



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS REPRESENTATIVOS UBICADOS EN LA
ZONA 18 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Stephanie Samantha Gordillo Sandoval

Asesorado por MSc. Ing. Dany Esaú López Bautista

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS REPRESENTATIVOS UBICADOS EN LA
ZONA 18 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

STEPHANIE SAMANTHA GORDILLO SANDOVAL
ASESORADO POR MSC. ING. DANY ESAÚ LÓPEZ BAUTISTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Alejandro Arévalo Valdez
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS REPRESENTATIVOS UBICADOS EN LA ZONA 18 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 05 de agosto de 2021.

Stephanie Samantha Gordillo Sandoval



EEPFI-PP-0212-2022
Guatemala, 14 de enero de 2022

Director
Armando Fuentes Roca
Escuela De Ingeniería Civil
Presente.

Estimado Mtro. Fuentes


Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

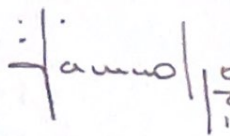
El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS REPRESENTATIVOS UBICADOS EN LA ZONA 18 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Hidrogeología - Obras subterráneas**, presentado por la estudiante **Stephanie Samantha Gordillo Sandoval** carné número **201408514**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en CIENCIAS en Ingeniería Geotécnica.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

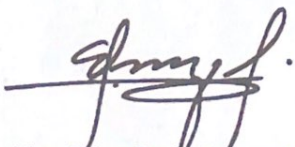
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Dany Esaú López Bautista
Asesor(a)
Ing. Agr. Dany López Bautista, M.Sc.
Colegiado No. 2,632


Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador(a) de Maestría




Mtro. Edgar Darío Alvaréz Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP.EIC.0212.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS REPRESENTATIVOS UBICADOS EN LA ZONA 18 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Stephanie Samantha Gordillo Sandoval**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Mtro. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela De Ingenieria Civil

Guatemala, enero de 2022





Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.392.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS REPRESENTATIVOS UBICADOS EN LA ZONA 18 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por: **Stephanie Samantha Gordillo Sandoval**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada 

Decana

Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi soporte espiritual y darme paz en cada momento de la carrera.
Mi padre	Ricardo Gordillo. Su apoyo incondicional, su inconmensurable esfuerzo por darme siempre lo mejor y por ser mi ejemplo de éxito y superación.
Mi madre	Yessenia Sandoval. Por ser mi ejemplo a seguir, por enseñarme e inculcarme los valores para ser una persona de bien y una mujer fuerte e independiente.
Mi hermano	Richard Gordillo. Por ser mi mejor amigo y compañero de aventuras durante toda mi vida. Por su amor y acompañamiento.
Mi novio	Julio Flores. Por su apoyo incondicional, por siempre impulsarme a no darme por vencida y ser mi mejor versión y, por inspirarme con su amor y determinación, a alcanzar todas mis metas.
Mi familia	Por acompañarme en cada etapa de mi vida, por siempre brindarme palabras de amor y motivación en mi travesía universitaria.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi segundo hogar.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos técnicos necesarios para iniciar mi vida profesional.
Escuela de Estudios de Posgrado de Ingeniería	Por apoyarme con mi crecimiento profesional y técnico.
Mis amigos	Por todos los momentos buenos y malos compartidos y por ser parte fundamental en mi vida. Por su apoyo y cariño incondicional.
Mi asesor	Dany López. Por su acompañamiento y aporte a este trabajo de investigación y por su disposición a siempre apoyarme en cada etapa desarrollada.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos	17
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	19
7. MARCO TEÓRICO.....	21
7.1. Geología y relieve.....	21
7.1.1. Geología regional	21
7.1.2. Geología local.....	22
7.1.3. Geomorfología	22
7.2. Hidrogeología	23

7.2.1.	Ciclo hidrogeológico	24
7.2.2.	Recarga hídrica	25
7.3.	Recursos hidrogeológicos	26
7.3.1.	Superficiales.....	26
7.3.2.	Subterráneos.....	26
7.4.	Acuíferos	27
7.4.1.	Acuíferos libres.....	27
7.4.2.	Acuíferos confinados.....	27
7.4.3.	Acuíferos semiconfinados	28
7.4.4.	Propiedades de los acuíferos	29
7.4.5.	Extracción de agua subterránea.....	29
7.5.	Pozos mecánicos	29
7.5.1.	Nivel freático.....	29
7.5.2.	Nivel estático	30
7.5.3.	Nivel dinámico	30
7.5.4.	Caudal de producción	30
7.6.	Calidad del agua	31
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	33
9.	METODOLOGÍA	37
9.1.	Fase I: revisión documental	37
9.1.1.	Antecedentes	38
9.1.2.	Marco teórico.....	38
9.1.3.	Recopilación de datos históricos de las variables de análisis	38
9.2.	Fase II: trabajo de campo.....	38
9.2.1.	Muestra	39
9.3.	Fase III: análisis estadístico	40

9.3.1.	Resultados.....	40
9.4.	Fase IV: redacción y publicación de informe final y científico..	41
9.4.1.	Informe final.....	41
9.4.2.	Informe científico	41
9.4.3.	Exposición oral de resultados.....	41
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	43
10.1.	Ordenamiento y tabulación de datos	43
10.2.	Estadística descriptiva.....	43
10.3.	Estadística inferencial.....	44
11.	CRONOGRAMA.....	45
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	47
13.	REFERENCIAS.....	49
14.	APÉNDICES.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo Hidrológico	24
2.	Tipos de acuíferos.....	28
3.	Diagrama de pozos mecánicos	31
4.	Cronograma	45

TABLAS

I.	Límites máximos aceptables y permisibles características químicas.....	32
II.	Límites máximos aceptables y permisibles características físicas	32
III.	Presupuesto	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
mm³	Milímetro cúbico
%	Porcentaje
Q	Quetzales

GLOSARIO

COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
EMPAGUA	Empresa Municipal de Agua.
FUNCAGUA	Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala.
INE	Instituto Nacional de Estadística.
MARN	Ministerio de Agricultura y Recursos Naturales.
NTG	Norma Técnica Guatemalteca.
SER	Servicios para el Desarrollo.
SIG	Sistema de Información Geográfica.

RESUMEN

En el siguiente documento se presenta el protocolo de investigación trabajado para el tema “Evaluación de los niveles de agua subterránea en los pozos representativos en la zona 18 de la Ciudad de Guatemala”.

Dentro del mismo se detalla el objetivo que se persigue a partir de la revisión de datos históricos, trabajo de campo y del desarrollo estadístico de las variables de análisis. Asimismo, se plantean, de forma específica, los procedimientos a seguir para responder al problema central de la investigación.

De igual forma, se identifican las fases para desarrollar el trabajo de investigación, así como las variables de análisis y la metodología a emplear. Además, en los primeros capítulos se realiza una retrospectiva de investigaciones previas orientadas a la misma problemática a nivel mundial, permitiendo de esta manera enfatizar la importancia del estudio.

Finalmente, se plantea la factibilidad del estudio, así como el cronograma de desarrollo de cada fase; incluyendo también el árbol de problemas y la matriz de coherencia donde se desglosan las variables, los índices e indicadores que se tomarán como base para la realización del trabajo de investigación.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es una de las necesidades fundamentales de todo ser humano, durante años ha sido utilizada para todo tipo de usos tanto industriales como residenciales. Sin embargo, la contaminación de las fuentes superficiales, el uso desmedido y la sobreexplotación de los acuíferos han ocasionado un desabastecimiento del recurso a nivel global, presentando una problemática que afecta a gran parte de la población mundial provocando una creciente necesidad de plantear soluciones sustentables para la conservación del agua con el objetivo de aumentar la vida útil de los acuíferos aprovechables.

En Guatemala, el riesgo de desabastecimiento de agua es aún mayor puesto que no existen leyes que regulen la extracción de agua subterránea, dando lugar a un uso, manejo y aprovechamiento descontrolado de los acuíferos en algunos lugares del país; asimismo, al no tener concentración de información en instituciones se limita el análisis y generación de propuestas dirigidas a la identificación y protección de zonas de recarga, identificación de zonas críticas de aprovechamiento, afectación entre pozos y reconocimiento de cuencas hidrogeológicas.

Esta situación motiva a generar información que contribuya a conocer cuál es el comportamiento del agua subterránea en pozos representativos ubicados en la zona 18 en los últimos diez años, con la finalidad de generar alertas que permitan a las instituciones y población en general, prepararse y tomar acciones de acuerdo a los resultados de esta evaluación, considerando también que, en esta zona de la ciudad de Guatemala, se

presenta un porcentaje del 20 % de la cantidad total de viviendas del departamento de Guatemala. (Morataya, 2011, p. 20)

Asimismo, menciona Martínez que la zona 18 ha reforzado su densidad poblacional desde 1994, además hace hincapié en que “En cuanto a la vivienda, las zonas municipales con mayor localización de viviendas para 2018 fueron: la 18, con 58,416 unidades, y la zona 7, con 36,607”. (Martínez, 2020, p. 7)

Dentro de la ciudad capital, uno de los lugares más afectados como consecuencia del crecimiento poblacional y el incremento de obras civiles es la zona 18, donde en los últimos años gran parte de su población ha experimentado un servicio deficiente de agua potable con una dotación nula o intermitente debido a que las profundidades de perforación cada vez son mayores y el potencial hídrico de los pozos que actualmente se encuentran en uso está llegando a su límite. Como mencionan Domínguez y Pérez (2020) “Los vecinos aseguran que el servicio es irregular desde hace más de año y medio” (p. 3).

Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente y con el objetivo de generar información que ayude a la población y autoridades a la toma de decisiones para el manejo sustentable de los pozos y en general del acuífero que actualmente abastece de agua en la zona 18, este trabajo de investigación permitirá obtener el valor del potencial hídrico de los pozos de estudio mediante la obtención de mediciones de los niveles estáticos, dinámicos; profundidad, así como el análisis de los datos históricos para realizar una comparación de la variabilidad del recurso en un lapso de 10 años, con la finalidad de proyectar estadísticamente el tiempo de vida útil de los pozos que actualmente se encuentran en funcionamiento en el área de estudio.

2. ANTECEDENTES

Para el presente estudio se recopilará información de la zona referente a las mediciones históricas de niveles de agua subterránea en pozos, de fuentes para la identificación de zonas de recarga hídrica y de los volúmenes de extracción de agua. Asimismo, para llevar a cabo el trabajo de investigación, es necesario conocer si se han realizado estudios previos en Guatemala respecto a la expectativa de vida útil de los mantos freáticos para prever la escasez del recurso agua.

Como primer ejemplo el autor, Murillo (2004), en su tesis de doctorado titulada Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del Bajo Guadalquivir, desarrolla la creación de un código que permita realizar el cálculo de la recarga hídrica natural a los acuíferos del área de estudio utilizando como metodología la valuación del balance hídrico tanto en el suelo como en los mantos freáticos. Además, también correlaciona la relación entre las variables de análisis y su efecto en la determinación de la recarga. Como resultado, el investigador presenta un modelo conceptual y matemático en un formato que permite realizar cálculos de la recarga a los mantos freáticos por infiltración, producto de la precipitación, y por riego en el área de estudio a partir de la introducción de parámetros iniciales; posteriormente, el patrón deduce variaciones en las variables e infiere la recarga.

De igual forma, Tuñón (2000) en su tesis doctoral titulada Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas, realiza un estudio de las consecuencias que genera la explotación de los acuíferos, asimismo, efectúa una estimación de la

recarga hídrica mediante el cálculo de los valores de evapotranspiración. Los resultados obtenidos permitieron obtener una deducción, mediante métodos matemáticos, del balance hídrico y del potencial de los recursos subterráneos; también se definió el estado del caudal de extracción (bombeo) debido a las fuentes de recarga natural.

Morales (2012), por su parte, en su tesis de maestría titulada Evaluación del descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero metropolitano en el valle de Guatemala, realiza un análisis en la variación de espacio y de tiempo de los niveles freáticos de los pozos ubicados en el acuífero metropolitano del país mediante la determinación de la velocidad de descenso y la tasa de extracción anual de agua en los pozos, así como, la identificación de la obra más crítica considerando como variables de estudio el caudal de extracción y la profundidad de perforación. Como resultados, la investigación presenta el período de finalización de su potencial hídrico, es decir, el límite de tiempo para su aprovechamiento y la variación de los niveles freáticos de los sectores de interés.

Asimismo, Bardales (2010) en su tesis de maestría titulada Estimación del potencial del recurso hídrico subterráneo del Valle de Monjas, Jalapa, Guatemala, plantea el cálculo del balance hídrico del suelo en la ubicación del estudio, así como la caracterización de las condiciones hidroclimáticas y de las propiedades fisicoquímicas del acuífero del Valle de Monjas teniendo como objetivo principal la estimación de la potencialidad de recarga natural ante las condiciones de explotación en el período de análisis. Como resultado, la investigación permitió definir el tipo de material geológico que conforma el suelo, asimismo se obtuvieron los valores de las propiedades hidrogeológicas y se determinó si el acuífero se puede clasificar como aprovechable y productor; además, se encontró el porcentaje utilizado del potencial del manto freático.

El tema de investigación representa gran interés tanto a nivel nacional como internacional, es por ello que, en México, Sánchez (2019), en su tesis de maestría titulada Estimación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca, realiza el cálculo de la recarga de agua subterránea utilizando como metodología el cálculo del balance de masas del del suelo y del acuífero teniendo como objetivo la determinación de la recarga potencial y real. Asimismo, identifica los niveles piezométricos de los pozos ubicados en el área de estudio. Como resultado de la investigación obtuvo la configuración de la evolución de los niveles de agua subterránea, la determinación de la recarga hídrica en el acuífero y la comparación con trabajos previos realizados en el Valle de Toluca, México.

De la misma manera, en Nicaragua, Núñez (2017) en su tesis de maestría titulada Disponibilidad hídrica subterránea y prospección geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua, efectúa el cálculo del potencial hídrico del acuífero subterráneo mediante la realización de mediciones de los niveles estáticos de agua subterránea de los pozos y el monitoreo de la precipitación, además de la obtención de tomografías eléctricas con el fin de determinar la configuración geológica. Como resultado, se determinó la disponibilidad hídrica subterránea para tres escenarios climáticos diferentes y se definieron los niveles críticos en relación con lo requerido para satisfacer la demanda por población.

Continuando en Nicaragua, Martínez (2017), en su tesis de maestría con el título Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Sébaco ante la contaminación y sobrexplotación y propuesta de un plan de gestión del recurso hídrico, plantea un estudio de vulnerabilidad dentro del acuífero mencionado, basado en la información disponible en estudios previos. De igual manera presenta un monitoreo de los pozos, para el levantamiento de sus niveles

estáticos, y otras pruebas para obtener la recarga hídrica por medio de la herramienta de balance hídrico de suelo. Como resultados del proyecto se logró estimar la demanda actual y futura del recurso, así como identificar problemas de índole social y de infraestructura que lo afectan. Por medio de estos datos se propone un plan general de gestión para el recurso.

Por su parte Izabá (2016), en su tesis de maestría titulada Potencial Hídrico y Calidad del Agua asociados con las Condiciones Socioambientales en la Microcuenca del Río Mapachá del Municipio de San Lorenzo, Departamento de Boaco, realiza una caracterización geológica, hidrológica e hidrogeológica, así como mediciones de niveles en los pozos y pruebas de infiltración con el fin de estimar el potencial hídrico de la zona y la calidad de agua de las fuentes subterráneas y superficiales para evaluar la capacidad de abastecimiento de los recursos. Como resultado, se encontró el potencial del acuífero y sus posibles amenazas; adicionalmente, se delimitaron las áreas de recarga hídrica y su contribución manto subterráneo.

Demostrando la importancia de este tipo de investigaciones, Chura (2015), en sus tesis de maestría titulada Evaluación de agua subterránea a través de pozos con fines de riego en la comunidad de Quenapajja–Acora, presenta un estudio de los 16 pozos ubicados en el área de interés empleando como metodología la revisión de datos históricos y la medición de niveles freáticos con la finalidad de generar mapas de niveles freáticos mínimos, mapas de isohipsas e hidrogramas de la información recopilada. Asimismo, también realiza un cálculo del balance hídrico utilizando como variables de análisis la oferta de agua subterránea disponible en el acuífero y la demanda de agua necesaria para suplir las necesidades de riego. Al concluir la investigación, se determinan los valores de conductividad hidráulica, es decir, la capacidad que tienen los pozos de dejar

pasar agua a través de ellos para definir si son óptimos para la explotación y abastecimiento.

Pasando ahora a documentar investigaciones relacionadas al tema realizadas para alcanzar títulos de licenciatura, Samayoa (2016), en su tesis titulada “Recarga de acuíferos mediante infiltración provocada a través de la infraestructura de la red de alcantarillado de la Ciudad de Guatemala”, diseña, tras la realización de distintos estudios de suelos y de calidad de agua, un sistema de captación e infiltración del agua pluvial, con el fin de recargar el acuífero superior de la Ciudad de Guatemala. Como resultado del proyecto se logró la construcción de un sistema para la recarga del acuífero aprovechando la infraestructura de alcantarillado ya existente en la zona. Replicar el estudio realizado en otras zonas puede generar beneficios similares a los conseguidos en el presente proyecto, como la resolución de problemas puntuales de inundaciones derivadas de la poca capacidad de las infraestructuras o la capacidad de evitar los efectos negativos de la erosión en las paredes de los pozos, así como la formación de cavernas que pudieran arriesgar su integridad.

De igual manera, Coló (2014) en su tesis de licenciatura bajo el título Estudio de los niveles freáticos del área Norte y Este de la Ciudad Capital, recopila información de datos indispensables como niveles, producción, profundidad o estado de los pozos, por medio de los cuales se realiza un análisis a través de distintos métodos para poder determinar la variación de niveles estáticos anuales de los pozos, así como la variación promedio del sistema, buscando determinar el comportamiento de los acuíferos. Como resultado se logró determinar que el método más exacto para la medición de niveles de agua en pozos es el de medición automática, mientras el de línea de presión es el más práctico. A través de ellos se logró concluir que a partir del 2008 un 73 por ciento de los pozos estudiados presentaron recuperación en sus niveles. Esto debido a

la considerable reducción de la producción en la zona derivada del rediseño en los equipos de bombeo para poder extraer caudales menores.

Montenegro (2013), al igual que en los proyectos anteriores, en su tesis de licenciatura titulada Estudio de aguas subterráneas en las zonas 10 y 14 de la Ciudad de Guatemala, evalúa la condición del acuífero de la zona de interés mediante la realización de un estudio hidrogeológico, tomando como variables de estudio los pozos mecánicos y la explotación del manto subterráneo. Como resultado, se determinó la capacidad de abastecimiento de la zona de interés y los lineamientos necesarios para poder realizar pozos mecánicos funcionales y aprovechables.

Velásquez (1995), por su parte, en su tesis de licenciatura titulada Estudio de los niveles freáticos en el Valle de Guatemala, indaga la variación de los niveles estáticos y dinámicos con la finalidad de definir la tasa de explotación de los acuíferos de estudio y las áreas más críticas, es decir, las que presentan un mayor desabastecimiento de agua subterráneo. Como resultado, el trabajo de investigación presenta una actualización de los descensos de los niveles piezométricos en los pozos, así como de la poca cobertura vegetal disponible para la recarga hídrica natural, repercutiendo directamente en la escasez de agua.

Finalmente, en El Salvador, Chávez *et al.* (2017) presenta en su tesis de licenciatura titulada Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador un estudio con el fin de poder ser utilizado como herramienta de conocimiento técnico-científico para la planificación para el ordenamiento del territorio y la gestión integrada del recurso hídrico, pues la información era escasa previa a la investigación. Los autores describen de las características biofísicas de las zonas con potencial de recarga

acuífero, obtenidas de estudios previos y de un mapa de recarga acuífera, y realizan un análisis de las condiciones para infiltración, utilizando para el cálculo de este, la metodología del balance hídrico en suelos para conocer el volumen de recarga anual del recurso analizado.

Al finalizar la investigación, se logra definir que la recarga del acuífero es de manera directa, por precipitación, con una recarga anual de 44.26 mm³. Asimismo, la utilización de tecnología SIG y el uso de cartografía de mayor detalle permitieron hallar con mayor precisión la ubicación espacial de las zonas potenciales de recarga acuífera, lo que permite que el estudio sea de gran valor para la planificación y ordenamiento del territorio analizado.

Asimismo, fundaciones dedicadas a la conservación del agua han realizado estudios para apoyar con la investigación y el monitoreo de los mantos acuíferos ubicados en la región de Guatemala, partiendo de ese punto, Barales (2019) en el documento técnico titulado *Análisis piezométrico de pozos de agua para los municipios de la mancomunidad Gran Ciudad del Sur* en conjunto con la Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (FUNCAGUA) realiza un análisis comparativo de los niveles piezométricos de los pozos sujetos a estudio desde el año 1978 al 2018, definiendo como objetivo conocer la situación del recurso hídrico de acuerdo a la explotación de los acuíferos. Como resultado del monitoreo contante de los pozos mecánicos, se obtuvieron los valores de descenso de los niveles estáticos a través del tiempo y la situación actual de aprovechamiento y potencial de explotación.

Como se ha mencionado en los trabajos citados, los autores han realizado investigaciones referentes a variables de estudio como recarga hídrica, balance hídrico, niveles piezométricos y potencial del recurso hídrico; sin embargo, no se

ha determinado la expectativa de vida útil de los pozos mecánicos que se abastecen del acuífero de la zona 18 de la Ciudad de Guatemala considerando las variables descritas con anterioridad mediante campañas de campo y análisis de datos históricos en los pozos mecánicos perforados en el área.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el agua subterránea se ha convertido en una fuente imprescindible de abastecimiento tanto para la ciudad como para el área rural. Según el Fondo de Agua (FUNCAGUA), en la región metropolitana cerca del 50% del agua que se distribuye se origina por la perforación, extracción y explotación de acuíferos; sin embargo, la falta de leyes y limitantes ha repercutido en la sobreexplotación de los acuíferos y en el descenso de los niveles de agua subterránea, así como en la escasez en el abastecimiento a la población. Por lo tanto, conocer el comportamiento de los niveles estático y dinámico actual en los pozos es muy importante, principalmente en las áreas donde el plan de ordenamiento territorial es deficiente y se presenta una alta tasa de sobrepoblación, ya que la extracción se realiza de forma descontrolada.

El desconocimiento de los niveles de agua subterránea en los pozos mecánicos se relaciona directamente con la cantidad de agua aprovechable en los acuíferos, así como con la extracción de agua mediante el uso de equipos de bombeo. No obstante, la dificultad para identificar los acuíferos se origina desde la falta de mapas temáticos de las cuencas hidrogeológicas y de sus propiedades. Además, de la falta de información respecto a la ubicación a nivel macro de los acuíferos aprovechables. Asimismo, el crecimiento exponencial de las construcciones en la ciudad ha disminuido las fuentes naturales de recarga hídrica y ha aumentado la sobreexplotación de agua subterránea para poder suplir las demandas requeridas por la población.

Para el año 2018, según registros del Instituto Nacional de Estadística (INE) el total de viviendas en la ciudad de Guatemala era de 283,756 de las

cuales 58,416 están ubicadas en la zona 18, lo que representa que la densidad de vivienda en esa zona asciende al 20.59 %. En el caso de las regiones sobrepobladas, la capacidad de producción necesaria para la red de distribución es alta, por lo que se necesita un mayor volumen de agua.

Como consecuencia del aumento de la densidad poblacional y habitacional, el área superficial para fuentes de recarga hídrica se ha reducido impactando directamente en la disminución de la infiltración de agua en los suelos, por lo tanto, existe un menor abastecimiento de agua subterránea y, por consiguiente, el potencial hídrico subterráneo ha sido menor. El descenso de dicha recarga repercute directamente en la capacidad de producción de los pozos, de ahí que se tenga actualmente una escasez de agua. Asimismo, el nivel de contaminación en la Ciudad de Guatemala, según el Ministerio de Agricultura y Recursos Naturales (MARN) y el Servicios para el Desarrollo (SER), es mayor al 90% debido a que las fuentes de agua poseen un gran contenido bacteriológico, incluyendo coliformes fecales.

Por lo anterior descrito, se propone el trabajo de investigación Evaluación del comportamiento de los niveles de agua subterránea en pozos representativos ubicados en la zona 18 de la ciudad de Guatemala, con referencia geográfica en la zona 18 del municipio y departamento de Guatemala. Para esto se desarrollaron los siguientes cuestionamientos:

- ¿Cuáles son los niveles estáticos y dinámicos actuales en los pozos representativos del acuífero de la zona 18?
- ¿Cuál ha sido el comportamiento histórico de los niveles de agua subterránea y del caudal de producción de los pozos perforados?

- ¿Cuál es el potencial hídrico actual de los pozos representativos del área de estudio?
- ¿Cuál es estado actual de la calidad del agua de los pozos representativos respecto a los límites máximos establecidos en COGUANOR NTG 29001)?

4. JUSTIFICACIÓN

Un deficiente desarrollo del plan de ordenamiento territorial en algunas zonas del país y un crecimiento urbano desmedido del 1.5 %, según información del Banco Mundial, así como la inexistencia de limitantes respecto al uso y extracción de agua subterránea para abastecimiento en las zonas urbanas y rurales han provocado que los niveles de agua subterránea hayan descendido de forma acelerada en los últimos años, principalmente en las zonas donde se han establecido mayor cantidad de asentamientos. En la Ciudad de Guatemala una de las áreas más afectada es la zona 18, donde, a pesar de colindar con el acuífero del Río de las Vacas, la profundidad de perforación para un pozo mecánico es mucho mayor a la que se presenta en la zona 5.

Al existir un descenso en los niveles del agua subterránea, se identifica que es necesario determinar la expectativa de vida útil de los pozos, así como el potencial hídrico de los mismos, con el fin de brindar una base técnica y real al ente encargado del área de saneamiento en Guatemala para que pueda formular soluciones y reglamentos que fomenten la conservación y el cuidado del recurso hídrico subterráneo. Además, permitirá evaluar la factibilidad de perforar nuevos pozos productivos en el área o rehabilitar, si fuese posible, a los ya existentes.

A través del proyecto de investigación se busca beneficiar a las familias que habitan la zona 18 debido a que en los últimos años se ha evidenciado un desabastecimiento de agua potable y una distribución irregular de este servicio en las colonias que conforman la zona de interés. Como consecuencia directa, ha disminuido la calidad de vida, causando afecciones a la salud y proliferación de enfermedades, según información recopilado por Prensa Libre y por la

Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA). Adicionalmente, la Alcaldía Auxiliar de la zona 18 y EMPAGUA tendrán información para trabajar en conjunto y así definir planes de acción para el manejo y aprovechamiento del agua subterránea, con la finalidad de minimizar el impacto del incremento de demanda.

El estudio pretende dar a conocer el tiempo límite para el aprovechamiento de su potencial hídrico, permitiendo de esta manera que los profesionales y entidades responsables puedan tomarlo de base para la toma de decisiones, de tal forma que, funcione como metodología para replicarlo en otras zonas geográficas, con la finalidad de definir soluciones sostenibles para la conservación del recurso agua. Asimismo, posibilitará que la población tome conciencia del uso correcto del agua y que comprenda que es un recurso finito mediante la creación de acciones preventivas y correctivas que busquen aumentar la vida útil de los acuíferos.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Evaluar los niveles estáticos y dinámicos en pozos representativos ubicados en la zona 18, Ciudad de Guatemala, para inferir su expectativa de vida útil mediante el cálculo del potencial hídrico.

5.2. Específicos

- Analizar los niveles estáticos y dinámicos, así como los caudales de extracción actuales en pozos representativos para contrastar su variación respecto a datos históricos.
- Calcular el nivel de aprovechamiento de los pozos representativos respecto a la profundidad del agua subterránea en estudio para estimar una expectativa de vida útil.
- Contrastar los análisis históricos de la calidad del agua de los pozos representativos respecto a la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001 para evaluar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos respecto a los límites máximos aceptables y permisibles.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Dado el título, las variables y los resultados esperados el alcance de la investigación será descriptivo con un enfoque cuantitativo puesto que se realizará, a partir de la definición de los niveles de agua subterránea y profundidad de los pozos representativos, un análisis del estado actual de la disponibilidad y capacidad de extracción de agua subterránea con el fin de determinar su potencial hídrico y, de esa manera, inferir la expectativa de su vida útil. Además, también se evaluará el estado actual de la calidad del agua de los pozos tomando como herramienta de contraste la Norma COGUANOR NTG 29001, específicamente los límites máximos aceptables y permisibles para los parámetros fisicoquímicos.

Una investigación con alcance descriptivo posibilitará detallar cuál es el estado actual de los pozos mecánicos que se abastecen del acuífero subterráneo de la zona 18, permitiendo así que las entidades encargadas puedan formular soluciones y reglamentos que fomenten la conservación y el uso adecuado del recurso agua. Asimismo, planteará un escenario real del desabastecimiento de agua en el sector y de cómo esto impactará en la calidad de vida de los habitantes de la zona.

De esta forma, la investigación brindará un beneficio directo a cada uno de los habitantes de la zona 18 y a las entidades responsables para poder planificar y ejecutar planes de acción que busquen aprovechar de mejor manera el agua subterránea en la zona, regulando la dotación de agua a cada vivienda con base en su necesidad y su densidad de población.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Geología y relieve

Conocer la geología y el tipo de relieve que caracterizan un área geográfica es fundamental para el análisis de sus propiedades geomorfológicas, dando lugar al estudio del comportamiento de las estructuras que se desarrollaron a lo largo de los años y a su efecto en las formas actuales de la superficie terrestre. Varela (2014) describe a la Geología como “la rama de las Ciencias Naturales que se ocupa del estudio de la Tierra” (p.13). Asimismo, el relieve se puede definir como el modelado resultante de los procesos internos y de los agentes externos que afectan a las placas continentales y oceánicas de la Tierra. Según Tarbuck y Lutgens (2005), “Las principales características de los continentes pueden agruparse en dos categorías diferenciadas; áreas extensas, planas y estables que se han erosionado casi el nivel del mar, y regiones elevadas de rocas deformadas” (p. 21).

La Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA); Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID) (2001) describe a Guatemala como “la más septentrional de las Repúblicas de América Central. Presenta un relieve diverso y complejo, en donde se distinguen desde altas montañas, pie de montes, hasta planicies coluvio-aluviales” (p.1).

7.1.1. Geología regional

El relieve de Guatemala ha sido modelado, en gran parte, por procesos tectónicos, es decir, por el movimiento de las placas sobre las que se encuentra.

Asimismo, el país está ubicado y dividido por los Bloques Maya y Chortí, específicamente en la zona de sutura de la Falla del Motagua. Según Donnelly et al., (1990) “los bloques Maya y Chortí son especialmente importantes para la geología caribeña debido a su extensa estratigrafía del pre – Cretácico y sus basamentos metamórficos del pre – Paleozoico tardío. Estos terrenos basamentales son litológicamente diferentes en los dos bloques”. (p. 1)

7.1.2. Geología local

El departamento de Guatemala presenta estructuras geológicas correspondientes a estructuras resultantes del choque o colisión de dos placas tectónicas. Como describe Beltetón (2001):

La Ciudad de Guatemala, se asienta sobre un graben estructural, controlado principalmente por el sistema de fallamiento de Motagua-Polochic. Este valle formado por este graben está limitado al oeste por la zona de fallas de Mixco; al este por la zona de fallas de Santa Catarina; al sur por el volcán de Pacaya y la caldera de Amatitlán; y, al norte por rocas cretácicas principalmente calizas y granitos. (p. 33)

7.1.3. Geomorfología

La geomorfología se encarga del estudio de las causas de formación de los distintos tipos de relieve. Como dice Gutiérrez (2008):

El relieve de la superficie terrestre es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como creadora de las grandes elevaciones y depresiones, producidas fundamentalmente por movimientos de componente vertical y, las segundas, como

desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado. (p. 10)

Es por ello, que el relieve de la Ciudad de Guatemala ha sido modificado a lo largo del tiempo por procesos internos y externos, siendo uno de los principales representantes el hombre.

El ser humano, durante años, ha realizado cambios en el relieve debido a la constante realización de construcciones de obra civil y al aumento de la densidad habitacional. En Guatemala, una de las zonas que presenta un mayor crecimiento en su densidad poblacional es la zona 18. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE) como resultado del Censo Nacional de Población y Vivienda efectuado en el año 2018, el municipio de Guatemala tiene una población total de 923,392 habitantes. Asimismo, Prensa Libre (2018), en un artículo, indica que “La zona 18 tiene 400 mil habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística” (párr. 8)

La zona 18 presenta zonas altas, debido a que una parte de su densidad habitacional se encuentra asentada en elevaciones de relieve, no obstante, también hay otra gran parte que se encuentra en superficies más planas.

7.2. Hidrogeología

La hidrogeología se encarga del estudio y análisis del comportamiento del agua subterránea, así como de su origen y ocurrencia en el ciclo hidrogeológico. Como dice Campillo et al. (2012) citan a Custodio y Llamas (1996) “parte de la hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en

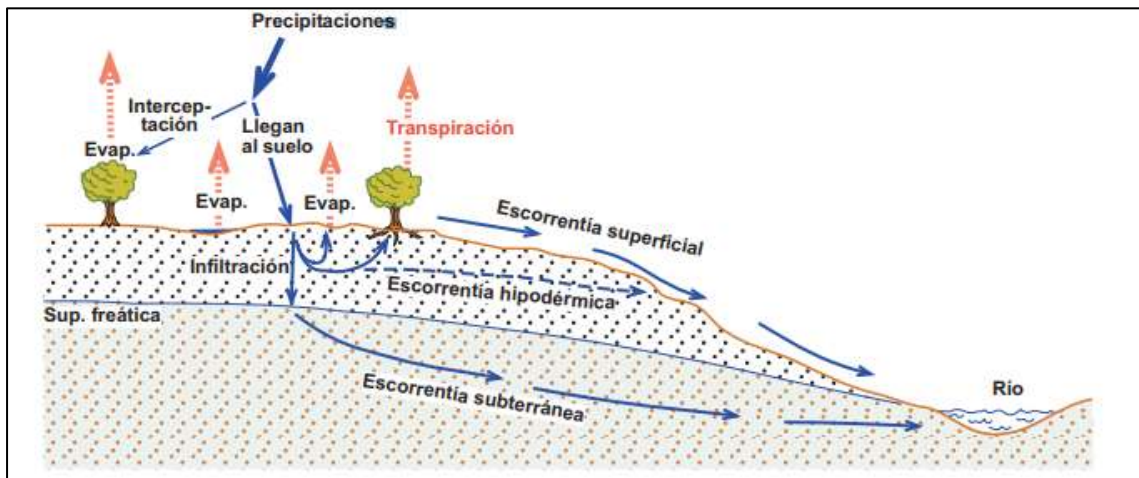
cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico”. (p. 18)

Una de las bases de estudio para la hidrogeología es la comprensión y análisis de la ocurrencia del ciclo hidrológico y de su relación directa con los acuíferos subterráneos.

7.2.1. Ciclo hidrológico

“Se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea” (Sánchez, s.f., p. 2).

Figura 1. **Ciclo Hidrológico**



Fuente: Sánchez. (s.f.). *El ciclo hidrológico*. Consultado el 5 de octubre de 2021.

Recuperado de: https://hidrologia.usal.es/temas/Ciclo_hidrol.pdf.

El ciclo hidrológico contempla la existencia de distintas variables, que, de acorde a su comportamiento y etapa dentro del ciclo, conforman entradas y salidas al sistema hidrológico que permiten, a partir de la metodología de balance de masas, realizar cualquier cálculo que se requiera realizar pertinente al estado de una unidad, por ejemplo, una cuenca.

Una de las variables de estudio más importantes para determinar el comportamiento y movimiento natural del agua en un ciclo hidrológico es la precipitación. La cual se define como “cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo. (También rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total)”. (Sánchez, s.f., p. 2)

Sánchez (s.f.) indica que “el estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca”. (p. 4)

Fruto de la infiltración proveniente de la precipitación en una cuenca se pueden obtener zonas de recarga hídrica.

7.2.2. Recarga hídrica

Según Bueso (2010), “la recarga es el proceso de incorporación de agua a un acuífero producido a partir de diversas fuentes: la precipitación, las aguas superficiales y por transferencias de otro acuífero”. (p. 72)

La recarga hídrica se zonifica según el lugar en donde ocurre; el área es aún mejor para este proceso natural si el suelo o roca presenta propiedades altas de permeabilidad que permitan el paso del agua infiltrada al acuífero.

Asimismo, la disponibilidad de recarga hacia un acuífero también estará en función de los recursos hídricos superficiales, tales como los ríos, mares, lagos.

7.3. Recursos hidrogeológicos

A continuación, en los siguientes incisos se describen los recursos hidrogeológicos.

7.3.1. Superficiales

Los recursos hídricos superficiales son aquellos que se movilizan dentro del ciclo hidrológico sobre la superficie de la tierra. Son alimentados por la precipitación y escorrentías superficiales.

7.3.2. Subterráneos

Los recursos hídricos subterráneos hacen referencia a toda el agua que se mueve de forma subterránea, es decir, el agua producto de la infiltración que alimenta los acuíferos. Al nivel natural del agua subterránea se le conoce como nivel freático.

7.4. Acuíferos

Collazo y Montaña (2012) definen a un acuífero como “toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de ella, pudiendo extraerse en cantidades significativas mediante obras de captación (ej. pozos)” (p.20).

Los acuíferos pueden clasificarse según su forma o estructura de la siguiente manera:

7.4.1. Acuíferos libres

Son acuíferos cuyo piso es impermeable y su techo esta a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Son los más afectados en caso de sequía, ya que el nivel freático oscila con los cambios climáticos. Pozos muy someros se ven afectados (se secan), cuando el nivel freático desciende hasta por debajo de la profundidad total del pozo. (Collazo y Montaña, 2012, p. 20)

7.4.2. Acuíferos confinados

Limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y la recarga es lateral. Cuando se realiza un pozo en éste tipo de acuíferos, el agua contenida en ellos asciende rápidamente por su interior. Si el agua alcanza la superficie, al pozo se le llama surgente. Superficie potenciométrica se le denomina al nivel de agua virtual que se genera cuando se integran todos los niveles hidráulicos

observados en los pozos del acuífero confinado. (Collazo y Montaña, 2012, p. 20)

7.4.3. Acuíferos semiconfinados

En estos, el techo, el piso o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan no impiden la circulación vertical del agua. Para que ello suceda, además de la permeabilidad deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior o inferior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de las unidades de baja permeabilidad denominadas semiconfinantes, filtrantes o acuitardos. (Collazo y Montaña, 2012, p.21)

Figura 2. Tipos de acuíferos



Fuente: Collazo y Montaña. (2012). Manual de Agua Subterránea. Consultado el 10 de octubre de 2021. Recuperado de: http://www.ose.com.uy/descargas/reclutamiento/ci_0006_16_manual_agua_subterranea.pdf.

7.4.4. Propiedades de los acuíferos

Los acuíferos presentan propiedades hidrogeológicas que son fundamentales para el estudio y análisis del agua subterránea. Para que un acuífero sea aprovechable debe cumplir al menos con las propiedades de almacenamiento y transmisividad, las cuales definen la capacidad de almacenaje y de transmitir que posee para que se pueda extraer agua subterránea.

7.4.5. Extracción de agua subterránea

El método más común para la extracción de agua subterránea es por medio de pozos. Estos pueden ser artesanales o mecánicos; sin embargo, en la actualidad el uso de pozos mecánicos por medio de sistemas de bombeo es más común y efectivo.

7.5. Pozos mecánicos

Los pozos mecánicos se pueden definir como “aquellos que se construyen con maquinaria cuando no es posible excavar un pozo a mano y está en dependencia de la formación geológica del terreno y de la calidad del agua subterránea en la parte somera del acuífero”. (Empresa Nicaraguense de Acueductos y Alcantarillados, 1999, p.4)

7.5.1. Nivel freático

Martínez (2005) lo define como “al límite superior de la zona saturada se le denomina superficie freática o nivel freático, que se define como el lugar geométrico de los puntos en los que el agua del subsuelo se encuentra a la presión atmosférica”. (p.21)

El nivel freático nos permite conocer el nivel natural del agua; sin embargo, esto no quiere decir que el acuífero sea aprovechable para explotación.

7.5.2. Nivel estático

El nivel estático es el lugar natural que ocupa el agua subterránea sin la existencia de un proceso de bombeo. “Se expresa mediante la distancia medida desde la superficie del terreno hasta la superficie del agua en el subsuelo. En un pozo corresponde a dicha distancia cuando el equipo de bombeo no se encuentra en funcionamiento”. (Armenta, 2013 p. 6).

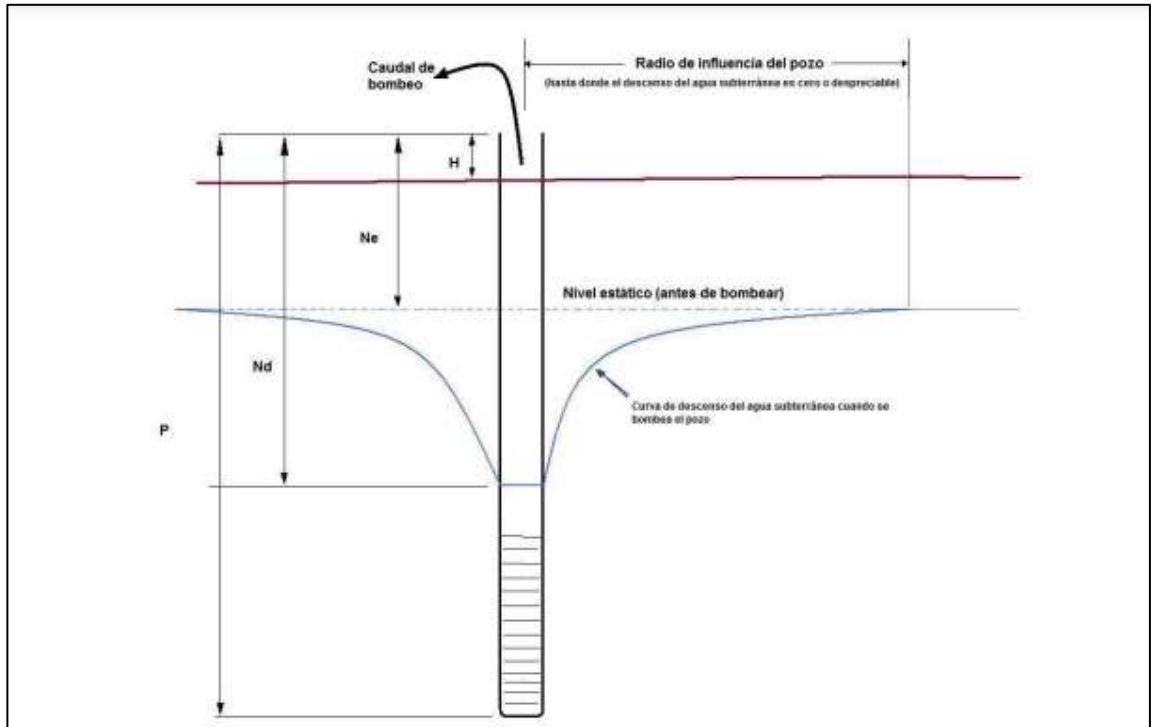
7.5.3. Nivel dinámico

Cuando se incluye un equipo de bombeo se puede evidenciar que los niveles de agua subterránea presentan un movimiento. Como indica Armenta (2013) el nivel dinámico se puede definir como “posición que ocupa el agua subterránea, generalmente en un pozo, cuando se encuentra en funcionamiento el respectivo equipo de bombeo”. (p. 6)

7.5.4. Caudal de producción

El caudal de producción hace referencia al gasto que el pozo está entregando posterior al equipamiento del sistema de bombeo.

Figura 3. Diagrama de pozos mecánicos



Fuente. Armenta. (2013). *Guía para el monitoreo de aguas subterráneas*.

7.6. Calidad del agua

Para analizar la calidad del agua que producen los pozos es necesario contrastar los análisis fisicoquímicos con los parámetros de límites máximos y permisibles que establece la Norma Técnica Guatemalteca NTG 29001.

Tabla I. **Límites máximos aceptables y permisibles características químicas**

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	-----

a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia.
b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca. (2010). COGUANOR 29001. *Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones.*

Tabla II. **Límites máximos aceptables y permisibles características físicas**

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 μS/cm	1500 μS/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 ^{(c)(d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L

(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto
(b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).
(c) En unidades de pH
(d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca. (2010). COGUANOR 29001. *Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones.*

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

1.2. Planteamiento del problema

1.3. Justificación

1.4. Hipótesis

1.4.1. Definición conceptual de las variables

1.4.2. Definición operacional de las variables

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

1.5.2. Objetivos específicos

1.6. Alcance

2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Fase I: investigación teórica

2.2. Fase 2: investigación de campo

- 2.3. Fase 3: trabajo de gabinete
- 2.4. Fase 4: técnicas estadísticas
- 2.5. Fase 5: resultados y proyecciones
- 2.6. Fase 6: redacción y publicación de informe científico

3. MARCO TEÓRICO

- 3.1. Geología y relieve
 - 3.1.1. Geología regional
 - 3.1.2. Geología local
 - 3.1.3. Geomorfología
- 3.2. Hidrogeología
 - 3.2.1. Ciclo hidrológico
 - 3.2.2. Recarga hídrica
- 3.3. Recursos hidrológicos
 - 3.3.1. Superficiales
 - 3.3.2. Subterráneos
- 3.4. Acuíferos
 - 3.4.1. Acuíferos libres
 - 3.4.2. Acuíferos confinados
 - 3.4.3. Acuíferos semiconfinados
 - 3.4.4. Propiedades de los acuíferos
 - 3.4.5. Extracción de agua subterránea
- 3.5. Pozos Mecánicos
 - 3.5.1. Nivel estático
 - 3.5.2. Nivel dinámico
 - 3.5.3. Caudal de producción
- 3.6. Calidad del agua
 - 3.6.1. COGUANOR NTG 29001

- 4. MARCO CONTEXTUAL
 - 4.1. Antecedentes históricos
 - 4.2. Ubicación geográfica
 - 4.3. Pozos de estudio
 - 4.3.1. Niveles de agua subterránea
 - 4.3.2. Caudal de producción

- 5. ANÁLISIS DE DATOS
 - 5.1. Estadística descriptiva
 - 5.2. Estadística inferencial

- 6. RESULTADOS
 - 6.1. Variación de los niveles dinámicos vs profundidad
 - 6.2. Variación de la calidad del agua
 - 6.3. Proyección de la expectativa de vida útil

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

La investigación que se describe en el presente documento se realiza por medio de un enfoque cuantitativo. Asimismo, se define con un alcance descriptivo y un diseño no experimental. La recolección de datos es de temporalidad transversal, con ocurrencia tanto retrospectiva como prospectiva.

Como punto de partida la investigación tendrá una ocurrencia retrospectiva, es decir, que se analizarán datos históricos de los niveles de agua subterránea de los pozos, así como de los caudales de producción y de las pruebas de laboratorios definidas en la Norma COGUANOR NTG 29001.

Para poder llevar a cabo la investigación se definirán fases o etapas de trabajo que permitirán realizar de forma ordenada la ejecución de cada una de las tareas necesarias para la culminación del proyecto. A continuación, se detallan las fases que componen el trabajo de investigación:

9.1. Fase I: revisión documental

La primera etapa del proyecto comprende la revisión bibliográfica de documentos científicos, libros, artículos e informes de tesis con la finalidad de sustentar el estudio con información preexistente que delimite las variables de interés y contribuya al enriquecimiento de la investigación.

9.1.1. Antecedentes

En esta etapa de la investigación se delimitará qué se ha investigado con anterioridad respecto a las variables y a la problemática identificada, permitiendo al investigador identificar nuevos puntos de interés y de mejora.

9.1.2. Marco teórico

Se realizará una revisión bibliográfica de teorías y metodologías que sustenten la ejecución y análisis de la información obtenida; asimismo, el marco conceptual permitirá tener un mayor alcance en el conocimiento de cada variable de análisis y de sus respectivos componentes con la finalidad de establecer las técnicas y métodos de análisis adecuados para la investigación.

9.1.3. Recopilación de datos históricos de las variables de análisis

Para poder llevar a cabo el desarrollo de la investigación se requiere el acceso a datos históricos de los últimos diez años de las variables de estudio, tomando como índices los niveles de agua subterránea, el caudal de producción y los análisis de laboratorio referentes a la calidad del agua. Esta información será proporcionada por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) y por la Alcaldía Auxiliar de la zona 18.

9.2. Fase II: trabajo de campo

Para la fase de campo se llevarán a cabo visitas a los pozos para poder evaluar el área geográfica en la que se encuentran ubicados. Además, también se tomarán datos del estado actual de los niveles de agua tomando como método

de medición lecturas por piezómetro o por la línea de aire, según la adecuación que tenga prevista cada pozo en campo.

9.2.1. Muestra

La muestra más importante para el desarrollo de la investigación son los pozos representativos del área de interés, los cuales se encuentran ubicados de forma dispersa en la zona 18 de la Ciudad de Guatemala. Los índices que se tomarán en cuenta para el cálculo y análisis del objeto de estudio serán los niveles de agua subterránea, es decir, los niveles estáticos y dinámicos del pozo en una temporalidad de diez años de antigüedad.

Para la determinación de los niveles actuales de agua en los pozos se utilizará cualesquiera de los siguientes métodos:

- Medición por sondas de nivel:

Empleando un carrete con electrodo con punta de acero inox y una masa que se conecta a la columna del pozo, se mide el nivel a partir del cierre del circuito eléctrico donde, cuando se encuentra con el agua dentro del pozo, emite un sonido.

- Medición indirecta con fluido intermedio:

Se utiliza normalmente aire comprimido a una sonda ubicada hasta la altura de la bomba sumergible, se aplica hasta que la línea de aire quede vacía. Posteriormente, se cierra la llave y se finaliza el proceso de aplicación de aire. Finalmente, el agua sube por el piezómetro hasta que se estabiliza y, mediante

la lectura de un manómetro, se determina la presión en el pozo y por medio de una conversión se encuentran los metros de columna de agua.

- Medición directa por sonda:

Si el pozo se encuentra adaptado con un transductor de presión y con un piezómetro hueco, se puede determinar la presión atmosférica y presión diferencial del sistema para encontrar el valor requerido.

9.3. Fase III: análisis estadístico

Esta fase comprende el ordenamiento y la tabulación de datos históricos y actuales de los índices de las variables de análisis, así como la aplicación de técnicas de estadística descriptiva e inferencial para poder proyectar el objetivo de la investigación.

Para poder llevar a cabo este apartado se utilizará como metodología el análisis de las medidas de tendencia central.

9.3.1. Resultados

A partir de la aplicación de la estadística descriptiva e inferencial se podrán definir los resultados de la investigación, permitiendo de esta manera identificar cuál es la situación actual de los pozos mecánicos representativos de la zona 18. Además, se podrá evaluar la veracidad de la hipótesis planteada para el estudio tomando como información de contraste la proyección realizada de forma inferencial.

9.4. Fase IV: redacción y publicación de informe final y científico

Esta etapa corresponde a la culminación del proceso presentando como requisitos indispensables la redacción, revisión, aprobación y publicación del informe final y, posteriormente, del informe científico; así como, la defensa oral del trabajo de investigación frente a profesionales y expertos en la temática abordada.

9.4.1. Informe final

Este informe corresponde al trabajo final del proyecto de investigación, el cual debe comprender todas las fases previas teniendo como fin principal la comprobación o rechazo de la hipótesis planteada, que está directamente relacionada al objetivo general de la investigación.

Este apartado debe ser aprobado por el asesor, la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería y por el departamento de Lingüística.

9.4.2. Informe científico

Esta etapa corresponde a la redacción del informe científico posterior a la aprobación del informe final del trabajo de investigación. En esta fase se deben presentar de forma concisa los resultados obtenidos, así como las conclusiones y recomendaciones dirigidas al enriquecimiento de la rama científica.

9.4.3. Exposición oral de resultados

Esta fase corresponde a la defensa del trabajo de investigación y a la exposición de los resultados alcanzados. Para ello, se deben presentar de forma

resumida y concisa los objetivos generales y específicos, la metodología de análisis y las conclusiones obtenidas.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para poder llevar a cabo el análisis de datos del proyecto de investigación se realizará, posterior al ordenamiento y tabulación, un análisis de las medidas de tendencia central como técnica de estadística descriptiva y, posteriormente, estadística inferencial para poder proyectar la expectativa de vida útil de los pozos representativos.

10.1. Ordenamiento y tabulación de datos

Se debe realizar la recopilación de datos históricos para poder realizar el ordenamiento y tabulación de los índices de la variable de interés con la finalidad de poder obtener un mejor análisis de la información.

10.2. Estadística descriptiva

Para poder realizar el análisis de los datos recopilados se utilizará como metodología la estadística descriptiva, la cual permitirá obtener los datos de las medidas de tendencia central, así como los valores necesarios para la elaboración de gráficas de regresión lineal.

El software que se empleará para poder el cálculo estadístico será Microsoft Excel, el cual permitirá obtener los valores de forma rápida y sencilla a partir de la inclusión de fórmulas y gráficos.

10.3. Estadística inferencial

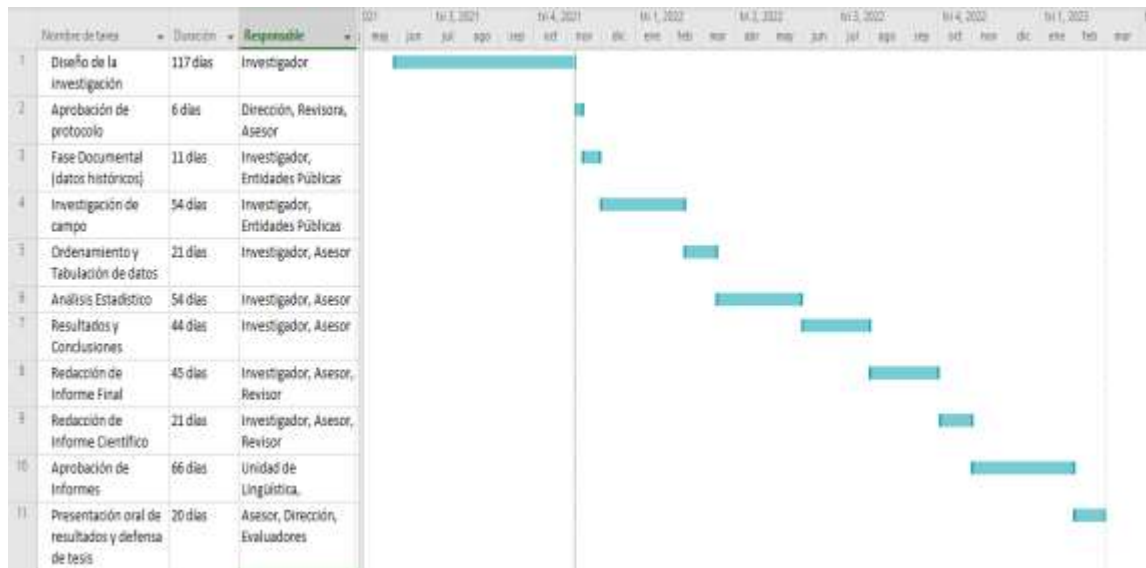
Teniendo como base los resultados obtenidos de la estadística descriptiva se formulará una expresión matemática que permita realizar una proyección de la vida útil de los pozos representativos, basándose en un modelo que contemple la dispersión de los datos.

11. CRONOGRAMA

A continuación, se presenta el cronograma de actividades establecido para la ejecución de cada fase de la metodología del trabajo de investigación, tomando en cuenta que este incluye la etapa de revisión documental que fue realizada previamente en las asignaturas de Seminario de Investigación 1 y 2.

El cronograma fue realizado en el software Microsoft Project para poder evaluar la duración de la actividad de forma teórica y gráfica.

Figura 4. Cronograma



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project 2019.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para llevar a cabo el trabajo de investigación se cuentan con los permisos necesarios por las entidades encargadas del área de saneamiento de la zona 18, así como con las autorizaciones de acceso a los pozos representativos para poder realizar la fase de investigación en campo.

Además, también se cuenta con el recurso económico para realizar la ejecución total del proyecto de investigación; con el equipo y programas computacionales necesarios para poder realizar el desarrollo del contenido del informe final y científico, requeridos por la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería.

A continuación, se presenta el presupuesto estimado para poder solventar cada una de las fases correspondientes a la metodología del trabajo de investigación, cabe destacar que el proyecto será financiado por el investigador al 100%.

Tabla III. **Presupuesto**

Descripción	Unidad	Costo unitario	Costo total
Recursos materiales			
Resma de hojas de papel bond	4	Q 50.00	Q 200.00
Fólders	5	Q 2.00	Q 10.00
Impresiones	400	Q 0.25	Q 100.00
Recursos humanos			
Asesoría lingüística	1	Q 1 500.00	Q 1,500.00
Servicios			
Servicio de telefonía	6	Q 299.00	Q 1,794.00
Servicio de internet	6	Q 275.00	Q 1,650.00
Trasportes	15	Q 50.00	Q 750.00
Laboratorio	4	Q 750.00	Q 3 000.00
Imprevistos	1	Q 400.00	Q 400.00
Total			Q 9,404.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 365.

13. REFERENCIAS

1. Armenta, J. (2013). *Guía para el monitoreo de aguas subterráneas*. Colombia: Corporación Autónoma Regional del Cesar.
2. Barales, L. (2019). *Análisis piezométrico de pozos de agua para los municipios de la mancomunidad Gran Ciudad del Sur*. Guatemala: FUNCAGUA.
3. Bardales, W. (2010). *Estimación del potencial del recurso hídrico subterráneo del Valle de Monjas, Jalapa, Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.
4. Beltetón, O. (2001). *Zonificación sísmica urbana en Guatemala*. Guatemala: Centro de Estudios Superiores en Energía y Minas.
5. Bueso, M. (2010). *Indentificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, municipio de Chiquimula*. Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
6. Campillo, A., Ramírez, L. y Valenzuela, M. (2012). *Principios Básicos para el Conocimiento y Monitoreo de las Aguas Subterráneas en Colombia*. Colombia: Sistema de Información Ambiental para Colombia (SIAC); Sistema de Información de Recurso Hídrico (SIRH).

7. Chávez, J., Flores, J. y Paiz, E. (2017). *Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el Municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador* (Tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador, El Salvador.
8. Chura, L. (2015). *Evaluación de agua subterránea a través de pozos con fines de riego en la comunidad de Quenapajja–Acora* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.
9. Collazo, M. y Montaña, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. Uruguay: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
10. Coló, G. (2014). *Estudio de los niveles freáticos del área norte y este de la ciudad capital* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
11. Custodio, E. y Llamas, M. (1996). *Hidrogeología Subterránea*. España: Ediciones Omega.
12. Domínguez, A. y Pérez, C. (19 de agosto de 2020). “Hasta el agua con la que nos cepillamos tenemos que reciclar”: el drama de familias de zona 18, donde el vital líquido es escaso. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.guatelevision.com/nacionales/hasta-el-agua-con-la-que-nos-cepillamos-tenemos-que-reciclar-el-drama-de-familias-de-zona-18-donde-el-vital-liquido-es-escaso>
13. Donnelly, T., Horne, G. y Finch, R. (marzo, 1990). Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks. *The Geological Society of America, Vol. único*. 1-39.

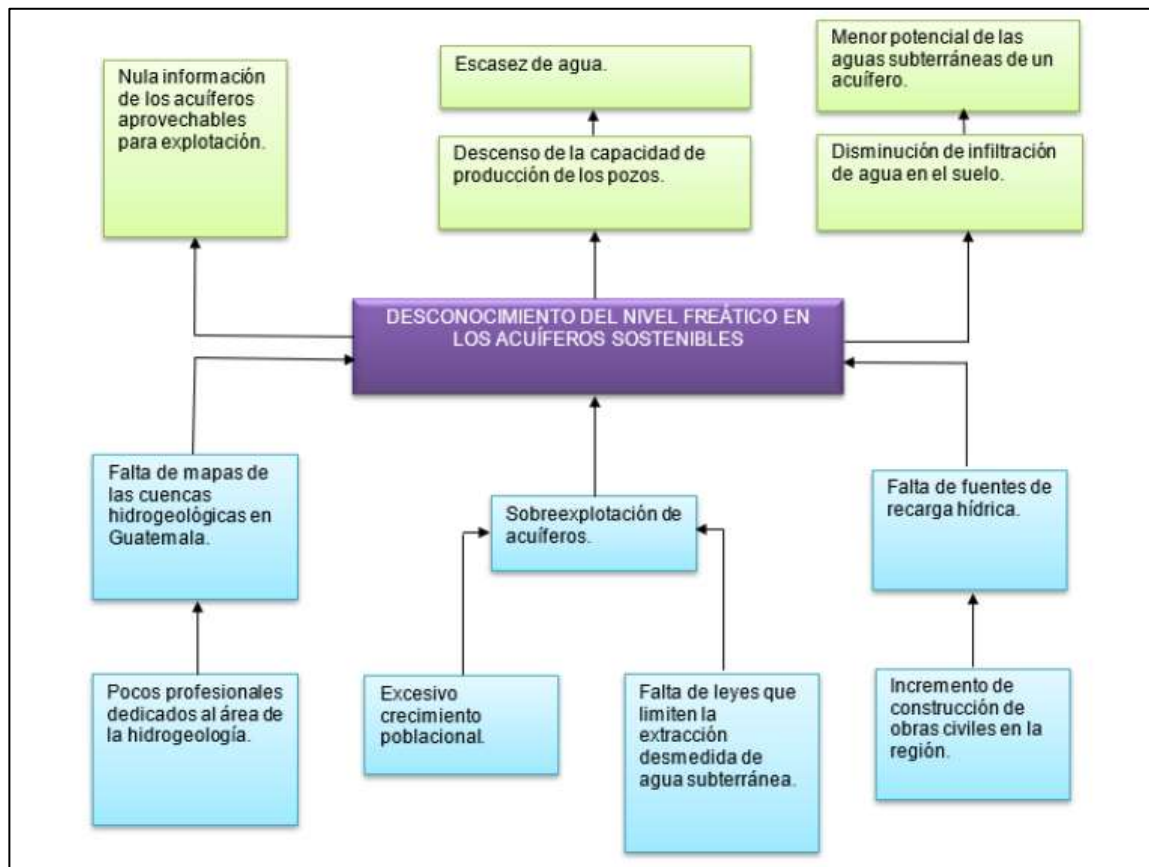
14. Empresa Nicaraguense de Acueductos y Alcantarillados. (1999). *Área de normas y procedimientos. Manual de perforación de pozos*. Nicaragua: ENACAL. Recuperado de <https://dl-manual.com/doc/manual-perforacion-pozos-dow1ny8k80z5>.
15. Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. España: Pearson Educación, S.A.
16. Izabá, R. (2016). *Potencial Hídrico y Calidad del Agua asociados con las Condiciones Socio-Ambientales en la Microcuenca del Río Mapachá del Municipio de San Lorenzo, Departamento de Boaco* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
17. Martínez, F. (10 de agosto de 2020). Así se han movilizado las poblaciones en las zonas capitalinas en los últimos 70 años y estas son algunas de las necesidades urbanas. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.prensalibre.com/pl-plus/guatemala/comunitario/asi-se-han-movilizado-las-poblaciones-en-las-zonas-capitalinas-en-los-ultimos-70-anos-y-estas-son-algunas-de-las-necesidades-urbanas/>.
18. Martínez, P. (2005). *Fundamentos de Hidrogeología*. España: Mundiprensa.
19. Martínez, R. (2017). *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Sébaco ante la contaminación y sobreexplotación y propuesta de un plan de gestión del recurso hídrico* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

20. Montenegro, E. (2013). *Estudio de las aguas subterráneas en zonas 10 y 14 de la Ciudad de Guatemala* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
21. Morales, J. (2012). *Evaluación del descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero metropolitano en el Valle de Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
22. Morataya, E. (2011). *Ciudad de Guatemala*. Guatemala: Encuesta CIMES. Recuperado de https://desarrollourbanoyterritorial.duot.upc.edu/sites/default/files/Encuesta%20CIMES_Ciudad%20de%20Guatemala_Morataya_MDUT%202011.pdf.
23. Murillo, J. (2004). *Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del Bajo Guadalquivir* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
24. Núñez, I. (2017). *Disponibilidad hídrica subterránea y prospección geofísica para el aprovechamiento sostenible del acuífero de la Isla Mancarrón, Archipiélago de Solentiname, Nicaragua* (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, Managua, Nicaragua.
25. Samayoa, J. (2016). *Recarga de acuíferos mediante infiltración provocada a través de la infraestructura de la red de alcantarillado de la Ciudad de Guatemala* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

26. Sánchez, J. (2019). *Estimación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
27. Sánchez, J. (s.f.). *Ciclo hidrológico*. España: Universidad de Salamanca.
28. Tarbuck, E. y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
29. Tuñón, J. (2000). *Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas* (Tesis de doctorado). Universidad de Granada, España.
30. Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA); Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID). (2001). *Mapa Fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala a escala 1:250,000*. Guatemala: MAGA.
31. Varela, R. (2014). *Manual de Geología*. Argentina: INSTITUTO SUPERIOR DE CORRELACIÓN GEOLÓGICA.
32. Velásquez, E. (1995). *Estudio de los niveles freáticos en el Valle de Guatemala* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2019.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Problema y línea de investigación	Pregunta central	Objetivo general	Preguntas específicas	Objetivos específicos	Variab les	Índices	Indicador es
El desconocimiento de los niveles de agua subterránea en los pozos mecánicos de los acuíferos sostenibles para explotación.	¿Cuál es la expectativa de vida útil para los pozos mecánicos que se abastece del acuífero subterráneo ubicado en la zona 18?	Evaluar los niveles estáticos y dinámicos en pozos representativos ubicados en la zona 18, Ciudad de Guatemala, para inferir su expectativa de vida útil mediante el cálculo del potencial hídrico.	¿Cuáles son los niveles de agua subterránea actuales en los pozos mecánicos que se abastecen del acuífero de la zona 18?	Analizar los niveles estáticos y dinámicos y caudal de extracción actuales en pozos representativos para contrastar su variación respecto a datos históricos.	Pozos	Nivel estático y dinámico Profundidad de perforación Caudal de producción	Pies Pies Gal/min
Línea de investigación			¿Cuál es el nivel de aprovechamiento de los pozos representativos de la zona 18?	Calcular el nivel de aprovechamiento de los pozos representativos respecto a la profundidad del agua subterránea en estudio para estimar una expectativa de vida útil.		Potencial hídrico	Años
Hidrogeología			¿Cómo ha variado la calidad del agua en los pozos representativos?	Contrastar los análisis históricos de la calidad del agua de los pozos representativos respecto a la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001 para evaluar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos respecto a los límites máximos aceptables y permisibles.	Calidad del agua	Características fisicoquímicas	LMA y LMP

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 365.