).

2.17 Constitución política del Ecuador

La Constitución Política del Ecuador de 2009, indica en el Título II Derechos, Capítulo Segundo Derechos del Buen Vivir, Sección Segunda Ambiente Sano, Art. 14 indica: Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

Capítulo segundo derechos del Buen Vivir

Sección primera agua y alimentación

Art. 12.- El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

El artículo 71 del Capítulo séptimo indica que la naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Además el Art. 74 menciona que las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir, pero los servicios ambientales no serán susceptibles de apropiación; su producción, prestación, uso y aprovechamiento serán regulados por el Estado (www.asambleanacional.gov.ec).

En el título VI RÉGIMEN DE DESARROLLO, Capítulo I, artículo 276 se establece como objetivo principal un desarrollo sustentable y con equidad en el acceso a los recursos, teniendo como objetivo recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural.

En el Art. 411 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; y en el Art. 412 la autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control. Esta autoridad cooperará y se coordinará con la que tenga a su cargo la gestión ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico (www.asambleanacional.gov.ec).

El Plan Nacional del Buen Vivir dentro del objetivo 7, manifiesta que se deben Garantizar los derechos de la naturaleza, y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global, lo cual se enmarca dentro del manejo y preservación de los acuíferos que proporcionan agua a la ciudad de Ibarra.

La Ley de Aguas del Ecuador, del Registro Oficial de mayo de 2004, en el Art. 2 cita: Las aguas de ríos, lagos, lagunas, manantiales que nacen y mueren en una misma heredad, nevados, caídas naturales y otras fuentes, y las subterráneas, afloradas o no, son bienes nacionales de uso público, están fuera del comercio y su dominio es inalienable e imprescriptible; no son susceptibles de posesión, accesión o cualquier otro modo de apropiación.

Así mismo en el **TÍTULO VIII** de la Concesión de Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, de esta misma ley, menciona en su Art. 43.- Nadie podrá

explotar aguas subterráneas sin autorización del Consejo Nacional de Recursos Hídricos y, en caso de encontrarlas, la concesión de derechos de aprovechamiento está sujeta, a más de las condiciones establecidas en el Art. 24, a las siguientes: a) Que su alumbramiento no perjudique las condiciones del acuífero ni el área superficial comprendida en el radio de influencia del pozo o galería; y, b) Que no produzca interferencia con otros pozos, galerías o fuentes de agua y en general a otras afloraciones preexistentes.

De esta manera se salvaguarda la integridad de los acuíferos de acuerdo a lo establecido por la ley.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo consiste en la descripción detallada de los materiales y métodos que se utilizaron para establecer soluciones al problema planteado.

3.1 Ubicación del área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en la cuenca del río Tahuando, ubicada en la provincia de Imbabura, en el cantón Ibarra, en las parroquias Ibarra, San Antonio, La Esperanza, Angochagua y una pequeña parte en la provincia de Pichincha, cantón Cayambe, parroquia Olmedo. Además, para la delimitación del área de estudio se solicitó información de los estudios elaborados por la EMAPA-I, realizándose así la identificación y la ubicación de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería.

De la revisión de los estudios realizados por la EMAPA-I, se obtuvieron las coordenadas referenciales de los acuíferos y de las zonas de recarga, las cuales se detallan en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1.- Coordenadas referenciales de la zona de estudio

Coordenadas UTM				
Datum: WGS 84, Zona 17 Sur				
Acuíferos	Tipo vertiente / pozo	Norte	Este	Altitud (msnm)
Yuyucocha	Vertiente-Pozo	10035834	820245	2279
Santa Clara	Pozo	10024943	827974	3640
La Carbonería	Vertiente	10032754	827119	3271
Guaraczapas	Vertiente	10027881	823658	2720

Fuente:

EMAPA-I,

2005.

Con la información cartográfica se generó el mapa base de la cuenca del río Tahuando (ver figura 3.1) y con las coordenadas geográficas referenciales procesadas con el software ArcGIS, además se realizaron recorridos de campo para ubicar y describir las vertientes y los pozos.

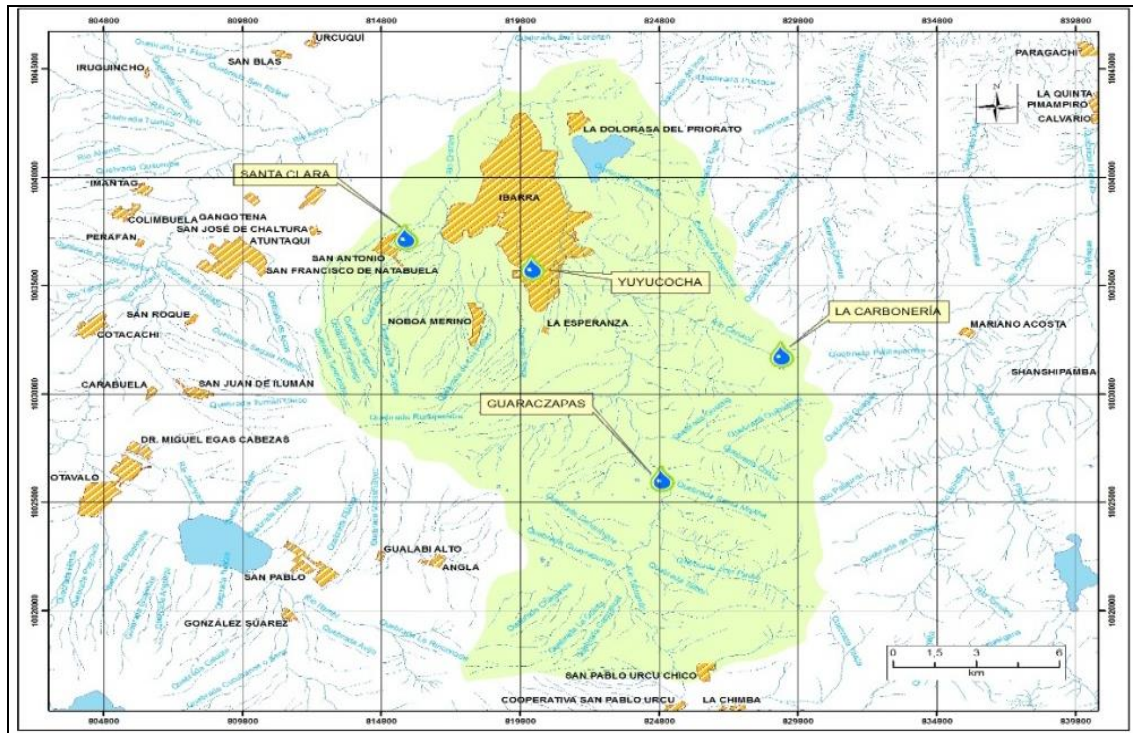


Figura 3.1.- Localización de los acuíferos

Elaboración: La Autora

En los recorridos de campo se tomaron coordenadas UTM de cada uno de los acuíferos, con el navegador GPS, en la proyección Universal Transversa de Mercator, Datum WGS 84 zona 17 Sur, los puntos fueron procesados para el respectivo análisis aplicando herramientas SIG, y posteriormente elaborar los respectivos mapas de ubicación y mapa base.

3.2 Materiales

Los materiales y equipos que se utilizaron durante el desarrollo del presente estudio se describen en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2: Materiales y equipos empleados.

Materiales:	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> - Cartas topográficas digitales del IGM de Ibarra (M1240), San Pablo del Lago (M110) y Cayambe (M0359) a escala 1:50000. - Coberturas digitales en formato shapefile (shp) del Sistema Nacional de Información (SNI). - Datos de las estaciones meteorológicas de Ibarra, Zuleta y San Pablo del Lago (INAMHI). - Imágenes aerotransportadas del Proyecto SIGTIERRAS (escala 1:5000). - Libretas de campo. - Software SIG: ArcGis 10.1, ArcMap con licencia del Laboratorio de Geomática. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cámara digital - Computador portátil - Vehículo 4*4 - Flexómetro de 30 m - Navegador GPS Garmin 60Csx - Impresora EPSON L555 - Infiltrómetro Turf Tec - Memoria portátil (Flash Memory Drive)

Fuente: Autora

3.3 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos se aplicó la siguiente metodología:

3.3.1 Identificación cartográfica de las zonas de recarga hídrica.

La identificación cartográfica consistió de las siguientes actividades:

1. Se realizó la recopilación de informes realizados por la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra, EMAPA – I, se visualizaron digitalmente las cartas topográficas de Ibarra, San Pablo del Lago y Cayambe, para delimitar la cuenca hidrográfica, generándose el mapa preliminar del área de estudio.
2. Se realizaron recorridos de campo para la recopilación de datos de ubicación de las zonas de recarga y los acuíferos, para elaborar los mapas respectivos.
3. En el recorrido de campo de los acuíferos se tomaron las coordenadas en proyección Universal Transversa de Mercator, Datum WGS 84 zona 17Sur, considerando las condiciones climatológicas, geológicas, edáficas y topográficas se identificaron los sitios de recargas hídricas.

4. Para generar la información cartográfica a escala 1:50.000 se utilizó la cartografía digital del Sistema Nacional de Información (SNI, 2013) a escala 1:50.000 y coberturas de uso actual del suelo y vegetación del Ministerio del Ambiente, y la información digital de pendientes, textura y litología de la cuenca, los cuales permitieron generar los mapas temáticos del área de estudio.

3.3.2 Análisis de las principales características de las zonas de recarga hídrica, en base a las variables: pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y velocidad de infiltración del suelo.

Se realizaron las siguientes actividades:

1. Luego de los recorridos de campo se procesó la información cartográfica de la cuenca y se describieron las variables: cobertura vegetal, uso actual del suelo, uso potencial, tipos de suelos, pendientes del terreno, litología, textura del suelo, zonas de vida de Holdridge, hidrología, profundidad del suelo, precipitación; para determinar cada una de las características edafo-climáticas de los acuíferos.
2. Generados los mapas de cobertura vegetal, litología, pendientes, uso de suelo y textura del suelo, se elaboró el modelo cartográfico mediante la herramienta Model Builder de la zona de recarga, con la ayuda de las herramientas del software ArcGis 10.2.
3. Se realizó el análisis geo-espacial de las variables del modelo cartográfico en formato raster, asignando parámetros de acuerdo a la fórmula propuesta por Matus (2007).
4. Posteriormente se realizaron pruebas de infiltración en sitios estratégicos (bosque, matorral, cultivos, suelo sin vegetación) para determinar la velocidad a la que se infiltra el agua en el suelo para asignar como parámetro en la comprobación en campo de las zonas de recarga identificadas cartográficamente.

3.3.3 Aplicación de la metodología para identificar las zonas de recarga hídrica

Se determinaron cartográficamente mediante la herramienta SIG los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, se realizó la sobreposición de cartografía usando el geoproceso de álgebra de mapas. Los datos que se generaron respondieron a los coeficientes de las variables: textura del suelo, pendiente, litología, precipitación, tipo de suelo y cobertura vegetal. Con el uso de la cartografía en formato digital, por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generaron mapas temáticos que representan la textura del suelo, pendiente del terreno, litología, uso del suelo, cobertura vegetal y precipitación.

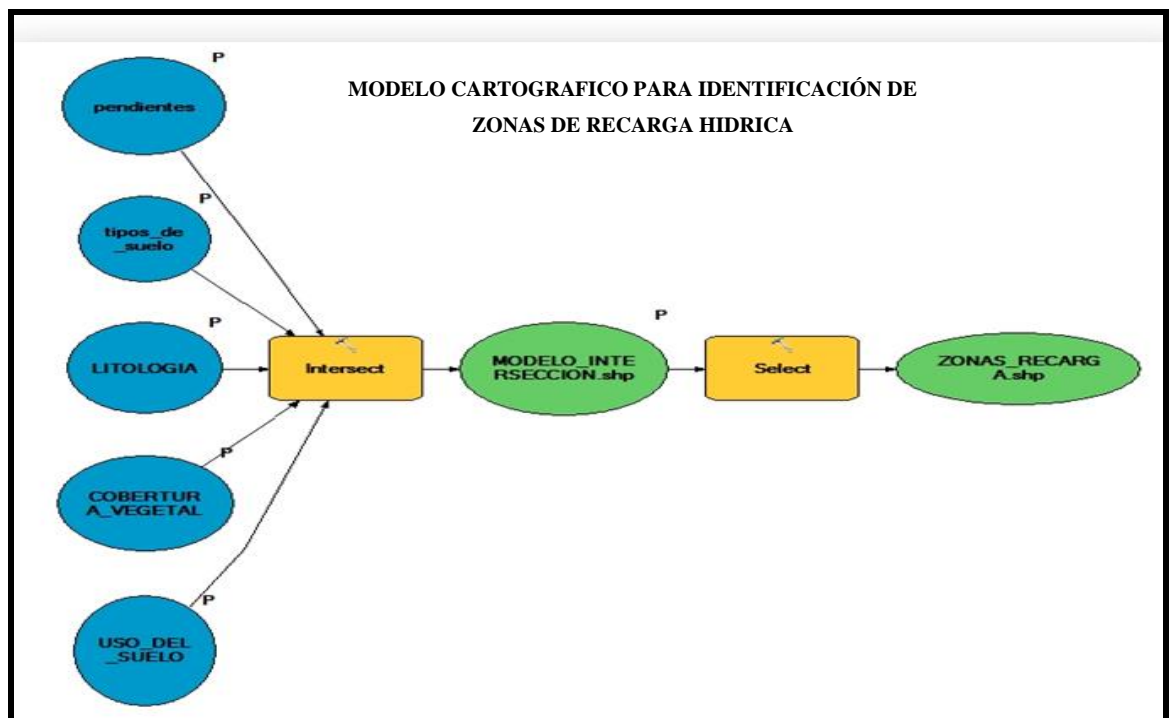


Figura 3.2.- Modelo Cartográfico para la identificación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Tahuando

Fuente: La Autora

El proceso de sobreposición digital de información geográfica se realizó mediante el modelo cartográfico construido con la herramienta Model Builder de ArcGIS 10.2 (ver figura 3.2).

Para describir y analizar las diferentes características de las zonas de recarga se consideraron los siguientes elementos biofísicos:

- a. Pendientes.-** Fue un criterio muy importante para el análisis e identificación de las zonas con potencial para la recarga hídrica, ya que está directamente relacionada con la escorrentía superficial de la cuenca; en pendientes montañosas, pendientes muy montañosas y pendientes escarpadas, aumenta la velocidad de la escorrentía, lo que modifica las condiciones de humedad del suelo, la capacidad de recarga y la susceptibilidad a la erosión; por el contrario, en pendientes planas, ligeramente onduladas o pendientes onduladas, el agua escurre con mayor lentitud y permanece por más tiempo en contacto con el suelo, lo que favorece el proceso de infiltración (Matus, 2007). Por lo tanto, para determinar la pendiente del área de estudio, se realizó un modelo digital de elevación (DEM) que fue convertido a un raster de pendientes, por lo que se estableció una ponderación de la capacidad de recarga hídrica según el tipo de pendiente, el cual se detalla en el cuadro 3.3:

Cuadro 3.3.- Ponderación de la posible recarga hídrica según el tipo de relieve y pendiente del terreno

Tipos de relieves	Pendientes (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Débil plano o casi plano	0 – 5%	Muy alta	5
Inclinación regular, suave o ligeramente ondulada	5 – 12%	Alta	4
Irregular, ondulación moderada	12 – 25%	Alta	4
Fuertes colinados	25 – 50%	Moderado	3
Muy fuertes, escarpado	50 – 70%	Baja	2
Abruptas, montañoso	>70%	Muy baja	1
Zona urbana	No aplica	Nula	0

Elaborador: Autora

- b. Tipo de Suelo:** Para determinar esta variable, se realizó la revisión de la cartografía digital del tipo de suelo de la cuenca del río Tahuando,

determinando así los siguientes tipos de suelos dentro de la cuenca detallados en el cuadro 3.4:

Cuadro 3.4.- Tipos de suelos dentro de la cuenca río Tahuando según la clasificación del USDA (1982)

Símbolo cartográfico	Orden	Gran Grupo	Sub Grupo
ARG	Mollisol	Argiudoll	Udoll
DURI	Mollisol	Duriudoll	Udoll
DURU	Mollisol	Durustoll	Ustoll
DYSD	Inceptisol	Dystrandept	Andept
DYSP	Inceptisol	Dystropept	Tropept
HAP	Mollisol	Hapludoll	Udoll
HAPS	Mollisol	Argiustoll	Ustoll
HAR	Mollisol	Haplustoll	Ustoll
UST	Entisol	Ustrothent	Orthent
NA	No aplicable	No aplicable	No aplicable

Fuente: SNI, 2014

En base a la información del cuadro anterior se ponderó la capacidad de recarga hídrica según el tipo de suelo, que se detalla en el cuadro 3.5. Se observa que las texturas gruesas favorecen la capacidad de recarga hídrica en los acuíferos y la textura fina retarda la capacidad de recarga.

Cuadro 3.5.- Ponderación de la capacidad de recarga hídrica de suelos

Orden	Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Mollisol	Suelo y subsuelo de franco arenosa a franco arcilloso y arcillosos, poco profundos a muy profundos, el drenaje interno es muy pobre a bien drenado.	Alta	3
Entisol	Moderadamente gruesa a fina, suelos normalmente húmedos.	Media	2
Inceptisol	Suelos formados sobre materiales residuales, arcillosos, muy húmedos, porcentaje de saturación mayor del 60%.	Baja	1

Fuente: (Matus, 2007)

c. Litología: En el cuadro 3.6 se detallan los valores de ponderación que permitieron determinar la capacidad de recarga hídrica en base al análisis de la cartografía de geología del Sistema Nacional de Información. En las rocas suaves (depósitos aluviales y coluviales) la capacidad de recarga es alta, mientras que en las rocas semisuaves (brechas, cenizas y piroclastos) la capacidad de recarga es moderada.

Cuadro 3.6.- Ponderación de la capacidad de recarga hídrica según la litología de la cuenca del río Tahuando

Descripción	Posibilidad de recarga	Ponderación
Depósito aluvial, depósito coluvial, depósito eluvial, terrazas, derrumbe,	Alta	4
Brecha volcánica, ceniza, piroclastos, andesita, aglomerados, glaciares.	Moderada	3
Zona urbanas y cuerpos de agua	Nula	0

Fuente, SNI, 2014

d. Cobertura vegetal: en la cuenca hidrográfica la presencia de tipos de cobertura vegetal favorece la recarga hídrica y permite conservar las características del suelo que también favorecen la recarga, ya que la cubierta vegetal aporta mayor cantidad de materia orgánica al suelo, por lo tanto, existe mayor retención del agua y mayor infiltración. Para lo cual se determinaron los siguientes valores y porcentajes de cobertura vegetal dentro de la cuenca. Las categorías de cobertura vegetal páramo y vegetación arbustiva tiene una superficie que equivale al 20% del total de la cuenca.

Cuadro 3.7.- Ponderación de la capacidad de recarga hídrica según la cobertura vegetal y uso de suelo de la cuenca del río Tahuando

Cobertura vegetal	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque nativo	Muy alta	5
Plantaciones forestales, vegetación arbustiva, páramo	Alta	4
Pastizales	Moderada	3
Caña de azúcar industrial	Baja	2
Cereales, leguminosas, raíces y tubérculos, frutales, tierras en transición, cultivos de ciclo corto	Muy baja	1
Cuerpo de agua, área poblada	Nula	0

Fuente (Matus, 2007)

Para determinar la recarga hídrica de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería ubicados dentro de la cuenca Tahuando, se elaboraron mapas de pendientes del terreno, textura del suelo, litología, cobertura vegetal y uso actual del suelo, de acuerdo a la fórmula y parámetros establecidos en la ecuación de Matus (2007):

$$ZR = [0,27(Pend) + 0,23(Ts) + 0,12(Tr) + 0,25(Cve) + 0,13(Us)]$$

Dónde:

- Zr: Potencial de recarga
- Pend: Pendiente
- Ts: Tipo de suelo
- Tr: Litología (Tipo de roca)
- Cve: Cobertura vegetal
- Us: Uso del suelo

La asignación de valores relativos a cada elemento se hace en función de la importancia de ese elemento en el proceso de infiltración del agua; o sea que los criterios que más favorecen la infiltración del agua en el suelo son los de mayor importancia. Los indicadores en la ecuación anterior corresponden a los valores relativos consensuados para la cuenca. La posibilidad de recarga hídrica de cada zona identificada, se multiplica el resultado obtenido en la evaluación por su

factor correspondiente y se suman los elementos. La sumatorias de las ponderaciones alcanzadas por todos los elementos arroja un valor que representa las posibilidades de que ocurra recarga hídrica en un sitio dado (Cuadro 3.8).

Cuadro 3.8. Potencial de recarga hídrica en base al modelo de Matus (2007)

Posibilidad de recarga	Rango
Muy Alta	4,01 – 5,0
Alta	3,01 – 4,0
Moderada	2,01 – 3,0
Baja	1,01 – 2,0
Muy baja	0,06 – 1,0
Nula	0,00 – 0,5

Elaborado por: Autora

3.3.4 Pruebas de infiltración en los acuíferos

En el trabajo de campo se identificaron áreas óptimas para la recarga hídrica de los acuíferos, donde se realizaron varias pruebas de infiltración, se observaron el tipo y textura del suelo y la cobertura vegetal en cada uno de los acuíferos, además se realizaron las pruebas de infiltración mediante el infiltrómetro tipo Turf Tec (figura 3.3) aplicando los métodos nombrados en la metodología de este estudio.



Figura 3.3.- Prueba de Infiltración en vegetación arbustiva

Con el infiltrómetro de la figura 3.3, se realizaron las pruebas de infiltración en los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería; para determinar la zona de infiltración tanto en campo y mediante la aplicación de las herramientas SIG.

3.3.5 Lineamientos generales para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra

Se realizaron las siguientes actividades:

- a) Entrevistas a los beneficiarios del agua potable y a los pobladores cercanos a los acuíferos, con el acompañamiento de técnicos de la EMAPA-I, para conocer el estado actual de las vertientes.
- b) Se aplicaron metodologías de varios estudios realizados en diferentes cuencas hídricas con similitud a esta investigación, tales como la metodología aplicada en el estudio “Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho”, municipio de Chiquimula realizado por Bueso (2010). En el estudio mencionado el autor identifica cinco tipos de zonas de recarga hídrica, las

mismas que presentan condiciones distintas y/o compartidas entre sí, en cuanto a que se definen dentro de cada tipo de clasificación.

- c) Adicionalmente se empleó la metodología propuesta por González (2011) en el estudio “Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá”; en el que se proponen prácticas de manejo y protección del agua en fincas dedicadas a la producción y protección forestal que contribuyen al buen manejo de la cuenca.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el desarrollo del presente trabajo realizado en las zonas de recargas hídricas de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería que proveen de agua potable a la zona urbana de Ibarra, se obtuvieron los siguientes resultados:

4.1 Delimitación y localización del área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Tahuando y en los recorridos de campo se determinaron la ubicación geo-referenciada de los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería, los cuales están localizados en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, en las parroquias de Ibarra, San Antonio, Angochagua, respectivamente, generando así el siguiente cuadro, en el cual se detalla la ubicación de cada acuífero y las coordenadas UTM, en Datum WGS 84, Zona 17Sur.

Cuadro 4.1.- Ubicación política y geografía de los acuíferos.

Nombre del Acuífero	Ubicación política		Coordenadas UTM, WGS 84, 17 Sur			
	Parroquia	Sector	Tipo vertiente/pozo	Norte	Este	Altitud (msnm)
Yuyucocha	Ibarra	Caranqui	Vertiente	10037061	819747	2230
			Pozo profundo	10037025	819701	2320
			Pozo profundo	10036740	819860	2325
			Pozo profundo	10036597	819701	2330
Santa Clara	San Antonio	Tanguarín	Pozo profundo	10036708	815723	2330
Guaraczapas	Angochagua	Zuleta	Vertiente	10025998	824565	2890
La Carbonería	Ibarra	La Carbonería	Vertiente	10031915	829835	3760
			Vertiente	10031530	829470	3640
			Vertiente	10031132	829412	3640

Elaborado por: Autora

En el programa ArcGis, 10.1 se elaboró lo mapas de ubicación y el mapa base (ver anexo1 y 2), con el uso de la información cartográfica, de las provincias, cantón, parroquias del Sistema Nacional de Información (SNI, 2012), y de las cartas topográficas de Ibarra, San Pablo del Lago y Cayambe del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013), se obtuvo la información de los poblados, curvas de nivel, rutas y vías principales – secundarias y locales, ríos perenne – intermitente, cuerpos de agua y con las coordenadas geográficas.

Con este trabajo inicial, se pudo identificar la ubicación exacta de los cuatro acuíferos, motivos de este estudio.

4.2 Caracterización morfométricas y biofísicas de los acuíferos

En el desarrollo de esta investigación de los acuíferos del río Tahuando, se pudo determinar varias características morfométricas del área de estudio, como el área, perímetro, pendiente, precipitación, temperatura, uso actual del suelo, uso potencial, litología, textura, zonas de vida, clima, profundidad del suelo, de los acuíferos en general y de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y la Carbonería, ver valores en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2.- Características cuantitativas de la micro cuenca río Tahuando.

Características Morfométricas		
ÁREA	35 643.81 hectáreas	356.43 Km ²
PERIMETRO	89 196.40 hectáreas	89.20 Km

Elaborado por: Autora

4.2.1 Tipos de Clima

El clima está fuertemente condicionado por la presencia de relieves montañosos que rodean la zona de estudio y en forma general pertenece al tipo Ecuatorial Mesotérmico Húmedo a Seco (clasificación de Pourrut, 1995) para la zona baja, en tanto que en la parte alta corresponde a Ecuatorial Frío de Alta Montaña.

No obstante, factores físicos como el relieve, morfología, pendientes, latitud, exposición a las masas húmedas, dirección del viento, hacen que la zona de estudio presente una variedad de microclimas con una distribución espacial muy cambiante, condiciones que se evidencian en la variabilidad de la temperatura y la precipitación. En la figura 4.1, mapa de tipos de clima se observan los diferentes tipos de microclimas que existen en la cuenca del río Tahuando y los acuíferos en estudio.

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

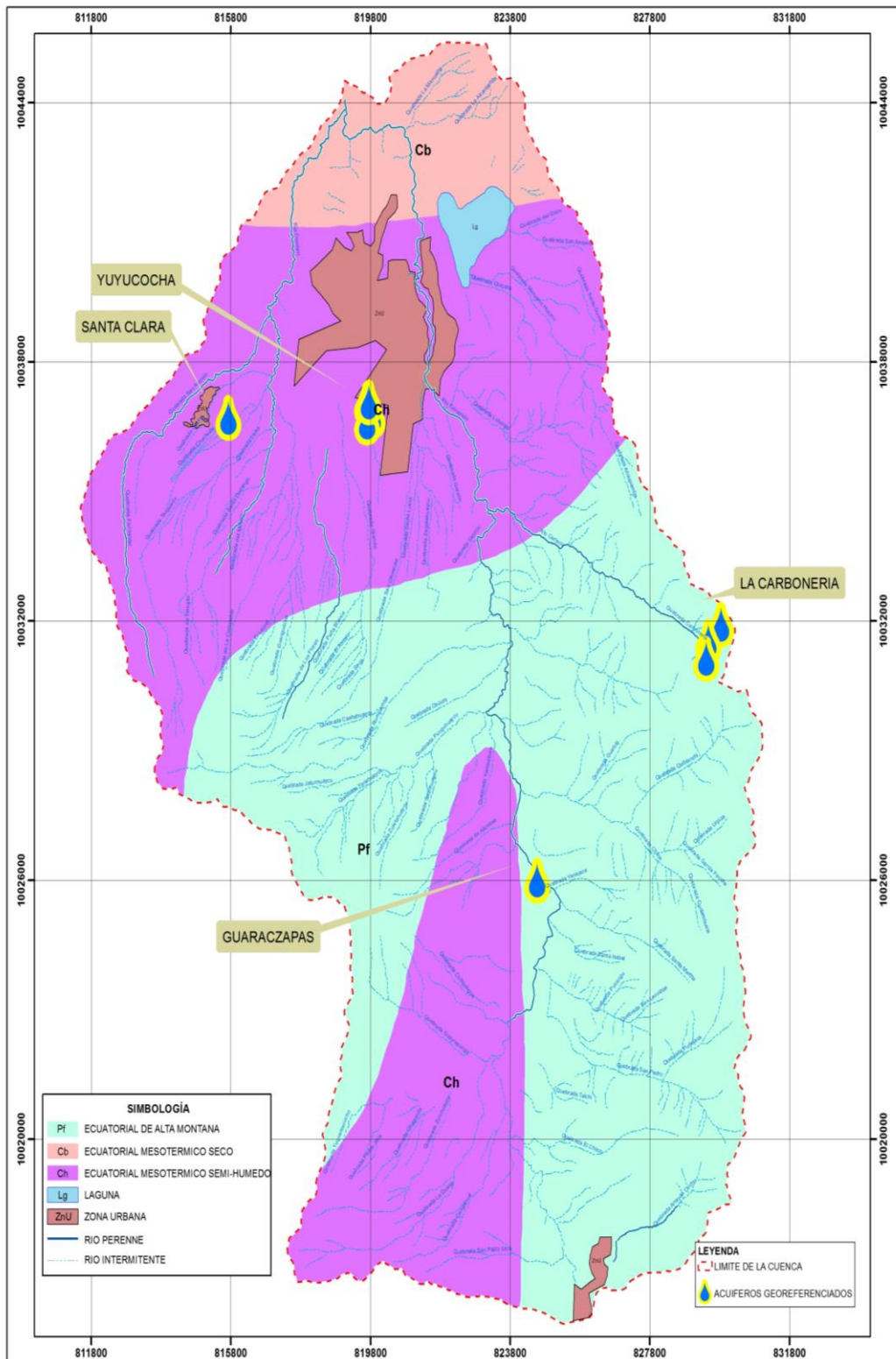


Figura 4.1. Mapa del clima

Elaborado por: La Autora

Del análisis del mapa del clima de la cuenca del río Tahuando, se obtiene la siguiente información de los cuatro acuíferos que proveen de agua potable a la zona urbana de Ibarra:

Los acuíferos de Yuyucocha y Santa Clara, están ubicados dentro del tipo del clima *Ecuatorial Mesotérmico Semi – Húmedo*, el cual es característico en la zona interandina a excepción de los valles templados y zonas con altitudes entre 3.000 y 3.200 msnm, las precipitaciones anuales fluctúan entre 500 y 2.000 mm y están repartidas en dos estaciones lluviosas, de febrero a mayo y en octubre-noviembre. Las temperaturas medias anuales están generalmente entre 12 y 20 °C pero pueden en ocasiones ser inferiores en las vertientes menos expuestas al sol; las temperaturas máximas no superan los 30 °C y la mínima a veces bajo 0 °C, variando en función de la altitud y de la exposición, la humedad relativa fluctúa entre valores de 65% y 85% y la duración de la insolación puede alcanzar valores de 1.000 a 2.000 horas anuales (SNI, 2014).

Los acuíferos de Guaraczapas y La Carbonería se ubican en el tipo de clima *Ecuatorial de Alta Montaña*, se sitúa sobre los 3000 msnm, la altitud y la exposición son los factores que condicionan los valores de las temperaturas y las lluvias. La temperatura máximas rara vez sobrepasan los 20 °C, y las mínimas tiene sin excepción valores inferiores a los 20 °C, las medias anuales son muy variables y fluctúan casi siempre de 4 a 8 °C, la precipitación tiene un rango de 800 a 2000 mm por año (SNI, 2014).

Al analizar el clima predominante en los acuíferos en estudio, se determinó dos tipos de climas ecuatoriales, lo que concuerda con la investigación realizada por las autoras Haro & Ruiz en el año 2012, las cuales realizaron la investigación referente a fuentes de agua en la provincia de Imbabura, señalando los dos tipos de climas como predominantes.

4.2.2 Aspectos Hidrológicos

Del análisis de la cartografía del área de estudio, se determinó que en la cuenca del río Tahuando, existe 11 acuíferos que se detallan a continuación en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.3.- Acuíferos y superficies del área de estudio

N°	Acuíferos	Superficie (hectáreas)
1	Guayrapungu	521,68
2	Cucho de Torres	998,9
3	La Carbonería	1374,81
4	Punguhuaycu	1440,49
5	San Pedro	1806,57
6	La Rinconada	2463,49
7	Yahuarcocha	2503,08
8	Tahuando parte alta	3115,4
9	Guaraczapas	4729,98
10	Santa Clara	5460,35
11	Yuyucocha	11225,07

Elaborado por: Aurora

En la figura 4.2, se observan los 11 acuíferos descritos en el cuadro 4.3, dicha información permite determinar que el acuífero de Yuyucocha, es el de mayor superficie en relación a los acuíferos que forman la cuenca del río Tahuando.

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

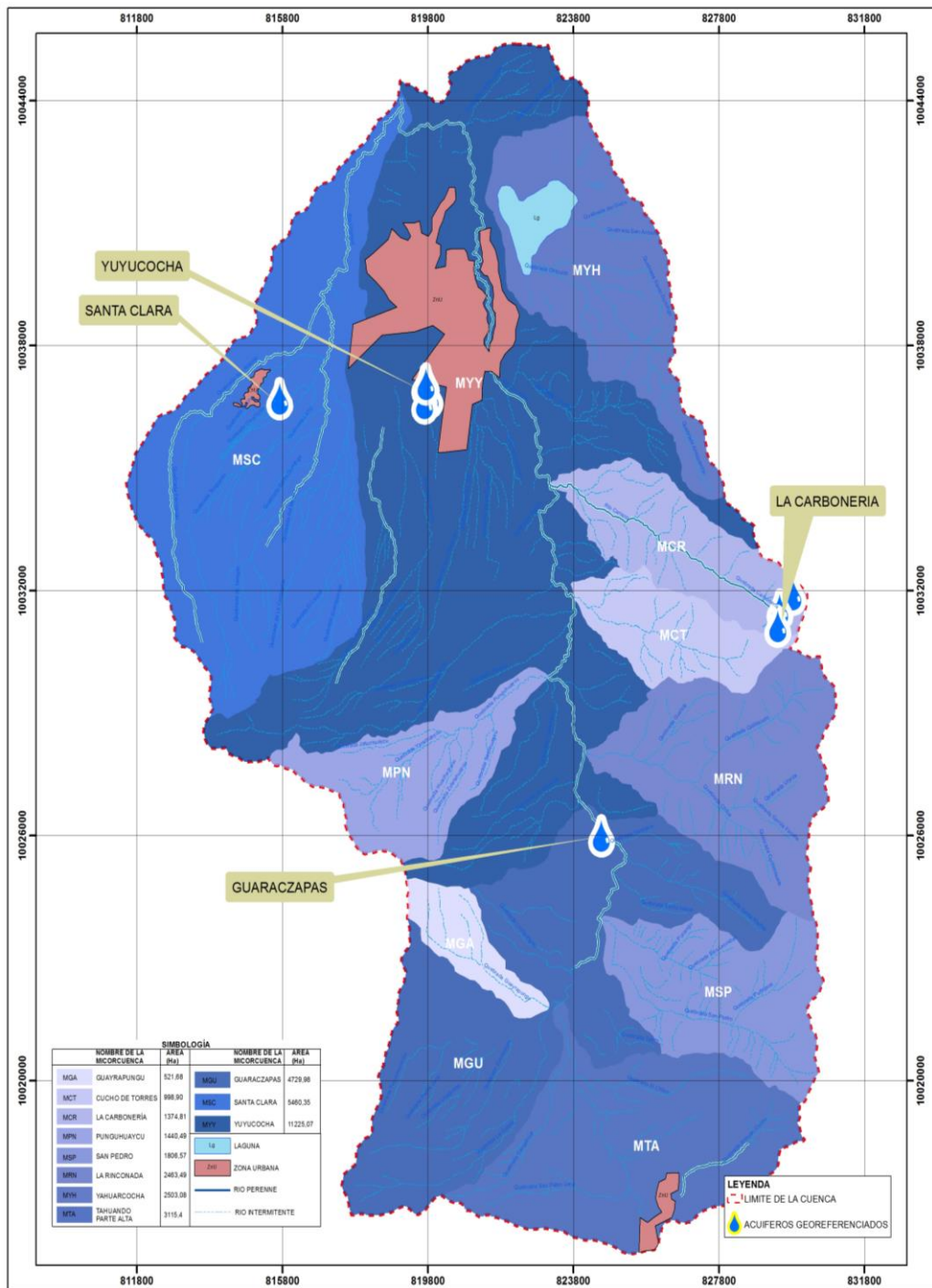


Figura 4.2. Mapa hidrológico
 Elaborado por: La Autora

En el cuadro 4.4, se describen los ríos y quebradas de cada uno de los acuíferos de la cuenca del río Tahuando.

Cuadro 4.4.- Descripción de los acuíferos con respecto a los drenajes perennes e intermitentes

Acuíferos	Acuíferos	Ríos	
		Perennes	Intermitentes
Yuyucocha	Yuyucocha	Río Tahuando	Quebradas: Alambas, Cashahuaycu, Cruz Huaycu, Cucho de Torres, El Arroyo, Garzón, Grande, La Alcantarrilla, La Manuelita, La Monja, La Rinconada, Los Flores, Lulunqui, Morascunga, Oscura, Peña Blanca, Punguhuaycu, Rumipamba, San Clemente, San Francisco Atuhuaycu, Santa Lucía, Seca, Turucucho, Yambaburo, Yuracruz, y Zagalahuaycu.
Santa Clara	Santa Clara	Ríos: Tahuando y Chorlaví	Quebradas: Cacho, Chuchuda, Del Molino, El Laurel, Farinango, Guanguacha, La Compañía, Licho, Los Muertos, San Antonio, Santo Domingo, Tanguarín, y Tiangas.
Guaraczapas	Guaraczapas	Río Tahuando	Quebradas: Chagunda, Curiquingue, Guayrapungu, La Quinta, Padre Jaca, San Pedro, Santa Isabel, Santa Martha, Talchi, Tuquerescucho, Yanajaca, y Zuruhuaycu.
La Carbonería	La Carbonería	Río Cariacu y Tahuando	Quebrada: La Carbonería

Elaborado por: La Autora

4.2.3 Temperatura

La temperatura es variable en función de la altitud; así las temperaturas medias pueden variar de los 5 °C a los 15 °C. En las temperaturas máximas y mínimas el rango de variación es muy alta, sobre todo para las zonas altas, pudiendo llegar a diferencias de 17 °C.

Caracterizados los acuíferos en base a la combinación de la cartografía de la temperatura dentro de la cuenca hidrográfica, y la ubicación de los acuíferos, se obtuvo el siguiente mapa (figura 4.2).

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

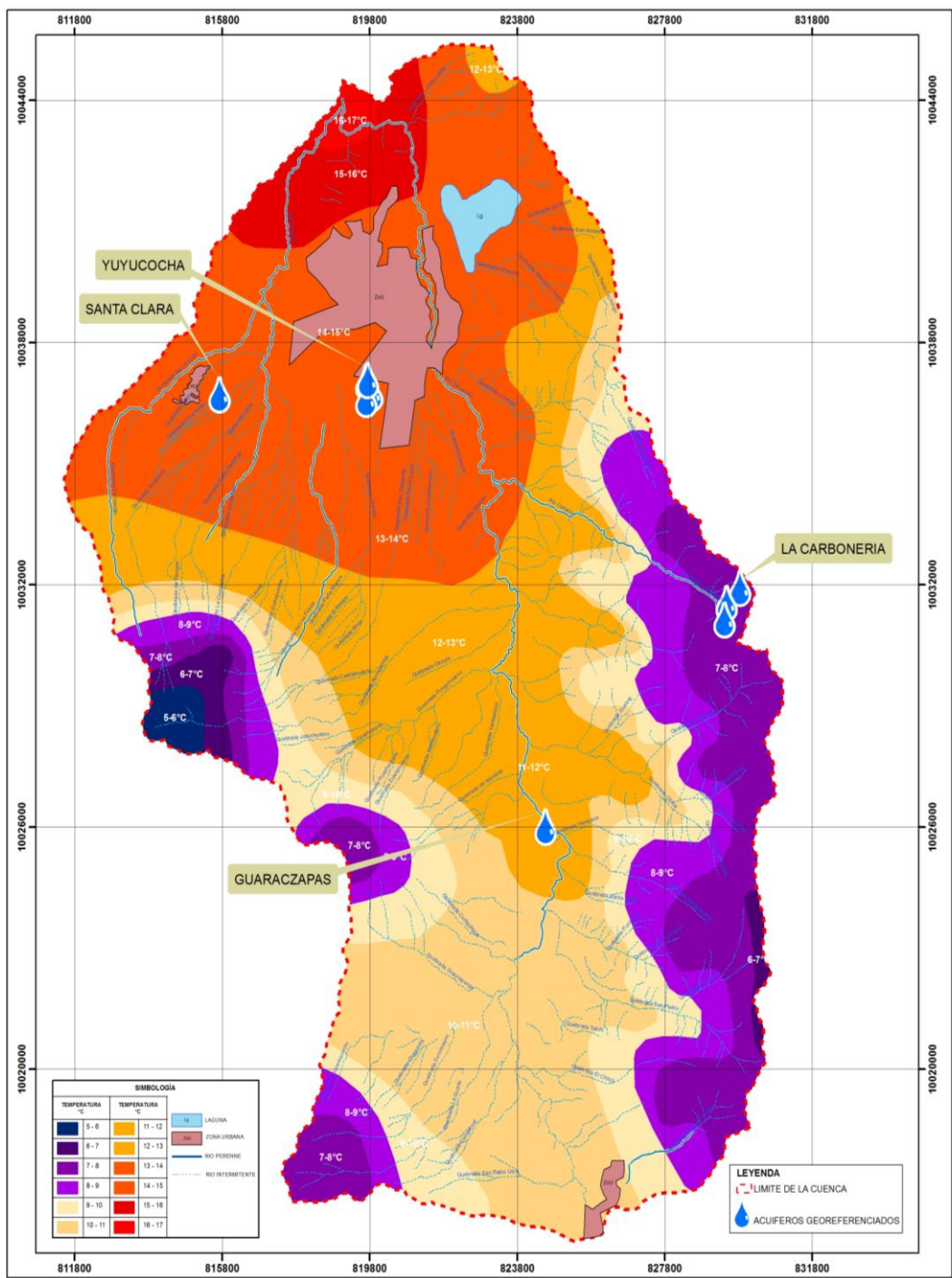


Figura 4.3, Mapa temperatura

Elaborado por: La Autora

Se puede determinar que, en relación a la temperatura, los acuíferos de Yuyucocha y Santa Clara, están dentro de un mismo rango de temperatura de 14 a 15 °C, y los acuíferos de la Carbonería están en los rangos más bajo de temperatura de 11 a 12 °C y 7 a 8 °C.

4.2.4 Precipitación

La distribución de la lluvia que precipita en los acuíferos, refleja diversas influencias que tienen una interacción común. En general, la precipitación tiene un gradiente hidráulico positivo en dirección sur, adicionalmente presenta un aumento con la altitud, comportamiento hidrológico típico de las zonas altas interandinas. (EMAPA-I, 2007).

Un factor más importante lo constituye la influencia de las masas húmedas provenientes de las regiones Costa y/u Oriente, pues estas determinan la mayor o menor cantidad de las precipitaciones; adicionalmente la orientación de la cuenca, su exposición a la dirección de los vientos y la presencia del Volcán Imbabura, modulan en forma determinante la producción y distribución de la precipitación, esto se evidencia en la distribución de las curvas Isoyetas (Figura 4.3).

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

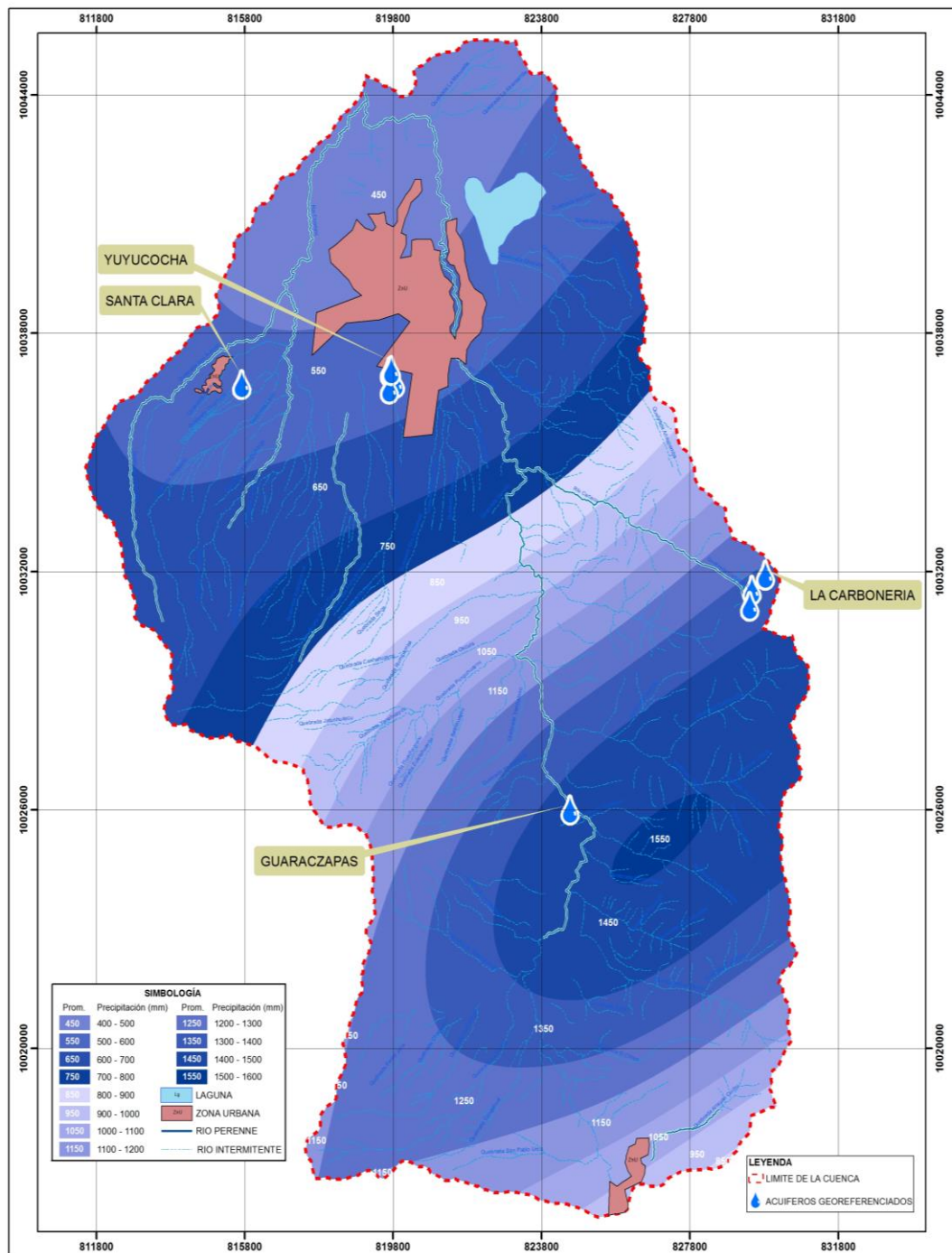


Figura 4.4, Mapa de precipitación

Elaborado por: Autora

En la figura 4.4 se muestran las curvas de isoyetas de cuenca en estudio, mediante el SIG se estimó la precipitación baja con valores de 400-500 mm, media con valores de 900-1000 mm y alta varía desde 1400 hasta 1500 mm por año. En el siguiente cuadro se detalla el valor de precipitación en cada uno de los acuíferos.

Cuadro 4.5.- Precipitación media anual de la cuenca del río Tahuando

Acuíferos	Rango de la precipitación (mm)	Promedio de la Precipitación (mm)
Yuyucocha	500 – 600	550
Santa Clara	500 – 600	550
Guaraczapas	1400 – 1500	1450
La Carbonería	1300 – 1400	1350

Elaborado por: Autora

Los acuíferos de Yuyucocha y Santa Clara, tiene una precipitación promedio anual de 550 mm, y los acuíferos de Guaraczapas, tiene un promedio anual de 1450 mm, siendo el lugar más húmedo entre los otros acuíferos, además el acuífero de La Carbonería tiene un promedio anual de 1350 mm, lo que indica que son sitios donde se registran mayor cantidad de lluvias.

La precipitación de esta zona de estudio ha sido constante y de forma general no ha tenido variaciones, lo cual concuerda con la investigación planteada por las autoras Domínguez & Pazmiño en el año 2014, las cuales indican a la precipitación de acuíferos y microcuencas de la provincia de Imbabura, como uno de los factores influyentes en su investigación, y una de las más importantes variables ambientales en este ámbito, ya que cuando se incrementan las precipitaciones existe una mayor cantidad de agua en cada uno de los acuíferos y microcuencas.

4.2.5 Zonas de vida según Holdridge

En la figura 4.5, mediante el Mapa de Zonas de Vida se determinó, que los acuíferos, están ubicados en la zona de bosque seco Montano Bajo (bsMB), bosque húmedo Montano Bajo (bhMB), y bosque muy húmedo Montano.

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

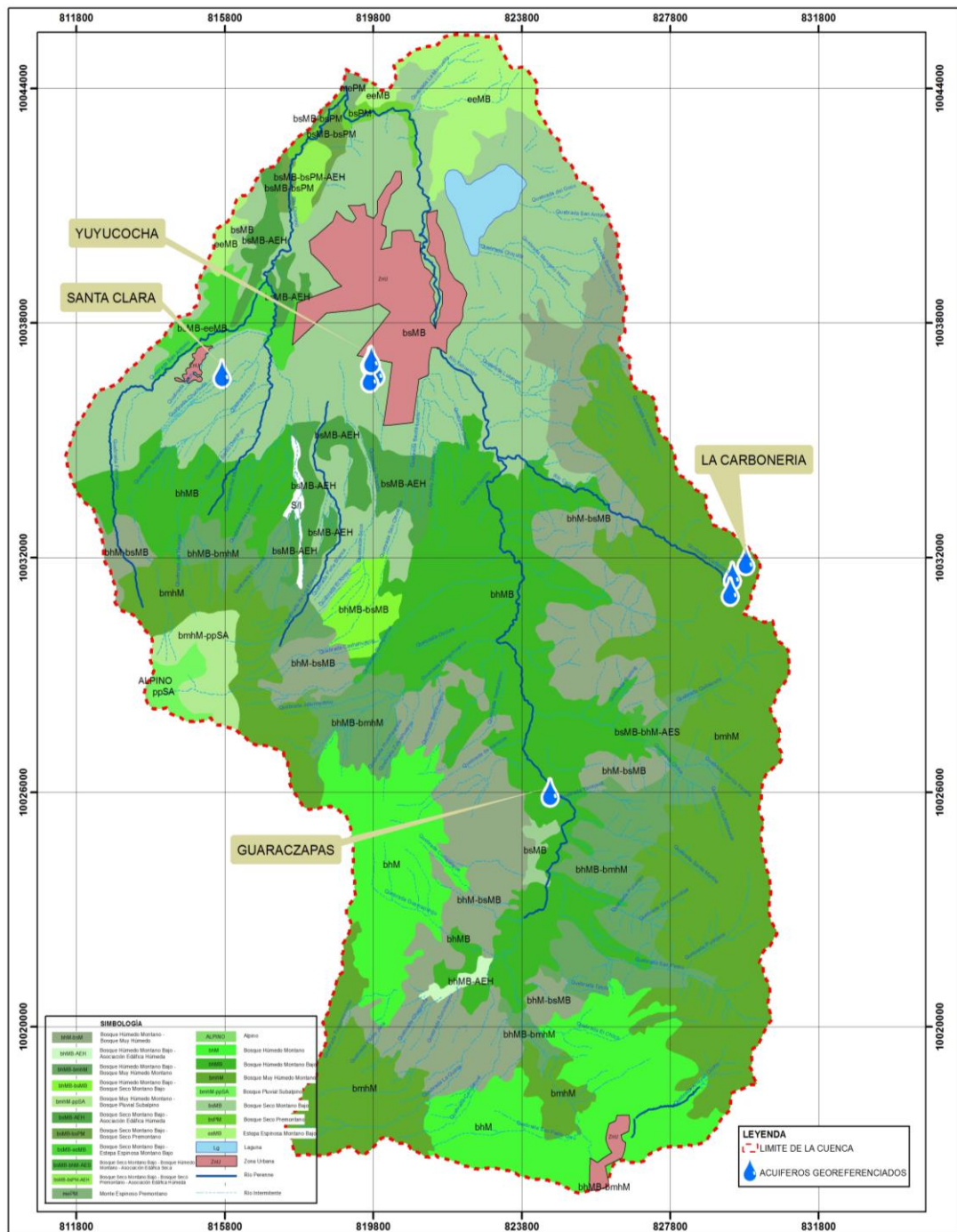


Figura 4.5, Mapa de zonas de vida

Elaborado por: Autora

4.2.6 Uso Potencial

Empleando las pendientes del terreno, los tipos de suelos, y uso actual del suelo, se analizó el uso potencial del territorio, por tal razón en base a esa información, se desarrolló en mapa del uso potencial del suelo de la cuenca (Figura 4.6). Del análisis cartográfico, se determinó que el *acuífero de Yuyucocha*, está ubicado en la zona de vida denominada bosque seco Montano Bajo (bsMB), con una altitud entre 2.000 a 2.300 msnm, con variaciones micro-climáticas de acuerdo a los pisos altitudinales de las vertientes este y oeste. La vegetación primaria de esta formación ha sido alterada completamente. En la actualidad se observan escasos remanentes de bosque nativo y matorral y muchas áreas de cultivos de subsistencia.

El *acuífero Santa Clara* está ubicado en la zona de vida bosque seco Montano Bajo (bsMB), esta zona de vida es característica en un rango de altitud de 2.000 y 2.300 msnm, con variaciones micro climáticas de acuerdo a los pisos altitudinales. La vegetación primaria de esta formación ha sido alterada completamente. En la actualidad se observan áreas de cultivos de subsistencia y pastos cultivados.

El *acuífero Guaraczapas*, está ubicado en la zona de vida denominada bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB), esta zona de vida se encuentra entre los 2.500 y 2.900 msnm. En general esta zona es muy productiva, sin embargo, en ella se han alterado los bosques protectores y las micro cuencas de los ríos presentan muchos problemas en la temporada seca.

El *acuífero La Carbonería* está ubicado en la zona de vida bosque muy húmedo Montano (bmhM), la vegetación de esta zona de vida tiene predominancia de especies gramíneas con asociaciones de arbustos de hojas coriáceas.

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

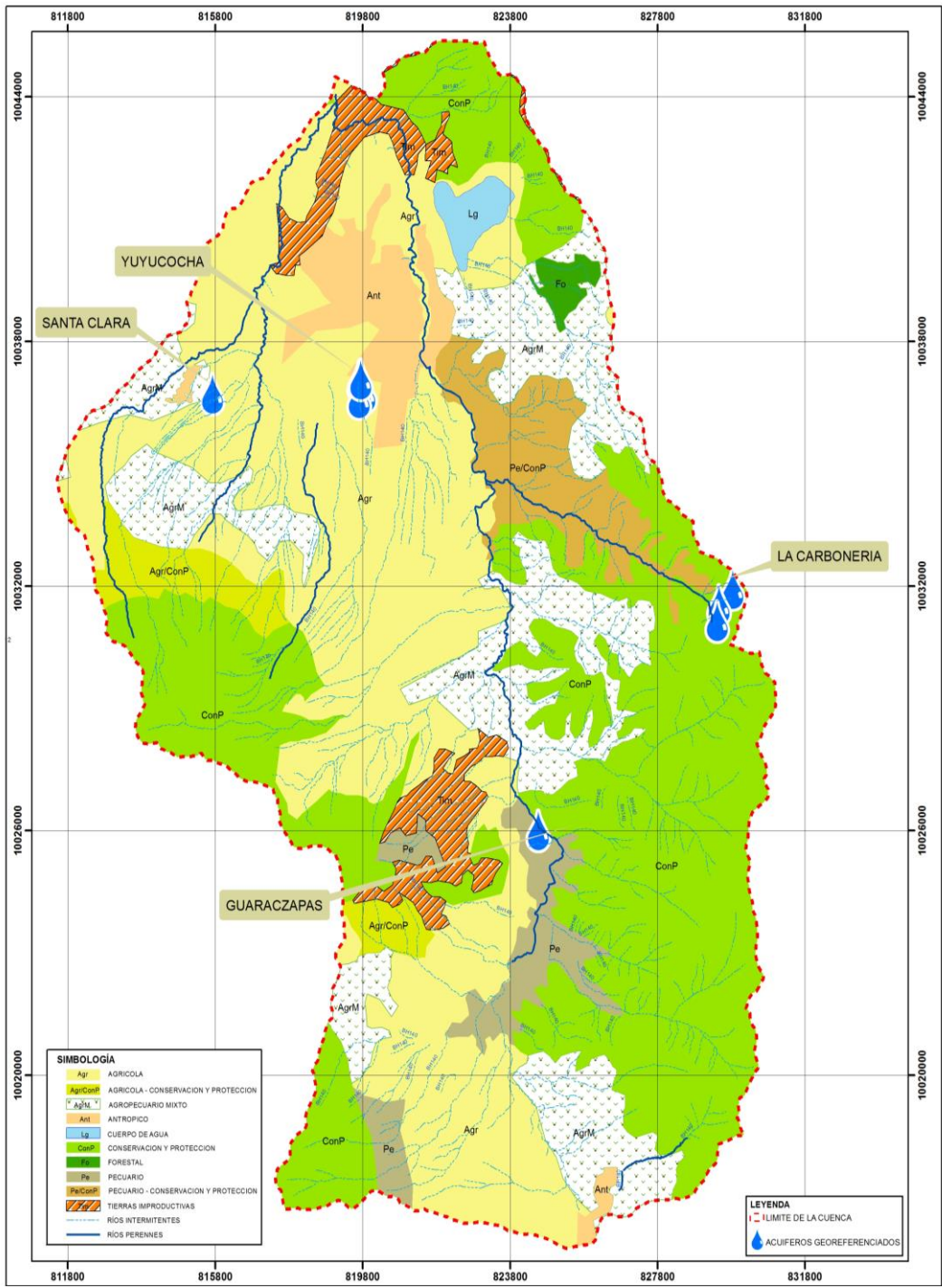


Figura 4.6, Mapa uso potencial
Elaborado por: La Autora

En base a la caracterización de la cuenca y el análisis cartográfico, en la figura 4.6, se presenta la clasificación del uso potencial de cada uno de los acuíferos, esta caracterización permitió direccionar las propuestas de los lineamientos a fin de conservar los recursos existentes en cada una de las zonas.

Además, se determinó que los acuíferos de *Yuyucocha* y *Santa Clara*, están ubicados en la zona agrícola, siendo áreas dedicadas para la producción de cultivos de ciclo corto entre otros, que permite un ingreso económico a las familias. En el acuífero *Guaraczapas*, el uso potencial según la cartografía son zonas de aptitud pecuaria, y en el acuífero *La Carbonería*, el uso potencial es de conservación y protección, lo cual se acerca a la realidad, ya que en esta zona se encuentran pendientes muy pronunciadas, lo que ha permitido que la vegetación nativa se conserve.

El uso potencial de los suelos, producto de la presente investigación, discrepa de la investigación realizada por Domínguez & Pazmiño en el año 2014, ya que estas autoras señalan que el principal uso potencial de los acuíferos de Imbabura es para ganadería, ya que la frontera agrícola se ha expandido y sobrepasado las zonas de conservación, esto se ha dado en la gran mayoría de los acuíferos de la provincia de Imbabura.

4.2.7 Evapotranspiración

En la cuenca hidrográfica se determinó que la evapotranspiración varía desde 225 mm a valores mayores de 1.000 mm por año, quedando así los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La carbonería en un rango de evapotranspiración de 225 a 1.000 mm anuales (figura 4.7).

"IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA"

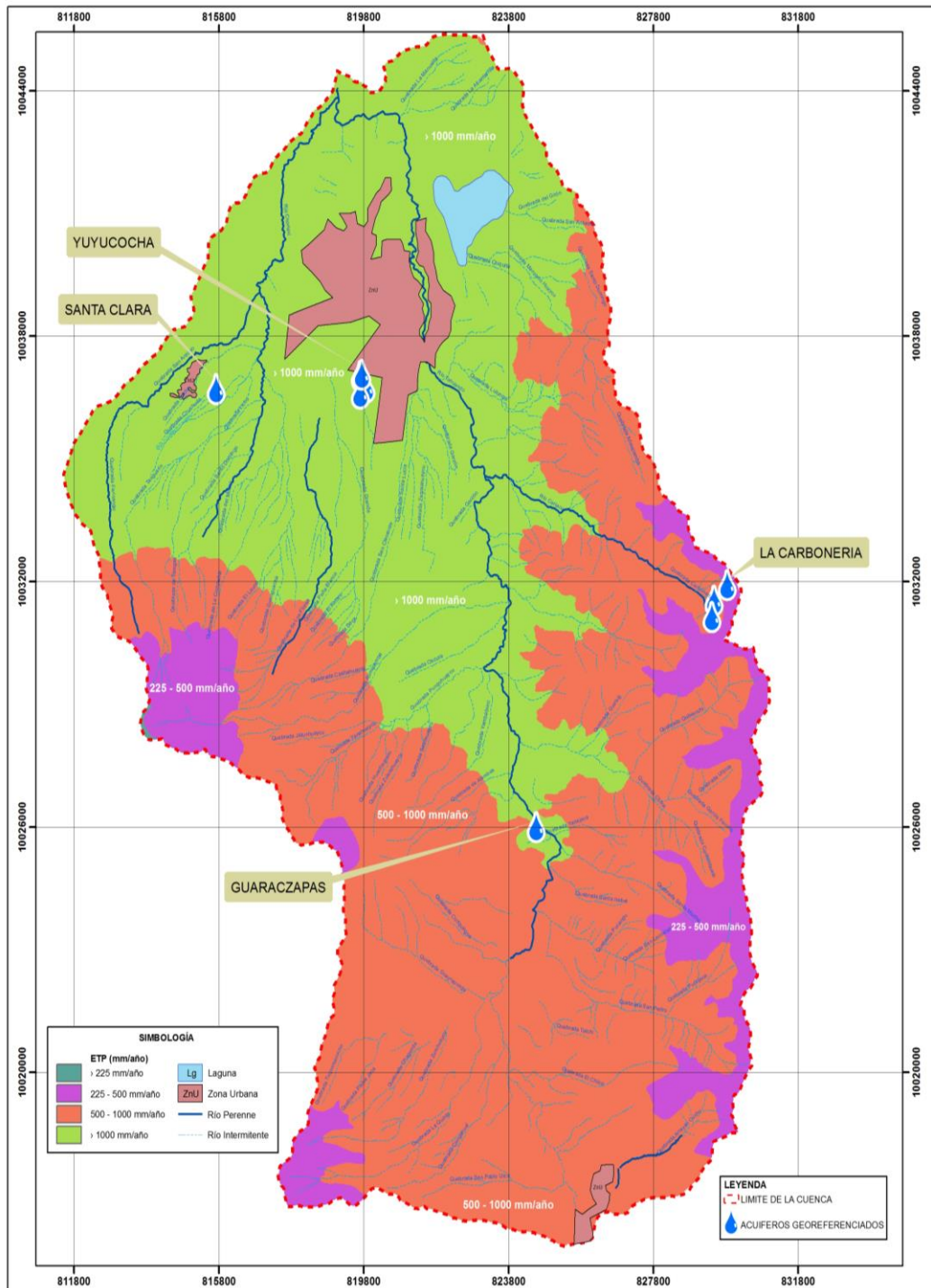


Figura 4.7, Mapa de evapotranspiración

Elaborado por: Autora

La evapotranspiración se encuentra en relación a la cobertura del suelo y a la principal actividad del mismo, es así que Albuja & Rodríguez en el año 2012, indican que en los suelos de la provincia de Imbabura los niveles de evapotranspiración van desde los 100 hasta los 1500 mm por año, siendo más alta en suelos con actividades agropecuarias, esto se confirma en esta investigación ya que los niveles de evapotranspiración fueron mayores a 1000 mm/año en los suelos agropecuarios y en los suelos de conservación tuvieron valores de 225 a 1000 mm/año.

4.3 Caracterización morfométrica y biofísica de los acuíferos para las zonas de recarga

A continuación, se detallan las características de la cuenca como la pendiente del terreno, tipo de suelo, litología, cobertura vegetal y el uso actual del suelo, de las cuales se determinó una ponderación cuantitativa para reemplazar en la ecuación general propuesta por Matus (2007), para determinar las zonas de recarga de la cuenca, en base a la sobreposición de cartografía temática empleando la herramienta Model Builder (ESRI, 2015)

4.3.1 Pendiente del terreno

La pendiente de la cuenca de drenaje, tiene relación con el grado de infiltración, con la escorrentía, con la humedad del suelo y con la contribución del agua subterránea a la corriente del cauce; su determinación se realizó en base a la sobreposición de la información cartográfica de pendientes con rangos desde 0% hasta pendientes mayores a 70% de inclinación, en el cuadro siguiente se detallan las pendientes de cada uno de los acuíferos y su respectiva ponderación para el cálculo de las zonas de recarga (figura 4.8).

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

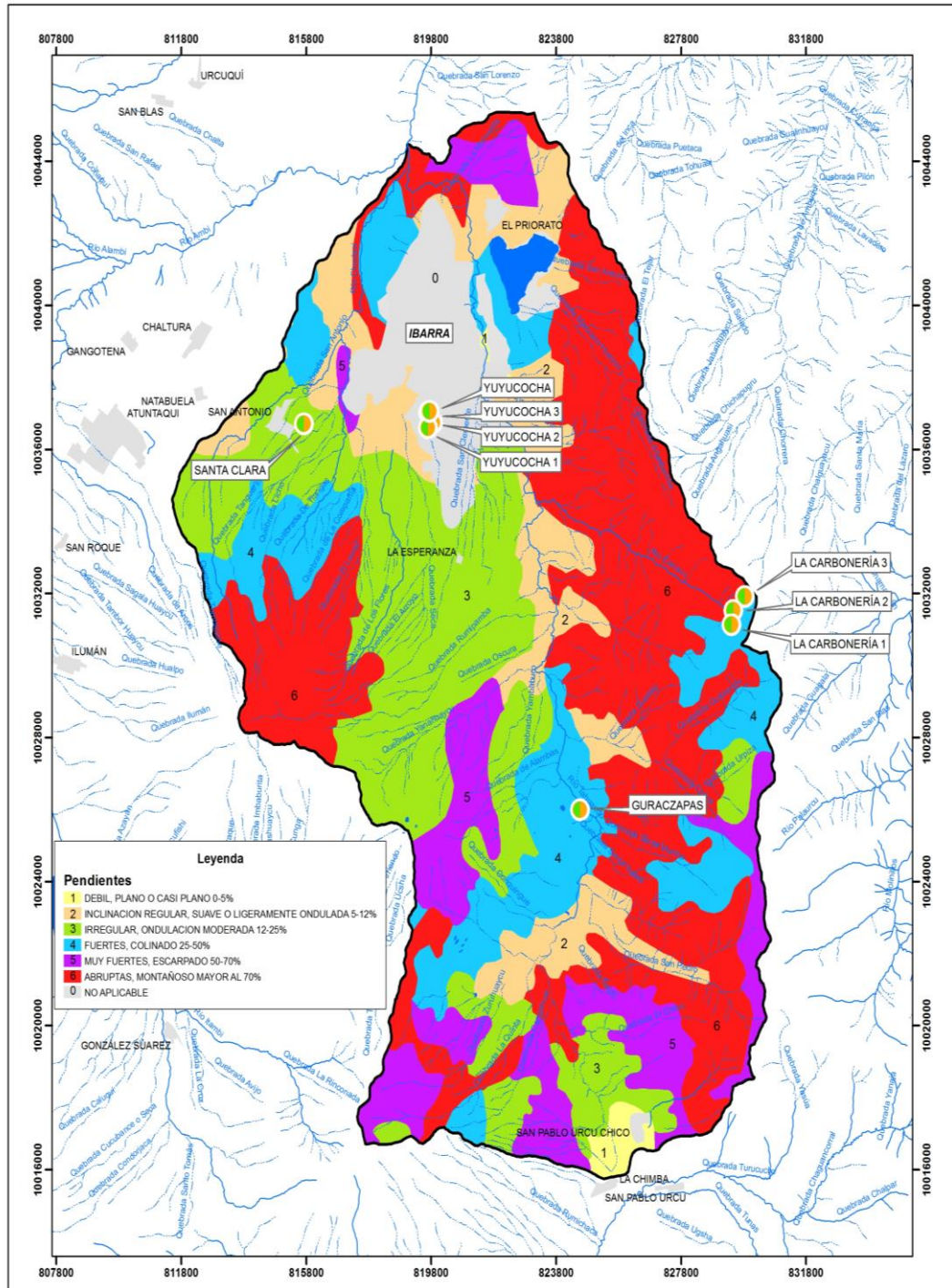


Figura 4.8, Mapa de pendientes del terreno

Elaborado por: Autora

De la interpretación del mapa de pendientes de la cuenca, se determinó que en los acuíferos de *Yuyucocha* la pendiente varía de 5 al 12% (ligeramente ondulada); *Santa Clara* posee una pendiente de 12 al 25% (irregular y ondulación moderada); *Guaraczapas* y *La Carbonería* poseen una pendiente del 25 al 50% (relieve fuerte y colinado). Además del análisis de las pendientes, se determinó que el acuífero de Yuyucocha, tiene una alta recarga, mientras que los otros acuíferos tienen una recarga moderada (cuadro 4.6). En la figura 4.9 se presentan las zonas de recarga hídrica determinadas en función de la pendiente del terreno.

Cuadro 4.6.- Detalle de las pendientes de cada uno de los acuíferos.

Acuíferos	Pendiente (%)	Tipo de relieve	Recarga Hídrica	Ponderación
Yuyucocha	5 – 12%	Ligeramente ondulada	Alta	4
Santa Clara	12 – 25%	Irregular y ondulación moderada	Moderada	3
Guaraczapas	25 – 50%	Fuerte y colinado	Moderada	3
La Carbonería	25 – 50%	Fuerte y colinado	Moderada	3

Elaborado por: Autora.

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

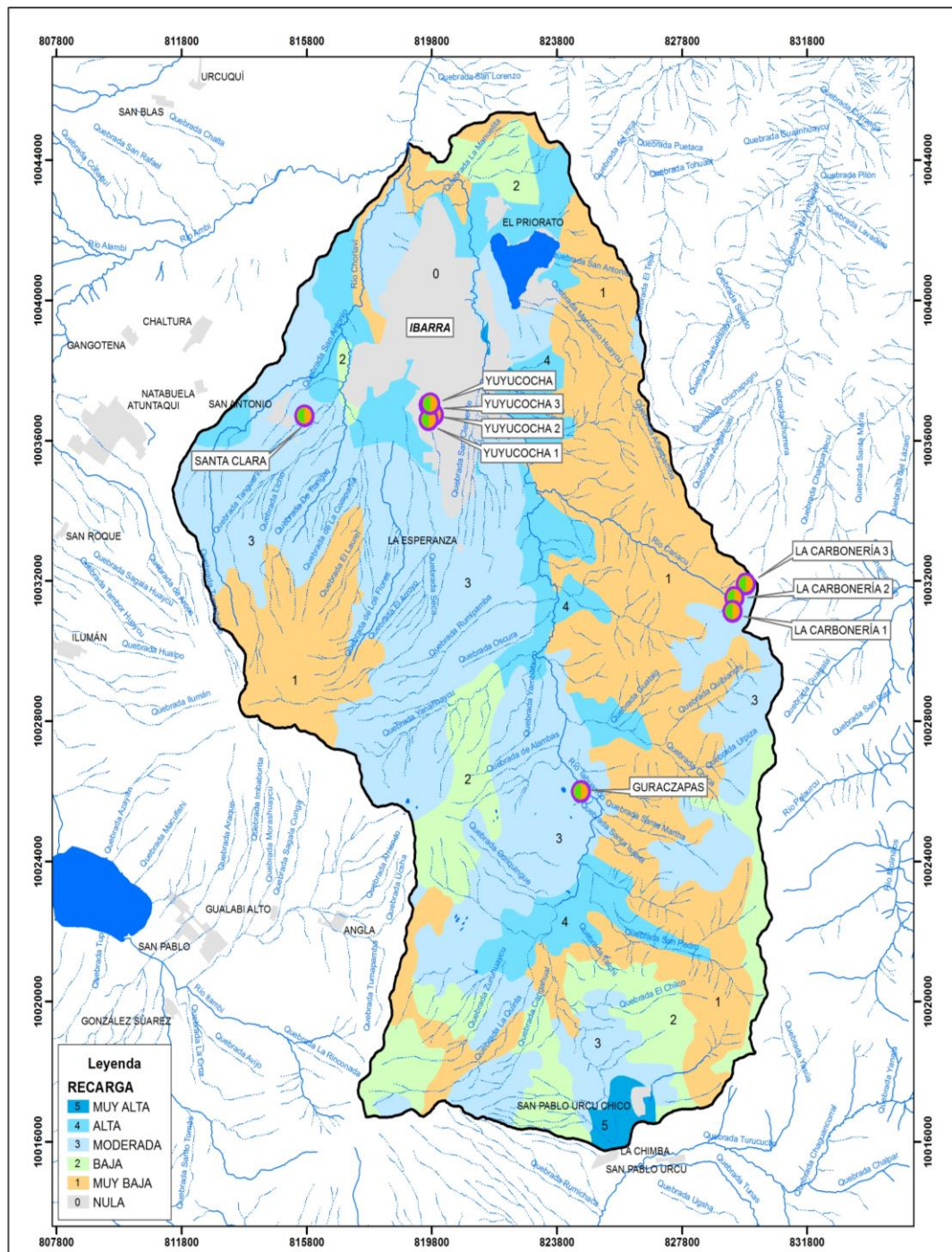


Figura 4.9. Recarga Hídrica según la pendiente
Elaborado por: Autora

4.3.2 Tipos de suelo

Para los tipos de suelo se tomo como referencia la información de textura y se analizó la distribución geográfica en la cuenca mediante la herramienta Model Builder, la cual fue un factor importante para la identificación de las zonas de recarga, generando el mapa del tipo del suelo según la textura (figura 4.10).

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

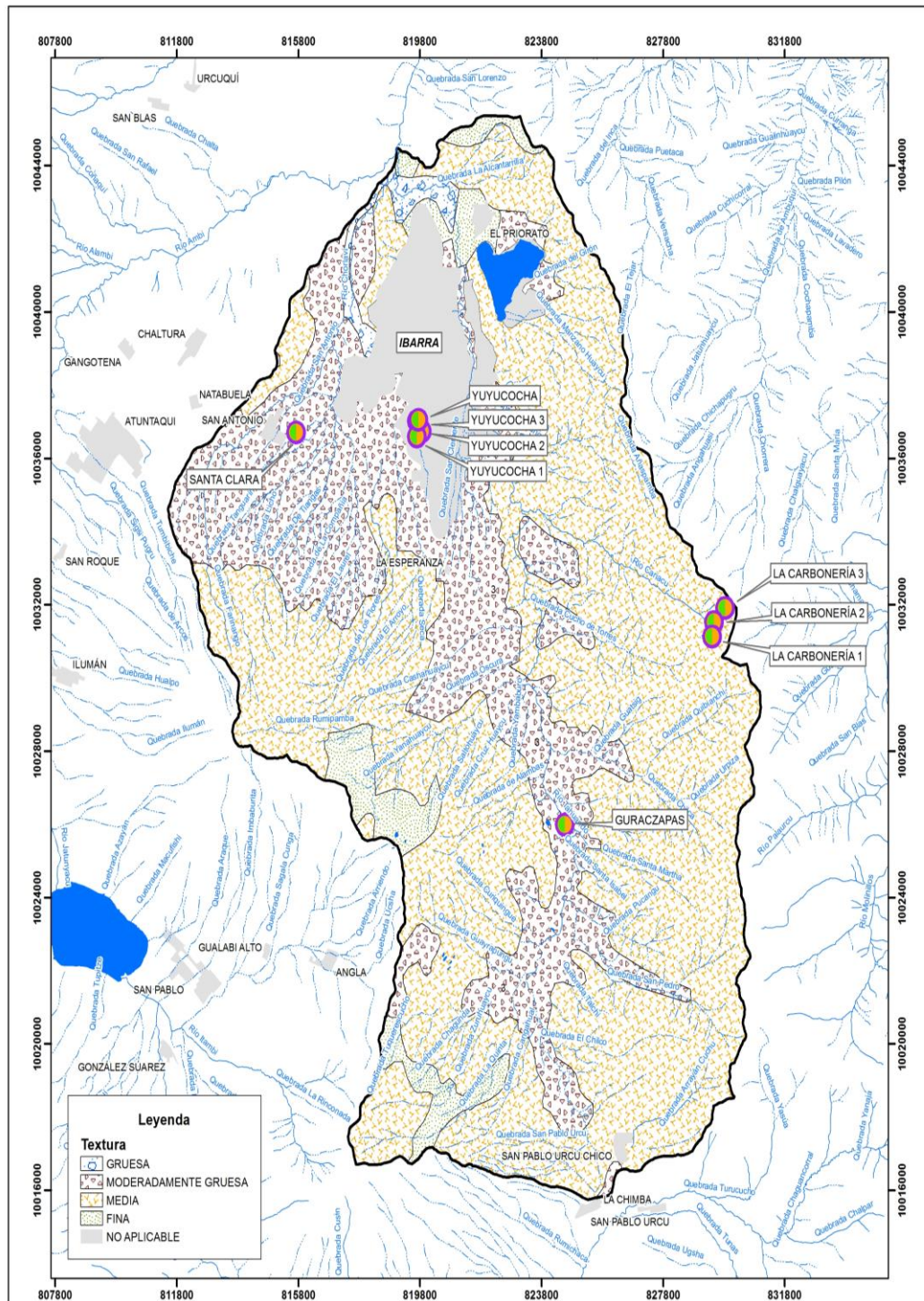


Figura 4.10, Mapa del tipo de suelo
Elaborado por: Autora

En cada uno de los acuíferos, los cuales se describen el cuadro 4.7, Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas poseen suelos de orden Mollisol propio de áreas semiáridas a semihúmedas con una textura moderadamente gruesa y profundidad baja, las vertientes de La Carbonería poseen suelos muy poco meteorizados de orden Inceptisol propio de regiones subhúmedas y húmedas con una textura media y profundidad baja.

Cuadro 4.7.- Detalle de las características del suelo de cada uno de los acuíferos

Acuíferos	Orden de suelo	Textura	Profundidad del suelo
Yuyucocha	Mollisol	Moderadamente gruesa	Baja
Santa Clara	Mollisol	Moderadamente gruesa	Baja
Guaraczapas	Mollisol	Moderadamente gruesa	Baja
La Carbonería	Inceptisol	Media	Baja

Elaborado por: Autora

Con esta información para las posibles zonas de recarga se utilizó los siguientes valores de ponderación, para reemplazar en la ecuación general según Matus, 2007, de tal manera que en el siguiente cuadro 4.8 se describen los valores de todas las características del suelo, para obtener una ponderación promedio. Los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas tienen una recarga Alta, mientras que en las vertientes de La Carbonería se presenta una recarga Moderada según la textura del suelo (figura 4.11).

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

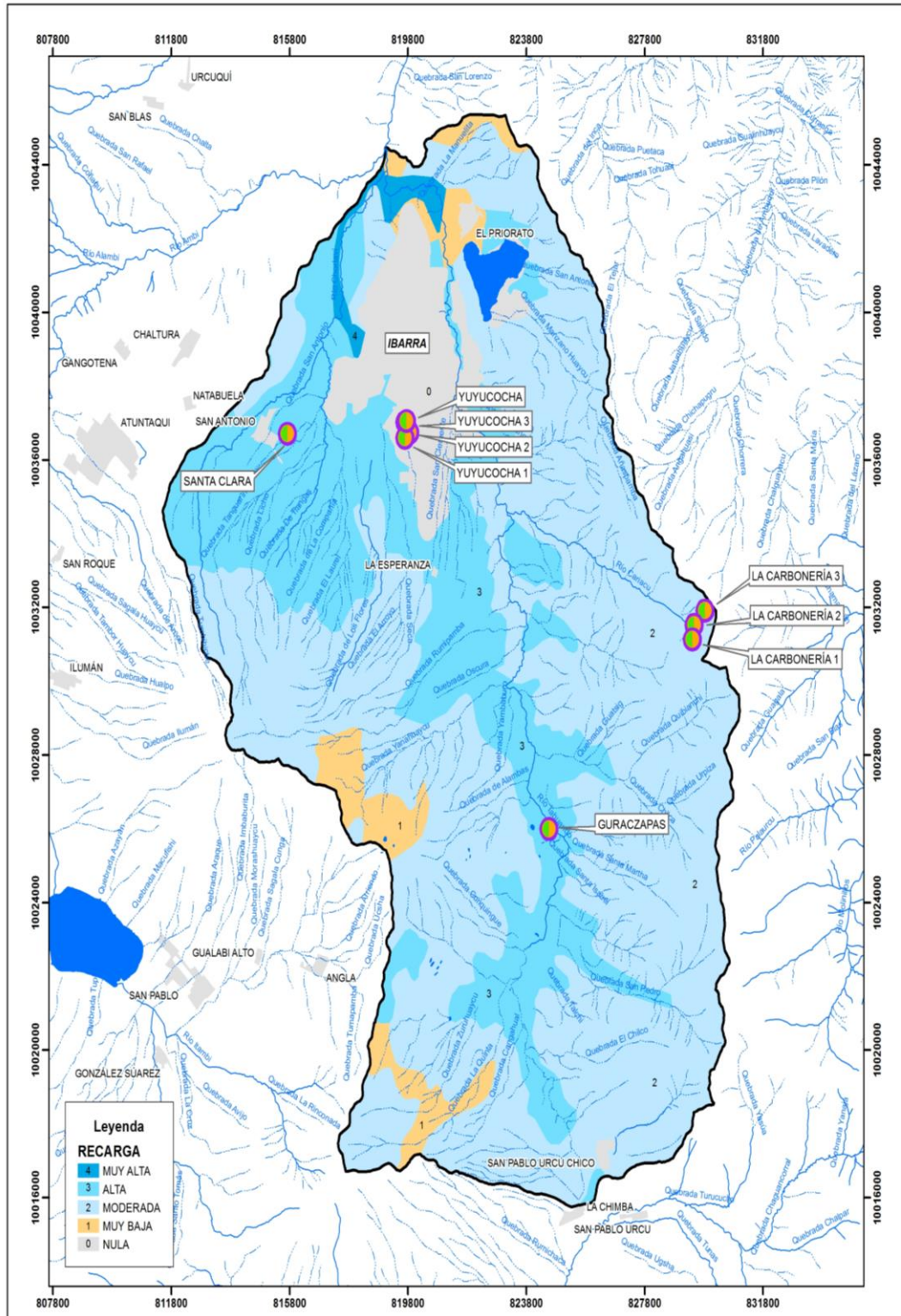


Figura 4.11. Recarga Hídrica según la textura

Elaborado por: Autora

Cuadro 4.8.- Ponderación del tipo de suelo

Acuíferos	Textura	Recarga
Yuyucocha	4	Alta
Santa Clara	4	Alta
Guaraczapas	4	Alta
La Carbonería	3	Moderada

Elaborado por: Autora

4.3.3 Litología

La litología de la cuenca hídrica del río Tahuando está compuesta por andesita, aglomerado, lahar, brecha, brecha volcánica, deposito aluvial – coluvial – glaciares, y terrazas, por lo cual dicha información permitió determinar la litología de cada uno de los acuíferos (figura 4.12).

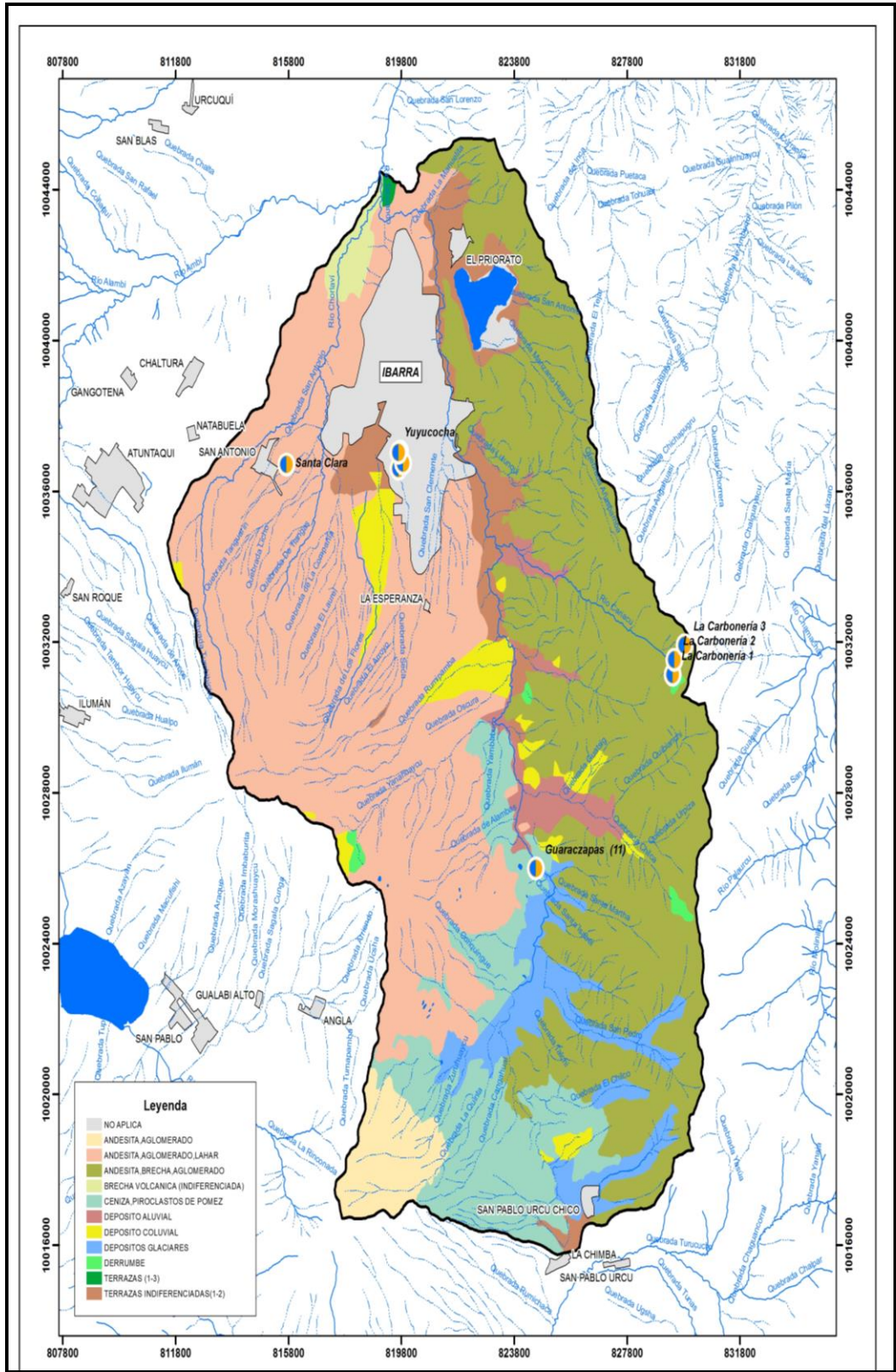


Figura 4.12 Mapa de la litología

Elaborado por: Autora

En el cuadro 4.9, se describe la ponderación de cada uno de los acuíferos en estudio en base a la información cartográfica de la litología de la cuenca. En el acuífero de Yuyucocha, las terrazas aluviales del río Tahuando están relacionadas con el drenaje principal de la cuenca, estas terrazas se encuentran ubicadas en la parte baja de la cuenca desde la cota de 2.360 msnm (sector San Francisco) hasta la cota de 1.760 msnm en la confluencia del río Tahuando con el río Ambi.

En los acuíferos de Santa Clara y La Carbonería la litología corresponde a las formaciones volcánicas del Imbabura. Están constituidos de brechas, andesitas y aglomerados. Las lavas son andesíticas mesocráticas, compactas, de grano fino a medio con fenocristales de plagioclasas y ortopiroxenos en una matriz vidriosa. Los aglomerados están constituidos por fragmentos de rocas volcánicas, redondeadas a angulares.

En el acuífero de Guaraczapas se presenta una litología compuesta de Cenizas, piroplásticos de pómez y depósitos fluvioglaciares localizados en los valles recientes en forma de U que corresponden a los sectores de La Rinconada y Angochagua. Para el cálculo de las potenciales zonas de recarga dentro de la cuenca, se utilizaron los valores de ponderación detallados en la metodología para cada uno de los acuíferos (vertientes y pozos profundos). El acuífero Yuyucocha está en una zona de recarga alta, y los acuíferos Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería están en una zona moderada, como se muestra en la figura 4.13.

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

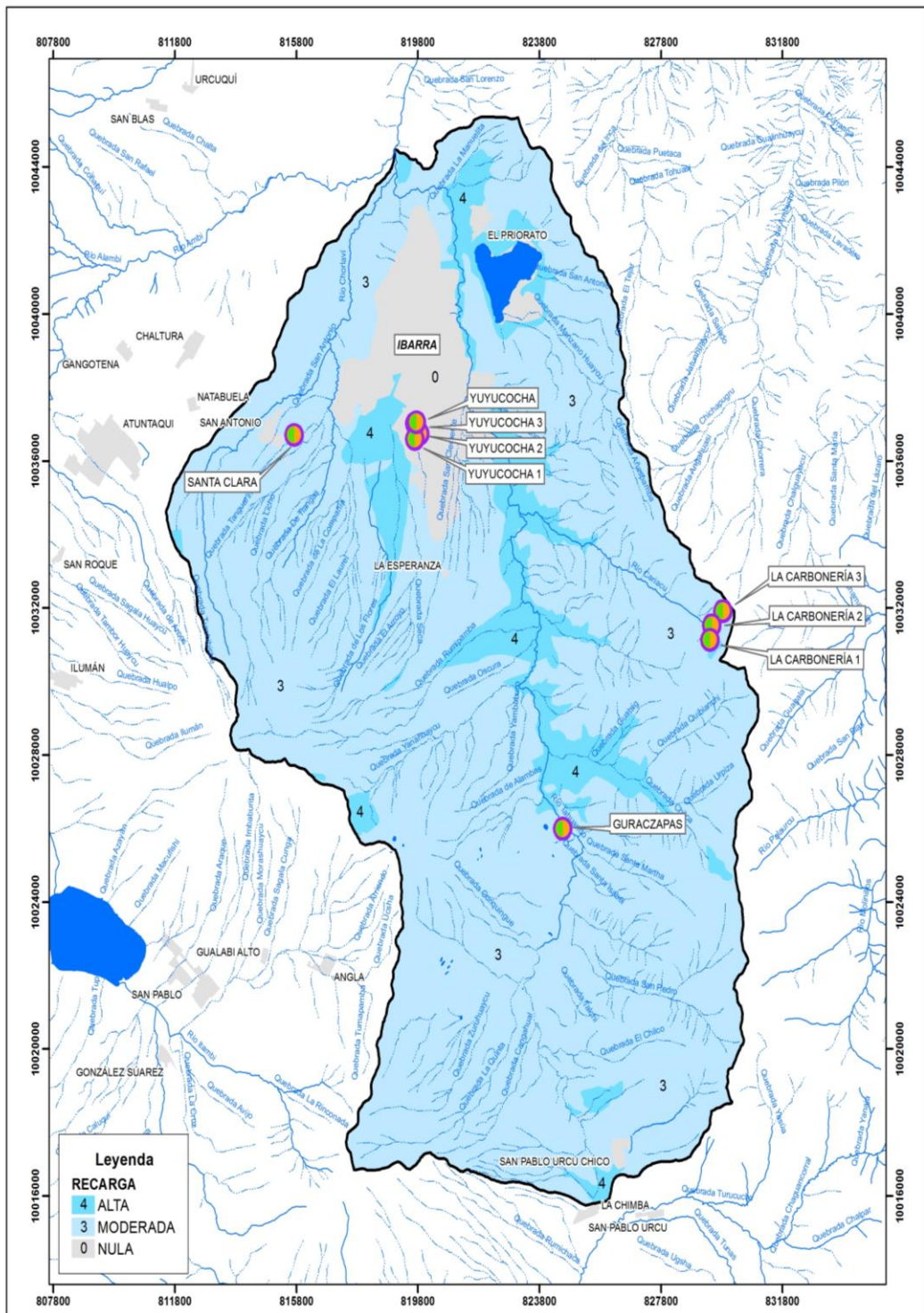


Figura 4.13. RH según la litología

Elaborado por: Autora

Cuadro 4.9.- Ponderación de la litología del área de estudio.

Acuíferos	Tipo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Yuyucocha	Terrazas	Alta	4
Santa Clara	Andesita, brecha, aglomerados	Moderada	3
Guaraczapas	Cenizas, piroplásticos de pómez	Moderada	3
La Carbonería	Andesita, brecha, aglomerados	Moderada	3

Elaborado por: Autora

4.3.4 Uso del suelo y cobertura vegetal

La cobertura vegetal puede facilitar la infiltración del agua aún en suelos compactos y arcillosos. La presencia de varios estratos de cobertura vegetal favorece la recarga hídrica y ayuda a conservar las características del suelo que también favorecen la recarga hídrica, del análisis de la cartografía de la cobertura vegetal de la cuenca del río Tahuando (figura 4.14), se determinó que existen coberturas como agropecuarias, antrópicas, bosque en tierras forestales, cuerpos de agua, eriales, vegetación arbustiva y herbácea y zona urbana, con esta categorización de la cobertura, se determinó el tipo de cobertura de los acuíferos, lo cual permitió determinar una ponderación de la potencialidad de recarga hídrica.

Fue necesario encontrar los usos del suelo que, por sus características, favorecen la infiltración del agua, como los sistemas silvopastoriles y agroforestales, el uso e incorporación de materia orgánica, o los asociados de cultivos. Además, hay que reconocer aquellos cultivos que afectan las características de suelo, dificultan la infiltración y favorecen la evaporación, la compactación y el escurrimiento superficial del agua, como la agricultura intensiva sin obras de conservación, la ganadería extensiva, la labranza convencional, o el uso de maquinaria agrícola.

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

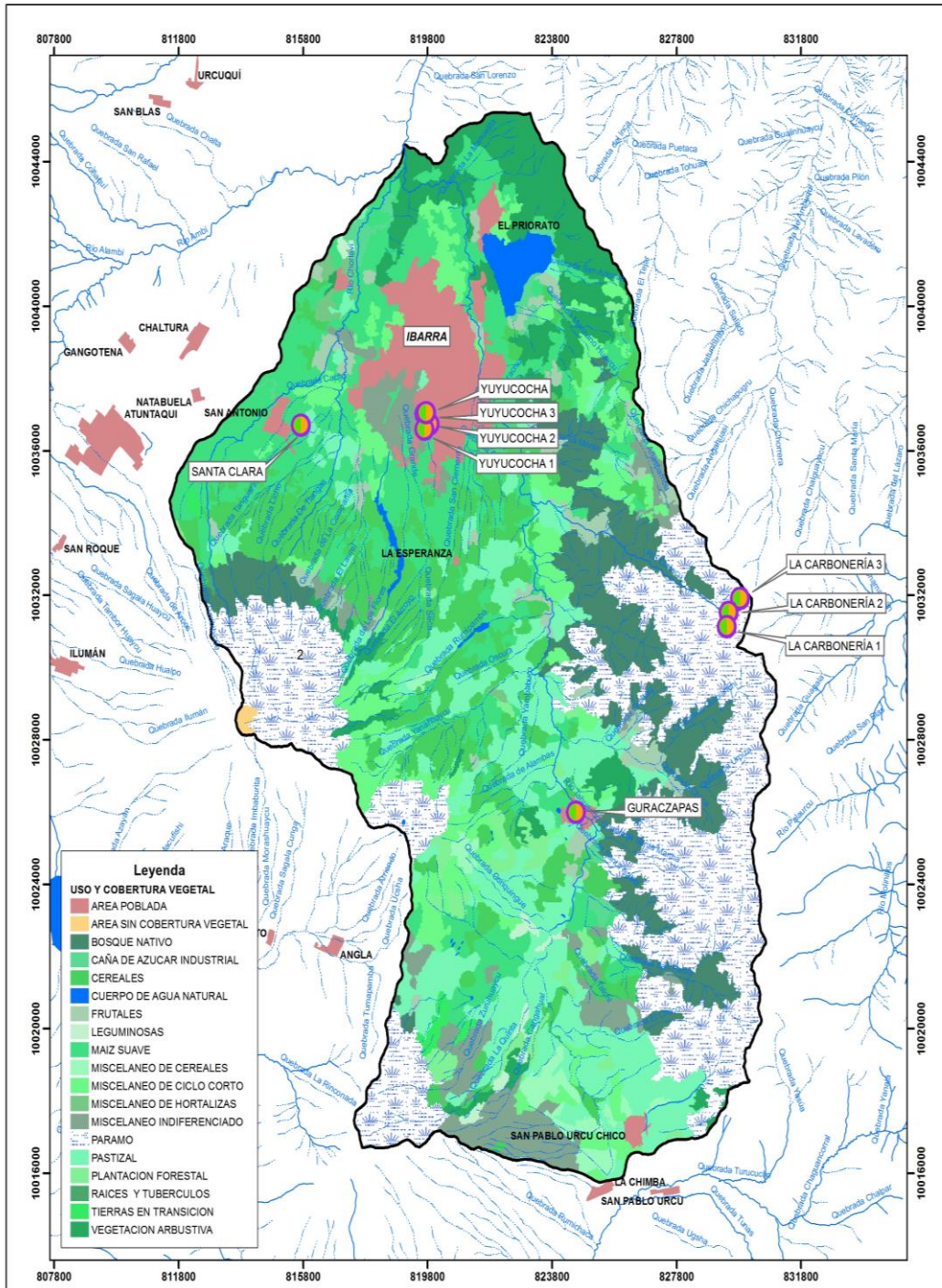


Figura 4.14, Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal

Elaborado por: Autora

En el cuadro 4.10, se determinó la ponderación de cada uno de los acuíferos que proveen de agua para la zona urbana de Ibarra, concluyendo así que los acuíferos están en diferentes zonas de recarga hídrica, por lo cual se verifica que el acuífero La Carbonería está en una zona de recarga alta, en relación a los acuíferos Yuyucocha y Guaraczapas que están en una zona de recarga moderada, y el acuífero Santa Clara se encuentra en una zona de recarga muy baja, como se muestra en la figura 4.15.

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

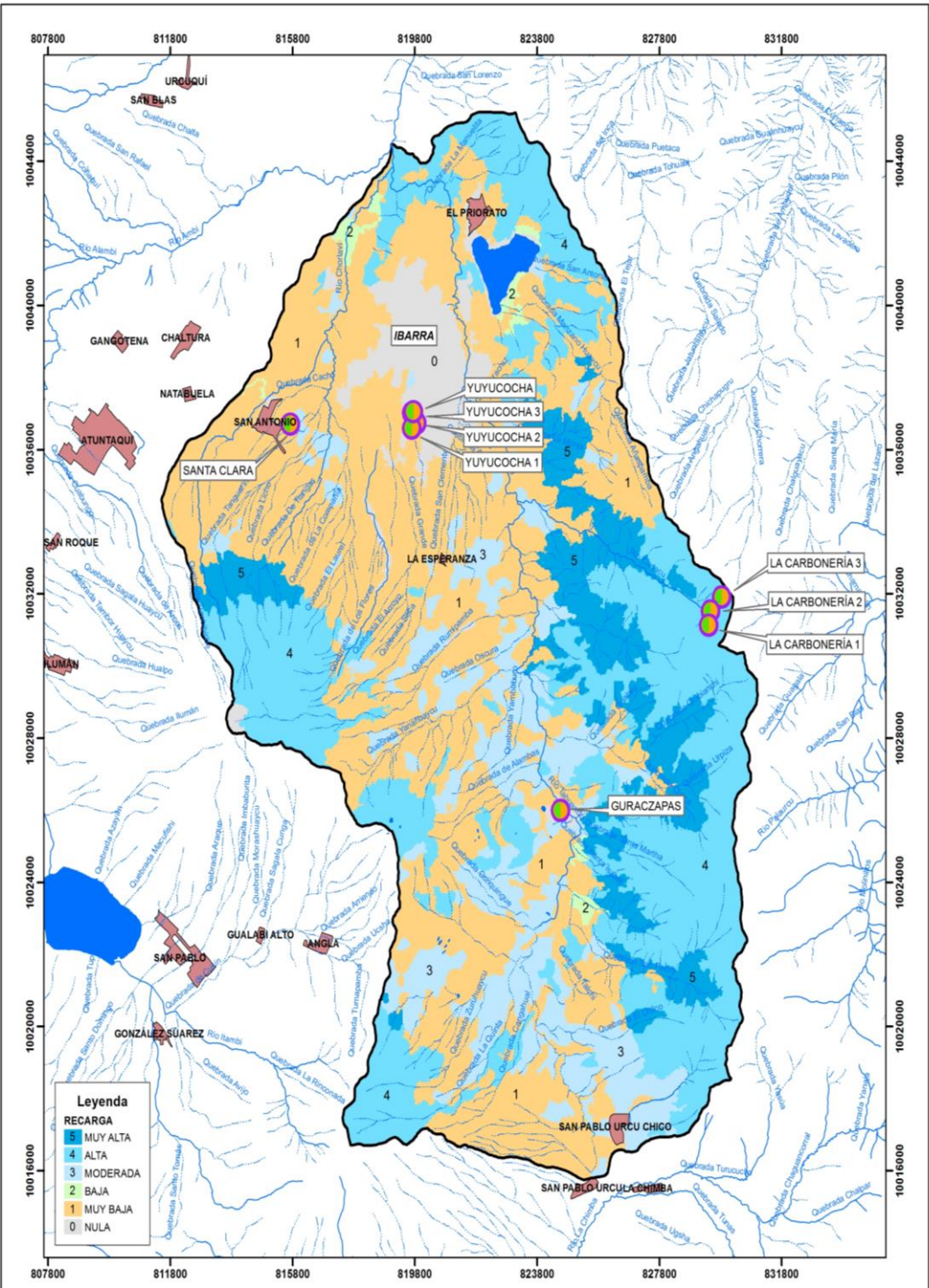


Figura 4.15. Recarga Hídrica según el uso y cobertura vegetal
Elaborado por: Autora

Cuadro 4.10.- Ponderación de la cobertura vegetal y uso del suelo

Acuíferos	Tipo	Cobertura y uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Yuyucocha 2	Pozo profundo	Pastizal	Moderada	3
Yuyucocha 1,3,4	Vertiente / pozo profundo	Asociación de pasto, cultivo y frutales	Muy baja	1
Santa Clara	Pozo Profundo	Maíz suave	Muy baja	1
Guaraczapas	Vertiente	Pastizal	Moderada	3
La Carbonería	Vertiente	Paramo	Alta	4

Elaborado por: Autora

4.4 Zonas de recarga hídrica en los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería

Para determinar el potencial de recarga hídrica en las zonas identificadas se aplicó la ecuación de Matus (2007). En el cuadro 4.11, se simplifica el valor de la ponderación de cada uno de los acuíferos en relación a los valores de la pendiente, tipo del suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. Además, se muestra la ponderación de cada elemento evaluado, la puntuación alcanzada en cada sitio y la posibilidad de recarga de dichos sitios. Las zonas que tienen posibilidades altas para que ocurra la recarga hídrica presentan características que favorecen la infiltración del agua en el suelo. Las áreas de moderada posibilidad podrían, con un buen manejo, mejorar su capacidad de recarga hídrica.

Cuadro 4.11.- Ponderación de los acuíferos para identificar las zonas de recarga

Acuíferos	Ponderaciones			
	Pendiente	Tipo del suelo	Litología	Cobertura vegetal y Uso del suelo
Yuyucocha	4	3	4	1
Santa Clara	3	3	3	1
Guaraczapas	3	3	3	3
La Carbonería	3	2	3	4

Elaborador por: Autora

En el cuadro 4.12, se detalla la recarga hídrica de los acuíferos, una vez que se evalúan las características de la zona considerando los elementos de la metodología y las tablas diseñadas para tal efecto (tablas de evaluación), se multiplicó cada resultado obtenido por su factor correspondiente y se sumaron los elementos. Esa sumatoria corresponde a un número dentro de un rango de posibilidades de recarga hídrica.

Cuadro 4.12.- Potencial de recarga de cada uno de los acuíferos

Acuíferos	Ponderaciones				ZR
	Pendiente	Tipo del suelo	Litología	Cobertura vegetal y Uso del suelo	
	0.27(Pend)	0.23(Ts)	0.12(Tr)	0.25(Cve) 0.13(Us)	
Yuyucocha	1.08	0.69	0.48	0.44	2.69
Santa Clara	0.81	0.69	0.36	0.64	2.50
Guaraczapas	0.81	0.69	0.36	1.01	2.87
La Carbonería	0.81	0.46	0.36	1.65	3.28

Elaborador por: Autora

En el cuadro 4.13, se describe el resultado de la ecuación general para determinar la recarga hídrica y se determinó que el acuífero La Carbonería matemáticamente se encuentran en áreas con una alta posibilidad de recarga hídrica; y los acuíferos de Santa Clara, Guaraczapas y Yuyucocha poseen una posibilidad de recarga moderada, cuyas posibilidades han permitido que se consideren acuíferos de mayor importancia, para abastecer de agua a la zona urbana de Ibarra.

Cuadro 4.13.- Determinación de la posibilidad de recarga de los acuíferos

Acuíferos	Recarga Hídrica	Rango	Posibilidad de recarga
Yuyucocha	2,69	2,01 – 3,0	Moderada
Santa Clara	2,50	2,01 – 3,0	Moderada
Guaraczapas	2,87	2,01 – 3,0	Moderada
La Carbonería	3,28	3,01 – 4,0	Alta

Elaborado por: Autora

Con la aplicación del modelo cartográfico, y el uso de las herramientas SIG con ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Mapa Algebra – Raster calculador, y el uso de la cartografía indicada, se generó el mapa de las zonas de recarga en formato raster, donde se verifica que el acuífero La Carbonería está en una zona alta de recarga, coincidiendo así con el análisis matemático donde se utilizó la ecuación general de Matus, además en el mapa de recargas hídricas (figura 4.16) se describe que los acuíferos de Santa Clara y Guaraczapas están en una zona moderada de recarga.

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

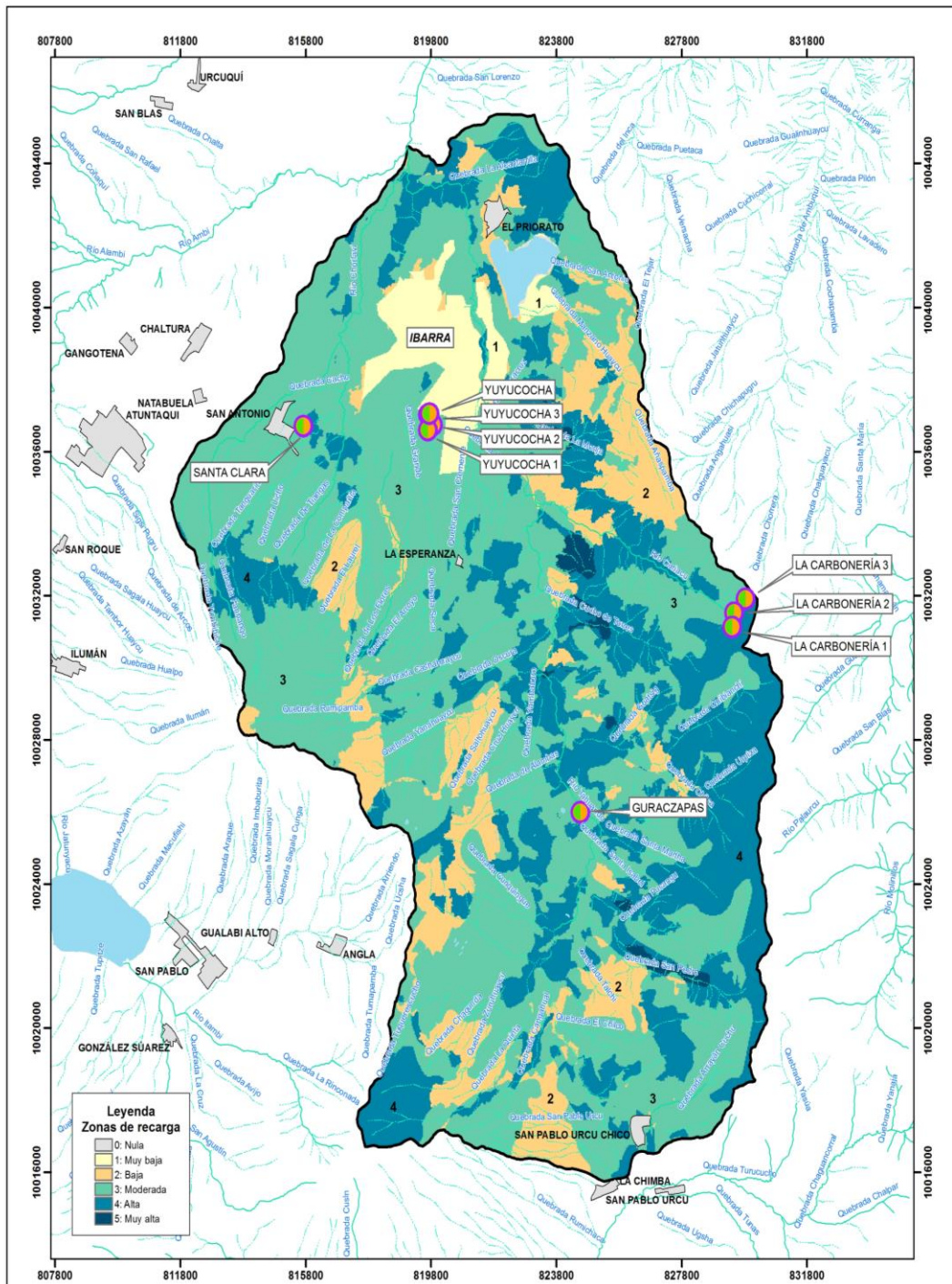


Figura 4.16 Mapa de zonas de recarga hídrica de los acuíferos

Elaborado por: Autora

Con el análisis cartográfico de la cuenca del río Tahuando, se determinó que dentro de la misma existen cinco categorías de recarga. En el cuadro 4.14, se determinó que la zona con mayor superficie es la zona *moderada*, con una superficie de 19.650,24 hectáreas, en esta zona están ubicados los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas y la zona de menor área es la zona *muy alta* con una superficie de 330,30 hectáreas, ya que comprende las partes más altas con pendientes fuertes y pronunciadas, permitiendo así que el agua escurra con facilidad y no se retenga en el suelo. Cabe indicar que la zona categorizada como *nula*, corresponde a la zona urbana de la cuenca, donde la población del cantón de Ibarra se ha establecido.

Cuadro 4.14.- Superficies de las zonas de recarga en la cuenca hidrográfica

Zonas de recarga	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Nula	253,08	0,71
Muy baja	1329,75	3,73
Baja	4486,17	12,59
Moderada	19650,24	55,13
Alta	9594,27	26,92
Muy alta	330,30	0,93
TOTAL	35.643,81	100

Elaboración: La autora

Rodríguez y Pérez (2014) mencionan que de la recarga potencial en la cuenca hidrográfica Guara se estima que el 13 y el 27% del área total con cobertura vegetal, se sustenta en zonas con alta y muy alta recarga, el 55% posee recarga media (estando cubiertos en su mayoría por bosques, pastos y el manglar, constituyendo este último, una barrera protectora contra la erosión costera) y los que aportan los menores volúmenes de agua al manto freático de forma natural representan el 5%. En la cuenca hidrográfica del río Tahuando se encontró que el 55,13% de la superficie total tiene recarga moderada y el 26,92% tiene recarga alta; la cobertura vegetal existente en estas zonas de recarga corresponde a paramo, vegetación arbustiva y pastos cultivados.

- **Recarga Hídrica Potencial**

Con el análisis de la cartografía temática se determinó el potencial de recarga de cada uno de los acuíferos, a fin de comparar con los datos recolectados en campo, como se puede observar en la figura 4.14. Para el respectivo análisis se utilizó la siguiente ecuación, propuesta por Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1998):

$$r = (1.35 (p-14)^{0.5}) (25.54)$$

Donde;

r: Recarga (mm/año)

p: precipitación (mm/año)

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG DE LOS ACUÍFEROS LA CARBONERÍA, GUARACZAPAS, YUYUCOCHA Y SANTA CLARA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS FUENTES DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA URBANA DE IBARRA

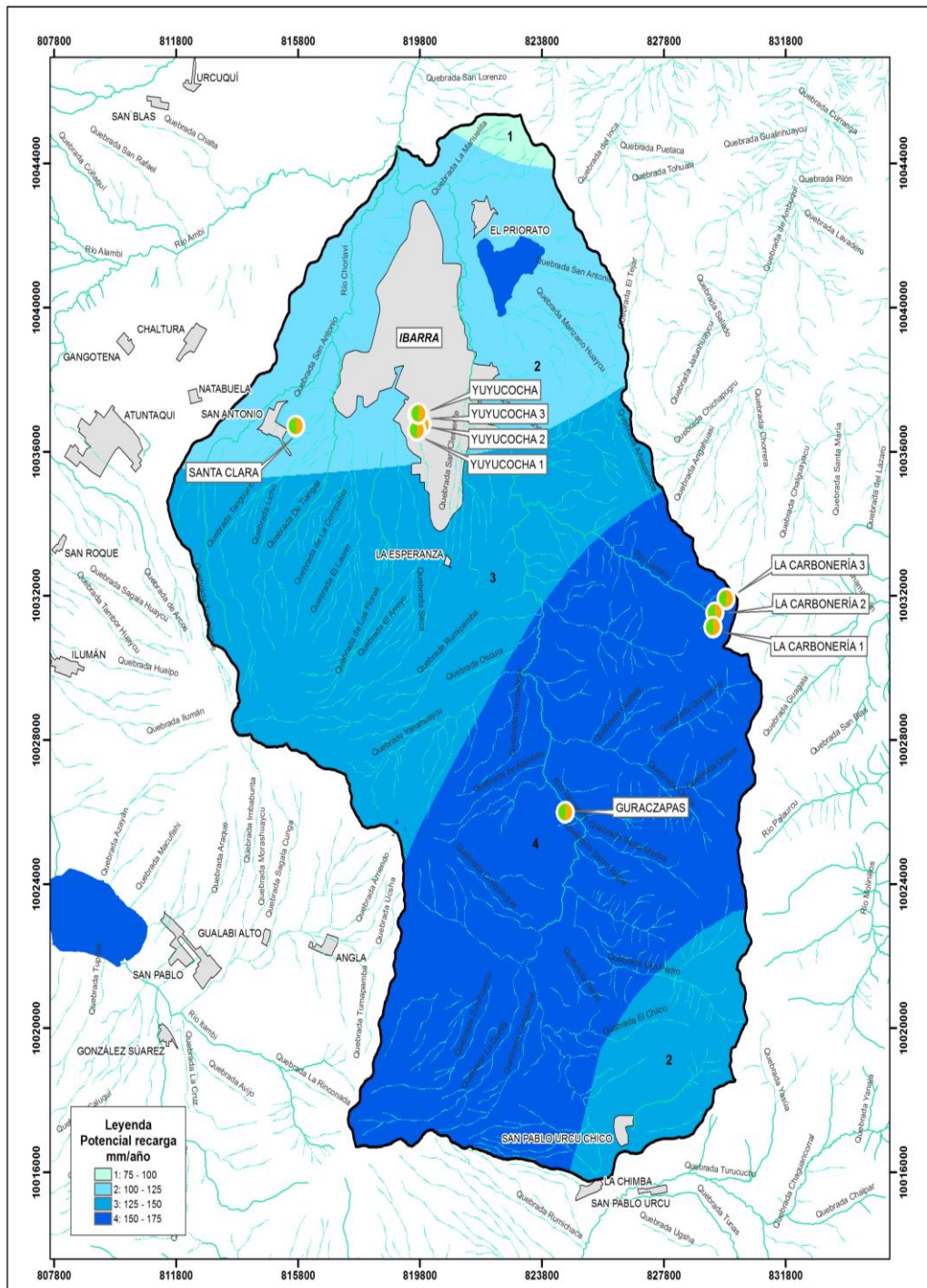


Figura 4.17. Mapa de recarga hídrica potencial.

Elaborado por: Autora

Se determinó que el potencial de recarga hídrica corresponde a la cantidad de agua que ingresa al acuífero del total de la precipitación anual en la cuenca hidrográfica. Por lo cual se observa que en los acuíferos de La Carbonería y Guaraczapas, existe una recarga de 150 a 175 mm/año y los acuíferos de Yuyucocha y Santa Clara, tienen una recarga de 100 a 125 mm/año.

Discusión:

González (2011), realizó el estudio Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la sub-cuenca del río Zaratí. En este estudio se analizó el marco legal e institucional existente en la sub-cuenca del río Zaratí; relacionado con las zonas de recarga hídrica y el agua para consumo humano, dando como resultado el desconocimiento de las leyes y la no existencia de normas relacionadas explícitamente sobre zonas de recarga hídrica (ZRH), por lo que se hace necesario ampliar el conocimiento del tema. Se identificaron de manera participativa, con actores locales, las principales fuentes de agua y las zonas potenciales de recarga hídrica (ZPRH) y se compararon con las zonas evaluadas bajo los criterios técnicos y climáticos, dando como resultado que las mejores condiciones geomorfológicas y climáticas para que ocurra una buena recarga hídrica están en la parte alta de la sub-cuenca del río Zaratí; en la cuenca del río Tahuando las condiciones geomorfológicas, principalmente las zonas planas, y las condiciones climáticas (específicamente las precipitaciones con valores mayores a 1000 mm por año) también fueron determinantes en la identificación de las zonas de recarga hídrica Alta en las vertientes de La Carbonería, concordando con los resultados encontrados en el presente estudio y con los reportados por González (2010).

4.5 Análisis de los acuíferos

El análisis se realizó de acuerdo a la capacidad de recarga en función de la pendiente del terreno, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo; además se comparó los datos de las pruebas de infiltración con la textura

del suelo en los acuíferos de Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería.

4.5.1 Acuífero de Yuyucocha

Mediante el análisis cartográfico realizado aplicando las herramientas SIG, se determinó que el acuífero en estudio pertenece al clima ecuatorial mesotérmico semi – húmedo (según la clasificación de Pourrut, 1995), está ubicado en una pendiente plana a ligeramente ondulada con un rango de 5 al 12%, con una de recarga *Moderada*, un tipo de suelo Mollisol localizado en una formación geológica de terrazas altas, textura del suelo moderadamente gruesa; se evidenció que este tipo de suelos son de aptitud agrícola. La formación vegetal corresponde a la zona de vida bosque seco Montano Bajo (bsMB), con una temperatura promedio anual de 14 a 15 °C y una precipitación total anual que varía de 500 a 750 mm.

En el cuadro 4.15, se describe la ubicación geográfica en coordenadas UTM, Datum WGS 84, zona 17 hemisferio sur, de los puntos en los que se realizó las pruebas de infiltración de agua en el suelo del acuífero. Los valores de infiltración en los dos sitios fueron de 90 mm, mientras que el tiempo que tardó el agua en infiltrarse en el suelo alcanzó una diferencia de un minuto con dos segundos, debido al uso del suelo que en el sitio uno corresponde a presencia de plantas ornamentales y en el sitio dos se evidenció la presencia de pastos cultivados con la especie kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), la velocidad de infiltración fue mayor en el sitio uno debido a que el suelo tiene textura arenosa.

Cuadro 4.15.- Determinación de la infiltración en el Acuífero Yuyucocha.

Acuífero Yuyucocha					
Ubicación geográfica, WGS 84 zona 17S			Pruebas de infiltración		
Norte	Este	Altitud msnm	Infiltración (mm)	Tiempo	Observaciones
10036604	819474	2253	90	8 min 51s	Suelo arenoso con platas ornamentales
10036657	819467	2260	90	9 min 53s	Suelo con pasto cultivado (kikuyo)

Elaborado por: Autora

4.5.2 Acuífero Santa Clara

En el acuífero de Santa Clara, de acuerdo al análisis de la cartografía con las herramientas SIG, se determinó que el acuífero está ubicado en una zona de vida de bosque seco Montano Bajo (bsMB), con una temperatura que fluctúa entre 14 a 15 °C, con una precipitación promedio de 550 mm por año, con una pendiente irregular e inclinación del terreno moderada que va del 12 al 25%, un tipo de suelo Mollisol con presencia de rocas andesitas, brechas y aglomerados, la textura es moderadamente gruesa y de aptitud agrícola, en el cual se encuentran cultivos de ciclo corto y pastos cultivados con escasa cubierta vegetal.

En la salida de campo se determinó que el acuífero Santa Clara, posee un suelo pedregoso, en estado de barbecho y pastos cultivados. Al realizar la prueba de infiltración se constató que el agua se infiltró 45 mm en 15 minutos en un suelo pedregoso, mientras que se infiltró 27 mm de agua en un lote baldío, en el cuadro 4.16 se presenta los datos tomados en campo:

Cuadro 4.16.- Determinación de la infiltración en el Acuífero Santa Clara.

Acuífero Santa Clara					
Ubicación geográfica, WGS 84 zona 17S			Pruebas de infiltración		
Norte	Este	Altitud	Infiltración (mm)	Tiempo (min)	Observaciones
10036334	815475	2364	45	15	Suelo pedregoso con plantas ornamentales
10036350	815458	2357	27	15	Lote baldío con suelo en barbecho, pedregoso y pasto.

Elaborado por: Autora

4.5.3 Acuífero Guaraczapas

En el acuífero Guaraczapas se determinó que está ubicado en una zona de vida de bosque húmedo Montano Bajo (bhMB), con una temperatura que varía de 11 al 12 °C, con una precipitación promedio de 1250 milímetros por año, la pendiente del terreno va de 25 a 50% correspondiendo a un relieve fuerte y colinado, el tipo de suelo pertenece al orden Mollisol formado de cenizas volcánicas, piroclastos y pómez, textura moderadamente gruesa con aptitud pecuaria, en la cual se encuentran pastos cultivados con escasa cobertura vegetal.

En los cinco sitios de medición de infiltración se encontraron diferencias en las cantidades de agua infiltrada y en el tiempo que tardó el agua en infiltrarse; el menor tiempo registrado fue de un minuto 50 segundos en un suelo pedregoso, el mayor tiempo registrado fue de seis minutos 24 segundos obtenido en un suelo de plantación de eucalipto (*Eucalyptus sp.*).

Cuadro 4.17.- Determinación de la infiltración en el Acuífero Guaraczapas.

Acuífero Guaraczapas					
Ubicación geográfica			Pruebas de infiltración		
Norte	Este	Altitud	Infiltración (mm)	Tiempo	Observaciones
10030992	821520	2645	90	1 min 50 s	Suelo pedregoso
10025624	824365	2815	60	1 min 57 s	Captaciones cubierta de arbustos
10025649	824439	2802	72	2 min 5 s	Captación cubierta por pasto
10025538	824313	2828	90	6 min 24 s	Captación cubierta por plantaciones de eucalipto
10023481	823904	2874	90	2 min 54 s	Captación de Zuleta

Elaborado por: Autora

4.5.4 Acuífero La Carbonería

En el cuadro 4.18, se detallan los datos tomado en campo en las pruebas de infiltración y la caracterización del acuífero La Carbonería, mediante el análisis cartográfico con las herramientas SIG se determinó que el rango de pendiente con relieve fuerte y colinado tiene valores de 25 a 50%, en suelos de tipo Inceptisol con textura media, la formación geológica presentó litología compuesta por andesitas, brechas y aglomerados. El área de influencia del acuífero consta de vegetación arbustiva y herbácea; este acuífero debido a la escasa intervención antrópica se puede clasificar como área de Conservación y Protección, con una zona de recarga alta.

Debido a la importancia hidrológica y de producción de agua del acuífero La Carbonería se realizaron en campo nueve pruebas de infiltración: una en la entrada a las captaciones, dos en la Captación 1, dos en la Captación 2 y 3 en la Captación 3; el valor más bajo de infiltración fue de 5 mm obtenido en la captación con una cobertura vegetal de páramo herbáceo y suelo saturado, mientras que el valor más alto (83 mm) se obtuvo en un suelo con cobertura de pajonal con pendiente plana en un tiempo de 15 minutos.

Cuadro 4.18.- Determinación de la infiltración en el Acuífero La Carbonería.

Acuífero La Carbonería					
Ubicación geográfica			Pruebas de infiltración		
Este	Norte	Altitud msnm	Infiltración (mm)	Tiempo	Observaciones
Entrada a captaciones					
829371	10032119	3651	7	15 min	Pendiente 25%
Captación 1					
829266	10031229	3590	25	15 min	Suelo con 60% pedregosidad
829296	10031440	2582	11	15 min	Bosque - pendiente 25%
829298	10031513	3570			Posible zona de recarga
Captación 2					
829345	10031642	3580	5	15 min	Pendiente 15%, predomina vegetación de páramos herbácea y suelo saturado
829323	10031638	3574	66	8 min 24 s	Pendiente 3%, bajo cubierta vegetación de matorral (romerillo)
Captación 3					
829312	10031883	3573	83	15 min	Pendiente 0% - suelo pajonal - recarga superficial
829313	10031831	3578	34	7 min 12 s	Pendiente 22% - suelo páramo
829303	10081872	3571	8	15 min	Pendiente 2% - bajo cubierta de vegetación árbol Polylepsis

Elaborado por: Autora

Discusión:

Ramírez y Vargas (2010), realizaron en Honduras la investigación Delimitación y evaluación de las zonas de recarga hídrica para las Montañas de El Volcán y La Chorrera. En esta investigación se menciona que Honduras es un país montañoso, contiene grandes cuencas hidrográficas con importantes zonas de recarga hídrica localizadas en las partes más altas de las cordilleras. Tales zonas están conformadas esencialmente por áreas impactadas por nubes y neblinas. Los sistemas montañosos de El Volcán y La Chorrera, tienen en sus porciones más altas zonas de recarga que abastecen de agua a importantes centros poblados y de enriquecer los mantos freáticos subterráneos en las tierras bajas. El presente

estudio muestra claramente que las zonas de recarga se inician a partir de los 1.450 msnm. En estas zonas la biotemperatura media anual oscila entre los 12 y 18 °C y la precipitación promedio total anual entre los 2.000 y 4.000 mm. También se explica que el avance de la frontera agrícola ha sido y continúa siendo una fuerte amenaza para los bosques latifoliados, ante tan crítica situación se sugiere legalizar las zonas de recarga como áreas protegidas, gestionar la protección y manejo y en el caso concreto de la zona La Chorrera proceder a la restauración.

En la cuenca del río Tahuando la presencia de colinas, montañas y el volcán Imbabura juntamente con la existencia de cobertura vegetal de páramo y vegetación arbustiva influyen directamente en la distribución geográfica de las zonas de recarga, identificando que las zonas con recarga Alta se localizan en la parte alta de la cuenca (vertiente oriental), y las zonas con recarga Moderada se distribuyen en casi la totalidad de la cuenca media y baja (vertientes oriental y occidental); además se determinó que las actividades agrícolas, pecuarias y presencia de zonas urbanas de la parte baja y media de la cuenca influyen en que la capacidad de recarga hídrica superficial sea Moderada y Baja; estos resultados se asemejan a los encontrados por Ramírez y Vargas (2010) en las cuencas de Honduras, las mismas que desde el punto de vista de relieve y uso de suelo se asemejan a la cuenca del río Tahuando.

4.6 Lineamientos de Manejo y Conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería, que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra

Para determinar los lineamientos para el manejo y conservación de las zonas de descarga, se analizó la problemática, estructura de los lineamientos y el plan de acción que se pueden desarrollar en los acuíferos.

4.6.1 Desarrollo de la metodología empleada

Para la formulación de los lineamientos se empleó una metodología participativa, la cual se realizó en condiciones de campo, a través de una entrevista general a las personas que se encontraban cerca de los acuíferos, cuando se realizó el trabajo de campo, además se coordinó y se entrevistó a los técnicos de EMAPA-I, los cuales en el paso de los años, han realizado visitas a las comunidades cercanas a los acuíferos, talleres exploratorios y de sensibilización permitiendo así la participación de la comunidad en la elaboración de una línea base, lo cual permitió determinar la problemática y la posibilidad de efectuar un análisis cuantitativo (caracterización) determinando su situación, a través de indicadores sociales, económicos, y tecnológicos además de establecer la identificación de dirigentes o representantes dentro del asentamiento, conociendo las deficiencias que poseen dentro del tema de conservación ambiental.

El procedimiento metodológico fue el siguiente:

- a. **Desarrollo rural participativo:** Consistió en llegar a la mayoría de la población afectada directamente mediante visitas de campo y así determinar su situación y el nivel de participación en la comunidad.
- b. **Instrumento y recolección de la información:** La información recopilada en los distintos talleres participativos se procesó y analizó a través de las relatorias, con el fin de obtener la línea base para plantear los lineamientos.
- c. **Procesamiento de la información:** La información fue procesada manualmente, obteniendo la problemática y caracterización de la zona de investigación, con esto fue posible plantear los lineamientos de este plan.
- d. **Expectativas de las comunidades:** Con la finalidad de evaluar las expectativas, económicas, ambientales y sociales de los pobladores que se asientan cerca a los acuíferos, se planteó varias capacitaciones y accionares que tiendan a llenar las expectativas de la comunidad, las mismas que fueron recolectadas a través de los talleres efectuados.

4.7.2 Problemática

En la zona de recarga hídrica de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara, los principales problemas de la sociedad y del medio ambiente relacionado con los recursos hídricos son los siguientes:

- Conflicto por el uso del agua de consumo y el uso agrícola, principalmente en la ciudad de Ibarra;
- Los impactos ambientales del uso de agua y del desarrollo urbano;

4.7.3 Estructura de los lineamientos

Los aspectos institucionales definen los reglamentos sobre lo qué se debe hacer para atender los objetivos planteados en los lineamientos de conservación y manejo de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra, y quién lo debe hacer.

Los principales aspectos a tratar en este grupo son:

- El ámbito legal, las leyes que dan soporte, definen competencias y atribuciones para administrar y ejecutar acciones para la conservación y manejo de los acuíferos.
- El fortalecimiento de las capacidades técnicas de los miembros de las juntas de aguas inmersos en los acuíferos tratados, orientación de los miembros de los comités, los profesionales, y la sociedad en general;
- Estrategias de comunicación y difusión en diferentes niveles y ámbitos a lo largo de las zonas de recarga hídrica;

4.7.4. Plan de acción en los acuíferos

- Conservación: protección de las fuentes de agua, calidad y cantidad del agua y protección de las áreas naturales: páramos, bosques, etc.;
- Uso del suelo;
- Gobernanza;

- Gestión técnica

El plan de acción para la EMAPA-I debe ejecutarse en las siguientes zonas prioritarias con recarga potencial:

1. Las zonas de recarga con potencial *Alto* se caracterizan por poseer una cobertura de paramo y vegetación arbustiva, lo que contrarresta algunas limitantes como las pendientes muy pronunciadas del terreno en donde se ubican las vertientes de La Carbonería (1,2,3); además, poseen suelos con texturas media y moderada capacidad de infiltración. Por lo que, en este caso las medidas de conservación y protección son las que se adaptan mejor para el manejo de las mismas.
2. En cuanto a las zonas con potencial *Moderado*, estas presentan limitante en cuanto a la cobertura y uso del suelo, que están constituidos por pastos cultivados, cultivos de ciclo corto y frutales, las pendientes tienen valores que van de 5% a 50%; lo que permite manejar, controlar y mejorar las prácticas agrícolas en estas zonas que corresponden a Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara. Estas zonas deben ser consideradas preferenciales por cuanto se encuentran mayormente distribuidas en toda la superficie de la cuenca, es decir que su potencial puede ser incrementado si se realizan actividades de repoblación de flora silvestre; pero si no se toman medidas de manejo adecuado del suelo ese potencial puede disminuir.

4.7.5 Matriz de Lineamientos de Manejo y Conservación de los Acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería

A continuación, en el cuadro 4.20, se describe el plan de acción lógico para el desarrollo de los lineamientos.

Cuadro 4.19.- Matriz de lineamientos

Lineamiento	Responsables	Tiempo	Posibles fuentes de financiamiento
1. Protección y conservación de fuentes de agua superficiales y subterráneas de la zona de recarga hídrica			
1.1 Actualización y/o creación de los catastros de la situación de fuentes de agua superficial y subterránea (cuantificación, tipo fuentes, nivel contaminación, caudal base, calidad de agua, caudal ecológico, nivel contaminación, usos, estatal o privada, adjudicación, mapeo).	SENAGUA MAE PREFECTURA DE IMBABURA (Dirección de Riego y Drenaje) EMAPA	3 años	Gobierno Central Cooperación internacional Gobiernos Locales (GADS)
2. Calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas para mantener los ecosistemas acuáticos básicos			
2.1 Establecimiento de la política y control para la conservación y explotación de aguas	SENAGUA MAE Municipio de Ibarra Prefectura de Imbabura (Dirección de Riego)	8 meses	Gobierno Central
2.2 Establecimiento de Entidad (es) encargada (s) del control de parámetros de calidad	SENAGUA	2 años	Gobierno Central
3. Conservación de páramos, bosques nativos, áreas protegidas, bosques protectores			
3.1 Utilización racional de agua (incluir índices)	SENAGUA LEY	10 años	Gobierno Central Autogestión Cooperaciones internacionales
3.2 Cambio de categoría de bosques exigüos nativos a bosques protectores	MAGAP MAE SENAGUA Municipio de Ibarra Prefectura de Imbabura	5 meses	Gobierno Central

3.3 Delimitación de franjas verdes y zonas de amortiguamiento alrededor de fuentes de agua, ríos y quebradas aledaños a los acuíferos	SENAGUA MAGAP MAE Prefectura de Imbabura (Dirección de Riego)	8 meses	Gobierno Central GADS
3.4 Implementación de sistemas de control y sanciones para áreas protegidas protección del acuífero La Carbonería (a través de la creación de una ordenanza que regule esto)	MAE Municipio de Ibarra	6 meses	Gobierno Central
3.5 Reforestación con especies nativas en lugares degradados en los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas	MAGAP MAE Municipio de Ibarra	2 años	Gobierno Central GADS Autogestión
3.6 Optimización de actividades agropecuarias: reducción de la carga animal y control del pastoreo en páramos, delimitación de la frontera agrícola	MAGAP MAE	3 años	Gobierno Central GADS
4. Fortalecimiento e incentivos de actividades productivas y agroecológicas de manera sustentable			
4.1 Los acuíferos cuentan con un plan de ordenamiento territorial. El plan será elaborado en base a los planes de ordenamiento territorial del cantón Ibarra	MAE MAGAP SENAGUA SENPLADES PREFECTURA DE IMBABURA MUNICIPIO DE IBARRA Universidades de la localidad	2 años	Gobierno Central Cooperación internacional Gobiernos Locales (GADS)
5. Calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas para mantener los ecosistemas acuáticos básicos			
5.1 Áreas protegidas del PANE y bosque protector en la cuenca del río Tahuando ejecutan sus planes de manejo	MAE Propietarios Comunidades Juntas de agua	2 años	Gobierno Central Cooperación internacional Gobiernos Locales (GADS)
6. Ordenamiento y Zonificación Territorial			

6.1 Subsistemas de áreas naturales protegidas consolidados	Municipio de Ibarra MAE Prefectura de Imbabura Propietarios de predios aledaños Comunidades Organizaciones de usuarios Juntas de agua	15 años	Gobierno Central Cooperación internacional Gobiernos Locales (GADS) Juntas de agua
6.2 Los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y la Carbonería cuenta con al menos el 80% de sistemas de uso eficiente del agua	Municipio de Ibarra MAE Prefectura de Imbabura Propietarios de predios aledaños Comunidades Organizaciones de usuarios Juntas de agua	15 años	Gobierno Central Cooperación internacional Gobiernos Locales (GADS) Juntas de agua
7. En ejecución la etapa piloto del plan de monitoreo del cumplimiento de los lineamientos de manejo y conservación			
7.1 Ejecución del plan piloto de monitoreo	Junta de manejo de los acuíferos debidamente establecida	5 años	GADS Juntas de agua
8. En ejecución una campaña ciudadana de sensibilización y concientización del uso del agua.			
8.1 Ejecución de primera fase de sensibilización y concientización, a través de las capacitaciones que se propone para ciudadanía en general y técnicos especializados.	Municipio de Ibarra MAE MAGAP Universidades de la Zona 1 Prefectura de Imbabura Propietarios de predios aledaños Comunidades Organizaciones de usuarios Juntas de agua	15 años	Instituciones involucradas

Elaborado por: Autora

4.7.6 Capacitación

Esta estrategia es fundamental y efectivo si se quiere lograr la participación de la población de actores directos e indirectos, ya que es necesario que las personas

involucradas tengan un conocimiento mínimo e interdisciplinario sobre los fundamentos de la gestión para alcanzar mayor impacto en la conservación y manejo de los acuíferos investigados.

En el Cuadro 4.21, se presenta los contenidos previstos para la capacitación de los diferentes grupos. Estos contenidos deben ser integrados en un programa con las siguientes actividades:

- Cursos formales de especialización en cooperación con las universidades de la Zona 1, organismos gubernamentales (MAE, MAGAP, SENAGUA)
- Talleres con discusiones sobre los temas y ejemplos de trabajo;
- Conferencias dictadas por profesionales, abierto a toda la comunidad.
- **El Grupo A**, hace relación a todos los agricultores, comuneros, pobladores aledaños de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería
- **El Grupo B**, se refiere a los técnicos de las distintas entidades relacionados con el recurso agua (técnicos de Prefectura de Imbabura, MAE, MAGAP, GADS, estudiantes universitarios)

Cuadro 4.20.- Contenidos de temas de cursos, talleres y conferencias propuestos para los comuneros, usuarios y técnicos del Sistema de Agua Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería.

Responsables de los cursos, talleres, conferencias	Contenido	Grupo
Universidades de la Zona 1	Gestión Integrada de los recursos hídricos	A
	Contaminación del Agua	
	Gestión de la descontaminación	
MAGAP	Frontera Agrícola	A Y B
MAE-MAGAP	Manejo de Páramos	
	Conservación de Páramos	
Secretaría Nacional de	Reforestación	
	Gestión de desastres naturales	A

Gestión de Riegos	Manejo de conflictos	
SENAGUA	Usos del agua	A
	Monitoreo hidrológico	B
	Modelos Hidrológicos y Calidad del Agua	
	Caudal Hidrológico; Evaluación y gestión de sedimentos en cuencas	
	Evaluación Ambiental Integrada y Estratégica	

Elaborado por: Autora

4.7.7 Gerenciamiento de la cuenca

En la experiencia adquirida, el manejo de los recursos hídricos es realizado por cuenca y en cada cuenca el sistema de manejo es ejecutado por:

- un comité de cuenca que tiene funciones deliberativas; y,
- una agencia de cuenca que tienen funciones ejecutivas.

En este caso los acuíferos tratados se hallan en la micro cuenca del río Tahuando, en la cuenca binacional Mira-Mataje, por eso es necesario reforzar el gerenciamiento de la micro cuenca, en la situación legal actual y prevista por la nueva legislación de los recursos hídricos propuesta, la función del comité de cuenca es consultiva. Dentro de este condicionante legal se enmarca *la propuesta de creación de una entidad de derecho público* que debe ser ajustada en la medida que Ley y su reglamentación es aprobada en el país.

Estructura: La entidad propuesta debe estar compuesta por estos miembros:

1. Autoridades públicas nacional y provincial, de agua y ambiente;
2. Parroquias de la micro cuenca: Angochagua, La Esperanza, San Antonio e Ibarra;
3. Usuarios del agua:
 - 3.1 Abastecimiento de la ciudad de Ibarra;
 - 3.2 Riego y uso agrícola;
 - 3.3 Uso industrial;
 - 3.4 Energía hidroeléctrica, termoeléctrica y recreación;

3.5 Conservación y preservación ambiental.

4. Representantes de la sociedad:

4.1 ONGs;

4.2 Representantes de entidades de enseñanza e investigación (público o privado).

Las atribuciones previstas para la Asamblea de Miembros son:

- Elegir los miembros del comité consultivo;
- Aprobar el presupuesto y el rendimiento de cuentas anuales de la entidad;
- Modificaciones en la contribución de los miembros;
- Aprobar el estatuto y las alteraciones del mismo.

Discusión:

- En relación a los lineamientos planteados en el presente estudio y comparados con el estudio realizado por González (2011), sobre el Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la sub-cuenca del río Zaratí. En los dos estudios se analizaron el marco legal e institucional existente en el área de estudio; relacionado con las zonas de recarga hídrica y el agua para consumo humano en la ciudad de Ibarra, dando como resultado la falta de normas relacionadas explícitamente sobre zonas de recarga hídrica (ZRH), por lo que se hace necesario realizar futuras investigaciones relacionadas con la temática. Se identificaron con técnicos de la EMAPA-I y actores locales, las principales fuentes de agua y las zonas potenciales de recarga hídrica (ZPRH) y se compararon con las zonas identificadas mediante la herramienta Model Builder, obteniendo como resultado que las mejores condiciones geomorfológicas, textura del suelo y climáticas de la parte media y alta de la cuenca influyen en la recarga hídrica alta y moderada de los acuíferos, siendo necesario aplicar lineamientos generales y medidas de protección, conservación y manejo adecuado del suelo.

- Matus (2007) elaboró una metodología participativa para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, en Nicaragua. Esta investigación se realizó con el objetivo de elaborar una propuesta metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, la cual combine el conocimiento técnico-científico con el local y/o tradicional. Se aplicó la propuesta metodológica en conjunto con los comités locales de cuenca. De igual manera, se validó la propuesta mediante la aplicación de mapas y el software ArcView, aplicando el método RAS (Recarga de Agua Subterránea) y comparando los resultados de las tres aplicaciones. Con base en el conocimiento local de comunitarios y técnicos, se propusieron estrategias y acciones para el manejo adecuado y sostenible de las zonas de recarga hídrica. En el cumplimiento de los objetivos se realizaron talleres donde a la vez se usaron herramientas participativas, revisión de literatura, diálogo semi-estructurado y visitas de campo. Los resultados mostraron que: hay bastante similitud o concordancia entre los resultados del método RAS (mapa de recarga), con los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto (mapa potencial de recarga); se sugieren estrategias y/o acciones para el manejo adecuado y sostenible de zonas de recarga hídrica.

En base al estudio anterior se propusieron Lineamientos de Manejo y Conservación de las zonas de recarga hídrica de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería, que abastecen de agua a la ciudad de Ibarra, considerando la importancia que tienen las zonas de recarga hídrica potencial para la EMAPA-I y usuarios del agua de la zona urbana y suburbana de la ciudad de Ibarra, además se contó con la participación directa de técnicos ambientales de la empresa y guardias operativos de los pozos y vertientes.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se determinó que la variable física pendiente del terreno fue la que mayormente influyo en la identificación de las zonas de recarga hídrica de la cuenca del rio Tahuando, debido a las condiciones geológicas y geomorfológicas del relieve.
- La actividad agropecuaria es fundamental en el desarrollo productivo, social y económico de la población y está directamente relacionada con los sistemas hídricos, siendo así que en las vertientes Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas, el principal uso del suelo es la actividad agrícola y pecuaria, estas áreas dificultan la recarga hídrica porque son suelos con sobreuso, erosionados y con escasa vegetación arbustiva.
- El área del acuífero La Carbonería está cubierta por varios estratos de vegetación arbustiva y herbácea, lo que favorece altamente la recarga hídrica; el tener este tipo de cobertura vegetal beneficia la conservación de las características del suelo mejorando capacidad de infiltración y retención del agua.
- Los comuneros de las zonas aledañas de estos acuíferos Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas, tienen escasos conocimientos sobre manejo y conservación de estos importantes acuíferos, que proveen de agua a la ciudad de Ibarra, por lo cual las áreas aledañas a los acuíferos presentan problemas en cuanto a uso del suelo.

- Las zonas con mayor potencial de recarga hídrica se localizan en la parte alta y media de la cuenca, ya que estas áreas se encuentran cubiertas por vegetación de bosque nativo y matorrales, la precipitación media anual es superior a 1000 mm, de los cuales aproximadamente entre el 14 y 15% del agua de lluvia aporta a la recarga hídrica de los acuíferos.

5.2 Recomendaciones

- Es necesario que se concientice a los distintos estamentos de gobiernos seccionales y locales y organizaciones privadas sobre la importancia de conservar y mantener las zonas de recarga hídrica identificadas, haciendo que estos establezcan políticas de manejo hacia las mismas.
- Al caracterizar el uso actual del suelo y determinar que el principal uso es el agropecuario, se debe recuperar y mantener mediante estrategias de diversificación de cultivos y Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), especialmente en los suelos de los acuíferos Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas.
- Una vez planteados mediante metodologías participativas los lineamientos de Conservación y Manejo de los Acuíferos Yuyucocha, Santa Clara, Guaraczapas y La Carbonería, propuestos en el presente estudio, se debe ejecutarlos en su totalidad, ya que en estos se engloban las principales actividades que están encaminadas a la búsqueda de la sostenibilidad de estas zonas de producción hídrica.
- En los acuíferos de la Carbonería se recomienda mantener la cobertura vegetal existente para garantizar la producción de agua del páramo y bosque nativo.

CAPÍTULO VI

6. BIBLIOGRAFÍA

- Albuja, J. (2012). Diseño de un sistema de riego para la hacienda santa mercedes en la ciudad de Ibarra provincia de Imbabura. Quito.
- Aldas, J. (2013). Estudio de variación de la cobertura vegetal y estado actual del Cerro Imbabura aplicando herramientas GIS con fines de declaración de área protegida. Quito.
- Almeida, L. (2014). Una revisión de la calidad del agua de los ríos de la provincia de Imbabura. Quito.
- Aparicio, M. 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. Cuernavaca, México, Lisuma. 303p.
- Aro, E. R. (2012). Plan para el mantenimiento de diez fuentes de agua con plantas nativas en el cantón Otavalo. Ibarra.
- Bueso, M. (2010). Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Taco y Shusho. Chiquimula, Guatemala.
- Cadena, H. (2012). Hablemos de riego. Creadores gráficos. Quito - Ecuador. 43 pp
- Calvo, L. 2005. Métodos de riego: un enfoque práctico para el diseño. San José, Costa Rica, Colorgraf. 168p.
- Cano. (2011). Geodinámica reciente del relieve: geo pronóstico de desastres naturales y de cambios geo ecológicos seculares. En: Geodinámica y riesgos naturales, IV encuentro de geógrafos de América Latina, Mérida, Venezuela.
- Carrica, Jorge C. y Lexow, Claudio. 2004. Evaluación de la recarga natural al acuífero de

- la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. Rev.
- Asoc. Geol. Argent., abr. /jun. 2004, vol.59, no.2, p.281-290.
- Castany, G. 1971. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Barcelona. Ed. Omega. 672p.
- CATIE. (2009). Geografía física, componentes naturales y paisajes geográficos. Facultad de geografía, universidad de la habana.
- Constitución de la República del Ecuador. (2009). ECUADOR
- Custodio, A. & Llamas, R. (2001). Características espaciales y temporales de la precipitación atmosférica en latino américa. Academia, la Habana, 150 pp.
- Custodio, G. (1998): regionalización climática y tipos de clima. En: Nuevo Atlas Nacional de España. Ed. Rea, Madrid, pp. VI.1.1.
- Dourojeanni J.R (2004). Evolución geotectónica y endodinámica reciente del relieve como fuerzas motrices corticales de los cambios espacio-temporales de la cobertura terrestre y sus ciclos biogeoquímicos a diferentes escalas multidimensionales. Archivo Inst. Geografía Tropical, La Habana, 17 pp.
- Dominguez, J. Pazmiño E. (2014). Plan de manejo participativo para el aprovechamiento del agua del cerro cubilche. UTN. Ibarra- Ecuador.
- FAO (2015). Estudio de la distribución de las cuencas hidrológicas en el Ecuador.
- Faustino, G. (2006). Manejo de cuencas y conservación de suelos. Archivo. Universidad Católica de Chile.
- Fuentes, P. (2005). Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México. DF. 303 PP
- García, J.R., D.A., Lilienberg y González Ortiz. (2005). Regionalización morfoestructural de la sierra maestra y de las depresiones circundantes. Rev. Cien. Tierra Esp., 12: 36-48.
- González Carrasco, W. del C. 2011. Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 175 p.
- Guerra, G. (2011). Cuencas hidrográficas. Lima: Universitaria.

- Guides, H. (1976). Funciones dentro de una cuenca hidrológica. *Global reach*, 59.
- Guides, H. (s.f.). Funciones dentro de una cuenca hidrográfica
- Harol, M. Ruiz, P. (2012). Determinación del potencial de recarga hídrica de las zonas de potencial erosión de las laderas del volcán Imbabura. UTE. Quito – Ecuador.
- INAB. (2003). Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Guatemala: CATI. 106p
- INAB. 2005. Identificación de las tierras forestales de captación y regulación hidrológica, la sub cuenca los Vados, cuenca río Los Esclavos. Guatemala. 69 p.
- Jiménez, F. 2009. Introducción al manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Turrialba, CR, CATIE. 31 p.
- Losilla, M. 1986. Aguas subterráneas; generalidades, ocurrencia, tipos de acuíferos. In Curso bases hidrológicas para el manejo de cuencas. Mayo 1987. Turrialba, CR, CATIE. 9 p.
- Losilla, M. 1986. Protección de las zonas de recarga de los acuíferos. In Curso bases hidrológicas para el manejo de cuencas. Mayo 1987. Turrialba, CR, CATIE. 8 p.
- Maldonado, C. (2010). Preservación ambiental y desarrollo turístico de la rinconada de la provincia de Imbabura. Quito.
- Maderey, R. 2005. Principios de hidrografía: estudio del ciclo hidrológico. México, DF,
- Martino, D. (1993). El suelo como sumidero de carbono. *Ojeando la agenda*, 45.
- Matus, S. (2007). Elaboración participativa de una metodología para identificar zonas potenciales de recarga hídrica aplicada a la subcuenca del río Juquapa. Turrialba: CATIE. 247 p.
- Meléndez; Fuster. 1973. Geología. Tercera edición. Madrid, España, Universidad de Madrid. 896 p.

- Muñoz, P. (1998). La conceptualización e identificación de las zonas de recarga hídrica prioritarias a nivel nacional. Plan de Acción Forestal (PAFG), Instituto Nacional de Bosques, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). Guatemala. 36p.
- Núñez S. 2001. Manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica, EUNED. 263 p.
- Rachel, F. (2013). Cuencas hidrograficas. Guadalajara: universitaria.
- Ramírez, LM; Vargas, R. 2010. Delimitación y evaluación de las zonas de recarga hídrica para las Montañas de El Volcán y La Chorrera, Honduras. Proyecto especial de graduación del Programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Honduras. 27p.
- Rodríguez, DM; Pérez, P. 2014. Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara. Cuba
- Sega, E. (2013). Funciones hidrológicas y socio económicas del las cuencas hidrográficas. Mexico.
- Senra, J. B. (2005). Gestión de los recursos hídricos en las cuencas transfronterizas. Plan nacional de recursos hidricos en Perú (pág. 75). Lima: Limusa.
- Vélez, M., Vélez., J. 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica
- Villón, M. 2004. Hidrología. Instituto tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 386 p.
- UNESCO. (2006). La influencia del hombre en el ciclo hidrológico. En UNESCO. Honduras: Vesca.
- UNESCO. (2006). Manual de uso conservación del agua en zonas rurales en América latina y el Caribe. Agua, vida y desarrollo, 120.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1.- Pruebas de infiltración de los acuíferos

ACUÍFERO YUYUCOCHA



Fotografía 1.- Ubicación del
infiltrómetro en suelo con vegetación
herbácea



Fotografía 2.-Toma de datos de
campo de la prueba de infiltración



Fotografía 3.- Resultado de medición de la infiltración.

ACUÍFERO SANTA CLARA



Fotografía 4.- Entrada a al pozo Santa Clara



Fotografía 5.- Toma de datos de campo en suelo sin vegetación



Fotografía 6.-Uso de suelo (barbecho) del acuífero de Santa Clara



ACUÍFERO GUARACZAPAS



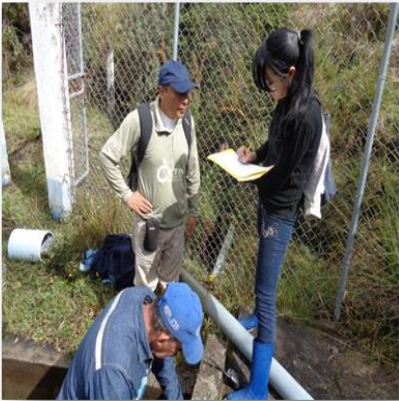

Fotografía 7.- Pruebas de medición de infiltración en pastos cultivados (*Pennisetum clandestinum*)- Captaciones Guaraczapas



Fotografía 8.-Toma de datos de campo de la prueba de infiltración pastos cultivados (*Pennisetum clandestinum*)- Zuleta

	
<p>Fotografía 9.- Prueba de medición en Captación cubierta por eucaliptos</p>	<p>Fotografía 10.- Toma de datos de la prueba de infiltración en cobertura vegetal arbórea</p>

ACUÍFERO LA CARBONERÍA

	
<p>Fotografía 11.- Reconocimiento del área</p>	<p>Fotografía 12.- Cobertura vegetal de páramo en el acuífero</p>



Fotografía 13.- Prueba de medición en suelo con pajonal



Fotografía 14.- Toma de datos de la prueba de infiltración bajo cubierta de vegetación árbol Polylepis

Anexo 1.- Mapa de Ubicación de la zona de recarga hídrica (zona de estudio)

Anexo 2.- Mapa base del área de estudio.

Anexo 3.- Mapa de pendientes del terreno del área de estudio.

Anexo 4.- Mapa de texturas del suelo del área de estudio.

Anexo 5.- Mapa de la litología del área de estudio.

Anexo 6.- Mapa de la cobertura vegetal y uso del suelo.

Anexo 7. Pruebas de infiltración en los acuíferos

Anexo 8.- Mapa de las zonas de recarga hídrica

Anexo 9.- Mapa de recarga hídrica potencial.