



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geotécnica

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN
POZOS EXISTENTES UBICADOS EN LA ZONA 1 DEL MUNICIPIO DE MIXCO,
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

Ing. Kevin Ottoniel Rodríguez Cahueque

Asesorado por el Msc Ing. Dany Esaú López Bautista

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN
POZOS EXISTENTES UBICADOS EN LA ZONA 1 DEL MUNICIPIO DE MIXCO,
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. KEVIN OTTONIEL RODRIGUEZ CAHUEQUE
ASESORADO POR EL MSC ING. DANY ESAÚ LÓPEZ BAUTISTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE 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 Gomez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ LA DEFENSA DE TESIS

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Inga. Brenda Luzelly Zeledon Franco
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
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:

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN
POZOS EXISTENTES UBICADOS EN LA ZONA 1 DEL MUNICIPIO DE MIXCO,
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 8 de agosto de 2020.

Ing. Kevin Ottoniel Rodríguez Cahueque

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la fortaleza necesaria para seguir adelante en todo momento y nunca dejar de bendecirme, sobre todo en tiempos difíciles.
Mi mamá	Porque cada momento de gloria que obtengo y obtendré es gracias a tus esfuerzos y sacrificios que hiciste por muchos años.
Mi papá	Por demostrarme que cada victoria mía te llena de mucho orgullo y deseas de todo corazón que siga saliendo adelante por siempre.
Mi hermana	Porque me demostraste qué harías lo imposible siempre que se trate de mí y estaré eternamente agradecido de ser tu hermano.
Mis familiares	Porqué en tiempos difíciles entendí que siempre que se trate de la familia, ninguna pelea es más importante.
Mis amigos	Por ser mi segunda familia, por todos los años compartidos y que todos sigamos cosechando logros académicos y laborales.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el alma mater que me formo como Ingeniero Civil y ahora como maestro en ingeniería geotécnica.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por los conocimientos adquiridos durante mi formación como maestro.
Msc Ing. Dany Esaú López Bautista	Por su profesionalismo, catedra y asesoría en la trayectoria de mi carrera como maestro en ingeniería geotécnica.
Municipalidad de Mixco	Al departamento de Aguas y Drenajes por su apoyo en la recolección de información para el desarrollo del informe.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS	XXI
HIPÓTESIS	XXIII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Geografía del municipio de Mixco.....	1
1.2. Aguas subterráneas.....	3
1.3. Acuífero	4
1.4. Tipos de acuífero	5
1.4.1. Acuífero libre.....	5
1.4.2. Acuífero semiconfinado.....	5
1.4.3. Acuífero confinado	6
1.5. Aprovechamiento de las aguas subterráneas	7
1.6. Características del agua subterránea	7
1.7. Tipos de pozos	8
1.7.1. Pozos poco profundos	9
1.7.2. Pozos profundos	9
1.7.3. Pozos artesianos	9
1.7.3.1. Método de percusión.....	10

	1.7.3.2.	Método de rotación	10
	1.7.3.3.	Método de rotopercusión	11
1.8.		Razones de baja extracción de caudal en los pozos	11
1.9.		Vida útil económica de un pozo.....	12
2.		MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	13
2.1.		Análisis macro y micro de la zona en estudio	13
2.2.		Análisis geológico de la zona de estudio	15
2.3.		Análisis morfométrico de la zona de estudio	17
	2.3.1.	Microcuencas del área de estudio	17
	2.3.2.	Ríos del área de estudio.....	19
	2.3.3.	Curvas de nivel del área de estudio.....	20
	2.3.4.	Modelo de elevación digital del área de estudio	21
	2.3.5.	Hillshade del área de estudio	21
2.4.		Ubicación geográfica de los pozos	22
2.5.		Monitoreo del estado de los pozos	24
	2.5.1.	Nivel de profundidad de perforación y niveles de agua	25
3.		ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE UN POZO	27
3.1.		Medición de caudal	27
3.2.		Nivel estático.....	29
3.3.		Nivel dinámico.....	29
3.4.		Abatimiento	30
3.5.		Nivel freático	30
3.6.		Perfil estratigráfico	32
	3.6.1.	Métodos de exploración.....	32
	3.6.1.1.	Método no destructivo.....	32
	3.6.1.2.	Método destructivo	33

4.	PROPUESTA DE PLANIFICACION PARA EL MONITOREO DE LOS POZOS	35
4.1.	Plan de monitoreo de pozos	35
4.1.1.	Frecuencia de monitoreo	35
4.2.	Monitoreo del nivel de agua en los pozos	36
4.2.1.	Método de sonda eléctrica	36
4.2.2.	Método de la línea de aire.....	37
4.3.	Monitoreo del caudal de extracción	39
4.4.	Recopilación de datos	39
4.5.	Análisis de la información recopilada	40
4.6.	Interpretación gráfica de la información recopilada	62
4.6.1.	Análisis microcuenca río Mariscal	87
4.6.2.	Análisis microcuenca río Seco	88
4.6.3.	Análisis microcuenca río Molino	88
4.6.4.	Análisis microcuenca río Panchiguajá.....	89
4.7.	Discusión de resultados.....	90
5.	PLANIFICACION PARA EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE UN POZO.....	93
5.1.	Ciclo de vida del proyecto.....	93
5.1.1.	Etapa de pre inversión	93
5.1.2.	Etapa de inversión	94
5.1.3.	Operación, administración y mantenimiento.....	95
5.2.	Parámetros a considerar en el mantenimiento de un pozo	95
5.3.	Criterios de toma de decisión	96
5.4.	Evaluación de un pozo mecánico	97
5.4.1.	Evaluación inicial del pozo y del sistema.....	97
5.4.2.	Mantenimiento de pozos	98
5.4.2.1.	Tipo de mantenimiento.....	98

	5.4.2.1.1.	Mantenimiento preventivo	99
	5.4.2.1.2.	Mantenimiento correctivo	100
5.4.3.		Cronograma de mantenimiento de pozos	100
5.4.4.		Presupuesto de inversión para el mantenimiento de un pozo.....	101
	5.4.4.1.	Costos directos de mantenimiento	104
CONCLUSIONES			107
RECOMENDACIONES			109
REFERENCIAS.....			111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Localización y ubicación municipio de Mixco.....	1
2.	Límite de zonas del municipio de Mixco	2
3.	Flujo de agua subterránea	4
4.	Tipos de acuíferos y pozos	6
5.	Métodos de perforación.....	11
6.	Distribución de pozos en las cuencas de la república de Guatemala ...	14
7.	Geología en zona 1 del municipio de Mixco	15
8.	Características de las rocas en zona 1 del municipio de Mixco	16
9.	Distribución de pozos en las microcuencas de zona 1 del municipio de Mixco.....	18
10.	Análisis de ríos en zona 1 del municipio de Mixco.....	19
11.	Curvas de nivel en zona 1 del municipio de Mixco	20
12.	Modelo de elevación digital en zona 1 del municipio de Mixco	21
13.	Hillshade en zona 1 del municipio de Mixco	22
14.	Ubicación geográfica de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco.....	24
15.	Caudal de extracción	28
16.	Niveles de un pozo mecánico y cono de abatimiento	31
17.	Ejemplo de perfil estratigráfico	34
18.	Sensor de nivel de agua.....	37
19.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-1	41
20.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-1	41
21.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-1	42

22.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-3.....	43
23.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-3.....	43
24.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-3.....	44
25.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-4.....	45
26.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-4.....	45
27.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-4.....	46
28.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-5.....	47
29.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-5.....	47
30.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-5.....	48
31.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-6.....	49
32.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-6.....	49
33.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-6.....	50
34.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-7.....	51
35.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-7.....	51
36.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-7.....	52
37.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-8.....	53
38.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-8.....	53
39.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-8.....	54
40.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-9.....	55
41.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-9.....	55
42.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-9.....	56
43.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-10.....	57
44.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-10.....	57
45.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-10.....	58
46.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-11.....	59
47.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-11.....	59
48.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-11.....	60
49.	Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-13.....	61
50.	Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-13.....	61

51.	Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-13	62
52.	Comportamiento de niveles estáticos por año	64
53.	Comportamiento de niveles dinámicos por año	66
54.	Comportamiento del caudal de extracción por año.....	68
55.	Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Mariscal.....	69
56.	Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Mariscal.....	70
57.	Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Mariscal.....	70
58.	Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Seco	71
59.	Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Seco	71
60.	Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Seco.....	72
61.	Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Molino.....	73
62.	Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Molino...	74
63.	Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Molino	75
64.	Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Panchiguajá	76
65.	Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Panchiguajá	77
66.	Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Panchiguajá	78
67.	Comportamiento de nivel estático promedio microcuenca río Mariscal.....	80
68.	Comportamiento de nivel estático promedio microcuenca río Seco	81
69.	Comportamiento de nivel estático promedio microcuenca río Molino ...	81

70.	Comportamiento de nivel estático promedio microcuenca río Panchiguajá.....	82
71.	Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuenca río Mariscal	83
72.	Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuenca río Seco ...	83
73.	Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuenca río Molino	84
74.	Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuenca río Panchiguajá	84
75.	Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Mariscal	85
76.	Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Seco	86
77.	Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Molino.....	86
78.	Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Panchiguajá.....	87

TABLAS

I.	Distribución de pozos en las microcuencas de zona 1 del municipio de Mixco	14
II.	Área de las microcuencas del área de estudio	18
III.	Longitud de ríos en las microcuencas del área de estudio	20
IV.	Ubicación geográfica de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco	23
V.	Niveles de agua y profundidad de perforación de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco.....	25
VI.	Caudal de extracción de referencia según diámetro del pozo	28

VII.	Propuesta de plan de frecuencia de monitoreo.....	36
VIII.	Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-1	40
IX.	Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-3	42
X.	Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-4	44
XI.	Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-5	46
XII.	Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-6	48
XIII.	Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-7	50
XIV.	Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-8	52
XV.	Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-9	54
XVI.	Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-10	56
XVII.	Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-11	58
XVIII.	Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-13	60
XIX.	Resumen comportamiento de niveles estáticos por año	63
XX.	Resumen comportamiento de niveles dinámicos por año	65
XXI.	Resumen comportamiento de caudal de extracción por año	67
XXII.	Resumen comportamiento de nivel estático promedio por microcuenca	80

XXIII.	Resumen comportamiento de nivel dinámico promedio por microcuenca.....	82
XXIV.	Resumen comportamiento de caudal de extracción promedio por microcuenca.....	85
XXV.	Propuesta de cronograma de mantenimiento.....	101
XXVI.	Propuesta de cronograma de mantenimiento.....	102
XXVII.	Costos de herramienta y accesorios	104
XXVIII.	Resumen de precio de repuestos	105
XXIX.	Costos directos de mantenimiento	106

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\emptyset_{\text{entub.}}$	Diámetro de entubado
$\emptyset_{\text{perf.}}$	Diámetro de perforación
\emptyset	Diámetro de tubería
gpm	Galones por minuto
°	Grados
lma	Límite máximo admisible
lmp	Límite máximo permisible
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
metro/año	Metro por cada año
m.s.n.m.	Metro sobre el nivel del mar
'	Minutos
"	Segundos
sdt	Sólidos disueltos totales

GLOSARIO

Abatimiento	Cono que se forma por la diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Capilaridad	Propiedad física del agua que permite el desplazamiento del líquido a través del suelo u materiales porosos, ascendiendo por la tensión superficial.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Estrato impermeable	Superficie formada por materiales muy finos con porosidad baja que no permite el paso del agua, con excepción del paso lento por la capilaridad.
Estrato permeable	Superficie que permite la filtración del líquido al suelo subyacente.
Franja capilar	Capa saturada del perfil de un estrato de suelo sobre la capa freática, que está sometida a absorción dentro del tramo saturado de la curva de retención del líquido.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.

INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
Nivel dinámico	Nivel de agua que se obtiene a través del bombeo del pozo.
Nivel estático	Nivel de agua que se obtiene con el pozo sin bombeo.
Nivel freático	Nivel real del agua que no está sometida a presión atmosférica.
Nivel piezométrico	Nivel del agua a presión atmosférica.
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia.
QGis	Software de Sistema de información geográfica cuántica.
Zona de saturación	Zona dentro del suelo donde los intersticios se encuentran ocupados por agua a presión igual o mayor que la presión atmosférica.

RESUMEN

En la zona 1 del municipio de Mixco no existe información directa relacionada con el estudio y evaluación del posible descenso de los niveles de agua en pozos existentes.

Se realizó la recopilación de información histórica correspondientes al nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción de agua potable y la información actual de dichos parámetros mencionados anteriormente. Esto con la finalidad de analizar e interpretar los parámetros que determinan la posible variación de los valores actuales vs. las condiciones iniciales de los pozos.

Dicha comparativa se utilizó para realizar la planificación en el mantenimiento preventivo de los pozos, específicamente para los pozos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, tomando en consideración las fases desde el anteproyecto hasta la propuesta de un cronograma de ejecución y presupuesto para dicha planificación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se han identificado descensos o variaciones de nivel estático y dinámico respecto a sus valores iniciales, lo que indica que existen factores que están condicionando la recarga del recurso hídrico a los pozos, en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala.

Los pozos mecánicos son estructuras de captación de agua, estos se construyen a través de la perforación hasta el subsuelo, donde se introduce tubería lisa y ranurada, haciendo posible su extracción a través de medios mecánicos o dependiendo de las condiciones de presión, puede llegar a brotar el agua por forma natural.

Las fuentes de abastecimiento de agua potable en el municipio de Mixco se dan a través de la construcción de pozos mecánicos, tanto para consumo humano como para riego de las zonas. Sin embargo, debido al crecimiento poblacional en el municipio, este vital líquido se requiere, con el pasar del tiempo, en cantidades mayores, por lo que es necesario tener un adecuado control del rendimiento y calidad de los mismos, para satisfacer la demanda de los habitantes de las distintas comunidades.

Es necesario evaluar el comportamiento del nivel estático y dinámico de los pozos existentes ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala, para determinar si los mismos presentan variaciones respecto a sus condiciones iniciales o se mantienen y, con base en esto, definir si aplica o no la planificación de mantenimiento, si se requiere profundizar el pozo, si el pozo se encuentra en estado crítico, entre otros; esto con la finalidad de no tener factores

que intervengan o repercuten a interrupciones repentinas y provoquen desabastecimiento de agua, lo cual se traduciría en un impacto negativo en cualquier proceso de producción, como el abastecimiento de agua para el consumo diario, entre otros. Derivado de lo anterior, se plantean las siguientes preguntas.

- Pregunta principal

¿Cuáles son los factores que condicionan la recarga del recurso hídrico de los pozos mecánicos en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala?

- Preguntas secundarias

¿Cuáles es el comportamiento histórico del nivel estático, nivel dinámico, caudal de extracción y calidad el agua en los pozos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala?

¿Se cuenta con un plan de frecuencia de monitoreo de nivel estático, nivel dinámico, caudal de extracción y calidad de agua en los pozos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala?

¿Se cuenta con un plan de mantenimiento preventivo de pozos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala?

¿Se cuenta con un plan de acción en los pozos considerados como críticos en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala?

¿Se ha realizado la inversión de un plan de monitoreo de los pozos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala?

OBJETIVOS

General

Evaluar los factores que condicionan la recarga del recurso hídrico a los pozos de la zona 1 del municipio de Mixco, para realizar el análisis e interpretación del comportamiento de sus niveles estático y dinámico.

Específicos

- Establecer cuál es el comportamiento histórico del nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción, para determinar el estado actual de los pozos mecánicos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco.
- Proponer un plan de frecuencia de monitoreo de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción, para verificar regularmente el estado de los pozos mecánicos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco.
- Recomendar un plan de mantenimiento preventivo de pozos, para su aplicación en los pozos mecánicos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco.
- Proponer un plan de acción en los pozos considerados como críticos, tomando en cuenta la reducción del caudal de extracción y descenso significativo del nivel dinámico, para su aplicación en la entidad competente.

- Determinar cuál es el costo de inversión de un plan de monitoreo en los pozos mecánicos, para presentar una propuesta técnica, económica y viable a la entidad competente.

HIPÓTESIS

Hi. Los factores que condicionan la recarga del recurso hídrico de los pozos mecánicos en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala, se debe a cambios en el nivel estático y dinámico, es decir, que se presentan variaciones respecto a las condiciones iniciales.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Nivel estático	Capa o zona límite de la superficie de saturación, en zonas que son permeables	Medición de niveles de agua
Nivel dinámico		Medición caudal de extracción

Ho. Los factores que condicionan la recarga del recurso hídrico de los pozos mecánicos en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala, no se deben a cambios en nivel estático y dinámico, sino a condiciones naturales de calidad de agua que obstruyen el ingreso de agua en las zonas de captación.

Ha. Los factores que condicionan la recarga del recurso hídrico de los pozos mecánicos en la zona 1 del municipio de Mixco, departamento de Guatemala, se debe a cambios provocados en la eficiencia de los equipos de bombeo.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de la presente investigación, se llevó a cabo la metodología que se describe a continuación.

Inicialmente se realizó la recopilación bibliográfica de los antecedentes en la zona de estudio, con la finalidad de determinar si existen estudios previos dentro de la zona de interés o cercanos a la misma. En estas referencias se incluyen: documentación desarrollada por profesionales, comprendido en tesis, simposios, artículos, libros y mapas.

Posteriormente, se realiza una entrevista con el director del departamento de Aguas y Drenajes de la municipalidad de Mixco para definir la zona de interés a analizar. Para el presente trabajo de investigación, se define como la zona de interés el casco urbano (zona 1) del municipio de Mixco, departamento de Guatemala y según su delimitación geográfica, cuenta con un total de trece pozos dentro de ella.

Una vez definida el área de estudio se procedió a realizar un análisis biofísico básico georreferenciado utilizando el programa Qgis, en donde se desarrolla un análisis macro y micro del comportamiento de los pozos ubicados dentro del casco urbano. A través de este análisis se pueden determinar aspectos como: la geología, características de las rocas, número de microcuencas, distribución de los pozos en las microcuencas, entre otros.

Con el apoyo del departamento de Aguas y Drenajes de la municipalidad de Mixco, se procede a realizar la compilación de información correspondiente al

registro histórico de parámetros (nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción) de los pozos a considerar. De esta manera, se desarrolló posteriormente la tabulación de la información recopilada, obteniendo como resultado una tabla de resumen del registro histórico (año 2015 a 2021) de los parámetros de un pozo (nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción).

A través de estos resultados se procedió a realizar el análisis e interpretación gráfica del registro de los parámetros de los pozos considerados en la zona de interés, para determinar las posibles variaciones de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción en el periodo de seis años. Una vez desarrollado este análisis gráfico, se procede a realizar el análisis por microcuenca y, posteriormente, concretar la discusión de resultados, las conclusiones y, por último, las recomendaciones.

INTRODUCCIÓN

Considerando que es necesario disponer de los servicios básicos para un desarrollo adecuado del ser humano y de esta forma, rendir adecuadamente en los ámbitos de empleo, estudio, desarrollo económico y social, surge la necesidad constante de la ejecución de proyectos de toda índole, con el objeto de mejorar la calidad de vida de todos los ciudadanos, y en general, de mejorar el país.

La Municipalidad de Mixco brinda la mayoría de los servicios básicos a toda el área municipal que se encuentra bajo su jurisdicción, invirtiendo en mantenimiento de caminos ya existentes, sistemas de agua potable, estabilización de suelos de terracería, instalación de drenajes sanitarios, infraestructuras para la educación y salud de primera calidad, entre otros.

Este estudio busca dar una solución técnica a las necesidades presentadas por el municipio de Mixco, para lo cual se realizó el análisis e interpretación del comportamiento del nivel estático y dinámico en los pozos ubicados en la zona 1, a fin de verificar el posible descenso o variación respecto a sus valores históricos y, determinar cuáles fueron los factores que condicionaron el comportamiento de los mismos.

El estudio se desglosa en cinco capítulos, el primero se enfoca sobre las generalidades de la investigación, así como las características y aprovechamiento de las aguas subterráneas, tipos de pozos y razones de baja producción de los mismos.

El segundo capítulo muestra la metodología del monitoreo que se realiza en los pozos ubicados en el área de estudio.

En el tercer capítulo se analizan las condiciones de un pozo, los resultados de caudal, niveles, abatimiento y el perfil estratigráfico.

El cuarto capítulo describe una propuesta de planificación del aprovechamiento del agua subterránea en estos pozos.

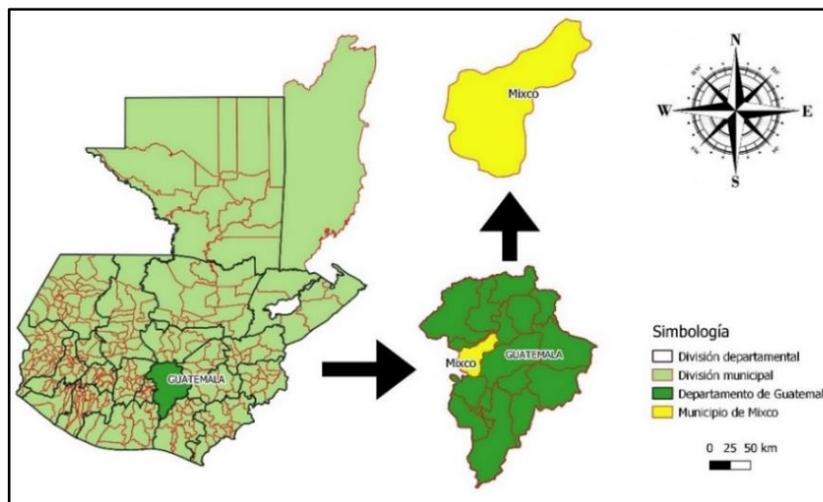
En el quinto capítulo se describe la metodología para el mantenimiento de los pozos, considerando el comportamiento de cada uno.

1. GENERALIDADES

1.1. Geografía del municipio de Mixco

Mixco se encuentra ubicado al oeste del municipio de Guatemala, y su cabecera se encuentra en las coordenadas 90°36'20.669" longitud oeste, y 14°37'52.102" latitud norte, a 17 km de la ciudad capital. El municipio de Mixco tiene como colindancias los municipios de San Raymundo y San Pedro Sacatepéquez al norte; el municipio de Villa Nueva al sur; los municipios de Chinautla y Guatemala al este, todos estos del departamento de Guatemala; y con el departamento de Sacatepéquez, con los municipios de San Lucas Sacatepéquez y Santiago Sacatepéquez, ambos al oeste. (Municipalidad de Mixco, 2020)

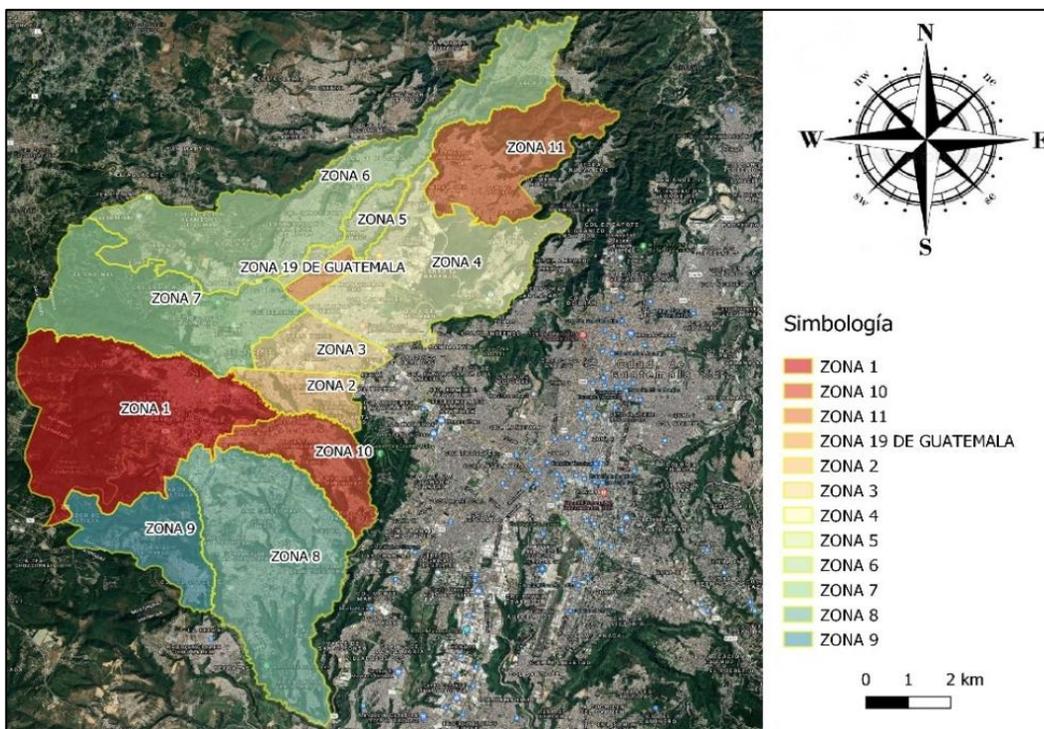
Figura 1. Localización y ubicación municipio de Mixco



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

De acuerdo al Diccionario Geográfico Nacional publicado por el IGN, Mixco cuenta con una extensión territorial de 99 km², el cual se divide en 11 zonas municipales que están conformadas por un total de 648 lugares poblados. (Municipalidad de Mixco, 2020)

Figura 2. Límite de zonas del municipio de Mixco



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

La municipalidad de Mixco manifestó su interés específico en el área del casco urbano para el desarrollo del estudio, por lo tanto, para dicho enfoque se seleccionó como área de estudio la zona 1 del municipio.

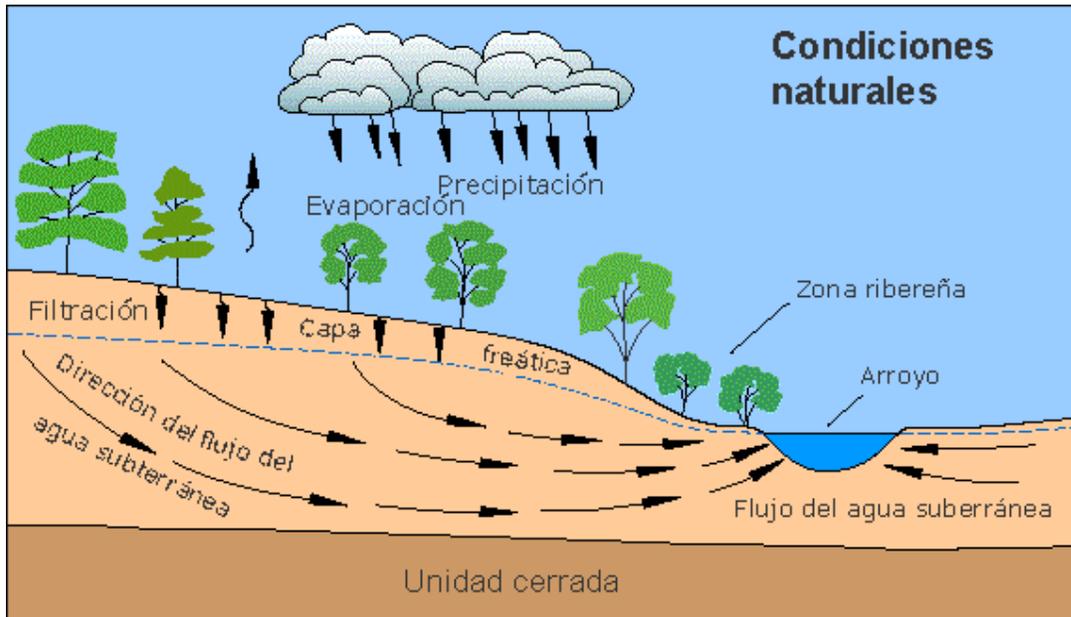
1.2. Aguas subterráneas

El agua que se encuentra contenida en una zona de saturación, es la parte de la totalidad de agua en los subsuelos que se puede mencionar con propiedad como agua subterránea. El agua subterránea puede formarse como un único cuerpo de agua continuo o se puede formar en diferentes estratos separados. (Gramajo, 2015).

Las características de circulación de las aguas subterráneas dependen de tres factores que condicionan su recarga, su presencia en el suelo y su descarga, los cuales son: climatología e hidrología, geología (tectónica y litología) y la geomorfología.

El proceso recarga de agua subterránea a los acuíferos se deriva por la infiltración de las aguas superficiales provenientes de la precipitación, corrientes superficiales y lagos alimentados por el agua de lluvia, de igual manera por el proceso de condensación. Una vez recargados los acuíferos, el agua se infiltra hasta encontrar un estrato que es impermeable, utilizándolo como un medio de transporte hasta el punto donde se ubique otro estrato que sea menos impermeable y, de esta manera, recargar estratos a mayor profundidad. Mientras tanto, otra parte del agua continua hasta su punto de descarga que pueden ser, por ejemplo: ríos, lagos, océanos, entre otros.

Figura 3. Flujo de agua subterránea



Fuente: USGS. *La ciencia del agua para escuelas*. Consultado el año 2021. Recuperado de: <https://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>.

1.3. Acuífero

Se define como una estructura geológica que contiene agua y es capaz de ceder en aprovechables cantidades a través de medios que pueden ser, por ejemplo: un pozo, galerías, zanjas, el uso de un manantial o sondeos. (Cruz, 2015)

Dentro de estos estratos o formaciones geológicas se pueden presentar diversidad de materiales, por ejemplo: formaciones volcánicas, calizas agrietadas, calizas muy agrietadas, gravas de río, arenas de playa, areniscas porosas muy cementadas, entre otros.

1.4. Tipos de acuífero

Tomando en consideración que hay diversos tipos acuíferos que se clasifican según el material litológico que lo constituye o la presión hidrostática del agua subterránea en él, los podemos clasificar en: (Ordoñez Gálvez, 2011)

1.4.1. Acuífero libre

Se denomina como acuífero libre cuando se encuentra una superficie que está libre de agua almacenada y está a presión atmosférica. (Molina, Telléz, y Paya, 2017)

En estos acuíferos, una vez desarrollada la perforación de pozos y que estos lo atraviesen parcial o totalmente, el nivel de agua subterránea será el mismo que se tendrá dentro del estrato geológico; es decir, el nivel freático coincidirá nivel piezométrico.

1.4.2. Acuífero semiconfinado

Son casos particulares de acuíferos cautivos, cuando el techo, el muro o ambos no son en su totalidad impermeables, sino que se permite la circulación de manera vertical del agua subterránea. (Ordoñez Gálvez, 2011)

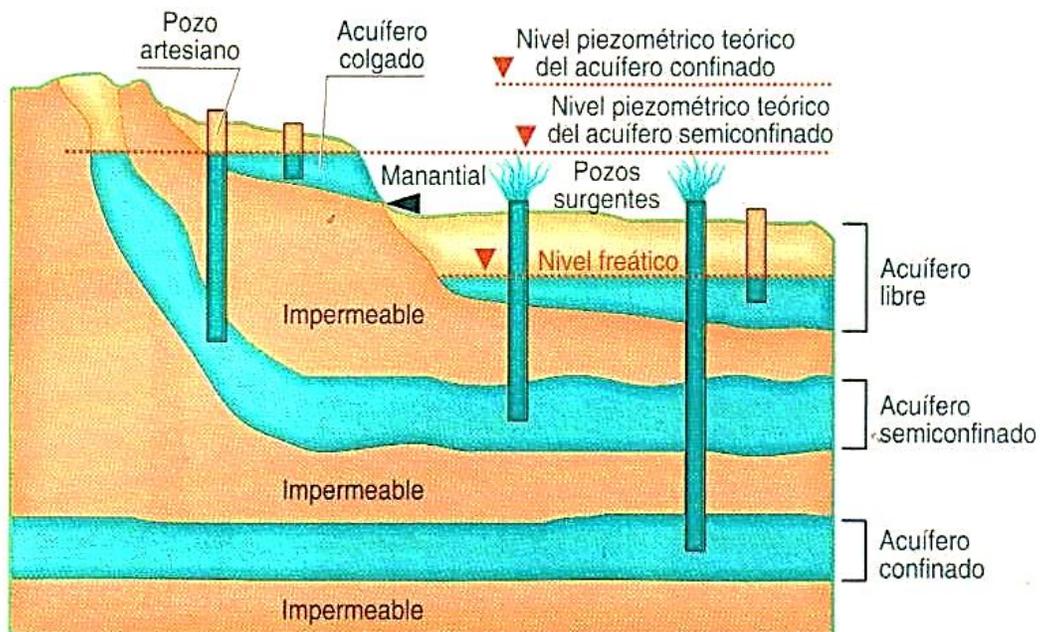
Es decir, que el agua subterránea alimentará muy lentamente a un acuífero principal que se encuentre a mayor profundidad.

1.4.3. Acuífero confinado

Un acuífero confinado es cuando una capa geológica está conteniendo una zona completamente permeable. Dentro de esta zona el agua se encuentra sometida a presión, de tal manera que el nivel de agua en una perforación abierta dentro del acuífero, asciende hasta la superficie. (Saneamiento, S.f)

En este tipo de acuífero, al perforar un pozo mecánico y atravesar el límite superior del estrato o formación geológica que lo contiene, el nivel del agua subterránea asciende de manera inmediata hasta alcanzar el nivel piezométrico y estabilizarse en el mismo.

Figura 4. Tipos de acuíferos y pozos



Fuente: Navarrete, Edison. *Tipos de acuíferos y pozos*. Consultado el año 2021. Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-814-Tipos-de-Acuiferos-y-Pozos-Figura-tomada-de-INTERNET_fig95_321159458.

1.5. Aprovechamiento de las aguas subterráneas

La primera etapa para recolectar información del agua subterránea es la exploración preliminar de las condiciones hidrogeológicas y geológicas que se presenten en el área interés. (Cid, 2016)

Cuando los acuíferos permeables se utilizan en conjunto con el agua superficial para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible, con frecuencia estos desempeñan el papel como reserva y en algunas situaciones técnicas que son favorables, los receptores de excedentes que son temporales por medio de alguna forma correcta de la recarga artificial. (Emilio Custodio, 1996)

Las recargas superficiales son aquellas que se producen por la cantidad y el tipo de precipitación y las aguas subterráneas nos sirven para determinar el flujo subterráneo, el cual nos servirá para determinar la recarga y la descarga en un punto determinado. Parte del agua superficial sufre el proceso de infiltración, por lo que este puede ser aporte para las aguas subterráneas.

Actualmente en Guatemala, no existen mapas hidrogeológicos que identifiquen y localicen los acuíferos importantes del país, así como, sus características hidrogeológicas para aprovechar el agua subterránea. (Barrientos, 2016)

1.6. Características del agua subterránea

La calidad del agua subterránea la condicionan las características o procesos biológicos, hidrológicos, geológicos y climáticos, las cuales se evalúan por medio de toma de muestras, siendo las principales fuentes: sales disueltas la

alteración de rocas y sedimentos, aportaciones atmosféricas (oceánicas y terrestres), organismos vivos y el lavado de suelos. (Cabrera, 2005)

La recarga del recurso hídrico que se extrae de un acuífero libre o acuífero confinado es variable, depende de las características del mismo (espesor, porosidad, permeabilidad, entre otros) y del diseño de la captación que se realice. (Cabrera, 2005)

Geológicamente, al momento de realizar una perforación de pozo con el fin de localizar agua subterránea, se espera hallar rocas sedimentarias o rocas volcánicas. Como se visualiza en el inciso 2.2, la ubicación de los pozos se encuentra en dos geologías distintas y ambas geologías, por el tipo de material, son buenas para almacenar y conducir el agua.

La contaminación que impacta el agua subterránea es normalmente producida por la infiltración en el suelo, por lo que generalmente un estudio de su análisis es conjunto de un sistema agua subterránea y suelo, así como las alternativas de descontaminación o remediación. Los aspectos a analizar son los siguientes: (Centro Europeo de Postgrado, s.f.)

- Tipo de contaminante
- Foco de contaminación (puntual o difuso)
- Mecanismo de infiltración

1.7. Tipos de pozos

Un pozo es una estructura vertical que se ejecuta con el fin de captar agua a lo largo de sus paredes y extraer de forma mecánica, agua subterránea

contenida en un acuífero. Según la necesidad y utilidad de cada pozo, existen diversos tipos de pozos los cuales pueden ser:

1.7.1. Pozos poco profundos

Los pozos poco profundos son pozos artesanales que se encuentran a profundidad que es inferior a los 50 pies y que usualmente se construyen de forma manual. En este tipo de pozos, por ser poco profundos, existe alto riesgo de contaminación por ser muy superficiales y estos tienden a secarse más fácilmente.

1.7.2. Pozos profundos

Los pozos profundos son perforaciones realizadas a través de diferentes formaciones geológicas. Por lo general, este tipo de pozos pueden llegar a profundidades mayores de 30 metros.

En este tipo de pozos, por ser profundos, existe muy bajo riesgo de contaminación por no encontrarse susceptibles o expuestos a la superficie.

1.7.3. Pozos artesianos

Por lo general, los pozos artesanales son perforaciones que se realizan a una profundidad desde 1000' hasta 1200', hasta encontrar un acuífero donde el agua contenida en el estrato, se encuentra a una presión superior a la presión atmosférica y se encuentra totalmente saturada, ocupando la totalidad de la formación geológica.

Por tal razón, durante el proceso de perforación del estrato permeable, al momento de atravesar el límite del estrato superior del material que contiene el agua subterránea, el agua asciende por presión hidrostática hasta llegar a la superficie y estabilizarse con el nivel piezométrico, cuando lo permite topografía, en tal caso se define como un pozo artesano surgente. (Cid, 2016)

Existen tres tipos de métodos de perforación de un pozo: método de rotación, método de percusión y método de rotopercusión. Según el método definido para perforar un pozo, con base en consideraciones geográficas y de geología local de la zona de interés en la cual se realizará la perforación, así se define el fluido de perforación que se va a utilizar según el método seleccionado. Estos fluidos de perforación pueden ser: a base de bentonita y a base de aire y espuma.

1.7.3.1. Método de percusión

El método de perforación por percusión consiste en dar golpes al terreno con una broca para provocar el rompimiento de las rocas que serán extraídas posteriormente con una cubeta. La herramienta solamente golpea como un martillo sin dar vueltas.

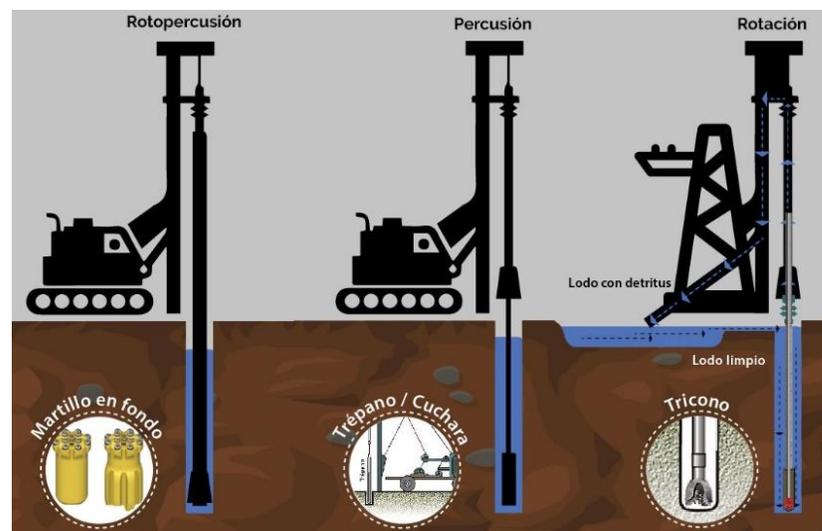
1.7.3.2. Método de rotación

El método de rotación consiste en la utilización de una broca tricónica y fluido a base de bentonita para hacer más eficiente el sistema. La herramienta únicamente da vueltas sin generar golpes. Este método se usa donde el terreno es inestable y la roca es semidura a suave.

1.7.3.3. Método de rotopercusión

El método de roto percusión consiste en la utilización de un martillo de fondo y fluido de perforación a base de aire y espuma. La herramienta da vueltas y golpea, siendo el método más eficiente de perforación en terrenos estables y muy duros. Muy importante seleccionar geológicamente los lugares donde se utilizará este método, de lo contrario se puede provocar la formación de cavernas, pérdidas de circulación y/o atrapamiento de herramienta.

Figura 5. Métodos de perforación



Fuente: Bolaños, Laura. *Métodos de perforación*. Consultado el año 2021. Recuperado de: <https://www.hidroambientecr.com/notas/metodos-de-perforacion>.

1.8. Razones de baja extracción de caudal en los pozos

Se pueden mencionar diversas razones por las que un caudal inicial de un pozo sufre una disminución en su rendimiento; a continuación, se resaltan algunas de las mismas:(Cid, 2016)

- El sedimento de algunos materiales muy finos en la profundidad y la presencia de lodos en la zona de captación pueden impedir que circule libremente el agua que se encuentra dentro del pozo.
- La presencia de corrosión en las paredes de un pozo, sobre todo en la rejilla, provocado por minerales que excedan el límite tolerable; esto ocasiona que el agua subterránea dentro del acuífero no tenga libre circulación.
- Las incrustaciones que pueden acumular los materiales en el interior de las aberturas de las rejillas, al disminuir su porcentaje de área abierta, pueden provocar pérdidas de carga.
- La sobreexplotación de un acuífero a través de la succión de un caudal de extracción superior al caudal específico.

1.9. Vida útil económica de un pozo

Es importante identificar el comportamiento de los pozos, para lo que periódicamente deben monitorearse los caudales de extracción que son bombeados, el régimen de bombeo y la potencia consumida por bomba. El monitoreo de los pozos determinará el funcionamiento, siempre y cuando el registro documentado sea bien interpretado, ya que de esto dependerá identificar el comportamiento y por ende su evaluación y aprovechamiento. (Cid, 2016)

El implemento de un programa de mantenimiento para los pozos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, será de gran importancia para la municipalidad, ya que el principal objetivo es la conservación de las propiedades físicas del pozo en óptimas condiciones y de esta manera prolongar la vida útil de los mismos.

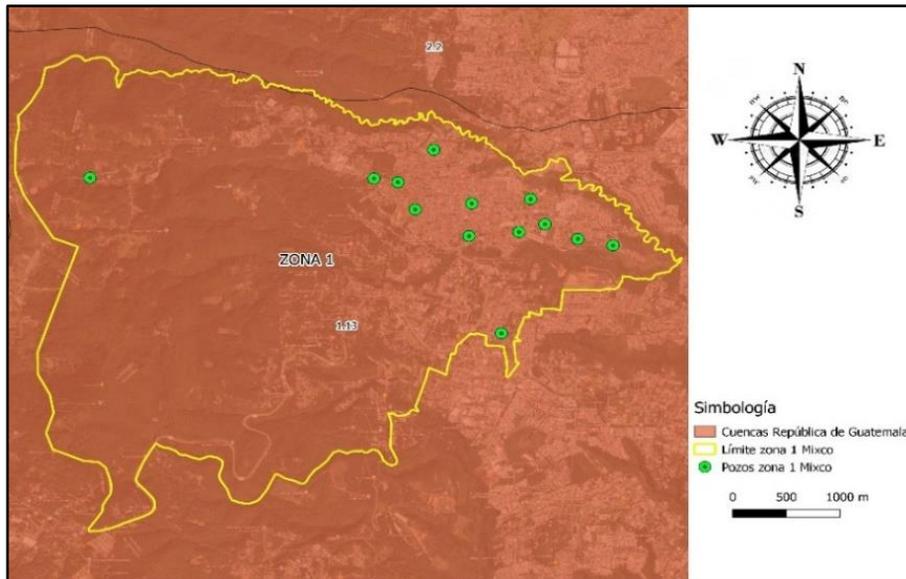
2. MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

2.1. Análisis macro y micro de la zona en estudio

Para el registro de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción de los pozos mecánicos, se consideró enfocar el área de estudio en los pozos de la zona 1 del municipio de Mixco (zona de interés de la municipalidad); las ubicaciones de los pozos en análisis se encuentran dispersas en los alrededores del casco urbano en cuatro microcuencas diferentes, las cuales son: microcuenca río Mariscal, microcuenca río Seco, microcuenca río Molino y microcuenca río Panchiguajá

A través del análisis macro de la división hidrogeológica utilizando del mapa de cuencas y vertientes de la república de Guatemala realizado por el INSIVUMEH, se observó que la totalidad de los pozos se encuentran ubicados dentro de la cuenca 1.13 María Linda con vertiente en el Pacífico, como se visualiza en la figura 6:

Figura 6. **Distribución de pozos en las cuencas de la república de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

Sin embargo, a través del análisis micro se determinó que la totalidad de pozos se encuentran distribuidos en diferentes cantidades en un total de cuatro microcuencas, como se muestra a continuación:

Tabla I. **Distribución de pozos en las microcuencas de zona 1 del municipio de Mixco**

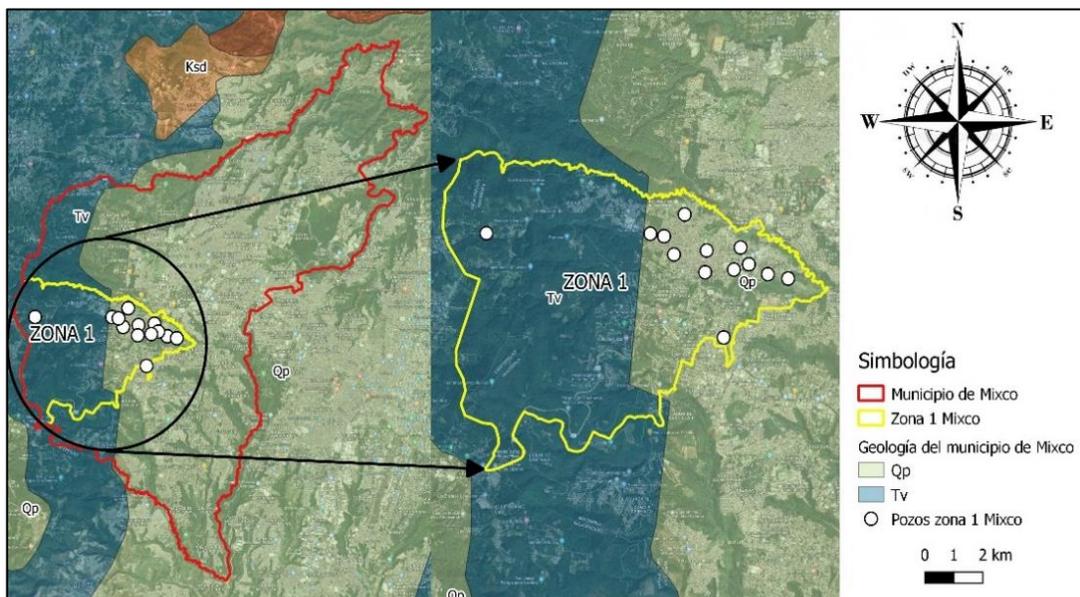
No.	Microcuenca	Cantidad de pozos
1	río Mariscal	1
2	río Seco	1
3	río Molino	2
4	río Panchiguajá	7
TOTAL		11

Fuente: elaboración propia.

2.2. Análisis geológico de la zona de estudio

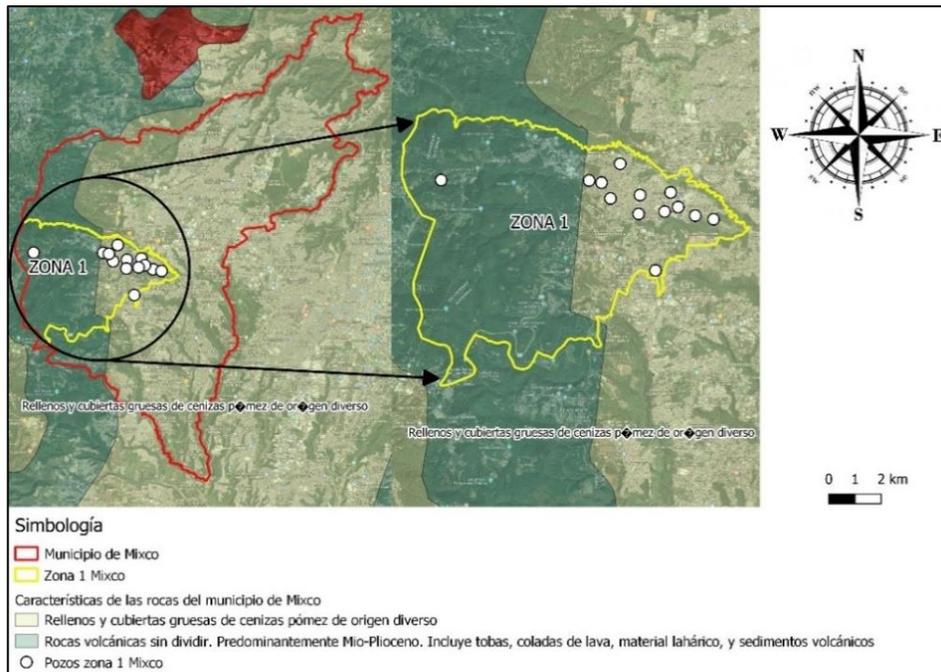
Geológicamente, el municipio de Mixco se encuentra en ubicado en la región fisiográfica de tierras altas volcánicas, en esta podemos encontrar dos grandes paisajes que son: montañas volcánicas del centro del país y valle tectónico de la ciudad de Guatemala. Como se visualiza en las figuras No. 7 y 8, la zona 1 del municipio de Mixco se encuentra delimitada por dos geologías distintas:

Figura 7. Geología en zona 1 del municipio de Mixco



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

Figura 8. **Características de las rocas en zona 1 del municipio de Mixco**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

Tv: según el IGN, en este tipo de geología se encuentran dentro del área de estudio los siguientes materiales: rocas ígneas y metamórficas del período terciario. Sin embargo, las características físicas de las rocas para la zona 1 del municipio de Mixco incluyen rocas volcánicas sin dividir, mio-plioceno, tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos.

Qp: según el IGN, en este tipo de geología se encuentran dentro del área del área de estudio los siguientes materiales: rocas ígneas y metamórficas del período cuaternario. Sin embargo, las características físicas de las rocas para la zona 1 del municipio de Mixco incluyen las rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso.

2.3. Análisis morfométrico de la zona de estudio

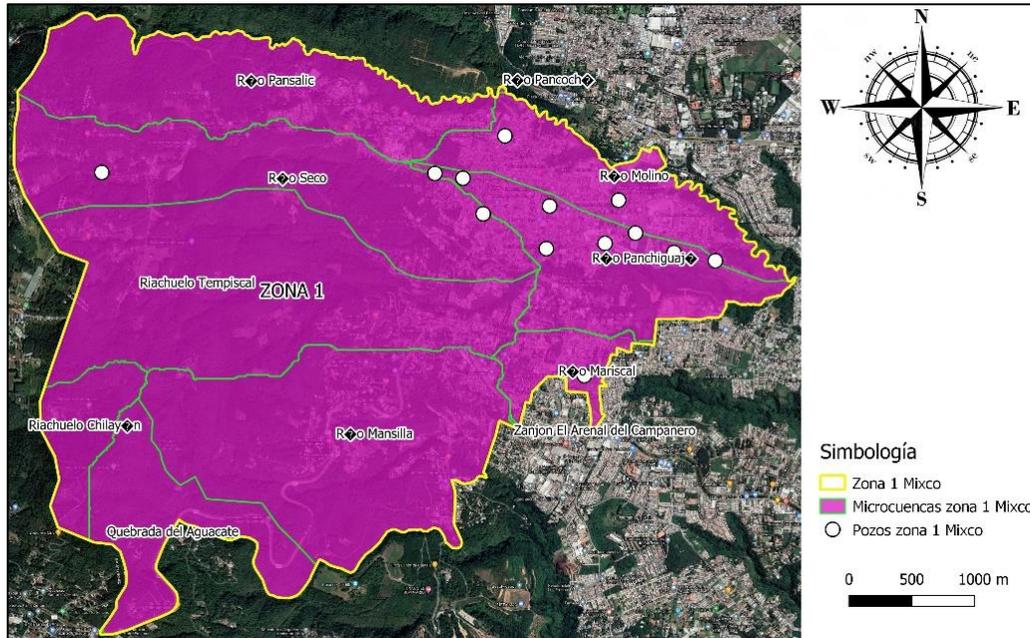
El análisis morfométrico es el estudio de variables de superficie, lineales, de relieve y drenaje, que permite determinar las características físicas de una cuenca. A través de estos resultados se desarrollan comparaciones entre cuencas y el modelado para la interpretación de la posible funcionalidad hidrológica.

2.3.1. Microcuencas del área de estudio

La zona 1 del municipio de Mixco cuenta actualmente con un total de trece pozos mecánicos para la dotación de agua potable a la población del casco urbano. Para el desarrollo del presente informe se consideró el análisis por microcuenca y cantidad de pozos en ella, esto con el objeto de determinar la variación de nivel estático y nivel dinámico por cada microcuenca y a través de la comparación de datos históricos vs. datos presentes.

Cabe mencionar que no se consideraron para el análisis dos pozos, esto se debe a que la municipalidad de Mixco no cuenta con registro histórico del primer pozo por tratarse de un pozo artesanal y el segundo pozo quedó inhabilitado.

Figura 9. **Distribución de pozos en las microcuencas de zona 1 del municipio de Mixco**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

Tabla II. **Área de las microcuencas del área de estudio**

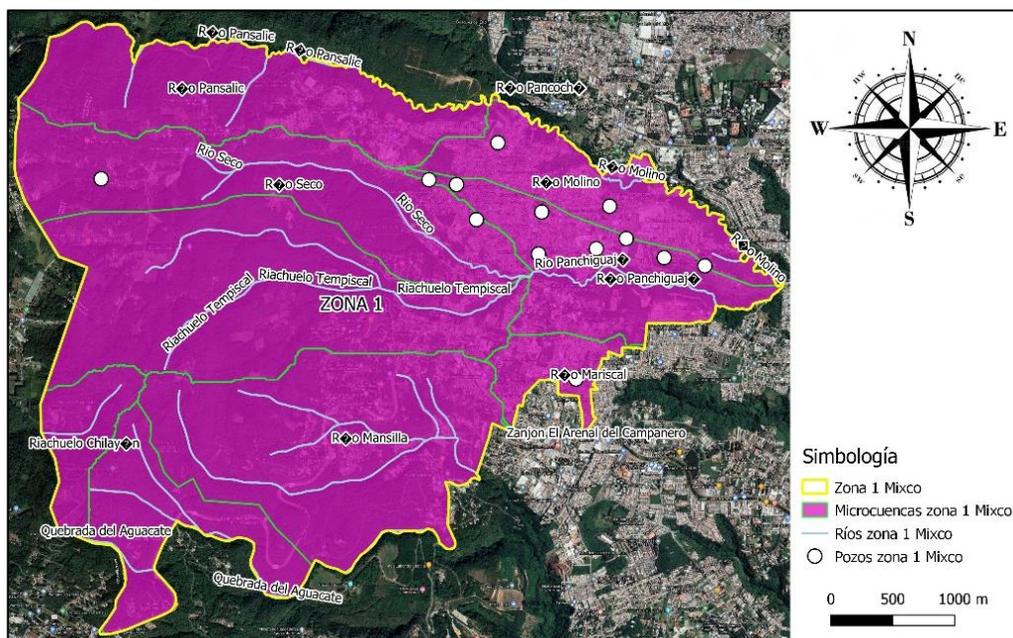
No.	Microcuenca	Área (m ²)
1	río Mariscal	5 571 859
2	río Seco	2 231 500
3	río Molino	2 361 132
4	río Panchiguajá	1 916 768
TOTAL		12 081 259

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Ríos del área de estudio

La zona 1 del municipio de Mixco cuenta actualmente con un total de siete ríos, dos riachuelos y una quebrada en los alrededores del área casco urbano. Para el presente informe, se consideró el análisis de ríos en las microcuencas donde se encuentran distribuidos los pozos, esto con el objetivo de determinar las características físicas de las cuatro microcuencas de interés.

Figura 10. Análisis de ríos en zona 1 del municipio de Mixco



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

Tabla III. Longitud de ríos en las microcuencas del área de estudio

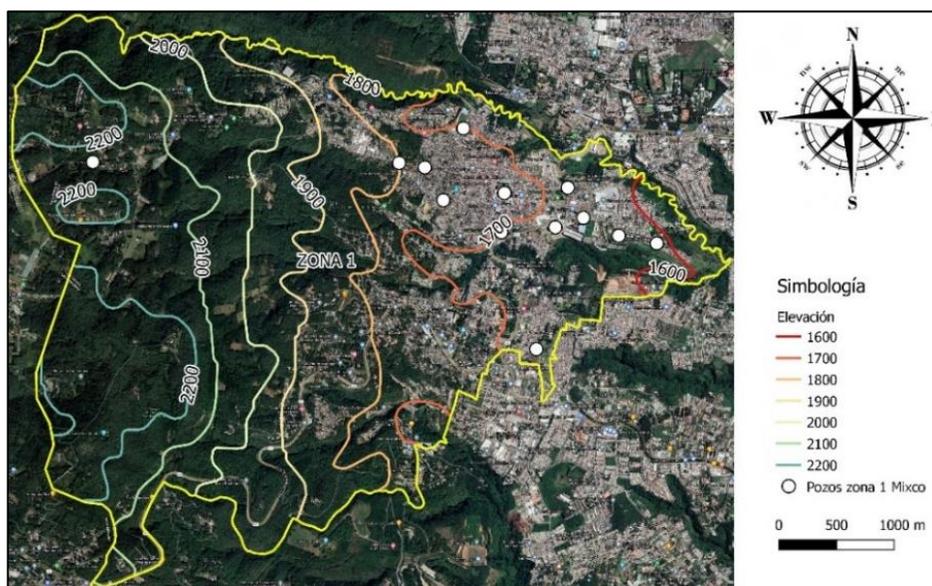
No.	Microcuenca	Longitud (m)
1	río Mariscal	608,81
2	río Seco	3 432,03
3	río Molino	4 022,53
4	río Panchiguajá	2 563,28
TOTAL		10 626,65

Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Curvas de nivel del área de estudio

El análisis de curvas de nivel es de utilidad para determinar las pendientes de las microcuencas del área de estudio, relacionando las diferentes alturas con las distancias recorridas en metros hacia el punto en donde desembocan los ríos.

Figura 11. Curvas de nivel en zona 1 del municipio de Mixco

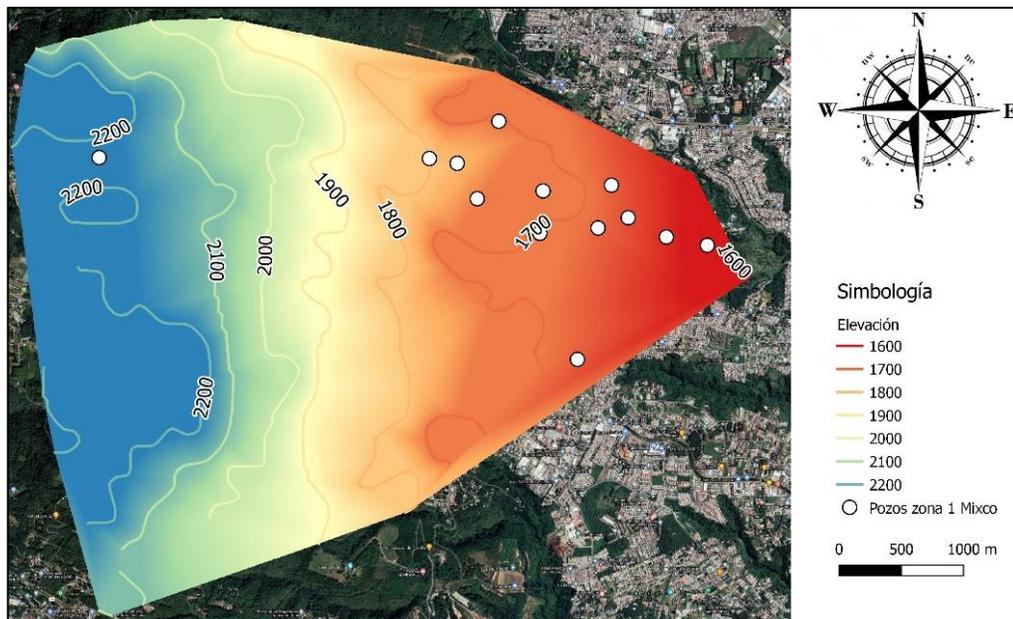


Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

2.3.4. Modelo de elevación digital del área de estudio

Los modelos de elevación digital se utilizan para representar visual y matemáticamente los valores de las elevaciones respecto al nivel del mar y así caracterizar las formas de los relieves y elementos que se presentan en él.

Figura 12. Modelo de elevación digital en zona 1 del municipio de Mixco

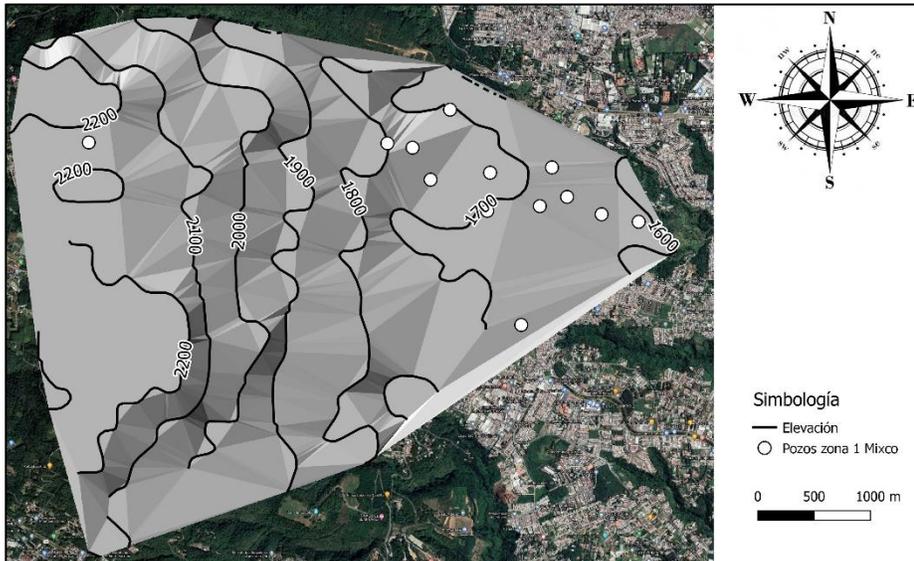


Fuente: elaboración propia utilizando programa Qgis.

2.3.5. Hillshade del área de estudio

El Hillshade es una técnica que es de utilidad para visualizar el terreno en función de luz, pendiente y orientación en la superficie elevada. Este método proporciona valores de elevación absolutos en función de la topografía del terreno.

Figura 13. **Hillshade en zona 1 del municipio de Mixco**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

2.4. Ubicación geográfica de los pozos

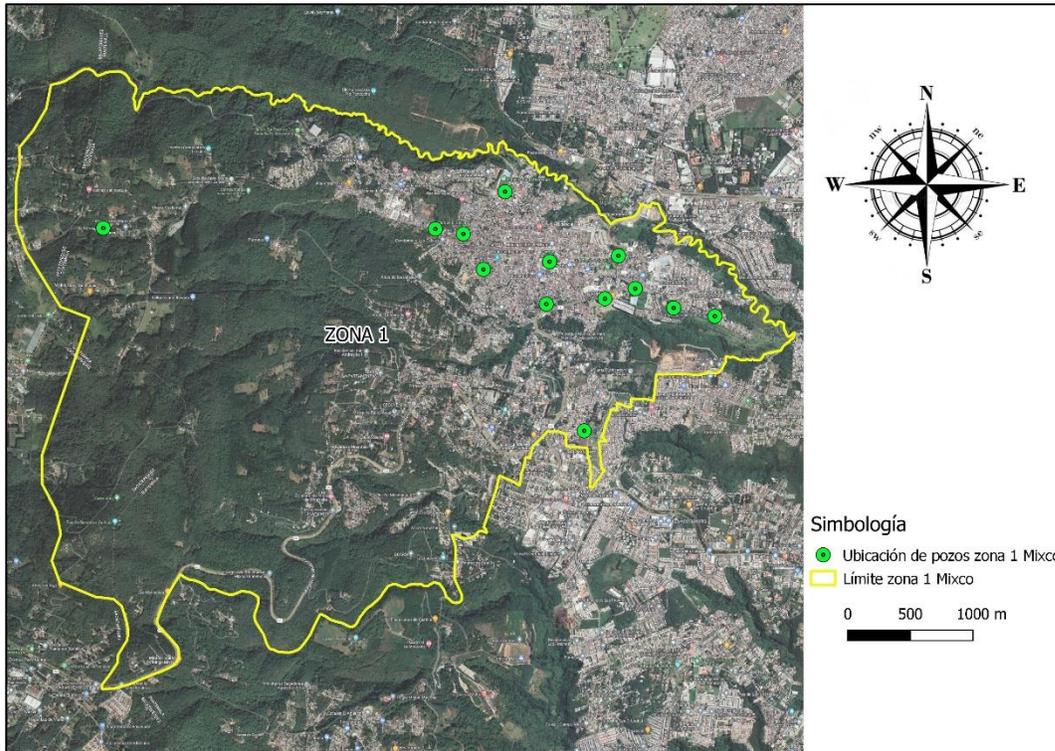
A continuación, se presenta la ubicación geográfica de la distribución de pozos en las cuatro microcuencas en la zona 1 del municipio de Mixco, los cuales son utilizados para llevar el control de niveles de agua potable para el casco urbano.

Tabla IV. **Ubicación geográfica de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco**

Pozo	Microcuenca	Ubicación geográfica	Dirección
P-1	río Mariscal	Latitud: 14°37'4.61"N, Longitud: 90°36'12.36"O	20 calle "A" 0-11, Sector Vista al Valle, Lo de Coy
P-3	río Seco	Latitud: 14°37'46.57"N, Longitud: 90°36'39.28"O	7ma. Calle "A" 11-74
P-4	río Molino	Latitud: 14°38'6.80"N, Longitud: 90°36'33.50"O	11 avenida 0-50
P-5	río Molino	Latitud: 14°37'50.11"N, Longitud: 90°36'3.25"O	4ta Calle 1-20 (parquecito)
P-6	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'57.06"N, Longitud: 90°36'52.11"O	Carretera Vieja Antigua 4-90
P-7	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'55.81"N, Longitud: 90°36'44.65"O	5ta Calle 13-07
P-8	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'48.60"N, Longitud: 90°36'21.61"O	5ta Avenida 5-00, parque central
P-9	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'37.55"N, Longitud: 90°36'22.47"O	Calzada 4 de febrero
P-10	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'38.93"N, Longitud: 90°36'6.85"O	Carretera interamericana 1-90 Km 16.8 Puente Jorge Surque
P-11	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'41.61"N, Longitud: 90°35'58.75"O	Carretera interamericana 0-51 Km 16.5 Puente Mateo Flores
P-13	río Panchiguajá	Latitud: 14°37'34.43"N, Longitud: 90°35'37.50"O	3ra. Calle 6-20, Colonia Lomas de Portugal

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Ubicación geográfica de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa Qgis.

2.5. Monitoreo del estado de los pozos

El monitoreo de las aguas subterráneas consiste en la medición de los niveles de agua (nivel estático y nivel dinámico) dentro del pozo, además de la medición del caudal de extracción.

2.5.1. Nivel de profundidad de perforación y niveles de agua

A continuación, se presentan el registro histórico de los parámetros (año 2015) de los pozos de zona 1 del municipio de Mixco considerados para el análisis e interpretación del comportamiento del nivel freático en las distintas microcuencas. Para los valores del aforo la medición se realizó en galones por minuto (gpm).

Tabla V. **Niveles de agua y profundidad de perforación de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco**

Pozo	Microcuenca	Profundidad del pozo (m)	Aforo (gpm)	Nivel estático (m.s.n.m.)	Nivel dinámico (m.s.n.m.)
P-1	río Mariscal	208,79	110	1 527,96	1 482,93
P-3	río Seco	247,50	225	1 563,87	1 537,35
P-4	río Molino	358,14	156	1 439,39	1 396,72
P-5	río Molino	205,74	77	1 532,84	1 499,31
P-6	río Panchiguajá	152,40	120	1 667,13	1 665,79
P-7	río Panchiguajá	353,57	95	1 561,45	1 447,45
P-8	río Panchiguajá	207,26	60	1 570,08	1 522,83
P-9	río Panchiguajá	368,81	550	1 532,95	1 433,06
P-10	río Panchiguajá	487,68	475	1 533,82	1 380,20
P-11	río Panchiguajá	405,38	647	1 524,34	1 400,68
P-13	río Panchiguajá	365,76	260	1 484,98	1 364,58

Fuente: elaboración propia.

3. ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE UN POZO

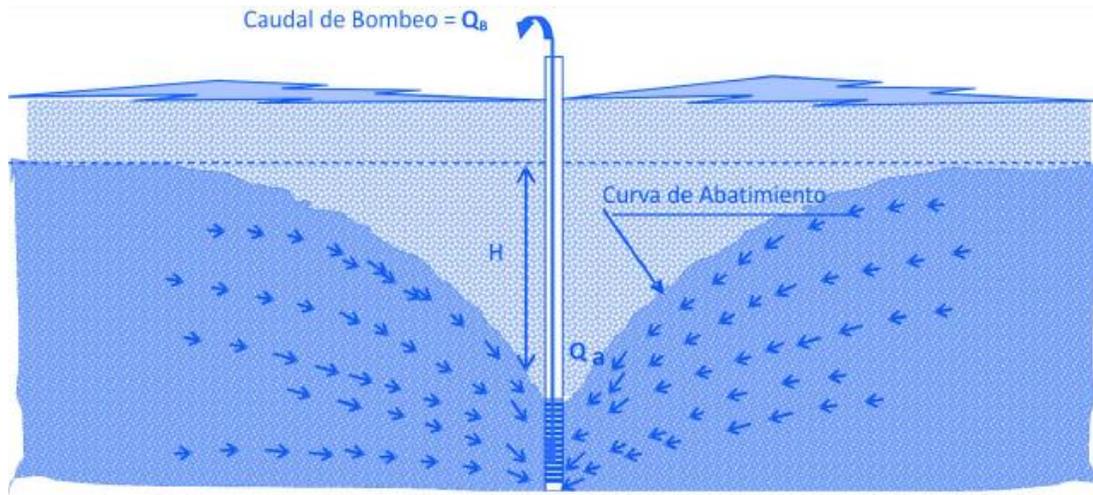
Como toda obra de infraestructura después de un tiempo de estar en funcionamiento, necesita de mantenimiento y de un monitoreo constante de sus aspectos de funcionamiento, en el caso de los pozos mecánicos hay varios aspectos que se deben tomar en cuenta, estos son: caudal, nivel estático, nivel dinámico, abatimiento y perfil estratigráfico. (Contreras M. F., 2014)

3.1. Medición de caudal

El caudal de extracción de un pozo es sin duda el punto de mayor interés, debido a que se busca determinar que el pozo cubra la necesidad de abastecimiento de agua. Existe varios métodos para determinar el caudal que produce un pozo, el más destacado es el método de medidor de flujo, pero muchas ocasiones no se dispone de este equipo, por lo que se debe aforar por otros métodos. (Contreras M. F., 2014)

Los estudios de aforo de pozos de agua subterránea tienen como finalidad conocer el caudal de explotación y las características hidráulicas de los acuíferos, la importancia de los ensayos de aforo radica en que a través de ellos se puede determinar la disponibilidad del agua del subsuelo, la calidad del agua subterránea, las características y eficiencia de funcionamiento de los elementos del pozo. (Contreras M. F., 2014)

Figura 15. Caudal de extracción



Fuente: Mantilla (2011). *Pozos y Acuíferos*. Pág. 44.

El caudal de extracción en un pozo dependerá del diámetro de perforación, de la carga dinámica total y del diámetro de entubado del pozo. En la tabla VI se presenta un listado de referencia de caudales en función de los diámetros, el cual dependerá de la condición hidrogeológica del lugar:

Tabla VI. Caudal de extracción de referencia según diámetro del pozo

No.	$\varnothing_{\text{perf.}}$	$\varnothing_{\text{entub.}}$	Q (gpm)
1	9 $\frac{7}{8}$ "	6"	100
2	12 $\frac{1}{4}$ "	8"	200
3	14 $\frac{3}{4}$ "	10"	400-500
4	17 $\frac{1}{2}$ "	12"	1 000
5	22"	14"	1 500
6	26"	16"	2 500

Fuente: elaboración propia.

3.2. Nivel estático

El nivel estático indica la columna de agua que existe por encima del elemento de succión del pozo mecánico cuando el acuífero no está siendo explotado, esto quiere decir que es la capacidad que tiene el acuífero en el momento que no se está bombeando, sino que se ha mantenido en reposo por un tiempo determinado. (Contreras M. F., 2014)

El nivel estático del agua puede descender al verse afectado por diversas razones, por ejemplo:

- Por restricción en la entrada por un impermeabilizado
- Por cambio en las condiciones climáticas, no cae suficiente agua en la zona, por lo tanto, no hay recarga suficiente
- Por sobreexplotación del acuífero

3.3. Nivel dinámico

También llamado nivel de bombeo, porque se refleja al dar inicio la descarga del acuífero por el pozo. Este nivel depende del caudal de bombeo, del tiempo de bombeo y de las características hidrogeológicas del acuífero. También se debe tener en cuenta la técnica desarrollada en el diseño de pozo. (Donado, 1999)

La medición de los niveles de agua se puede realizar por dos métodos principalmente; a través de una sonda con un electrodo en el extremo que se bajará por la tubería y a través de línea de aire que se instala en el pozo. (Contreras M. F., 2014)

El departamento de Aguas y Drenajes de la municipalidad de Mixco es la entidad encargada del monitoreo permanente de niveles de agua en sus pozos. La municipalidad lleva este control de sus pozos a través del método de la sonda eléctrica, debido a que cuentan con el equipo necesario para el mismo.

3.4. Abatimiento

El abatimiento, también conocido como cono de abatimiento, es la diferencia de nivel que existe entre el nivel dinámico y el nivel estático en un pozo, esta diferencia nos indicará cuanto desciende el nivel de un pozo desde que está sin bombeo, hasta el nivel cuando el pozo se encuentra con bombeo, la obtención del abatimiento es de utilidad para determinar cuál es el caudal específico de los pozos. (Contreras M. F., 2014)

El agua fluye radialmente hacia el pozo. Transcurridas unas horas, la superficie freática adquiere la forma que se visualiza en la figura 14, que se denomina cono de abatimiento. (Minas, 2009)

Cuando el descenso de la carga hidráulica cambia con el tiempo se dice que está en condiciones transitorias, pero una vez el nivel de la carga hidráulica no cambia, se dice que está en condiciones estables o permanentes. Adicionalmente, con el radio de influencia del pozo (el nivel dinámico es igual el nivel estático), se determina la caída de la carga hidráulica con el tiempo.

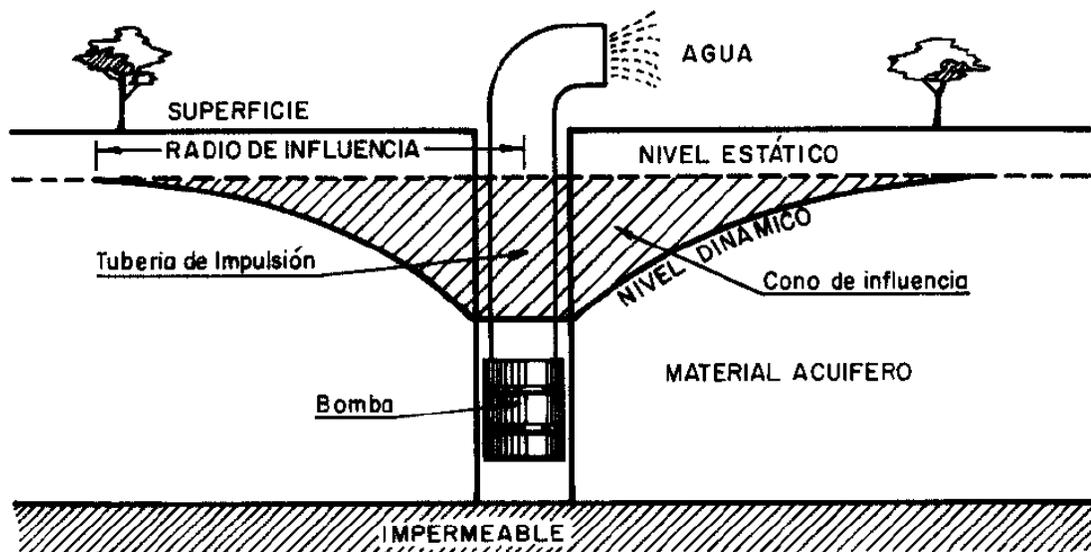
3.5. Nivel freático

Se le conoce como nivel freático a la zona límite o capa de la superficie de saturación, en las zonas que son permeables. Sobre este nivel se ubica la zona de aireación (capa próxima al nivel freático), denominada como franja capilar. En

dicha capa el agua subterránea fluye por medio de capilaridad, de tal forma que existen algunos movimientos que ascienden de agua subterránea en sentido opuesto a la fuerza de la gravedad. (González F. A., 2007)

En la franja capilar (zona de aireación), se ubica una zona intermedia o de agua vadosa, dentro de la cual el agua fluye por gravedad y desciende. Evidentemente, en función de la magnitud de agua subterránea presente en el acuífero permeable, la zona de saturación y la capa freática, oscila en nivel hidrostático alcanzando de esta forma zonas superficiales, ocasionalmente en su punto de descarga, dando lugar a las charcas, aguas corrientes o lagunas. (González F. A., 2007)

Figura 16. Niveles de un pozo mecánico y cono de abatimiento



Fuente: Martínez y López (1984). *Pozos y Acuíferos*. Pág. 18.

3.6. Perfil estratigráfico

Un perfil estratigráfico contribuirá a determinar los puntos a profundidad más idóneos para colocar la tubería dentro de un pozo y el material presente en cada capa, así mismo se señala el punto donde se deberán ubicar las rejillas de infiltración, profundidad de perforación y el nivel del agua. (Contreras M. F., 2014)

Un perfil estratigráfico es una interpretación de la litología encontrada por medio de la exploración *in situ* por perforaciones extraídas, lo cual permite determinar el tipo de material que se halla en el subsuelo y obtener características que aportarán a determinar parámetros en laboratorio.

El perfil estratigráfico de un pozo, es la interpretación de las muestras de los estratos perforados o hallados de manera ordenada de acuerdo a la profundidad, con una disposición tal para que, el analista (hidrogeólogo), identifique las formaciones geológicas potenciales con carga hídrica y le contribuya de tal manera a tomar decisiones acertadas sobre el acuífero en estudio.

3.6.1. Métodos de exploración

Los métodos de exploración son los trabajos previos a la inversión económica de un pozo mecánico, estos equivalen alrededor del 20-30 % del valor económico del pozo de producción y pueden ser de dos tipos.

3.6.1.1. Método no destructivo

El objetivo principal del método no destructivo es la recuperación del núcleo dentro de la perforadora. Este método se desarrolla por medio de la perforación

con diamantina y el diámetro máximo de perforación será de 4". Algunas características del método de perforación no destructivo son:

- No se reutiliza el fluido de perforación
- El fluido de perforación es a base de polímeros
- Este método se utiliza para la exploración de minerales
- Este método puede alcanzar profundidades de hasta 1 600'
- Se puede utilizar cualquier ángulo de perforación

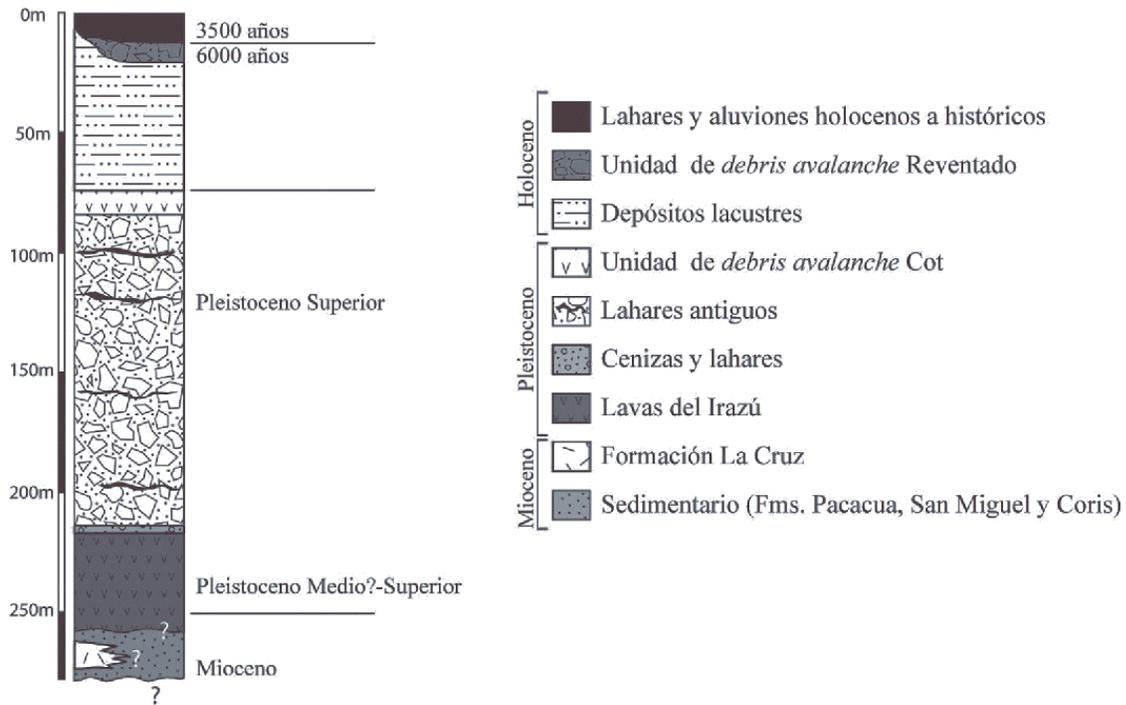
3.6.1.2. Método destructivo

Los métodos destructivos se realizan a través de los pozos exploratorios, con un $\varnothing_{\text{perf.}}$ de 6 1/8" o 4" con recuperación de muestras representativas alteradas o inalteradas. Una vez perforado un pozo exploratorio, el personal encargado de la exploración deberá realizar un análisis de muestras representativas recuperadas alteradas o inalteradas y presentar como resultado el perfil estratigráfico del área de estudio en base al tipo de material geológico y las profundidades a las que se encuentran estas formaciones geológicas.

Algunas características del método de perforación destructivo son:

- Se reutiliza el fluido de perforación
- Fluido de perforación a base de agua y espuma
- Se utiliza para la determinación de aguas subterráneas
- Este método puede alcanzar profundidades de 1 000' hasta 1 200'
- El ángulo de perforación debe ser de 90°

Figura 17. Ejemplo de perfil estratigráfico



Fuente: Quintanilla y Mendonza. *Estratigrafía de pozos como un aporte al conocimiento de la geología del Cuaternario del Valle de El Guarco (Cartago), Costa Rica*. Consultado el año 2021.

Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/ESTRATIGRAF%C3%8DA-DE-POZOS-COMO-UN-APORTE-AL-DE-LA-DEL-Quintanilla-Alvarado/eff3c75dcdda31cc928719fa13d2f7d8bc5d4f87>.

4. PROPUESTA DE PLANIFICACION PARA EL MONITOREO DE LOS POZOS

4.1. Plan de monitoreo de pozos

La normativa COGUANOR NTG 29006 define que la frecuencia del monitoreo del agua potable tiene por objetivo definir la continuidad del seguimiento que debe efectuarse a la calidad del agua para consumo humano (agua potable). Durante situaciones de emergencia, la frecuencia del muestreo será establecida por la autoridad reguladora pertinente. (COGUANOR, S.f.)

En esta normativa se establece el número mínimo de muestras mensuales para los programas de análisis mínimo y complementario, sin embargo, no establece un periodo de tiempo para la frecuencia de monitoreo en las fuentes de abastecimiento.

4.1.1. Frecuencia de monitoreo

Los pozos mecánicos son obras con un grado de importancia alto, esto se debe a que a través de ellos se distribuye el vital líquido hacia los habitantes de las diferentes comunidades. Debido al grado de importancia, estos proyectos deben de prestar un servicio óptimo que garantice la calidad de los pozos, por lo que se debe considerar una adecuada frecuencia de control en ellos.

La municipalidad de Mixco no cuenta con un plan de frecuencia de monitoreo de nivel estático, nivel dinámico, caudal de extracción y calidad de

agua, para verificar regularmente el estado de los pozos ubicados en la zona 1, es por ello que para el presente informe se presentará la siguiente propuesta:

Tabla VII. **Propuesta de plan de frecuencia de monitoreo**

No.	Trabajo a realizar	Frecuencia
1	Medición de nivel estático	Semestral
2	Medición de nivel dinámico	Semestral
3	Medición de caudal de extracción	Semestral
4	Medición de las propiedades físico-químicas del agua	Semestral
5	Medición de las propiedades bacteriológicas del agua	Semestral

Fuente: elaboración propia.

4.2. Monitoreo del nivel de agua en los pozos

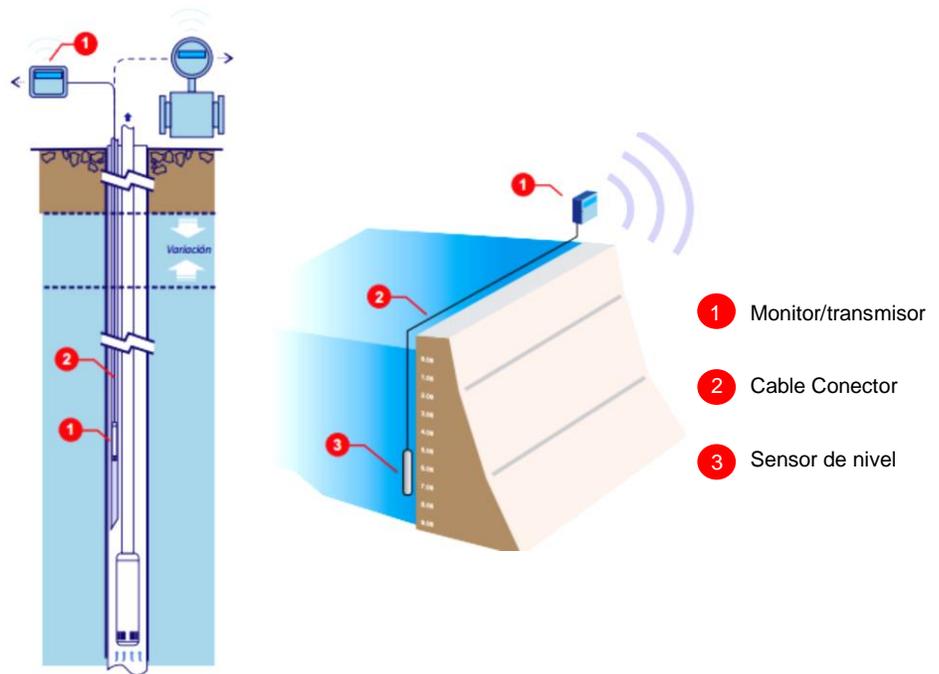
La medición de los niveles de agua de un pozo se puede realizar a través de dos métodos principalmente; por una sonda con un electrodo en el extremo que se bajará por la tubería o por la línea de aire que se encuentra instalada en el pozo. (Contreras M. F., 2014)

4.2.1. Método de sonda eléctrica

Este método se desarrolla a través de un sensor de nivel, que es un instrumento que notifica a través de una alarma de nivel de agua el punto en el cual se encuentra. Es decir, este nos indicara a que profundidad se encuentra el nivel de agua sin bombeo (nivel estático) y el nivel de agua con bombeo (nivel dinámico).

Estos sensores tienen diferentes aplicaciones, las cuales son: medición de nivel, en automatización de edificaciones, en suministros de agua de presión constante, en la metalurgia, en maquinaria, protección de medio ambiente, tratamiento médico y en equipos de vacío.

Figura 18. **Sensor de nivel de agua**



Fuente: Contreras (2014). *Estudio de aguas subterráneas en zona 13 de la ciudad de Guatemala*. Pág. 65.

4.2.2. Método de la línea de aire

(López, 2014) Define que el objetivo del método es determinar el nivel del agua usando la medición de presiones, inyectando aire en el conducto que este paralelo al tubo de bombeo dentro el pozo. Los componentes de este método son:

- Ducto de aire

Es un tubo de poliducto de diámetro $\text{Ø}1/4''$. Este ducto de aire deberá contar con una longitud suficiente para que se mantenga de manera vertical dentro del pozo. La tubería no deberá permitir el ingreso de aire para no ocasionar ninguna pérdida de presión durante la medición, ubicando en la parte extrema superior un manómetro que permita la medición de la presión de aire dentro del tubo. (López, 2014)

- Inyección de aire

Este equipo neumático se requiere para el suministro de presión hacia ducto. La capacidad de este equipo dependerá de manera directa del nivel de agua y de la profundidad en el pozo, debido a que se necesita que este equipo realice una inyección presión al ducto hasta el punto donde la presión sea similar a la columna de agua en la parte extrema inferior del tubo. (López, 2014)

Según (López, 2014) las ventajas de este método son las siguientes:

- Las mediciones son rápidas y simples.
- El método es favorable en los pozos que se realizan mediciones constantes.
- Se requiere de menor tiempo y esfuerzo físico a diferencia de la medición con una sonda eléctrica.
- Es un método económico en comparación con otros.

Según (López, 2014) las desventajas de este método son las siguientes:

- Este ducto de presión deberá colocarse al mismo tiempo de la instalación del equipo de bombeo.
- Se utilizará una tubería de poliducto que sea resistente las presiones altas y con la longitud idéntica a la profundidad en que se encuentre ubicado el equipo de bombeo.
- Debe de contar con el uso de energía eléctrica para funcionar de manera adecuada el compresor. En caso contrario se debe contar con un generador eléctrico para su funcionamiento.
- En el caso de pozos muy profundos (mayor a 1000'), el equipo requerido para inyectar la presión y la medición, sobrepasa la capacidad del compresor comercial común, por lo que es práctico para el transporte de este método.
- Tiene una medida estimada utilizada de referencia, con un margen de error que oscila entre 5-15 metros, dependerá a que profundidad se ubique la línea de aire.

4.3. Monitoreo del caudal de extracción

La municipalidad de Mixco cuenta con el registro histórico del caudal de extracción anual desde el año 2015, el cual se utilizó como base para el desarrollo del presente informe. Sin embargo, la municipalidad no cuenta con un plan de monitoreo del caudal de extracción, por lo que para el presente caso se estará utilizando la propuesta descrita en la tabla VII.

4.4. Recopilación de datos

Los registros anuales de los parámetros de los pozos mecánicos en análisis ubicados en la zona 1 del municipio, se obtuvieron a través del apoyo del director

del departamento de Aguas y Drenajes de la municipalidad de Mixco, juntamente con el personal de la dirección.

En las tabla XIX, XX y XXI se presenta el resumen del registro histórico de parámetros de la información recopilada anual del año 2015 al 2021 utilizando como el registro histórico los parámetros de la tabla V. En la tabla anteriormente mencionada se puede observar que no aparecen los pozos P-2 y P12, la municipalidad de Mixco no cuenta con un registro histórico de sus parámetros anuales, esto se debe a que el pozo P-2 es un pozo artesanal y el pozo P-12 quedo inhabilitado.

4.5. Análisis de la información recopilada

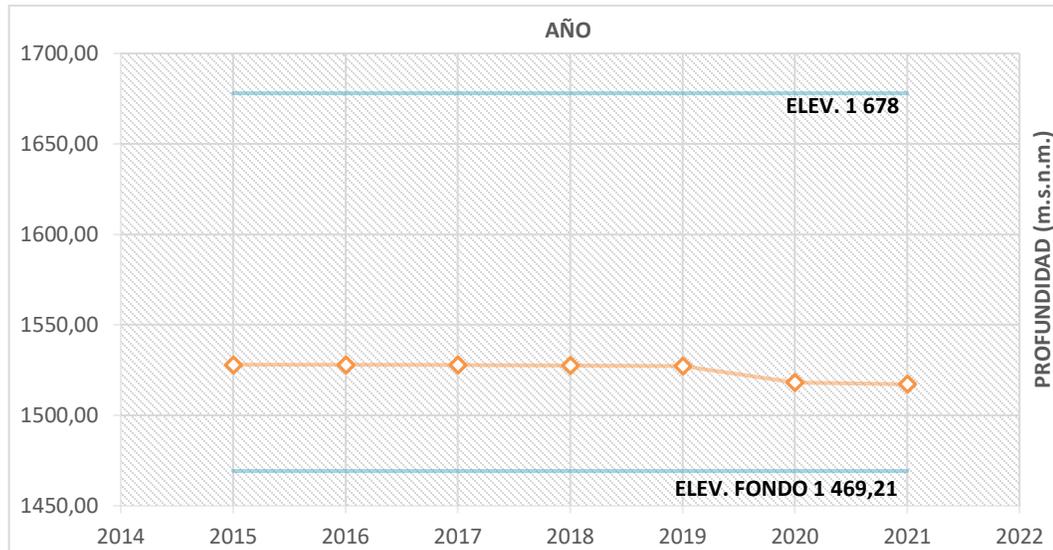
Tabulando la información de los parámetros obtenidos se presentaron los resultados en tablas y gráficas donde se visualiza la variación de nivel que tienen los pozos en las diferentes microcuencas, como se muestra a continuación:

Tabla VIII. **Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-1**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 527,96	1 482,93	110
2016	1 527,96	1 484,91	97,03
2017	1 527,75	1 484,72	79,19
2018	1 527,55	1 484,54	61,35
2019	1 527,34	1 484,35	43,5
2020	1 518,04	1 484,05	39,61
2021	1 517,14	1 484,65	38

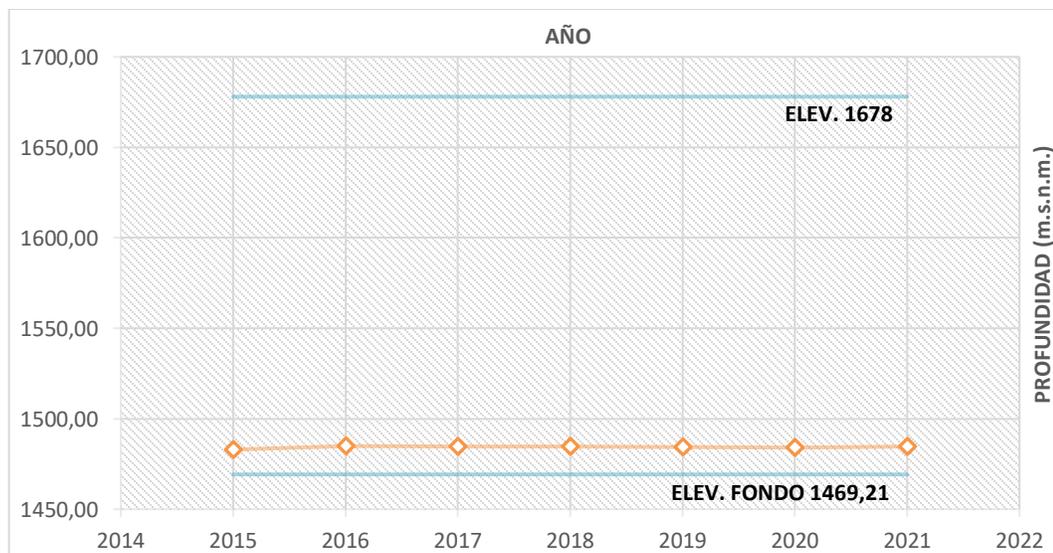
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-1



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-1



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-1**



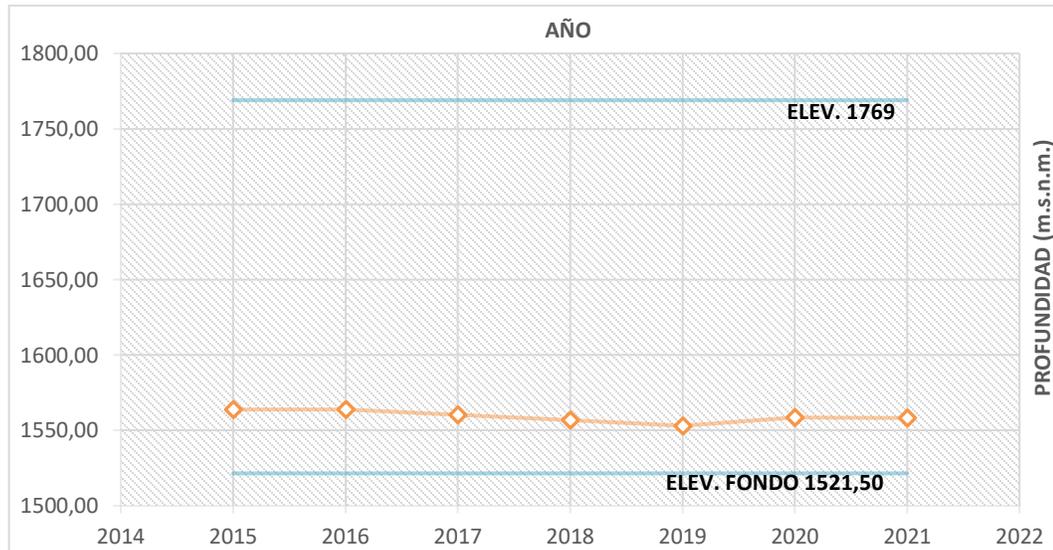
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-3**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 563,87	1 537,35	225
2016	1 563,87	1 551,91	225
2017	1 560,27	1 547,80	210
2018	1 556,68	1 543,69	195
2019	1 553,08	1 539,58	180
2020	1 558,69	1 549,56	150,18
2021	1 558,08	1 550,06	180

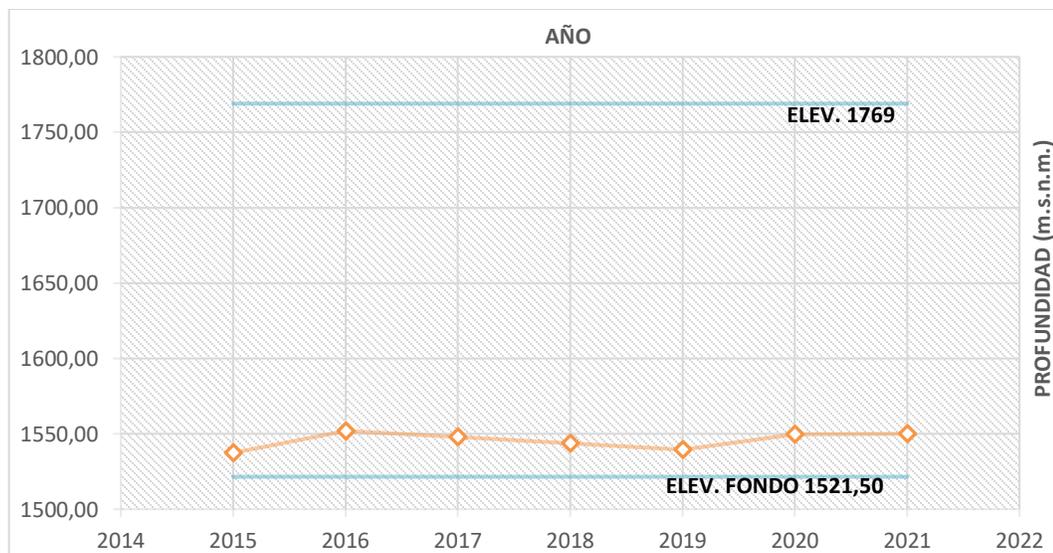
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-3



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-3



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-3**



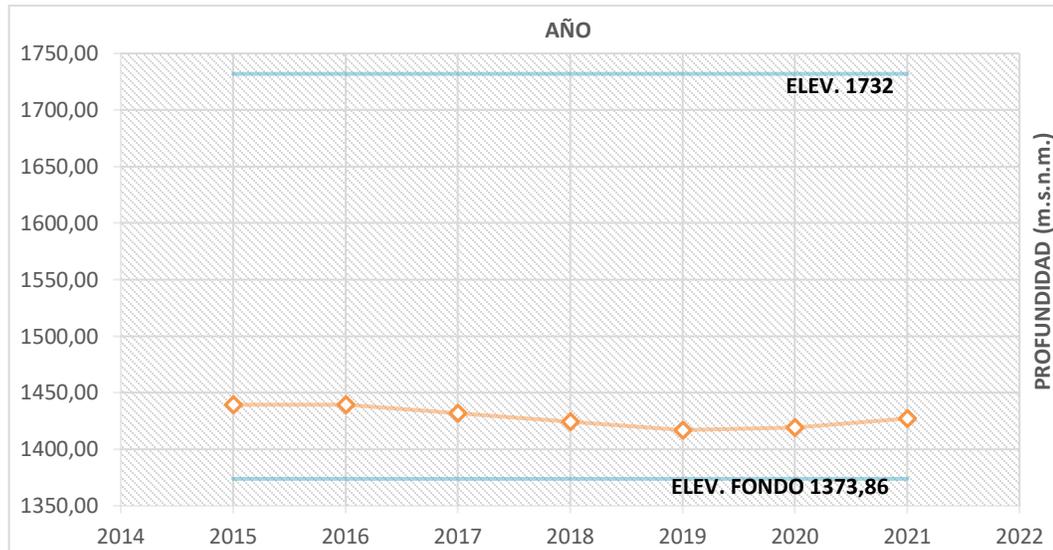
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-4**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 439,39	1 396,72	156
2016	1 439,39	1 428,11	129,49
2017	1 431,91	1 420,45	119,66
2018	1 424,42	1 412,81	109,83
2019	1 416,93	1 405,16	100
2020	1 419,40	1 408,08	105,46
2021	1 427,08	1 420,08	78,95

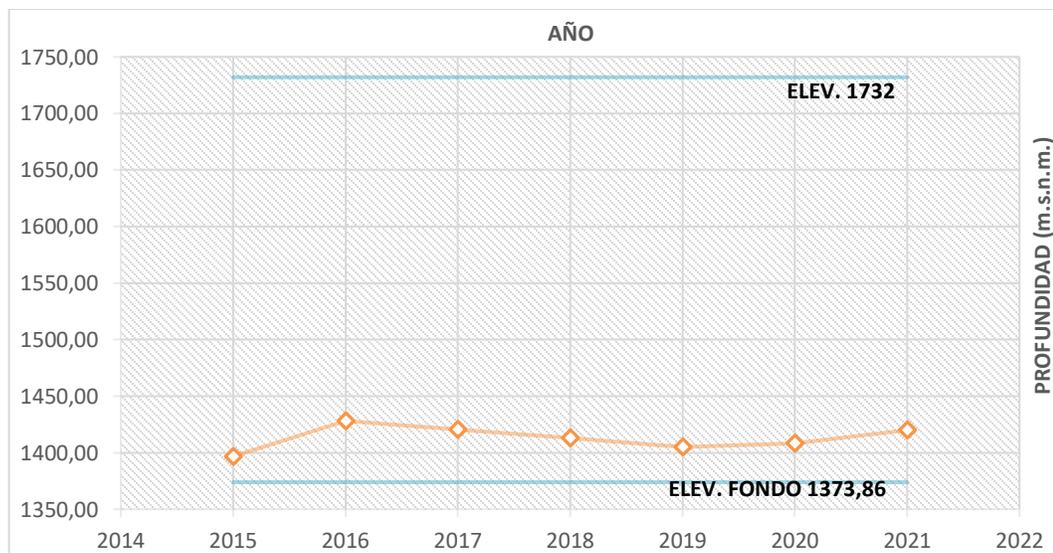
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-4



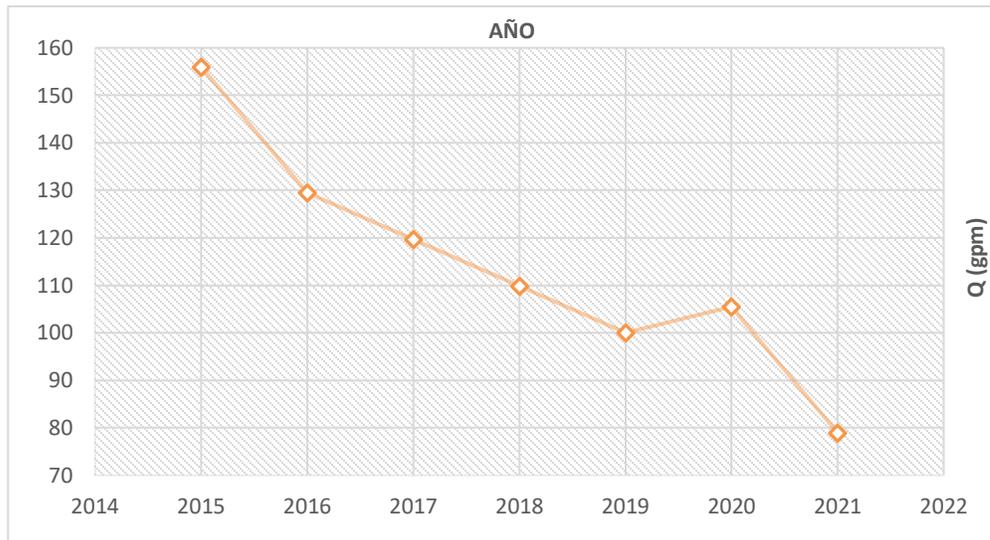
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-4



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-4**



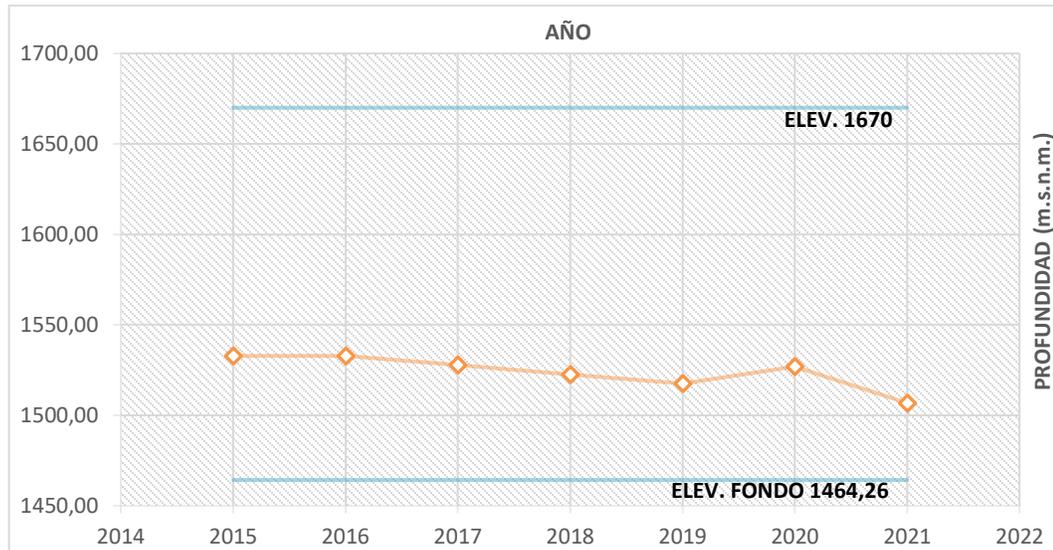
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-5**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 532,84	1 499,31	77
2016	1 532,84	1 494,74	75
2017	1 527,88	1 492,51	69,21
2018	1 522,68	1 490,27	63,42
2019	1 517,60	1 488,03	57,61
2020	1 527,04	1 487,12	70
2021	1 506,79	1 496,45	78,32

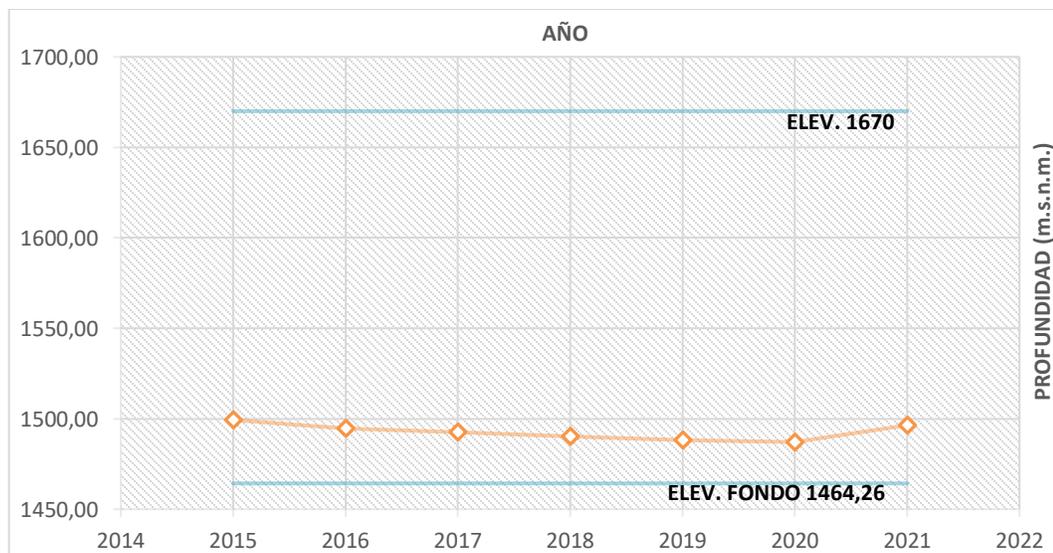
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-5



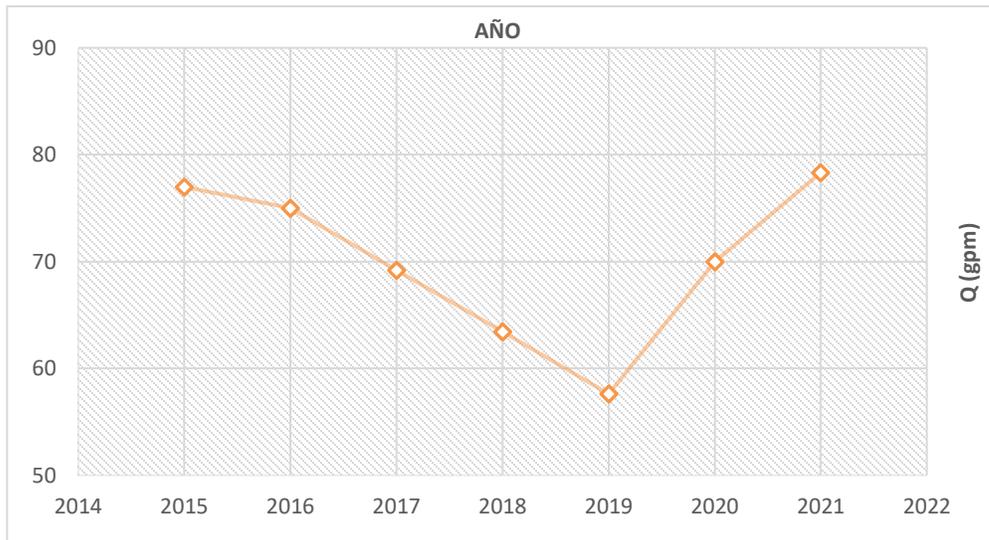
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-5



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-5**



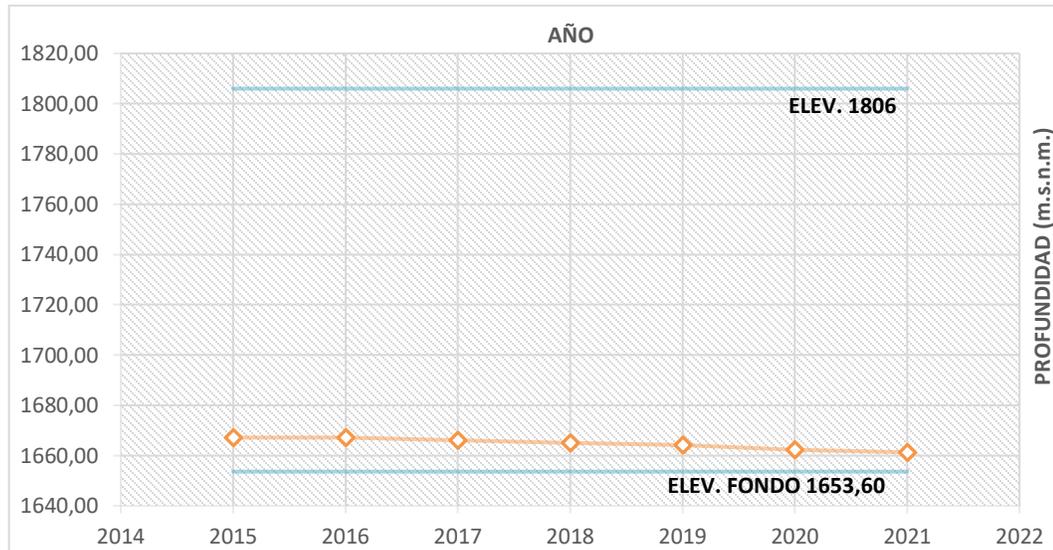
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Comportamiento de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción por año de pozo P-6**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 667,13	1 665,79	120
2016	1 667,13	1 660,31	120
2017	1 666,12	1 659,81	119,85
2018	1 665,10	1 659,30	119,7
2019	1 664,08	1 658,80	119,54
2020	1 662,24	1 660,14	117,39
2021	1 661,29	1 658,40	106,45

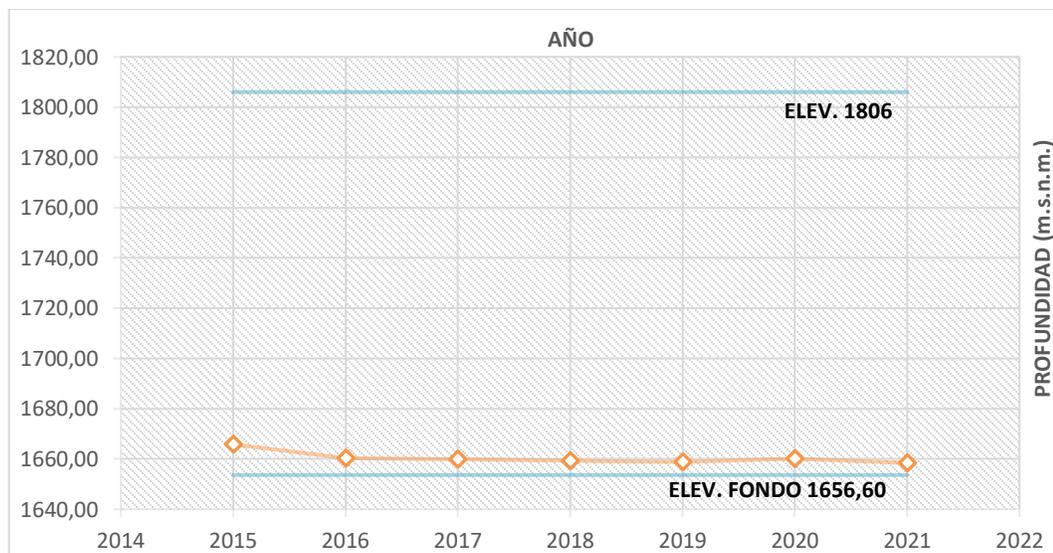
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-6



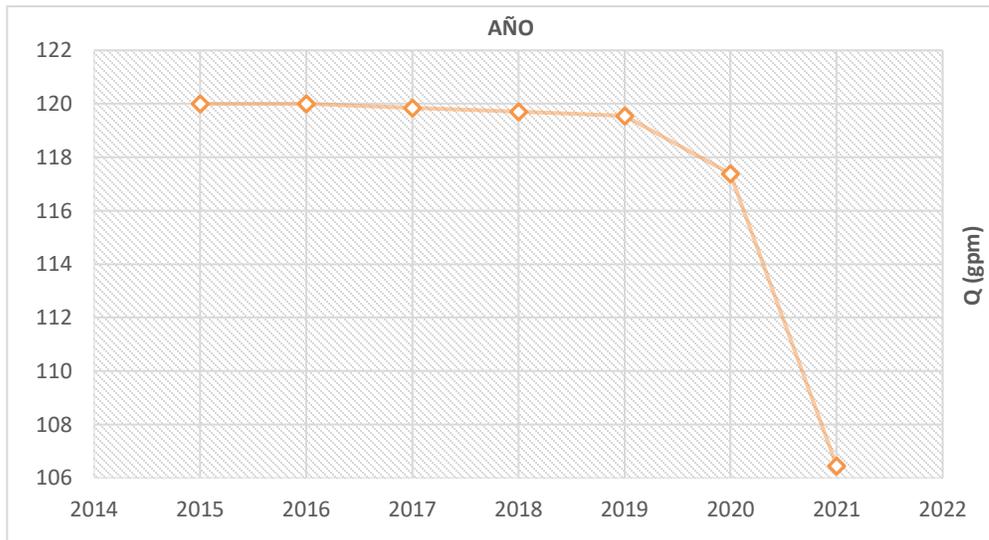
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-6



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-6**



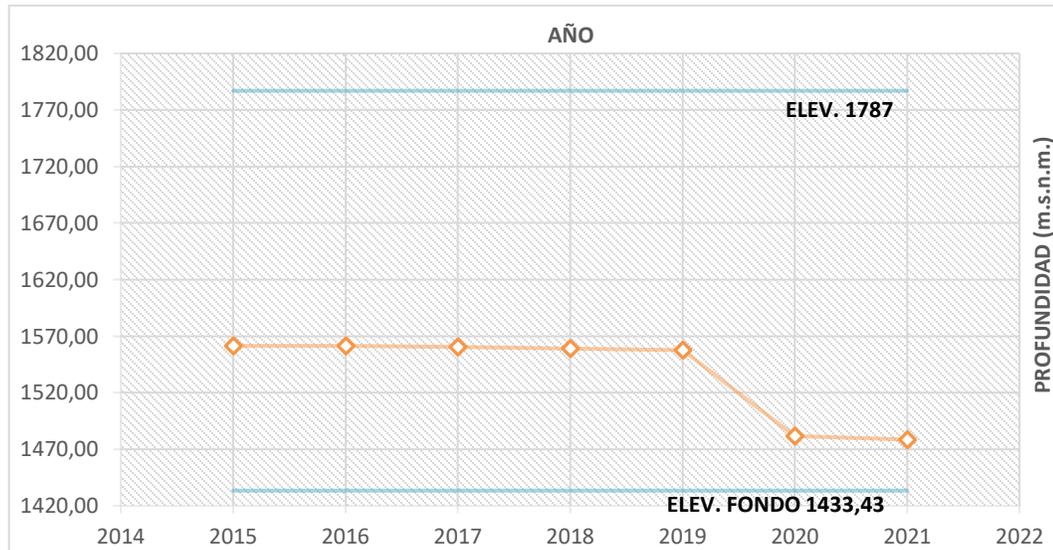
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-7**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 561,45	1 447,45	95
2016	1 561,45	1 447,45	91
2017	1 560,23	1 446,84	71,67
2018	1 559,01	1 446,23	52,34
2019	1 557,79	1 445,62	33
2020	1 481,59	1 445,62	23,07
2021	1 478,54	1 436,48	22,8

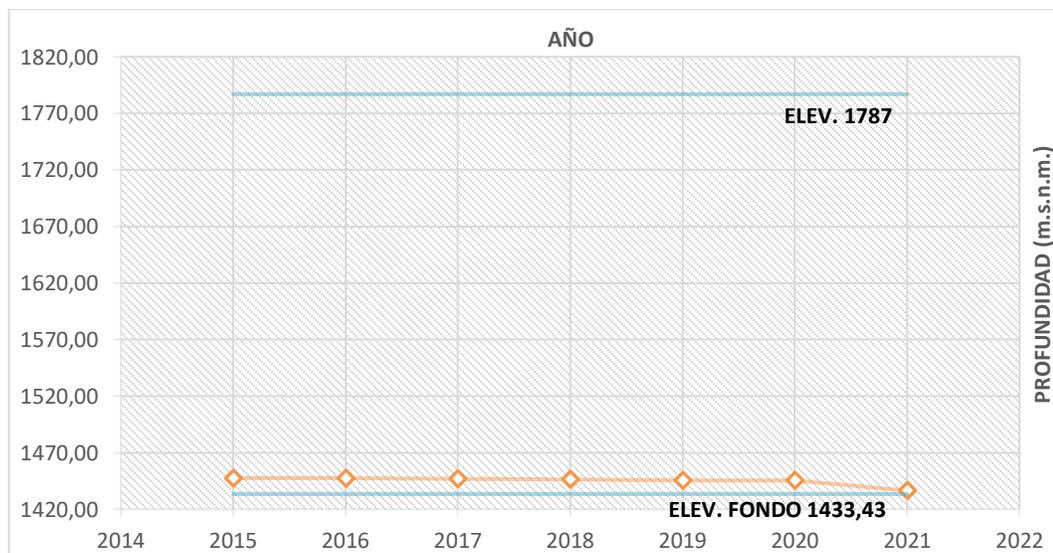
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-7



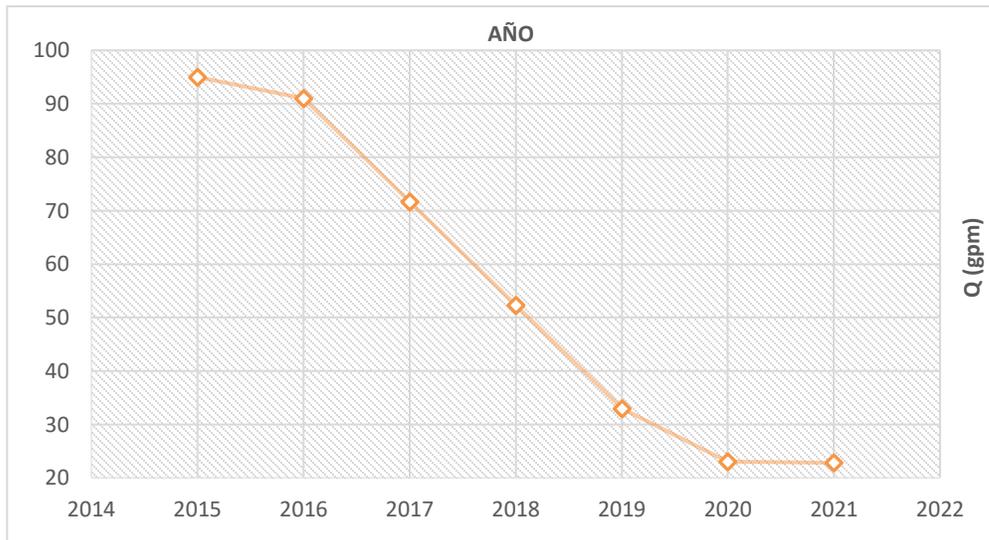
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-7



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-7**



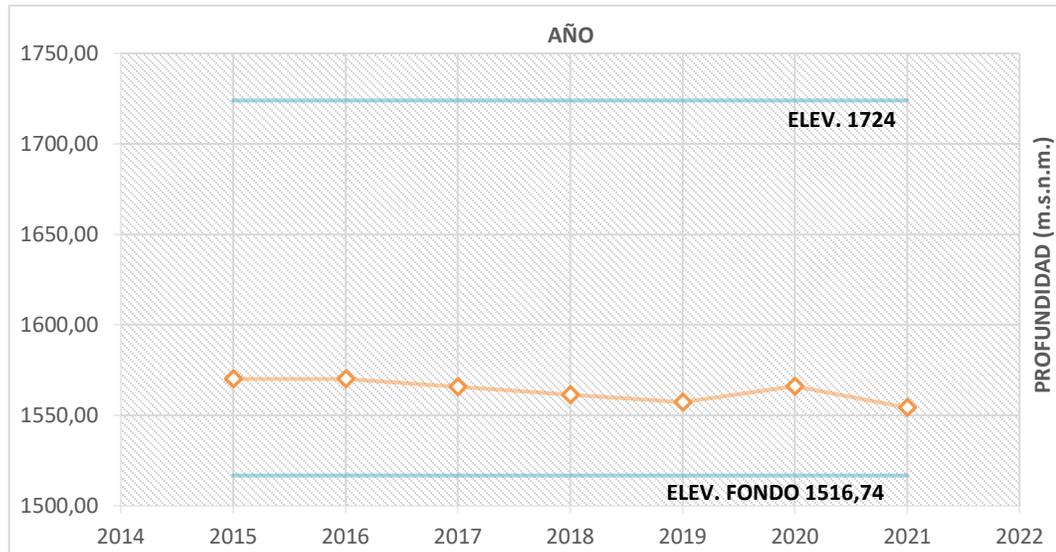
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-8**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 570,08	1 522,83	60
2016	1 570,08	1 526,28	100
2017	1 565,80	1 525,18	80,23
2018	1 561,52	1 524,08	60,46
2019	1 557,24	1 522,98	40,67
2020	1 566,04	1 525,05	37,38
2021	1 554,23	1 523,80	38,48

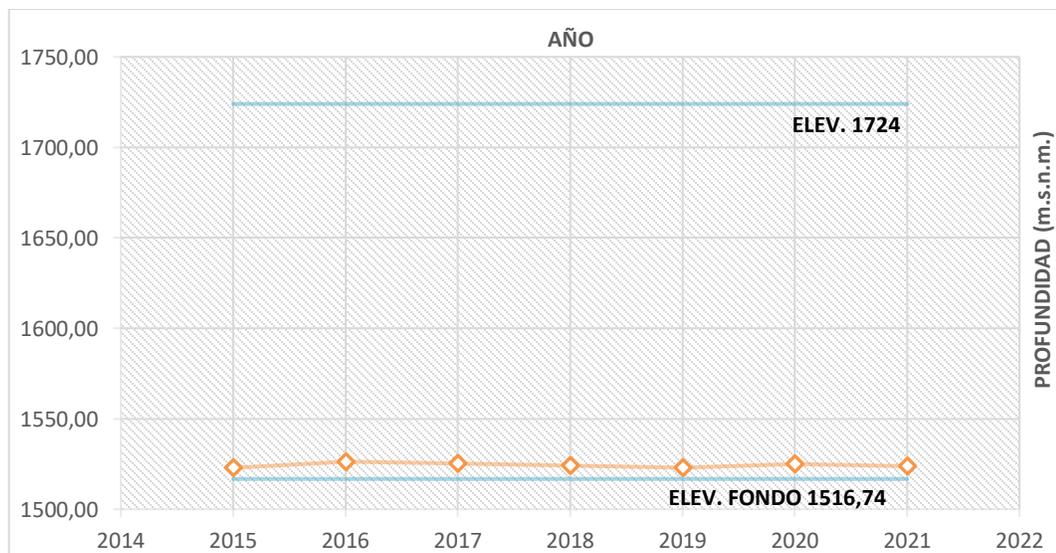
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-8



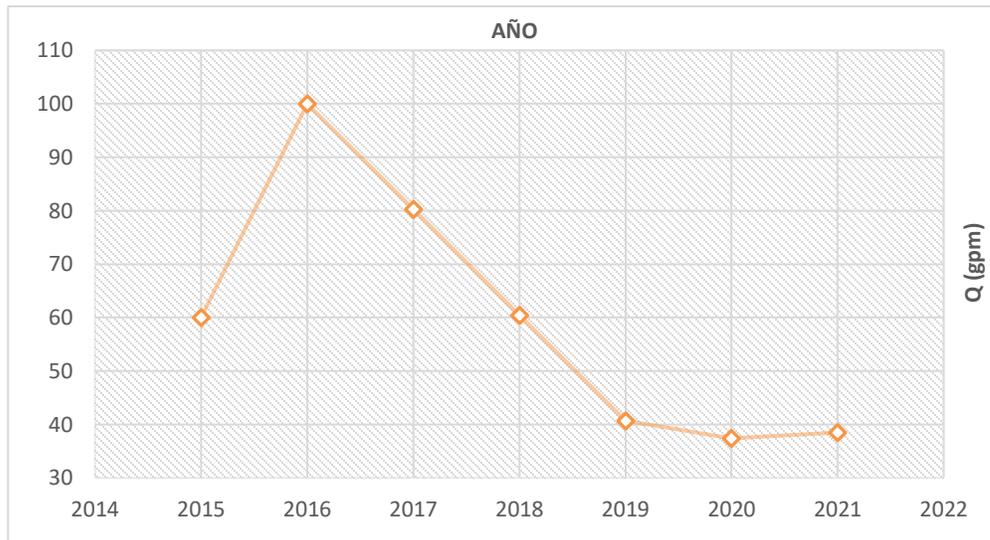
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-8



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-8**



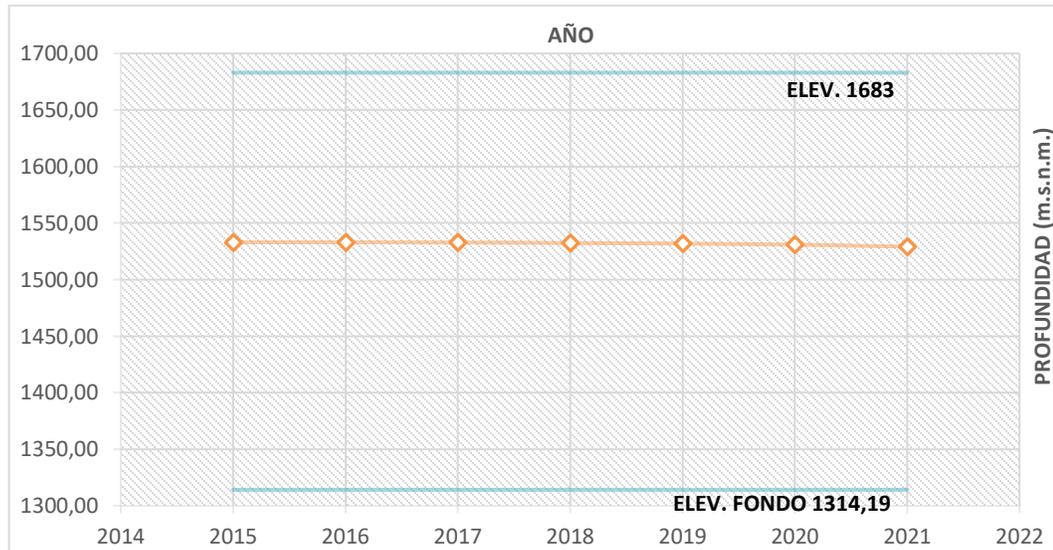
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-9**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 532,95	1 433,06	550
2016	1 532,95	1 529,08	550
2017	1 532,65	1 528,65	533,34
2018	1 532,34	1 528,22	516,68
2019	1 532,04	1 527,79	500
2020	1 531,04	1 527,19	505,62
2021	1 529,15	1 525,34	509,79

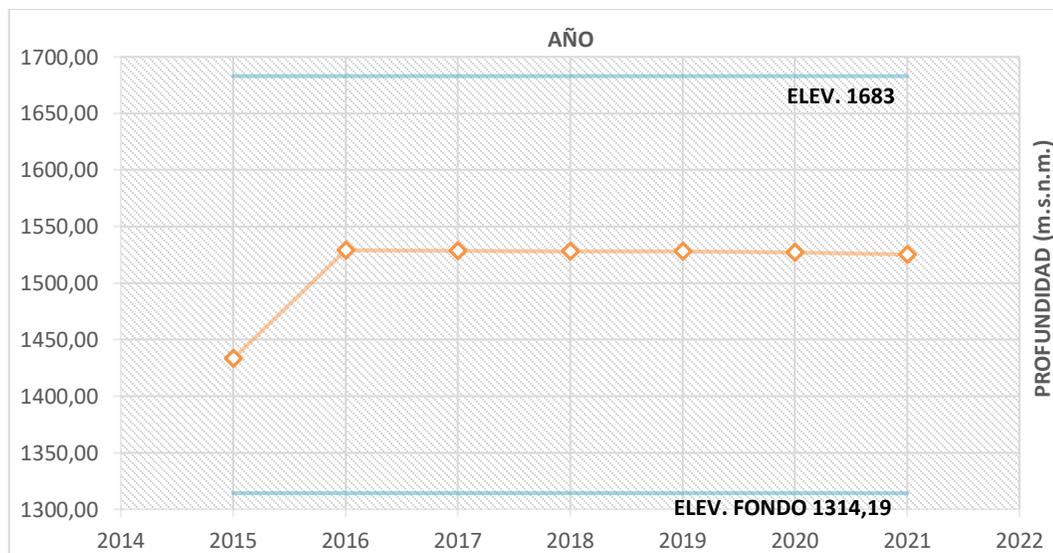
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-9



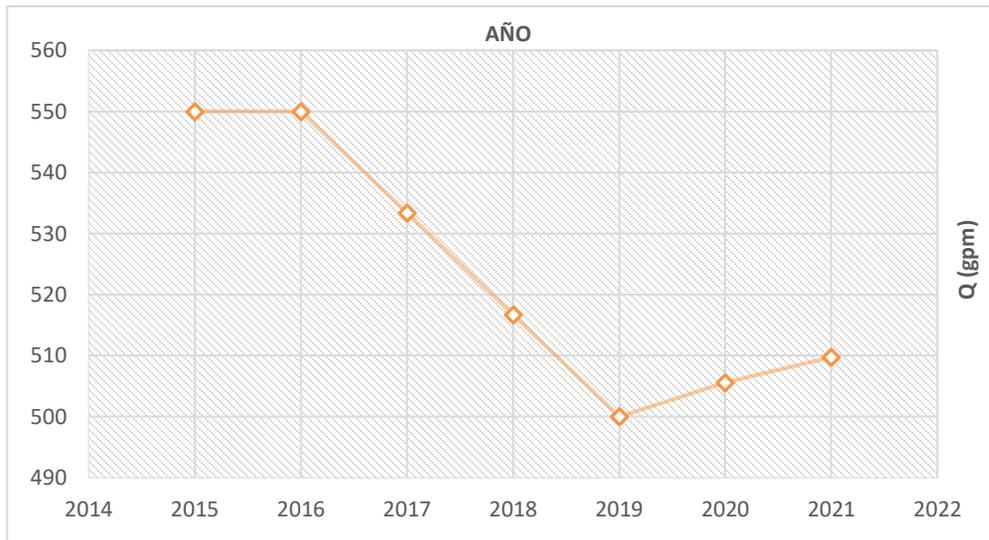
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-9



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-9**



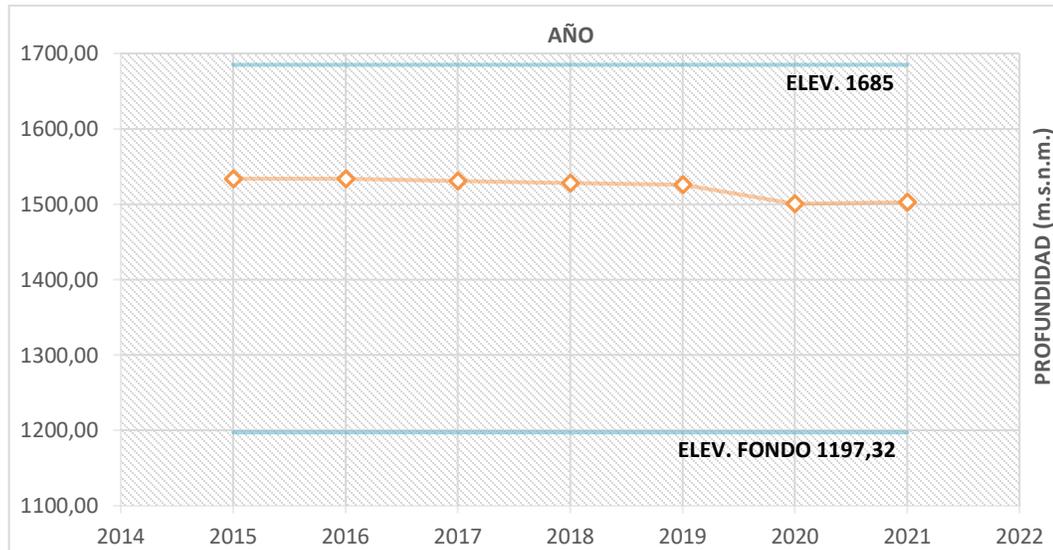
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-10**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 533,82	1 380,20	475
2016	1 533,82	1 378,68	353,52
2017	1 531,08	1 376,54	330,68
2018	1 528,33	1 374,41	307,84
2019	1 525,59	1 372,28	285
2020	1 500,55	1 370,08	222,52
2021	1 502,73	1 368,33	238,61

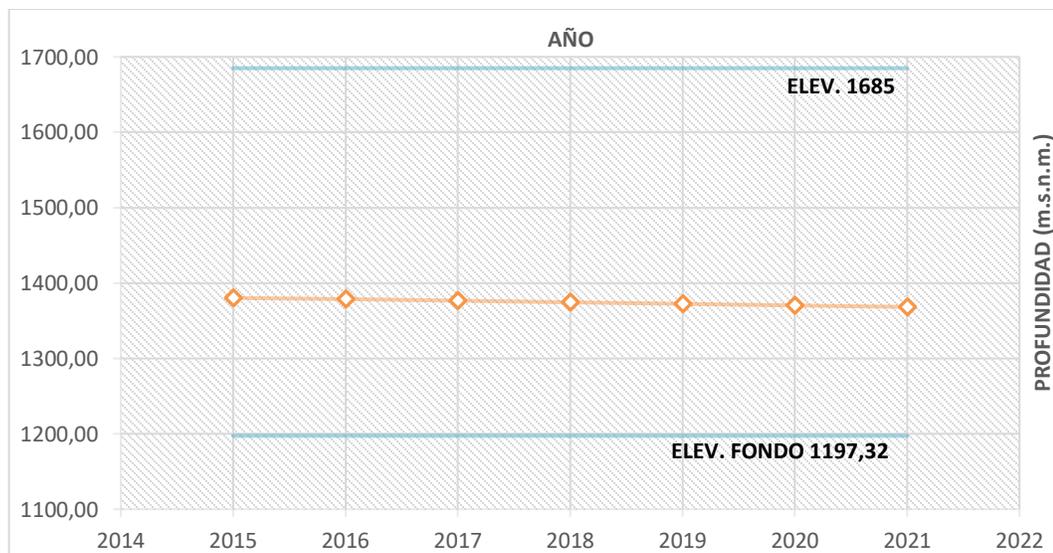
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-10



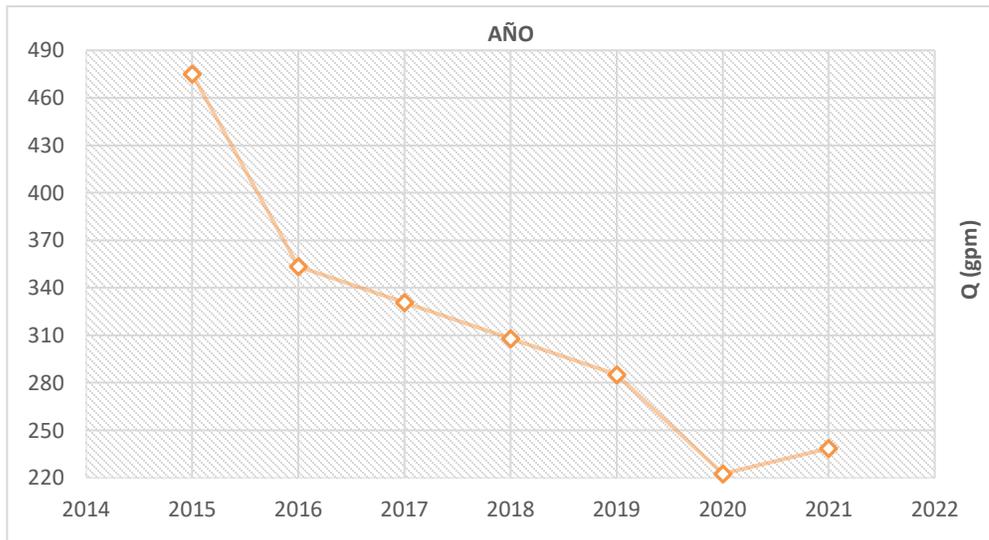
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-10



Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-10**



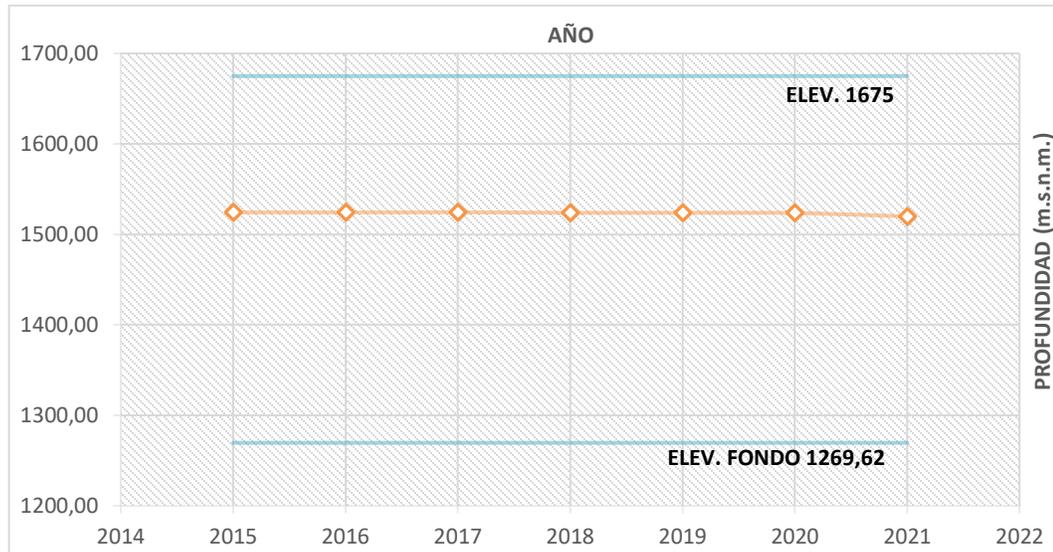
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-11**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 524,34	1 400,68	647
2016	1 524,34	1 510,91	522,58
2017	1 524,24	1 510,51	518,39
2018	1 524,14	1 510,12	514,2
2019	1 524,04	1 509,72	510
2020	1 524,04	1 509,80	505
2021	1 519,92	1 508,46	500

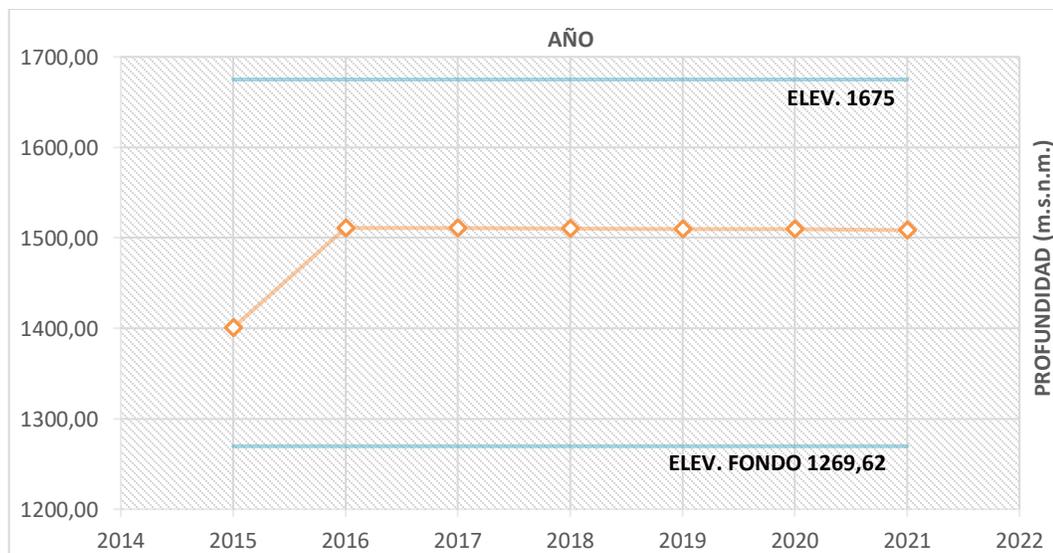
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-11



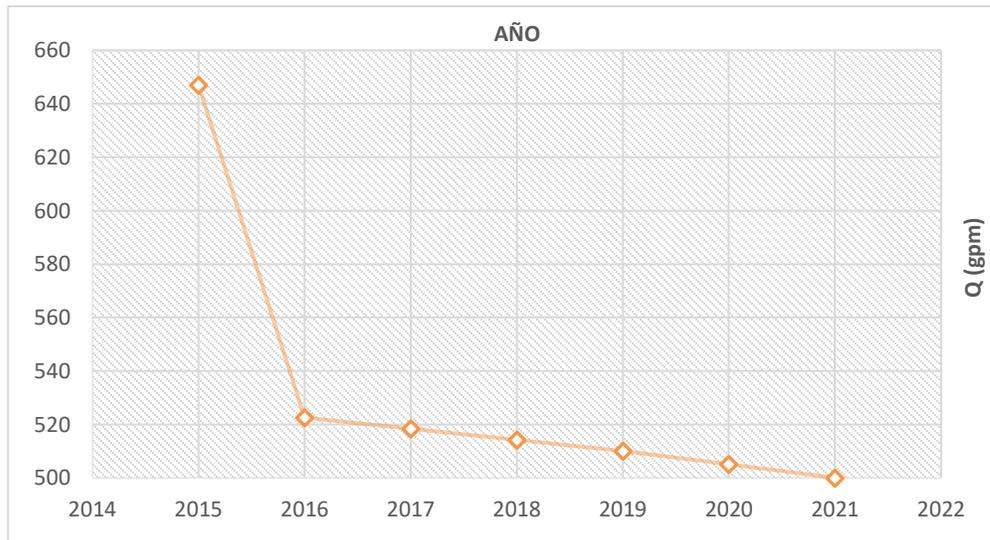
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-11



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-11**



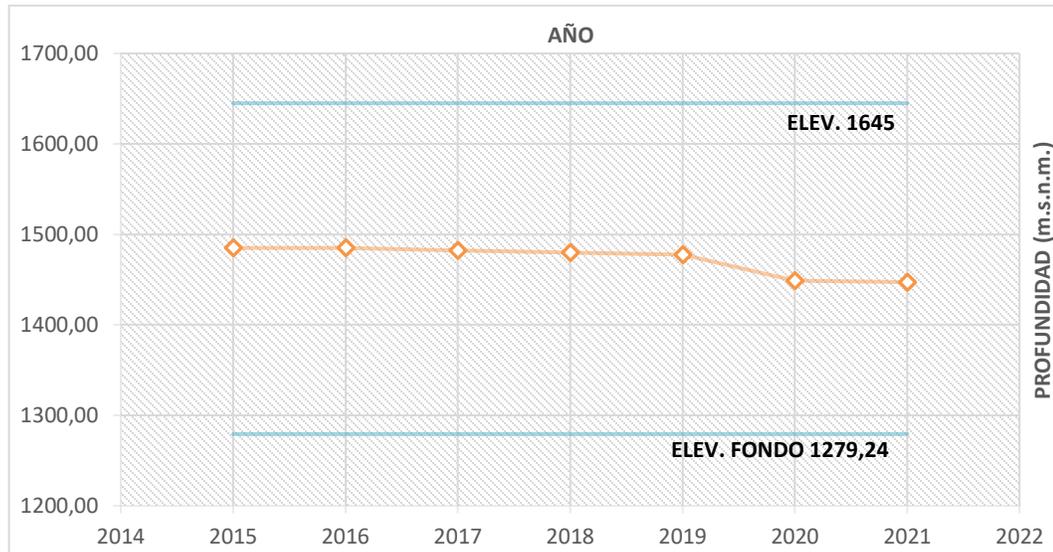
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Comportamiento de nivel estático y nivel dinámico por año de pozo P-13**

Año	Nivel estático (m.s.n.m)	Nivel dinámico (m.s.n.m)	Q (gpm)
2015	1 484,98	1 364,58	260
2016	1 484,98	1 426,61	265,35
2017	1 482,44	1 426,25	258,9
2018	1 479,90	1 425,90	252,45
2019	1 477,36	1 425,54	246
2020	1 448,95	1 401,09	250,83
2021	1 447,25	1 398,96	240,25

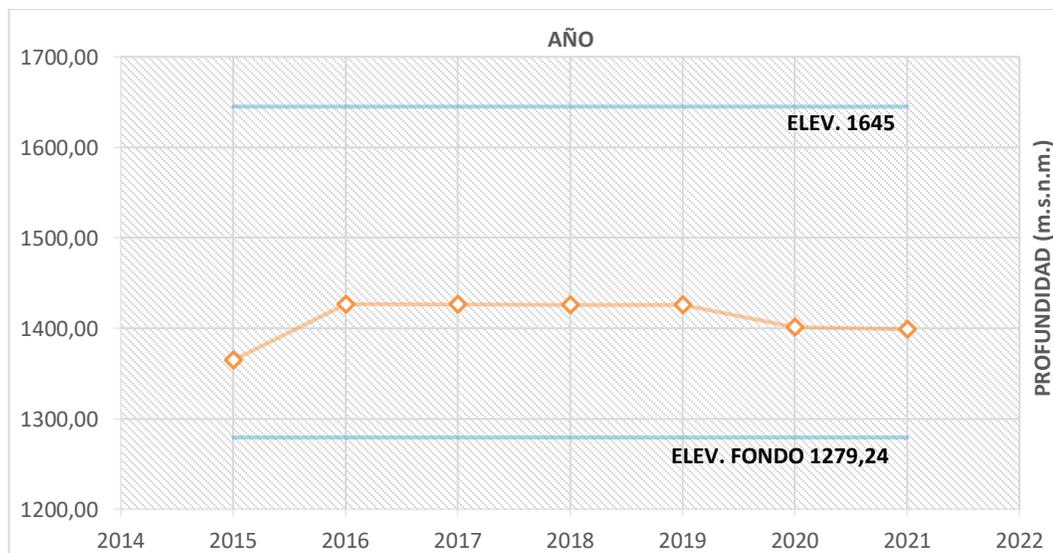
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Comportamiento de nivel estático por año de pozo P-13



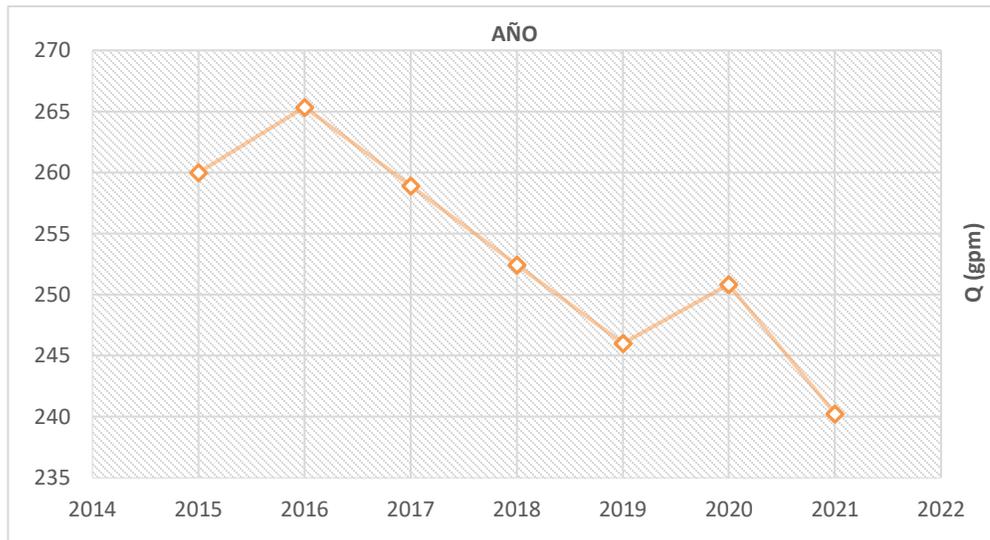
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Comportamiento de nivel dinámico por año de pozo P-13



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Comportamiento de caudal de extracción por año de pozo P-13**



Fuente: elaboración propia.

4.6. Interpretación gráfica de la información recopilada

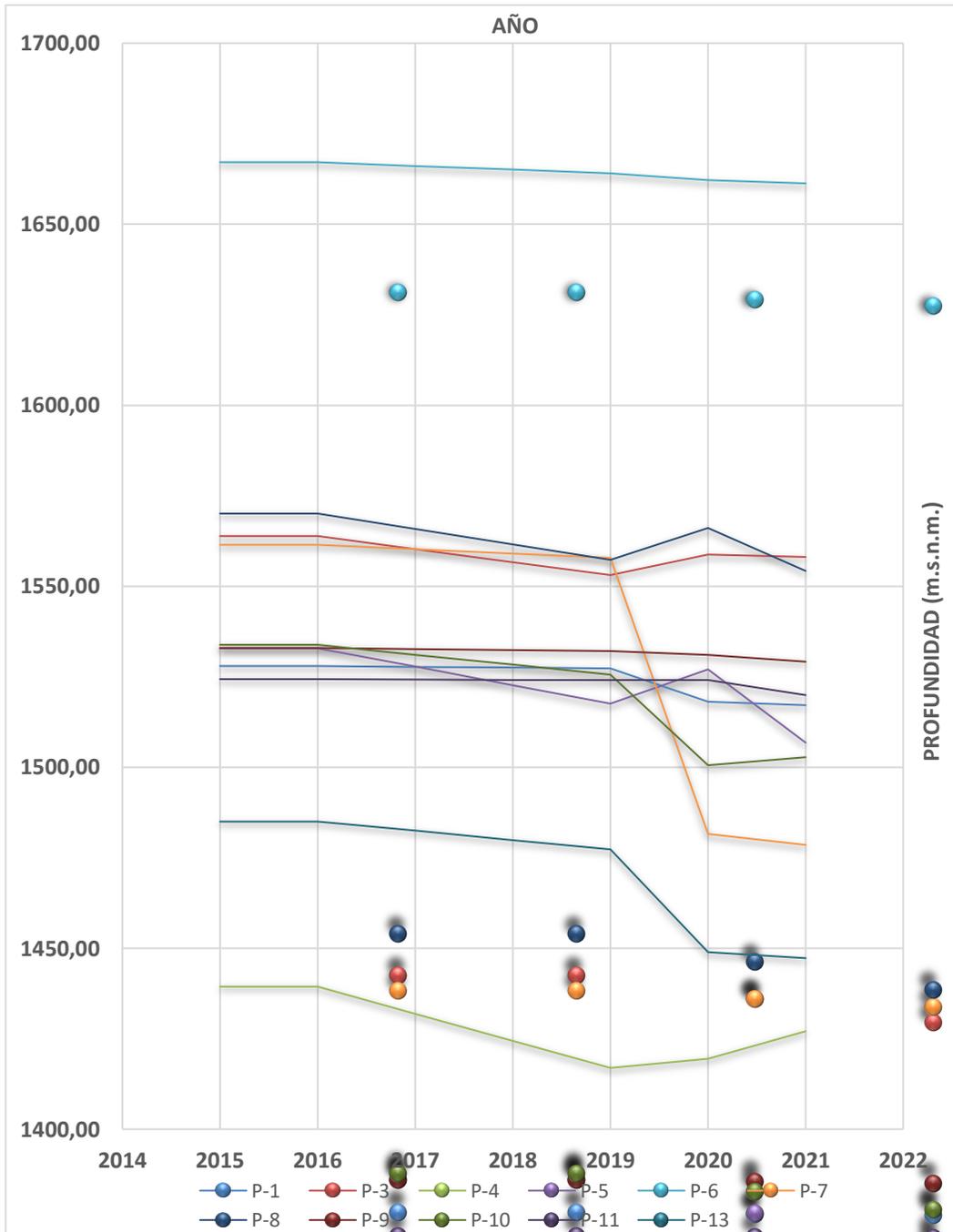
A través de la tabulación de la información recopilada, se puede realizar la interpretación gráfica del comportamiento de los niveles estáticos, niveles dinámicos y caudal de extracción en la zona 1 del municipio de Mixco. Con los registros anteriores se elaboraron las gráficas de la Figura 52, 53 y 54, que representa las variaciones de niveles de agua y caudal de extracción por año, en los pozos considerados dentro de la zona de análisis.

Tabla XIX. **Resumen comportamiento de niveles estáticos por año**

Año	Nivel estático (m.s.n.m.)												
	P-1	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-13		
2015	1 527,961	563,871	439,391	532,841	667,131	561,451	570,081	532,951	533,821	524,341	484,98		
2016	1 527,961	563,871	439,391	532,841	667,131	564,451	570,081	532,951	533,821	524,341	484,98		
2017	1 527,751	560,271	431,911	527,761	666,121	560,231	565,801	532,641	531,081	524,241	482,44		
2018	1 527,551	556,681	424,401	522,681	665,101	559,011	561,521	532,341	528,331	524,141	479,90		
2019	1 527,341	553,081	416,931	517,601	664,081	557,791	557,241	532,041	525,591	524,041	477,36		
2020	1 518,041	558,691	419,401	527,041	662,241	481,591	566,041	531,041	500,551	524,041	448,95		
2021	1 517,141	558,081	427,081	506,791	661,291	478,541	554,231	529,151	502,731	519,921	447,25		
Descenso promedio de nivel estático (metro/año)	1,80	0,97	2,05	4,34	0,97	13,82	2,64	0,63	5,18	0,74	6,29		

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Comportamiento de niveles estáticos por año



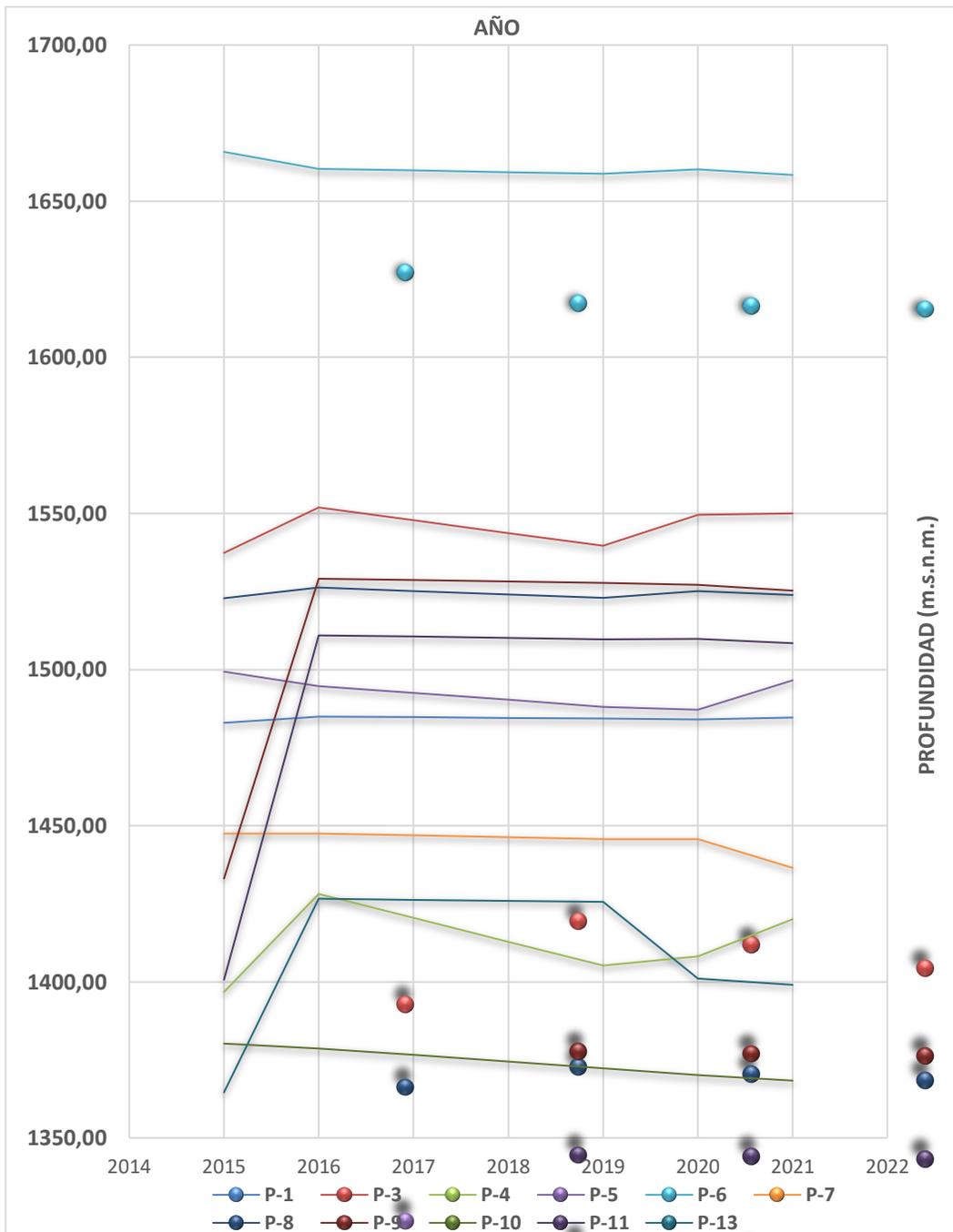
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resumen comportamiento de niveles dinámicos por año**

Año	Nivel dinámico (m.s.n.m.)												
	P-1	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-13		
2015	1 482,931	537,351	396,721	499,311	665,791	447,451	522,831	433,061	380,201	400,681	364,58		
2016	1 484,911	551,911	428,111	494,741	660,311	447,451	526,281	529,081	378,681	510,911	426,61		
2017	1 484,721	547,801	420,461	492,501	659,801	446,841	525,181	528,651	376,541	510,511	426,26		
2018	1 484,541	543,691	412,811	490,271	659,301	446,231	524,081	528,221	374,411	510,121	425,90		
2019	1 484,351	539,581	405,161	488,031	658,801	445,621	522,981	527,791	372,281	509,721	425,54		
2020	1 484,051	549,561	408,081	487,121	660,141	445,621	525,051	527,191	370,081	509,801	401,09		
2021	1 484,651	550,061	420,081	496,451	658,401	436,481	523,801	525,341	368,331	508,461	398,96		
Descenso promedio de nivel dinámico (metro/año)	-0,29	-2,12	-3,89	0,48	1,23	1,83	-0,16	-15,38	1,98	-17,96	-5,73		

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Comportamiento de niveles dinámicos por año



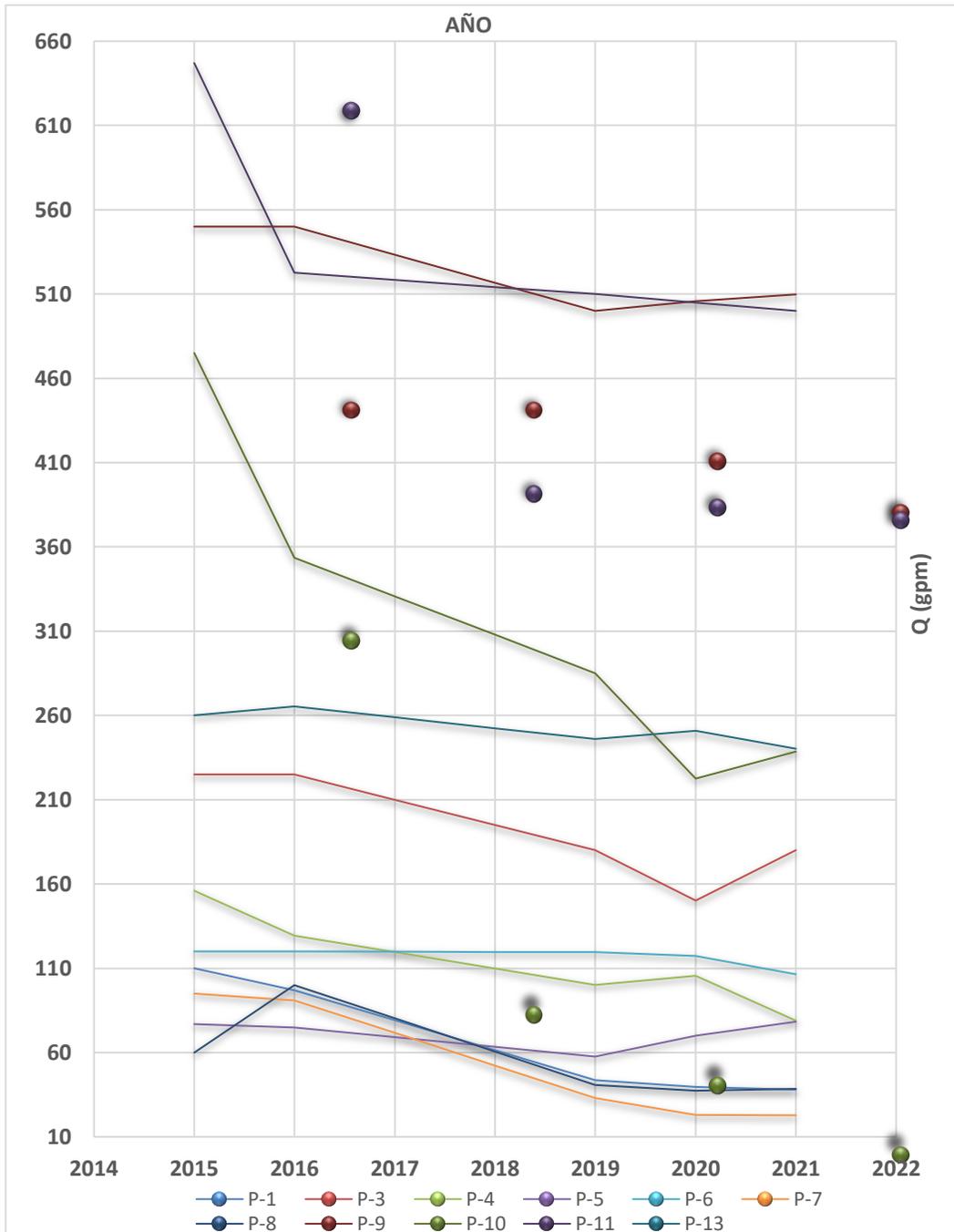
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resumen comportamiento de caudal de extracción por año**

Año	Caudal de extracción (gpm)												
	P-1	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-13		
2015	110,00	225,00	156,00	77,00	120,00	95,00	60,00	550,00	475,00	647,00	260,00		
2016	97,03	225,00	129,49	75,00	120,00	91,00	100,00	550,00	353,52	522,58	265,35		
2017	79,19	210,00	119,66	69,21	119,85	71,67	80,23	533,34	330,68	518,39	258,90		
2018	61,35	195,00	109,83	63,42	119,70	52,34	60,46	516,68	307,84	514,20	252,45		
2019	43,50	180,00	100,00	57,61	119,54	33,00	40,67	500,00	285,00	510,00	246,00		
2020	39,61	150,18	105,46	70,00	117,39	23,08	37,38	505,62	222,52	505,00	250,83		
2021	38,00	180,00	78,95	78,32	106,45	22,80	38,48	509,79	238,61	500,00	240,25		
Descenso promedio de caudal de extracción (gpm/año)	12,00	7,5	12,84	-0,22	2,26	12,03	3,59	6,7	39,4	24,5	3,29		

Fuente: elaboración propia.

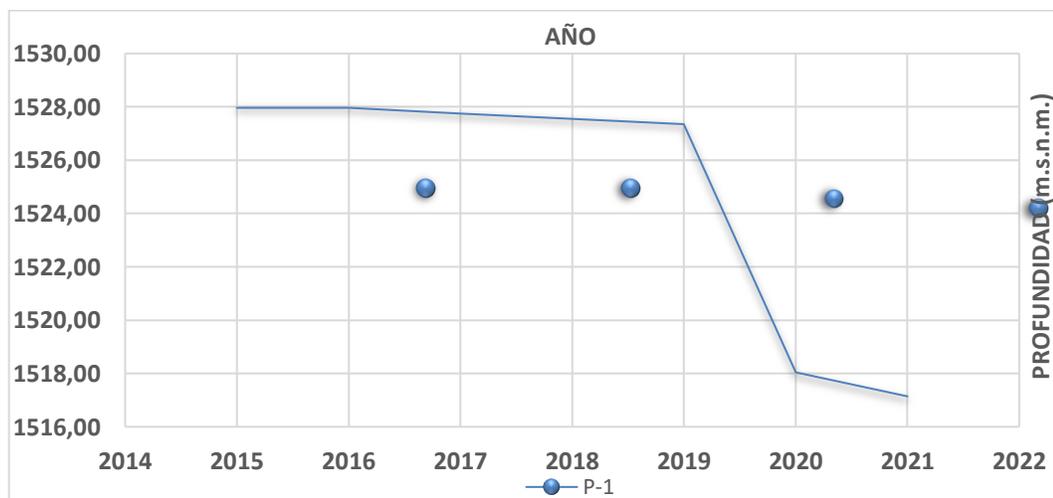
Figura 54. Comportamiento del caudal de extracción por año



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se realiza el análisis gráfico de variaciones de niveles de agua en los pozos y caudal de extracción durante el tiempo por cada microcuenca. Las gráficas de la figura 55, 56 y 57 corresponden a la microcuenca río Mariscal; las gráficas de la figura 58, 59 y 60 corresponden a la microcuenca río Seco; las gráficas de la figura 61, 62 y 63 corresponden a la microcuenca río Molino y, por último, las gráficas de la figura 64, 65 y 66 corresponden a la microcuenca río Panchiguajá.

Figura 55. **Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Mariscal**



Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Mariscal**



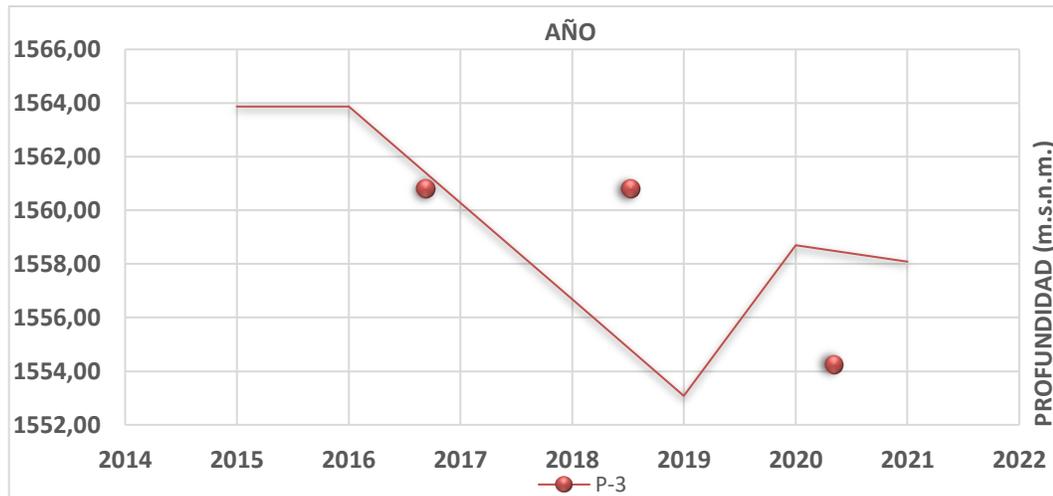
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Mariscal**



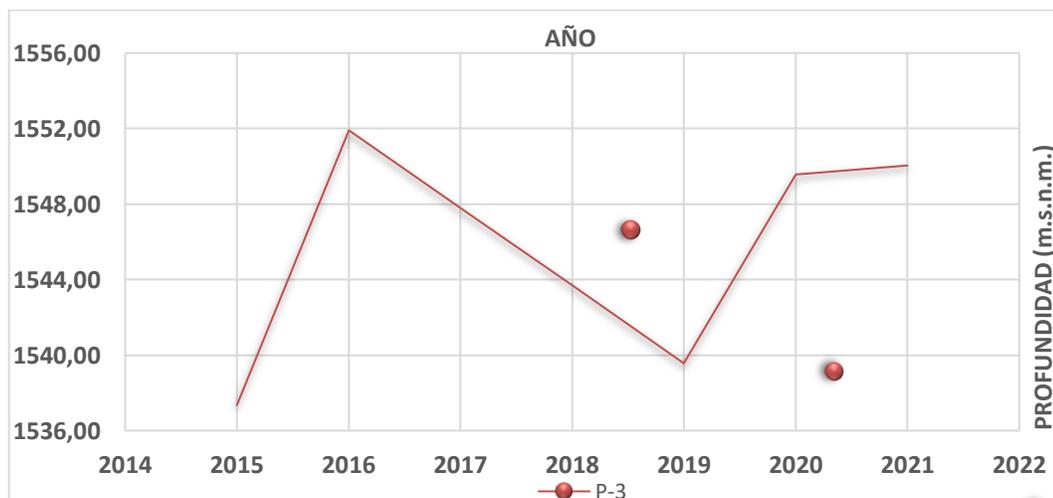
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Seco**



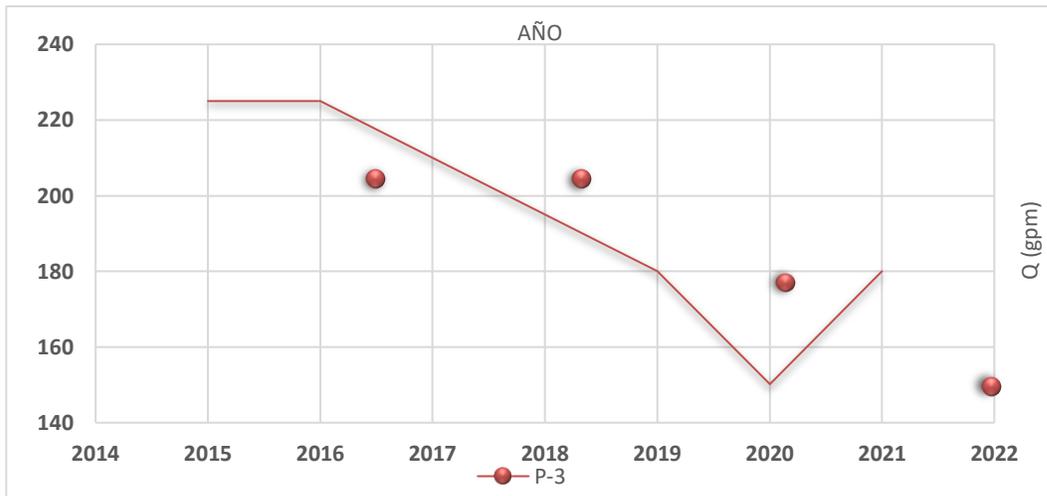
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Seco**



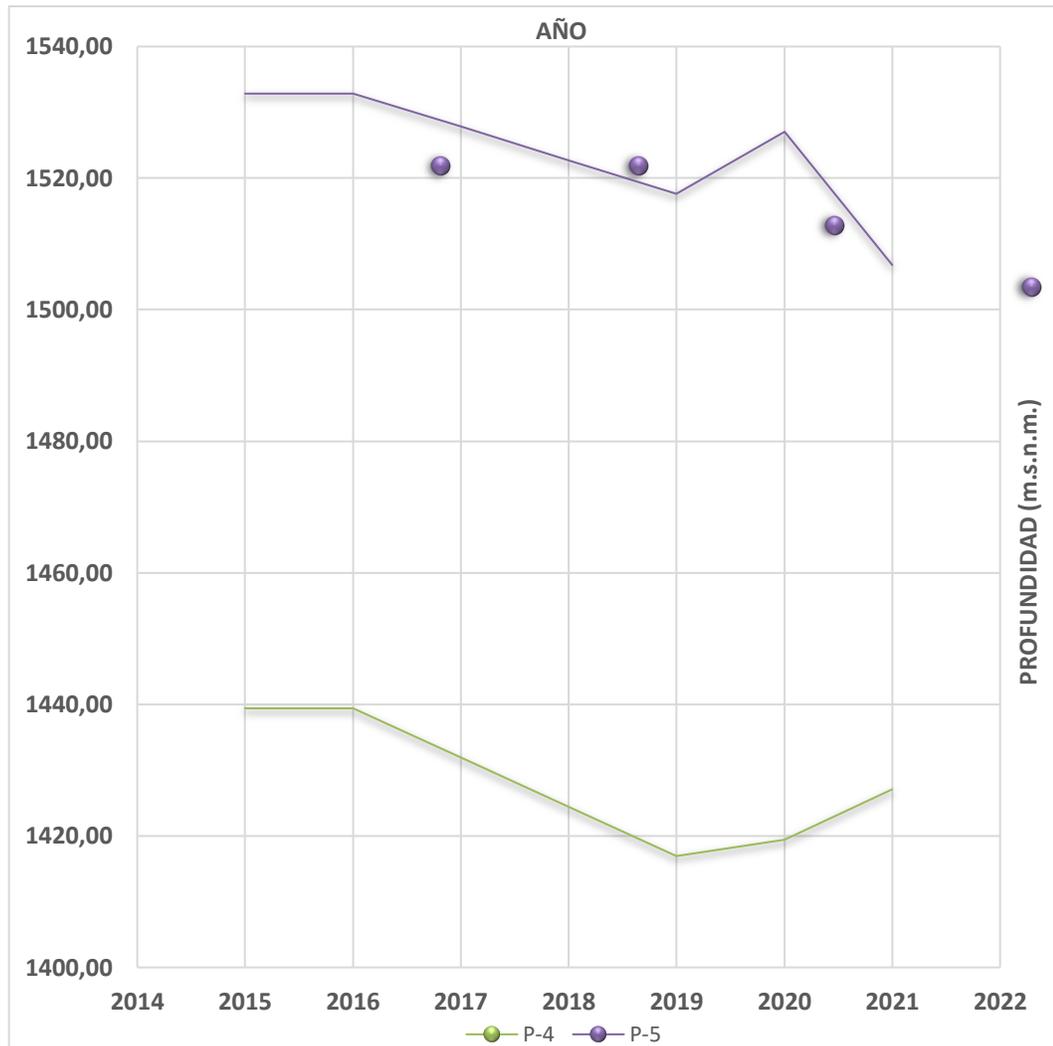
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Seco**



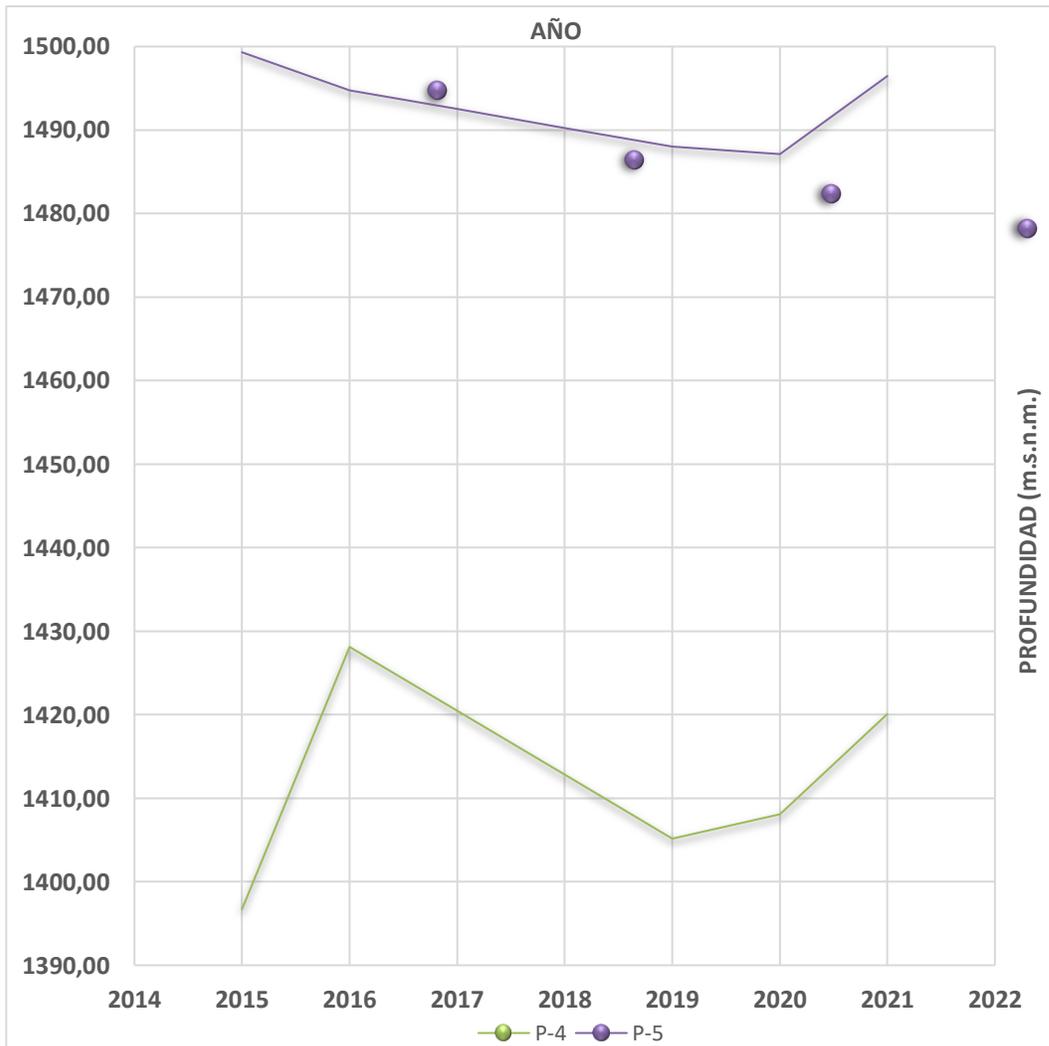
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Molino**



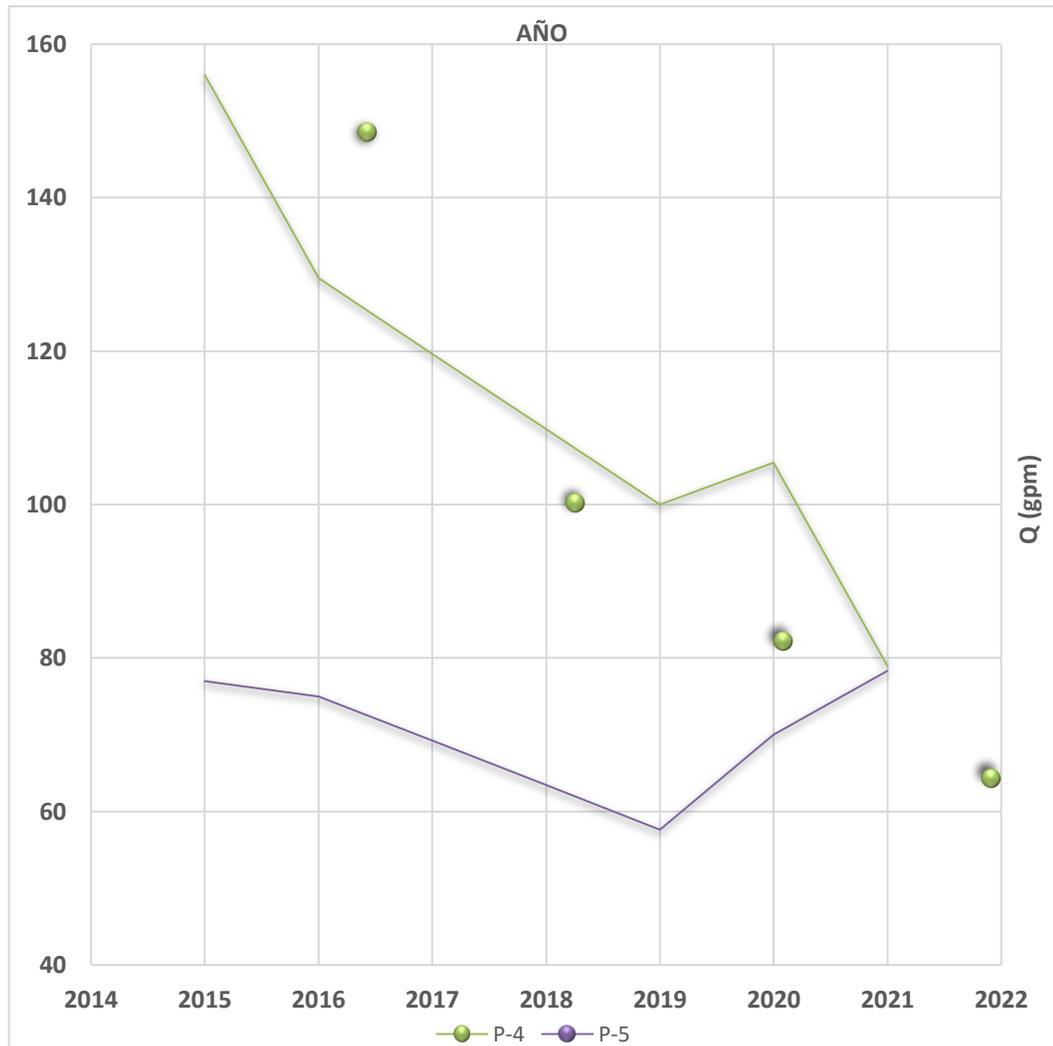
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Molino



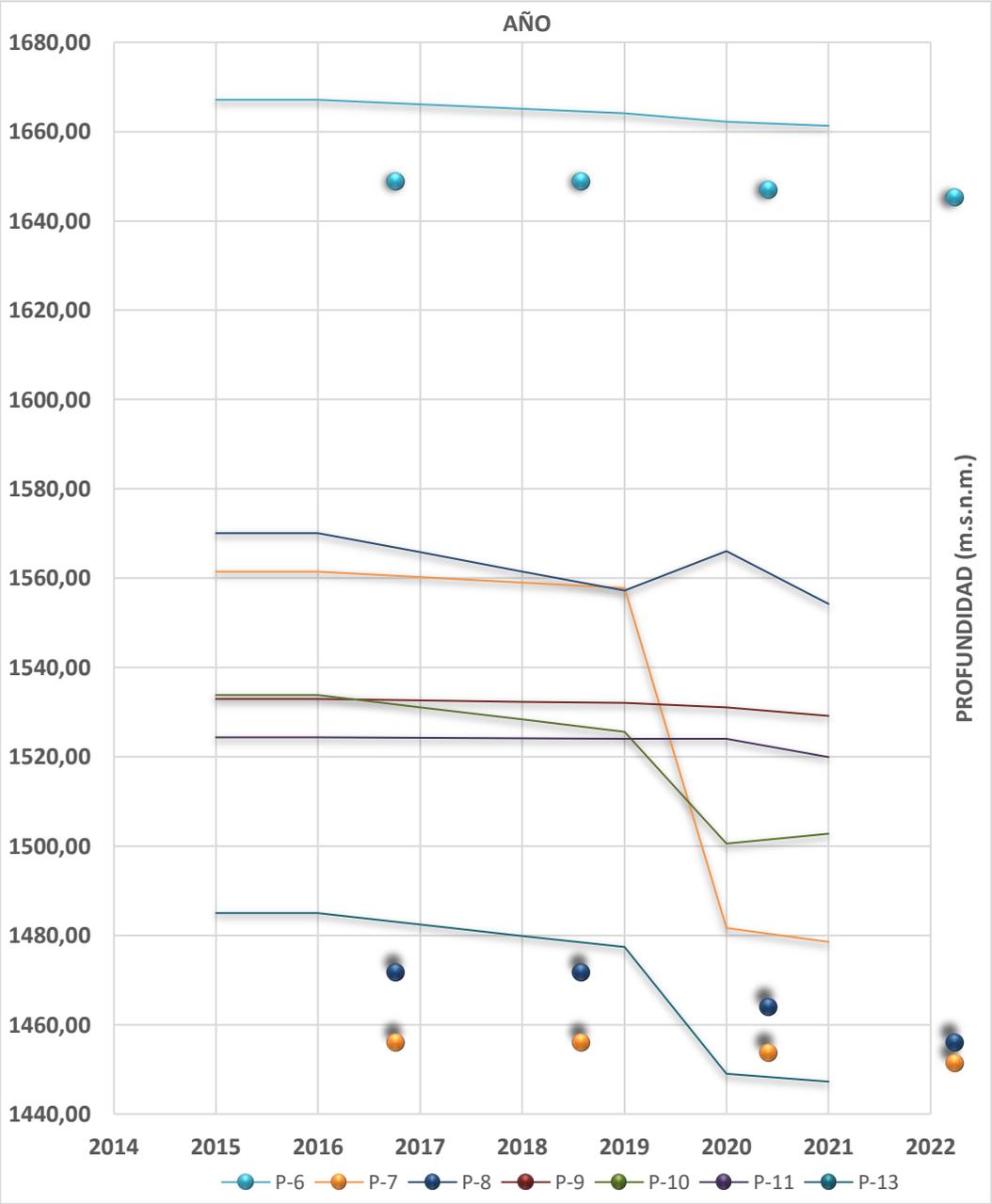
Fuente: elaboración propia.

Figura 63. Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Molino



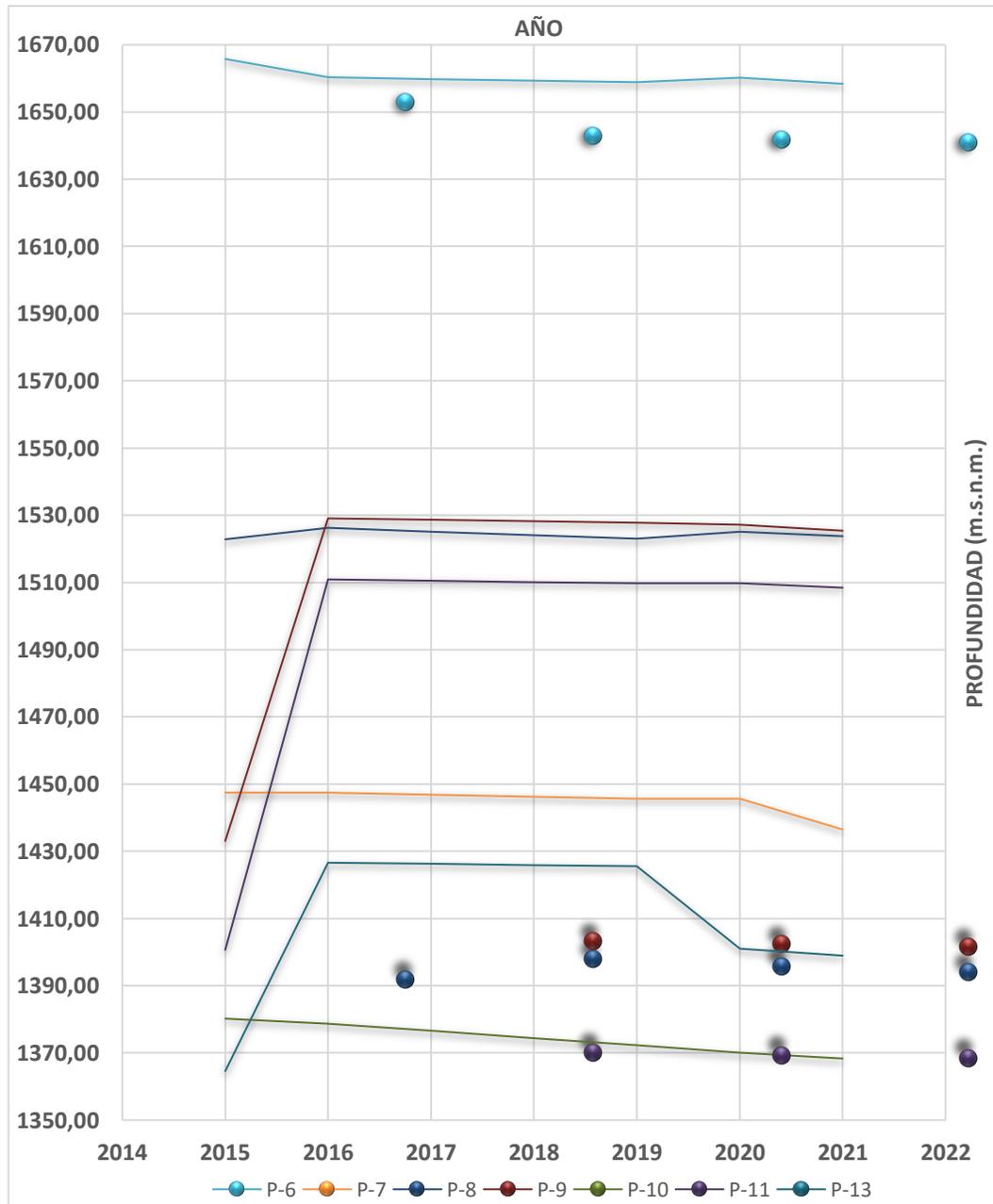
Fuente: elaboración propia.

Figura 64. Comportamiento de niveles estáticos en la microcuenca río Panchiguajá



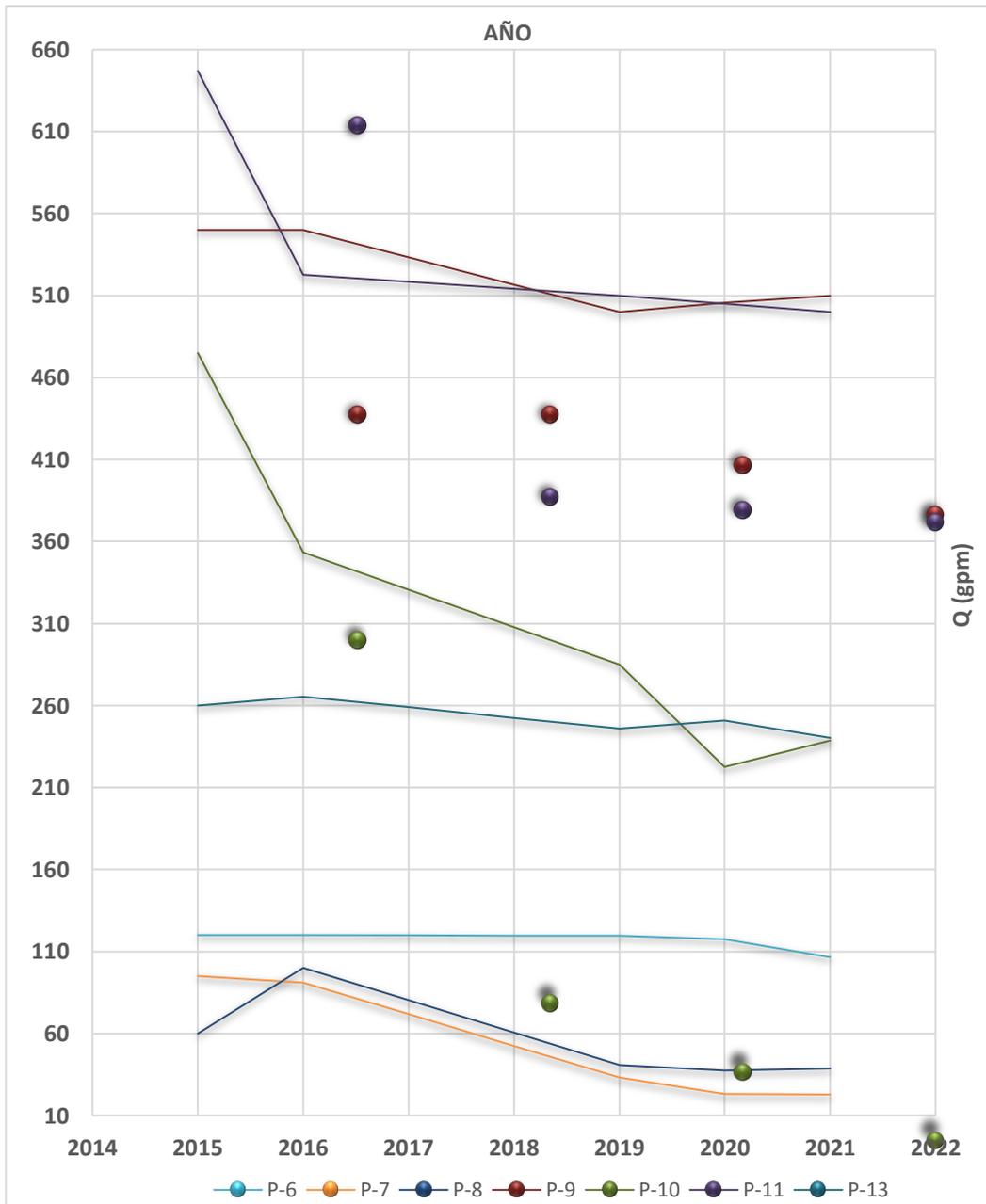
Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Comportamiento de niveles dinámicos en la microcuenca río Panchiguajá



Fuente: elaboración propia.

Figura 66. Comportamiento del caudal de extracción en la microcuenca río Panchiguajá



Fuente: elaboración propia.

Con la información tabulada se realiza el análisis gráfico de la variación de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción en cada pozo durante el tiempo en dimensionales de elevación en m.s.n.m. A través del análisis de estos resultados se determinan las siguientes observaciones:

- Los pozos que presentan mayor descenso promedio de nivel estático (metro/año) son los pozos P-7 y P-13.
- El 90 % de los pozos considerados en la zona 1 del municipio de Mixco presentan reducción de su caudal de extracción respecto al año 2015. El pozo P-5, a diferencia del resto, presenta un aumento en su caudal de extracción para el año 2021 de 101,71 %, en un periodo de seis años.
- El pozo P-7 presenta la mayor disminución de caudal de extracción para el año 2021, reduciéndose de 95 a 22,80 gpm equivalente a un 76 % de su rendimiento en comparación a su caudal de extracción histórico en el año 2015.

De las gráficas del comportamiento de nivel estático de los pozos en análisis se puede visualizar que existe una disminución constante de nivel de agua del año 2015 al 2021. A partir del año 2019 existen variaciones en los niveles de todos los pozos, ya que se presentan tres condiciones diferentes que son: asciende, se mantiene o desciende.

Como parte del análisis gráfico de la información recopilada se determinó el nivel estático y nivel dinámico promedio por año por microcuenca mostrado en la tabla XXII y tabla XXIII. De igual forma, se determinó el caudal de extracción conjunta por microcuenca mostrada en la tabla XXIV.

Tabla XXII. Resumen comportamiento de nivel estático promedio por microcuena

Año	Nivel estático promedio (m.s.n.m.)			
	Microcuena río Mariscal	Microcuena río Seco	Microcuena río Molino	Microcuena río Panchiguajá
2015	1 527,96	1 563,87	1 486,12	1 553,53
2016	1 527,96	1 563,87	1 486,12	1 553,53
2017	1 527,75	1 560,27	1 479,83	1 551,79
2018	1 527,55	1 556,68	1 473,55	1 550,05
2019	1 527,34	1 553,08	1 467,27	1 548,31
2020	1 518,04	1 558,69	1 473,22	1 530,63
2021	1 517,14	1 558,08	1 466,93	1 527,59

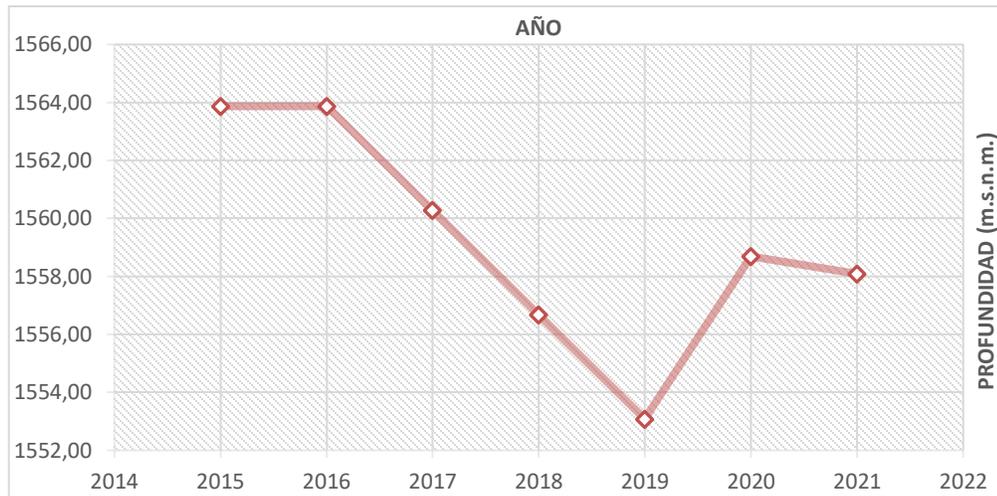
Fuente: elaboración propia.

Figura 67. Comportamiento de nivel estático promedio microcuena río Mariscal



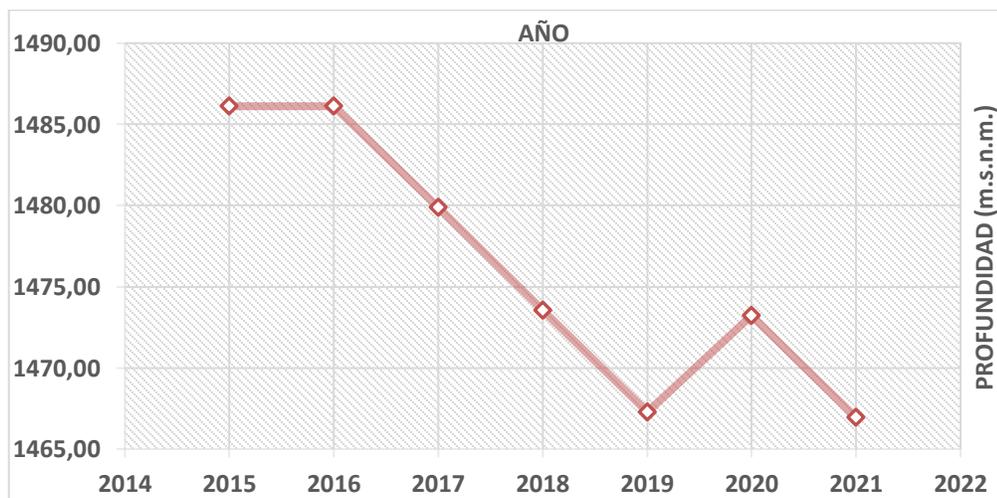
Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Comportamiento de nivel estático promedio microcuena río Seco**



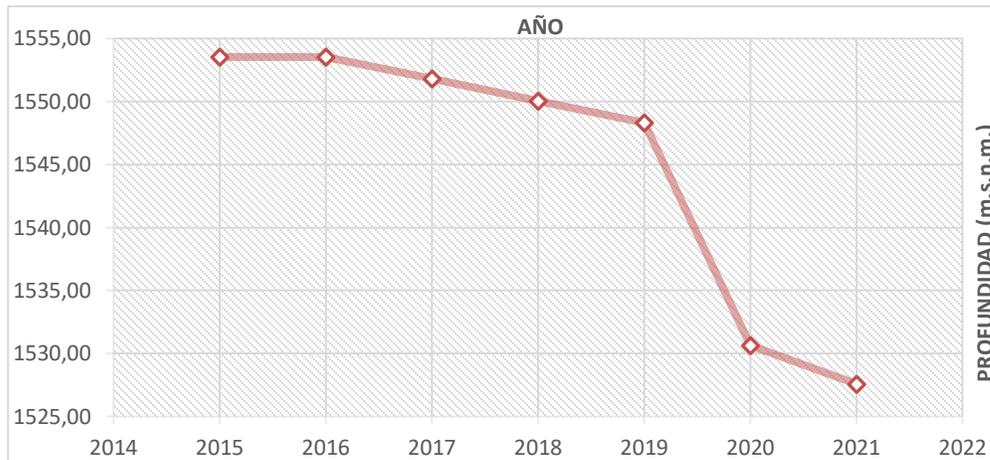
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Comportamiento de nivel estático promedio microcuena río Molino**



Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Comportamiento de nivel estático promedio microcuenca río Panchiguajá**



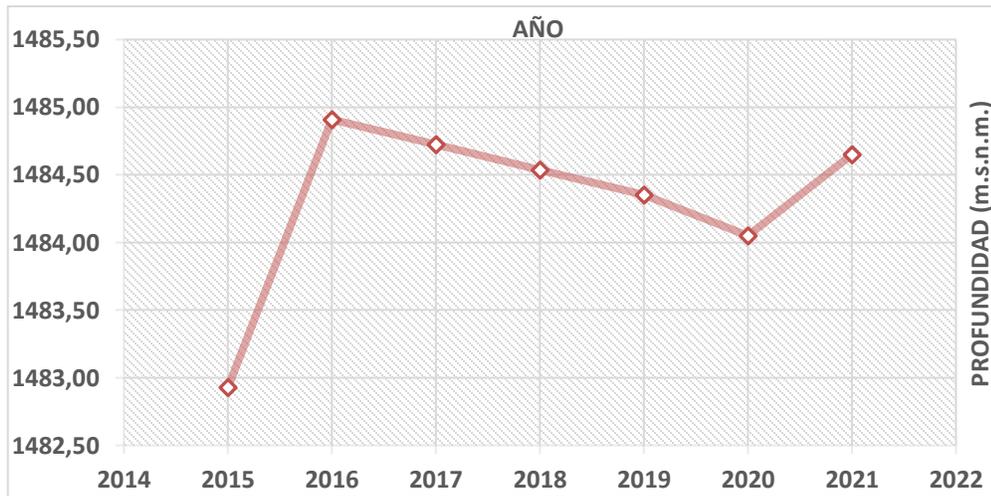
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resumen comportamiento de nivel dinámico promedio por microcuenca**

Año	Nivel dinámico promedio (m.s.n.m.)			
	Microcuenca río Mariscal	Microcuenca río Seco	Microcuenca río Molino	Microcuenca río Panchiguajá
2015	1 482,93	1 537,35	1 448,02	1 459,23
2016	1 484,91	1 551,91	1 461,43	1 497,04
2017	1 484,72	1 547,80	1 456,48	1 496,26
2018	1 484,54	1 543,69	1 451,54	1 495,47
2019	1 484,35	1 539,58	1 446,60	1 494,68
2020	1 484,05	1 549,56	1 447,60	1 491,28
2021	1 484,65	1 550,06	1 458,26	1 488,54

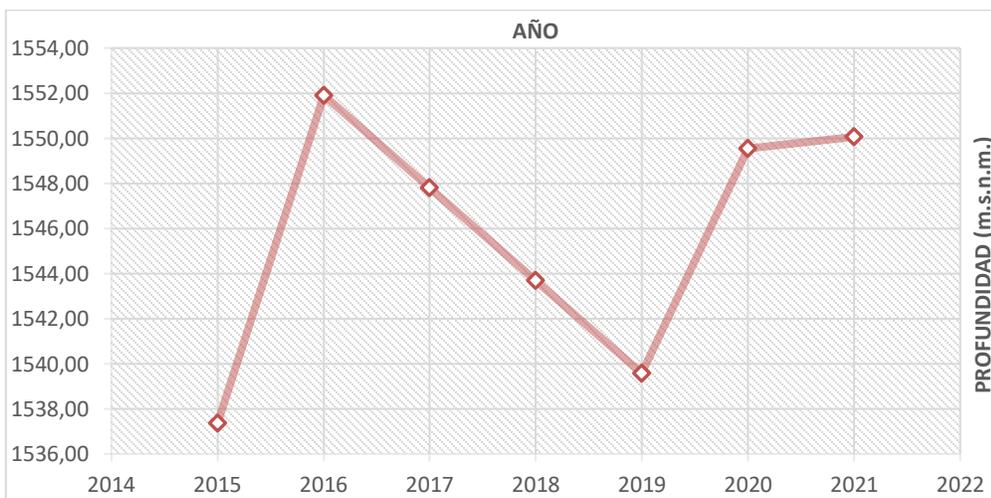
Fuente: elaboración propia.

Figura 71. **Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuenca río Mariscal**



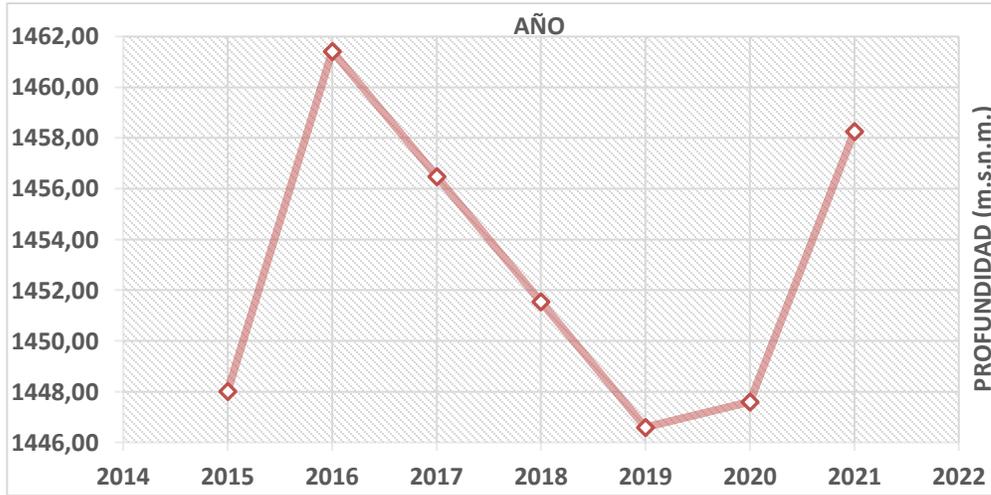
Fuente: elaboración propia.

Figura 72. **Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuenca río Seco**



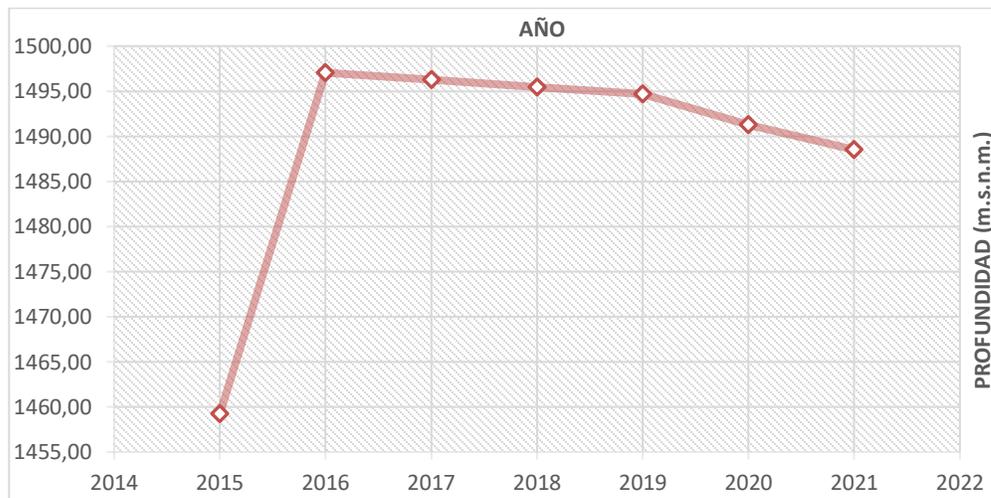
Fuente: elaboración propia.

Figura 73. **Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuencia río Molino**



Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Comportamiento de nivel dinámico promedio microcuencia río Panchiguajá**



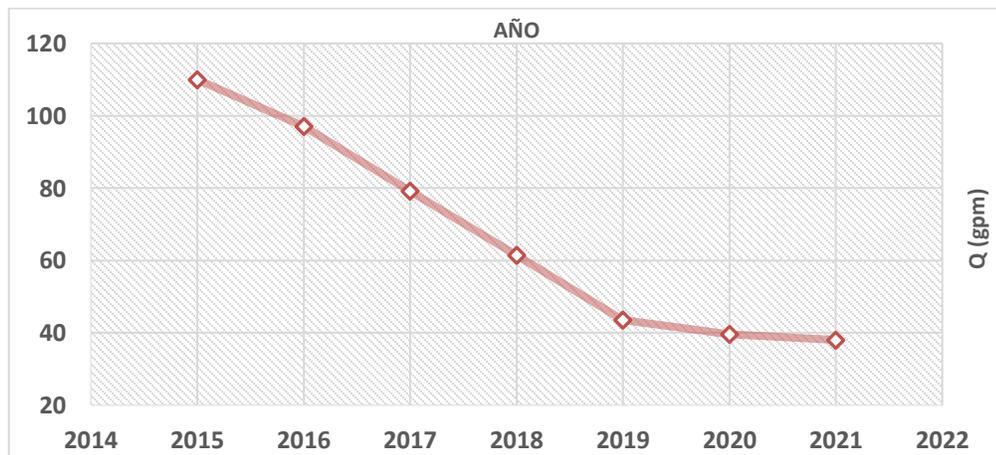
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resumen comportamiento de caudal de extracción promedio por microcuena**

Año	Aforo promedio (gpm)			
	Microcuena río Mariscal	Microcuena río Seco	Microcuena río Molino	Microcuena río Panchiguajá
2015	110,00	225,00	116,50	315,29
2016	97,03	225,00	102,25	286,06
2017	79,19	210,00	94,44	273,29
2018	61,35	195,00	86,63	260,52
2019	43,50	180,00	78,81	247,74
2020	39,61	150,18	87,73	237,40
2021	38,00	180,00	78,64	236,63

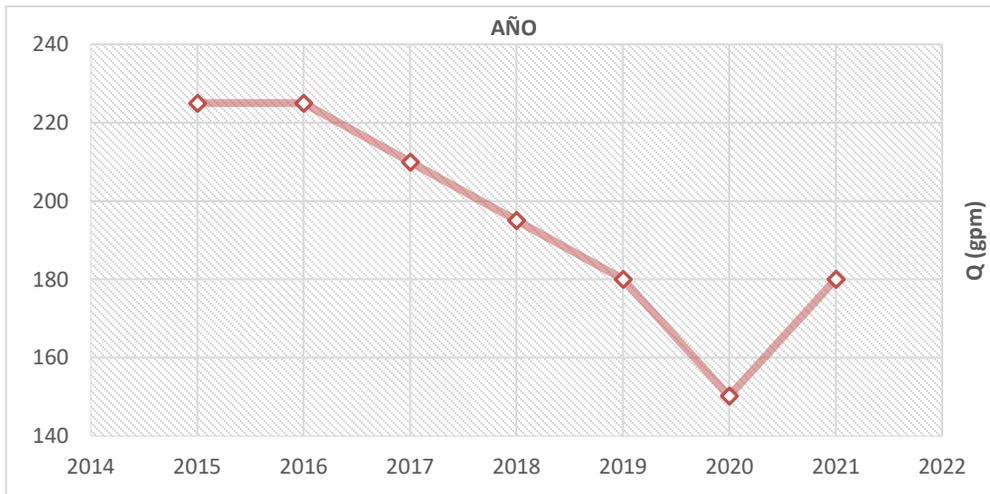
Fuente: elaboración propia.

Figura 75. **Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuena río Mariscal**



Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Seco**



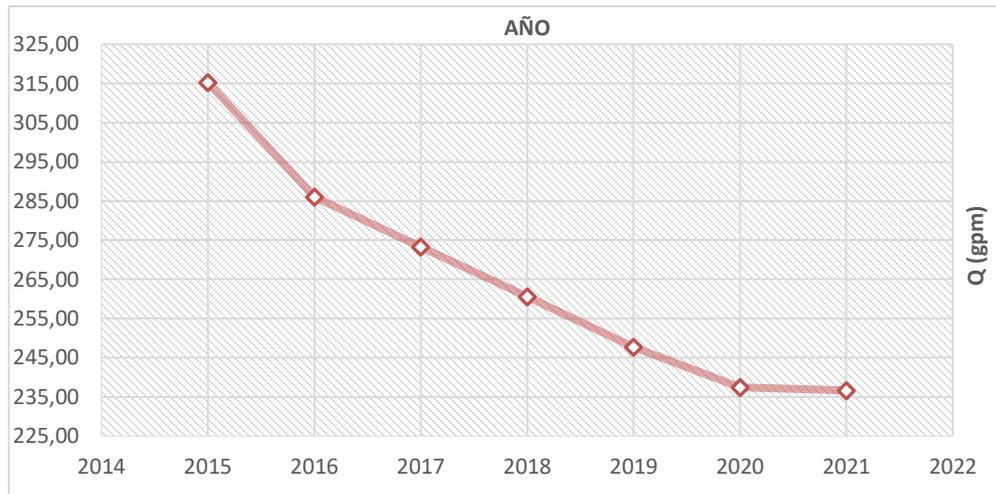
Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Molino**



Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Comportamiento de caudal de extracción promedio microcuenca río Panchiguajá**



Fuente: elaboración propia.

4.6.1. **Análisis microcuenca río Mariscal**

La figura 67 presenta el nivel estático promedio por año del pozo, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel estático ha presentado un descenso continuo en un período de seis años, en promedio 1,80 metro/año. La figura 71 presenta el nivel dinámico promedio por año del pozo, de esta grafica se puede interpretar que el nivel dinámico ha presentado un ascenso continuo en el tiempo un promedio de 0.29 metro/año.

En la figura 75 se muestra el caudal de extracción promedio por año del pozo en la microcuenca río Mariscal. El pozo P-1 muestra una pérdida de rendimiento de 65,45 % de su capacidad en un periodo de seis años de operación; es decir, para el año 2021 el pozo tiene un rendimiento de 34,54 % respecto a la capacidad histórica del año 2015.

4.6.2. Análisis microcuenca río Seco

La figura 68 presenta el nivel estático promedio por año del pozo, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel estático ha presentado un descenso continuo del año 2015 al 2019 un total de 10,79 metros. A partir del año 2019 al 2020 tiene un ascenso de 5,61 metros y, por último, del año 2020 al 2021 presenta un descenso mínimo de 0,61 metros, obteniendo así un descenso promedio de 0,97 metro/año.

La figura 72 presenta el nivel dinámico promedio por año del pozo, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel dinámico ha presentado un ascenso significativo de 14,55 metros del año 2015 al 2016, sin embargo, del año 2016 al 2019 presenta un descenso continuo en un periodo de tres años de 12,33 metros. A partir del año 2019 al 2021, asciende de manera significativa un total de 10,48 metros en un periodo de dos años.

En la figura 76 se muestra el caudal de extracción promedio por año del pozo en la microcuenca río Seco. El pozo P-3 muestra una pérdida constante de caudal de extracción del año 2015 al 2020 un total de 74,82 gpm. Del año 2020 al 2021 tiene una recuperación de 29,82 gpm; es decir, para el año 2021 el pozo produce un 80 % de su capacidad al año 2015 en un periodo de seis años.

4.6.3. Análisis microcuenca río Molino

La figura 69 presenta el nivel estático promedio por año de los pozos, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel estático ha presentado un descenso continuo del año 2015 al 2019 un total de 18,85 metros. A partir del año 2019 al 2020 tiene un ascenso de 5,95 metros y, por último, del año 2020 al 2021

presenta un nuevo descenso de 6,28 metros, obteniendo así un descenso promedio de 3,20 metro/año.

La figura 73 presenta el nivel dinámico promedio por año de los pozos, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel dinámico ha presentado un ascenso significativo de 13,41 metros del año 2015 al 2016, sin embargo, del año 2016 al 2019 presenta un descenso continuo en un periodo de tres años de 14,83 metros. A partir del año 2019 al 2021, asciende de manera significativa un total de 11,66 metros en un periodo de dos años, obteniendo así un ascenso promedio de 1,71 metro/año.

En la figura 77 se muestra el caudal de extracción promedio por año de los pozos en la microcuenca río Molino. Los pozos P-4 y P-5 muestran una pérdida constante de caudal de extracción del año 2015 al 2019 un total de 37,70 gpm. Del año 2019 al 2020 tiene una recuperación de 8,92 gpm, sin embargo, del año 2020 al 2021 presenta una nueva pérdida de 9,10 gpm. Es decir, para el año 2021 los pozos dentro en la microcuenca tuvieron una pérdida de rendimiento promedio de 32,50 % en un periodo de seis años de operación, por lo que para el año 2021, se tiene un rendimiento de 67,50 % respecto a la capacidad histórica del año 2015.

4.6.4. Análisis microcuenca río Panchiguajá

La figura 70 presenta el nivel estático promedio por año de los pozos, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel estático ha presentado un descenso continuo en un período de seis años, en promedio 4,32 metro/año. La figura 74 presenta el nivel dinámico promedio por año de los pozos, de esta gráfica se puede interpretar que el nivel dinámico ha presentado un ascenso significativo de

37,81 metros del año 2015 al 2016. Sin embargo, del año 2016 al 2021 presenta un descenso continuo en un periodo de cinco años de 8,50 metros.

En la figura 78 se muestra el caudal de extracción promedio por año de los pozos en la microcuenca río Panchiguajá. Los pozos P-6, P-7, P-8, P-9 P-10, P-11 y P-13, muestran una pérdida de rendimiento, es decir, para el año 2021 los pozos dentro en la microcuenca tuvieron una pérdida de rendimiento promedio de 24,95 % en un periodo de seis años de operación, por lo que para el año 2021, se tiene un rendimiento de 75,05 % respecto a la capacidad histórica del año 2015.

4.7. Discusión de resultados

A través del análisis e interpretación gráfica del comportamiento de los parámetros históricos de los pozos, distribuidos en las cuatro microcuencas dentro de la zona 1 del municipio de Mixco, se obtienen los siguientes resultados:

En la microcuenca río Panchiguajá se presenta el mayor descenso de nivel estático y nivel dinámico promedio por año, éste se refleja en los pozos P-7 y P-10. Adicionalmente, el pozo P-13 tiene un descenso de nivel estático y, sin embargo, presenta un ascenso de nivel dinámico promedio por año.

Existe un ascenso de nivel dinámico promedio por año en los pozos que se encuentran distribuidos en las cuatro microcuencas en análisis, estos son: P-1 (microcuenca río Mariscal), P-3 (microcuenca río Seco), P-4 (microcuenca río Molino), P-8, P-9, P-11 y P-13 (microcuenca río Panchiguajá).

El pozo P-4 refleja un ascenso de nivel estático y nivel dinámico a partir del año 2019 y un descenso de caudal de extracción considerable a partir del mismo año.

Los pozos P-1, P-7 y P-10 son los que presentan la mayor disminución de caudal de extracción, reduciéndose de 110 a 38 gpm, 95 a 22,8 gpm y 475 a 238,61 gpm respectivamente. Esto refleja una disminución de rendimiento del 65,45 %, 76 % y 49,77 %, tomando de referencia el caudal de extracción del año 2015.

Considerando que el pozo P-1 tuvo un descenso de nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción tomando de referencia los parámetros del año 2015, estos resultados demuestran que la variación de los valores históricos vs. valores actuales es ocasionada por el equipo de bombeo (cambio del equipo de bombeo debido a la reducción de rendimiento del pozo mecánico y el incremento en el nivel dinámico).

Se presenta un descenso de nivel estático y dinámico en los pozos P-7 y P-10, es decir, para el año 2021 se encuentran a un 24 % y 50,23 % de su capacidad, respecto su valor del 2015. Considerando que los pozos P-6, P-7, P-8, P-9, P-10, P-11 y P-13 se encuentran todos en la microcuenca Río Panchiguajá y que los pozos P-7 y P-10 son los que presentan mayor porcentaje de descenso, se puede interpretar que esto se debe a una sobreexplotación de los pozos.

Los pozos P-3, P-4, P-8, P-9, P-11 y P-13, distribuidos en las microcuencas en análisis, reflejan un ascenso de nivel dinámico respecto a sus condiciones históricas, debido a que el caudal de extracción disminuyó en 20 %, 49,39 %, 38,87 %, 7,31 %, 22,72 % y 7,60 % respectivamente; por lo que se interpreta que

las condiciones de operación e hidrogeológicas se encuentran estables. Sin embargo, por la reducción de caudal, las condiciones del acuífero representan un posible riesgo a futuro.

5. PLANIFICACION PARA EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE UN POZO

5.1. Ciclo de vida del proyecto

El ciclo de vida de un proyecto inicia con la identificación del problema, necesidad u oportunidad de desarrollo y/o mejora que requiere una solución. Este se compone de las siguientes fases principales:

- Pre inversión
- Inversión o ejecución
- Operación, administración y mantenimiento

El proceso de planificación para un pozo mecánico, abarca desde la identificación de las condiciones hidrogeológicas que favorezcan la recarga hídrica de las diferentes formaciones geológicas para el aprovechamiento de las aguas subterráneas, hasta el proceso de captación y distribución del vital líquido hacia los habitantes que están ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco (casco urbano).

5.1.1. Etapa de pre inversión

La etapa es esencialmente una fase de estudio en la cual se debe determinar la conveniencia de implementar o no el proyecto que se está analizando. Cuenta con cinco etapas: idea, perfil, prefactibilidad, factibilidad y

diseño. El propósito de la pre inversión es mejorar la calidad con el respaldo de estudios de pre inversión técnicamente elaborados.

Durante la etapa de pre inversión en la elaboración de un pozo mecánico es donde se determinará la profundidad del pozo mecánico, el tipo de máquina de perforación en base a la formación geológica, método de perforación, tipo de maquinaria, el fluido de perforación, tipo de rejilla, tipo de acero de la tubería, tipo de limpieza y desarrollo (mecánica, compresor, uso de productos químicos) tipo de bomba, entre otros.

5.1.2. Etapa de inversión

La etapa de inversión se refiere a la concreción de los proyectos exitosos que pasaron por el filtro de la pre inversión, y que obtuvieron opinión favorable para su ejecución. Esta fase posee una sola etapa que es ejecución del proyecto en base al diseño definido durante la etapa de pre inversión.

Durante esta etapa se lleva el seguimiento físico y financiero del proceso de perforación, verificando que no se presenten inconvenientes durante la perforación, por ejemplo:

- Derrumbes
- Estratos duros e inestables (atrapamiento de herramienta)
- Pérdida de circulación
- Fallas mecánicas

5.1.3. Operación, administración y mantenimiento

La etapa de operación, administración y mantenimiento es cuando da inicio con la puesta en marcha del proyecto de inversión y en ella se materializan los beneficios previstos en la pre inversión. Esta fase cuenta con una sola etapa que es operación del proyecto.

5.2. Parámetros a considerar en el mantenimiento de un pozo

Para el adecuado mantenimiento de un pozo mecánico se debe contar con el historial de información que se debe medir o identificar para la toma de decisiones, estas deben ser:

- Nivel estático
- Nivel dinámico
- Caudal de extracción
- Muestra de agua: sdt, nitratos, Fe, Mn, salinidad, olor, color, biomasa, turbidez
- Comportamiento de niveles de forma regional vs. pozos aislados
- Medir niveles en pozos seleccionados sin bombeo, mientras otros se estén explotando o disponer de una red de pozos de observación
- Ubicar pozos aguas arriba que interfieran en pozos aguas abajo
- Estrato geológico regional que impida la entrada de contaminantes al acuífero
- Hacer pruebas de bombeo en pozos profundos y medir niveles en pozos superficiales
- Identificar áreas de recarga para su protección

Adicional a los parámetros anteriores los parámetros que se deben definir y calcular para la toma de decisiones son los siguientes:

- % de caudal actual vs. original
- Capacidad específica
- Abatimiento/Columna de agua
- Como definir deficiencias del equipo de bombeo
- Como definir obstrucción de entrada de agua al pozo
- Tiempo de influencia de pozos
- Determinar caudal con y sin interferencia
- Presencia de incrustaciones identificando color
- Definir frecuencia de inspección con cámara
- Definir frecuencia de mantenimiento para evitar interrupciones de bombeo en época crítica
- Construir mapa de dirección de flujo del agua subterránea
- Definir lugares de contaminación de acuíferos con mapas de concentraciones
- Construir mapa de dirección de flujo de contaminantes

5.3. Criterios de toma de decisión

Una vez desarrollado el análisis de la información recopilada histórica vs. actual, se deben de considerar algunos criterios para la toma de decisión en el mantenimiento de un pozo mecánico, estos criterios deberán ser:

- Cuando el caudal producido sea menor al 80 % del caudal inicial o de referencia
- Cuando la capacidad específica sea menor al 75 % del valor inicial o de referencia

- Cuando el abatimiento sea mayor a $\frac{2}{3}$ de la columna de agua
- Cuando la concentración de Fe y/o Manganese superen el Imp
- Cuando se tenga presencia de ligas, arena, olor desagradable, color amarillento
- Cuando se tengan incrustaciones en el pozo
- Cuando se tenga presencia de arena en el pozo

5.4. Evaluación de un pozo mecánico

La evaluación de un pozo mecánico consiste en hacer un diagnóstico para realizar las reparaciones y acciones necesarias para recuperar las condiciones del mismo.

5.4.1. Evaluación inicial del pozo y del sistema

(Cid, 2016) en su investigación define las actividades a considerar para la evaluación de un pozo mecánico, las cuales son las siguientes:

- Inspección inicial: se realiza una inspección visual, así como una recopilación de información de las características del área de trabajo, datos hidráulicos, si los hubiese, y geometría del pozo.
- Prueba de bombeo con equipo instalado: se realiza una prueba de bombeo con el equipo instalado con el fin de obtener parámetros del pozo (nivel dinámico, nivel estático, caudal y caudal específico), ya que con estos datos puede determinarse el comportamiento y productividad del pozo. Estos parámetros se comparan con los datos en la prueba de bombeo correspondiente a la fase final y así determinar los resultados de la rehabilitación.

- Desinstalación de equipo de bombeo: se procede a desinstalar el equipo de bombeo para su revisión en taller.
- Revisión de equipo de bombeo en taller: se realizan la prueba visual, mecánica y eléctrica para determina la condición del mismo.
- Análisis de la calidad del agua: a través del envío de muestras de agua al laboratorio se obtienen sus características fisicoquímicas y bacteriológicas, lo cual es un indicador de inconvenientes que esta puede causar en las zonas de captación del pozo.
- Aplicación de químico floculante: el objetivo de este tratamiento es aglomerar y flocular las partículas disueltas en el agua para cumplir con el siguiente procedimiento.
- Inspección con cámara: se realiza una inspección con cámara de video sumergible, con el fin de conocer el estado del *casing* y la condición general del pozo.

5.4.2. Mantenimiento de pozos

El mantenimiento de los sistemas de abastecimiento de agua potable, consiste en el conjunto de actividades necesarias a desarrollar para la corrección oportuna de las fallas que puedan presentarse en las estructuras y, de este modo conseguir que éstas se encuentren continuamente en condiciones de poder operar y prestar un servicio óptimo. (Sumalé, 2012)

5.4.2.1. Tipo de mantenimiento

En los sistemas de abastecimiento de agua potable (pozos mecánicos) se pueden presentar dos tipos de mantenimiento, estos serán el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. (Sumalé, 2012)

5.4.2.1.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es el que se desarrolla en los equipos sumergibles, de rebombeo y eléctricos. Sin embargo, a ciertos equipos y válvulas que se encuentran en la superficie se les hará tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo. (Sumalé, 2012)

Durante la etapa de operación, el mantenimiento preventivo estará destinado a preservar y conservar los equipos y/o instalaciones a través del análisis de la estructura e identificación de reparaciones que garanticen un adecuado funcionamiento y fiabilidad.

La característica principal de este mantenimiento es la detección de fallas o anomalías en su fase inicial y su corrección en el momento oportuno. La definición implica prevenir, es decir, la correcta anticipación para evitar un riesgo o un daño mayor al equipo.

Según (Sumalé, 2012) este método presenta diversas ventajas, las cuales pueden ser:

- Confiabilidad, los equipos operan en mejores condiciones de seguridad, ya que se conoce su estado, y sus condiciones de funcionamiento.
- Disminución del tiempo muerto, tiempo de parada de equipos/máquinas.
- Mayor duración, de los equipos e instalaciones.
- Disminución de existencias en almacén y, por lo tanto, sus costos puesto que se ajustan los repuestos de mayor y menor consumo.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de mantenimiento, debido a una programación de actividades.
- Menor costo de las reparaciones.

5.4.2.1.2. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo no hay una definición precisa que explique con claridad, las ventajas o desventajas que presenta su aplicación, el aspecto económico es determinante en el análisis de costos totales de operación. (Sumalé, 2012)

Para unos, el mantenimiento correctivo significa la actividad de reparar después de una suspensión no prevista; otros; sin embargo, consideran que es el conjunto de acciones tendientes a minimizar los paros no previstos, como será la sustitución de materiales, rediseño de instalaciones, modificaciones operativas, entre otros. (Sumalé, 2012)

5.4.3. Cronograma de mantenimiento de pozos

Se debe poseer un cronograma de mantenimiento de los pozos mecánicos, este variará dependiendo del componente del pozo y de la cantidad de horas al día que trabaja, este sería un mantenimiento preventivo para evitar mantenimientos correctivos, ya que los correctivos se tienen que llevar a cabo en el momento que se presente el problema, en la tabla que se muestra a continuación, se hace una propuesta al respecto.

Tabla XXV. **Propuesta de cronograma de mantenimiento**

No.	Actividad	Frecuencia
1	Inspección general del equipo de bombeo.	Anual
2	Limpieza de equipos de bombeo y de la bomba, verificación de las instalaciones eléctricas	Mensual
3	Alineación de los motores de las bombas	Anual
4	Verificación de funcionamiento y operación de válvulas de cierre o cheque	Semestral
5	Prevención contra las incrustaciones de rejillas y revestimiento, método mecánico o tratamiento químico, inspección con cámara.	Mínimo cada 2 años
6	Análisis físico, químico y bacteriológico	Semestral
7	Prueba de bombeo y medición de niveles del pozo	Semestral

Fuente: elaboración propia.

5.4.4. Presupuesto de inversión para el mantenimiento de un pozo

Una vez iniciada la operación del proyecto, se inicia el proceso de desgaste de las obras, los equipos empiezan a depreciarse y muchos accesorios empiezan a desgastarse, producto del uso.

Es por eso que, durante la pre inversión del proyecto, en relación al proceso de operación se definen las que garanticen la vida útil del mismo, lo anterior genera costos periódicos que deberán ser cuidadosamente calculados, no se deben olvidar que estos costos constituyen un criterio de evaluación.

Estos costos son por adquisición de materiales, para reparación y mantenimiento de las instalaciones (redes, cañerías, pintura y estanque), por la

mano de obra pagada, transporte de materiales (fletes), herramientas y artículos de seguridad del operador. Mantenimiento que se va a proveer a los equipos de rebombeo, estos son las bombas centrifugas, válvulas, equipos de medición, paneles de control, tuberías, tanques de almacenamiento y cisternas aéreas entre otras.

La tabla XXVIII contiene los costos del mantenimiento preventivo correspondiente a los 11 equipos de rebombeo con los que cuenta la zona 1 del municipio de Mixco. El precio por unidad es lo que cuesta darle servicio a un equipo de rebombeo y el precio total es por el servicio a los 11 equipos.

Tabla XXVI. **Propuesta de cronograma de mantenimiento**

No.	Descripción	Equipo a utilizar	Cantidad de pozos	P.U.	Sub-Total
SERVICIO MENSUAL					
1	Limpieza de válvulas y tuberías con wipe y kerosene	Kerosene y wipe	11	Q. 70,00	Q. 770,00
2	Limpieza de maleza en el contorno de la estructura	Gasolina y bolsas	11	Q. 60,59	Q. 666,49
3	Cheque de prensaestopa y cambio de empaquetadura (de ser necesario)	Empaque (de ser necesario)	11	Q. 15,00	Q. 165,00
4	Limpieza de tableros	Wipe, aire comprimido en spray	11	Q. 85,00	Q. 935,00
Sub-Total rubro mensual					Q. 2 536,49
SERVICIO SEMESTRAL					
1	Análisis físico-químico y bacteriológico (incluye toma de muestra y traslado de muestra)	Empresa privada	11	Q. 2 000,00	Q. 22 000,00
2	Limpieza y desinfección de cisternas	Cloro líquido y cepillo de cerdas	11	Q. 106,75	Q. 1 174,25
3	Revisión de filtro en el reservorio por obstrucción con arena u otro elemento	Servicio de aire comprimido	11	Q. 100,00	Q. 1 100,00

Continuación tabla XXVI.

4	Chequeo de anillos de desgaste y cambio de requerirse	Anillos de desgaste	11	Q. 300,00	Q. 3 300,00
5	Inspección de tableros de control y reparaciones menores	Técnicos	11	Q. 1 250,00	Q. 13 750,00
6	Verificación de funcionamiento y operación de válvulas de cierre o cheques	Ayudante de plomería	11	Q. 600,00	Q. 6 600,00
Sub-Total rubro semestral					Q. 47 924,25
SERVICIO ANUAL					
1	Extracción de equipo de bombeo y verificación de alineación de los motores y bombas	Empresa privada	11	Q. 1 900,00	Q. 20 900,00
2	Evaluación de medidos y revisión y/o reparación de equipo de desinfección	Empresa privada	11	Q. 1 500,00	Q. 16 500,00
3	Chequeo de alineamiento y desgaste del eje, impulsores, sellos, rodamientos y empaques	Técnicos y ayudantes	11	Q. 1 850,00	Q. 20 350,00
4	Verificación de la estructura en forma integral y reparaciones de daños existentes	Cemento, pegamento y accesorios	11	Q. 1 500,00	Q. 16 500,00
5	Reparación interior de tanques o cisternas (simultáneamente con limpieza)	Electrodos, pegamento, cepillos y herramienta menor	11	Q. 500,00	Q. 5 500,00
6	Mantenimiento de cajas de control de bombas sumergibles y centrifugas	Técnicos electromecánicos	11	Q. 1 000,00	Q. 11 000,00
Sub-Total rubro anual					Q. 90 750,00
TOTAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO					Q. 141 210,74

Fuente: elaboración propia.

Al igual, se deben considerar las revisiones o visitas a los pozos, mínimo cada 3 días la sugerencia es que se tenga a un técnico fijo responsable de esta revisión de pozos, lo cual representa un costo fijo que se debe diluir entre los

pozos, para observar el estado de los equipos de bombeo, tuberías y tableros eléctricos, dichas visitas permitirán determinar el estado de los equipos y permitirán verificar todo tipo de anomalías, por ejemplo; fugas, ruidos excesivos, vibraciones y otros. Toda anomalía debe reportarse a los encargados del mantenimiento del departamento.

5.4.4.1. Costos directos de mantenimiento

Los costos directos de mantenimiento son muy difíciles de estimar con anticipación y a continuación se detallan aquellos medios que se usan para el servicio de mantenimiento en los equipos de bombas. (Sumalé, 2012)

Los costos sobre herramientas y accesorios son los principales medios que se usan para el servicio de mantenimiento en los equipos de bombas, éstos se transforman en bienes terminados con la adición de mano de obra directa y costos indirectos de fabricación.

Tabla XXVII. **Costos de herramienta y accesorios**

No.	Descripción	Cantidad (meses)	P.U.	Sub-Total
1	Combustibles y lubricantes	12	Q. 31 110,00	Q. 373 320,00
2	Radio comunicador	12	Q. 697,00	Q. 8 364,00
3	Accesorios	12	Q. 2 000,00	Q. 24 000,00
4	Cloro	12	Q. 2 500,00	Q. 30 000,00
TOTAL				Q. 435 684,00

Fuente: elaboración propia.

La mano de obra directa, en este caso son los encargados de las revisiones, visitas y del mantenimiento preventivo de los equipos de bombeo, tuberías,

dispositivos de medición, accesorios y paneles de control y de los depósitos de agua. También de garantizar un trabajo óptimo y prolongar la vida útil del equipo.

Es indispensable que la municipalidad de Mixco cuente en bodega con los repuestos que en momentos de emergencia puedan utilizarse para trabajos menores en los equipos de rebombeo, así como para los paneles eléctricos de funcionamiento. (Sumalé, 2012)

La siguiente tabla muestra un listado de los repuestos y costo unitario que tienen en el mercado cada uno de ellos.

Tabla XXVIII. Resumen de precio de repuestos

No.	Descripción	Cantidad	P.U.	Sub-Total
1	Aceite	20	Q. 175,00	Q. 3 500,00
2	Grasa entubada	20	Q. 24,95	Q. 499,00
3	Sello mecánico	11	Q. 208,50	Q. 2 293,50
4	Anillos de desgaste	15	Q. 225,00	Q. 3 375,00
5	Cojinetes	18	Q. 150,00	Q. 2 700,00
6	Empaques de prensa estopa	25	Q. 7,20	Q. 180,00
7	Válvula de compuerta de bronce	6	Q. 150,00	Q. 900,00
8	Cheque horizontal de bronce	6	Q. 85,50	Q. 513,00
9	Collarín de soporte	1	Q. 800,00	Q. 800,00
10	Niples de HG Tipo pesado (4x6")	18	Q. 17,95	Q. 323,10
11	Codos HG tipo pesado de 45° (4" y 6")	18	Q. 87,95	Q. 1 583,10
12	Unión universal de 4" HG	13	Q. 29,99	Q. 389,87
13	Material de empalme y amarre	2	Q. 800,00	Q. 1 600,00
14	Accesorios eléctricos	1	Q. 4 500,00	Q. 4 500,00
15	Bomba centrífuga (10-30 HP)	1	Q. 50 000,00	Q. 50 000,00
17	Bomba de agua y motor sumergible 60 HP	1	Q. 89 000,00	Q. 89 000,00
TOTAL				Q. 162 156,57

Fuente: elaboración propia.

El total de costos directos por concepto de mantenimiento, donde se incluye herramientas, accesorios y mano de obra directa se detalla en la tabla XXIX, que se presenta a continuación:

Tabla XXIX. **Costos directos de mantenimiento**

No.	Descripción	Gasto de cuota mensual
1	Herramientas y accesorios	Q. 36 307,00
2	Mantenimiento	Q. 11 767,56
3	Repuestos	Q. 13 513,05
TOTAL DE MANTENIMIENTO		Q. 61 587,61

Fuente: elaboración propia.

Los montos de gasto mensual descritos en los renglones de la tabla anterior se obtuvieron de las tablas XXVI, XXVII y XXVIII, tomando en consideración que el total los tres cuadros corresponde a montos anuales.

CONCLUSIONES

1. La circulación del agua subterránea depende de tres factores que condicionan la recarga del recurso hídrico, la presencia del vital líquido en el suelo y su descarga a los pozos de la zona 1 del municipio de Mixco. Estos factores son los siguientes: limatología e hidrología, geología (tectónica y litología) y la geomorfología.
2. El comportamiento histórico de los pozos mecánicos ubicados en la zona 1 del municipio de Mixco, presenta una disminución variable de nivel de agua del año 2015 al 2021, según los registros oficiales de la Dirección de Aguas y Drenajes de la municipalidad de Mixco, a partir del año 2019 se presenta una variación diversa de nivel estático. Con esta información se determinó que el estado actual presenta un ascenso en su nivel estático del 18,18 %, en su nivel dinámico presenta un ascenso del 45,45 % y en su caudal de extracción refleja una pérdida del 63,64 %.
3. Para realizar la propuesta de plan de monitoreo frecuente, que proporcione de manera regular el estado de los pozos mecánicos ubicados en zona 1 del municipio de Mixco, se debe considerar el registro de la medición de los niveles estático, dinámico y caudal de extracción de manera semestral con el fin de verificar posibles variaciones de nivel de registros medidos vs. registros anteriores.
4. La planificación adecuada de un mantenimiento preventivo de los pozos debe considerarse desde la etapa de pre inversión hasta la etapa de operación y mantenimiento. La planificación adecuada de un pozo

mecánico debe reflejar el análisis de la estructura y, de esta forma, identificar las posibles reparaciones ocasionadas por un mal funcionamiento del diseño y/o de algún fenómeno externo que afecte la funcionalidad y fiabilidad de los pozos.

5. Un plan de acción debe incluir, la preservación y conservación de los equipos para que la operación y servicios sean óptimos, tomando en cuenta que un pozo es considerado crítico cuando presenta un criterio para la toma de decisiones de un mantenimiento preventivo, por ejemplo: caudal producido menor al 80 % del valor del caudal de referencia, capacidad específica menor al 75 % del caudal de referencia, incrustaciones en el pozo, presencia de arena, su abatimiento es mayor a $\frac{2}{3}$ de la columna de agua.
6. Para el presente informe se considera una propuesta de monto de inversión de mantenimiento de Q. 61 587,61 mensuales, que incluye: herramientas, accesorios, repuestos y mano de obra, esto con la finalidad del buen desarrollo y ejecución de un proyecto de agua y saneamiento como lo es un pozo mecánico.

RECOMENDACIONES

Al departamento de Aguas y Drenajes de la municipalidad de Mixco:

1. Se recomienda, considerar un análisis previo de los factores que condicionan la recarga del recurso hídrico a los pozos de la zona 1 del municipio de Mixco, debido a que a través de estos podemos determinar: la calidad del agua subterránea que se extrae, tipo de material (si es adecuado para almacenar y conducir el agua subterránea), entre otros.
2. Verificar regularmente el comportamiento de los parámetros a considerar de los pozos de la zona 1 del municipio de Mixco (nivel estático, nivel dinámico y caudal de extracción), considerando los futuros registros y de esta manera, obtener un dato certero del estado de los pozos.
3. Poner en práctica el registro frecuente de los niveles estáticos, niveles dinámicos y caudal de extracción, para tener un adecuado monitoreo de los pozos mecánicos, esto con el fin de dar un adecuado seguimiento durante su etapa de operación y, de esta forma, detectar de manera oportuna el momento de intervención en cada pozo de una manera planificada, sin que esta afecte el servicio de abastecimiento de agua a la población.
4. Considerar para los nuevos proyectos, la adecuada planificación de un plan de mantenimiento preventivo y, de esta forma, asegurar el buen funcionamiento de los nuevos pozos. Adicional, para los proyectos existentes considerar la aplicación de un mantenimiento preventivo o

correctivo (según sea el caso), para prevenir que se ocasione el colapso de las estructuras.

5. Intervenir en los pozos considerados como críticos (mayor variación de parámetros actuales vs. registros históricos) y, de esta manera, prevenir el colapso de dichos sistemas. Para el presente informe, según el análisis de los parámetros de niveles de agua y caudal de extracción, se recomienda intervenir en los pozos críticos, los cuales son los pozos P-7 y P-10.
6. Considerar la propuesta de mantenimiento preventivo de pozos, como parte del presupuesto de inversión en los proyectos de agua y saneamiento.

REFERENCIAS

1. Barrientos, I. (2016). *ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS VOLCÁNICOS DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA*. Guatemala.
2. Bolaños, L. (30 de Abril de 2020). *Hidroambiente*. Recuperado de <https://www.hidroambientecr.com/notas/metodos-de-perforacion>.
3. Cabrera, M. (2005). *Agua Subterránea y ambiente*. Argentina.
4. Centro Europeo de Postgrado (s.f.). Recuperado de <https://www.ceupe.com/blog/contaminacion-de-suelos-y-aguas-subterraneas.html>.
5. Cid, B. (Febrero de 2016). *PLANIFICACION Y PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA REHABILITACION DE POZO MECÁNICO UTILIZADO EN EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA*. Guatemala, Guatemala.
6. COGUANOR. (S.f.). *NTG 29006 Agua para consumo humano (agua potable). Recolección, preservación, transporte y almacenamiento de muestras. Generalidades*. Guatemala.
7. Contreras, M. (Octubre de 2014). *ESTUDIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONA 13 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA*. Guatemala, Guatemala.

8. Cruz, A. (2015). *ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN INTRÍNSECA DE ACUÍFEROS CÁRSTICOS, POR MEDIO DEL MÉTODO EPIK, EN EL MUNICIPIO DE SANTA CRUZ VERAPAZ, A.V.* Cobán, Alta Verapáz.
9. Custodio, E. (1996). *Explotación racional de las aguas subterráneas.* Barcelona.
10. Donado, L. (Noviembre de 1999). Hidráulica de Pozos. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/269112987_Hidraulica_de_Pozos.
11. González, F. (Septiembre de 2007). *MANUAL PARA LAS OFICINAS MUNICIPALES DE PLANIFICACIÓN –OMP- Y CORPORACIONES EDILES PARA LA TOMA DE DECISIÓN EN LA SELECCIÓN DE UN POZO MECÁNICO.* Guatemala, Guatemala.
12. IGN. (S.f.). *Instituto Geográfico Nacional.* Recuperado de <https://www.ign.gob.gt/>.
13. Gramajo, H. (2015). *ANÁLISIS DE LOS NIVELES ESTÁTICOS E HIDROQUÍMICA EN POZOS MECÁNICOS, PARTE BAJA DE LA SUBCUENCA COLOJATE, CUENCA ACOMÉ, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS EN EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA INGENIO MAGDALENA, GUATEMALA.* C.A. Guatemala.

14. INSIVUMEH. (S.f.). *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH-*. Recuperado de http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios_de_guatemala.html.
15. López, G. (2014). *ESTUDIO DE LOS NIVELES FRÁTICOS DEL ÁREA NORTE Y ESTE DE LA CIUDAD CAPITAL*. Guatemala.
16. Mantilla, I. (2011). *Alternativas tecnológicas. Agua y saneamiento para la zonal rural*. Paraguay.
17. Martínez, M. & López, A. (1984). *Pozos y acuíferos*.
18. Minas, D. (2009). *Agua subterránea*. Sonora, México.
19. Municipalidad de Mixco. (2020). *Plan de desarrollo territorial con enfoque territorial 2032*. Guatemala.
20. Molina, S., Telléz, J. & Paya, H. (2017). *Rediseño y ampliación del Sistema de agua potable en la comunidad San Pedro de Los Molinas, municipio de San Marcos Carazo*. Managua, Nicaragua.
21. Navarrete, E. (Noviembre de 2017). *ResearchGate*. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-814-Tipos-de-Acuiferos-y-Pozos-Figura-tomada-de-INTERNET_fig95_321159458.
22. Ordoñez, J. (2011). *Aguas subterráneas - Acuíferos*. Lima, Perú.

23. Quintanilla, E., Alvarado, G. & Mendoza, C. (2008). *SemanticScholar*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/papes/ESTRATIGRAF%C3%8DA-DE-POZOS-COMO-UN-APORTE-AL-DE-LA-DEL-Quintanilla-Alvarado/eff3c75dcdda31cc928719fa13d2f7d8bc5d4f87>.
24. Saneamiento, E. (S.f.). *Hidrogeología*.
25. Sumalé, J. (2012). *Sostenibilidad financiera en el uso de pozos mecánicos de agua potable en aldeas y colonias del municipio de Mixco*. Guatemala.

