

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL



IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO NEGRO, CIUDAD DE GUATEMALA
SISTEMATIZACIÓN DE PRÁCTICA PROFESIONAL

LUISA FERNANDA DONIS CACERES
CARNET 11343-10

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, NOVIEMBRE DE 2015
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

EN LA MICROCUENCA DEL RÍO NEGRO, CIUDAD DE GUATEMALA

SISTEMATIZACIÓN DE PRÁCTICA PROFESIONAL

**TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**

POR

LUISA FERNANDA DONIS CACERES

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADA

**GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, NOVIEMBRE DE 2015
CAMPUS CENTRAL**

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANO: DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS

VICEDECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ

SECRETARIA: ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES

DIRECTOR DE CARRERA: MGTR: JULIO ROBERTO GARCÍA MORÁN

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
MSC. MARTHA MARÍA RÍOS PALENCIA

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN
MGTR. JERSON ELIZARDO QUEVEDO CORADO
MGTR. PEDRO ARNULFO PINEDA COTZOJAY
MGTR. RODOLFO ESTUARDO VÉLIZ ZEPEDA

Guatemala, 31 de Julio de 2015

**Consejo de Facultad
Ciencias Ambientales y Agrícolas
Presente**

Estimados miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación de la estudiante Luisa Fernanda Donis Caceres, carné 11343-10, titulada: "Validación de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica adaptable a otras áreas de incidencia de la Municipalidad de Guatemala"

La cual considero que cumple con los requisitos establecidos por facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



MSC. Marta María Ríos Palencia
Colegiado No. 3992
Cod. URL 18191



Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Sistematización de Práctica Profesional de la estudiante LUISA FERNANDA DONIS CACERES, Carnet 11343-10 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 06103-2015 de fecha 18 de octubre de 2015, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO NEGRO, CIUDAD DE GUATEMALA**

Previo a conferírsele el título de INGENIERA AMBIENTAL en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 4 días del mes de noviembre del año 2015.

**ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES, SECRETARIA
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar**



AGRADECIMIENTOS

A:

Dios por darme la oportunidad de alcanzar mis metas, por abrirme las puertas necesarias y dejarme disfrutar de este momento en mi vida.

Municipalidad de Guatemala

Por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica profesional y trabajar en diversos proyectos de gestión ambiental.

Ing. Lourdes Benavente,

Por brindarme su apoyo y confianza para desarrollar la presente investigación.

Ing. Beatriz Ramírez,

Por compartir su conocimiento tecnológico y científico para la realización de la investigación en recursos hídricos.

MSC. Martha María Ríos Palencia,

Por guiarme a integrar el presente documento además de compartir su conocimiento científico y carrera profesional.

Universidad Rafael Landívar,

Específicamente a coordinadores del Laboratorio de Edafología por su apoyo para completar la investigación realizada.

DEDICATORIA

A:

Mi madre

T æ æ Ü | • æ Á
Ô æ ^ | ^ • Á ^ | æ æ

A quien quiero mucho y quién me enseñó a seguir adelante como una mujer fuerte, por apoyarme para concluir esta meta.

Mi padre:

Ô æ | | • Á æ | æ Á
Ö | } ã Á | | ^ •

Por su apoyo, cariño y consejos oportunos para conocer el camino que debía llevarme hasta donde estoy y quiero ser.

Mis hermanos:

Ü | } æ á Ö | } ã Á Á
Ç ^ æ á | Á Ö | } ã

Por el apoyo recibido que me permitió alcanzar esta meta.

T æ æ ^ | | Á

Ô æ | | • Á æ | æ Á
Ö | } ã Á Ö æ

Por creer en mí, por su cariño y darme su ejemplo de aventurero, donde estés sepas que seguí adelante.

Mis amigos:

Por brindarme su amistad, apoyo, y compañía en cada momento de esta carrera profesional que las giras de campo no hubieran sido tan memorables sin ustedes.

Mis chechitos:

S æ ^ | Á Ö | * |

Por enseñarme la base de la vida y por todo su amor.

ÍNDICE

i.	RESUMEN.....	1
ii.	ABSTRACT.....	2
I.	INTRODUCCIÓN.....	3
II.	ANTECEDENTES	5
	2.1 REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
	2.1.1 Conceptos básicos de hidrología.....	5
	2.1.2 Factores que afectan la recarga hídrica.....	8
	2.1.3 Recarga hídrica y la actividad antrópica	11
	2.1.4 Importancia de la recarga hídrica.....	12
	2.1.5 Medidas de conservación para las zonas de recarga hídrica	13
	2.2 Descripción de la actividad de la organización.....	14
	2.2.1 Municipalidad de Guatemala.....	14
	2.2.2 Misión	17
	2.2.3 Visión	17
	2.2.4 Dirección de Medio Ambiente	17
	2.3 Descripción general de área de estudio.....	17
	2.3.1 Ubicación geográfica	17
III.	CONTEXTO DE LA PRÁCTICA.....	19
	3.1 Eje de Sistematización.....	19
	3.2 Necesidad empresarial	19
	3.3 Justificación	19
	3.4 Descripción del área específica de acción en la institución	21
IV.	OBJETIVOS.....	23
	4.1 General	23
	4.2 Específicos.....	23
V.	METODOLOGÍA	24
	a. Fase de gabinete inicial.....	26
	b. Fase de campo	29

c. Segunda fase de gabinete	29
b. Fase de gabinete final	34
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
6.1 Pendiente del terreno.....	35
6.2 Textura del suelo.....	37
6.3 Geología	39
6.4 Cobertura Vegetal	41
6.5 Uso de la tierra.....	43
6.6 Zonas potenciales de recarga hídrica	45
6.7 Participación social	48
VII. CONCLUSIONES	51
VIII. RECOMENDACIONES	52
IX. BIBLIOGRAFÍA	53
X. ANEXOS	56

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica de acuerdo al uso de la tierra.	27
Cuadro 2. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según pendiente y microrrelieve.	28
Cuadro 3. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según textura.	30
Cuadro 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.	31
Cuadro 5. Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura forestal.	33
Cuadro 6. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica.....	33
Cuadro 7. Resumen de la encuesta presentada hacia actores locales de la zona 15.	50
Cuadro 8. Boleta de campo de clasificación de textura de suelo.	57
Cuadro 9. Matriz para la clasificación y ponderación de la velocidad de infiltración.	61

Cuadro 10. Resultados de textura de suelo de la microcuenca del Río Negro 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. La cuenca hidrográfica.....	6
Figura 2. División de una cuenca hidrográfica.....	7
Figura 3. Factores que influyen en la zona de recarga hídrica.....	11
Figura 4. Ubicación de la Municipalidad de Guatemala.....	15
Figura 5. Organigrama General de la Municipalidad de Guatemala.....	16
Figura 6. Localización de la microcuenca del Río Negro en el municipio de Guatemala.....	18
Figura 7. Área específica de acción dentro de la estructura de la Municipalidad de Guatemala.....	22
Figura 8. Esquema metodológico propuesto a seguir para la identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica.....	25
Figura 9. Clasificación de Pendientes en la Microcuenca del Río Negro.....	36
Figura 10. Distribución en porcentaje según rango de pendientes dentro de la microcuenca.....	37
Figura 11. Clases texturales de la microcuenca del Río Negro.....	38
Figura 12. Distribución en porcentaje según clase textural del área de estudio....	39
Figura 13. Geología de la microcuenca Río Negro.....	40
Figura 14. Distribución en porcentaje del tipo de roca del área en estudio.....	41
Figura 15. Cobertura vegetal permanente de la microcuenca del Río Negro.....	42
Figura 16. Distribución porcentual según rangos de cobertura vegetal.....	43
Figura 17. Uso de la tierra de la microcuenca del Río Negro actualizado al año 2010.....	44
Figura 18. Distribución porcentual del uso de la tierra.....	45
Figura 19. Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en la microcuenca del Río Negro.....	46
Figura 20. Distribución porcentual del potencial de recarga hídrica.....	47
Figura 21. Involucramiento de actores locales de la zona 15 del municipio de Guatemala.....	48
Figura 22. Capacitación a niños de la zona 15 sobre áreas verdes y sus beneficios.....	49
Figura 23. Puntos de muestreo de la microcuenca del Río Negro.....	56
Figura 24. Diagrama para determinar la capacidad de infiltración del suelo por el método de Porchet.....	59

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO NEGRO, CIUDAD DE GUATEMALA

i. RESUMEN

El objetivo de la siguiente práctica fue aportar a los procesos de planificación e investigación de la Municipalidad de Guatemala para el manejo de los recursos hídricos locales. La metodología utilizada en la microcuenca del Río Negro fue la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica diseñada por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE); que evalúa los factores biofísicos de pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso de la tierra. Para cada factor existe una ponderación de 1 a 5 donde 1 corresponde al valor más bajo del potencial de recarga, y este valor se asignó según las características específicas que determinan la recarga hídrica. Al obtener los valores ponderados se utilizó la ecuación modificada para la determinación del potencial de recarga hídrica. Se obtuvo como resultado mapas elaborados con Arc Gis 10.0 como representación gráfica de cada factor. La microcuenca en estudio presenta cuatro potenciales de recarga hídrica, los cuales, son: alto, moderado, bajo y muy bajo que cubren un área de 3.63 %, 19.57 %, 20.25 % y 56.38% respectivamente del área total, lo cual, significa que existe un potencial bajo de recarga hídrica, sin embargo, existen áreas con potencial alto de recarga hídrica que a largo plazo con cuencas colindantes pueden asegurar el recurso hídrico en calidad y cantidad. Por lo que se recomienda que estas áreas deben considerarse como áreas prioritarias en los planes de manejo de cuencas bajo proyectos de conservación de recursos naturales para el resguardo de servicios ecosistémicos del municipio.

IDENTIFICATION OF WATER RECHARGE ZONES IN THE MICROBASIN OF RIO NEGRO, CITY OF GUATEMALA

ii. ABSTRACT

The purpose of this practice is to contribute with the planning and investigation processes of the Municipality of Guatemala to manage local water resources. The methodology used in the micro-basin of Río Negro was the participatory identification of zones with the potential of water recharging designed by Tropical Agricultural Research and Higher Education Center (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE); which assesses the biophysical factors regarding slope, soil type, rock type, vegetation cover, and soil use. There is a weighing of 1 to 5 for each factor; 1 corresponds to the lower value of the recharging potential, that value was assigned based on the specific characteristics that determine the water recharge. The modified equation was used to determine the water recharging potential after reaching the weighing values. The result was the maps created with Arc Gis 10.0 as a graphic representation of each factor. The micro-basin researched shows four potentials of water recharge as follows: high, moderate, low, very low; which cover an area of 3.63%, 19.57%, 20.25%, and 56.38% of the total area, accordingly. This means there is a low potential of water recharge; however, there are areas with high potential of water recharge, which in the long term with adjacent basins may assure the water resource in terms of quality and quantity. Therefore, it is recommended that these areas must be considered a priority in the basins manage plans under natural resources conservation projects to protect ecosystem services of the municipium.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el INAB (2005) las zonas de recarga hídrica son territorios con capacidad de infiltrar de forma natural el agua procedente de la precipitación o escorrentía superficial, y con ello, permiten alimentar a los acuíferos donde los flujos subterráneos se desplazan horizontalmente hacia los diferentes cuerpos de agua como lagos, ríos, manantiales y océanos.

Existen diferentes factores biofísicos que se interrelacionan para determinar la zona de recarga hídrica como el clima, zona de vida, estratos geológicos, usos de la tierra, tipo de roca, la presencia de cobertura forestal, topografía, etc. Por lo tanto, esto se reflejara en el volumen de agua que posea el acuífero y el estado de los cuerpos de agua circundantes a estas zonas.

El recurso hídrico es un bien natural y necesario para el desarrollo del sector social, económico y ambiental, ya que cubre diferentes necesidades como el requerimiento biológico, uso doméstico e industrial, entre otros usos. Esto ha incurrido en que el recurso sea afectado por las actividades antrópicas que alteran su calidad, cantidad y su disponibilidad para ser aprovechada.

La importancia de zonas de recarga recae en que son fuentes principales para obtener agua dulce alrededor del mundo y juegan un papel importante dentro del ciclo del agua. Asimismo, realizar su identificación, protección y conservación asegurará el bienestar de todo ser vivo y del desarrollo económico de cada nación.

Según el FODECYT (2010) en Guatemala se han realizado diferentes estudios en relación a la identificación de zonas de recarga hídrica, y los cuales, se han aplicado diversas metodologías de tipo cuantitativo y cualitativo. Entre los estudios a nivel nacional se pueden mencionar el “Mapa de Zonas de Recarga Hídrica modificado para la República de Guatemala y el Mapa de Tierras Forestales de Captación y Regulación Hidrológica” realizado por el INAB (2005). Sin embargo, en la actualidad la mayoría de estudios se dirigen a nivel local, es decir, que se utiliza la cuenca hidrográfica o microcuenca hidrográfica como unidades

territoriales específicas para su adecuado manejo, ya que, la generación de información es más precisa y representativa del área a estudiar.

Existen diferentes metodologías para realizar la identificación de zonas de recarga hídrica que se basan en elementos cuantitativos y cualitativos. Para el presente estudio se utiliza la metodología participativa del CATIE con la finalidad de generar información certera del área de estudio además de involucrar y empoderar a actores sociales y autoridades sobre los resultados del documento de investigación para garantizar la sostenibilidad de las zonas potenciales de recarga hídrica del área en estudio.

Con la finalidad de proveer información relevante a las autoridades y actores sociales acerca de las zonas potenciales de recarga hídrica del área de incidencia de la microcuenca del Río Negro, la cual, representa un 8.12% del total del municipio de Guatemala, se realizó la práctica profesional durante seis (6) meses en la Municipalidad de Guatemala dentro de la Dirección de Medio Ambiente. Con ello, se espera que el documento de investigación sea una herramienta para planificar estrategias de ordenamiento territorial, uso racional de recursos naturales y establecer lineamientos para la conservación de dichas zonas que favorecerán la preservación del recurso hídrico, que a su vez se proyectará como avances en la gestión ambiental del municipio de Guatemala estableciendo a futuro la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

II. ANTECEDENTES

2.1 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.1 Conceptos básicos de hidrología

Es necesario comprender los conceptos que se relacionan a la recarga hídrica, para que el planteamiento de una metodología para su identificación sea más entendible. Por lo anterior, se define lo siguiente:

Hidrología

Es la ciencia que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, incluyendo propiedades químicas y físicas y su relación con el ambiente y seres vivos (CATIE, 2006).

Escorrentía

Se refiere a la cantidad de agua de lluvia, riego o deshielo que excede la capacidad de infiltración del suelo, es decir, que supera la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, y por lo tanto, esta fluye en dirección longitudinal a la pendiente dirigiéndose a cuerpos de agua como ríos, lagos, embalses y océanos (Matus, 2009).

Infiltración

Es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo, acumulándose en los poros del suelo, para poder ser utilizada por plantas o avanzar por gravedad desplazándose hacia capas más profundas del suelo, donde alimenta a los mantos freáticos. La capacidad de infiltración se mide por la cantidad de agua que el suelo es capaz de absorber por unidad de tiempo (mm/h, cm/min, cm/h), de acuerdo a su humedad, composición y grado de compactación (Matus, 2009).

Cuenca hidrográfica

Es el área natural que posee límites físicos que son definidos por la división superficial de las aguas, llamado "parteaguas"; que debido a la ocurrencia de

precipitaciones y flujos superficiales configuran una red de drenaje superficial que canaliza aguas hacia un cuerpo de agua como ríos, lagos, embalses artificiales o naturales; desde la parte más alta de la cuenca hasta el punto con el menor altitud de la zona como se puede observar en la Figura 1 (INAB, 2005).

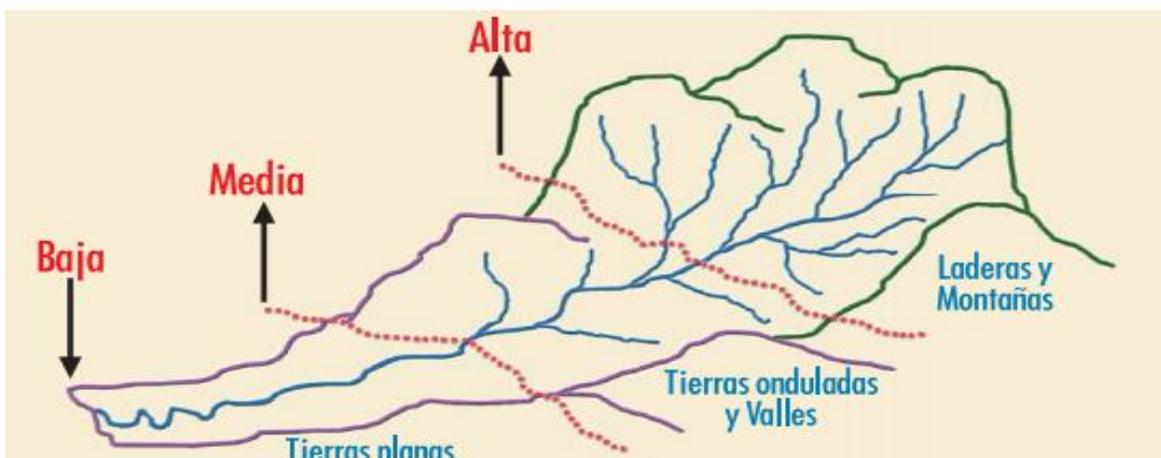


Figura 1. La cuenca hidrográfica.

(World Vision, 2011).

Microcuenca hidrográfica

Se define como una pequeña unidad geográfica, donde se interaccionan los recursos disponibles para una cantidad de personas, principalmente suelo, agua y vegetación. La microcuenca es el ámbito lógico, ya que, es un territorio pequeño y posee comunidades con intereses comunes por lo tanto la participación de autoridades y usuarios de servicios y recursos del área harán posible la aplicación de acciones técnicas directas e indirectas para planificar el uso y manejo de los recursos naturales en la búsqueda de sostenibilidad de los sistemas de producción pertenecientes al desarrollo de la misma (FAO, 2008).

La red hídrica es fundamental para delimitar espacios en que se puede dividir una cuenca, ya que al curso principal donde llega un afluente secundario se le llama subcuenca, y a este último al recibir un afluente terciario se conoce como microcuenca además se encuentran las quebradas que son cauces menores, como se puede observar en la Figura 2 (FAO, 2008).

Cabe destacar, que una acción en relación al uso y manejo de los recursos naturales que se realice en la microcuenca presenta impactos medibles a corto o mediano plazo, siendo positivo o negativo, sobre la recuperación o deterioro del suelo, cobertura vegetal, cantidad y calidad del agua, fauna, y otros componentes naturales (FAO, 2008).

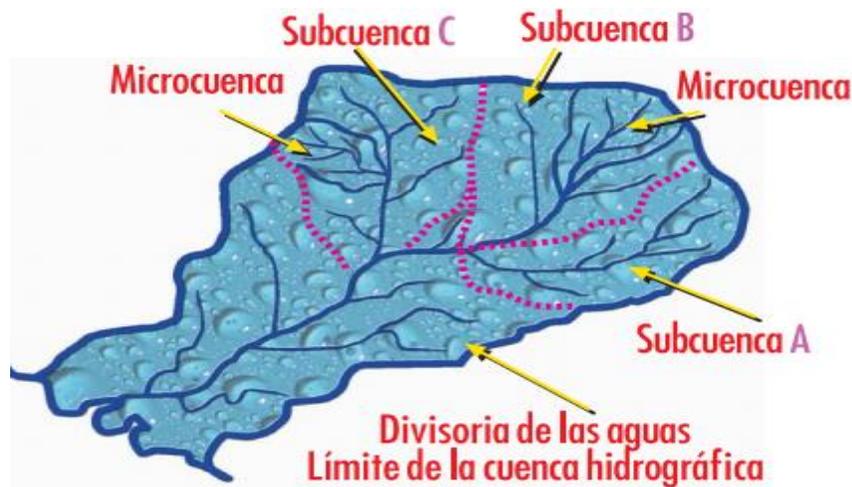


Figura 2. División de una cuenca hidrográfica.

(World Vision, 2011).

Zonas de recarga hídrica

Se le llama recarga al proceso que ocurre de forma natural, por el cual, se incorpora agua procedente de la infiltración de la lluvia, por aguas superficiales y por la transparencia entre acuíferos. El área donde ocurre la recarga se le llama zona de recarga y por consiguiente son sitios con mayor capacidad de infiltración o con rocas superficialmente permeables (Matus, 2009).

Hay zonas que por sus características, facilitan la infiltración y, ofrecen los mayores aportes de recarga hídrica y dentro de estas, aquellas que por sus particularidades específicas sean susceptibles de disminuir su potencial de recarga hídrica al ser sometidas a un manejo diferente a su capacidad de uso. A estas áreas se les denomina zonas críticas de recarga hídrica (Matus, 2009).

Por ejemplo, los ecosistemas forestales dentro del ciclo del agua desempeñan roles importantes, como es la infiltración. Los bosques, a su vez, contribuyen a preservar la estructura adecuada del suelo favoreciendo a que el agua de lluvia se infiltre durante el invierno que servirá para mantener los caudales durante el verano, que serán provenientes de los mantos freáticos (IARNA, 2006).

Asimismo contribuyen a reducir la escorrentía proveniente de la precipitación debido a la intercepción que hay por la presencia de los árboles además que la capa de materia orgánica reduce el flujo de agua y favorece la infiltración. Además mejora la calidad del agua, debido a que los suelos forestales funcionan como filtros de agua; siendo las cuencas con mayor cobertura forestal las que presentan mejor calidad del agua (IARNA, 2006).

2.1.2 Factores que afectan la recarga hídrica

Los efectos benéficos de la preservación de las zonas de recarga hídrica no son exclusivas del bosque sino también la recarga hídrica depende de la precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos (IARNA, 2006). Asimismo, depende de la permeabilidad del suelo, de su contenido de humedad, intensidad de lluvia y el patrón de drenaje de la cuenca. A su vez, se puede mencionar la pendiente de la superficie como un factor importante, ya que, los terrenos con mayor inclinación favorecen la escorrentía superficial; que por lo contrario, los terrenos que posean poca pendiente retienen por más tiempo el agua lo que favorece la infiltración (Matus, 2009). De manera más detallada, estos factores son:

Clima

En un área territorial las condiciones climáticas dependen de la cantidad de lluvias (entradas de agua) y la evapotranspiración (salidas de agua), este último debido a la pérdida de agua por la transpiración de plantas y la evaporación de agua que regulan el ciclo hidrológico. Por consiguiente, este factor influye en la recarga hídrica para aportar en mayor o menor cantidad el recurso líquido vital para la infiltración de agua de lluvia de forma natural al suelo (FODECYT, 2010).

Suelo

El suelo impermeable y compactado impide o dificultan la infiltración, por lo contrario, un suelo permeable facilita la recarga. Las características del suelo que influyen en la recarga son la textura, densidad aparente, grado de saturación y la capacidad de infiltración (INAB, 2003).

Topografía

La recarga hídrica dependerá del tiempo de contacto entre el agua y la superficie del terreno. A este factor se relaciona el grado de inclinación que posea el terreno ya que al poseer pendientes fuertes favorecen a la escorrentía superficial, disminuye el tiempo de contacto y reducen la infiltración del agua. Sin embargo, al poseer pendientes de menor grado, maximiza el contacto del agua con el suelo e incrementa la infiltración del suelo (Matus, 2009).

Cobertura vegetal

La cobertura vegetal influye en disminuir o aumentar la escorrentía superficial debido a que a mayor cobertura permite mayor tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo, esto favorece la infiltración del agua. Por consiguiente, un porcentaje de la lluvia es interceptada por la cobertura vegetal, y es necesario considerar la profundidad y densidad de las raíces y la capacidad de retención del dosel vegetal (Matus, 2009).

Cabe destacar que ante la presencia de cobertura vegetal multiestratificada existe mayor recarga hídrica debido a que ayuda a conservar las propiedades del suelo, que a su vez, también favorecerán la recarga (CATIE , 2010).

Uso de la tierra

El suelo se deteriora cuando el uso de la tierra se establece en tierras no aptas para dicha intensidad o tipo de uso. A esto se relacionan al deterioro de las características del suelo dando como resultado la erosión y compactación. También se reduce la capacidad de infiltración y por consiguiente, la recarga hídrica disminuye (CATIE , 2010). Por ejemplo, los tipos de uso de la tierra con

cobertura natural promueven la recarga hídrica mientras que usos como agrícolas, pecuarios y urbanos tienden a limitar ó inhibir completamente la infiltración de agua (IARNA, 2006).

Tipo de roca

El tipo de roca permitirá determinar si la recarga hídrica es subsuperficial o profunda de aguas subterráneas, a lo cual, se denomina acuífero. Asimismo, es posible determinar si hay existencia de una capa de material rocoso o arcilla impermeable que no permite el paso de agua hacia el acuífero o pudiéndose desplazar a través de flujos de agua subsuperficiales con movimiento horizontal que luego brota en un manantial o alimentan a un río (CATIE , 2010).

Las características de las rocas como la porosidad y la permeabilidad son las que principalmente determinan la recarga hídrica. La permeabilidad de una roca se mide por la velocidad a la que se va transmitir el agua a través de una sección transversal (CATIE , 2010).

Cabe mencionar que existen dos fuerzas que controlan el movimiento del agua en la roca como son la gravedad y la atracción molecular. La gravedad hace que el agua pueda infiltrarse hasta zonas impermeables y también pueda desplazarse lateralmente generando el flujo de manantiales, ríos y pozos. La segunda fuerza, retarda el flujo a través de pequeños poros de las rocas (National Groundwater Association, 2010).

En la Figura 3 se presenta un esquema gráfico de como los factores anteriormente mencionados se interrelacionan para determinar la recarga hídrica y a su vez, se presentan los flujos de agua a largo del mismo proceso de recarga. El aire húmedo al enfriarse se condensa y precipita como lluvia que formará escorrentía superficial o se infiltrará en el suelo para formar parte de las aguas subterráneas y desplazarse horizontalmente para alimentar a cuerpos de agua y al final se conducirse hacia el océano, donde el aire ascendente se enfría y la humedad se condensa en gotas de agua formando nubes o niebla, estas al encontrarse con el

viento provoca precipitaciones en el paisaje. La evapotranspiración de cuerpos de agua y vegetación contribuye a la humedad del aire y al enfriarse en las partes altas precipita nuevamente y se vuelve a repetir el ciclo del agua (Monzón, 2012).

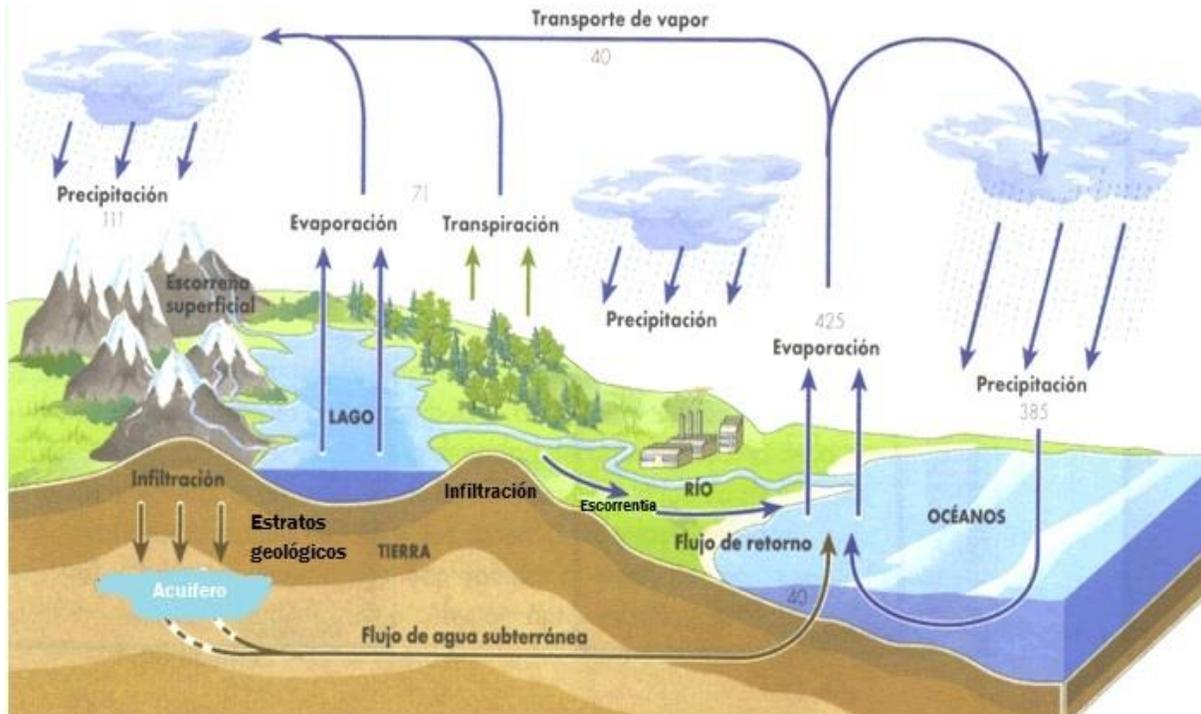


Figura 3. Factores que influyen en la zona de recarga hídrica. (Monzón, 2012).

2.1.3 Recarga hídrica y la actividad antrópica

Las zonas de recarga hídrica son una parte importante del sistema hidrológico de una cuenca hidrográfica, y al presentarse cualquier fenómeno que altere su estado provocará un efecto negativo que se verá reflejado en los acuíferos y por consiguiente, en el aprovechamiento de la cantidad y calidad de agua, caracterizados por mecanismos de uso poco eficiente del recurso (New Jersey Stormwater, 2004).

Los impactos potencialmente adversos del desarrollo desmedido dentro de la dinámica de la recarga hídrica han sido durante mucho tiempo señalados; entre ellos el crecimiento demográfico, urbanismo, deforestación, la expansión de fronteras agropecuarias, entre otros. Estos factores han ido reduciendo la

permeabilidad de los suelos a través de la perturbación y compactación, con ello, reducen la tasa de recarga del agua subterránea. Estas reducciones en la recarga hídrica de las aguas subterráneas pueden tener impacto negativo en arroyos, humedales y otros cuerpos de agua reduciendo el volumen, calidad y la velocidad del flujo de agua base de los mismos, también afectando negativamente el rendimiento de los pozos de abastecimiento de agua (New Jersey Stormwater, 2004).

Por otro lado, la mayoría de la contaminación de flujos subterráneos es el resultado de la actividad antrópica presente, los contaminantes pueden filtrarse en aguas subterráneas debido a fugas de tanques subterráneos, pozos, fosas sépticas y vertederos. El uso de pesticidas y fertilizantes, jabones, petróleo, aceite, entre otros, pueden estar presentes en los flujos subterráneos, infiltrándose lentamente hasta llegar a un punto de concentración incrementando los niveles de contaminación de acuíferos o flujos subterráneos causando niveles bajos de calidad de agua y por consiguiente, afectando el aprovechamiento del recurso (Longwood University, 2003).

2.1.4 Importancia de la recarga hídrica

El agua subterránea es sin duda el componente que constituye alrededor de dos terceras partes de los recursos de agua dulce en todo el mundo; además como alimentan a lagos, pantanos, embalses y ríos representan el 3.5 por ciento y la humedad del suelo sólo el 1.5 por ciento del agua dulce (Chilton, 2001).

La importancia de dichas zonas empieza por el hecho de que constituyen parte del ciclo del agua, además de su aprovechamiento dentro del ámbito social y el mantenimiento del equilibrio ecológico, por lo anterior, es necesario proteger y mantener su calidad y cantidad del recurso hídrico, ya que, repercute en el bienestar de todo ser vivo (Longwood University, 2003). Además que los inventarios de aguas subterráneas y el uso de aguas superficiales revelan la importancia mundial que representan las aguas subterráneas y las razones incluyen: la disponibilidad de agua a largo plazo, calidad natural para suministro de

agua potable y un servicio a bajo costo que favorece a regiones con ausencia de sistemas de abastecimiento de agua (Chilton, 2001).

2.1.5 Medidas de conservación para las zonas de recarga hídrica

En la actualidad existen conflictos entre los usuarios del recurso hídrico, esto debido a que el desarrollo económico lleva consigo el cambio de uso de la tierra, la sobreexplotación de suelo, extracción de aguas subterráneas, contaminación, deforestación, construcción de pozos, entre otros. En consideración a esta tendencia de deterioro de estas zonas de recarga se establece lo siguiente para su adecuada administración, protección y conservación (Planning Commission Government of India, 2012):

- Gestión de zonas de protección de recarga hídrica;
- Regulación de zonas de protección de recarga hídrica;

Gestión de zonas de protección de recarga hídrica

La gestión de zonas de protección debería ser delimitada según lo siguiente (Planning Commission Government of India, 2012):

1. Protección las zonas de recarga y descarga natural de amenazas como deterioro físico como el cambio de uso de la tierra, erosión, contaminación, etc.
2. Protección de aguas subterráneas de manera que cubra con las necesidades de ecosistemas dependientes.
3. Protección de zonas vulnerables que requieren atención especial y regulación por alteración química del agua.
4. Disposición de suministro de agua en cantidad y calidad bajo sistemas de manejo y sostenibilidad para cumplir con las necesidades de cualquier ser vivo.
5. Disponer agua para el desarrollo económico sostenible.

Regulación de zonas de protección de recarga hídrica

Es necesario involucrar a las autoridades competentes para la toma de medidas posibles para la conservación y protección de las zonas de protección de recarga hídrica en especial en la realización de planes de protección de aguas subterráneas (Planning Commision Goverment of India, 2012). Al establecer las zonas de protección se debería regular principalmente:

1. Extracción y aprovechamiento de aguas subterráneas;
2. Deforestación y forestación;
3. Eliminación de residuos de cualquier tipo;
4. Cambios de uso de la tierra y;
5. Prohibición de concesiones mineras.

De acuerdo con Planning Commision Goverment of India (2012) deberán establecerse comités locales dedicados a supervisar, controlar y sancionar actividades que dentro de las zonas de protección de recarga no se dirijan a la conservación del recurso hídrico.

Asimismo, el enfoque legislativo servirá para complementar el mecanismo de control hacia las zonas de recarga hídrica a través de permisos, sanciones y la utilización coordinada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Las autoridades tienen la responsabilidad de establecer lineamientos para la gestión del recurso hídrico, uso de la tierra y el cuidado de la calidad y cantidad de agua para todos los ciudadanos. Pero corresponde a todos los ciudadanos ayudar a mantener el recurso hídrico y recursos naturales asociados en óptimas condiciones para un aprovechamiento efectivo y en beneficio de las generaciones presentes y futuras (Longwood University, 2003).

2.2 Descripción de la actividad de la organización

2.2.1 Municipalidad de Guatemala

La Municipalidad de Guatemala es una institución autónoma del Estado responsable del gobierno del municipio. Es la encargada de la administración de

brindar servicios que necesitan los ciudadanos. Entre sus principales funciones se encuentran la planificación, control y la evaluación del desarrollo y crecimiento del territorio. A su vez, se dirige a regular aspectos sociales y a contribuir a mejorar la calidad de vida. Su ubicación es en la 21 calle 6-77, zona 1, en el Centro Cívico como se muestra en la Figura 4 (Municipalidad de Guatemala, 2004).

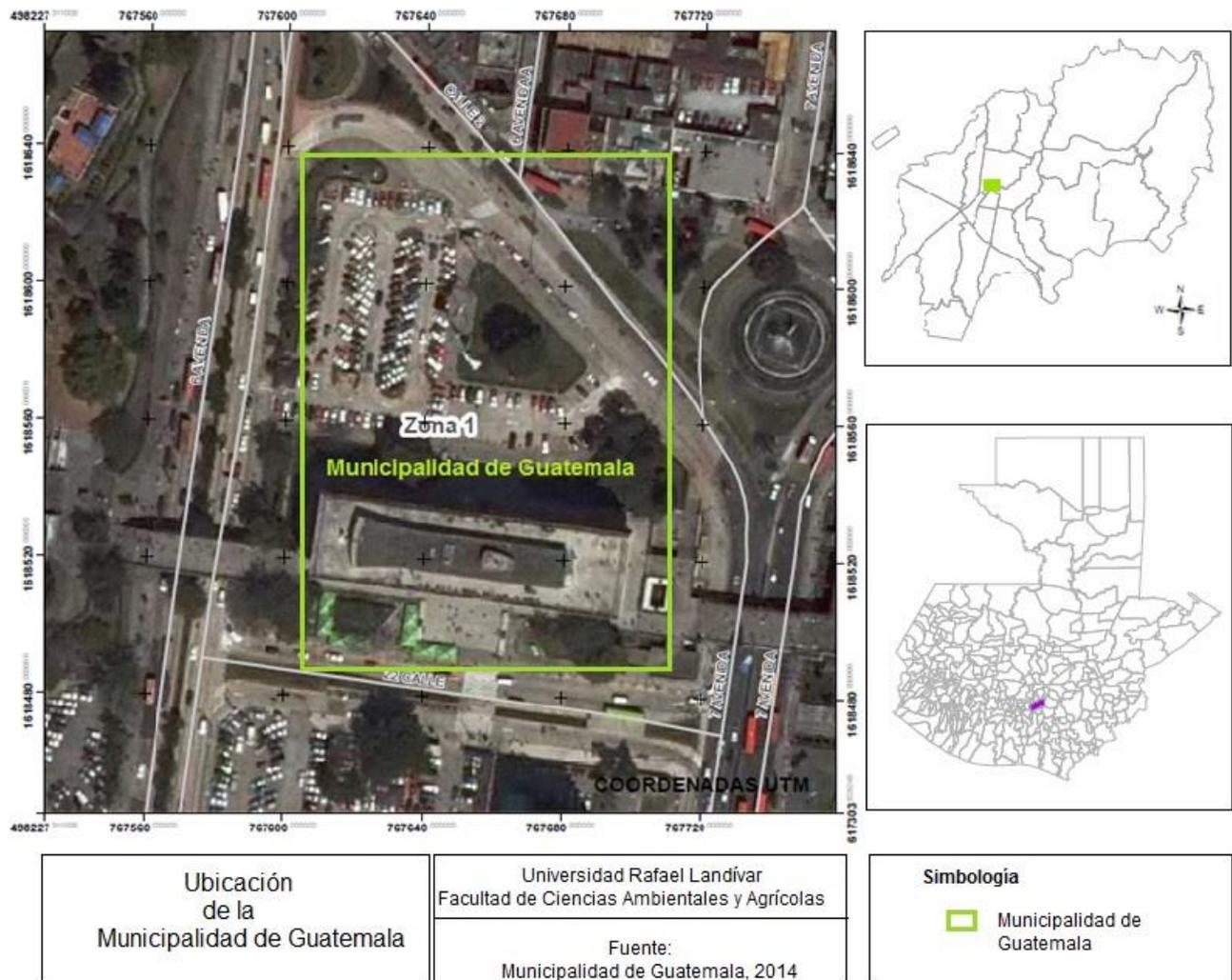


Figura 4. Ubicación de la Municipalidad de Guatemala. (Ramirez, 2014).

Está conformada por un Concejo Municipal siendo éste el órgano de deliberación y decisión en relación a los asuntos municipales, que a través de diferentes direcciones se dirigen esfuerzos para regular aspectos sociales, económicos, culturales, políticos, ambientales, entre otros; como se puede observar en la Figura 5 (Municipalidad de Guatemala, 2004).

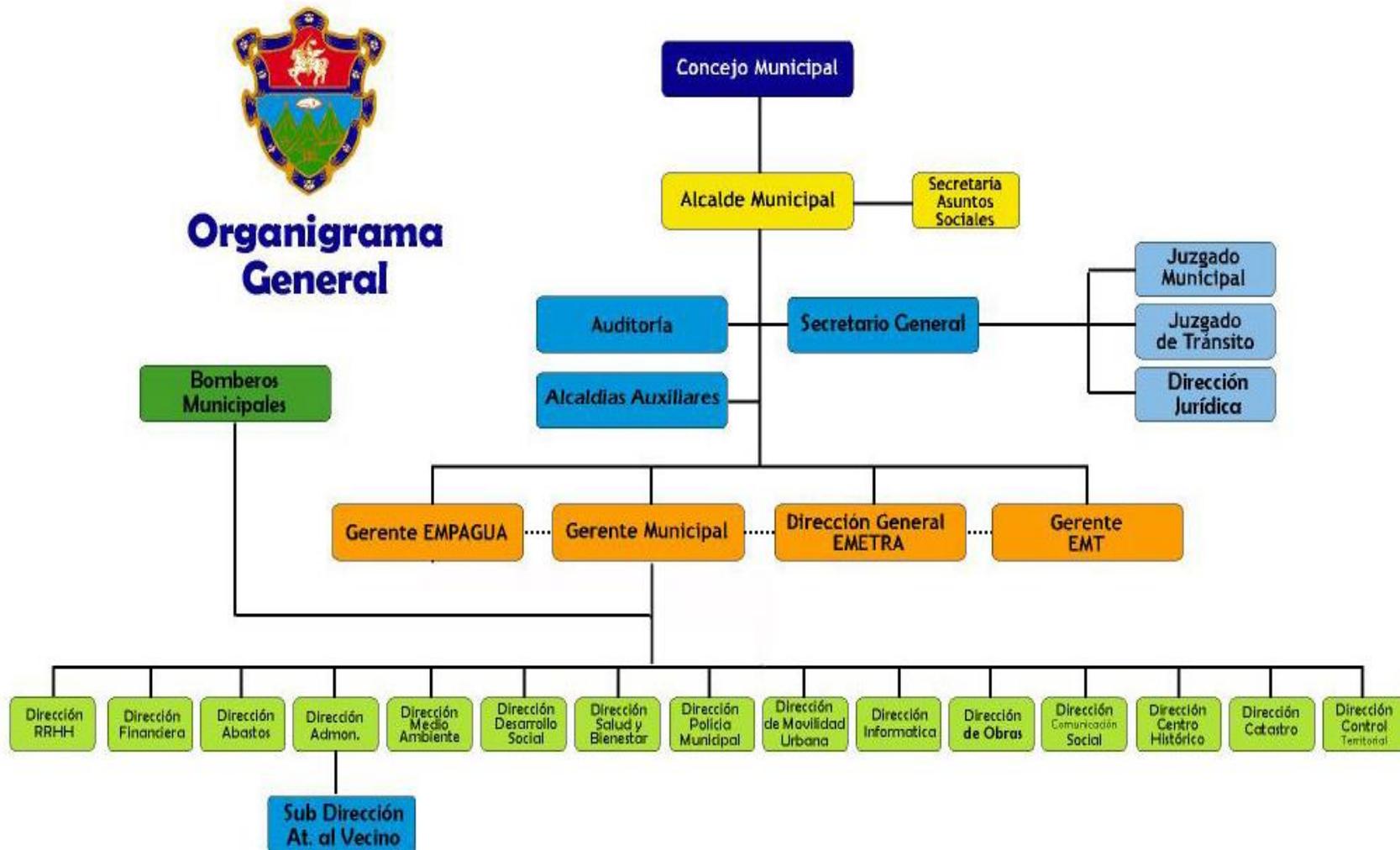


Figura 5. Organigrama General de la Municipalidad de Guatemala.

(Municipalidad de Guatemala, 2004).

2.2.2 Misión

Es dar a todos los vecinos los servicios que necesitan. Siendo su finalidad principal lograr que las personas tengan una vida de calidad (Municipalidad de Guatemala, 2004).

2.2.3 Visión

La visión de la Municipalidad de Guatemala es crear una “Ciudad para vivir”.

2.2.4 Dirección de Medio Ambiente

La Dirección de Medio Ambiente, fue creada el 5 de enero del 2001, y es dependiente de la Alcaldía Municipal; tiene como finalidad integrar todas las actividades de la Municipalidad manejando espacios abiertos públicos y privados, así como la coordinación interinstitucional en relación a la gestión ambiental (Municipalidad de Guatemala, 2004).

Es la encargada de la protección, conservación, mejoramiento y manejo de la gestión ambiental en el municipio de Guatemala, con la finalidad de brindar calidad de vida a los ciudadanos.

La constituyen cuatro diferentes departamentos (Municipalidad de Guatemala, 2004):

- Departamento de manejo de desechos sólidos;
- Departamento de manejo de áreas verdes;
- Departamento de contaminación ambiental;
- Departamento de educación ambiental.

2.3 Descripción general de área de estudio

2.3.1 Ubicación geográfica

La microcuenca del Río Negro, se encuentra ubicada en el municipio de Guatemala que representa un 8.12% del total del área del municipio. El área de la microcuenca es de aproximadamente 17.46 kilómetros cuadrados, y se encuentra comprendida entre las coordenadas: 767515.812700 m y 772331.812700 m en “X”; y 1618846.930000 m y 1611340.930000 m en “Y” bajo el sistema de

coordenadas GTM, zona 15 N Dantum WGS84 (Figura 6) (Municipalidad de Guatemala, 2004).

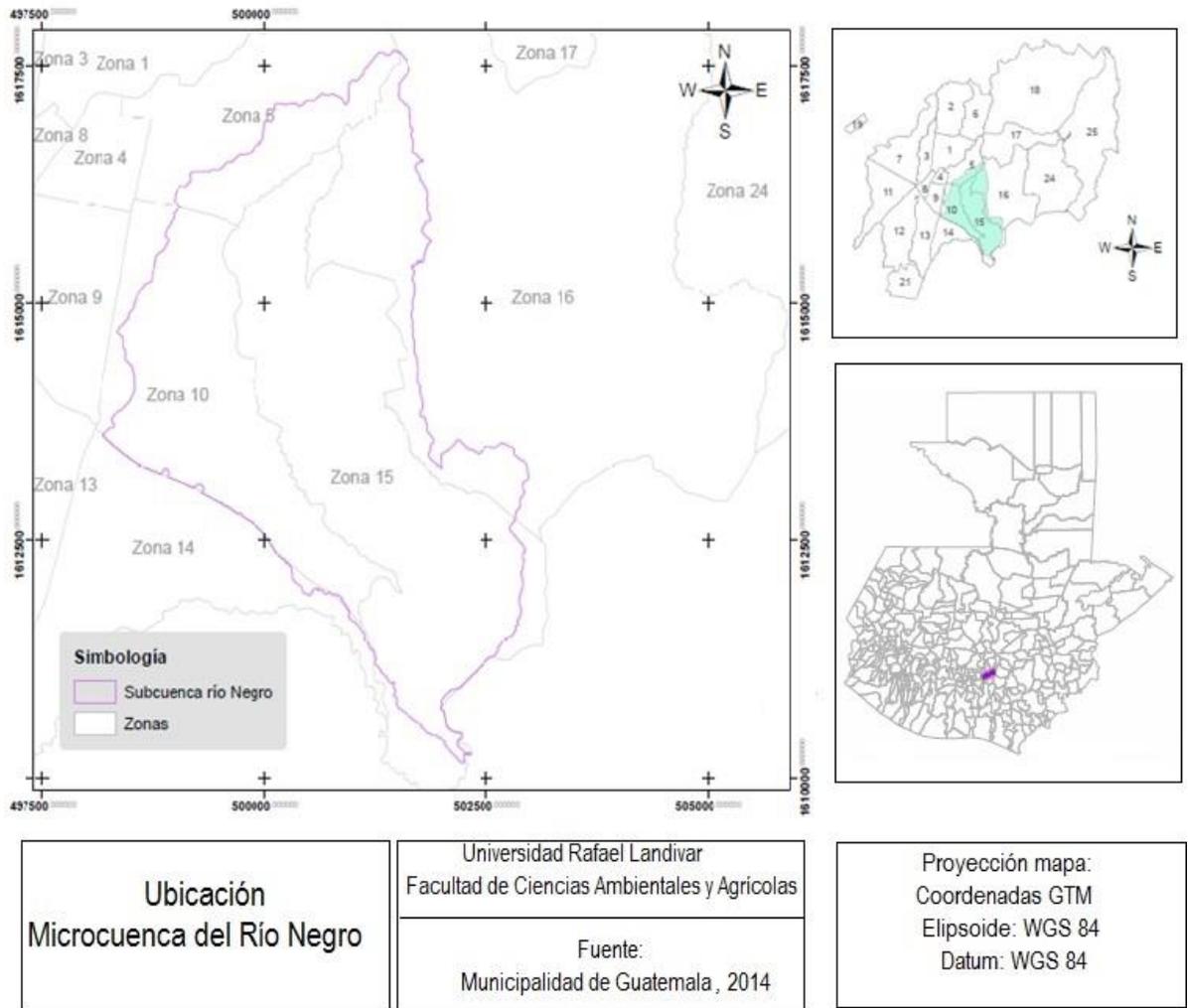


Figura 6. Localización de la microcuenca del Río Negro en el municipio de Guatemala. (Ramirez, 2014).

III. CONTEXTO DE LA PRÁCTICA

3.1 Eje de Sistematización

Se realizó la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro, Guatemala, con el fin de brindar lineamientos para un adecuado manejo y conservación del recurso hídrico local.

3.2 Necesidad empresarial

La municipalidad de Guatemala, a través de la Dirección de Medio Ambiente, tiene como función impulsar el desarrollo social, económico y tecnológico; que prevenga la contaminación y mantenga el equilibrio ecológico además de propiciar el uso racional de los recursos naturales. Por ello, generar información por parte de la municipalidad es necesario para la toma de decisiones y acciones adecuadas para el fortalecimiento de la gestión ambiental dentro del municipio.

Cabe mencionar, que la empresa municipal de Agua de la Municipalidad de Guatemala (EMPAGUA) cubre con el 50% de cobertura de agua potable tanto en agua superficial como subterránea del área metropolitana. Por consiguiente, es notable la necesidad de asegurar el acceso de agua potable para los ciudadanos que se encuentran dentro de la microcuenca de estudio, ya que, es parte de los servicios indispensables para el desarrollo socioeconómico local.

Por lo anterior, es necesario realizar la identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica dentro de la microcuenca del Río Negro. La obtención de información permitirá tomar decisiones y acciones oportunas de preservación y conservación hacia los recursos naturales, lo que reducirá la problemática del deterioro ambiental y a largo plazo no comprometerá el estado de los recursos naturales para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras.

3.3 Justificación

El agua es un recurso natural renovable que al satisfacer las necesidades de las generaciones presentes está siendo afectado por el constante deterioro ambiental y el incremento de la contaminación en flujos superficiales y subterráneos (Saavedra, 2009). Asimismo, el crecimiento poblacional, las actividades

productivas y diversos patrones de consumo construyen vías hacia conflictos sobre su disponibilidad, inadecuada calidad del recurso hídrico y acentúan la competencia para el uso de los recursos hídricos. Por ende, se obtiene como resultado una alta vulnerabilidad socioambiental a nivel nacional (IARNA, 2002).

En Guatemala existe una relativa abundancia del recurso hídrico pero la inadecuada gestión puede, a largo plazo, ser la falta de disponibilidad estableciendo su ineficiente aprovechamiento que causará dificultades en el desarrollo económico y las condiciones de salud de la sociedad en conjunto.

La microcuenca del Río Negro se definió como área de estudio dentro de la práctica profesional debido a que cada uno de los factores biofísicos que determinan el potencial de recarga hídrica se presentan con características propicias para la infiltración del agua al suelo en comparación con otras áreas de incidencia de la municipalidad de Guatemala. Además que la metodología aplicada establece la incidencia social como parte importante para conocer el área de estudio, actividades que se realizan en el área, el proceso de abastecimiento de agua, entre otros datos; y a través de la alcaldías auxiliares se pudo establecer de forma adecuada esta comunicación así como transmitir la importancia de protección y preservación hacia las zonas potenciales de recarga hídrica.

La disminución de calidad del agua es uno de los mayores desafíos que enfrentan las entidades gubernamentales debido a conflictos que surgen entre comunidades, regiones, municipios, departamentos que pertenecen a una misma cuenca hidrográfica. De acuerdo con la Alianza Mundial por el Agua, citado por Saavedra (2009), existe una nueva concepción que propone “asegurar el desarrollo y manejo coordinado de los recursos del agua y tierra, teniendo presente con otros sistemas naturales, sociales y culturales, maximizando el bienestar económico, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas” (Saavedra, 2009).

Esto evidencia la importancia de establecer la planificación territorial con enfoque de cuenca hidrográfica conjugado con un enfoque de gestión territorial del paisaje, políticas de largo plazo, fortalecimiento institucional, adecuado uso de la tierra, uso

racional de recursos hídricos, entre otros. Debido a que el agua toma un papel importante para todo ser vivo y para mantener el equilibrio ecológico, es necesario el manejo adecuado entre las actividades antrópicas con las zonas de recarga hídrica para la sustentabilidad y preservación del agua a largo plazo y a su vez, establecer un bienestar de la sociedad (IARNA, 2003).

El deterioro de la zona de recarga hídrica se produce por efecto de prácticas tales como la tala de árboles (deforestación), el sobrepastoreo, monocultivos, cambio de uso de la tierra, urbanización entre otros; que tendrá como consecuencia la erosión de suelo y pérdida de fertilidad de suelos, además de otros efectos negativos para los ecosistemas y la prestación de bienes y servicios ecosistémicos (Saavedra, 2009). Esto implica que en los ecosistemas se plasman huellas que son mayores a la capacidad del ambiente para recuperarse por sí mismo, por ende, se generan impactos biofísicos (inundaciones, emisiones de gases de efecto invernadero y cambios de clima) además de repercusiones socioeconómicas (migración humana, pobreza, salud humana e inestabilidad) (Programa Estado de la Nación , 2013).

Por ello, es importante generar estrategias viables e integradas de gestión ambiental para la adecuada coordinación de esfuerzos, ya que, el manejo, la protección y conservación de las fuentes de agua se traduce en brindar más oportunidades de mejora económica, social y ambiental.

3.4 Descripción del área específica de acción en la institución

La práctica profesional se realizó en la Dirección de Medio Ambiente, la cual, es encargada por velar por el control y mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos a través de la protección, conservación y mejora del medio ambiente (Municipalidad de Guatemala, 2004).

Durante los seis (6) meses de duración de la práctica profesional, se trabajó en conjunto con la encargada de la unidad de planificación de la Dirección, para generar información confiable para la identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro del municipio de Guatemala. Y con ello, facilitar la

coordinación de medidas, lineamientos y acciones para mejorar la gestión ambiental del municipio de Guatemala. En la Figura 7 se ubica el área específica, la cual, es la unidad de planificación para trabajar el documento de investigación.



Figura 7. Área específica de acción dentro de la estructura de la Municipalidad de Guatemala.

(Elaboración propia).

IV. OBJETIVOS

4.1 General

Aportar al proceso de planificación e investigación de la Municipalidad de Guatemala, a través de la generación de información para el manejo de los recursos hídricos locales.

4.2 Específicos

Validar una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica adaptable a otras regiones de incidencia de la Municipalidad de Guatemala.

Identificar las zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca del Río Negro del municipio de Guatemala utilizando la metodología propuesta.

V. METODOLOGÍA

Existen diferentes metodologías para la identificación de zonas de recarga hídrica, las cuales pueden basarse en datos cualitativos o cuantitativos esto se define según las herramientas que se poseen y el área de estudio. Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó la base conceptual de la metodología participativa para la identificación de zonas de recarga del CATIE (2010).

Para la identificación de zonas de recarga hídrica el estudio se basa en la ecuación propuesta por Mathus Silva (2009) que considera cinco elementos con diferentes ponderaciones asignadas, siendo la siguiente:

$$ZR = 0.27 (\textit{Pendiente}) \pm 0.23 (\textit{Tipo de suelo}) \pm 0.12 (\textit{Tipo de Roca}) \\ \pm 0.25 (\textit{Cobertura vegetal}) \pm 0.13 (\textit{Uso de la tierra})$$

Sin embargo, para el presente estudio la ecuación de Mathus fue modificada, ya que, para obtener la variable de “Tipo de suelo” es necesario realizar las pruebas de textura de suelo y pruebas de infiltración, esta última no se llevó a cabo durante la práctica profesional. Por lo anterior, la variable “Tipo de suelo” es sustituida por la variable “Textura del suelo” donde se tomó en cuenta los fundamentos teóricos del CATIE (2010) que establecen que a partir de la textura del suelo se puede determinar el potencial de infiltración. Los cambios realizados hacen referencia a identificar zonas potenciales de recarga hídrica y se presentan de la siguiente forma:

$$ZR = 0.27 (\textit{Pendiente}) \pm 0.23 (\textit{Textura de suelo}) \pm 0.12 (\textit{Tipo de Roca}) \\ \pm 0.25 (\textit{Cobertura vegetal}) \pm 0.13 (\textit{Uso de la tierra})$$

Dónde:

- ZR = Potencial de recarga.
- Pendiente = Resultado obtenido a base del mapa de pendientes.
- Textura de suelo = A partir de la digitalización de la toma de muestras de suelo del área en estudio.
- Geología = A partir del mapa de hojas geológicas 1:50,000
- Cobertura = Resultado obtenido del % de suelo cubierto por vegetación permanente.

- Uso de la tierra = A partir de la digitalización del terreno a una escala de 1:10,000, con base en una ortofoto del área de estudio del 2006.
- 0.27, 0.23, 0.12, 0.13 = Representan la importancia relativa de cada una de las variables.

Sin embargo, se establece el procedimiento que se debe realizar en las pruebas de infiltración como guía para futuros trabajos de la misma índole en el Anexo 3. Por ello, el documento se dirige a la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica de forma rápida, practica y bajo condiciones de pocos recursos financieros y de tiempo disponibles.

Para la puesta en práctica de la metodología aplicada se llevaron a cabo las cuatro (4) fases que se observan en la Figura 8.

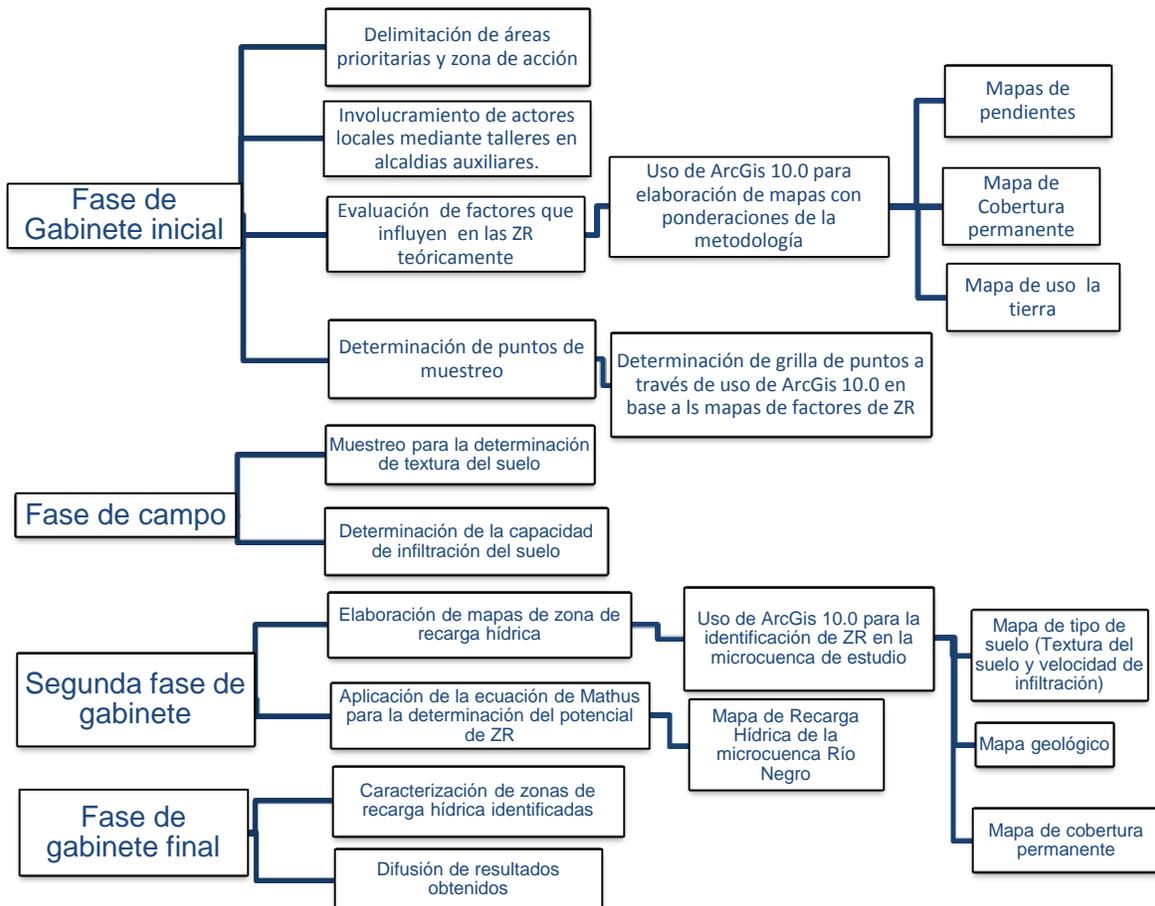


Figura 8. Esquema metodológico propuesto a seguir para la identificación y caracterización de la zonas de recarga hídrica. (Elaboración propia, basado en Mathus, 2007).

a. Fase de gabinete inicial

La primera fase del área de estudio comprendió en su mayoría giras de reconocimiento a través de la orientación de mapas del área de estudio y de la colaboración de promotores de alcaldías auxiliares de las zonas correspondientes al área para la exploración de áreas con cobertura vegetal.

Para el procesamiento de datos se utilizaron las herramientas del software de ArcGis 10.0, con la finalidad de elaborar mapas preliminares de pendientes, cobertura y uso de la tierra aplicando las ponderaciones posibles de la recarga hídrica presentadas en los Cuadros 1 y 2. Y por último, la determinación de puntos de muestreos en el área de estudio se realizó a través de los resultados originados a través de los mapas realizados, lo que permitió mapear de una forma lógica y representativa (Manchame, 2011).

a.1 Delimitación del área de estudio

Se delimitó el área de estudio, que en este caso es la microcuenca del Río Negro. El procedimiento de datos se realizó a partir de las capas de zonas del área metropolitana a escala 1:50,000 y ortofotos del año 2002 de las mismas zonas comprendidas por el área de la microcuenca generadas por la Municipalidad de Guatemala, con la finalidad de conocer de forma superficial el área de estudio y los factores que inciden en la misma, además de determinar su área geométrica en kilómetros cuadrados a través de ArcGis10.0 (Manchame, 2011).

- **Mapa de cobertura y uso de la tierra**

Para realizar el mapa de uso de la tierra se utilizaron ortofotos de las zonas territoriales correspondientes a la microcuenca del año 2008 procedentes del IARNA y aplicando las herramientas de ArcGis 10.0 se digitalizó los diferentes polígonos para diferenciar los usos de la tierra presentes a una escala de 1:10,000. Además se realizó la comparación de la capa digitalizada del uso de la tierra con imágenes satelitales del año 2013; con la finalidad de establecer

un uso de la tierra actualizado a lo que actualmente se encuentra en el área de estudio.

Por último, se aplicó la clasificación a partir de la matriz presentada en el Cuadro 1 para la ponderación de recarga hídrica según el uso de la tierra (Manchame, 2011).

Cuadro 1. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica de acuerdo al uso de la tierra.

Uso de la tierra	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque que presenta los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas	Muy alta	5
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Terrenos cultivados, obras de conservación de suelo	Regular	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Baja	2
Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy baja	1

(CATIE , 2010).

- Mapa de pendientes

Para la elaboración del mapa de pendientes se utilizó el modelo de elevación digital de la microcuenca elaborada por el Sistema de Información Municipal (2010). Se utilizó ArcGis 10.0 para el procesamiento de datos y por último se realizó la clasificación de la posibilidad recarga hídrica según el grado de pendiente se observa en la matriz del Cuadro 2.

Cuadro 2. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según pendiente y microrrelieve.

Microrrelieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelo plano a casi plano, con o sin rugosidad	0-6	Muy alta	5
Suelo moderadamente ondulado/cóncavo	6-15	Alta	4
Suelo ondulado/cóncavo	15-45	Moderada	3
Suelo escarpado	45-65	Baja	2
Suelo fuertemente escarpado	>65	Muy baja	1

(CATIE , 2010).

- Mapa de puntos de muestreo de suelo.

La determinación de puntos de muestreo permitió mapear el área de una manera lógica y consistente (Anexo 1). Por ello, se tomaron las siguientes consideraciones:

- El nivel de muestreo es semidetallado, por lo que se recolectó una muestra de suelo por kilómetro cuadrado y la escala de publicación de los mapas cartográficos es de 1: 40,000.
- La distribución de los puntos se realizó con una separación de 1,000 m entre puntos.
- Para el procedimiento se utilizó las herramientas de análisis de Geospatial Modelling Environment diseñadas para ArcGis 10.0.

Cabe mencionar, que para el muestreo se excluyeron las áreas que corresponden a áreas urbanizadas y con pendientes muy altas dentro de la microcuenca de estudio, esto se obtuvo a partir del cruce de capas de uso de la tierra, pendientes y cobertura permanente anteriormente realizadas, lo que permitió reducir el nivel de error al eliminar áreas que teóricamente no presentan ninguna recarga hídrica. Al obtener los puntos de muestreo se

calculó sus coordenadas geográficas, las cuales sirvieron para la identificación de puntos en el campo (Manchame, 2011).

b. Fase de campo

Los puntos de muestreo se identificaron utilizando un GPS, esta fase comprendió muestreos para la textura del suelo, que son necesarios para la determinación teórica de infiltración de suelo que se aplica en la ecuación propuesta.

a. Determinación de la textura del suelo

A partir de la grilla de puntos se tomaron 9 muestras de texturas de suelo. Se tomaron muestras de aproximadamente de dos (2) libras de peso y a una profundidad de 20 centímetros, para ello, se utilizaron bolsas plásticas transparentes y estas fueron identificadas en su exterior con marcador indeleble, indicando el número de muestra, lugar de muestreo y fecha. A su vez, se diseñó una boleta de campo para la toma de datos en campo (Anexo 2).

Una vez recolectada todas las muestras en campo fueron llevadas al laboratorio de edafología de la Universidad Rafael Landívar para la determinación de la textura de suelo, donde se utilizó el método de Bouyucos (Solís, 2006).

c. Segunda fase de gabinete

A partir de los datos obtenidos en campo se realizó el procesamiento de los mismos a través de la aplicación de la ecuación de Mathus Silva (2009) utilizando el software ArcGis 10.0 para la identificación de zonas de recarga hídrica

a. Mapa de tipo de suelo

El mapa de tipo de suelo vincula dos importantes elementos del suelo que influyen en la recarga hídrica, los cuales son: la textura del suelo y velocidad de infiltración (Manchame, 2011).

i. Mapa de texturas de suelo

El mapa de texturas de suelo se configuró a partir de las muestras colectadas en campo donde cada una presentó la cantidad de arena, limo y arcilla que determinó la clase textural del área bajo estudio. Los resultados fueron analizados mediante el uso de la herramienta Natural Neighbour de ArcGis 10.0 donde se logró la interpolación espacial de los resultados individuales para establecer los valores de textura para las áreas intermedias a los lugares muestrados. Según el modelo de texturas del suelo fueron clasificados y ponderados según la matriz que se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según textura.

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelo franco arenoso, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios y muy rápida capacidad de infiltración (mayor de 25 cm/h)	Muy alta	5
Suelo franco, con partes iguales de arena, limo y arcilla y rápida capacidad de infiltración (12,7 – 25 cm/h).	Alta	4
Suelo franco limoso, con partículas de tamaño medio a finas y moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2-12,7 cm/h).	Moderada	3
Suelo franco arcilloso, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación y lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración (0,13-2 cm/h).	Baja	2
Suelo arcilloso, muy pesados con partículas muy finas, compactados, con muy lenta	Muy baja	1

capacidad de infiltración
(menor de 0,13 cm/h).
(CATIE , 2010).

Para la realización del mapa cartográfico de velocidad de infiltración se establecen los pasos a seguir en el Anexo 5 que por razones anteriormente expuestas no se llevó a cabo dentro de la práctica profesional.

b. Mapa geológico

El mapa de tipo de roca se obtuvo por medio de la hoja geológica elaborada por el MAGA a escala 1:50,000. Se clasificaron las características geológicas considerando el nivel de permeabilidad que podrían presentar. La clasificación se realizó en base a las categorías de la matriz que presentan en el Cuadro 4 para la determinación de los valores ponderados de recarga hídrica del mapa geológico.

Cuadro 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.

Rocas	Posibilidad de recarga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados (arena gruesa, piedra pómez, grava)	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados, con poca cementación (arena fina, arenisca)	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular interconexión de poros	Moderada	3
Rocas poco permeables, algo duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas (grava combinada con arcilla)	Baja	2

Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas. (CATIE , 2010).	Muy baja	1
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	---

Los resultados obtenidos de este mapa fueron considerados en la ecuación general para la determinación del potencial de zonas de recarga hídrica de acuerdo a la metodología propuesta (Manchame, 2011).

c. Mapa de Cobertura permanente

El mapa de cobertura vegetal permanente se refiere al porcentaje de suelo cubierto por dicha cobertura. Para la determinación de la cobertura vegetal, se delimitó las unidades de mapeo preliminar que son las áreas resultantes del traslape de los mapas de pendientes, textura de suelo y geología.

Seguidamente, se sobreponen sobre el mapa ya existente de “Cobertura vegetal y uso de la tierra”, digitalizado anteriormente donde se realizó una comparación entre el área de mapeo preliminar y el área que dentro de dicha unidad de mapeo ocupa la cobertura de tipo permanente. El porcentaje de cobertura fue calculado para cada unidad de mapeo preliminar generada en el área de estudio en base a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cobertura} = (\text{Área con cobertura permanente} / \text{Área unidad provisional de mapeo}) * 100.$$

Los resultados obtenidos se ponderaron en base a la matriz presentada en el Cuadro 5 y se obtuvieron los valores para la aplicación de la ecuación general de zonas de recarga hídrica (Manchame, 2011).

Cuadro 5. Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura forestal.

Porcentaje	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80 %	Muy alta	5
70-80%	Alta	4
50-70%	Moderada	3
30-50%	Baja	2
<30%	Muy baja	1

(CATIE , 2010).

Una vez obtenidos todos los valores ponderados para cada variable, se procedió a la aplicación de la ecuación modificada para la determinación del potencial de zonas de recarga hídrica:

$$ZR = 0.27 (\textit{Pendiente}) \pm 0.23 (\textit{Textura de suelo}) \pm 0.12 (\textit{Tipo de Roca}) \\ \pm 0.25 (\textit{Cobertura vegetal}) \pm 0.13 (\textit{Uso de suelo})$$

Los resultados obtenidos para cada unidad de mapeo resultante fueron comparados y reclasificados en base al Cuadro 6.

Cuadro 6. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica.

Posibilidad de recarga	Valor resultante
Muy alta	1.10 - 5.00
Alta	3.50 – 4.09
Moderada	2.60 – 3.49
Baja	2.00 – 2.59
Muy Baja	0.75 – 2.00

(Matus, 2009).

De la aplicación del Cuadro 6 se obtuvo como resultado el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca bajo estudio mediante la

superposición de las unidades de mapeo: textura del suelo, usos de la tierra (a través de la cobertura vegetal), geología y pendiente utilizando Arc Gis 10.0.

b. Fase de gabinete final

Para el presente estudio, las zonas potenciales de recarga hídrica preliminares se difundieron hacia los actores sociales que intervengan en las zonas de la microcuenca bajo estudio (Manchame, 2011). Cabe mencionar, que son resultados preliminares debido a que es necesario realizar las pruebas de infiltración para confirmar dichas zonas de recarga hídrica.

Por último, al obtener las zonas de recarga hídrica definidas se debe realizar la caracterización de las zonas de recarga hídrica con la finalidad de describir las condiciones que configuran cada una de las zonas en función del relieve, tipo de roca, tipo de suelo, cobertura vegetal, entre otros.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología aplicada en el área de estudio fue de fácil interpretación para su uso en la investigación realizada, lo cual, se obtuvieron resultados en corto tiempo, a bajo costo, con material didáctico de fácil acceso así como herramientas a disposición rápida.

Los resultados obtenidos permitieron de forma rápida definir las áreas con potencial de recarga hídrica en el área de estudio; que era la finalidad de la investigación realizada y con ello se replicó la utilización de la metodología propuesta en otros estudios de la misma índole en distintas áreas de incidencia de la Municipalidad de Guatemala.

A través de las variables propuestas por la ecuación de Mathus Silva (2009) entre ellas la pendiente del terreno, tipo de suelo, tipo de roca, uso de la tierra y cobertura vegetal, se realizó el análisis de los resultados para definir las zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro. Por lo anterior, se obtuvo los siguientes resultados:

6.1 Pendiente del terreno

En la Figura 9 se encuentra el mapa de pendientes de la microcuenca del Río Negro que presenta los diferentes rangos propuestos según el potencial de recarga hídrica establecido por la metodología utilizada; obteniendo únicamente cuatro rangos dentro del área de estudio según las características del terreno analizado.

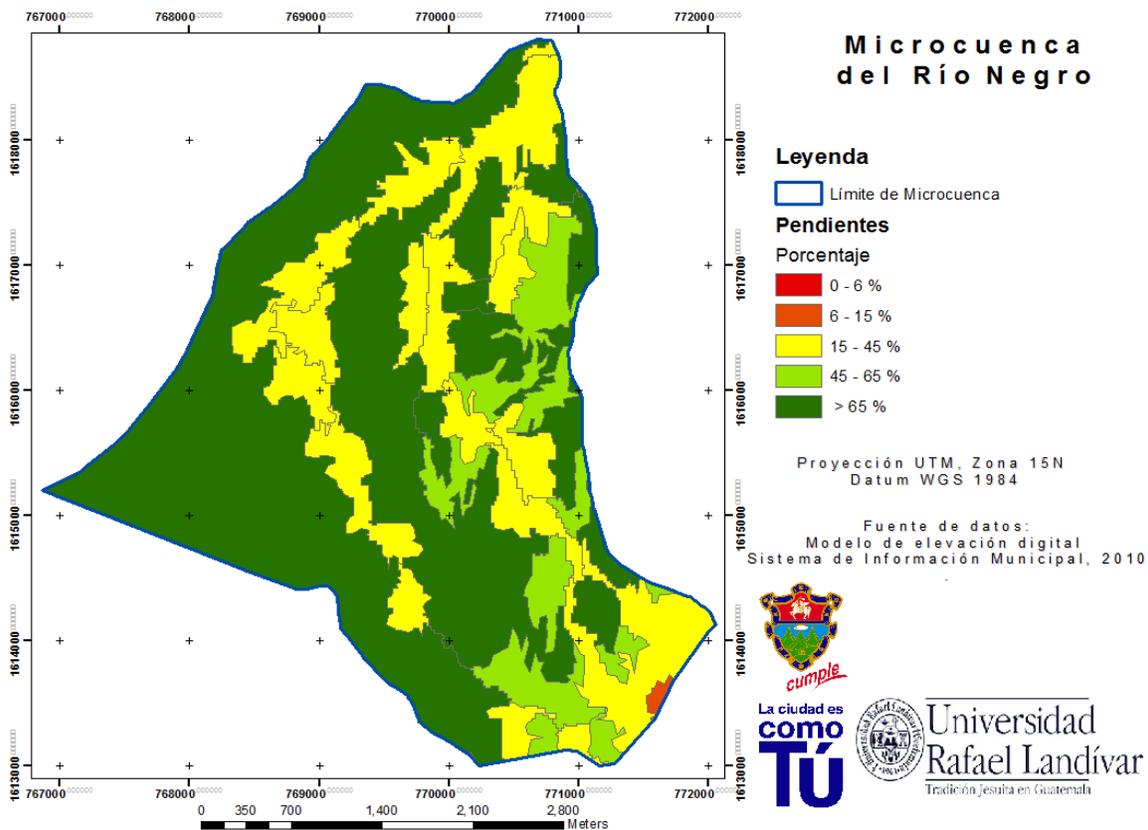


Figura 9. Clasificación de Pendientes en la Microcuenca del Río Negro.
(Elaboración propia).

Como se mencionó anteriormente las pendientes “planas” permiten que el agua de lluvia permanezca más tiempo en la superficie, y esto, contribuye a la infiltración de agua al suelo mientras que las pendientes “inclinadas” facilitan la escorrentía; reduciendo la cantidad de agua de lluvia que podría infiltrarse en el suelo para favorecer a la recarga hídrica del área.

Al analizar la Figura 10 se puede observar que los rangos comprendidos entre 6-15 % y 15-45 % son áreas que presentan pendientes de planas a modernamente inclinadas. Dichos rangos en conjunto representan un 27.95 % que aportan al potencial de recarga hídrica entre alto y moderado de la microcuenca en estudio. Mientras que los rangos comprendidos entre 45-65 % y al porcentaje mayor de 65 (>65 %) corresponden a áreas con pendientes con un grado de inclinación alto y representa el 72.05 % del área total, lo que significa, que la mayoría del terreno

posee áreas escarpadas y esto es lo que favorece a que la escorrentía superficial del agua de lluvia sea más rápida, reduciendo el tiempo de contacto sobre la superficie del suelo y agotando la posibilidad de infiltración.

Al considerar a la pendiente como factor determinante para establecer el potencial de recarga hídrica se puede detectar que dentro del área de estudio no se encuentra el rango 0-6 %, que son áreas con planicies, las cuales, favorecen directamente la infiltración de agua de lluvia al suelo.

Y por último las áreas que son más apropiadas para la recarga hídrica dentro de la microcuenca en estudio se ubican tanto en la parte alta, media y baja del terreno específicamente en las áreas verdes circundantes al Río Negro, mismas que se encuentran dentro de áreas protegidas específicamente en el Biotopo de la Ardilla (Ubicado en Vista Hermosa Zona 15 y su ingreso se encuentra en la 4 calle A entre 19 y 20 avenida A) mientras que las áreas menos idóneas se encuentran en las áreas impermeabilizadas de la microcuenca encerrando a las áreas un potencial de recarga moderado.

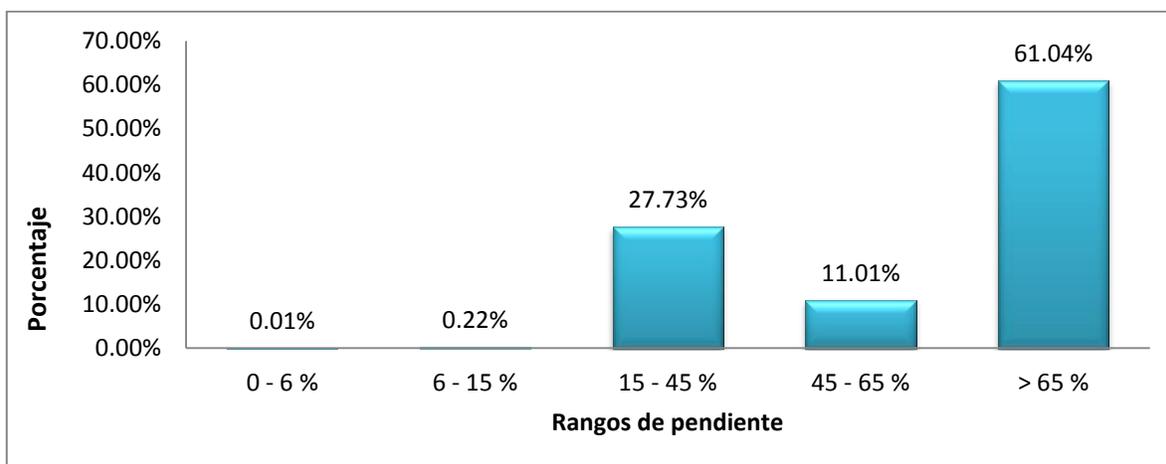


Figura 10. Distribución en porcentaje según rango de pendientes dentro de la microcuenca.
(Elaboración propia).

6.2 Textura del suelo

A partir de la determinación de la textura de las diferentes muestras de suelo los resultados fueron analizados mediante el uso de ArcGis 10.0 se logró establecer

los valores de textura para las áreas intermedias a los lugares muestrados. Con ello, se identificaron cinco clases texturales diferentes, como se puede observar en la Figura 11; estos resultados demuestran que la mayoría del terreno se encuentra bajo la clase textural “Arcillo-arenoso” que posee un potencial de recarga hídrica bajo debido a que las partículas arcillosas son de tamaño grande y no permiten la infiltración de agua y, favorecen el estancamiento de agua, y por ende la escorrentía superficial.

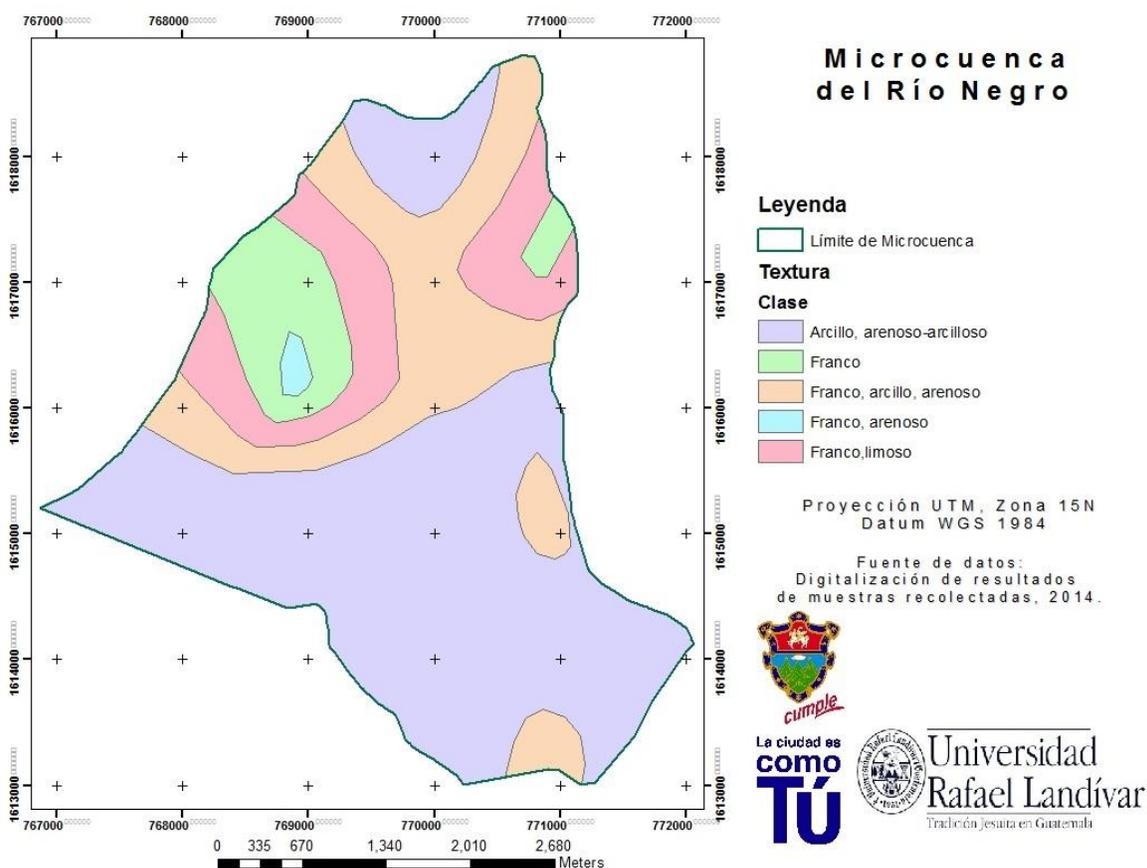


Figura 11. Clases texturales de la microcuenca del Río Negro. (Elaboración propia).

A su vez de los resultados obtenidos se evidencian en la distribución del porcentaje por clase textural que se presenta en la Figura 12, de lo cual, se enfatiza en la capacidad que cada clase tiene para facilitar la infiltración del agua al suelo en lugar de analizar el porcentaje de las partículas. Para analizar a mayor

detalle los resultados obtenidos conforme a los porcentajes de arena, limo y arcilla observar el Anexo 6.

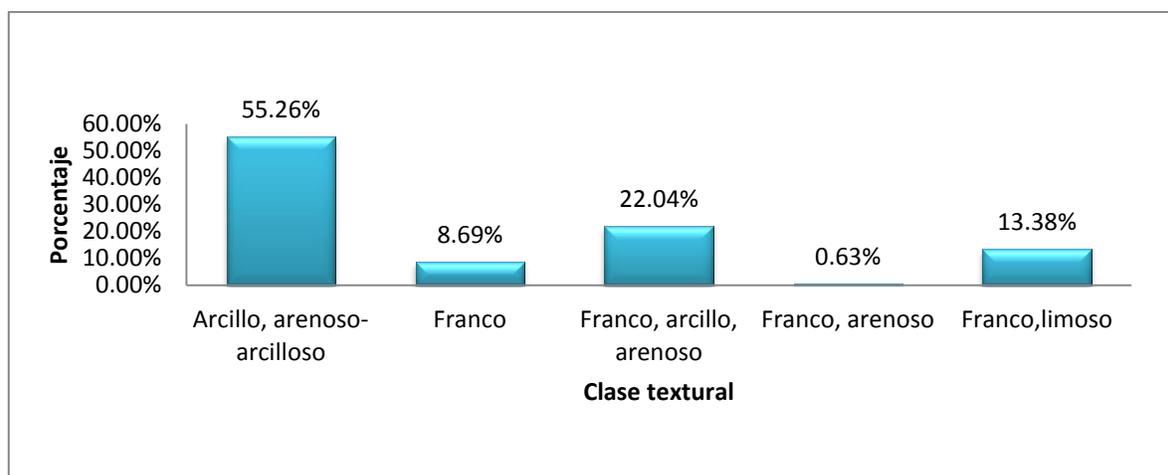


Figura 12. Distribución en porcentaje según clase textural del área de estudio (Elaboración propia).

De acuerdo con la Figura 12 se evidencia que el 0.63 % del área total pertenece a la categoría de “texturas gruesas” las cuales son arena-franco y franco-arenoso que presentan mayor potencial para la recarga hídrica ya que favorecen la infiltración debido al tamaño de las partículas; mientras que el 44.11 % lo posee la categoría de “texturas medias” que se refiere a clases texturales como franco, franco-arenoso-arcilloso y franco limoso que caracterizan con una menor posibilidad de recarga hídrica que la anterior; y en cuanto al restante 55.26 % se encuentra bajo la categoría de “texturas finas” de las cuales son arcillo-arenoso-arcilloso que no posee alta capacidad de recarga hídrica debido a que el tamaño de la partícula es muy pequeña y no permite la infiltración de agua al suelo.

Por consiguiente, la posibilidad de recarga se halla entre un nivel medio y bajo ya que el 44.74 % del área en estudio se encuentra entre las clases que favorecen la recarga hídrica de los suelos.

6.3 Geología

A partir del mapa de geología 1:50,000 generado por el MAGA se determinó que dentro del área de estudio existen dos tipos de geología: rocas volcánicas sin

dividir (basaltos y andesitas) y rocas poméz; que se pueden visualizar en la Figura 13 bajo la etiqueta “Tv” y “Qp” respectivamente.

Se puede mencionar que las rocas volcánicas sin dividir del área en estudio incluyen tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos; los cuales, presentan características como porosidad que contribuyen a la infiltración de agua en los estratos del suelo. Igualmente la microcuenca del Río Negro, se caracteriza por poseer la roca tipo poméz que son rellenos y cubiertas gruesas de la misma piedra que poseen diversos orígenes como lo observado en campo y se conoce que este tipo de roca está directamente relacionado con un potencial de recarga hídrica alto debido al material de origen y porosidad que favorece la permeabilidad de la misma.

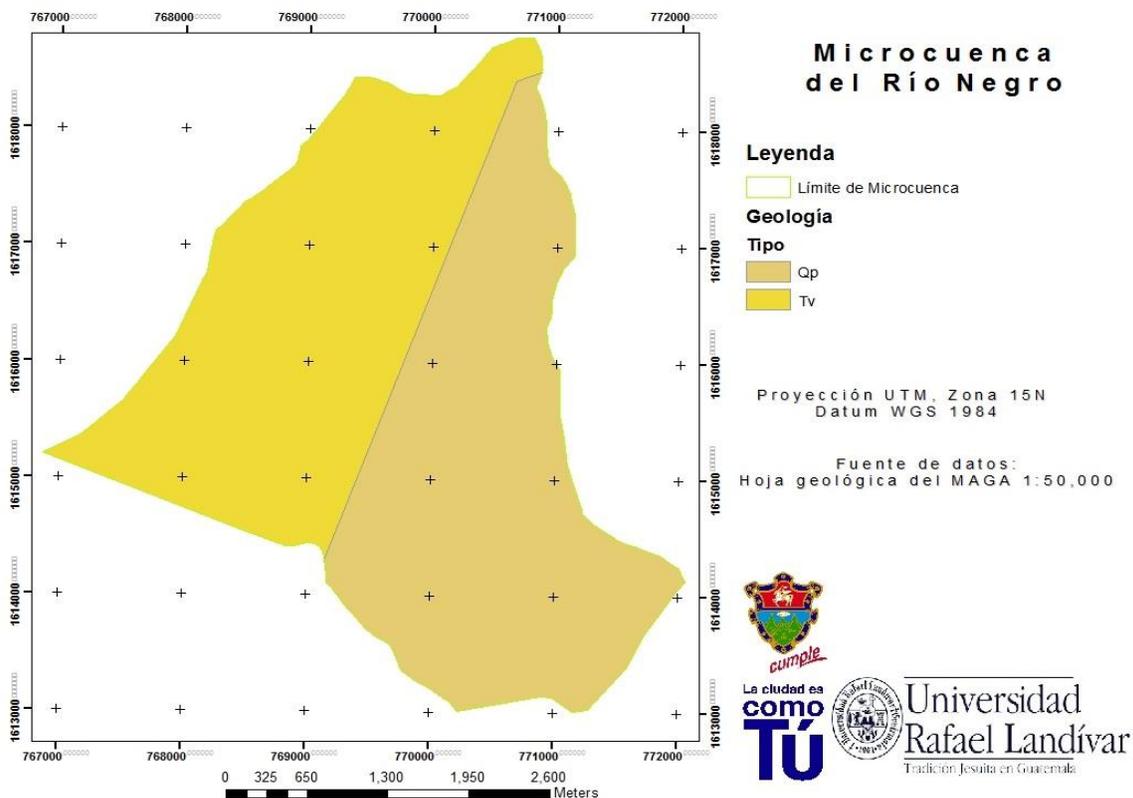


Figura 13. Geología de la microcuenca Río Negro. (Elaboración propia).

De lo anterior se puede visualizar en la Figura 14 que el 51.10 % del área total pertenece a basaltos y andesitas las cuáles poseen una permeabilidad moderada y el restante 48.90% concerniente a rocas poméz que poseen alta permeabilidad además de la porosidad efectiva característica de la misma, que favorecen la infiltración de agua en los estratos rocosos del suelo.

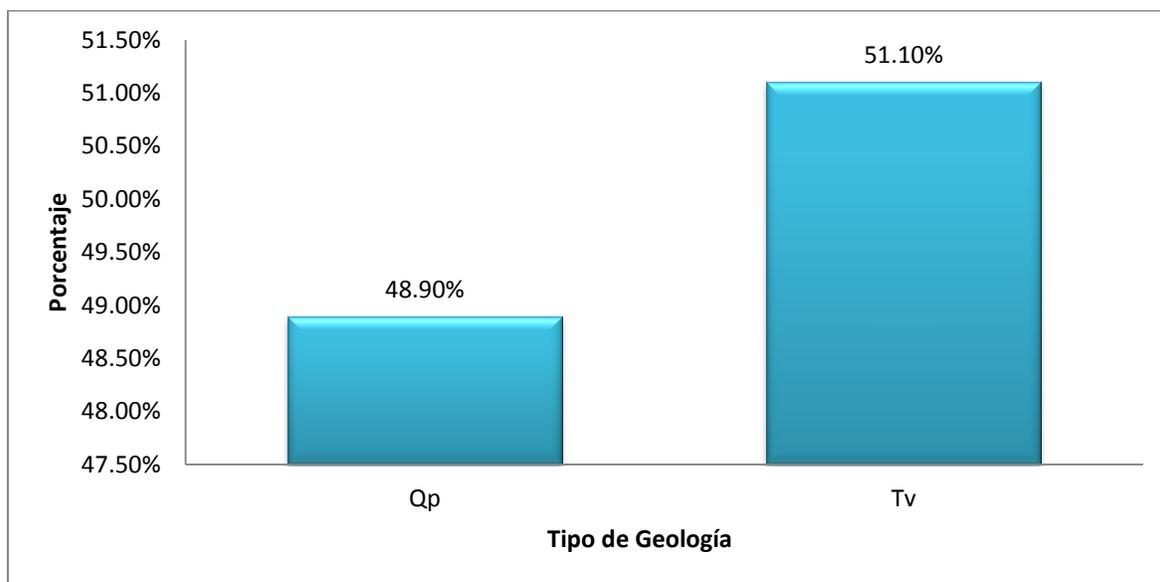


Figura 14. Distribución en porcentaje del tipo de roca del área en estudio. (Elaboración propia).

6.4 Cobertura Vegetal

Conforme a la metodología aplicada se considera como cobertura vegetal al porcentaje de una unidad del terreno que posee vegetación permanente dentro de microcuenca en estudio, como se observa en la Figura 15. Para la determinación de la cobertura vegetal se tomaron como base los diferentes usos de la tierra, tales como: arbustos y matorrales, bosque y bosque latifoliado.

Asimismo, se puede indicar que el área de estudio se considera como una microcuenca urbanizada ya que en la mayoría de su territorio presenta áreas dedicadas al comercio, educación y de residencia. El desarrollo económico y social se encuentra en constante crecimiento y como resultado se obtiene la

pérdida de áreas con vegetación permanente en varias zonas de la microcuenca de estudio.

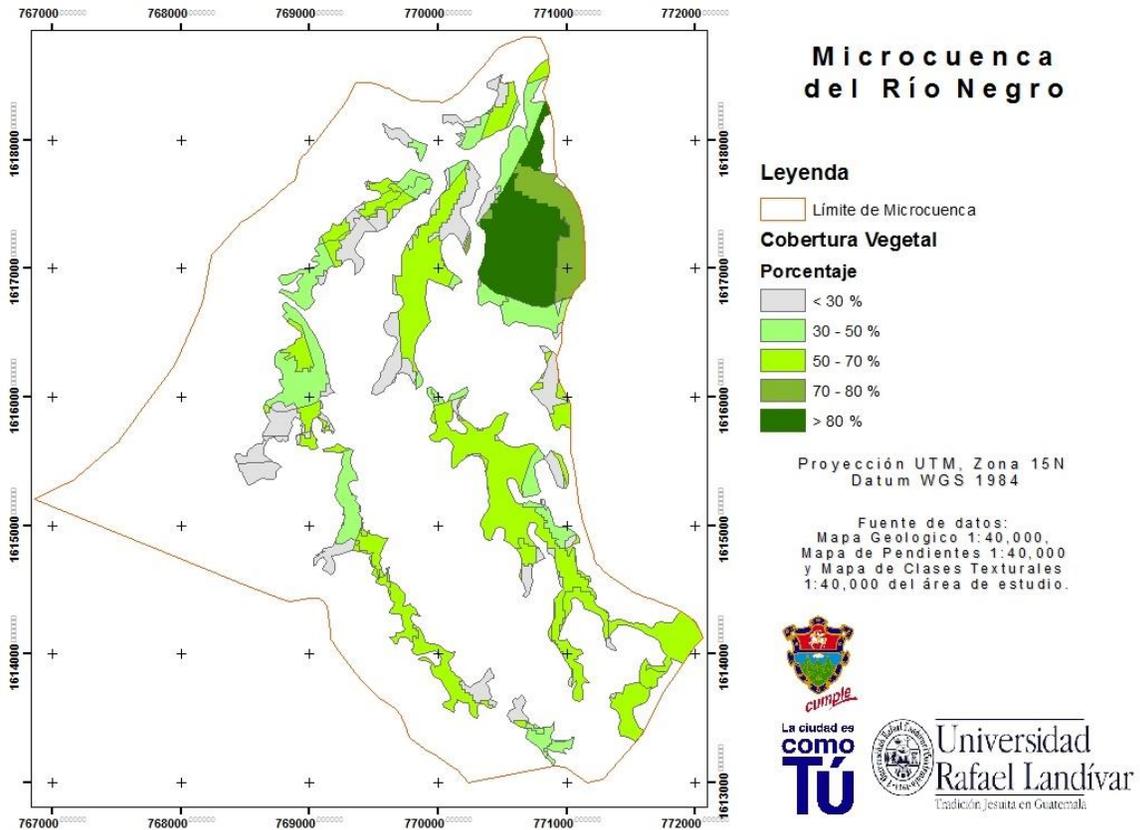


Figura 15. Cobertura vegetal permanente de la microcuenca del Río Negro. (Elaboración propia).

Como lo muestra la Figura 16 el 14.16% del área total corresponde al porcentaje mayor de 80 (>80%) el cual presenta una posibilidad de recarga “Muy alta” así como el 6.65% pertenece al rango comprendido entre 70-80% y con una posibilidad de recarga “Alta” mientras que el rango entre 50-70% como se observa posee la mayoría de área territorial en la microcuenca ya que cubre un 37.93% y su posibilidad de recarga hídrica es “Moderada”. Sin embargo, con 21.90% se encuentra el rango entre 30-50% con la posibilidad de recarga “Baja” y por último el porcentaje menor de 30 (<30%) posee un 19.36% y con posibilidad de recarga

hídrica “Muy baja”; los cuales son datos que no favorecen la infiltración y por consiguiente la recarga hídrica es menor en estas áreas.

Por lo tanto, entre mayor sea el porcentaje de cobertura vegetal permanente mayor será la posibilidad de agua que pueda ser infiltrada para la recarga. Esto evidencia que los rangos comprendidos entre 50-70 %, 70-80 % y >80 % son los datos más relevantes para determinar un potencial apto para la recarga hídrica, lo cual, representa un 58.74 % de la totalidad de área en estudio.

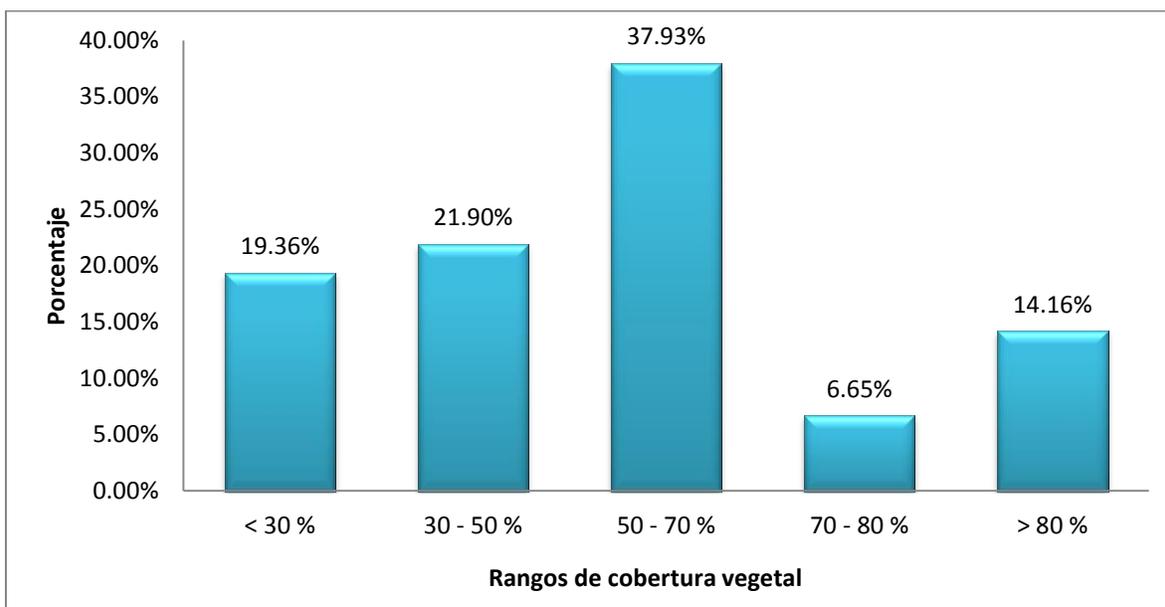


Figura 16. Distribución porcentual según rangos de cobertura vegetal. (Elaboración propia).

6.5 Uso de la tierra

Los datos del uso de la tierra para la microcuenca en estudio se encuentran en el mapa de la Figura 17. Como se puede observar se ubican únicamente 5 tipos de uso, de los cuales, lo más importantes a considerar son aquellos que favorecen la infiltración de agua de lluvia. Entre los que se pueden mencionar: arbustos y matorrales, bosque y bosque latifoliado, que por el grado de cobertura permiten un mayor contacto del agua con el suelo que favorecerá la capacidad de suelo para infiltrar mayor cantidad de agua, además, estos pueden alterar la estructura del

suelo pesado al poseer un sistema radicular profuso que permita una mayor recepción de agua en el suelo.

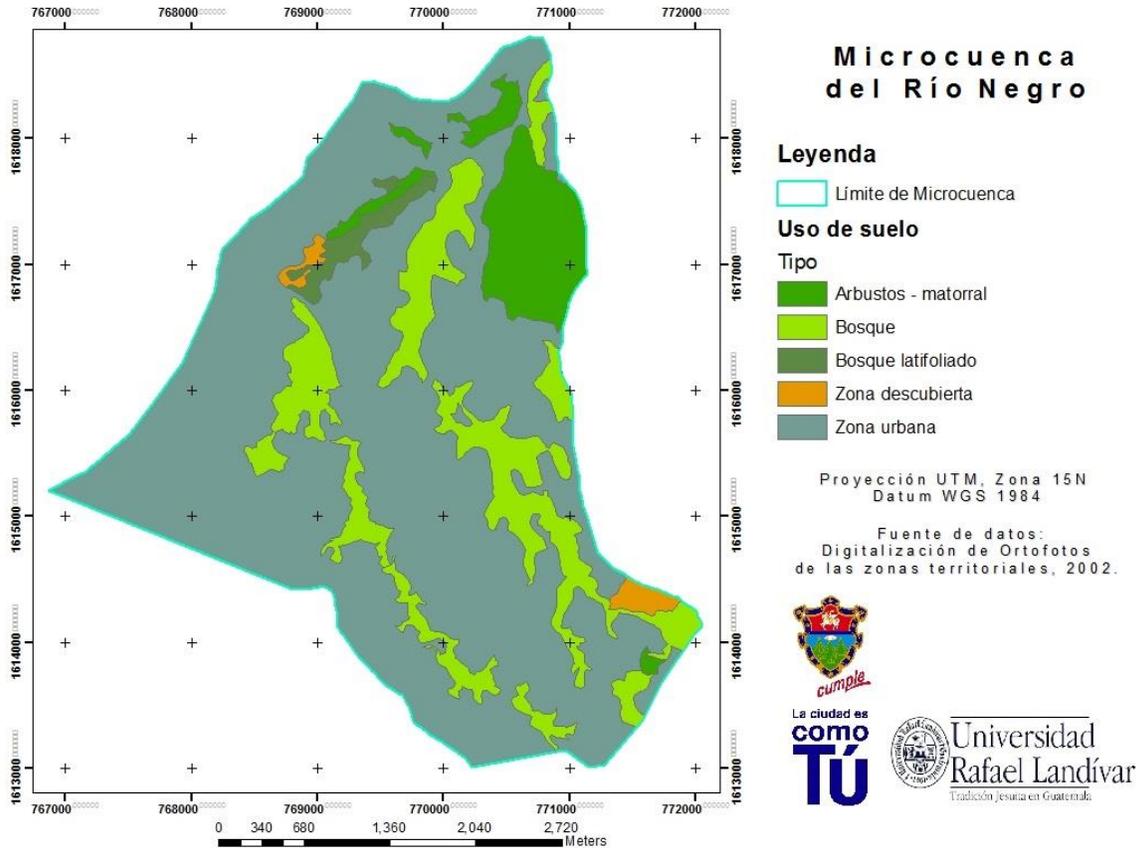


Figura 17. Uso de la tierra de la microcuenca del Río Negro actualizado al año 2010. (Elaboración propia).

Al analizar los resultados de la Figura 18 el 74.03% del suelo de la microcuenca se encuentra impermeabilizado, es decir, que el suelo no es capaz de infiltrar el agua de lluvia debido a que se encuentra cubierto por zonas urbanizadas que se dedican al desarrollo económico y social; generando escorrentía superficial; y en la mayoría de los casos, el recurso hídrico se desperdicia al ser contaminado por medio de la mezcla con aguas residuales, lo que repercute en el bienestar social y natural.

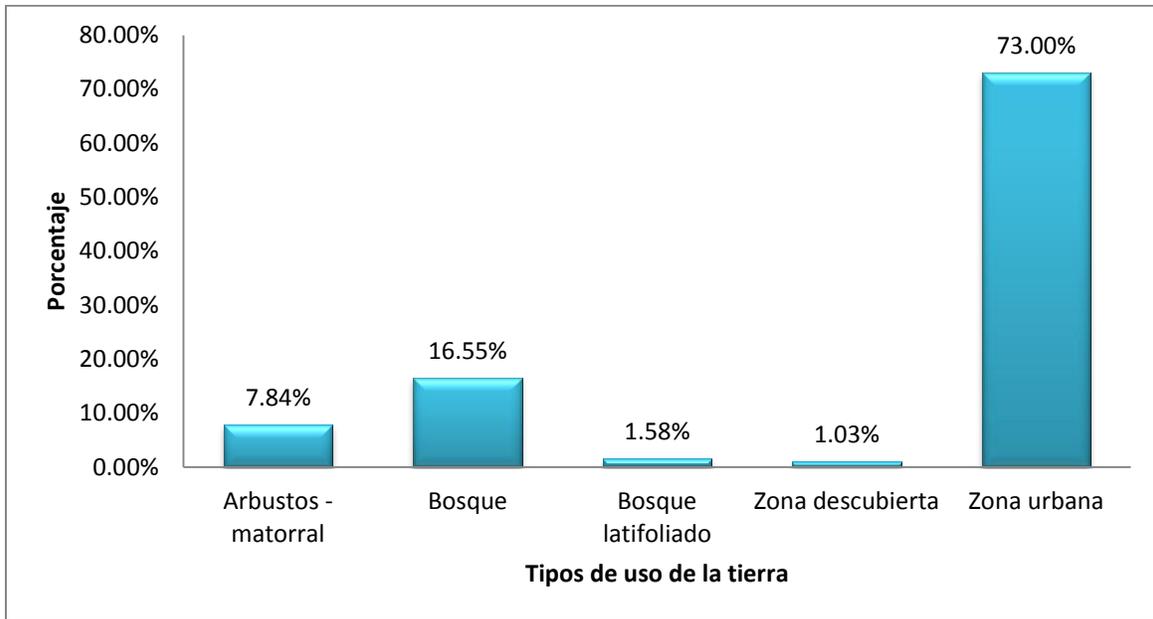


Figura 18. Distribución porcentual del uso de la tierra. (Elaboración propia).

6.6 Zonas potenciales de recarga hídrica

Como resultado de un análisis de campo y teórico se obtuvo un mapa cartográfico que detalla las zonas de recarga hídrica según su potencial (Figura 19); en el mismo se ubican áreas con un potencial alto, moderado, bajo y muy bajo. Este último se presenta con mayor extensión dentro del área de estudio debido a las condiciones desfavorables para la recarga hídrica.

A partir de la metodología aplicada se obtuvieron datos de potencial alto y moderado de recarga hídrica; lo que lleva a considerar que el potencial de recarga hídrica de alto a moderado anteriormente cubría una mayor extensión del territorio de la microcuenca en estudio, y esto, posiblemente se debe a los múltiples cambios de uso de la tierra dentro del área de estudio.

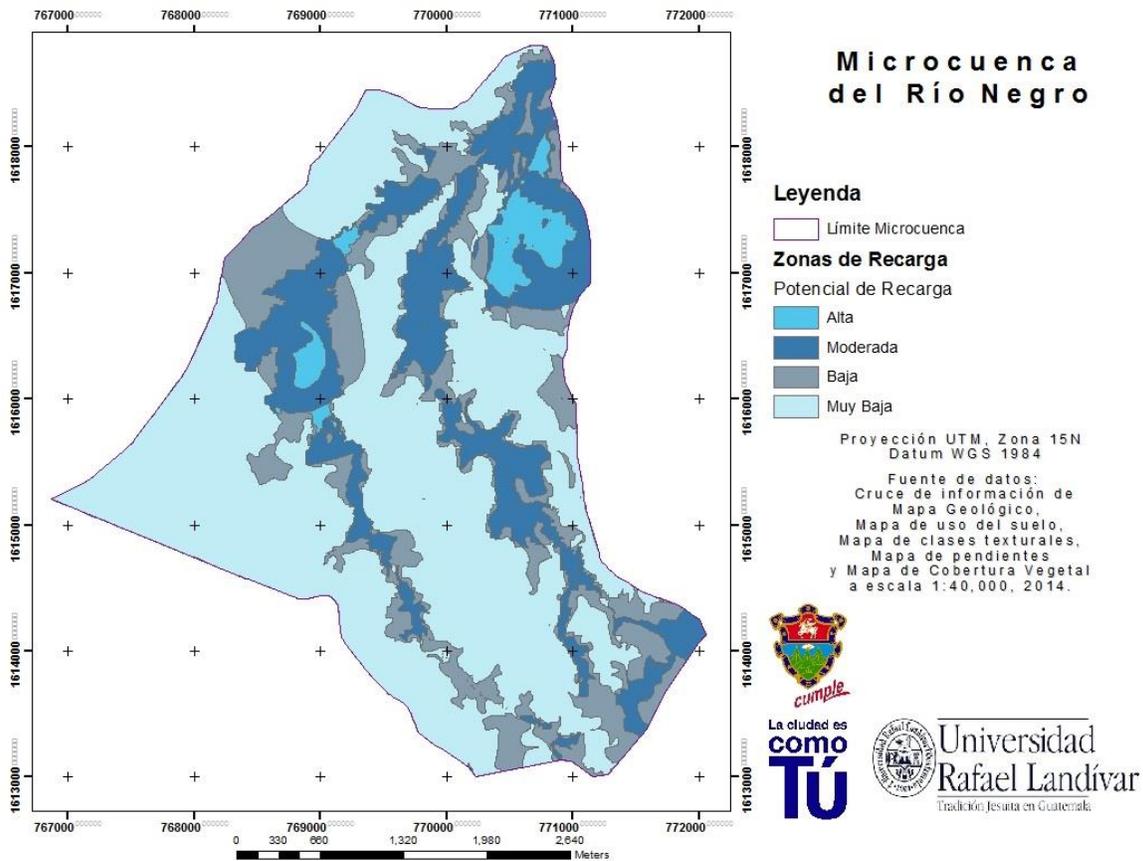


Figura 19. Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en la microcuenca del Río Negro. (Elaboración propia).

En la Figura 20 se establece en porcentaje la distribución de los diferentes potenciales de recarga hídrica, entre ellos se puede mencionar las zonas clasificadas con un potencial “Alto” abarcan únicamente el 3.63% ubicándose en la parte alta de la microcuenca. Con diversos factores que influyen en la recarga hídrica se asume un 19.73 % que corresponde al potencial de recarga “Moderado” y es la tercera zona con mayor extensión.

Sin embargo, el 20.25 % del área total posee un potencial de recarga “Bajo” y se debe principalmente al cambio de uso de la tierra a causa de la impermeabilización de la misma. Por último, el 56.38 % pertenece al potencial de recarga “Muy bajo” el cual no favorece a la recarga hídrica ya que la combinación

de los factores como poca cobertura vegetal, suelo con texturas finas (con alto contenido arcilloso), pendientes elevadas, uso de la tierra, etc.

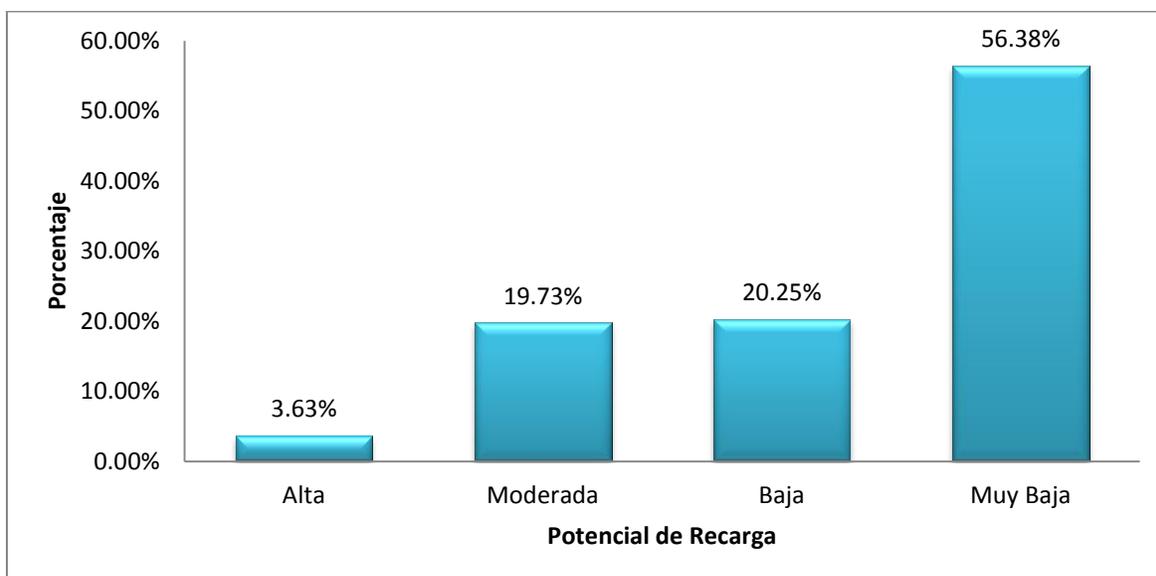


Figura 20. Distribución porcentual del potencial de recarga hídrica. (Elaboración propia).

En el análisis de resultados se delimitó que la microcuenca del Río Negro posee un porcentaje muy bajo de recarga hídrica (23.36%), concentrándose en las partes altas y medias de la misma. Por consiguiente, se puede determinar que la microcuenca, a pesar de encontrarse en áreas con una cobertura vegetal moderada dentro del departamento de Guatemala, no posee mayor potencial de recarga hídrica debido a la presencia de infraestructura urbanística, pendientes escarpadas, suelos con mayor cantidad de arcilla, entre otros.

Es importante tomar en cuenta que la tasa de deforestación es de 1,544 ha/año (INAB; CONAP; UVG y URL, 2012) para el departamento de Guatemala, por lo tanto, la cobertura vegetal se encuentra amenazada por el constante crecimiento de áreas urbanizadas. Por consiguiente, las pérdidas de cobertura a largo plazo son altamente probables de acuerdo con el documento de Dinámica de la cobertura forestal 2006-2010 para el país (INAB; CONAP; UVG y URL, 2012).

Sin embargo, existen zonas potenciales de recarga hídrica que pueden asegurar el recurso líquido vital en calidad y en cantidad especialmente en conjunto con otras cuencas colindantes. Por consiguiente, la identificación de las zonas de recarga hídrica del área de estudio proporciona información pertinente para resguardar los recursos naturales asociados a estas zonas de vital importancia para el mejoramiento de la gestión ambiental a nivel territorial.

6.7 Participación social

Conforme al involucramiento de actores sociales que pretendía la metodología aplicada, se realizó la capacitación de temas relacionados a la recarga hídrica así como los pasos que se aplicarían para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica dentro de la microcuenca del Río Negro. Esta información se dirigió para la Alcaldía Auxiliar de la zona 15 (Figuras 21 y 22) únicamente debido a que no se pudo establecer comunicación con las otras alcaldías auxiliares que intervienen en el área (zona 5, 10, 16) por razones que se desconocen.



Figura 21. Involucramiento de actores locales de la zona 15 del municipio de Guatemala.
(Elaboración propia).



Figura 22. Capacitación a niños de la zona 15 sobre áreas verdes y sus beneficios.
(Elaboración propia).

Las alcaldías auxiliares de la Municipalidad de Guatemala son el vínculo entre los vecinos y el gobierno municipal, que busca dar espacios para promover iniciativas destinadas a mejorar la calidad de vida de la zona a la que corresponden (Municipalidad de Guatemala, 2004). Por ello, fue necesario realizarlo a través de estos vínculos, ya que, son fundamentales para el desarrollo de diferentes proyectos y a su vez se percibe el apoyo y compromiso de los vecinos para su realización. En la capacitación se pasó una encuesta sobre los cambios que se han observado en los últimos años conforme a factores que afectan la recarga hídrica en la zona 15 como se puede observar el resumen de respuestas en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Resumen de la encuesta presentada hacia actores locales de la zona 15.

Factor	Descripción
Flujos de agua	Han disminuido la cantidad de flujos de agua y la contaminación de desechos sólidos y orgánicos es mayor.
Pozos	Aunque el flujo de agua ha disminuido los 4 pozos del área aún siguen en funcionamiento.
Urbanización	Se establecen más áreas residenciales verticales y actividad comercial por la iniciativa privada.
Clima	No han percibido cambios.
Paisaje	Se ha impulsado no sólo por el gobierno municipal sino por los vecinos la concientización a áreas verdes.
Reforestación	Se han reforestado más áreas verdes con especies comunes del municipio de Guatemala.

(Elaboración propia).

VII. CONCLUSIONES

La microcuenca del Río Negro es un territorio que en su mayoría se encuentra impermeabilizado, ya que, posee viviendas y distintas actividades económicas. Por lo anterior, la recarga hídrica se ve afectada y limitada para alimentar los cuerpos de agua zonas circundantes debido a que la superficie del suelo no es la indicada para obtener la infiltración de agua de lluvia al suelo.

Las zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca del Río Negro se clasifican según el potencial de recarga, los cuales, son: alto, moderado, bajo y muy bajo que cubren un área de 3.63 %, 19.57 %, 20.25 % y 56.38% respectivamente; lo cual, significa que existe un potencial bajo de recarga hídrica para el área en estudio pero existen áreas con potencial alto y moderado (23.36 %) que pueden asegurar el recurso líquido vital en calidad y en cantidad en conjunto con otras cuencas colindantes a largo plazo para el municipio de Guatemala.

De acuerdo a la metodología aplicada la microcuenca posee un porcentaje muy bajo de capacidad de infiltración, debido a que la mayoría de su territorio no posee áreas con suelo de texturas gruesas, presencia de masa boscosa del 50-70%, con piedra pómez y una pendiente entre el rango 15 – 45% que favorezcan la infiltración de agua al suelo. La capacidad de recarga de los acuíferos se está reduciendo debido al deterioro del suelo y deforestación que se perciben en el área de estudio.

Las estrategias de protección y conservación del presente estudio establecen la preservación de la masa boscosa actual, usos de la tierra conforme a su intensidad de uso y protección de cuerpos de agua superficiales aledaños al área de estudio. Así como prevenir la contaminación de suelos y agua subterránea, realización de monitoreos para evaluar la gestión del recurso hídrico y establecer sanciones que resguarden la seguridad de los recursos naturales hacia las zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca en estudio con la finalidad de la

preservar el recurso hídrico para la población además de poseer avances en la gestión ambiental del Municipio de Guatemala.

VIII. RECOMENDACIONES

La metodología aplicada se debe llevar a cabo con el recurso humano, tecnológico y con el tiempo suficiente, con la finalidad de obtener resultados completos debido a las pruebas de infiltración en campo y al procesamiento de datos requiere una inversión significativa de recursos y capacidades.

Las zonas con potencial de recarga hídrica alto deben de considerarse como áreas prioritarias en los planes de manejo de cuencas a través de la entidad municipal bajo proyectos de protección y conservación de recursos naturales para el resguardo de los servicios ecosistémicos del municipio de Guatemala.

Es importante realizar las pruebas de infiltración al finalizar la época lluviosa del área en estudio, ya que, es necesario un suelo saturado para obtener datos certeros sobre la velocidad de infiltración de cada tipo de textura de suelo.

Es de suma importancia involucrar la parte social para la identificación, protección y conservación de las zonas de recarga hídrica; ya que esto permite empoderar a los actores sociales y autoridades de tomar acciones pertinentes para el resguardo no sólo del recurso hídrico sino de los recursos naturales en conjunto relacionadas al mismo.

Para completar la metodología aplicada se puede realizar un balance hídrico, el cual, es una representación teórica de los intercambios de agua de lluvia entre la evapotranspiración, escorrentía y recarga de acuíferos; permitiendo cuantificar los ingresos y salidas de los flujos de agua del sistema, evaluando de esta forma el comportamiento hídrico de la microcuenca.

Para favorecer la infiltración en zonas impermeabilizadas se pueden generar estrategias como establecer un drenaje pluvial separado del drenaje residual tanto en vivienda como en zonas comerciales e industriales del área; con la finalidad de recolectar el agua de lluvia para que sea dirigida a pozos de absorción y puedan alimentar igualmente los acuíferos del área y posteriormente a cuerpos de agua superficiales. El propósito de esta estrategia presentada es adaptar el aprovechamiento del recurso hídrico con las condiciones actuales del área y dirigiéndose hacia un desarrollo sostenible del municipio.

IX. BIBLIOGRAFÍA

CATIE. (14 de Julio de 2006). Hidrología. *Hidrología y Gestión de Cuencas Curso Internacional*. Turrialba, Cartago, Costa Rica.

CATIE . (Septiembre de 2010). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hidrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del Río Jucuapa, Nicaragua. Nicaragua.

Chilton, J. (2001). *World Health Organization* . Obtenido de http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqachapter9.pdf

FAO. (Abril de 2008). La microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales. (C. N. Córdova, Ed.) San Salvador , El Salvador.

FAUSAC. (Diciembre de 2003). Manual Técnico: Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural. Guatemala .

FODECYT. (08 de Septiembre de 2010). Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en la subcuencas de los Ríos Taco y Shusho, Municipio de Chiquimula. Guatemala.

IARNA. (26 de Abril de 2002). El agua: Situación actual y necesidades de gestión. Guatemala, Guatemala.

IARNA. (Marzo de 2003). Vulnerabilidad socioambiental: Aplicación para Guatemala . Guatemala.

IARNA. (29 de Marzo de 2006). Hidrología Forestal. Guatemala, Guatemala.

- INAB. (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*. Guatemala.
- INAB. (Abril de 2005). Programa de Investigación de Hidrología Forestal. Guatemala.
- INAB; CONAP; UVG y URL. (2012). *Mapa de Cobertura Forestal de Guatemala 2010 y Dinámica de la Cobertura Forestal 2006-2010*. Guatemala.
- Longwood University. (31 de 07 de 2003). *Longwood University*. Recuperado el 23 de Febrero de 2014, de Longwood University: <http://www.longwood.edu/cleanva/images/Sec4.groundwaterchapter.pdf>
- MAGA. (2003). Mapa de Cobertura Vegetal y Usos del suelo de Guatemala. Guatemala, Guatemala .
- Manchame, L. (2011). *Identificación de las zonas potenciales para la recarga hídrica, en la microcuenca del Río Agua Caliente, Municipio de Camotan, Chiquimula*. Chiquimula.
- Matus, O. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Turrialba, Costa rica.
- Monzón, F. (2012). *Biología y geología interactiva*. Obtenido de http://biologiaygeologia.org/unidadbio/a_ctma/hidrosfera/hidrosfera2.html
- Municipalidad de Guatemala. (10 de Enero de 2004). ¿Qué es una Municipalidad? *Municipalidad de Guatemala*(1.5). Guatemala, Guatemala.
- Municipalidad de Guatemala. (2011). Ubicación de la Municipalidad de Guatemala.
- National Groundwater Association. (18 de Octubre de 2010). *National Groundwater Association*. Obtenido de <http://www.ngwa.org/Fundamentals/hydrology/Pages/Forces-controlling-water-in-rocks.aspx>
- New Jersey Stormwater. (26 de Abril de 2004). Chapter 6: Groundwater Recharge. *New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual*. New Jersey, United States. Recuperado el 12 de Noviembre de 2014, de http://www.njstormwater.org/bmp_manual/NJ_SWBMP_6%20print.pdf
- Planning Commission Government of India. (Marzo de 2012). Draft Model Bill for the Conservation, Protection and Regulation of Groundwater. India .

- Programa Estado de la Nación . (2013). Cambio climático y ecosistemas en Centroamérica: Una oportunidad para la acción . Costa Rica.
- Ramirez, B. (2014). *Ubicación área del proyecto*. Municipalidad de Guatemala, Dirección de Medio Ambiente. Guatemala: Municipalidad de Guatemala.
- Saavedra, C. (Octubre de 2009). El manejo, protección y conservación de las fuentes de agua y recursos naturales. La Paz, Bolivia.
- Sistema de Información Municipal. (2010). *Modelo de elevación digital*. Municipalidad de Guatemala, Dirección de Catastro Municipal. Guatemala: Sistema de Información Municipal.
- Solís, J. (2006). *Manual de Laboratorio de Edafología*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- World Vision. (2011). *Manual de Manejo de Cuencas*. Obtenido de http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual_de_Manejo_de_Cuencas_Vision_Mundial_mod.pdf

X. ANEXOS

Anexo 1. Distribución de puntos de muestreo de la microcuenca del Río Negro, Guatemala, departamento de Guatemala

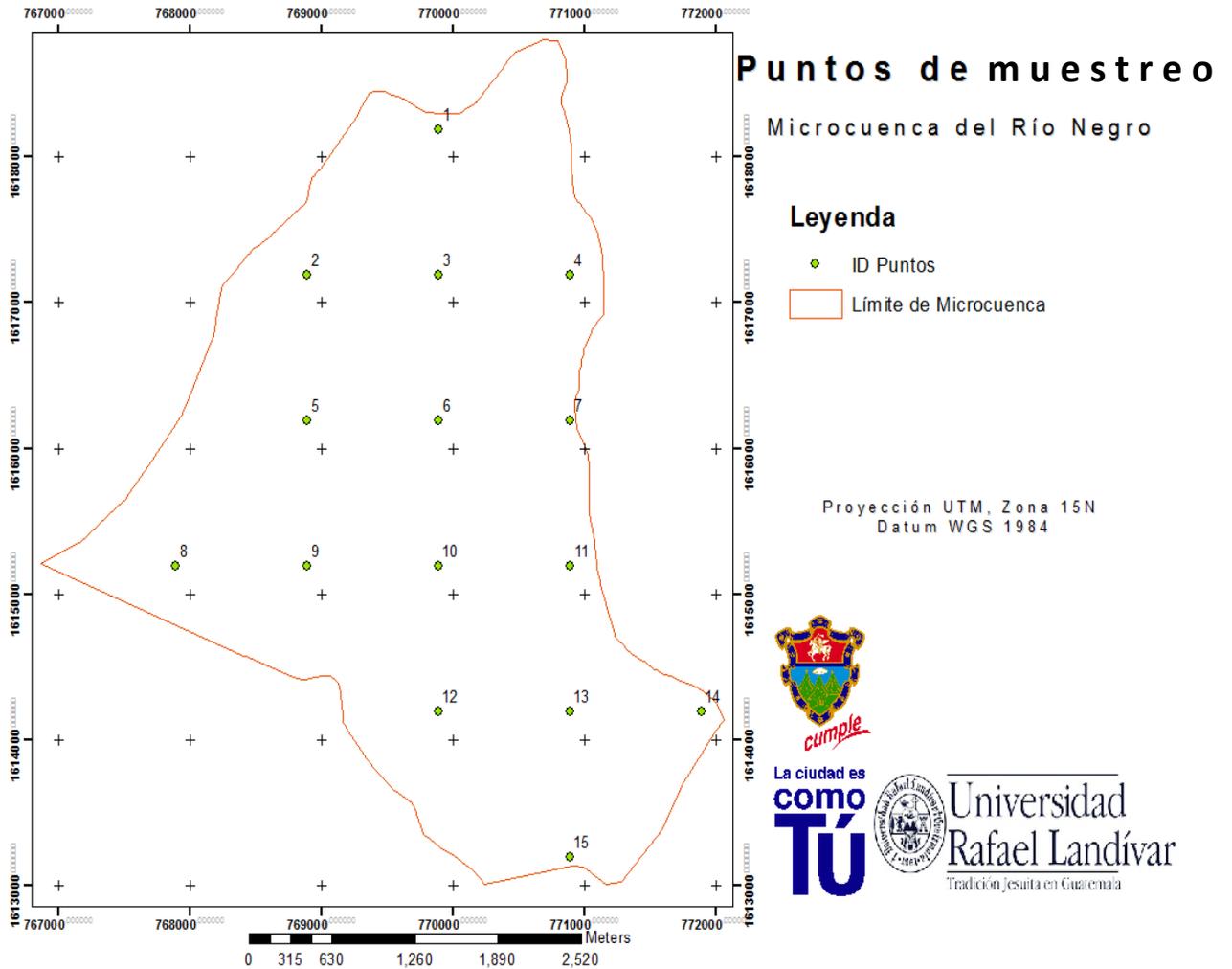


Figura 23. Puntos de muestreo de la microcuenca del Río Negro.

(Elaboración propia).

Anexo 2. Boleta de campo de clasificación de textura de suelo.

Cuadro 8. Boleta de campo de clasificación de textura de suelo.

No. de Muestra	Punto X	Punto Y	Fecha	Textura	Comentario

(Elaboración propia).

Anexo 3. Determinación de la capacidad de infiltración del suelo

- Homogenización de áreas para el muestreo de infiltración

Para reducir el número de muestras necesarias para la determinación de la velocidad de infiltración en relación al número y localización de puntos de muestreo, se determinarán áreas que posean la clase textural del mismo tipo en base a resultados obtenidos del muestreo de suelos del área en estudio. Considerando los criterios expuestos por Matus Silva (2009) en cuanto a que existe una relación estrecha entre la textura del suelo y su respectiva velocidad de infiltración, para lo cual, se establecieron “áreas homogéneas” para realizar las pruebas de infiltración necesarias. (Manchame, 2011).

- Pruebas de infiltración

El método a utilizar es el propuesto por Porchet o también conocido por cilindro invertido, ya que es de fácil aplicación y perturba en

menor medida a la estructura del suelo. Consiste en excavar en el suelo un agujero y se llena de agua hasta a una altura (h) y se mide el cambio de tiempo (dt) con la ayuda de un metro y un cronometro que servirá para suponer la capacidad de infiltración del suelo a muestrear. La metodología para la determinación de la velocidad de infiltración del suelo se encuentra en el Anexo 4.

Se debe considerar la posibilidad de encontrar suelos a los que resulte imposible alcanzar su punto de saturación, por la cantidad de agua que sería necesaria en época seca. Por lo anterior, las pruebas de infiltración es recomendable de realizar durante la época lluviosa para permitir que el suelo alcance dicho punto de saturación.

Cabe mencionar que para el presente estudio no se realizaron las pruebas de infiltración debido a que no se dispone de tiempo y del recurso humano necesario para llevarlas a cabo. Además que es una investigación con elementos muy complejos para realizarla dentro de seis meses, por ello, se limitó a presentar las zonas potenciales de recarga hídrica (Manchame, 2011).

Anexo 4. Metodología para la determinación de la velocidad de infiltración del suelo a través del método de Porchet

El método consiste en excavar en el suelo un agujero cilíndrico de radio (R) que se llenará de agua hasta cierta altura (h), y por último se mide el cambio en el tiempo (dt) para determinar la capacidad de infiltración (f) como se puede observar en lo siguiente diagrama según (Manchame, 2011):

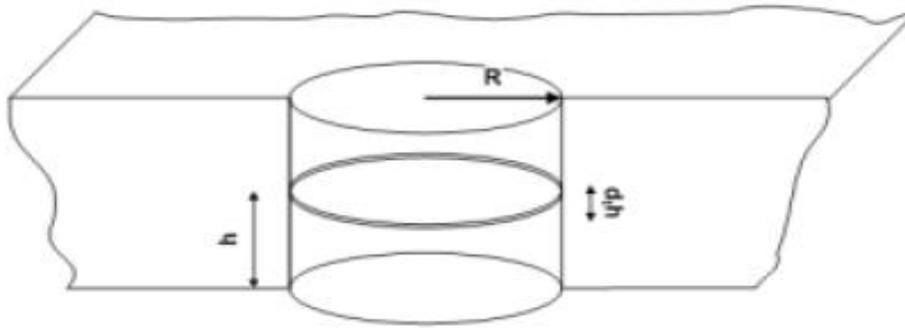


Figura 24. Diagrama para determinar la capacidad de infiltración del suelo por el método de Porchet.

Fuente: (Manchame, 2011).

La superficie por la cual se infiltra es:

$$S = \pi R (2h + R)$$

Para un tiempo, dt, suficientemente pequeño para que pueda suponerse constante la capacidad de infiltración, f, se verificara la igualdad:

$$\pi (2h + R) f = R^2 \left(\frac{dh}{dt} \right)$$

Separando variables tenemos la ecuación diferencial:

$$f dt = -R \left(\frac{dh}{(2h + R)} \right)$$

Al integrar resulta:

$$f = \left(\frac{R}{2(t_2 - t_1)} \right) * \ln \left(\frac{2h + R}{2h^2 + R} \right)$$

Por lo tanto, para determinar f, basta medir pares de valores (h₁, t₁), (h₂, t₂).

El procedimiento para realizar la prueba consiste en limpiar el área, con diámetro según el barreno mecánico por 15 cm de profundidad, para colocar una sonda graduada de referencia para la toma de profundidades. Seguidamente agregar agua en el hoyo hasta que se alcance el punto de saturación del suelo para obtener los datos (Manchame, 2011).

Anexo 5. Mapa de velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración deber ser calculada utilizando la ecuación de capacidad de infiltración dada por el método Porchet en cada punto de muestreo, que se presenta a continuación según (Manchame, 2011):

$$f = \frac{R}{2(t^2 - t^1)} \times \text{Ln} \frac{2 h^1 + R}{2 h^2 + R}$$

Dónde:

f: Velocidad de infiltración en cm/h

R: Radio del agujero en cm

T₁: Tiempo 1 en horas.

T₂: Tiempo 2 en horas.

H₁: Altura de la columna de agua en el tiempo 1.

H₂: Altura de la columna de agua en el tiempo 2.

Ln: Logaritmo natural.

El valor obtenido al aplicar la ecuación de infiltración fue aquel, para el cual, es poco cambiante en la toma de datos. El valor “f” aceptado fue el que no varió para dos lecturas y en tiempos consecutivos, luego de conseguir el punto de saturación (Manchame, 2011).

Al obtener los resultados para un punto de muestreo específico, se generalizó para el total del área que ocupa una clase textural. De acuerdo con Mathus (2009), los valores de velocidad de infiltración y áreas de influencia se clasificarán y ponderarán según la matriz presentada en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Matriz para la clasificación y ponderación de la velocidad de infiltración.

Infiltración Básica (cm/h)	Posibilidad de Recarga	Ponderación
>25	Muy alta	5
12.7 – 25.0	Alta	4
2.0 – 12.7	Moderada	3
0.13 - 2.0	Baja	2
< 0.13	Muy Baja	1

(Matus, 2009).

Como resultado se obtiene el mapa de velocidad de infiltración ponderados de acuerdo al Cuadro 6, el cual, proporcióno los valores requeridos para la ponderación del tipo de suelo (Manchame, 2011).

Al generar los mapas de textura de suelo y velocidad de infiltración se procede a realizar el mapa de tipo de suelo de la siguiente manera:

$$\text{Tipo de suelo: } \frac{\text{Valor ponderado Textura del suelos} + \text{Valor ponderado "Velocidad de infiltración"}}{2}$$

Con la aplicación de la formula anterior se obtiene el mapa de tipo de suelo y sus valores serán aplicados a la ecuación general para la determinación de zonas de recarga hídrica (Manchame, 2011).

Anexo 6. Resultados obtenidos de las muestras de suelo de la microcuenca del Río Negro.

Cuadro 10. Resultados de textura de suelo de la microcuenca del Río Negro

No. de muestra	%Arena	%Limo	% Arcilla	Textura de suelo
02	30.4	42.7	26.9	Franco
03	60.4	18.7	20.9	Franco-areno-arcilloso
04	47.1	32.0	20.9	Franco
05	56.4	23.1	11.9	Franco arenoso
06	49.1	24.7	26.2	Franco-areno-arcilloso
07	43.1	16.0	40.9	Arcillo-arenoso
11	52.4	18.7	28.9	Franco-areno-arcilloso
13	65.4	11.7	23.2	Arcillo arenoso
15	65.1	12.0	22.9	Franco-areno-arcilloso

(Elaboración propia).