

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Recarga hídrica en el valle de la ciudad de Guatemala a través
de pozos de absorción**

Trabajo de graduación presentado por Carlos Humberto Herrera
Figuroa para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Civil

Guatemala,

2021

Recarga hídrica en el valle de la ciudad de Guatemala a través
de pozos de absorción

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Recarga hídrica en el valle de la ciudad de Guatemala a través
de pozos de absorción**

Trabajo de graduación presentado por Carlos Humberto Herrera
Figuroa para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Civil

Guatemala,

2021

Vo.Bo.:



(f)

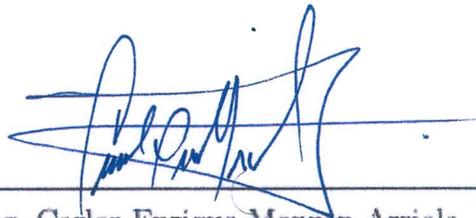
Ing. Otoniel Echeverría

Tribunal Examinador:



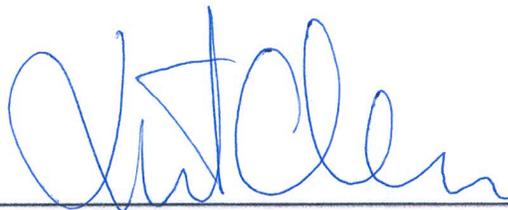
(f)

Ing. Otoniel Echeverría



(f)

Ing. Carlos Enrique Monzon Arriola



(f)

Ing. Roberto Godo Levensen

Fecha de aprobación: Guatemala, 23 de Noviembre de 2021.

La idea de generar un área de recarga hídrica por medio de pozos de infiltración en áreas de recuperación grandes en donde se pueda trabajar un proyecto de gran magnitud, surge a falta de la recarga de los de la ciudad de Guatemala en donde existe una sobre-explotación del mismo a través de pozos de extracción para los diferentes usos y necesidades de las personas, al no existir una ley de aguas como tal, el país y sus subsuelos se encuentran en riesgo debido a que cualquiera realiza la construcción de un pozo para la extracción del agua sin pagar daños o sin estar obligado a construir otro, pero de infiltración para asegurarse recargar el subsuelo.

Este proyecto puede generar impacto en los entes reguladores y encargados de la conservación del recurso hídrico, lo importante que es la recarga hídrica para la reutilización del agua y evitar problemas de escasez para asegurar que todos los habitantes puedan utilizar y tener agua que es de vital importancia para la humanidad.

Este es un acto que dedico principalmente a Dios, a mis padres, Ana Maria Figueroa y Carlos Humberto Herrera, por el apoyo incondicional en sus diferentes formas a continuar y cumplir mi sueño de ser profesional; a Pamela, que con su comprensión y apoyo fue un empuje para nunca dejarme caer. A los distintos catedráticos y compañeros de carrera que fue siempre un ambiente ameno y agradable para todos. A la Universidad del Valle de Guatemala que formó un criterio, conocimientos y habilidades para desenvolver como profesional y a lo largo de la vida como estudiante.

Lista de siglas y acrónimos

Acrónimo	Español	Inglés
CPRG	Constitución Política de la República de Guatemala	
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales	
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas	
INAB	Instituto Nacional de Bosques	
CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres	
MINEDUC	Ministerio de Educación	
DEM	Modelo de Elevación Digital	Digital Elevation Model
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación	
GPS	Sistema de Posicionamiento Global	Global Positioning System
MEM	Ministerio de Energía y Minas	
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.	
MSPAS	Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social	
MICIVI	Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda	
AMSA	Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán	
AMSCLAE	Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su Entorno	
AMASURLI	Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal, y Río Dulce	
PDF	Formato de Documento Portable	Portable Document Format
AMPI	Autoridad para el Manejo y Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Lago de Petén Itzá	
QGIS	Quantum GIS	Quantum GIS
EMPAGUA	Empresa Municipal de Agua	
SIG	Sistema de Información Geográfica	Geographic Information System

Prefacio	v
Lista de siglas y acrónimos	vii
Lista de figuras	xiv
Lista de cuadros	xv
Resumen	xvii
Abstract	xix
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Objeto de estudio	9
6. Marco teórico	11
6.1. Entrevista con autoridades de EMPAGUA	11
6.2. Agua	13
6.3. Usos del agua	13
6.3.1. Doméstico	13
6.3.2. Industrial	13
6.3.3. Agrícola	14
6.3.4. Público	14
6.4. Recarga hídrica	14
6.5. Conceptos de la hidrología	14

6.5.1. Escorrentía	14
6.5.2. Infiltración	15
6.5.3. Infiltración de las corrientes superficiales	15
6.5.4. Cuenca hidrográfica	15
6.5.5. Micro-cuenca hidrográfica	16
6.6. Recarga al acuífero	16
6.6.1. Recarga por infiltración de la lluvia	17
6.6.2. Recarga por infiltración de las corrientes	17
6.7. Acuífero	18
6.7.1. Tipos de acuíferos	19
6.8. El agua en Guatemala	20
6.8.1. Vertiente del Golfo de México	20
6.8.2. Vertiente del Pacífico	20
6.8.3. Vertiente del Caribe	20
6.8.4. El agua en la economía nacional	21
6.9. Ciclo hidrológico	22
6.9.1. Precipitación	23
6.10. Elementos de infiltración	23
6.10.1. Pozos	23
6.10.2. Pozos de infiltración	24
6.10.3. Infiltración	25
6.10.4. Capacidad de infiltración	25
6.10.5. Permeabilidad	26
6.10.6. Porosidad	26
6.11. Software GIS	27
6.11.1. QGIS	27
7. Marco legal	29
7.1. Legislación ambiental sobre el recurso hídrico	29
7.2. Instituciones a nivel local y nacional a cargo de la protección del ambiente acuático	30
8. Metodología	33
8.1. Medición permeabilidad	33
8.2. Medición de la capacidad de infiltración	35
8.2.1. Movimiento de las aguas subterráneas	35
8.2.2. Método del cilindro invertido (Porchet)	35
8.3. Topografía	37
8.4. Ordenamiento territorial	39
8.5. Delimitación de la cuenca hidrográfica	41
8.6. Área de recarga hídrica	45
9. Resultados	49
9.1. Cantidad de precipitación	49
9.2. Áreas y pozos propuestos	52
10. Análisis de resultados	57
11. Conclusiones	59

12.Recomendaciones	61
13.Bibliografía	63
14.Anexos	65

Figura	Página
1. Entrevista con personal de EMPAGUA	12
2. Carta de convocatoria de reunión para intercambio de información	12
3. Cuenca hidrográfica	15
4. Micro-cuenca hidrográfica	16
5. Acuíferos	18
6. Tipos de acuíferos	19
7. Cuencas y sub-cuencas en Guatemala	20
8. Precios del agua en América Latina	21
9. Ciclo hidrológico	22
10. Descripción de construcción de un pozo	24
11. Descripción de un pozo de infiltración	24
12. Descripción de la permeabilidad en un suelo	26
13. Programa de información geográfica	28
14. Coeficiente de permeabilidad	34
15. Santa Catarina Pinula	37
16. DEM Santa Catarina Pinula	38
17. Curvas de nivel cada 20 metros	38
18. Distribución de Santa Catarina Pinula	39
19. Síntesis de Santa Catarina Pinula	40
20. PlugIn de OPS de Santa Catarina Pinula	41
21. Cuencas en Santa Catarina Pinula	42
22. Cuencas, ríos y rutas en Santa Catarina Pinula	43
23. Salidas de cuencas de Santa Catarina Pinula	44
24. Salidas de dirección de drenaje de Santa Catarina Pinula	44
25. Área de recarga hídrica Santa Catarina Pinula	45
26. Área de recarga hídrica en QGis Santa Catarina Pinula	46
27. Área de recarga hídrica en Santa Catarina Pinula	47
28. Área de recarga hídrica en Santa Catarina Pinula	48

29. Precipitación anual en el Departamento de Guatemala	49
30. Tendencia número de días de lluvia en el Departamento de Guatemala	50
31. Número de días de lluvia en Guatemala	50
32. Número de días de lluvia en Guatemala	51
33. Promedio de mm pluviométricos en Guatemala	51
34. Áreas	52
35. Distribución de pozos propuestos en área	52
36. Distribución de pozos propuestos en área	53
37. Coeficiente de escorrentía	53
38. Cálculo de caudal	54
39. Cantidad de pozos	55
40. Cambio en el nivel del agua subterránea	65
41. Red de flujo en Santa Catarina Pinula	66
42. Perfil de distribución Santa Catarina Pinula	66
43. Control de pozos en Santa Catarina Pinula	67
44. Control de pozos en Santa Catarina Pinula	67
45. Utilización del agua en temporada de verano	67
46. Consumo del agua dependiendo el segmento	68
47. Cálculo realizados para el análisis	69
48. Cálculo realizados para el análisis	70
49. Cálculo realizados para el análisis	71
50. Cálculo realizados para el análisis	72
51. Métodos de calculo de tiempo de concentración	73

Lista de cuadros

Cuadro	Página
1. Promedios de porosidad, rendimiento específico y permeabilidad de varios materiales	27
2. Valores teóricos de la permeabilidad	34

A lo largo de los años conforme el desarrollo ha ido evolucionando se ha incrementado el uso de recursos, en este caso el agua en su gran mayoría. La empresa municipal de agua (EMPAGUA) en su base de datos hace constatar que ha incrementado el uso del recurso y se han visto en la obligación de buscar alternativas para la obtención del recurso.

En los años 60, al existir una baja demanda del recurso y una altura bastante cercana, los pozos de extracción de agua subterránea de construían a 450 pies de profundidad, según los datos obtenidos de EMPAGUA en la década de los 2000 la perforación ya alcanzaba los 1,700 pies de profundidad con un nivel freático de 900; En la actualidad el nivel freático sobrepasa los 1,000 pies de profundidad y esto continua si no se toman medidas al respecto.

Por lo expuesto con anterioridad, el presente estudio pretende aportar y recalcar la importancia del manto acuífero y poder utilizarla posteriormente.

La recarga hídrica de la ciudad de Guatemala se ha visto afectada por el desarrollo de la misma, esto nos muestra un indicador de explotación a la misma en la que implementando un sistema de identificación de zonas de recarga hídrica se pueda aprovechar el desperdicio y acumulación a través de un pozo de infiltración.

Al identificar zonas de recarga hídrica se pretende que puedan servir de apoyo para la construcción de pozos y con esto mejorar algunas problemáticas que se dan en la zona central de la ciudad de Guatemala. Algunos problemas que se generan en la zona central son la nula o muy poca recarga de zonas acuíferas, evitar las inundaciones o acumulación de agua especialmente en pasos a desnivel o zonas con pendiente pronunciada, y por ultimo evitar grandes acumulaciones de vehículos a causas de inundaciones.

El área trabajada para su análisis fue en el municipio de Santa Catarina Pinula, esta forma parte del valle de la ciudad de Guatemala como ejemplificación de la zona que fue analizada, en esta área se pudo contar con estudios de permeabilidad e infiltración de suelo y demás detalles que completan el análisis realizado.

Over the years, as development has evolved, the use of resources has increased, in this case the vast majority of water. The municipal water company (EMPAGUA) in its database confirms that the use of the resource has increased and they have been obliged to seek alternatives to obtain the resource.

In the 60s, as there was a low demand for the resource and a fairly close height, ground-water extraction wells were built at 450 feet depth, according to data obtained from EMPAGUA in the 2000s, drilling had already reached the 1,700 feet deep with a water table of 900; Currently the water table exceeds 1,000 feet in depth and this continues if no action is taken.

Due to the above, this study aims to contribute and emphasize the importance of the aquifer and to be able to use it later.

The water recharge of Guatemala City has been affected by its development, this shows us an indicator of exploitation in which by implementing an identification system of water recharge areas it is possible to take advantage of waste and accumulation to through an infiltration well.

By identifying water recharge areas, it is intended that they can serve as support for the construction of wells and thereby improve some problems that occur in the central area of Guatemala City. Some problems that are generated in the central area are the null or very little recharge of aquifer areas, avoiding floods or accumulation of water especially in overpasses or areas with steep slopes, and finally avoiding large accumulations of vehicles due to flooding.

The area worked for its analysis was in the municipality of Santa Catarina Pinula, this is part of the valley of Guatemala City as an example of the area that was analyzed, in this area it was possible to have studies of permeability and infiltration of soil and others. details that complete the analysis performed.

CAPÍTULO 1

Introducción

Durante mucho tiempo se pensó que el agua sería infinita y fácil de obtener de ríos, lagos y manantiales que existen, al descubrir nuevas formas de obtención al excavar y extraer el agua del subsuelo los cuerpos superficiales fueron olvidados y tomados como medida de conductores de desechos.

De los mayores problemas que existen en la ciudad de Guatemala y en el mundo es la falta de agua, esto se debe a que no existe ninguna ley de aguas que respalde y proteja la explotación del manto freático con la perforación de pozos ya sean privados, públicos o clandestinos. Es decir, la ley no obliga a ninguna empresa que realice un pozo a realizar otro pozo en alguna zona de acumulación de agua que su función sea un pozo de absorción o de recarga hídrica, es por ello que se deben buscar alternativas para abastecer la necesidad de este vital líquido para el ecosistema y la vida.

Al momento de la alteración de uno de los recursos naturales vitales como lo es el agua, el mismo afecta otras condiciones que dependen directamente como es el ciclo hidrológico, la calidad del agua y sostenimiento del caudal a lo largo de todo el año.

Debido a que en Guatemala la mayoría del agua consumida y obtenida por sus habitantes es obtenida de zonas superficiales se ha vuelto indispensable la construcción de pozos de extracción para continuar el abastecimiento, Guatemala es un país que no aprovecha el abundante recurso que posee.

Por lo que, la presente tesis tiene como objetivo principal proponer una alternativa de infiltración de agua a través de pozos de infiltración en el sistema de alcantarillado de la zona central para la contribución de la recarga del manto freático, con estos pozos se pretende aprovechar el recurso que el alcantarillado no es posible de conducir por saturación u otros problemas que se generan.

Según Funcagua que es un fondo de agua, desde el 2011 que comenzó en labores esta asociación que como propósito es contribuir con la disponibilidad del suministro del agua en el largo plazo para la región metropolitana de Guatemala, haciendo conciencia del uso responsable del mismo, realizando investigaciones y llevando a cabo acciones eficientes de conservación y de reducción de riesgos a través de alianzas público-privadas que garanticen la **sostenibilidad** (Funcagua, 2020).

La sobre-explotación de los desde los años 80's han tenido un cambio significativo en los niveles de con aproximadamente 100 metros de diferencia según datos obtenidos de Funcagua, debido a eso se han realizado estudios, congresos de como buscar alternativas para la reutilización del agua. Estos cambios han provocado una reducción considerable en la disponibilidad y calidad del agua con sus características adecuadas para el consumo y uso humano, forzando al humano a sobre-explotar el recurso hídrico de una manera acelerada e insostenible que provoca un des-balance en las entradas y salidas del sistema de la cuenca.

Con la impermeabilización de los suelos en las áreas urbanas, especialmente en el departamento de Guatemala, donde el crecimiento de vivienda y de construcción avanza a pasos agigantados provoca que las tierras con uso de vegetación natural tengan un cambio a uso de suelos para proyectos de urbanización, conlleva a que hayan cambios en la recarga hídrica de los acuíferos y se genere un des-balance del cual fue ya antes mencionado.

Según EMPAGUA las perforaciones para el uso de pozos incrementa con el paso de los años, esto debido a que la recarga hídrica ha disminuido ya que la extracción de agua se mantiene incrementando con el paso de los años, el no tener una ley de aguas vigente que regule la extracción del recurso complica aún más la situación. Por lo anterior ya expuesto, es importante la recarga de los acuíferos para almacenar agua y poder usarla posteriormente (EMPAGUA2018).

Las aguas subterráneas están sujetas a una serie de riesgos relacionadas con su cantidad que es reducción de caudal y su calidad que incluye factores de contaminación. En cuanto a cantidad esta claro que toda extracción sin recarga va a disminuir las cantidades. Se habla de minería del agua cuando la extracción es superior a la recarga.

La importancia de las aguas subterráneas o zonas de recarga hídrica es que son fuentes principales para la obtención de agua dulce y de consumo humano, esta juega un papel importante dentro del ciclo del agua. Al realizar la identificación, protección de las zonas de recarga se garantiza la conservación de todo ser vivo y de desarrollo para la humanidad.

Según el FODECYT en Guatemala se han realizado distintos estudios en relación con las zonas de recarga hídrica, entre los estudios a nivel nacional se puede mencionar el mapa “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, el problema de dicho mapa es la antigüedad del mismo ya que fue realizado aproximadamente 16 años atrás (FODECYT 2010).

4.1. Objetivo general

Diseñar una propuesta de sistema de infiltración de agua de lluvia a través de pozos de infiltración en un área específica ubicada en Santa Catarina Pinula para la recarga hídrica del acuífero.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis hidrológico de la cuenca que encierra el municipio de Santa Catarina Pinula.
- Definir el área de trabajo para la ubicación del sistema de infiltración propuesto.
- Diseñar el sistema de pozos de acuerdo a las características hidrológicas y el área definida.

CAPÍTULO 5

Objeto de estudio

Polígono de conservación y Recarga hídrica, se encuentra ubicado en el departamento de Guatemala, en el municipio de Santa Catarina Pinula, las áreas de forestación del parque se propondrá una serie de pozos de infiltración para la recarga hídrica del subsuelo del área.

6.1. Entrevista con autoridades de EMPAGUA

La entrevista se llevó a cabo bajo una carta de solicitud de información dirigida a la gerente de la empresa municipal de agua (EMPAGUA) la licenciada Crista Fonca. Esto con el fin de tener un registro de la información que se esta solicitando y como manejar el grado de confidencialidad que EMPAGUA maneja con ese tipo de información.

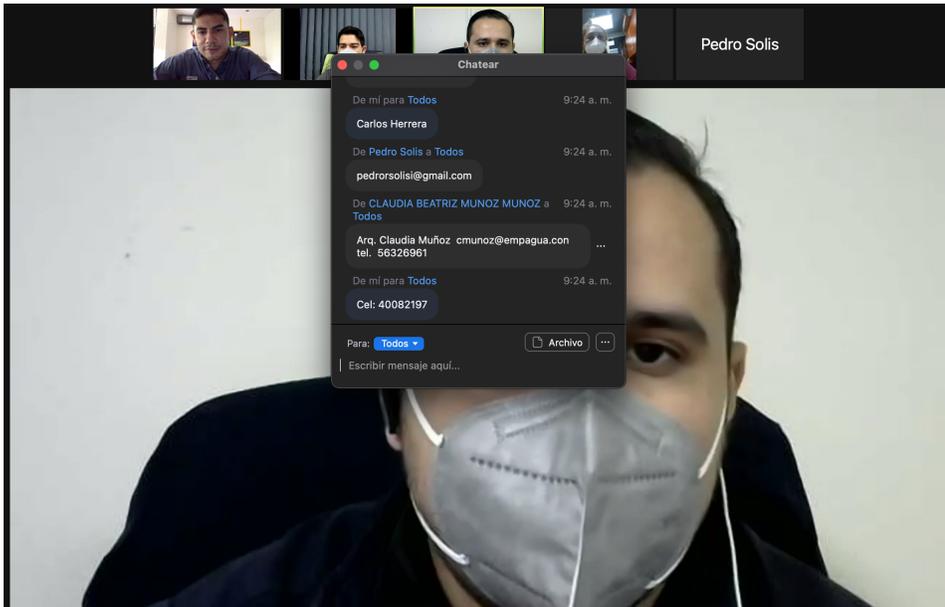
La entrevista fue pactada para el 30 de julio del año 2021 con la sub-gerencia técnica encargada del Ing. Julio Escoto, el me introdujo con las personas encargadas de las áreas de niveles de acuífero del valle de la ciudad de Guatemala que es el Lic. Pedro Solis y para los aspectos de proyectos de recarga hídrica la Arq. Claudia Muñoz.

En dicha entrevista se me solicito que se tuviera la mayor discreción posible para la publicación de la información obtenida en dicha entrevista, además de las personas encargadas de los temas estuvieron presentes los Ing. Carlos Monterroso y el Ing. Luis de León.

A lo largo de la entrevista se platicaron los temas de ya antes mencionados y justamente se encontró la primera interrogante que fue cambiarle el nombre de la tesis, puesto que el nombre original utilizaba pozos de absorción, pero estos se utilizan mas para filtración de aguas negras y no es ese el caso, por lo que se adopto pozos de infiltración para recarga hídrica.

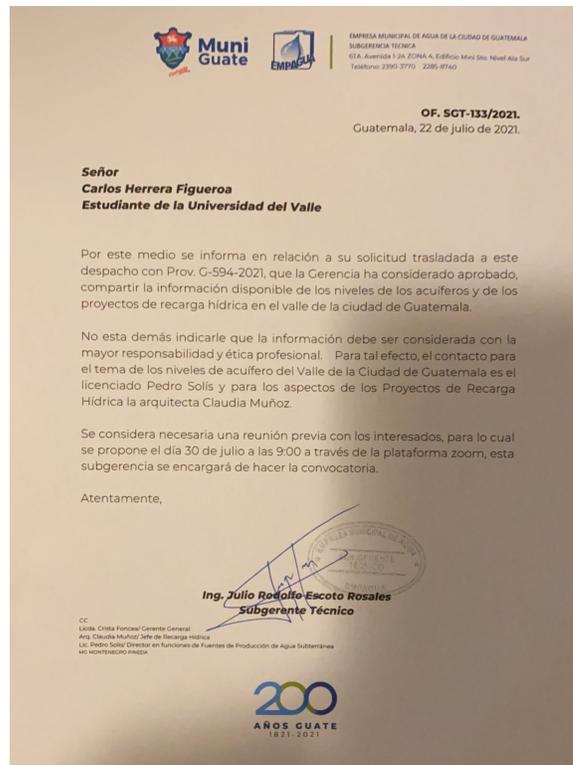
Se utilizarán los datos obtenidos en dicha reunión para el análisis posterior y cumplir los objetivos generales y específicos.

Figura 1: Entrevista con personal de EMPAGUA



Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Figura 2: Carta de convocatoria de reunión para intercambio de información



Fuente: (Elaboración propia, 2021).

6.2. Agua

Según el ICLE el agua está definida como “Cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, líquido incoloro, insípido, en pequeña cantidad, incoloro y verdoso en grandes masas que refracta la luz, disuelve muchas sustancias, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y es más o menos puro. Forma la lluvia, las fuentes y los mares” (ICLE, 2019)

Guatemala puede ser destacada como una zona privilegiada por la abundancia del recurso como lo es el agua, a través de este recurso se consigue la producción de energía eléctrica que es suficiente para abastecer a todo el país si no que alcanza para vender la misma a países cercanos como lo son México y algunos otros de centro América. Sin embargo la abundancia del agua ha sido mala para Guatemala, esto ha provocado el desinterés de la población en cuidarla y preservarla para futuras generaciones y para un recurso limpio sin tantos procesos, en la actualidad es un tema en la cual diferentes sectores han hecho presión para que se apruebe una ley que regule el uso del recurso.

6.3. Usos del agua

6.3.1. Doméstico

El consumo doméstico varía según los hábitos higiénicos de la población, nivel de vida, grado de desarrollo, abundancia y calidad de agua disponible, condiciones climáticas, usos y costumbres, etc. La mayor parte del agua superficial esta contaminada y generalmente esta no es usada para el suministro de agua, esto aplica para lugares en donde no existen montañas o volcanes cercanos que produzcan agua en las alturas en la cual este tipo de agua no esta contaminada y se utiliza para suministro con muy poco tratamiento o ninguno.

Sin embargo, en nuestro país se estima que el consumo de agua para uso doméstico anda entre 75 y 100 lts/hab.día, la cantidad básica para el consumo doméstico, que incluye necesidades fisiológicas, usos culinarios, lavado de ropa y utensilios, sistemas de calefacción y acondicionamiento de aire, riego de plantas y jardines privados, aseo de la vivienda, etc. Para las áreas urbanas, el agua subterránea proporciona la mayor parte del suministro para uso doméstico, el agua subterránea proviene de pozos profundos en la cual es considerada fresca y de poco tratamiento, sin embargo, muchos de los acuíferos poco profundos se encuentran contaminados por los desechos subterráneos que contaminan el agua que se encuentra en buenas condiciones y no necesita de gran tratamiento para ser usada.

6.3.2. Industrial

Depende del grado de industrialización y del tipo de industrias, grandes o pequeñas. Las zonas industriales en muchos casos conducen a un desarrollo urbanístico que trae como consecuencia un aumento en el consumo del agua. En el consumo industrial del agua, influye la cantidad disponible, precio y calidad.

6.3.3. Agrícola

Mientras que un mismo litro de agua puede usarse y reutilizarse para lavar platos, ducharse, generar electricidad, este mismo puede utilizarse una única vez para el riego. El riego reproduce artificialmente estos procesos ya que los cultivos bien regados y expuestos a climas secos y cálidos tienen una elevada "evapotranspiración" (evaporación del suelo y transpiración de las plantas).

Por ello, se dice que el riego consume mucha agua. En general, los cultivos necesitan evapotranspirar una cantidad de agua determinada para producir una determinada cantidad de alimento. Por ello, al hablar de la cantidad de agua que consume la agricultura de riego, en realidad se está hablando de la cantidad de alimento que produce. En consecuencia, si se disminuye la cantidad de agua que se consume en el riego, se disminuirá la cantidad de alimento producido en el mismo.

6.3.4. Público

Este consumo se refiere al de los edificios e instalaciones públicas tales como: escuelas, mercados, hospitales, rastros, cuarteles, riego de calles, parques, jardines, servicio contra incendios, lavado de redes de alcantarillado. Este consumo es variable, pero en nuestro país puede estimarse entre el 20 y 30 del consumo doméstico.

6.4. Recarga hídrica

Es un proceso natural que involucra el incremento del agua hasta la zona de saturación, es decir donde se encuentra el nivel de las aguas subterráneas. Se realiza de dos maneras, la que se conoce como recarga artificial que es agua adicionada a través de pozos, y la recarga natural que es el agua absorbida naturalmente por el suelo.

Los principales procesos de transferencia del ciclo hidrológico de una cuenca son: Precipitación pluvial, infiltración, evapotranspiración y escorrentía superficial. Estos son los elementos importantes en la estimación del balance hídrico de toda una cuenca (Herrera, 2001).

6.5. Conceptos de la hidrología

6.5.1. Escorrentía

"La escorrentía es uno de los procesos básicos propios del ciclo del agua. Hace referencia al flujo de agua procedente de las lluvias o deshielo de nieve que circula sobre la superficie del suelo una vez supera su capacidad de evaporización y de infiltración de la misma."(AQUAE, 2021)

6.5.2. Infiltración

"La infiltración se produce en el terreno por la acción conjunta de dos fuerzas, a saber la gravedad y la atracción molecular, las que pueden actuar en un mismo sentido o bien en forma opuesta, según las circunstancias. La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de las napas subterráneas, se ve influenciada por dos condiciones; las precipitaciones y las condiciones del terreno."(GWP, 2011).

6.5.3. Infiltración de las corrientes superficiales

"Las corrientes se clasifican en general en dos categorías: corrientes influentes y corrientes efluentes. En las corrientes influentes, el nivel de las aguas superficiales está por encima de la superficie freática libre y el agua pasa desde la corrientes superficial a la zona de saturación.

La corriente efluente es la que su nivel está por debajo del nivel freático y, por tanto, recibe aportaciones de agua subterránea de los mantos de las laderas. (GWP, 2011).

6.5.4. Cuenca hidrográfica

Es el área natural que posee límites físicos que son definidos por la división superficial de las aguas, llamado "parte-aguas"; debido a la constancia de precipitaciones y flujos superficiales, esto 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.

Figura 3: Cuenca hidrográfica



Fuente: (World Vision, 2011).

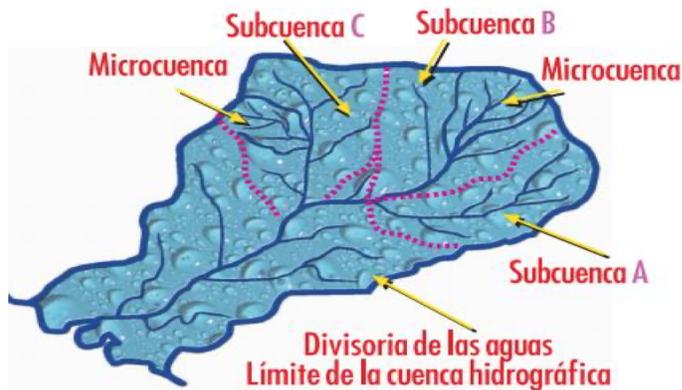
6.5.5. Micro-cuenca hidrográfica

"La micro-cuenca se define como una pequeña unidad geográfica donde vive una cantidad de familias que utiliza y maneja los recursos disponibles, principalmente suelo, agua y vegetación"(FAO, 2008).

La micro-cuenca posee un área que puede ser planificada mediante la utilización de recursos locales y un número de familias que puede ser tratado como un núcleo social que comparte intereses comunes (agua, servicios básicos, Infraestructura, organización, entre otros.).

La red hídrica es fundamental para delimitar espacios en los que se puede dividir una cuenca, ya que al curso principal donde llega un afluente secundario se le llama sub-cuenca, y a este último al recibir un afluente terciario se conoce como micro-cuenca.

Figura 4: Micro-cuenca hidrográfica



Fuente: (World Vision, 2011).

6.6. Recarga al acuífero

El agua subterránea tiene como origen las infiltraciones de las aguas superficiales que provienen directamente de la lluvia, corrientes superficiales y lagos, todas estas alimentadas por el agua de lluvia.

Los datos anteriores se demuestran directamente con análisis realizados en donde señala que la penetración de la lluvia a través de los estratos, las pérdidas de corrientes por la infiltración, los niveles y pendientes del nivel freático (Herrera, 2001).

6.6.1. Recarga por infiltración de la lluvia

Las recargas de agua en la zona de saturación provenientes de fuentes superficiales, comprenden tres pasos:

- El movimiento descendente del agua a través de los materiales comprendidos en la zona de aireación.
- Infiltración del agua desde la superficie a la zona de suelos.
- El movimiento de parte del agua al manto freático, aumentando así las reservas subterráneas.

La infiltración es producida debido a la acción natural de las fuerzas de gravedad y atracción molecular, esta se expresa como un gradiente de potencia en los lugares donde la humedad del suelo no se encuentra en equilibrio. Al momento que la zona del suelo recibe agua en toda su capacidad, el restante es decir lo adicional desciende por gravedad, esta agua puede tomarse mucho tiempo en llegar al punto que se quiere, pero si se mantiene en una infiltración constante la recarga no deja de actuar. Estas pueden descender a un punto intermedio o directamente hacia el manto freático, en la zona intermedia no es afectada directamente por la evaporación o absorción como fuente de alimento en las raíces de las plantas y arboles.

6.6.2. Recarga por infiltración de las corrientes

En general las corrientes se pueden clasificar de distintas maneras, en incurrentes o influentes y excurrentes o efluentes, influentes si aportan agua al acuífero, si escurren encima del nivel freático aumentando su caudal de agua y excurrentes si escurren en un nivel inferior que el nivel freático, en cuyo caso el acuífero aporta agua a la corriente.

La recarga se debe a la penetración en el sub-suelo, esto depende directamente del coeficiente de infiltración de cada tipo de suelo, en algunos suelos la infiltración es mas rápida y en otros como el suelo rocoso tiende a ser mas lenta, sin embargo si la cantidad de lluvia es mayor al coeficiente de infiltración del sub-suelo, el agua tiende a generar escorrentías superficiales, las condiciones que influyen en la recarga del agua subterránea son las siguientes:

- La precipitación pluvial: La proporción de agua infiltrada aumenta cuando la precipitación ocurre de manera ligera y escasa, esto se debe a que el sub-suelo es capaz de absorber. Las lluvias que caen una vez satisfechas las deficiencias del suelo son las que enriquecen las reservas subterráneas. Por otro lado si las lluvias caen con una intensidad alta pero en corta duración, el sub-suelo solo es capaz de absorber una pequeña parte del agua, la otra gran parte se vuelve una escorrentía superficial como ya se le conoce, el problema esta en que solo una pequeña parte podrá alcanzar el nivel freático.

- Las facilidades de permeabilidad:La más importante es la permeabilidad del terreno. Formaciones tales como calizas cavernosas, rocas fracturadas, grava o arena de grano grueso, permiten en gran parte que las lluvias alcancen el nivel freático, en cambio un suelo arcilloso solo permite el paso del agua a poca profundidad, esto debido a no drenas ni se desecan fácilmente, volviéndose un material de barro cuando se encuentra saturado de agua.

Las características en la infiltración del agua desde la superficie son en parte por la formación subyacente de la cual se deriva el suelo, es decir origen y placas tectónicas, y por otra parte el desarrollo del mismo suelo, la vegetación, y la topografía del lugar que tiene una gran influencia en la infiltración. Los terrenos con grandes planicies tienden a tener una mayor infiltración y por otro lado un terreno inclinado es menor la infiltración.

Las cantidades de recarga de un acuífero dependen directamente de la entrada del mismo, en este caso si la recarga es artificial es decir a través de pozos su recarga es regularmente constante, puesto que se tienen cierta cantidad de metros cúbicos que se pueden infiltrar con la ayuda de los pozos. Por otra parte, la infiltración es mayor cuando en el área de entrada ocurren no solo la precipitación local, sino el escurrimiento superficial de alguna área tributaria, como sucede en pendientes aluviales que reciben aguas superficiales provenientes de áreas montañosas con fuerte precipitación (Herrera, 2002).

6.7. Acuífero

“Es una unidad geológica saturada capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, los que a su vez sirven de fuentes de abastecimiento de líquido. Para que un acuífero sea funcional, sus poros o intersticios deben de estar llenos de agua y ser lo suficientemente grandes como para que permitan que el agua se desplace hacia los pozos y manantiales con un caudal apreciable” (Herrera, 2002).

Figura 5: Acuíferos

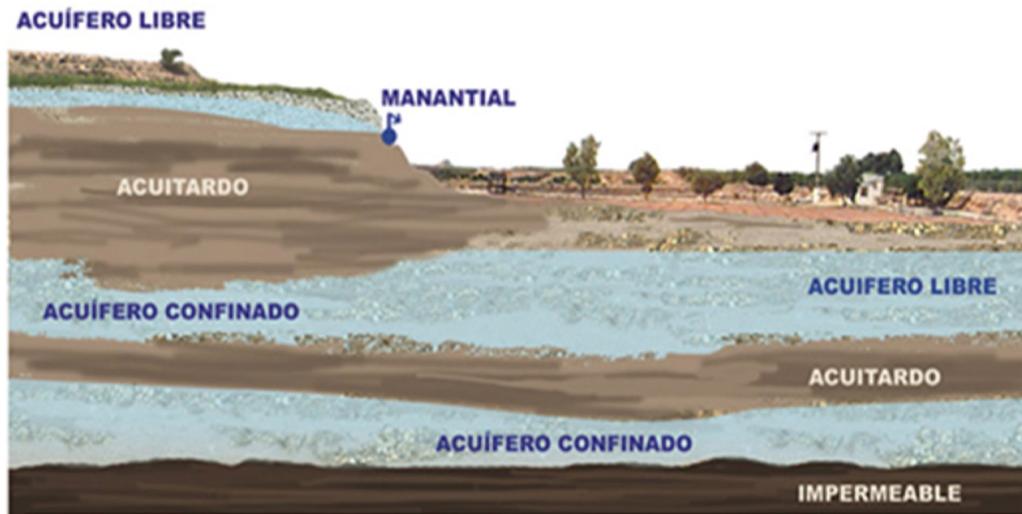


Fuente: (GWP, 2011).

6.7.1. Tipos de acuíferos

- Acuíferos libres: Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros (GWP, 2011).
- Acuífero semi-libre: Se puede considerar un cuando la conductividad hidráulica de la capa del material granular fino en un acuífero semiconfinado es tan grande que la componente horizontal del flujo no puede despreciarse, entonces el acuífero se encuentra entre los semi-libres y los semi-confinados (Taracena, 1999).
- Acuíferos confinados: Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos (GWP, 2011).
- Acuíferos semi-confinados: Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua (GWP, 2011).

Figura 6: Tipos de acuíferos



Fuente: (GWP, 2011).

6.8. El agua en Guatemala

6.8.1. Vertiente del Golfo de México

Los ríos que desembocan en el golfo de México son los de grandes longitudes y mas caudalosos en Guatemala, algunos ejemplos son el Usumacinta, La Pasión, y el Chixoy. Las pendientes en la vertiente son suaves y mantiene una precipitación media de 2,500 milímetros anuales.

6.8.2. Vertiente del Pacífico

La mayoría de afluentes se originan a una altura media de 3,000 metros sobre el nivel del mar. Las pendientes son pronunciadas en algunas partes de la cuenca, entre el 10 y 20 por ciento y cambiando bruscamente a pendientes mínimas creando zonas susceptibles de inundación. La precipitación de la vertiente tiene periodos de gran intensidad, con una precipitación anual de 2200 milímetros anuales.

6.8.3. Vertiente del Caribe

La vertiente del Caribe incluye ríos de grandes longitudes, incluyendo el río más grande del país, el río Motagua con 486.55 kilómetros de longitud. Las pendientes son más suaves y menos brusco. Las crecidas de los ríos son mayores, ya que los caudales son constantes durante todo el año, partes de esta vertiente son de baja pluviosidad , 500 milímetros anuales, mientras que en Izabal esta pluviosidad puede alcanzar los 3500 milímetros anuales.

Figura 7: Cuencas y sub-cuencas en Guatemala



Fuente: (Funcagua, 2020).

6.8.4. El agua en la economía nacional

Se calcula que tres de cada cuatro empleos en el mundo dependen en mayor o menor medida del agua. La escasez de agua potable y los problemas de acceso a ella y al saneamiento pueden por lo tanto limitar el crecimiento económico y la creación de empleo en los próximos decenios, según un informe de las Naciones Unidas. Al existir una demanda creciente del agua dulce que aumenta cada vez mas debido al cambio climático, desde los años 80 ha venido en aumento la extracción de aguas subterráneas en uno por ciento anual desde la fecha, y este índice es consecuente de la creciente en la población mundial. Se estima que entre los años 2011 y 2050 la población tendrá un crecimiento de un 33 por ciento pasando de 7,000 millones de personas a 9,000.

La escasez ya pronunciada o anticipada ha hecho necesario explotar fuentes de agua no convencionales como lo son: aguas residuales tratadas para su reutilización, captación de agua de lluvia, o agua de la escorrentía natural de las áreas urbanas. Provocando varios proyectos de reutilización del agua sin pensar en la recarga de los subsuelos en países de tercer mundo donde no existe una ley que regule la extracción de la misma. Al generar este tipo de proyectos podría generar nuevos empleos relacionados con la investigación y el desarrollo tecnológico.

Según algunos datos de EMPAGUA en enero de 2020 los hogares de la ciudad de Guatemala consumían 28 metros cúbicos de agua mensual, estos es únicamente con lo que se tiene registrado sin contar las conexiones ilegales e ilícitas que existen y los asentamientos que consumen de manera indefinida con una tarifa única de servicio.

Figura 8: Precios del agua en América Latina



Fuente: www.eltiempo.com datos del 2014.

Fuente: (EMPAGUA, 2020).

6.9. Ciclo hidrológico

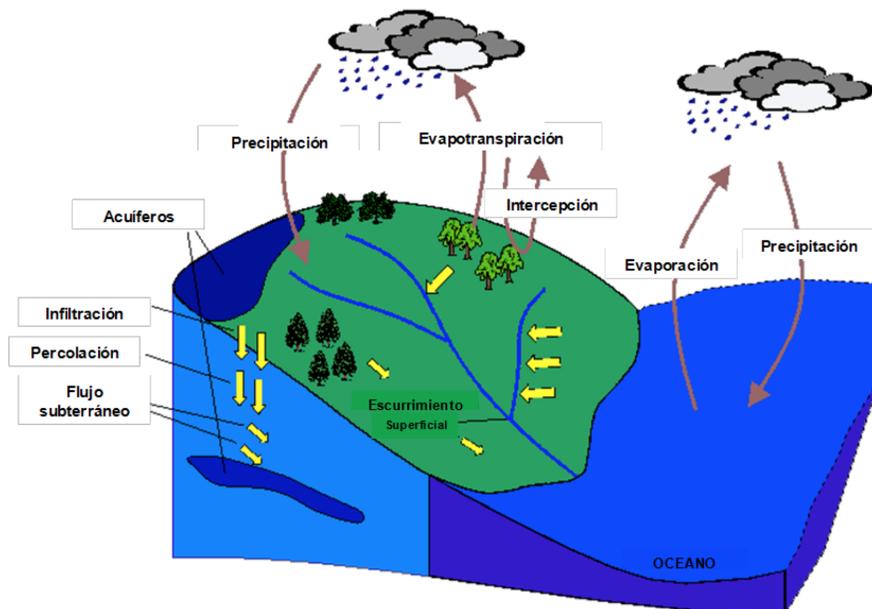
El ciclo hidrológico es un proceso de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra. La evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales a la condensación de la misma en las nubes, luego la precipitación del agua a través de las nubes, para luego la acumulación en el suelo o masas de agua, y como último paso la re-evaporación (GWP, 2011).

Este es un proceso de transporte de agua de manera circulatoria e indefinido o permanente, el proceso permanente del agua de deriva de dos cosas:

- El Sol que es el causante de la energía transmitida para la elevación del agua más conocido como evaporación.
- La gravedad terrestre que produce que el agua condensada en las nubes caiga más conocido como precipitación y una segunda etapa que es el escurrimiento.

(GWP, 2011).

Figura 9: Ciclo hidrológico



Fuente: (GWP, 2011).

6.9.1. Precipitación

Precipitación pluvial

La precipitación pluvial es la cantidad de agua caída en una zona determinada, esta se puede medir a través de un pluviómetro, el instrumento más utilizado para la medición de las precipitaciones que está en litros o mm/m². Los aspectos importantes durante la precipitación que son de interés para la recarga hídrica son la duración, intensidad y frecuencia (Custodio, 2001).

Existen factores que determinan el desigual reparto de las precipitaciones que son desde el ámbito general hasta lo regional por ejemplo:

- Los factores de alcance general son los responsables de que en los climas ecuatoriales las lluvias sean fundamentalmente de convección, y en las zonas tropicales las estaciones lluviosas coincidan con los solsticios.
- Los factores regionales o locales que determinan aspectos como la humedad de las zonas costeras y la mayor frecuencia de lluvia en las zonas montañosas, en especial en la vertiente orientada hacia el mar.

(Custodio, 2001).

Precipitación efectiva

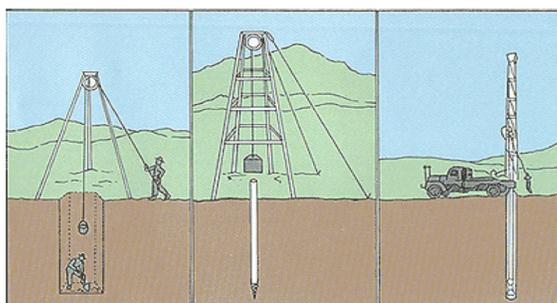
La precipitación efectiva es la porción de lluvia que puede infiltrarse en el subsuelo y estar disponible para raíces de la vegetación o bien infiltrarse a la zona intermedia o manto freático, este tipo de precipitación es la que sirve como indicativo de medición para estimar el balance hídrico (Custodio, 2001).

6.10. Elementos de infiltración

6.10.1. Pozos

Un pozo es un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar lo que se busca, sea una reserva de agua subterránea del nivel freático o fluidos como el petróleo, actualmente se le han dado nuevos usos a los pozos para infiltrar agua en lugar de extraer. Generalmente de forma cilíndrica, se suele tomar la precaución de asegurar sus paredes con ladrillo, piedra, cemento o madera, para evitar su deterioro y derrumbe (GWP, 2011).

Figura 10: Descripción de construcción de un pozo



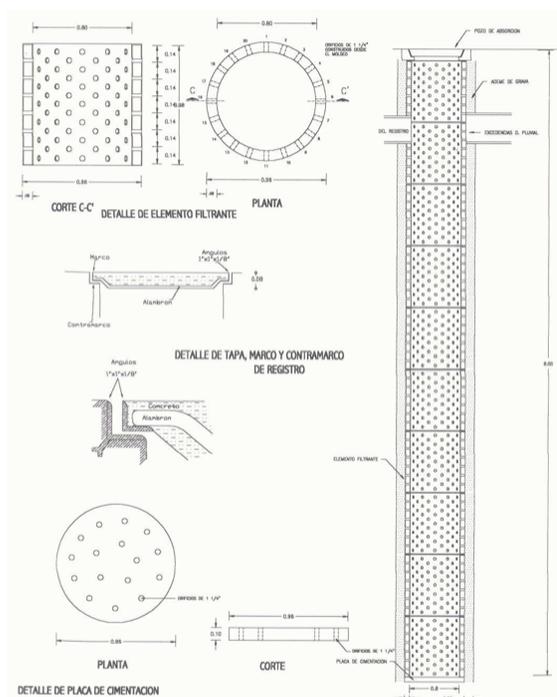
Fuente: (GWP, 2011).

6.10.2. Pozos de infiltración

Los pozos de infiltración consisten en excavaciones cilíndricas o rectangulares de profundidad variable y permiten filtrar el agua de lluvia directamente al suelo en espacios reducidos, reduciendo el caudal máximo, disminuyendo el volumen escurrido y recargando la napa de agua subterránea (ChileCubica, 2017).

Figura 11: Descripción de un pozo de infiltración

CROQUIS No. 3 POZO DE ABSORCION PREFABRICADO CON TUBERIA PERFORADA. PATENTE (163291).



Fuente: (SIAPA, 2014).

6.10.3. Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el subsuelo. La percolación es el movimiento del agua a través después de la entrada. Existen ciertos factores que influyen en la tasa de infiltración como lo son:

- La condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal.
- Las propiedades del suelo, tales como la porosidad.
- La conductividad hidráulica.
- El contenido de humedad presente en el suelo.
- La duración de la lluvia.
- El patrón de drenaje de la cuenca.

(SIAPA, 2014).

Las pendientes de la superficie forman parte de un factor fundamental, puesto que si son muy inclinadas favorecen a la escorrentía superficial, y si son menos pronunciadas retienen de mejor manera y por mayor cantidad de tiempo el agua, favoreciendo a la infiltración.

Las pendientes moderadas ofrecen mejores condiciones para la infiltración que un terreno totalmente plano, ya que los terrenos totalmente planos suelen generar suelo herméticos y la textura del suelo juega otro papel importante en la infiltración, puesto que es influida y depende en gran manera de la pendiente del terreno (SIAPA, 2014).

6.10.4. Capacidad de infiltración

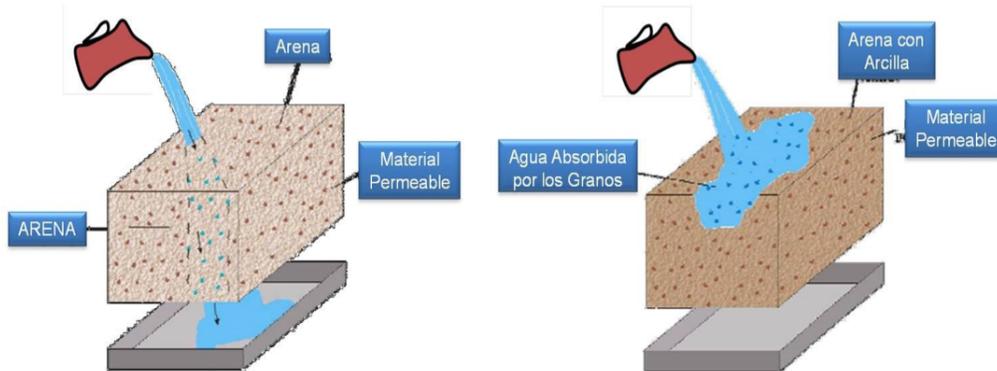
La cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones se le denomina capacidad de infiltración y es el proceso por el cual el agua penetra en los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático. El agua primero satisface la deficiencia de humedad del suelo y, después, cualquier exceso pasa a formar parte del agua subterránea (SIAPA, 2014).

Esta capacidad es expresada en litros por segundo por metro cuadrado de superficie permeable generalmente (lps/m²).

6.10.5. Permeabilidad

La permeabilidad se denomina a la propiedad de una formación acuífera en lo referente a la función transmisora o de conducto. Esta se define como la capacidad de un suelo o medio poroso de transmitir el agua (SIAPA, 2014).

Figura 12: Descripción de la permeabilidad en un suelo



Fuente: (GWP, 2011).

6.10.6. Porosidad

La porosidad de un acuífero es la parte del volumen que consiste en aberturas o poros, osea la proporción de su volumen no ocupado por material sólido. La porosidad es un indicativo para saber la cantidad de agua que puede ser almacenada en un material saturado.

La porosidad se expresa generalmente como un porcentaje del volumen bruto del material. Aunque la porosidad representa la cantidad de agua que un acuífero puede almacenar, no nos indica cuanta de aquella puede ceder (SIAPA, 2014).

Cuando un material saturado drena el agua que esta almacenando mediante la gravedad, únicamente cede una parte del volumen total almacenado en el. Aquella parte del agua que no se puede remover por drenaje superficial, es retenida, contra la fuerza de gravedad, por capilaridad y atracción molecular.

La cantidad de agua que un volumen unitario del material deja escapar cuando se drena por gravedad se denomina rendimiento específico, y la cantidad de agua que un volumen unitario retiene cuando se somete a gravedad se denomina retención específica. El rendimiento específico más la retención específica es igual a la porosidad.

Cuadro 1: Promedios de porosidad, rendimiento específico y permeabilidad de varios materiales

Material	Permeabilidad				
	Porosidad	Rendimiento específico	Permeabilidad intrínseca (Darcys)	Unidades Meinzer	$m^3/Dia /m^2$
Arcilla	45	3	0.0005	0.01	0.0004
Arena	35	25	50.00	1,000.00	41.00
Grava	25	22	5,000.00	100,000.00	4,100.00
Grava y Arena	20	16	500.00	10,000.00	410.00
Arenisca	15	8	5.00	100.00	4.10
Calizas Densas	5	2	0.05	1.00	0.041
Cuarzo y Granito	1	0.5	0.0005	0.01	0.0004

Fuente: (SIAPA, 2014).

Un Darcy = $0.987 \times 10^{-8} cm^2$
 Un Meinzer = $0.0408 m^3/dm^2$ con gradiente unitario

6.11. Software GIS

6.11.1. QGis

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License . QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos (QGis, 2021).

Con este programa se analiza un modelo de elevación digital que se vuelven curvas de nivel para la obtención de una perspectiva real del comportamiento del terreno. Se utiliza dicho programa debido a que es de código abierto y de licencia gratuita para el público en general, esto permite el desarrollo de cualquier persona en su uso general.

Figura 13: Programa de información geográfica



Fuente: (QGis, 2021).

7.1. Legislación ambiental sobre el recurso hídrico

Por legislación ambiental se entiende un conjunto de normas jurídicas, tratados, convenios, estatutos, reglamentos, y el derecho común que, de manera muy amplia, funcionan para regular la interacción de la humanidad y el resto de los componentes biofísicos o el medio ambiente natural, con el fin de reducir los impactos de la actividad humana, tanto en el medio natural, así como en la humanidad misma (MARN, 2008).

La legislación ambiental se compone por:

- Leyes generales
- Leyes específicas
- Acuerdos gubernativos
- Acuerdos ministeriales
- Normas técnicas
- Reglamentos y ordenanzas municipales

Estos instrumentos regulan uno o varios aspectos del medio ambiente y aseguran el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

El tema del agua en Guatemala es un tema muy compuesto, esto se debe a que no existe una ley de aguas por la que se rijan los parámetros de utilización y tratamiento del mismo, en la actualidad existen mas de 46 propuestas de ley de aguas en el organismo legislativo que es el encargado de dictar las leyes, reformarlas, derogarlas y darles interpretación auténtica, para el bien común de la población. Por lo que se pueden mencionar algunas que son las comúnmente utilizadas como:

- **La Constitución Política de la República de Guatemala en su Artículo 127:** establece que “Todas las aguas son bienes de dominio público, inalienables (intransferibles) e imprescriptibles (no se pueden vender). Su aprovechamiento, uso y goce se otorgan en la forma establecida por la ley, de acuerdo con el interés social. Una ley específica regulará esta materia” (MARN, 2008).
- **El Decreto 74-96 del Congreso de la República de Guatemala:** Ley de Fomento de la Educación Ambiental.
- **Ley de Áreas Protegidas, Decreto 4-89 del Congreso de la República de Guatemala:** cuya aplicación corresponde al Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), incorpora genéricamente las aguas como parte de procesos ecológicos esenciales y sistemas naturales vitales.
- **El Decreto 68-86 del Congreso de la República de Guatemala:** Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, cuya aplicación corresponde al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la cual está sustentada en el Artículo 97 de la Constitución Política de la República, el cual trata sobre el medio ambiente y el equilibrio ecológico, por lo que emitirá las disposiciones que sean necesarias y los reglamentos correspondientes
- **Acuerdo Gubernativo 236-2006:** El Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, tiene como objetivo proteger los cuerpos de agua de los impactos provenientes de la actividad humana; recuperar los que están en proceso de deterioro; y promover el desarrollo del recurso agua, con visión de gestión integrada. Este se complementa con el Manual General del reglamento de las descargas y recursos de aguas residuales y de la disposición de lodos, Acuerdo Ministerial 105-2008 el cual sirve para interpretar los aspectos técnicos y legales que se encuentran regulados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.
- **Acuerdo Gubernativo 12-2011:** El Reglamento de las Descargas de Aguas Residuales en la Cuenca del Lago de Atitlán, tiene como objetivo fijar parámetros y reducción progresiva de los límites máximos permisibles de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores en la cuenca del lago de Atitlán (MARN, 2008).

7.2. Instituciones a nivel local y nacional a cargo de la protección del ambiente acuático

Existe una diversidad de instituciones a nivel nacional que intervienen en el manejo del recurso hídrico, cada una con distintas responsabilidades y atribuciones que son asignadas, entre ellas son:

- **Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN):** a este ministerio le corresponde velar por la protección de los recursos naturales, tanto la explotación como el uso de los recursos, además es el encargado de otorgar las licencias para el uso de los recursos naturales.

- Ministerio de Educación (MINEDUC): en materia ambiental se sustenta en el Decreto 74-96 del Congreso de la República.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA): El encargado de regular el riego en el país y actualmente promueve el acceso a servicios técnicos y financieros para la construcción de proyectos de sistemas de riego.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM): Maneja todo lo relacionado a política energética y la explotación minera, la asignación de fomentar el uso de fuentes renovables de energía y desarrollo de hidroeléctricas.
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS): Una de las funciones relacionadas al agua es velar por su calidad en materia de agua potable y saneamiento.
- Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (MICIVI): La ley del Organismo Ejecutivo, Decreto 114-97 del Congreso de la República de Guatemala, faculta a este Ministerio para la construcción de canales de navegación, dragado de ríos y medición hidrológica.
- Autoridades de cuencas:
 - Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán (**AMSA**).
 - Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su Entorno (**AMSCLAE**).
 - Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal, y Río Dulce (**AMASURLI**).
 - Autoridad para el Manejo y Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Lago de Petén Itzá (**AMPI**).
 - Autoridad Protectora de la Sub-cuenca y Cauce del Río Pensativo (MARN, 2008).

Para la caracterización del área de recarga hídrica, por medio de pozos de infiltración, se necesita generar un protocolo de trabajo previo a la búsqueda de información que ayuden para obtener datos de la permeabilidad del suelo, los niveles y topografía del área, esto permite generar parámetros reales que pueden convertirse en áreas de investigación y aplicación en un futuro en el área de recarga y reutilización del agua.

8.1. Medición permeabilidad

Cuando se menciona la construcción de obras de infiltración o absorción, en todos los casos se pretende aprovechar los estratos más permeables del terreno con aguas freáticas sobre el que se asienta la mayor parte del "Valle de Guatemala".

Entonces, para la presentación de un proyecto de sistema de infiltración, se deben analizar los siguientes puntos:

1. Estudio de mecánica de suelos (estratigrafía).
2. Permeabilidad del suelo.
3. Área efectiva para infiltración del sistema elegido.
4. Tipo de obra de Infiltración propuesta, en este caso pozos de infiltración.

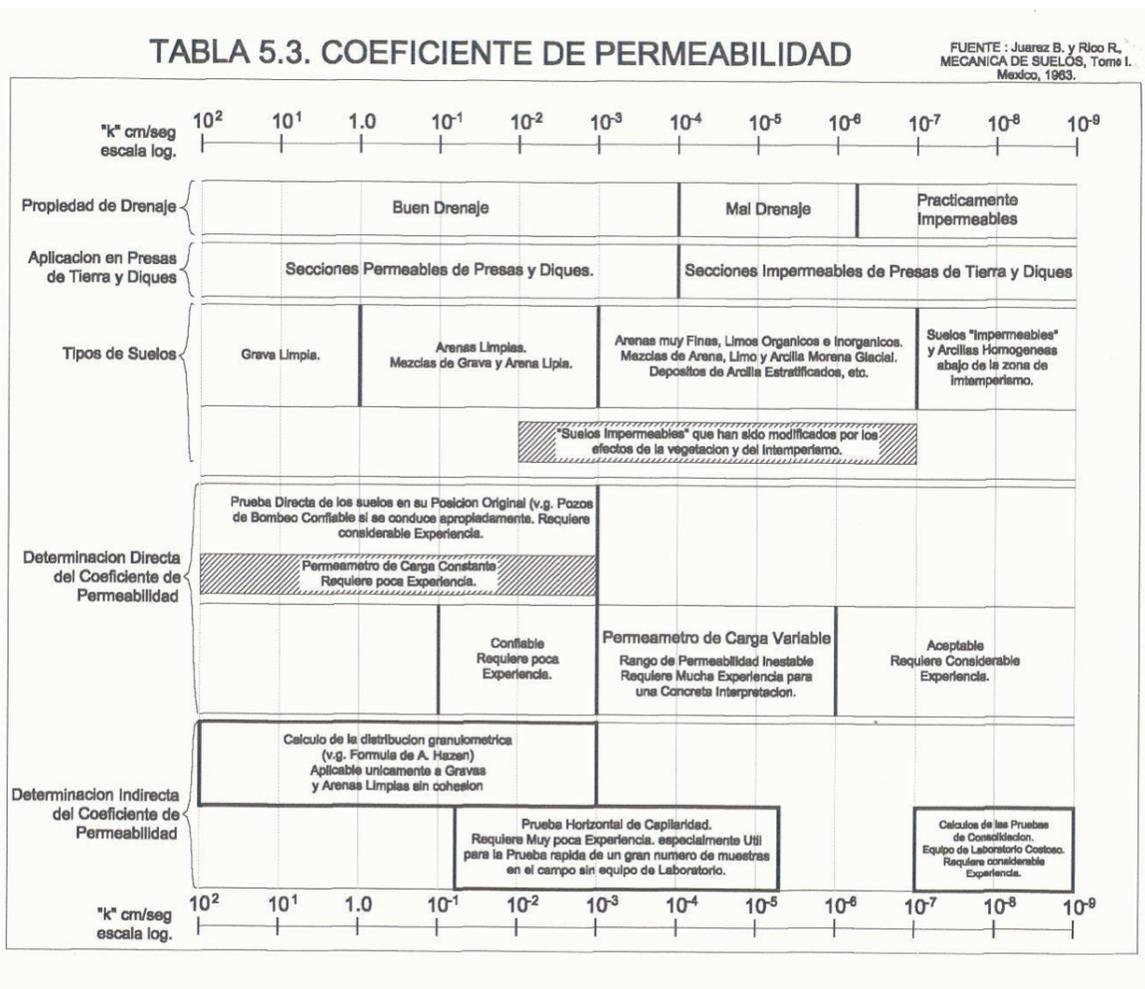
Para el área efectiva para infiltración, es necesario analizar el área que tendrá el pozo, la profundidad del mismo con la permeabilidad del suelo, estos permitirá determinar el número de pozos que se requieren para infiltrar el caudal calculado.

Cuadro 2: Valores teóricos de la permeabilidad

Material	Valor de K (cm/seg)
Jal grueso	1×10^{-2}
Jal medio	1×10^{-3}
Arena amarilla	1×10^{-3}
Arena de río	1×10^{-2}
Arena jalosa	1×10^{-3}
Arenas limosas	1×10^{-4}

Fuente: (SIAPA, 2014).

Figura 14: Coeficiente de permeabilidad



Fuente: (SIAPA, 2014).

8.2. Medición de la capacidad de infiltración

Para determinar la capacidad de infiltración del suelo en donde se desea instalar el pozo de infiltración, se deben hacer pruebas,

Con fines ejemplificativos, se determinara el valor K, utilizando coeficientes de suelo que ya fueron estudiados,

$$vT = k * S * A_p * P \quad (1)$$

Donde:

k= Permeabilidad promedio del estrato (m/s)

S= Gradiente hidráulico (1)

A_p = Área permeable (m^2)

T= Tiempo en segundos (s)

8.2.1. Movimiento de las aguas subterráneas

"La dinámica del flujo en un medio poroso saturado se describe mediante la ley de Darcy"(GWP, 2011). Esta ley funciona para la medición de la filtración que puede tener un suelo, es cuando un flujo de agua constante a través de un medio poroso

$$H = V * A * \frac{(H5 - h4)}{l} * t \quad (2)$$

Donde:

A= es el área de la sección transversal del medio poroso

K= Conductividad hidráulica o permeabilidad.

Se tuvo una prueba de absorción de suelo de un estudio realizado en Santa Catarina Pinula, el cual no esta admitido para su publicación, en el mismo se utilizan las diferentes métodos para realizar el estudio.

8.2.2. Método del cilindro invertido (Porchet)

El método utilizado consistió en excavar en el suelo un agujero de radio "R" y profundidad constante. Se llenó con agua hasta una altura "H" e inmediatamente se tomaron intervalos de tiempo suficientemente pequeños (dt) para poder medir el descenso del agua, hasta la saturación del suelo, momento en el cual, la velocidad se vuelve constante.

$$f(cm/min) = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} * \ln \frac{(2h_1 + R)}{(2h_2 + R)} \quad (3)$$

Donde:

f= Velocidad de infiltración en cm/min

R= Radio de excavación (cm)

H= Altura del espejo de agua para un tiempo t

Otra ecuación utilizada para el comportamiento de la velocidad de infiltración en el tiempo para cada punto de observación, se utilizó el modelo de Kostiakov-Lewis "K-L". Los parámetros k y n fueron determinados por medio de mínimos cuadrados.

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = K * t^n \quad (4)$$

Donde:

I= Velocidad de infiltración en (mm/h)

K= Lámina infiltrada en el primer minuto

t= pendiente de la curva

Para determinar la conductividad hidráulica del suelo "K" (velocidad de ingreso del agua dentro del perfil del suelo, cuando este, ya se encuentra saturado) se calculó primero el tiempo base.

$$t_b(min) = -600 * n \quad (5)$$

Donde:

t_b = Tiempo base (min); momento en el cual, la velocidad de infiltración se vuelve constante
n= pendiente de la curva del modelo de K-L

Con el valor de la conductividad hidráulica expresada en mm/día, se substituyó en la siguiente ecuación para determinar el porcentaje de infiltración.

$$I = (-2.74 * 10^{-5} * K + 0.2284) * \ln(k) + 0.000159(k) - 0.586 \quad (6)$$

Donde:

I= Porcentaje de infiltración

K= Conductividad hidráulica del suelo en (mm/día)

ln= Logaritmo natural

Los modelos que describen el comportamiento de la lámina de agua infiltrada se construyeron por medio de la siguiente ecuación.

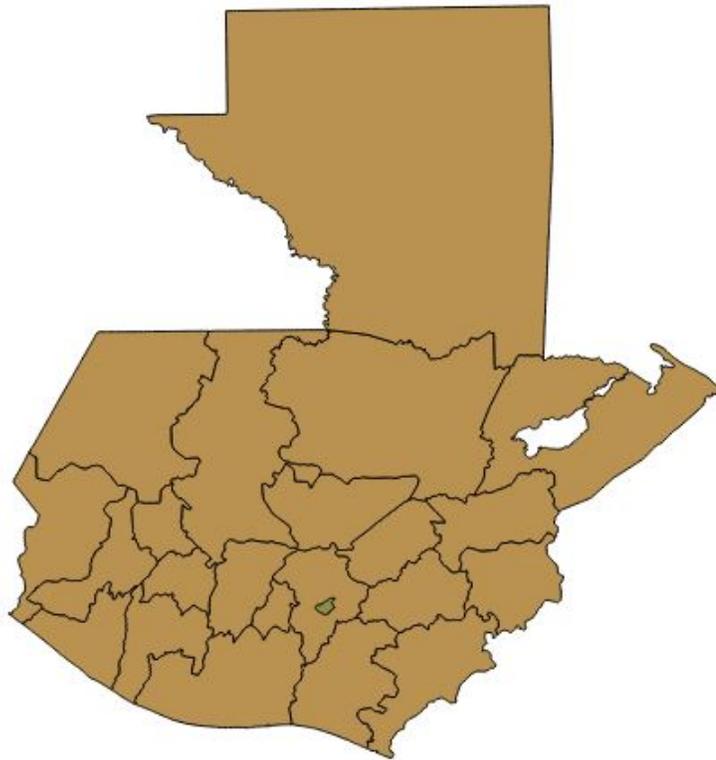
$$Z(mm) = \frac{K * t^{n+1}}{60 * (n + 1)} \quad (7)$$

Z = Lámina de agua infiltrada para un tiempo t .
 K y n = Parámetros del modelo de K-L

8.3. Topografía

Como parte de la realización de un proceso para el municipio de Santa Catarina Pinula, se procedió a utilizar la herramienta de QGis, se obtuvieron los shapefiles del portal de Segeplan los cuales fueron Departamentos y Municipios de Guatemala, esto para extraer el municipio de Santa Catarina únicamente como se puede observar en la siguiente imagen.

Figura 15: Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

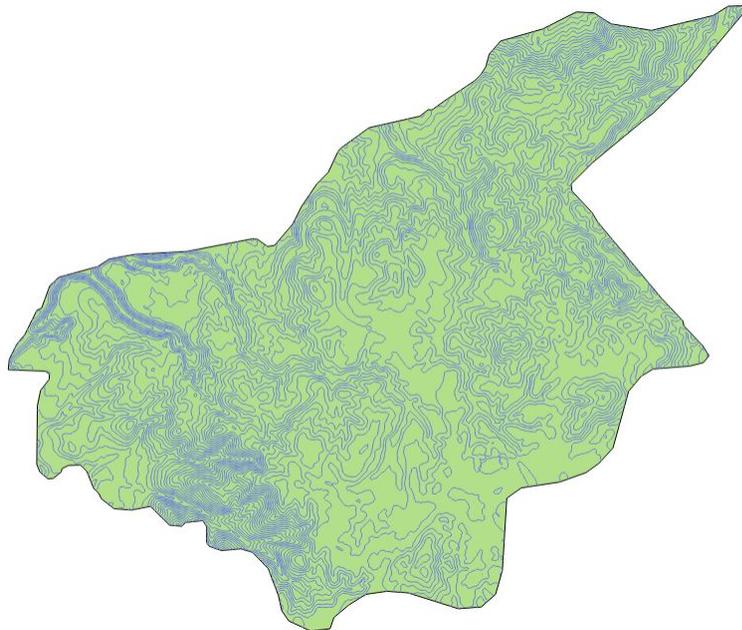
Para la realización del análisis, se partió del modelo de elevación digital -DEM- nacional, se utilizó el geo-proceso de máscara para poder extraer únicamente la porción de Santa Catarina Pinula utilizando como máscara el shapefile de Santa Catarina Pinula, posterior a eso con el ráster, en el área de extracción y curvas de nivel se obtuvieron las mismas cada 20 metros para poder tener un análisis del terreno y topografía del mismo.

Figura 16: DEM Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

Figura 17: Curvas de nivel cada 20 metros



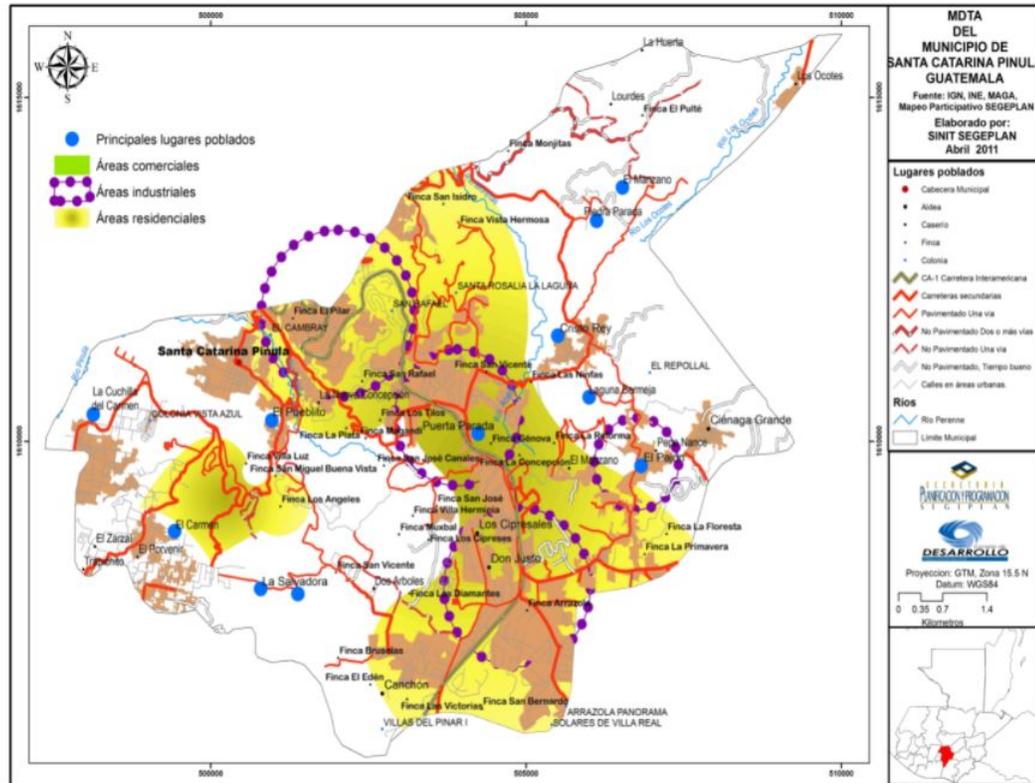
Fuente: (Elaboración propia).

Estos análisis sirvieron para observar el comportamiento del terreno según el área del municipio, y poder tomar la decisión de los mejores áreas para optar por la recarga hídrica según el trazo de la cuenca que fue realizado posteriormente.

8.4. Ordenamiento territorial

El ordenamiento territorial es un proceso técnico, administrativo y político, en el cual como punto de partida es de vital importancia la toma de decisiones, ya que lo que se pretende es considerar las condiciones sociales, ambientales y económicas para la ocupación de forma ordenada del territorio, así como el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales, este tipo de procesos busca el equilibrio de las poblaciones de manera sostenible disminuyendo los impactos negativos que puedan ocasionar las diferentes actividades y procesos de desarrollo del municipio (De Paz, 2016).

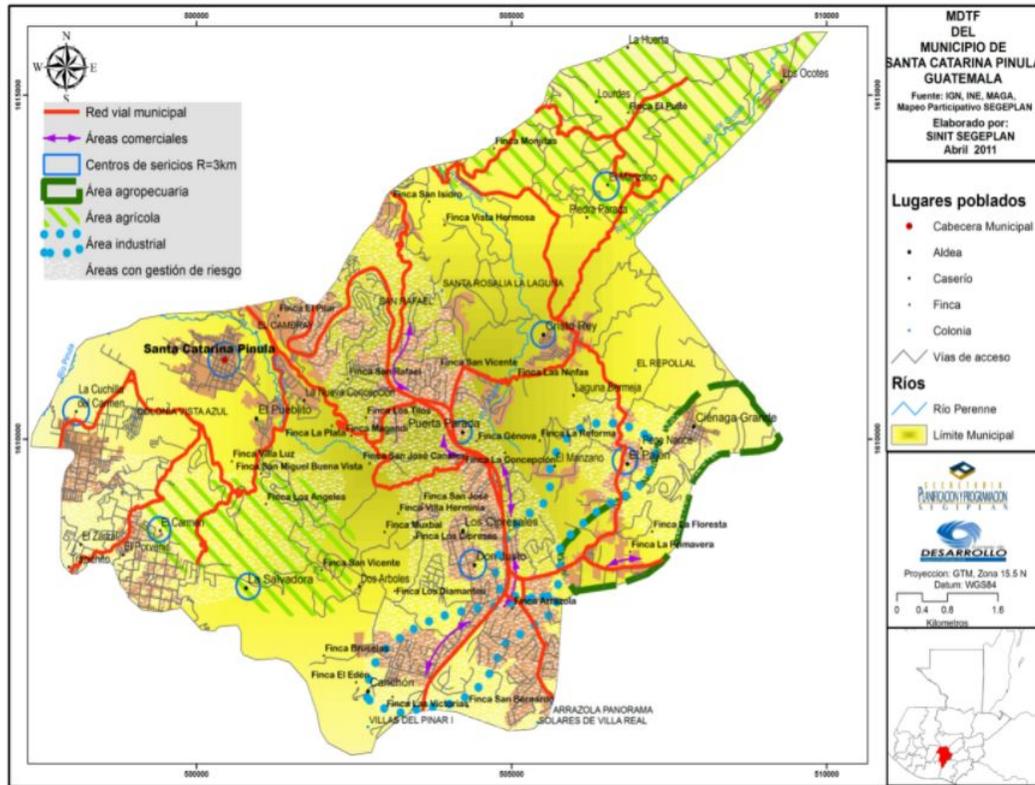
Figura 18: Distribución de Santa Catarina Pinula



Fuente: (Segeplan, 2011).

A partir de un proceso de ordenamiento territorial se pueden establecer áreas específicas en cada parte del municipio, esto es importante para poder establecer un área para la recarga hídrica del municipio en conjunto con otros factores importantes como lo son las cuencas, y la topografía del área.

Figura 19: Síntesis de Santa Catarina Pinula



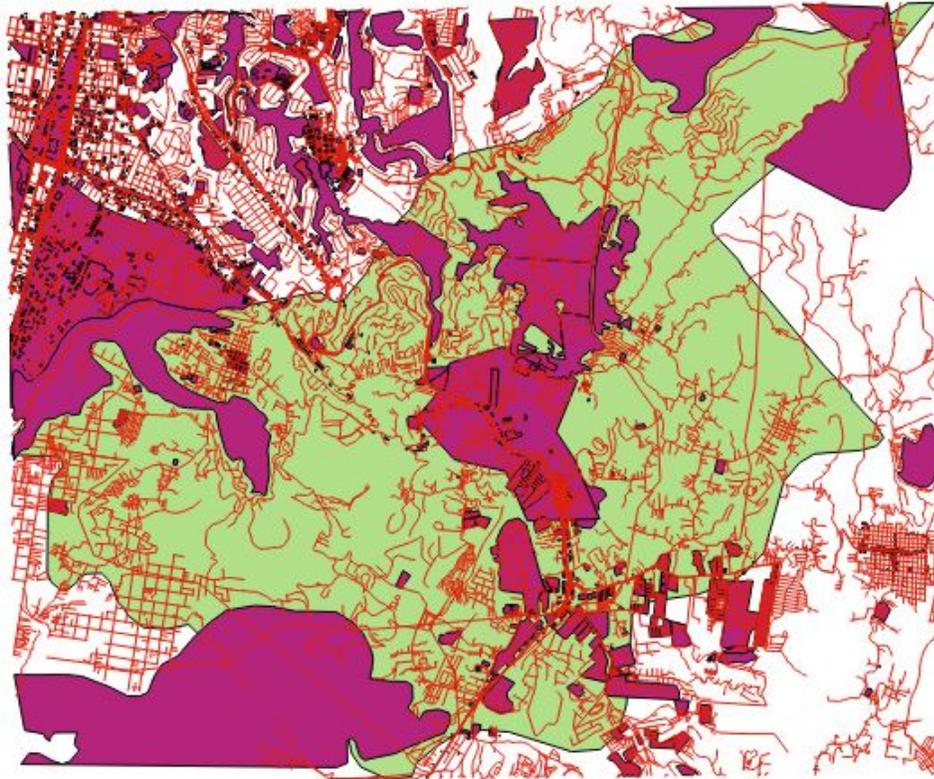
Fuente: (Segeplan, 2011).

Esto indica hacia donde va el crecimiento del municipio, la delimitación de las áreas como lo son la agropecuaria, agrícola, industrial, etc. El crecimiento urbano y en cuanto podría crecer la demanda del uso de los servicios, tales como la energía, agua potable y extracción de basura y aguas residuales.

Con la ayuda del plugin de Open Street Maps -OPS-, pudimos realizar una comparación de los shapefiles ya obtenidos de las vías principales y secundarias del municipio para saber que tan certero es el plugin, sin embargo este presentaba ciertos desfases al momento de clasificar ciertos puntos de referencia o vías de circulación, estas inconsistencias en el plugin de -OPS- se deben a que es un proyecto colaborativo que se involucra cualquier usuario que pueda hacer aportes o recolección de información para la edición de mapas.

Debido a estas inconsistencias, es mejor utilizar el shapefile de caminos secundarios, se encuentra en carreteras principales del portal de SEGEPLAN, se debe a que se utilizarían más shapefiles del mismo portal en análisis siguientes.

Figura 20: PlugIn de OPS de Santa Catarina Pinula



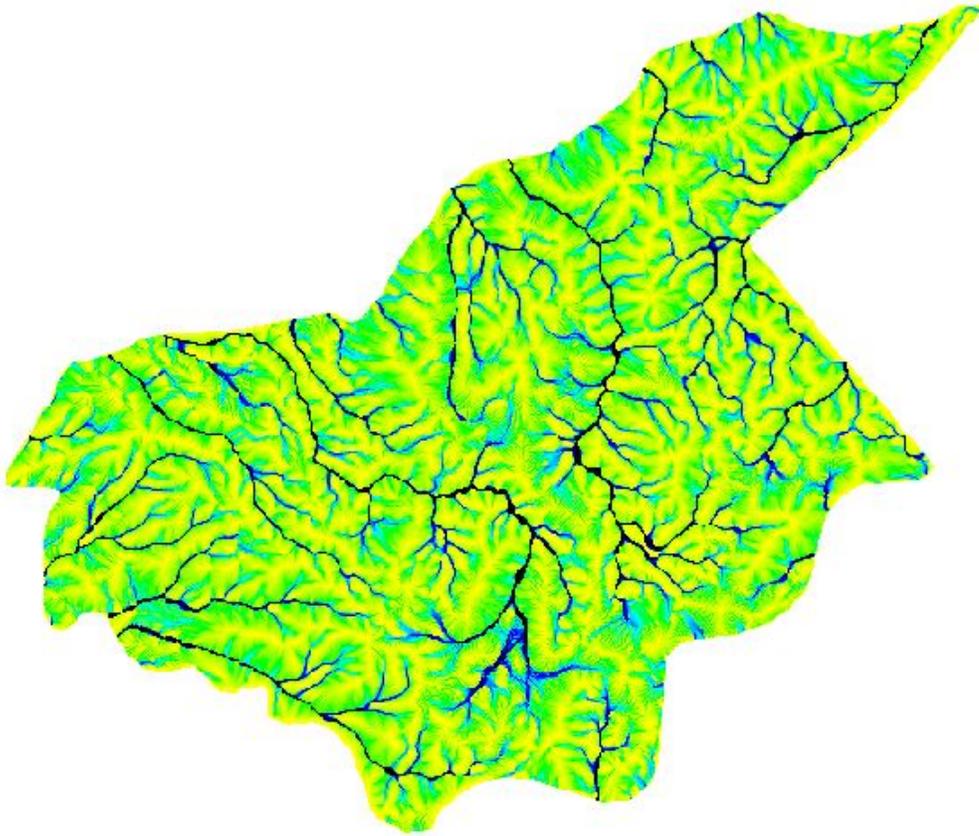
Fuente: (Elaboración propia).

8.5. Delimitación de la cuenca hidrográfica

Esta variable es de las mas importantes para poder definir el área de recarga y aprovechamiento de la escorrentía del municipio de Santa Catarina.

Para la delimitación de la cuenca fue necesario tener el shapefile de curvas de nivel, esto debido a que según eso se realiza la delimitación de la misma, para esto fue necesario el complemento de GRASS, esto para poder crear un directorio de mapas.

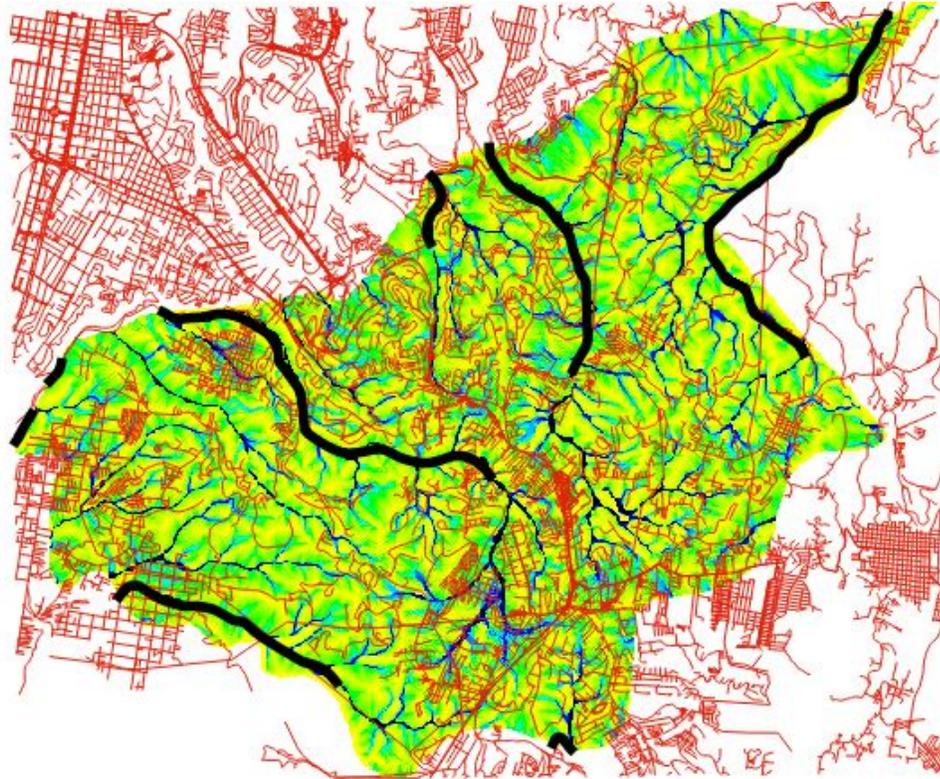
Figura 21: Cuencas en Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

El mapa anterior nos indica el comportamiento de la cuenca por todo el municipio de Santa Catarina y las zonas donde es posible una mejor recarga hídrica debido a su topografía y la zona por donde delimitan los ríos que tienen paso por el municipio, tal es el río Pinula, que cuenta con 6.5 kilómetros de extensión y tiene un paso cerca del casco urbano del municipio.

Figura 22: Cuencas, ríos y rutas en Santa Catarina Pinula

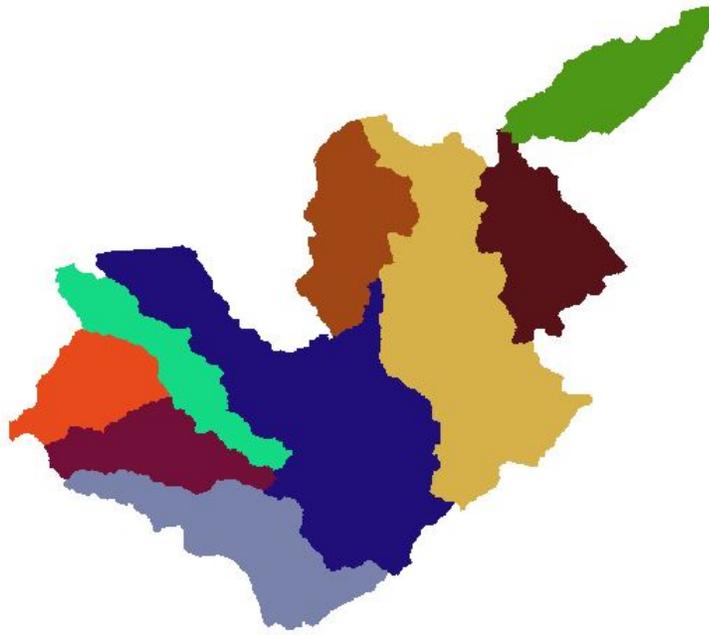


Fuente: (Elaboración Propia).

A partir de la delimitación de la cuenca se supo las salidas de la cuenca y la dirección de los drenajes que sera de uso de la dirección de la escorrentía para la recarga hídrica del subsuelo, como se puede observar en los mapas a continuación.

Para la búsqueda de una zona de recarga se analizaron estos mapas obtenidos bajo el análisis de la delimitación de la cuenca y se realizo una investigación exploratoria en Google Earth para observar el comportamiento de las curvas en formato 3D, esto teniendo en cuenta el comportamiento de la cuenca y las condiciones o recomendaciones para delimitar una zona para recarga hídrica.

Figura 23: Salidas de cuencas de Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

Figura 24: Salidas de dirección de drenaje de Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

8.6. Área de recarga hídrica

En Santa Catarina Pinula existe un total de 20 pozos mecánicos, todos de extracción de agua y ninguno de recarga, la distribución del agua subterránea en el municipio parte desde el centro del municipio hacia toda la periferia del centro poblado.

La zona escogida para la recarga hídrica debe ser un área que se garantice la no alteración del suelo por un tiempo determinado, esto debido a que cualquier construcción, o alteración a la topografía del suelo podría tener aspectos negativos en el diseño y construcción de los pozos de infiltración en serie para lo que fueron diseñados.

La zona escogida es un área que maneja la municipalidad de Santa Catarina Pinula, la zona conocida como Cambray, esta zona en principio fue una zona residencial donde era habitable en una gran parte con permisos municipales, con la advertencia de parte de la CONRED que era un área no segura para complejo habitacional.

Esta área también fue escogida debido a su topografía que es de gran importancia y el paso del río Pinula que se encuentra justamente a escasos metros del área. Otro elemento importante es la cercanía de los pozos de extracción lo cual alimenta los acuíferos de donde es extraída el agua y como ultimo punto, es una zona rodeada de vegetación en la cual la escorrentía fluye a un ritmo lento debido a la raíces de los arboles y vegetación ya antes mencionada. Esto mejora la cantidad y calidad de infiltración del agua.

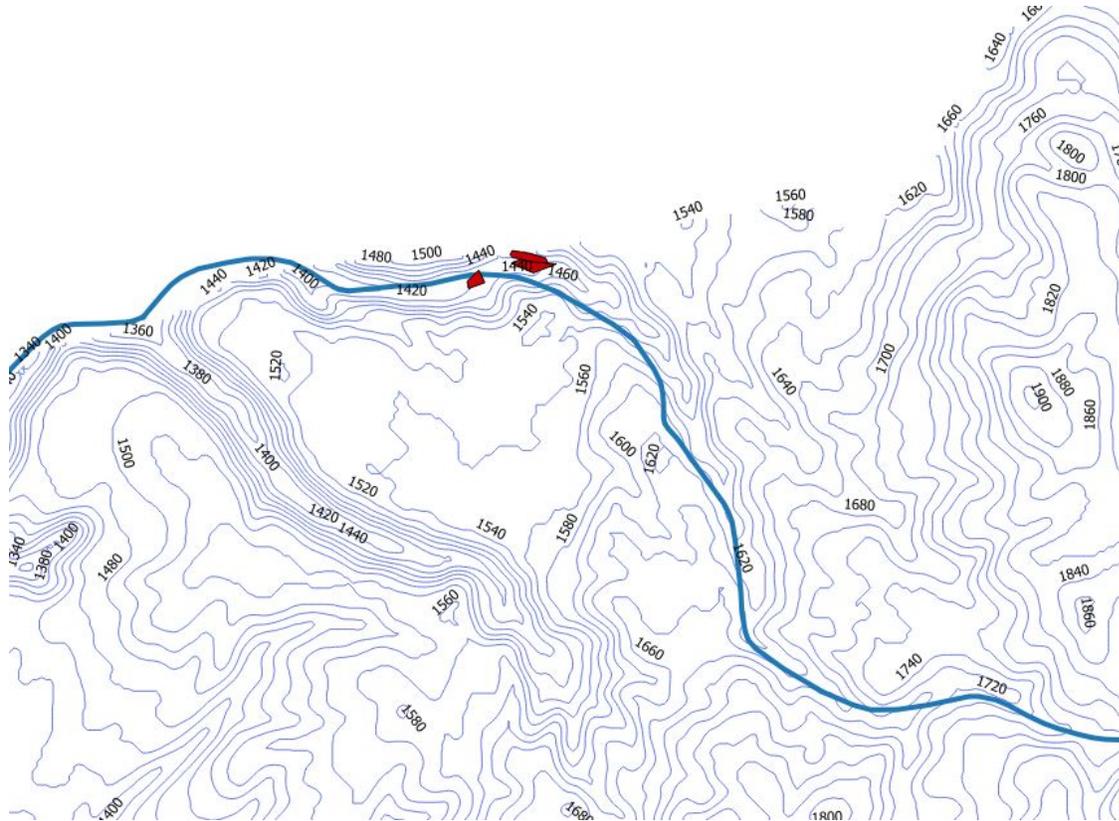
Figura 25: Área de recarga hídrica Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

Esta propuesta de recarga vista en Google Earth fue analizada en QGis para verificación de topografía con datos importantes para el cálculo y propuesta de pozos de infiltración como se puede ver a continuación,

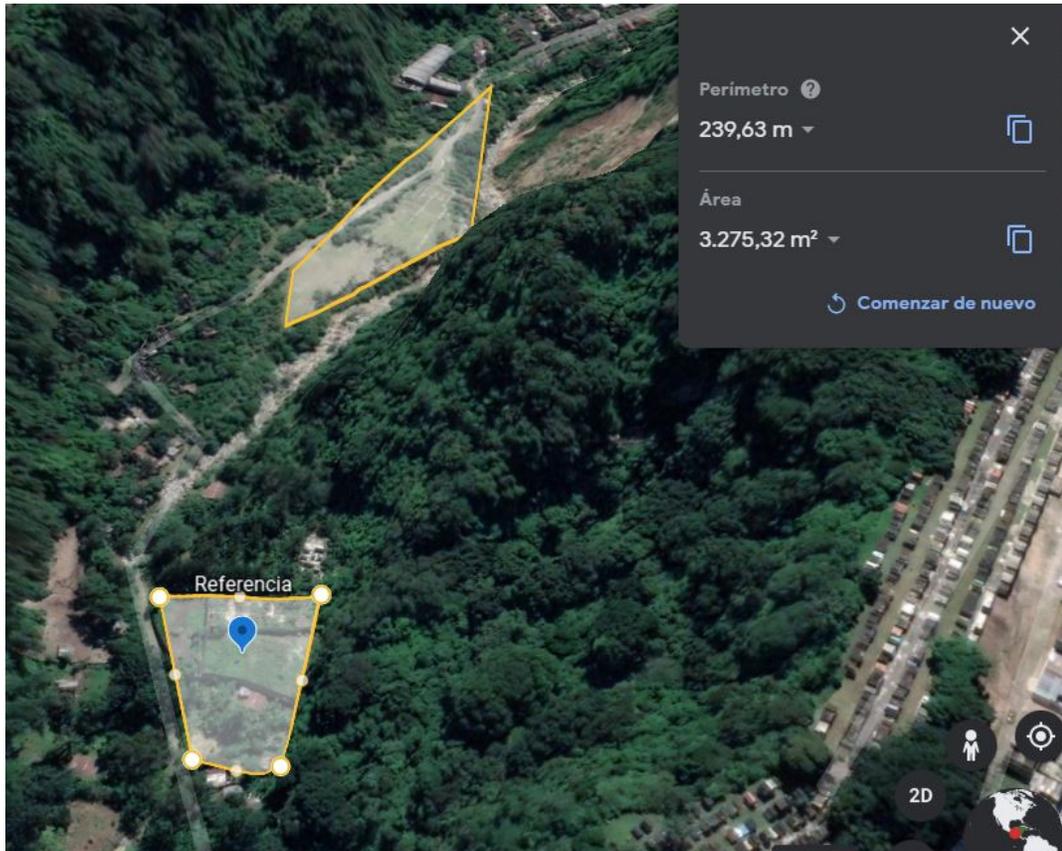
Figura 26: Área de recarga hídrica en QGis Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

El mapa anterior nos da un dato de aproximadamente 100 metros de diferencia en la cota mayor a la cota de recarga, es un área buena debido a la dirección de la escorrentía, se escogió grandes áreas con pendientes no mayor a 3 por ciento para que el coeficiente de escorrentía fuera bajo y se lograra una mayor captación en los diferentes pozos.

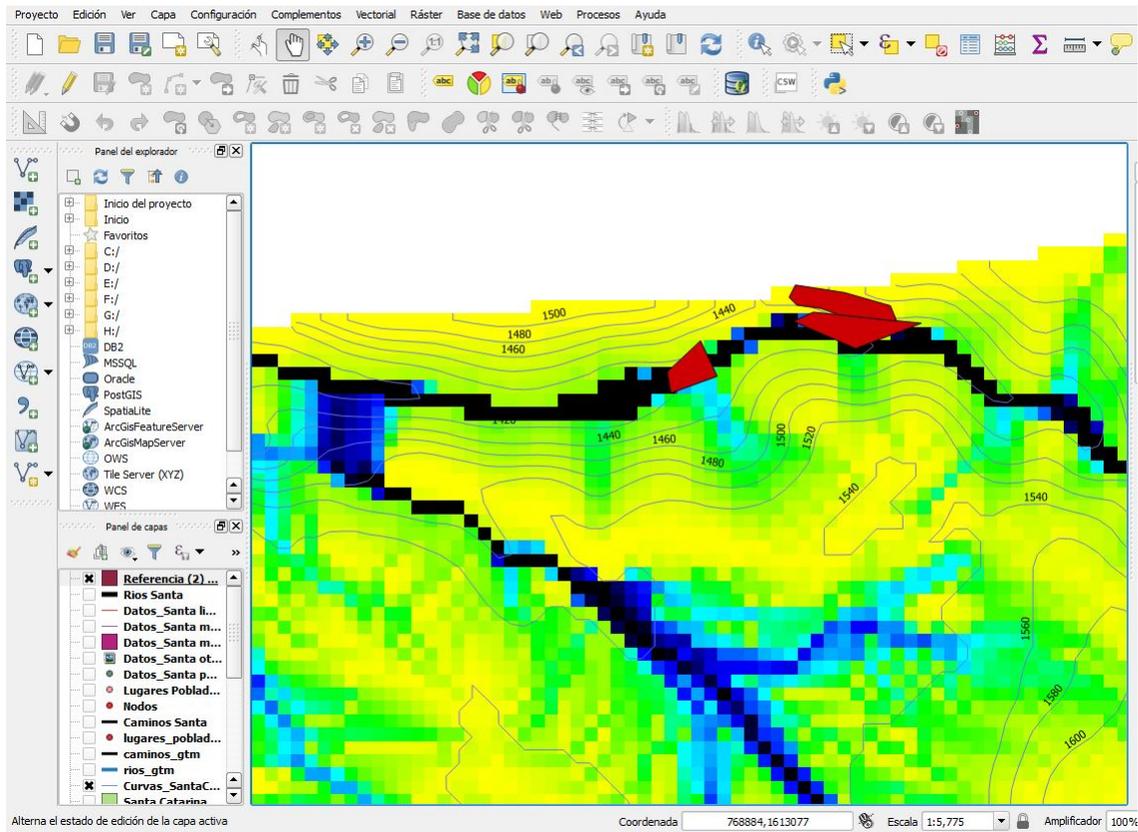
Figura 27: Área de recarga hídrica en Santa Catarina Pinula



Fuente: (Elaboración propia).

Con diferentes áreas, fraccionadas en tres partes, con una suma de 0.013 kilómetros cuadrados de terrenos para elaboración de pozos en serie, porque únicamente esta cantidad de terreno, el problema es la inversión inicial de construir al menos 20 pozos de infiltración lo que representa un gasto alto.

Figura 28: Área de recarga hídrica en Santa Catarina Pinula



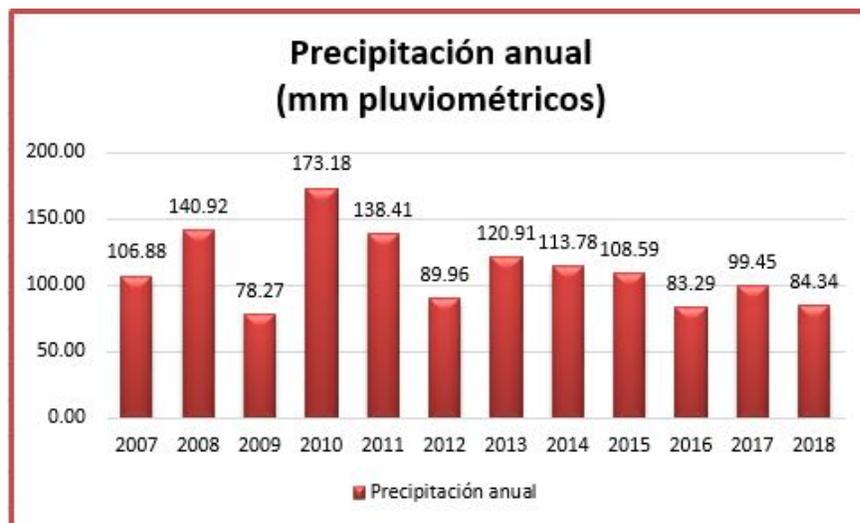
Fuente: (Elaboración propia).

En el mapa anterior se puede observar la delimitación de la cuenca, junto a las áreas de recarga pintadas de rojo y el río Pinula en negro, esto nos indica una fuerte recarga hacia el manto acuífero de la zona.

9.1. Cantidad de precipitación

Se obtiene un promedio y una representación gráfica de la cantidad de mm pluviométricos de lluvia anual que hubo desde el 2007 hasta el 2018 que son los años que se obtuvo información de parte del INE.

Figura 29: Precipitación anual en el Departamento de Guatemala



Fuente: (Elaboración propia).

Se obtiene un promedio y una representación gráfica de los días de lluvia en promedio anuales durante los 12 meses de cada año para obtener la tendencia de como se puede observar a lo largo del tiempo, cabe resaltar que únicamente se encuentran datos del 2007 al 2017.

Figura 30: Tendencia número de días de lluvia en el Departamento de Guatemala



Fuente: (Elaboración propia).

Figura 31: Número de días de lluvia en Guatemala



Fuente: (Elaboración propia).

Las siguientes tablas de Excel, demuestran la cantidad de días lluviosos mensuales y la cantidad de mm pluviométricos, además de un promedio de mm pluviométricos desde el año 2007 hasta el 2018 que se ha recabado información.

Figura 32: Número de días de lluvia en Guatemala

DEPARTAMENTO		Guatemala	Guatemala	El Progreso	El Progreso	Sacatepéquez	Chimaltenango	Chimaltenango	Chimaltenango	Escuintla	Escuintla	Escuintla	Santa Rosa	Sololá	Sololá	Sololá	Quezaltenango	Quezaltenango	Quezaltenango	Retalhuleu	Retalhuleu	San Marcos	San Marcos	San Marcos
MUNICIPIO		Guatemala	San Pedro Ayampuc	San Agustín Acasaguastán	San Agustín Acasaguastán	Ciudad Vieja	Chimaltenango	San Martín Jilotepeque	Santa Cruz Balanyá	Santa Lucía Cotzumalguiza	San José	Escuintla	Cullapa	Santiago Atitlán	Sololá	San Lucas Tolimán	Otintepeque	Mazatenango	Retalhuleu	Champerico	San Marcos	San Marcos	Catarina	
ALTITUD		1582	320	1909	2195	1766	1000	2000	200	6	730	737	1500	1562	1562	2380	439	200	5	2420	44	233		
ESTACIÓN		INSIVUMEH	San Pedro Ayampuc	San Agustín Acasaguastán	Los Albores	Suiza Contenta	Alameda Ica	San Martín Jilotepeque	Santa Cruz Balanyá	Camantulul	Puerto de San José	Sabana Grande	Los Esclavos	Santiago Atitlán	El Tablón	El Capitán	Labor Ovalte	Mazatenango	Retalhuleu	Champerico	San Marcos	Tecún Umán	Catarina	
2007	Enero	4	3	12	5	1	2	1	-	-	-	-	-	4	-	-	2	2	2	0	1	1	1	
2007	Febrero	0	-	3	-	-	-	-	3	1	2	-	-	-	-	-	1	5	-	0	-	-	-	
2007	Marzo	3	2	11	-	-	1	1	8	-	5	-	2	1	1	-	12	6	1	1	1	4		
2007	Abril	11	1	5	4	-	7	1	10	3	9	10	8	9	12	7	17	-	0	-	6	-		
2007	Mayo	7	4	8	6	6	7	8	22	13	17	12	12	11	12	11	26	25	12	9	18	18		
2007	Junio	20	22	23	19	19	17	20	24	13	18	19	22	21	19	23	26	21	14	22	18	21		
2007	Julio	19	N/D	-	17	15	19	18	-	18	19	19	14	15	15	22	23	20	13	18	21	18		
2007	Agosto	19	19	-	17	16	21	20	29	22	24	19	18	19	19	20	27	22	16	21	18	18		
2007	Septiembre	27	-	23	24	23	20	24	17	26	26	22	24	23	22	30	21	15	30	23	23	23		
2007	Octubre	19	16	23	16	16	15	13	25	17	23	22	18	18	16	16	26	25	18	20	21	21		
2007	Noviembre	4	5	16	5	5	4	3	9	-	2	2	1	5	1	4	4	3	0	2	-	-		
2007	Diciembre	1	2	-	4	2	1	2	5	-	2	-	1	-	1	1	4	4	1	-	1	1		
2008	Enero	2	-	-	2	-	1	-	2	-	1	-	1	2	-	1	1	0	-	0	-	0		
2008	Febrero	1	5	-	3	-	4	2	9	1	4	5	6	4	4	2	11	9	1	1	1	2		
2008	Marzo	3	3	9	1	-	2	-	14	3	7	-	2	2	3	4	14	10	2	3	4	4		
2008	Abril	6	4	5	5	3	4	4	17	5	9	6	4	-	6	6	18	22	8	11	N/D	N/D		
2008	Mayo	10	10	10	10	8	11	13	22	10	27	14	15	13	13	14	22	14	11	11	15	15		
2008	Junio	25	24	22	25	-	24	22	24	16	24	22	24	23	22	24	N/D	22	16	25	23	23		
2008	Julio	24	21	22	24	-	23	22	24	21	21	20	23	25	24	23	N/D	22	18	21	19	19		
2008	Agosto	22	16	22	16	20	21	25	20	21	22	22	24	23	20	N/D	22	-	21	23	23	23		
2008	Septiembre	25	21	23	21	-	25	22	25	17	26	22	26	27	22	22	N/D	26	20	27	19	19		
2008	Octubre	17	16	28	18	-	20	19	27	17	30	20	20	15	19	20	N/D	25	19	20	23	23		
2008	Noviembre	-	-	7	-	-	-	-	6	1	1	-	1	1	1	-	N/D	5	0	2	0	0		
2008	Diciembre	-	-	-	-	-	-	1	4	-	-	-	1	1	-	-	N/D	0	-	-	N/D	N/D		
2009	Enero	-	2	7	-	-	-	-	6	-	-	1	-	-	-	-	N/D	5	0	-	0	0		
2009	Febrero	2	3	9	5	1	3	1	3	-	1	2	-	-	-	-	N/D	3	0	-	0	0		
2009	Marzo	-	1	1	1	-	-	-	8	-	2	1	-	-	-	-	N/D	10	1	1	1	3		
2009	Abril	1	-	3	2	3	2	2	4	1	7	5	4	1	4	5	N/D	3	0	9	0	0		
2009	Mayo	13	17	24	18	16	18	21	23	12	26	20	24	23	23	23	N/D	23	13	25	15	15		

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 33: Promedio de mm pluviométricos en Guatemala

DEPARTAMENTO		Guatemala	Guatemala	El Progreso	El Progreso	Sacatepéquez	Chimaltenango	Chimaltenango	Chimaltenango	Santa Lucía
MUNICIPIO		Guatemala	San Pedro Ayampuc	San Agustín Acasaguastán	San Agustín Acasaguastán	Ciudad Vieja	Chimaltenango	San Martín Jilotepeque	Santa Cruz Balanyá	Santa Lucía
ALTITUD		1,502	320	1,900	1,900	2,105	1,766	1,800	2,080	2,080
ESTACIÓN		INSIVUMEH	San Pedro Ayampuc	San Agustín Acasaguastán	Los Albores	Suiza Contenta	Alameda Ica	San Martín Jilotepeque	Santa Cruz Balanyá	Santa Lucía
2016	Octubre	41.3	-	37.7	17.2	165.4	30.1	8.9	7.6	7.6
2016	Noviembre	4.3	-	6.0	79.7	-	N/D	28.0	7.3	7.3
2016	Diciembre	3.0	-	1.7	55.2	-	9.3	5.5	3.7	3.7
2017	Enero	3.8	-	0.0	16.1	-	0.4	2.3	2.0	2.0
2017	Febrero	10.7	-	0.0	16.1	-	2.9	3.0	2.2	5.3
2017	Marzo	0.4	-	0.3	33.9	-	25.5	5.0	43.5	0.3
2017	Abril	9.0	-	17.5	33.4	-	48.8	16.3	28.8	21.2
2017	Mayo	311.5	-	142.3	234.8	-	127.3	120.8	131.9	109.9
2017	Junio	220.6	-	199.2	477.1	-	233.4	106.4	203.9	137.8
2017	Julio	115.0	-	30.3	130.8	-	173.0	135.2	88.0	184.9
2017	Agosto	196.8	-	178.9	306.7	-	153.3	88.3	194.4	127.8
2017	Septiembre	204.2	-	200.5	444.8	-	249.5	208.4	156.1	136.5
2017	Octubre	121.3	-	102.1	333.7	-	102.6	80.8	208.2	85.0
2017	Noviembre	0.0	-	1.8	37.8	-	3.1	0.0	2.1	35.6
2017	Diciembre	0.1	-	0.0	27.3	-	1.0	2.5	25.6	0.0
2018	Enero	0.4	-	0.6	-	-	0.0	1.7	-	-
2018	Febrero	10.5	-	1.4	-	-	5.9	3.7	-	-
2018	Marzo	3.1	-	4.8	-	-	0.0	2.3	-	-
2018	Abril	19.7	-	13.6	-	-	19.0	29.2	-	-
2018	Mayo	196.3	-	282.5	-	-	257.7	149.1	-	-
2018	Junio	293.0	-	86.4	-	-	193.7	197.1	-	-
2018	Julio	18.7	-	4.3	-	-	34.2	26.9	-	-
2018	Agosto	117.6	-	37.9	-	-	130.2	94.1	-	-
2018	Septiembre	174.1	-	67.9	-	-	203.9	83.0	-	-
2018	Octubre	178.0	-	120.1	-	-	173.1	114.6	-	-
2018	Noviembre	0.0	-	7.8	-	-	23.6	1.6	-	-
2018	Diciembre	0.1	-	0.0	-	-	4.9	0.0	-	-
		111.5								

Fuente: (Elaboración propia).

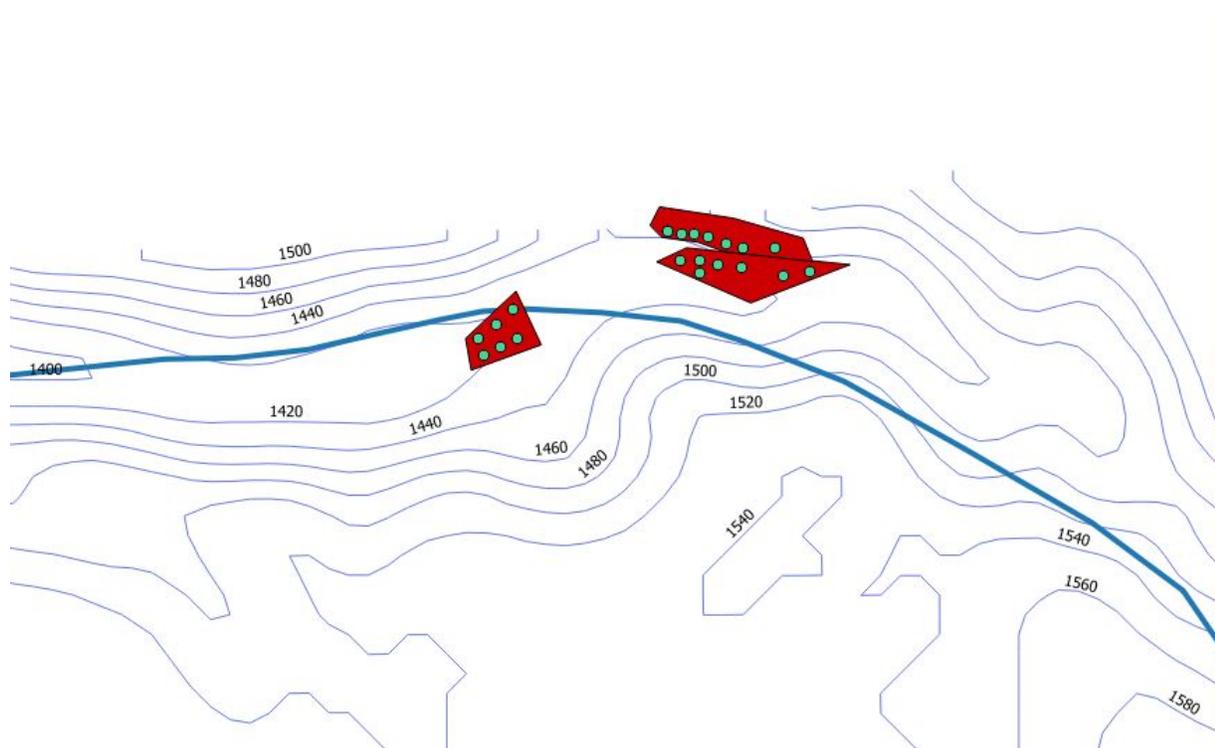
9.2. Áreas y pozos propuestos

Figura 34: Áreas

Áreas	Metros cuadrados
1	5,412.48
2	3,275.32
3	4,706.32
TOTAL	13,394.12

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 35: Distribución de pozos propuestos en área



Fuente: (Elaboración propia).

En la Figura 35 se muestran los 21 pozos propuestos en QGis, adecuados según el terreno y como se encuentran distribuidos en las diferentes áreas propuestas para recarga hídrica.

Figura 36: Distribución de pozos propuestos en área



Fuente: (Elaboración propia).

En la Figura 36 se muestran las referencias de los pozos según Google Earth para poder satisfacer la cantidad de litros/hora calculado en la precipitación máxima.

Figura 37: Coeficiente de escorrentía

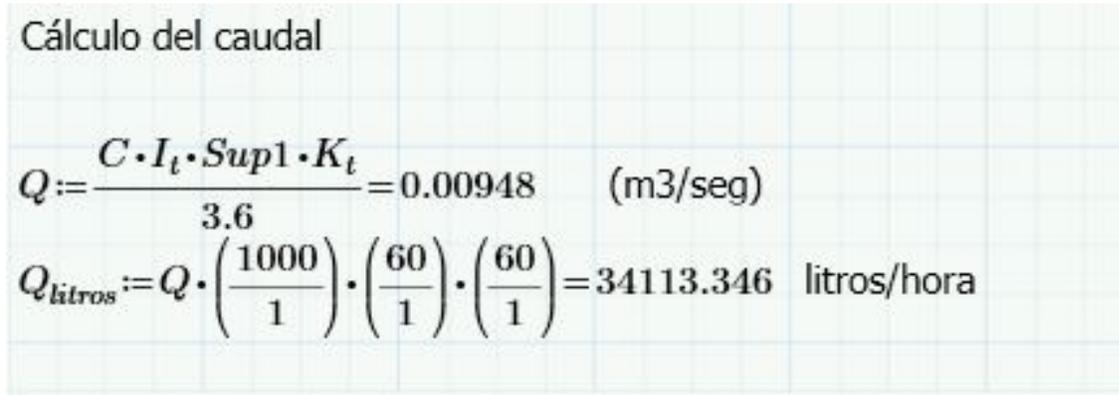
Coeficiente de escorrentía. Calc. de caudales. F. Catalá		
Tipo area	C lluvias corta	C lluvias largas
Residencial >150 viviendas/ha	0.70 a 1.00	1.00
Residencial de 100 a 150 v/ha	0.75 a 1.00	1.00
Residencial de 50 a 100 v/ha	0.65 a 0.80	1.00
Residencial de 25 a 50 v/ha	0.40 a 0.70	1.00
Residencial de 10 a 25 v/ha	0.30 a 0.50	0.80 a 0.90
Residencial de 5 a 10 v/ha	0.25 a 0.35	0.60 a 0.80
Residencial de 0 a 5 v/ha	0.10 a 0.25	0.50 a 0.60
Comercial céntrica	0.70 a 0.95	1.00
Comercial periférica	0.50 a 0.70	1.00
Industrial	0.50 a 0.90	1.00
Deportiva	0.20 a 0.35	0.50
Parques y jardines	0.10 a 0.25	0.40
Pavimentos hormigón, aglomerado.	0.90 a 1.00	1.00
Pavimentos adoquinados	0.60 a 0.80	1.00
Pavimentos de ladrillo	0.70 a 0.85	1.00
Pavimentos espedrados	0.40 a 0.50	1.00
Cubierta de grava	0.20 a 0.30	1.00
Cubierta	0.90 a 1.00	1.00
Cultivos (según pendiente)	0.05 a 0.20	0.15 a 0.50
Bosques (según pendiente)	0.05 a 0.15	0.10 a 0.35

Fuente: (ATHA, 2018).

El coeficiente de escorrentía utilizado como se puede observar en la Figura 37 es parques y jardines, con lluvias cortas debido a que es más bajo el porcentaje de lluvia larga en el año que en la lluvia corta.

Por otro lado el área escogida es de alta vegetación con cero vivienda habitacional.

Figura 38: Cálculo de caudal

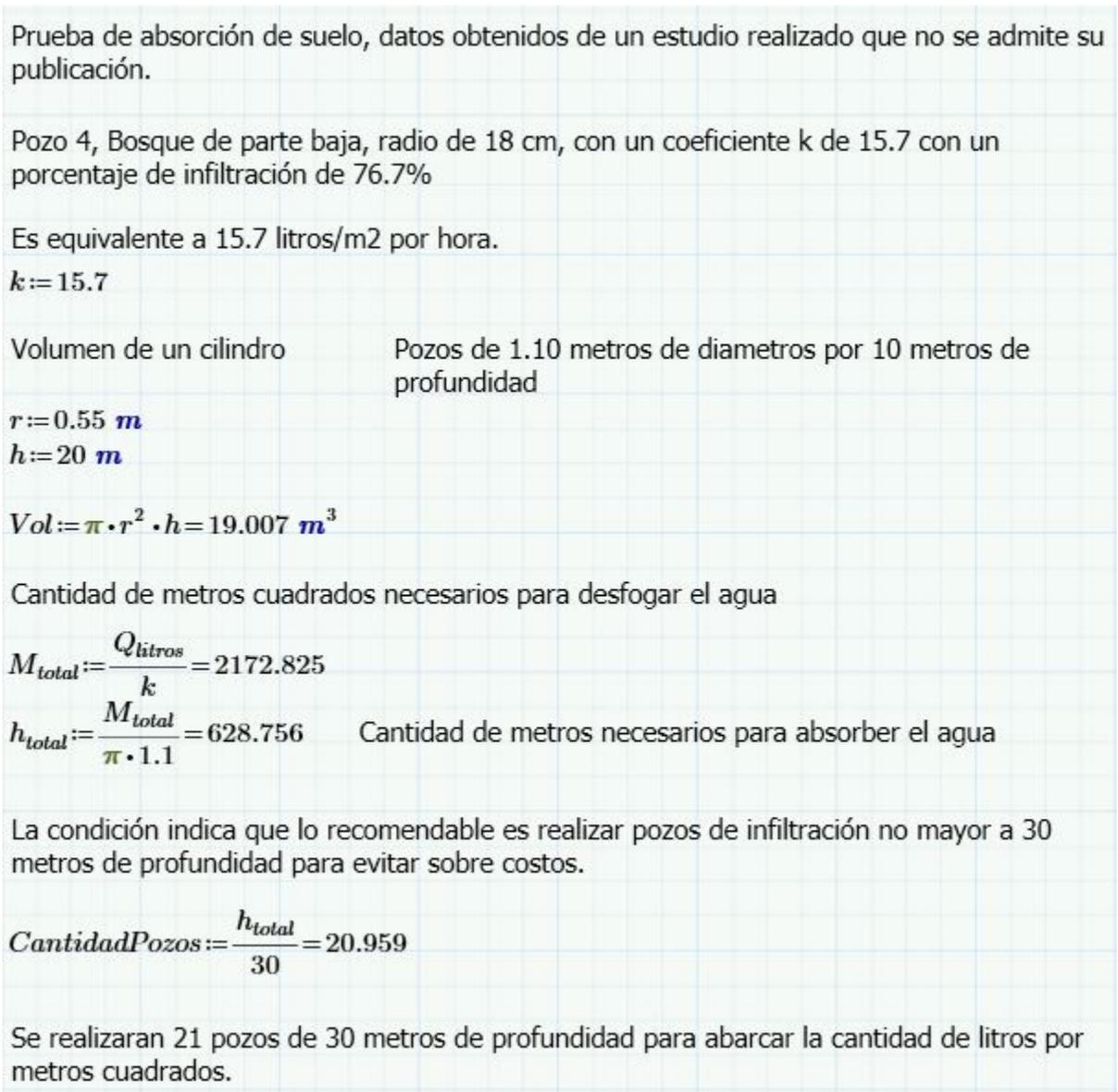


Cálculo del caudal

$$Q := \frac{C \cdot I_t \cdot Sup1 \cdot K_t}{3.6} = 0.00948 \quad (\text{m}^3/\text{seg})$$
$$Q_{\text{litros}} := Q \cdot \left(\frac{1000}{1}\right) \cdot \left(\frac{60}{1}\right) \cdot \left(\frac{60}{1}\right) = 34113.346 \quad \text{litros/hora}$$

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 39: Cantidad de pozos



Fuente: (Elaboración propia).

Como se puede observar en las figuras 38 y 39, un caudal de 0.00948 metros cúbicos por segundo y un coeficiente de permeabilidad de 15.7 litros por metro cuadrado, este coeficiente fue obtenido como ahí indica de un estudio realizado en el cual no se admite su publicación.

Con pozos de 30 metros de profundidad con 1.10 metros de diámetro propuestos se tiene una capacidad de captar 19 metros cúbicos de agua, en las temporadas de mayor precipitación se tiene un máximo de 618 metros cúbicos por hora de agua por lo que es necesario aproximadamente 21 pozos de 30 metros de profundidad para poder satisfacer la necesidad de recarga propuesta.

Para los resultados obtenidos, se observa que en la Figura 29 se tiene el historial de precipitación anual del 2007 al 2018 obtenido del INE, este fue el último año de información obtenido, con una media de 111.5 mm pluviométricos mensuales a lo largo de los 12 años que se tiene información, cabe resaltar que dentro de los cálculos realizados se incluyó un factor de seguridad del 10 por ciento para compensar la información de la cual no se pudo obtener.

De acuerdo con el anexo, la Figura 47, se puede observar una precipitación diaria corregida de 138.07 mm pluviométricos mensuales, este es un dato muy de acorde a Guatemala, donde se manejan estadísticas de al menos el presencia de huracanes, tormentas tropicales o sistemas de baja presión en una gran parte de los años analizados anteriormente, según la Figura 30 se puede observar un promedio de 11 días de lluvia mensual de los años 2007 al 2017.

Estos datos fueron de gran utilidad para poder calcular un caudal con el método racional, haciendo la aclaración que se utilizaron otros métodos para el calculo de tiempo de concentración, tales como los que se pueden observar en la Figura 51, estos diferentes métodos son utilizados para la realización de una comparativa de datos, tomando un promedio y poder tomar un valor no tan conservador pero tampoco muy optimista. Como se puede observar en la Figura 48 el método escogido es el de Chow, esto debido a que es un valor que se encuentra en el promedio junto a los demás.

La topografía del área influye en los cálculos de gran manera, como se puede observar en la Figura 36, es un área montañosa con gran pendiente para luego tener áreas con gran extensión de planicie y vegetación y así poder formar la suficiente área para formar una serie de pozos de infiltración a 30 metros de profundidad construidos bajo el método de tubería perforada, tal como se puede observar en la Figura 11 y Figura 50.

El área propuesta para la recarga hídrica como se puede observar en las figuras 26 y 34 es de aproximadamente 13,394.12 metros cuadrados de superficie plana con una pendiente no mayor al 3 por ciento, esta pendiente es de gran ayuda, puesto que el coeficiente de escorrentía es importante en la recarga hídrica. Mientras un coeficiente menor es posible mayor recarga al mantener por mayor cantidad de tiempo el agua y lograr una infiltración mas eficiente.

Según indican los cálculos que se pueden observar en la Figura 39, se obtiene un coeficiente K de permeabilidad de 15.7 (mm/h), con un porcentaje del 76.7 por ciento de infiltración en un estudio realizado en el municipio de Santa Catarina Pinula, este coeficiente es de gran ayuda puesto que es posible realizar el calculo de los metros cuadrados de agua necesarios de infiltrar, dando como resultado un total de 2,172.83 metros cuadrados por hora, para dicha cantidad son propuestos pozos de 1.10 metros de diámetro, estándares utilizados para la fabricación de pozos, y basándose en estándares de construcción de pozos en donde se indican que lo más conveniente es la realización de pozos no mayores a 30 metros de profundidad por la complejidad y el costo del mismo.

Tal como se puede observar en las figuras 35 y 36 la distribución de los 21 pozos de mismas dimensiones para la absorción del agua. La propuesta en dichas áreas son pozos de infiltración construidos en serie por la formación de un campo de recarga, el aprovechamiento de la zona con alta vegetación.

Luego de los análisis realizados en el software de QGis y las diferentes capas se pudo concluir que el área escogida para la zona de recarga hídrica es la mas adecuada por diferentes factores los cuales son, es una zona de vegetación natural controlada por un ente gubernamental como lo es la municipalidad de Santa Catarina Pinula, esta zona debido a los acontecimientos de varios años fue clausurada y manejada por la administración pública, esto garantiza la no construcción o alteración de la topografía por una buena cantidad de años, otro factor importante es la cercanía de la cuenca del río Pinula, esto garantiza recarga efectiva a los mantos acuíferos de la zona, por último y como no menos importante es por como se encuentra la distribución de redes de flujo de la municipalidad, la distribución parte del centro poblado hacia las demás zonas del municipio y otros municipios, esto influye en que el área se encuentra a escasos kilómetros del casco urbano y funcionaria como una recarga a los mismos mantos que son explotados para el uso del agua subterránea.

1. La cuenca del río Pinula se encuentra en un área montañosa, con pendientes de gran magnitud con aproximadamente 100 metros de diferencia de una zona a otra, y siendo la cuenca de mayor extensión es viable una mejor infiltración en el sub-suelo.
2. Al utilizar áreas de gran vegetación con pendientes leves se obtiene un coeficiente de escorrentía mayor para tener un mayor tiempo de recarga en suelos de moderada permeabilidad. Con esto se logra construir pozos de 30 metros de profundidad en serie a una distancia de 10 metros entre sí para desfogar la cantidad de agua necesaria.
3. Al seleccionar una zona de recarga hídrica como “El cambray”, se garantiza una recarga hídrica eficiente, los factores de topografía, vegetación, cercanía al casco urbano y área controlada por ente municipal garantizan una recarga por una larga cantidad de años.
4. Del año 1978 al 2018 se ha registrado un descenso en los niveles del nivel freático según los últimos reportes de 400 metros de profundidad, el descenso en el municipio de Santa Catarina Pinula se presenta un descenso en los niveles piezométricos dinámicos y estático parciales de agua subterránea de 120 metros del año 1978 al 2018.

1. Se recomienda un análisis financiero del proyecto para conocer su viabilidad y poder aplicarlo y hacerlo realidad, de igual manera un diseño de captación para poder transportar el agua captada a los diferentes pozos de infiltración.
2. Que el Congreso de la República de Guatemala pueda admitir y dar lectura a las iniciativas de ley propuestas por diferentes sectores del país y así poder tener un control más riguroso de la explotación de los mantos acuíferos, ríos y demás cuerpos de agua a nivel nacional.
3. Que las Municipalidades en general, incluyan en sus normativas y requisitos para otorgar una licencia de construcción, la construcción de como mínimo un pozo de absorción para realizar un balance en la extracción y la infiltración de aguas.
4. Que la información manejada por las entidades encargadas del manejo sustentable del agua sea pública y expuesta a cualquier persona, esto debido a que es un trámite bastante tedioso el encontrar información actualizada o validada y más aún, solicitar información a las entidades encargadas.
5. Realizar trabajos de manera público-privado, en el cual, las municipalidades o entidades de gobierno puedan realizar la construcción de áreas de recarga hídrica con el apoyo privado, es decir, el área pública indica el terreno o la zona y se realizan los complejos de recarga hídrica bajo el área privada.
6. Las zonas escogidas para recarga hídrica deberán cumplir una serie de requisitos indispensables para poder ser consideradas, el garantizar la no construcción o alteración hacia la topografía, una zona con vegetación, de esta manera se podrá realizar una recarga efectiva por un largo periodo de tiempo.

7. El constante monitoreo a los niveles de los acuíferos y realizar estudios que propongan una alternativa a la explotación del agua subterránea en épocas de verano, de esta manera los niveles de los acuíferos podrán mantener sus niveles e incluso incrementarlos en épocas de invierno.
8. Que la cooperación internacional trabaje en conjunto junto a EMPAGUA y las municipalidades encargadas de la distribución del agua sobre nuevas técnicas de el uso y reutilización del agua en zonas de industria y zonas comerciales.
9. Las empresas en el cual el giro de negocio involucre gran cantidad de metros cúbicos de agua, obligatoriamente realizar el tratamiento correspondiente a los desechos y realizar proyectos de recarga en compensación o balance del recurso.

Literatura citada:

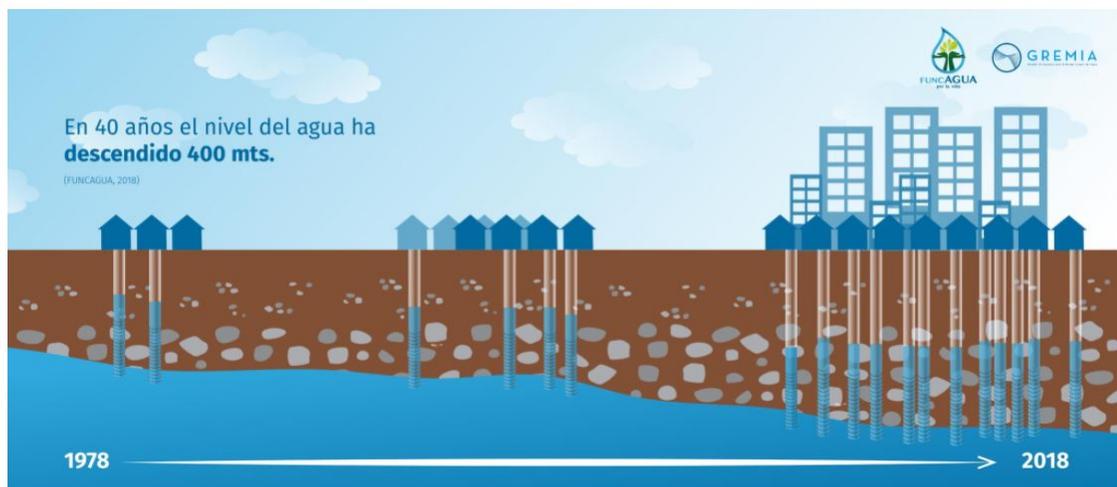
- Congreso de la República de Guatemala. (1989). *Decreto No. 4-89*. Ley de Áreas Protegidas. Guatemala.
- Congreso de la República de Guatemala. (1996). *Decreto No. 74-96*. Ley del Fomento de la Educación Ambiental.
- Congreso de la República de Guatemala. (1986). *Decreto No. 68-86*. Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.
- CPRG. (1985). *Constitución Política de la República de Guatemala*. Guatemala. Asamblea Nacional Constituyente.
- EMPAGUA. (2006). *Situación Actual de los Recursos Hídricos en Guatemala. Estudio Hidrológico en el Valle de la Ciudad de Guatemala*. Proyecto de Emergencia. Municipalidad de Guatemala. Tomo I.
- FODECYT. (2010).). *Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en la sub-cuencas de los Ríos Taco y Shusho, Municipio de Chiquimula*. FODECYT. Guatemala.
- MARN, AMASURLI. (2007). *Plan de acción integrado de la cuenca del Lago de Izabal-Río Dulce*. Guatemala, 78 págs.
- MARN. (2008). *Manual de Educación Ambiental sobre el Recurso Hídrico en el Área Metropolitana*. Guatemala. 66 págs.
- MARN. (2008). *Manual General del Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Acuerdo Ministerial 105- 2008.

- SIAPA. (2014). *Infiltración Pluvial..* Lineamientos Técnicos para Factibilidades. Febrero, 2014. Cap 5. 10 Págs

Enlaces web:

- AQUAE. (2021). *La escorrentía: un proceso clave en el ciclo del agua.* 2021. Sitio web: <https://www.fundacionaquae.org/escorrentia/>
- ChileCubica. (2017). *Pozos de Infiltración.* 2021. Sitio web: <https://www.chilecubica.com/vocabularios-definiciones/pozos-de-infiltración/>
- Dr. Juan Julio Ordoñez Gálvez. (2011). *Aguas subterráneas-acuíferos.* GWP. 2011. sitio web: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf
- EMPAGUA. (2018). *Empresa Municipal de Agua de la ciudad de Guatemala, Manual de Labores.* 2019. Sitio web: http://docs.muniguate.com/2019/memoria/arch/MEMORIA_DE_LABORES_2018_EMPRESA_MUNICIPAL_DE_AGUA_EMPAGUA.pdf
- FAO. (2008). *La Microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales.* 2012. Sitio web: <http://www.fao.org/climatechange/30329-07fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>
- FUNCAGUA. (2020). *Agua en Guatemala.* 2021. Sitio web: <https://funcagua.org.gt/agua-en-guatemala/>
- INAB. (2005). *Programa de Investigación de Hidrología Forestal.* 2019. Sitio web: http://portal.inab.gob.gt/images/servicios_en_linea/investigacion_forestal/programa_nacional_investigacion_forestal_inab.pdf
- ILCE. (2019). *El Agua, ¿Qué Cosa es?.* 2019. Sitio web: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/102/html/sec4.html>
- Ing. Agr. Mario Estuardo de Paz Pérez. (2016). *Importancia del ordenamiento territorial en los municipios de Guatemala.* ANAM. 2021. Sitio web: <https://anam.org.gt/2016/12/23/importancia-del-ordenamiento-territorial-en-los-municipios-de-guatemala/>

Figura 40: Cambio en el nivel del agua subterránea



Fuente: (FUNCAGUA, 2018).

Figura 41: Red de flujo en Santa Catarina Pinula

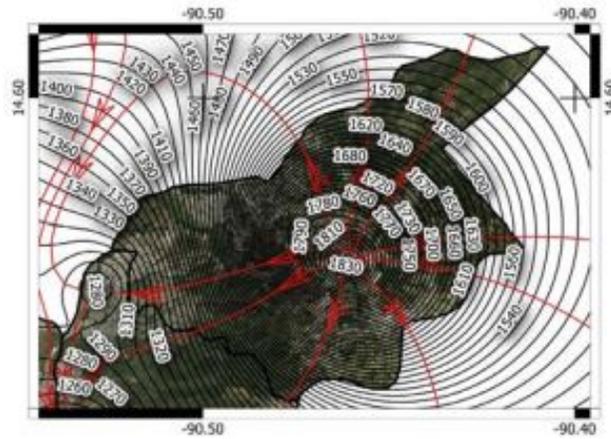


Imagen 4-22. Red de flujo del nivel estático de pozos en 1978 de Santa Catarina Pinula.

Fuente: (FUNCAGUA,2018).

Figura 42: Perfil de distribución Santa Catarina Pinula

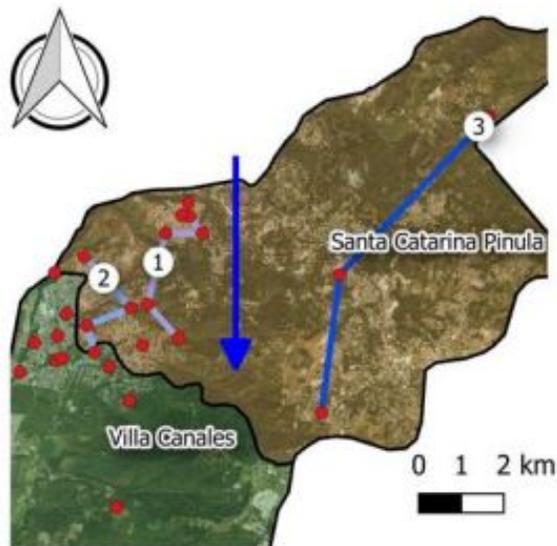


Imagen 4-27. Ubicación de Perfiles del municipio de Santa Catarina Pinula.

Fuente: (FUNCAGUA,2018).

Figura 43: Control de pozos en Santa Catarina Pinula

B. Tabla de datos para la creación de perfiles y redes de flujo en el software QGIS época lluviosa.

Municipio	Pozo	Latitud	Longitud	Altura msnm	Profundidad en msnm	Periodos de trabajo del pozo - hrs al día	Nivel estático	Nivel estático msnm	Nivel dinámico	Nivel dinámico msnm	Fecha del levantamiento
Santa Catarina Pinula	LA CEIBA 2	14.57102	-90.49605	1556	1069	24	146	1411	148	1408	23-Oct
Santa Catarina Pinula	EL ESTADIO	14.567507	-90.50112	1556	1076	24	152	1404	167	1389	23-Oct
Santa Catarina Pinula	EL RASTRO	14.571382	-90.49776	1558	1284	24	155	1403	163	1396	23-Oct
Santa Catarina Pinula	EL CEMENTERIO 1	14.57387	-90.49632	1585	1310	24	212	1373	208	1377	23-Oct
Santa Catarina Pinula	EL HUISITAL	14.567546	-90.4934	1578	1334	24	208	1370	203	1374	23-Oct
Santa Catarina Pinula	EL JORDAN	14.552494	-90.50496	1482	1238	24	198	1285	202	1280	23-Oct
Santa Catarina Pinula	SECTOR IV	14.551776	-90.50848	1456	1060	24	258	1198	270	1186	23-Oct
Santa Catarina Pinula	LA CUCHILLA - LA ESCUELA No. 823	14.562548	-90.51834	1456	1192	24	214	1243	214	1242	23-Oct

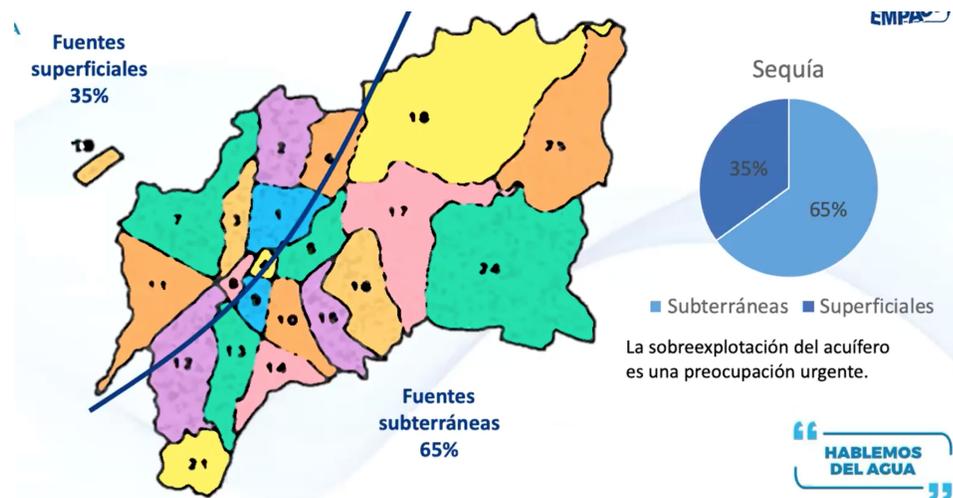
Fuente: (FUNCAGUA,2018).

Figura 44: Control de pozos en Santa Catarina Pinula

Santa Catarina Pinula	LA ARBOLEDA	14.54798	-90.517784	1393	1149	24	86	1307	93	1299	23-Oct
Santa Catarina Pinula	SECTOR VI	14.542377	-90.51611	1358	901	24	102	1256	124	1234	23-Oct
Santa Catarina Pinula	LA SALVADORA I	14.545349	-90.49842	1486	1248	24	104	1382	126	1360	23-Oct
Santa Catarina Pinula	ARCO AZUL	14.558782	-90.46423	1880	1423	24	267	1613	267.9	1612	24-Oct
Santa Catarina Pinula	EL CANCHON	14.529581	-90.46814	1916	1511	24	228	1688	228	1688	24-Oct
Santa Catarina Pinula	EL MANZANO I - LA IGLESIA	14.592186	-90.432785	1682	1429	26	246	1436	246.4	1435	24-Oct

Fuente: (FUNCAGUA,2018).

Figura 45: Utilización del agua en temporada de verano



Fuente: (FUNCAGUA,2018).

Figura 46: Consumo del agua dependiendo el segmento

SEGMENTACION CUENTAS	No. Cuentas	m3 Facturados	%	m3/cuenta
PARTICULARES	182,272	5,111,381	81	28
ASENTAMIENTOS ALCANTARILLADO MARISCAL	26,239	26,222	12	1
BANVI II	6,100	0	3	0
BANVI I	3,446	3,446	2	1
GOBIERNO	2,199	4,679	1	2
HACIENDA REAL	1,160	363,598	1	313
HACIENDA REAL	982	23,793	0	24
Total general	224,866	5,867,286	99	

Equivale a un consumo diario de 208l al día por persona para un hogar de 4.5 personas.

“ HABLEMOS DEL AGUA ”

*Datos reales de facturación enero 2020.

Fuente: (FUNCAGUA,2018).

Figura 47: Cálculo realizados para el análisis

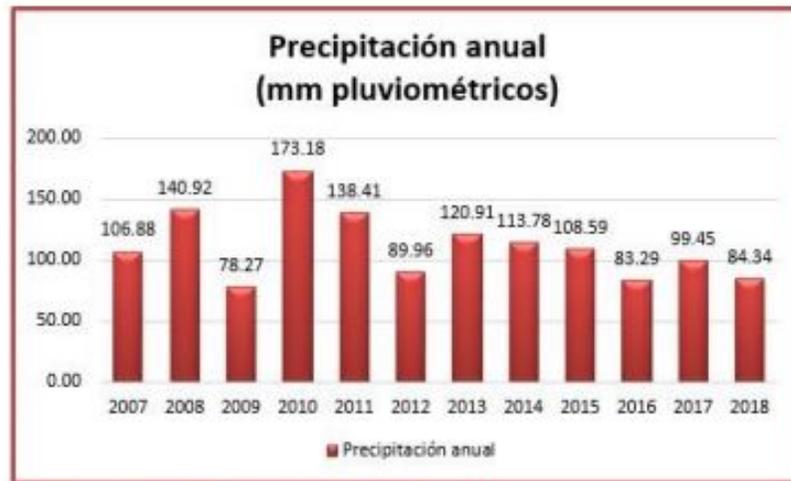
Carlos Herrera
16779

Calculo de cantidad de m³ para poder infiltrar

Datos obtenidos del INE del año 2018, mas reciente

Precipitación mensual (mm pluviométricos)

- A := 106.88
- B := 140.92
- C := 78.27
- D := 173.18
- E := 138.41
- F := 89.96
- G := 120.91
- H := 113.78
- I := 108.59
- J := 83.29
- K := 99.45
- L := 84.34



$$PROM := \frac{(A+B+C+D+E+F+G+H+I+J+K+L)}{12} = 111.498 \quad (\text{mm})$$

Se agrega un factor de seguridad del 10% mas de lluvias por no tener amplia variedad de información.

$$Pdi := PROM + (PROM \cdot 10\%) = 122.648 \quad (\text{mm})$$

Calculo de Caudal $Sup := 5412.48 \text{ m}^2 + 3275.32 \text{ m}^2 + 4706.32 \text{ m}^2 = 0.013 \text{ km}^2$
 $Sup1 := 0.013$

Corrección de la precipitación diaria

$$K_A := 1 - \frac{\log(Sup1)}{15} = 1.126$$

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 48: Cálculo realizados para el análisis

Precipitación diaria corregido

$$P_{dc} = Pdi \cdot K_A = 138.07 \quad (\text{mm})$$

Intensidad media diaria

$$I_d = \frac{P_{dc}}{24} = 5.753 \quad (\text{mm/hora})$$

Tiempo de concentración

Tiempo de concentración por método racional

Longitud según QGIS 6.54 km^2 $L = 6.54$

$$H = \frac{(1540 - 1440)}{6540} = 0.015$$

$$t_{c1} = 0.3 \cdot \frac{6.54^{0.76}}{H^{0.19}} = 2.766 \quad \text{horas}$$

Tiempo de escorrentía por el método de Kirpich

$$t_{c2} = \frac{10 \cdot L^{1.155}}{513 \cdot H^{0.385}} = 0.853$$

Tiempo de escorrentía por el método de Chow

$$t_{c3} = \frac{L^{1.29}}{10 \cdot H^{0.32}} = 4.296$$

Tiempo de escorrentía por el método de Watt-Chow

$$t_{c4} = \frac{L^{1.29}}{33 \cdot H^{0.385}} = 1.781$$

Tiempo de escorrentía por el método de Kerby-Hathway

$n = 0.4$ bosque frondoso

$$t_{c5} = \frac{1.4441 \cdot L^{0.303} \cdot n^{0.47}}{H^{0.33} \cdot I_d^{0.4}} = 10.623$$

Tiempo de escorrentía por el método de Onda cinemática

$$t_{c6} = \frac{1.9178 \cdot L^{0.303} \cdot n^{0.6}}{H^{0.33} \cdot I_d^{0.4}} = 12.523$$

Tiempo de escorrentía por el método de Ayres

$$t_{c7} = 31 \cdot \text{Sup1}^{0.57} = 2.608$$

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 49: Cálculo realizados para el análisis

Tiempo de escorrentía por el método de Bransby-Williams

$$t_{c3} = \frac{L^{1.2}}{45 \cdot H^{0.2} \cdot Sup1^{0.1}} = 0.754$$

Se realizan los calculos de tiempo de concentración con los diferentes metodos para tener un promedio y poder tomar un valor ni tan conservador ni muy optimista.

Cálculo de la intensidad para un tiempo igual al tiempo de concentración

$$I_1 = 6$$

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{t_{c3}} \right) = 8.034 \quad \text{para un periodo } t$$

Coefficiente de Escorrentía

$C = 0.25$ Parques y Jardines, con lluvias largas

Coefficiente de escorrentía. Calc. de caudales. F. Catalá

Tipo area	C lluvias corta	C lluvias largas
Residencial >150 viviendas/ha	0.70 a 1.00	1.00
Residencial de 100 a 150 v/ha	0.75 a 1.00	1.00
Residencial de 50 a 100 v/ha	0.65 a 0.80	1.00
Residencial de 25 a 50 v/ha	0.40 a 0.70	1.00
Residencial de 10 a 25 v/ha	0.30 a 0.50	0.80 a 0.90
Residencial de 5 a 10 v/ha	0.25 a 0.35	0.60 a 0.80
Residencial de 0 a 5 v/ha	0.10 a 0.25	0.50 a 0.60
Comercial céntrico	0.70 a 0.95	1.00
Comercial periférico	0.50 a 0.70	1.00
Industrial	0.50 a 0.90	1.00
Deportiva	0.20 a 0.35	0.50
Parques y jardines	0.10 a 0.25	0.40
Pavimentos hormigón, aglomerado..	0.90 a 1.00	1.00
Pavimentos adoquinados	0.60 a 0.80	1.00
Pavimentos de ladrillo	0.70 a 0.85	1.00
Pavimentos espedrados	0.40 a 0.50	1.00
Pavimentos de grava	0.20 a 0.30	1.00
Cubierta	0.90 a 1.00	1.00
Cultivos (según pendiente)	0.05 a 0.20	0.15 a 0.50
Bosques (según pendiente)	0.05 a 0.15	0.10 a 0.35

Cálculo del coeficiente de uniformidad temporal

$$K_t = 1 + \frac{t_{c3}^{1.25}}{t_{c3}^{1.25} + 14} = 1.306$$

Cálculo del caudal

$$Q = \frac{C \cdot I_t \cdot Sup1 \cdot K_t}{3.6} = 0.00948 \quad (\text{m}^3/\text{seg})$$

$$Q_{litros} = Q \cdot \left(\frac{1000}{1} \right) \cdot \left(\frac{60}{1} \right) \cdot \left(\frac{60}{1} \right) = 34113.346 \quad \text{litros/hora}$$

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 50: Cálculo realizados para el análisis

Prueba de absorción de suelo, datos obtenidos de un estudio realizado que no se admite su publicación.

Pozo 4, Bosque de parte baja, radio de 18 cm, con un coeficiente k de 15.7 con un porcentaje de infiltración de 76.7%

Es equivalente a 15.7 litros/m² por hora.

$$k = 15.7$$

Volumen de un cilindro

Pozos de 1.10 metros de diámetros por 30 metros de profundidad

$$r = 0.55 \text{ m}$$

$$h = 30 \text{ m}$$

$$Vol = \pi \cdot r^2 \cdot h = 28.51 \text{ m}^3$$

Cantidad de metros cuadrados necesarios para desfogar el agua

$$M_{total} = \frac{Q_{litros}}{k} = 2172.825$$

$$h_{total} = \frac{M_{total}}{\pi \cdot 1.1} = 628.756 \quad \text{Cantidad de metros necesarios para absorber el agua}$$

La condición indica que lo recomendable es realizar pozos de infiltración no mayor a 30 metros de profundidad para evitar sobre costos.

$$CantidadPozos = \frac{h_{total}}{30} = 20.959$$

Se realizaran 21 pozos de 30 metros de profundidad para abarcar la cantidad de litros por metros cuadrados.

Fuente: (Elaboración propia).

Figura 51: Métodos de calculo de tiempo de concentración

● Fórmulas para estimar el t_c [min] de cuencas. L [m] es longitud del cauce más largo (desde parte aguas hasta la sección de control), H [m] es el desnivel de L.

Autor (Ec.)	Fórmula para t_c	Observación
KIRPICH (5.2)	$t_c = \frac{1L^{1.155}}{513H^{0.385}}$	Para cuencas agrícolas pequeñas. Derivada con cuencas con $A < 0.5 \text{ km}^2$. La más común en nuestro medio. Algunos autores la consideran que subestima los valores menores de t_c .
CHOW (5.3)	$t_c = \frac{L^{1.14}}{10H^{0.32}}$	Derivada con cuencas de diferentes regiones geográficas con $A < 20 \text{ km}^2$.
WATT-CHOW (5.4)	$t_c = \frac{L^{1.29}}{33H^{0.395}}$	Derivada con cuencas de diferentes regiones geográficas con $A < 5840 \text{ km}^2$ y pendientes de $L < 0.1$.
SCS (5.5)	$t_c = \frac{3L^{1.3}}{220H^{0.5}} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$	CN = curva número, Sec. 5.5.2, para cuencas pequeñas, $A < 8 \text{ km}^2$. Se usa frecuentemente conjuntamente con la técnica del hidrograma sintético del SCS.
KERBY-HATHWAY (5.6)	$t_c = \frac{1.444L^{0.706}n^{0.47}}{H^{0.235}}$	n = coef. rugosidad de MANNING (ver Sec. 6.3.4). n=0.02 para áreas lisas e impermeables, n=0.1 para suelos bajo barbecho, n=0.2 para suelos con cultivos de cereales, n=0.4 praderas, n=0.6 bosque frondoso, n=0.8 bosque con broza profunda. i = intensidad de lluvia efectiva [mm/hr].
Onda cinemática (5.7)	$t_c = \frac{1.9178L^{0.93}n^{0.6}}{H^{0.33}i^{0.4}}$	
AYRES (5.8)	$t_c = 31A^{0.57}$	A = área de la cuenca [km^2].
BRANSBY-WILLIAMS (5.9)	$t_c = \frac{L^{1.2}}{45H^{0.2}A^{0.1}}$	

Fuente: (Elaboración propia).