



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

***“MODELO DE SIMULACIÓN - OPTIMIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE
GUADALUPE, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA”***

TESIS

*Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de DOCTOR EN
CIENCIAS presenta:*

ALEJANDRO FIGUEROA NÚÑEZ

Director de Tesis: Dr. José Rubén Campos Gaytán

ENSENADA B. C.

Junio de 2018

DEDICATORIA

A Dios.

A mi esposa, Yared Sarahí, por ser mi principal apoyo y hacer todo mucho más sencillo.

A mi hija Zoe, mi mayor inspiración.

A mi familia, mis padres y hermanos por ser un pilar fundamental en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por la beca otorgada.

A mi director, Dr. José Rubén Campos Gaytán por su gran apoyo y confianza, al Dr. Tracy Nishikawa, Dr. Jorge Ramírez, Dr. Thomas Kretzschmar y Dr. Felipe Correa por su valioso aporte, comentarios, sugerencias, constantes revisiones y gran disponibilidad, sin los cuales no lo hubiera logrado.

Al Ing. Jezrael Lafarga, de COTAS Guadalupe, por la atención y toda la información brindada para la realización de esta tesis. Al Dr. Rogelio Vázquez por las visitas en campo y compartir su conocimiento.

A la CESPE y CONAGUA por la información proporcionada.

Al departamento de coordinación de posgrado de esta facultad y al Dr. Álvaro López por la orientación y apoyo durante este proceso.

En especial a mis familias Figueroa-Villalobos, Núñez-Mendoza, Gutiérrez-Núñez y De La Cerda-González por el enorme e incondicional apoyo, gracias por todo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

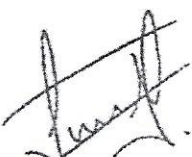
MODELO DE SIMULACIÓN - OPTIMIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL
VALLE DE GUADALUPE, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

TESIS

Que para obtener el grado de doctor en ciencias presenta:

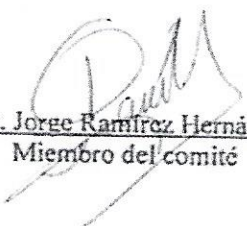
Alejandro Figueroa Núñez

Aprobada por:


José Rubén Campos Gaytán
Director de tesis


Dr. Tracy Nishikawa
Co-Director de tesis

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Miembro del comité


Dr. Jorge Ramírez Hernández
Miembro del comité


Dr. Felipe Correa Díaz
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Junio 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

MODELO DE SIMULACIÓN - OPTIMIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL
VALLE DE GUADALUPE, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

TESIS

Que para obtener el grado de doctor en ciencias presenta:

Alejandro Figueroa Núñez

Aprobada por:



José Rubén Campos Gaytán
Director de tesis



Dr. Tracy Nishikawa
Co-Director de tesis



Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Miembro del comité

Dr. Jorge Ramírez Hernández
Miembro del comité

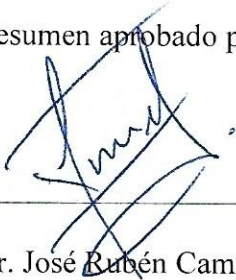
Dr. Felipe Correa Díaz
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Junio 2018

Resumen de la tesis de **Alejandro Figueroa Núñez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **DOCTOR EN CIENCIAS** del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, junio del 2018.

***MODELO DE SIMULACIÓN - OPTIMIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE
GUADALUPE, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA***

Resumen aprobado por:



Dr. José Rubén Campos Gaytán

Director de Tesis

En el presente trabajo se desarrolla un modelo de simulación - optimización para el acuífero Guadalupe, en Ensenada, Baja California, México, con el cual se simula el comportamiento del agua dentro del acuífero y se implementa un modelo de optimización que se utiliza para determinar el volumen óptimo de agua necesario de cada una de las diferentes fuentes de abastecimiento, naturales y por recarga artificial con agua proveniente de plantas de tratamiento, bajo distintos escenarios. Con los resultados de esta investigación y la aplicación de los mismos, se pretende lograr el beneficio directo para la comunidad local del Valle de Guadalupe, así como para la ciudad de Ensenada.

Palabras clave: Acuífero Guadalupe, flujo de agua subterránea, simulación - optimización, MODFLOW, GWM-VI.

Contenido

PÁGINA

I. INTRODUCCIÓN.....	8
I.1. Planteamiento del problema.....	8
I.2. Descripción de la zona de estudio	9
II. ANTECEDENTES	11
II.1. Estado del arte.....	12
II.2. Objetivos	14
II.2.1. Objetivo general.....	14
II.2.2. Objetivos particulares	15
III.- METODOLOGÍA.....	15
III.1. Modelo de la subcuenca del Valle de Guadalupe.....	15
III.1.1. Dominio de flujo	16
III.1.2. Topografía del terreno	17
III.1.3. Basamento impermeable	18
III.1.4. Conductividad hidráulica	19
III.1.5. Precipitación	21
III.1.6. Recarga del modelo	23
III.1.7. Carga constante	24
III.1.8. Evapotranspiración	24
IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN (nivel freático calculado).....	25
IV.1. Condición Estacionaria	25
IV.1.1. Ecuación de Balance	29
IV.2. Condición Transitoria.....	30
IV.2.1. Ecuación de balance	35
V. MODELO DE OPTIMIZACIÓN	38
V.1. Función Objetivo	39
V.2. Restricciones	40
V.3. Descripción del proceso de solución del modelo de optimización	41
V.4. Caso de estudio sintético	44
V.5. Modelo de optimización en Acuífero Guadalupe	52

V.5.1. Escenario Optimista.....	52
V.5.2. Escenario Pesimista	52
V.5.3. Escenario actual (Statu Quo)	53
V.5.4. Escenario de recarga adicional	53
V.6. Variables del modelo de optimización	54
VI. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS OPTIMIZADOS	61
VI.1. Escenario 1: Escenario optimista, recarga natural de 31.1 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.1 Mm³/año, y restricción de carga normal.....	61
VI.2. Escenario 2: Escenario optimista, recarga natural de 31.1 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.1 Mm³/año, y restricción de carga sustentable.	68
VI.3. Escenario 3: Escenario pesimista, recarga natural de 26.51 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.17 Mm³/año y; restricción de carga normal.....	71
VI.4. Escenario 4: Escenario pesimista, recarga natural de 26.51 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.17 Mm³/año, y restricción de carga sustentable.	76
VI.5. Escenario 5: Escenario Statu Quo, recarga natural de 26.51 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 20.63 Mm³/año, y restricción de carga normal.....	79
VI.6. Escenario 6: Escenario de recarga adicional, recarga natural de 26.51 Mm³/año + 31.54 Mm³/año de recarga adicional de agua tratada, descarga de pozos actuales de 20.63 Mm³/año, y restricción de carga normal.....	83
VII. DISCUSIÓN.....	85
VIII. CONCLUSIONES	87
IX. BIBLIOGRAFÍA	90
APÉNDICE A	93
APÉNDICE B	105
APÉNDICE C	108
APÉNDICE D.....	113
APÉNDICE E	116
APÉNDICE F	121
APÉNDICE G.....	124
APÉNDICE H.....	129
APÉNDICE I	132
APÉNDICE J.....	137
APÉNDICE K.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Localización de acuíferos en la Cuenca Guadalupe. Las líneas en amarillo, rojo y verde indican el límite de cada acuífero y la línea en azul el límite de la cuenca (CONAGUA, 2015).....	10
Figura 2.- Configuración de la Cuenca Guadalupe, la línea negra representa el límite de la cuenca.	11
Figura 3.- Cuadrícula para el modelo del AG en ModelMuse. La frontera sur-oeste representa la zona de salida de la subcuenca hacia La Misión. El cambio de una celda activa a una inactiva representa una frontera de flujo nulo. Ubicación de las delegaciones municipales de El Porvenir y Francisco Zarco dentro del modelo desarrollado.....	17
Figura 4.- Topografía del terreno natural utilizada para el modelo del AG en ModelMuse.	18
Figura 5.- Datos de elevación (en metros sobre el nivel del mar) que representan la topografía del basamento impermeable del modelo del AG.....	19
Figura 6.- Conductividad hidráulica de los materiales que componen el AG, considerada durante las simulaciones realizadas con MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011) en ModelMuse.	20
Figura 7.- Precipitación media anual (mm) durante el periodo 1977-2016. Información para 1977-2007 de Campos-Gaytán (2008), 2008-2012 de Herrera et al. (2017) y 2013-2016 de la SEFOA (2017). Promedio 1977-2016 y 2007-2016, ambos utilizados en el modelo.....	22
Figura 8.- Esquema de comportamiento de la precipitación media mensual (Campos-Gaytán, 2008), considerada en la simulación del flujo de agua subterránea	22
Figura 9.- Distribución de la recarga por el frente de montaña considerada durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG	24
Figura 10.- Tasa de pérdidas por evapotranspiración y ubicación de pozos de observación para fines de calibración, consideradas durante la simulación del agua subterránea en el AG.....	25
Figura 11.- Comparación de las elevaciones del nivel freático calculado y observado en el AG en condiciones estacionarias (febrero 1984).....	27
Figura 12.- Diagrama de dispersión de las elevaciones del nivel freático observado vs simulado.....	28
Figura 13.- Volúmenes totales para las variables que integran la ecuación de balance durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG en estado estacionario	30
Figura 14.- Configuración del nivel freático calculado para el AG en estado transitorio para diciembre 2016, simulación en el ModelMuse	33

Figura 15.- Niveles freáticos observado vs calculado, para la condición transitoria (febrero 1984-diciembre 2016).....	34
Figura 16.- Volúmenes totales para las variables que integran la ecuación de balance durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG en estado transitorio	35
Figura 17.- Niveles freáticos calculado y observado en condición transitoria, correspondientes a diciembre de 2016.....	36
Figura 18.- Hidrogramas de pozos de observación ubicados en el AG.....	37
Figura 19.- Diagrama de flujo esquemático del GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013).....	44
Figura 20.- Caso de estudio sintético considerado para la simulación del flujo de agua subterránea con MODFLOW (mediante el empleo de ModelMuse) y la optimización con GWM-VI.	45
Figura 21.- Elevaciones del nivel freático calculadas para el último periodo de simulación, considerando el modelo del caso de estudio sintético.....	46
Figura 22.- Ubicación de los pozos incluidos en el escenario de optimización para el modelo del caso de estudio sintético.....	47
Figura 23.- Elevaciones del nivel freático calculadas para el último periodo de simulación del caso de estudio sintético, en el cual se considera los volúmenes de extracción y recarga resultantes del proceso de optimización.	49
Figura 24.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en los pozos optimizados durante el periodo 1-6 para el caso de estudio sintético: A) Pozo de extracción optimizado Pozo_1_EXT y B) Pozo de recarga optimizado Recarga_1.	50
Figura 25.- Gastos de extracción y recarga resultante para los pozos optimizados durante el periodo 1-6 considerando el caso de estudio sintético: A) Pozos de extracción (Pozo_1_Ext hasta Pozo_1_Ext 6), y B) Pozo de recarga Recarga_1).	51
Figura 26.- Ubicación de pozos de extracción y recarga propuestos para el modelo de optimización.....	54
Figura 27.- Comportamiento mensual de extracción de los pozos agrícolas (Campos-Gaytán, 2008).....	55
Figura 28.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en los pozos optimizados durante el periodo 2017-2035 para el escenario 1: A) Pozo de extracción optimizado HPa, y B) Pozo de recarga optimizado HPh.	64
Figura 29.- Gastos de extracción y recarga resultante para los pozos optimizados durante el periodo 2017-2035 considerando el escenario 1: A) Pozo de extracción QPa, y B) Pozo de recarga QPh.	65
Figura 30.- A) Elevaciones del nivel freático calculadas para diciembre de 2035. La cual, ha sido evaluada considerando únicamente la simulación del flujo de agua subterránea en el AG con una condición optimista del comportamiento en el acuífero, pero sin incluir el proceso de optimización, y B) Diferencia entre las elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y aquellas que	

resultaron del proceso de simulación-optimización considerando el escenario 1 para diciembre de 2035.....	67
Figura 31.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en el pozo “d” (QPd) para el escenario 2.	69
Figura 32.- Gastos de extracción para el pozo “d” (QPd) durante el escenario 2.	70
Figura 33.- Diferencia del nivel freático entre enero de 2017 y diciembre de 2035 aplicando el modelo de optimización (escenario 2).....	71
Figura 34.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en el pozo “d” (HPd) para el escenario 3.	73
Figura 35.- Gastos de extracción para el pozo “d” (QPd) durante el escenario 3.	73
Figura 36.- A) Elevación del nivel freático calculado para diciembre de 2035, considerando la ocurrencia de una condición pesimista en el acuífero y sin incluir el proceso de optimización. B) Diferencia de las elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y aquellas que resultaron del proceso simulación-optimización para diciembre de 2035 considerando el escenario 3.	75
Figura 37.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en el pozo “j” (HPj) para el escenario 4.	77
Figura 38.- Gastos de extracción para el pozo “j” (QPj) durante el escenario 4.....	78
Figura 39.- Diferencia de las elevaciones del nivel freático calculadas para enero de 2017 y aquellas obtenidas del proceso simulación-optimización para diciembre de 2035 considerando las condiciones del escenario 4.....	79
Figura 40.- Comportamiento del nivel freático en el pozo “n” (HPn) para el escenario 5.....	81
Figura 41.- Gastos de extracción para el pozo “n” (QPn) durante el escenario 5.	81
Figura 42.- Diferencia de las elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y diciembre de 2035 aplicando el modelo de optimización a las condiciones del escenario 5.	82
Figura 43.- Zona considerada para la recarga adicional de 1,000 l/s, elevación del terreno natural y curvas de elevación del nivel freático simulado para diciembre 2020 (escenario 6).....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla I.- Área de las subcuencas que forman la Cuenca Guadalupe (Fuente: Campos-Gaytán, 2008).	11
Tabla II.- Datos de extracción y recarga de los acuíferos con sobreexplotación que suministran agua a la ciudad de Ensenada.	12
Tabla III.- Características de la cuadrícula que comprende el dominio de flujo en la subcuenca Valle de Guadalupe.	16
Tabla IV.- Obras de extracción con observaciones del nivel freático en febrero de 1984 (CONAGUA, 1998).	26
Tabla V.- Estadísticos de resultados (con base en las elevaciones del nivel freático observado vs calculado).	28
Tabla VI.- Resultados de las variables de la ecuación de balance para la condición estacionaria (febrero de 1984)	29
Tabla VII.- Gasto promedio de extracción para las obras que intervienen en la simulación del estado transitorio	31
Tabla VIII.- Fechas con observaciones del nivel freático en las obras hidráulicas del AG consideradas para la calibración del modelo	33
Tabla IX.- Información del modelo, caso de estudio sintético.	45
Tabla X.- Volúmenes de extracción y recarga correspondientes a la solución óptima del caso de estudio sintético [En m³].	48
Tabla XI.- Gasto considerado para recarga por fuente	57
Tabla XII.- Volumen mensual máximo por pozo de optimización.	58
Tabla XIII.- Elevación del nivel freático resultante permitido en cada pozo donde se establece una restricción de carga hidráulica para la restricción normal.	59
Tabla XIV.- Elevaciones del nivel freático definidas para cada pozo donde se ha fijado una restricción de carga hidráulica para la restricción sustentable.	60
Tabla XV.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 1 con restricción de carga normal.	62
Tabla XVI.- Comparativa de extracciones y recarga aplicando el modelo de simulación-optimización (m³).	63
Tabla XVII.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 1 con restricción de carga sustentable.	68
Tabla XVIII.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 3 con restricción de carga normal.	72
Tabla XIX.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 4 con restricción de carga sustentable.	76
Tabla XX.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 5 con restricción de carga normal.	80

I. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Ensenada, Baja California, México, presenta una problemática con el abasto de agua potable, el cual en su gran mayoría se suministra de fuentes subterráneas. Entre las principales causas, de este problema, se encuentran la sobreexplotación de los acuíferos, la intrusión salina, la falta de lluvia y la falta de reutilización del agua residual tratada. Todo lo anterior ha generado que hoy en día colonias enteras pasen días sin agua, además del abasto en la ciudad por tandeo.

Una de las opciones para combatir este desabasto es el uso integral del agua, que permita aprovechar de manera conjunta el agua de lluvia, la que se infiltra a los acuíferos, la de reuso y la que escurre o se almacena de manera superficial. Este trabajo presenta una forma de realizar dichas actividades, mediante la propuesta de recarga artificial y, con distintos escenarios, estimar los resultados en el caso de que se lleven a cabo estas acciones.

I.1. Planteamiento del problema

El estado de Baja California se ubica en la Región Hidrológico-Administrativa (RHA) con el promedio de lluvias más bajo a nivel nacional, 169.0 mm anuales (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2011); aunado a esto, en la entidad no se aprovecha el agua recolectada en el drenaje pluvial construido y en los arroyos de la región.

En 2017, la Comisión Estatal del Agua (CEA, 2017) reportó que Ensenada obtiene el 79% del agua que utiliza de fuentes subterráneas, lo cual limita la disponibilidad del líquido, en gran escala, a un solo factor: las precipitaciones. Se sabe que el agua que logra infiltrarse al subsuelo se acumula en los acuíferos y, posteriormente, se extrae; sin embargo, según lo publicado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2013), los acuíferos de la zona presentan como problemática la sobre-explotación. Entre los acuíferos que abastecen a la ciudad de Ensenada se encuentran Guadalupe, La Misión, Ensenada y Maneadero; este último, presenta también intrusión salina.

Por otra parte, el gobierno invierte en el tratamiento del 100% de las aguas residuales, lo cual representa sólo el primer paso para un aprovechamiento sustentable del agua, el siguiente debe ser el reuso directo de ésta.

Actualmente, se han manejado distintas opciones para combatir el desabasto de agua potable en la ciudad, entre las cuales se encuentran: la construcción de una línea de conducción de agua potable desde Mexicali a Ensenada, esto, para obtener agua del Río Colorado; la construcción de una planta desaladora

(la cual se encuentra en proceso de construcción); la recarga artificial de acuíferos, y el reuso de aguas tratadas.

Entre los problemas que afectan al Acuífero Guadalupe (AG) se tiene una sobre-explotación de 12.04 Millones de metros cúbicos al año ($\text{Mm}^3/\text{año} = \text{hm}^3/\text{año}$) (SEMARNAT, 2013); la cual, ha afectado directamente el volumen de agua disponible en él. A últimas fechas, el problema del poco volumen de agua para satisfacer la demanda se ha hecho obvio para toda la comunidad de la ciudad de Ensenada, esto, como consecuencia de la disminución de las extracciones que la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) realiza de los pozos que se ubican en el AG. Las cuales, representaban el 25% del total de la demanda en 2011 (CEA, 2012); mientras que, en 2017, se ha dejado de extraer en su totalidad agua del acuífero para suministro de la ciudad (CEA, 2017).

En el presente trabajo se desarrolla un MODELO DE SIMULACIÓN - OPTIMIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, con el cual se simulará el comportamiento del agua dentro del acuífero, bajo distintos escenarios y se diseñará e implementará un modelo de optimización que se utilizará para determinar el volumen óptimo de agua necesario de cada una de las diferentes fuentes de abastecimiento, naturales y artificiales. Con los resultados de esta investigación y la aplicación de los mismos, se pretende lograr el beneficio directo para la comunidad local del Valle de Guadalupe, así como para la ciudad de Ensenada. Esta propuesta, podría utilizarse como modelo base para el aprovechamiento sustentable de los diferentes acuíferos que suministran agua a la ciudad de Ensenada.

1.2. Descripción de la zona de estudio

El presente trabajo comprende el estudio del acuífero que se localiza en la subcuenca del Valle de Guadalupe, ubicada dentro de la Cuenca Guadalupe. En la Figura 1 se muestra la localización de los acuíferos que componen la cuenca antes mencionada, según lo proporcionado por la CONAGUA (2015).

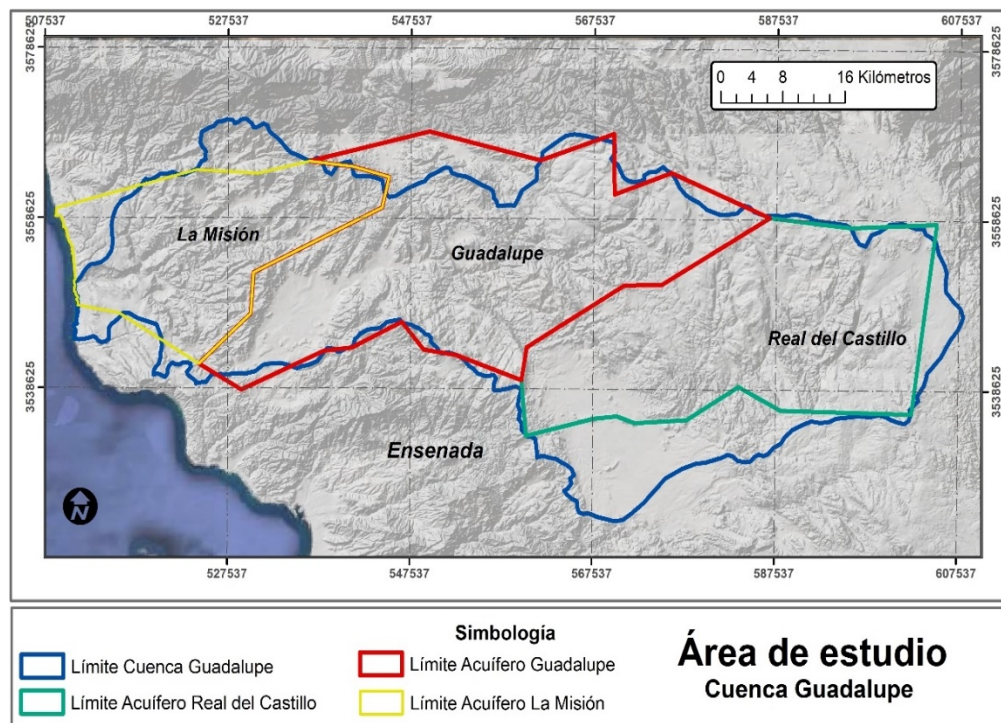


Figura 1.- Localización de acuíferos en la Cuenca Guadalupe. Las líneas en amarillo, rojo y verde indican el límite de cada acuífero y la línea en azul el límite de la cuenca (CONAGUA, 2015)

La Cuenca Guadalupe (Figura 2) se ubica a 37 km de la ciudad de Ensenada, entre los paralelos $31^{\circ}51'$ y $32^{\circ}15'$ de latitud norte y meridianos $115^{\circ}52'$ y $116^{\circ}51'$ de longitud oeste, y se puede subdividir para su estudio en las subcuencas Ojos Negros, Guadalupe y La Misión (Campos-Gaytán, 2008). El área de cada subcuenca se indica en la Tabla I.

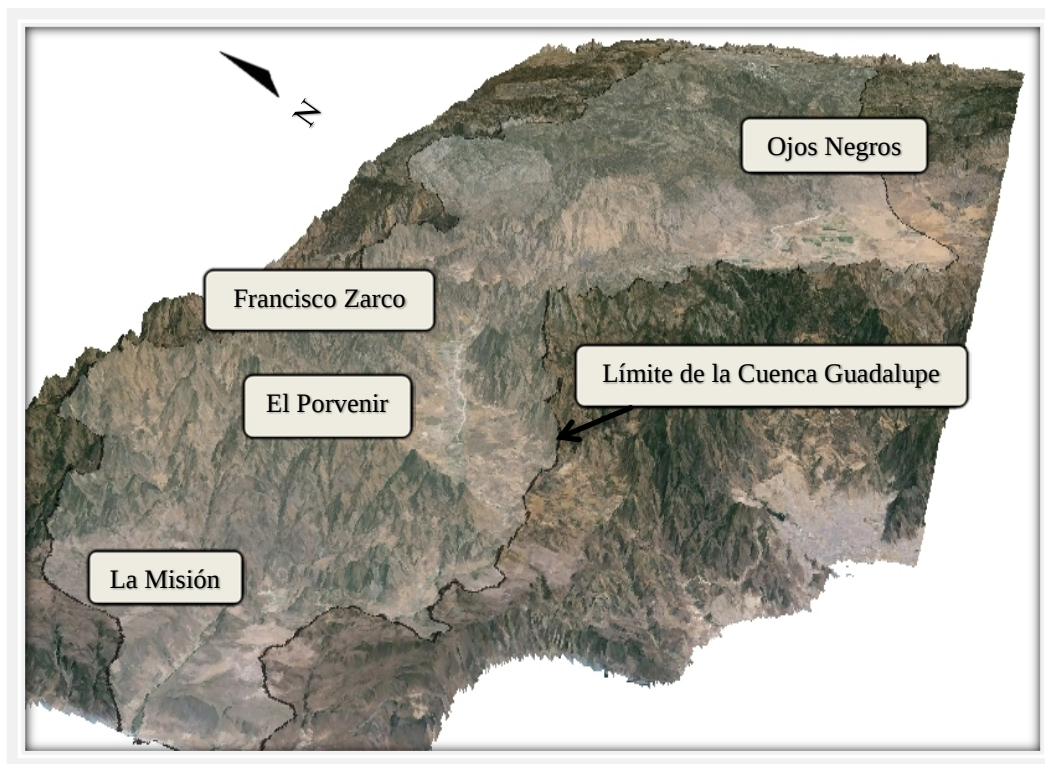


Figura 2.- Configuración de la Cuenca Guadalupe, la línea negra representa el límite de la cuenca.

Tabla I.- Área de las subcuencas que forman la Cuenca Guadalupe (Fuente: Campos-Gaytán, 2008)

Subcuenca	Área (km ²)
Ojos Negros	1,094
Guadalupe	836
La Misión	455
Cuenca Guadalupe	~2,400

II. ANTECEDENTES

La sobre-explotación de 12.04 Mm³/año que afecta al AG (SEMARNAT, 2013), ha afectado directamente el volumen de agua disponible en el acuífero. De manera similar, este tipo de problema tiene afectación a otros acuíferos que suministran agua a la ciudad de Ensenada (Tabla II).

Tabla II.- Datos de extracción y recarga de los acuíferos con sobreexplotación que suministran agua a la ciudad de Ensenada.

A	B	C	D	E	F
		Mm ³ /año = hm ³ /año			
206	La Misión	6.50	1.00	7.58	-2.08
207	Guadalupe	26.40	1.40	37.04	-12.04
211	Ensenada	3.70	0.00	10.33	-6.63
212	Maneadero	20.8	0.00	38.47	-17.67

A= clave del acuífero; B= nombre del acuífero; C= recarga media anual; D= descarga natural comprometida; E= volumen concesionado de agua subterránea; F= déficit (sobreexplotación).

Fuente: Diario Oficial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (20 de diciembre de 2013).

El problema de sobre-explotación que afecta a los acuíferos de la región, es uno de los principales motivos por los cuales se ha generado el interés para el desarrollo del trabajo de investigación en esta zona.

II.1. Estado del arte

Hasta el día de hoy, se han realizado diversos trabajos de investigación que indican que las opciones, en general, económicamente factibles para la ciudad de Ensenada son las que incluyen el reuso de las aguas tratadas, tal como el realizado por Waller *et al.* (2009). Sin embargo, estos no especifican la manera de reutilizarlas, es decir, no se describe el tipo de obra de ingeniería necesaria para su reuso, recarga o conducción, ni el volumen de extracción o recarga de cada fuente disponible. Este tipo de interrogantes son las que se pretende resolver con la realización de esta investigación.

Por otra parte, en México, con respecto a la modelación matemática como herramienta de optimización en el uso y manejo del agua, se ha desarrollado con diferentes objetivos. Un ejemplo de esto es el realizado por Chávez (1992), el cual permite conocer un volumen de extracción óptimo con el objetivo de combatir el abatimiento de los pozos ubicados dentro de un acuífero que abastecía a una planta termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad. Dicho modelo permite obtener diferentes escenarios de abatimiento y opciones de abastecimiento con la combinación de los pozos que ahí se ubican.

Otra finalidad para la cual se puede desarrollar un modelo de simulación-optimización, puede ser la calidad del agua que se requiere para satisfacer determinada necesidad. Arreguín y Alcocer (2004) presentaron un modelo que tiene como función objetivo minimizar la cantidad de agua de primer uso (pozos, manantiales y/o norias), la cual se suministraba a las diferentes actividades desarrolladas en la

ciudad de Cuernavaca. En este caso de estudio, dicho tipo de agua se combinaba con aguas tratadas, por lo cual se propuso la construcción de nuevas plantas de tratamiento. Con el modelo se determinó la distribución óptima de agua de primer uso y tratada, con base en la calidad que requiere cada sector de la población industrial, agrícola y doméstico.

Internacionalmente, los modelos de simulación-optimización son ampliamente utilizados; por ejemplo, el desarrollado por Nishikawa (1998), con la finalidad de manejar de manera óptima el agua suministrada a la ciudad de Santa Barbara, CA, USA. En dicha investigación se implementó un modelo de optimización (similar al que se plantea y propone en el trabajo que aquí se desarrolla), en el cual se consideró como objetivo minimizar el costo del suministro de agua, tomando en cuenta el volumen máximo de agua que se puede obtener de cada fuente de abastecimiento, niveles mínimos de agua dentro del acuífero (para evitar intrusión salina o sobreexplotación), y la demanda de agua de la ciudad durante un periodo de 5 años (esto último para evitar el desabasto en caso de alguna sequía).

Las diferencias entre el modelo desarrollado en esta investigación y los elaborados previamente por otros autores se comentan a continuación. En el estudio desarrollado por Waller et al. (2009) se evaluaron combinaciones de fuentes de abastecimiento (sobreexplotación, reuso, desalación o un acueducto por construir) disponibles en la ciudad de Ensenada, para satisfacer la demanda tanto de la ciudad como de dos zonas agrícolas (el Valle de Guadalupe y Maneadero), de manera que representara el menor importe económico posible, incluyendo el menor costo por escasez. No obstante, el análisis de optimización elaborado por los autores fue de forma general, por lo que no se describe las combinaciones entre las diferentes fuentes de abastecimiento ni se toma en cuenta la evolución del volumen disponible en las fuentes a través de los periodos de tiempo. Respecto al segundo modelo (Chávez, 1992), en él se utiliza una demanda mensual promedio (constante a lo largo de todo el año), a diferencia de la demanda por temporada utilizada en el presente modelo (es decir, la demanda varía con respecto a la temporada del año de acuerdo con la tasa de extracción realizada por los pozos agrícolas existentes); además, de no incluir posibles variantes en los valores de recarga (disminución de precipitaciones), o incluir recarga artificial. En el tercer modelo (Arreguin y Alcocer, 2004), interviene el factor calidad del agua con base en la necesidad de diversos destinatarios, mientras que, en nuestro caso, el suministro debe cumplir con una sola calidad requerida e incluir factores tales como satisfacer la demanda mensual de agua, manejar como opción la recarga artificial del acuífero y establecer límites sustentables, en algunos de los escenarios. En comparativa con el caso del cuarto modelo (Nishikawa, 1998), en este trabajo se considera dentro de las opciones, la posible inclusión de nuevas fuentes de abastecimiento (pozos) y recarga

artificial. Lo cual requiere de la inclusión de otros parámetros al tipo de modelo que presenta, por ejemplo, los referentes en la capacidad de las bombas en las estaciones de recarga y ubicaciones probables para estos.

Respecto a los trabajos de simulación del flujo de agua subterránea que se han elaborado para el AG, se puede mencionar el desarrollado por Campos-Gaytán et al. (2014). Con base en lo publicado por Campos-Gaytán y Kretzschmar (2006), Campos-Gaytán et al. (2014) publicaron un modelo de simulación al cual realizaron modificaciones, principalmente, en lo referente a las salidas de agua del acuífero, cambiando fracturas por evapotranspiración y drenes como causante de las descargas. Lo anterior, con motivo de mejorar el ajuste entre los niveles freáticos observado en campo y simulado. Al mismo tiempo, realizaron simulaciones considerando tres distintos escenarios en el manejo del acuífero. El primero de estos, consideró la recarga por precipitaciones con una tendencia a la baja y el ritmo de extracción promedio que presentaba el acuífero; el segundo escenario, consideró las condiciones climáticas promedio, de recarga y descarga, y el tercer escenario, consideró la recarga debida a condiciones de precipitación con tendencia a la baja y extracciones que generaran una condición sustentable para el acuífero.

La parte correspondiente a la simulación del flujo de agua subterránea desarrollada en esta tesis fue realizada con base en el modelo de Campos-Gaytán et al. (2014); sin embargo, entre las diferencias más destacables encontramos el software utilizado, ya que, en esta tesis se emplea el MODFLOW-NWT (Niswonger *et al.*, 2011), basado en MODFLOW (Harbaugh, 2005), el cual es uno de los modelos numéricos más populares mundialmente para el desarrollo de este tipo de modelos en la actualidad; la inclusión de información actualizada hasta el 2016, tal como niveles freáticos observados en pozos y registro de precipitación; la discretización en celdas de menor tamaño (mejor resolución); se encuentra georreferenciado; modificaciones en valores de conductividad hidráulica, y la manera en que se recarga el acuífero, principalmente.

II.2. Objetivos

II.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es la actualización del modelo numérico del flujo de agua subterránea aplicado al AG y la integración de un modelo de optimización.

Lo anterior permitirá simular la manera en que se comporta el acuífero, considerando las condiciones

actuales en que se encuentra y opera; además, determinar una alternativa óptima de manejo del acuífero. Para eso, se analizarán diferentes escenarios, en los cuales podría llegar a utilizarse tanto las aguas de lluvia y la tratada (mediante la recarga artificial de las mismas), como la existente en el acuífero, con la finalidad de lograr el manejo sustentable del recurso hídrico.

II.2.2. Objetivos particulares

Los objetivos particulares en los cuales se basa esta investigación son:

- 1.- Determinar las características, físicas, hidrológicas y geológicas, actuales con que cuenta el AG.
- 2.- Simular numéricamente la recarga artificial del acuífero.
- 3.- Definir sitios factibles para la recarga artificial del acuífero.
- 4.- Desarrollar el modelo que permita optimizar el uso integral del agua en el AG.

III.- METODOLOGÍA

III.1. Modelo de la subcuenca del Valle de Guadalupe

Para realizar la simulación de las condiciones de flujo subterráneo antes y después de la recarga artificial se elaboró un modelo mediante el software ModelMuse, la cual es una interfaz que permite utilizar distintos softwares de simulación de flujo de agua subterránea, utilizando para este trabajo, específicamente, el MODFLOW-NWT (Niswonger *et al.*, 2011). Además, se utilizó como base el modelo del AG reportado por Campos-Gaytán *et al.* (2014), quienes lo describen de la siguiente manera: El modelo conceptual del AG corresponde a un acuífero libre de medio heterogéneo, sobre un fondo impermeable de topografía irregular, con flujo horizontal en régimen transitorio; y cuyas fronteras que limitan el dominio de flujo en todas direcciones se consideran como fronteras de flujo nulo, con excepción de una sección de la frontera sur, la cual se consideró con un nivel freático constante. El AG se alimenta por los escurrimientos de frente de montaña y por la recarga que generan las precipitaciones. Las descargas se componen del escurrimiento natural, extracciones de los pozos que se ubican en la zona y pérdidas por evapotranspiración.

III.1.1. Dominio de flujo

Para el análisis con el software que realizará las simulaciones, es necesario establecer el dominio de flujo del sistema de agua subterránea y determinar las dimensiones que MODFLOW-NWT (Niswonger *et al.*, 2011) requiere para el desarrollo del modelo. El área que se determinó como dominio de flujo en el modelo comprende una cuadrícula de 115 renglones y 180 columnas (Figura 3), dando un total de 20,700 celdas. La Tabla III muestra un resumen de las principales características de la cuadrícula que define el dominio de flujo.

Tabla III.- Características de la cuadrícula que comprende el dominio de flujo en la subcuenca Valle de Guadalupe.

Concepto	Cantidad	Unidad
Celda cuadrada (longitud por lado)	100	m
Área por cada celda	10,000	m ²
Número total de celdas	20,700	celda
Área total de la cuadrícula	207	Km ²

Un total de 5,771 celdas que integran la cuadrícula se consideran activas; es decir, con capacidad de recarga, descarga y conducción del flujo de agua subterránea.

En la Figura 3 se muestra la geometría correspondiente al modelo conceptual que se introdujo en el software ModelMuse, donde las celdas activas están marcadas en color azul, y el color gris marca el área de celdas inactivas. De igual manera se muestra el modelo georreferenciado en ArcMap y su ubicación dentro de las delegaciones municipales de Francisco Zarco y El Porvenir.

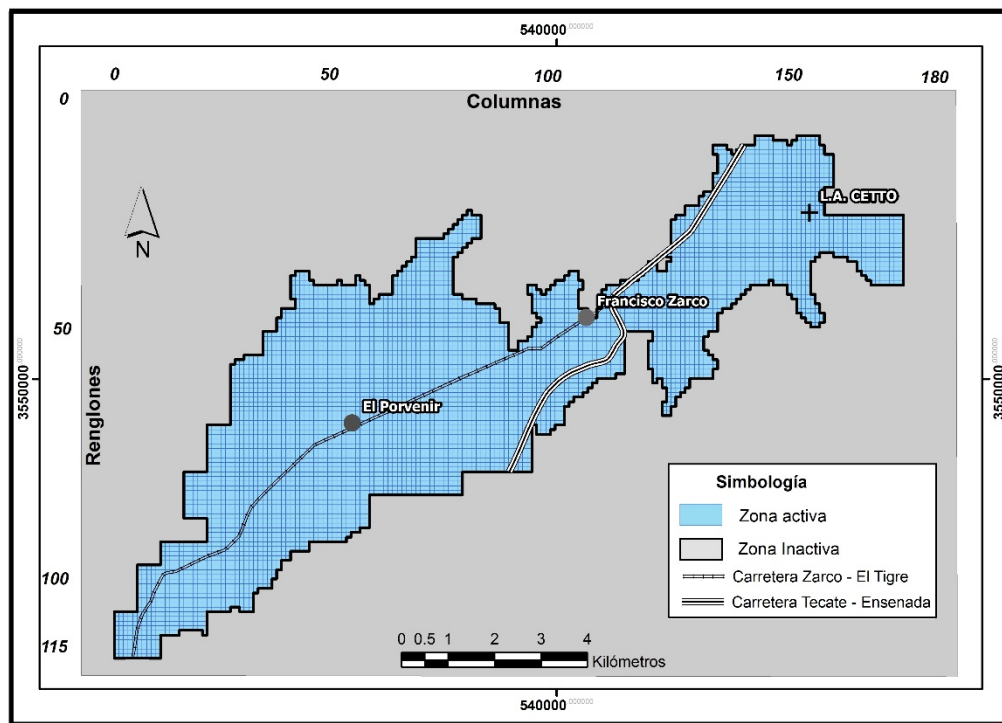


Figura 3.- Cuadrícula para el modelo del AG en ModelMuse. La frontera sur-oeste representa la zona de salida de la subcuenca hacia La Misión. El cambio de una celda activa a una inactiva representa una frontera de flujo nulo. Ubicación de las delegaciones municipales de El Porvenir y Francisco Zarco dentro del modelo desarrollado.

III.1.2. Topografía del terreno

La topografía del terreno natural que se utilizó en el modelo de simulación se obtuvo de Campos-Gaytán (2008) y se muestra en la Figura 4. Las elevaciones de la superficie topográfica del terreno, en conjunto con la información de la elevación del basamento impermeable, definen el espesor de la capa de terreno que permite el flujo del agua.

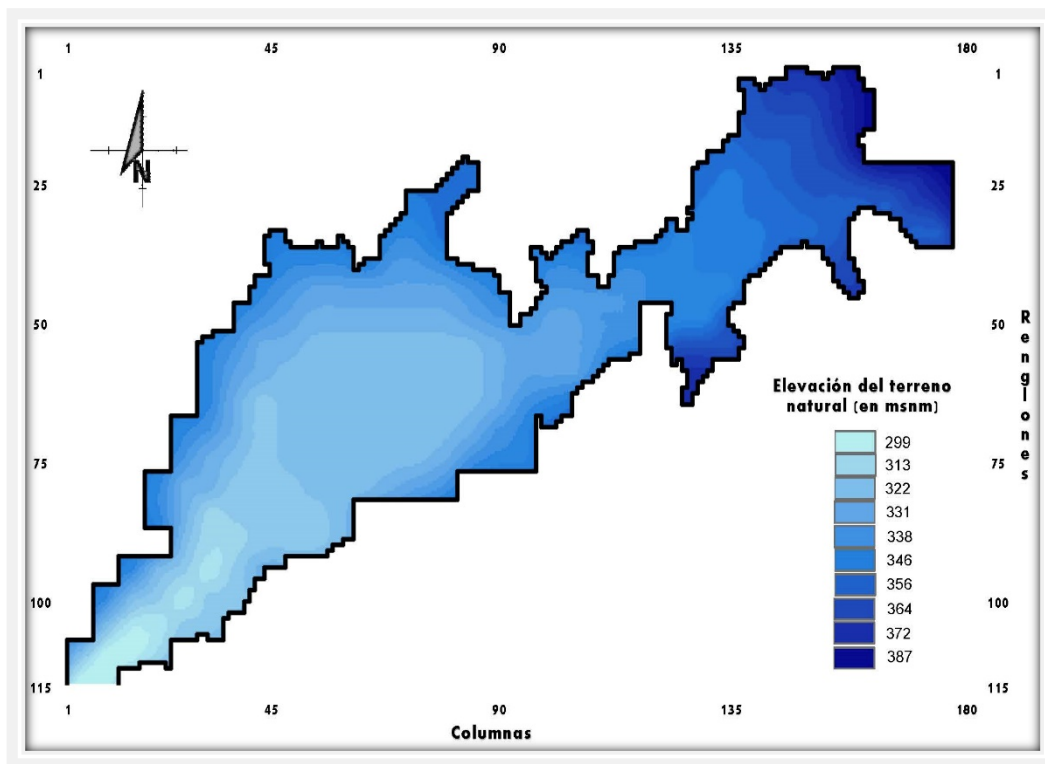


Figura 4.- Topografía del terreno natural utilizada para el modelo del AG en ModelMuse.

III.1.3. Basamento impermeable

Las elevaciones del basamento impermeable consideradas durante la simulación, corresponden a las reportadas en Campos-Gaytán *et al.* (2014). En la Figura 5 se muestra la información correspondiente al basamento impermeable; el cual, se considera como una frontera de flujo nulo.

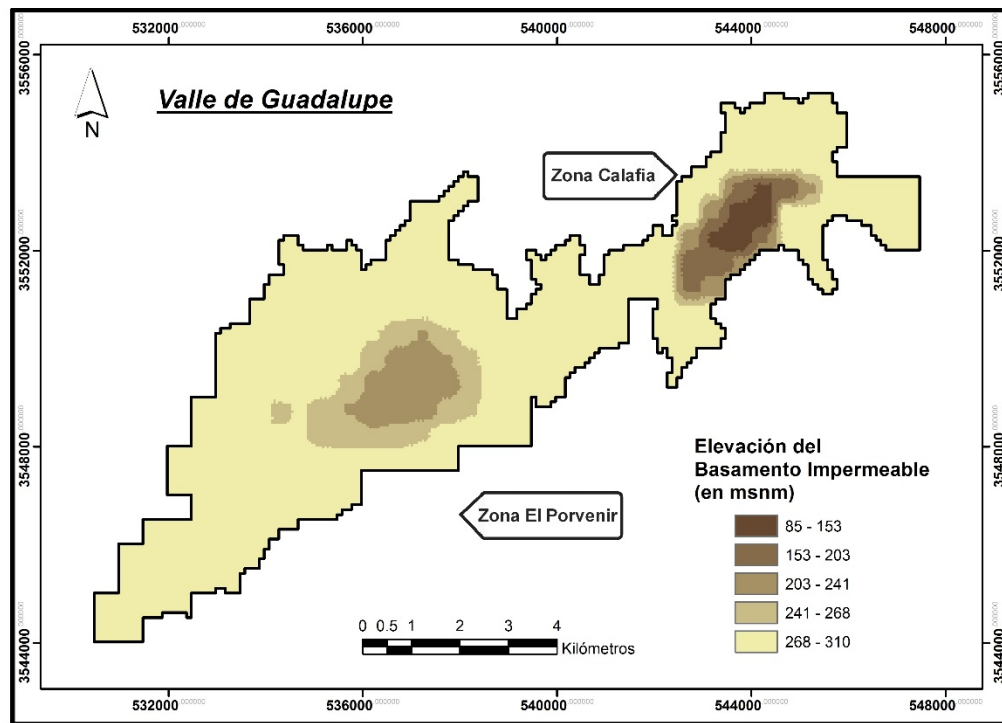


Figura 5.- Datos de elevación (en metros sobre el nivel del mar) que representan la topografía del basamento impermeable del modelo del AG

III.1.4. Conductividad hidráulica

Con base en información sobre ensayos de bombeo de la CONAGUA (Beltrán, 2001; Andrade, 1997; Andrade, 1992), columnas litológicas, y lo establecido en tablas de valores para materiales similares publicados por Anderson y Woessner (1992), Campos-Gaytán (2008) estimó los valores de la conductividad hidráulica (CH) para la zona de estudio. Los cuales, han sido considerados como valores iniciales de la CH para el AG en la etapa de calibración desarrollada en esta simulación. Sin embargo, con la finalidad de lograr un mejor ajuste entre los niveles freáticos observados y calculados, fue necesario realizar algunos ajustes a tales valores iniciales, esto, considerando el rango de valores establecido en la información disponible.

De acuerdo con la información hidrogeológica recopilada, el acuífero se puede dividir en dos zonas: La fosa El Porvenir que está situada al suroeste y la fosa Calafia al noreste del valle. El acuífero está compuesto por gravas, arenas, limos y arcillas poco consolidadas, lo que permite el flujo de agua a través de ellas y la recarga del acuífero en grandes cantidades (Campos-Gaytán, 2008). Los materiales

encontrados en el acuífero se agruparon de la siguiente manera: la roca ígnea y metamórfica integran el área inactiva del modelo y establecen el límite del acuífero, las cuales se consideran con una conductividad hidráulica de 0.00 m/día; en el área central del modelo, existe una zona formada por materiales sedimentarios con posible presencia de lentes de arcilla, a la que se le asignó un valor de 41.09 m/día; en la zona noreste del modelo (fosa Calafia) se encuentran depósitos aluviales y fluviales formados por arenas fina y gruesa, a los que se le ha asignado un valor de conductividad hidráulica de 68.49 m/día; para la zona norte de El Porvenir, se consideró un valor de conductividad de 82.19 m/día, compuesto principalmente por limos, arcillas y arenas; finalmente, un área del arroyo compuesto por arena fina, arena gruesa y grava se encuentra dentro del acuífero, al que se le asignó el valor más alto de conductividad hidráulica de 109.59 m/día.

Los valores estimados de la CH, que están entre los 0 y 40,000 m/año, se han considerado durante las simulaciones generadas con el modelo propuesto para el AG en esta investigación y analizado mediante ModelMuse (Figura 6).

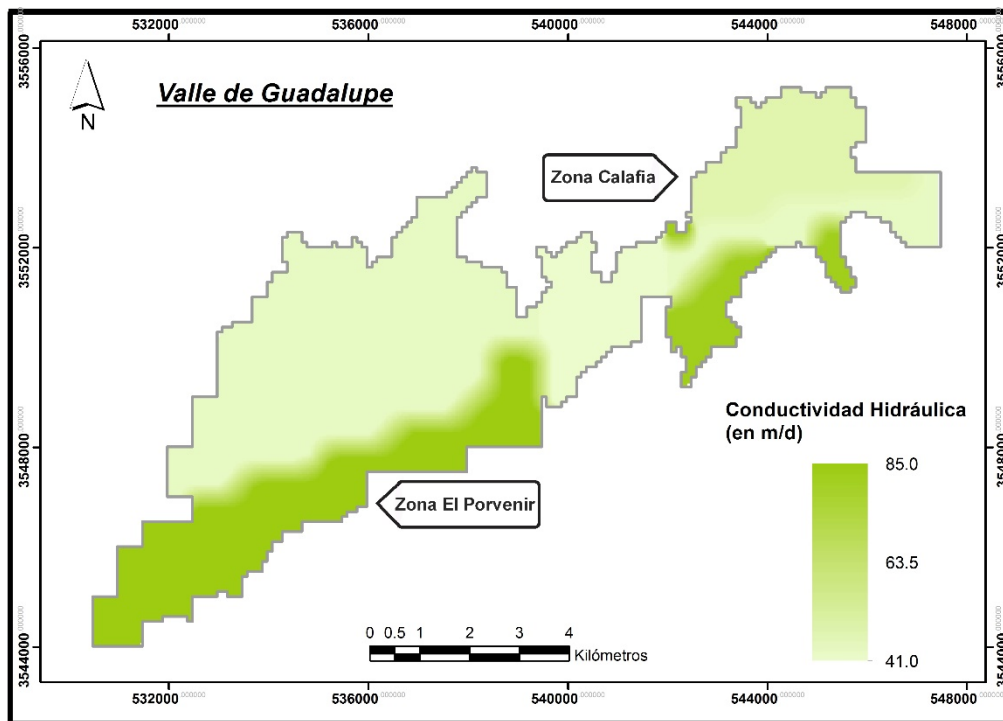


Figura 6.- Conductividad hidráulica de los materiales que componen el AG, considerada durante las simulaciones realizadas con MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011) en ModelMuse.

III.1.5. Precipitación

Durante la simulación de la condición estacionaria se ha considerado una precipitación media anual en la zona de estudio equivalente a 350 mm/año (Campos-Gaytán, 2008). Este valor se obtuvo del análisis de los datos que presentan las estaciones climatológicas de la CONAGUA, durante el periodo 1977-2007: Agua Caliente, El Porvenir, El Pinal, Ojos Negros, San Juan de Dios Norte, Olivares Mexicanos y Valle de San Rafael. En el trabajo desarrollado por Campos-Gaytán (2008) se puede observar que dichas estaciones presentan faltantes en la información de la precipitación, es decir, no cubren la totalidad del periodo antes mencionado, por lo que el autor determinó los valores faltantes.

Para la condición transitoria, la subcuenca Guadalupe cuenta con una precipitación media anual de 342 mm/año (1977-2016) como se muestra en la Figura 7. Esta fue elaborada con base en la información publicada por Campos-Gaytán (2008) y completada con la información generada por Herrera-Oliva et al. (2017) y la Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California (SEFOA, 2017). Para algunos de los escenarios proyectados (2017-2035) que se consideran en esta tesis, también se empleó un valor promedio de precipitación equivalente a 266 mm/año, el cual se estableció como el observado en el periodo de 2007 a 2016, y presenta un decremento en comparativa con el utilizado para los escenarios con la precipitación promedio de 1977-2016. El comportamiento promedio mensual de las precipitaciones en esta zona se presenta en la Figura 8.

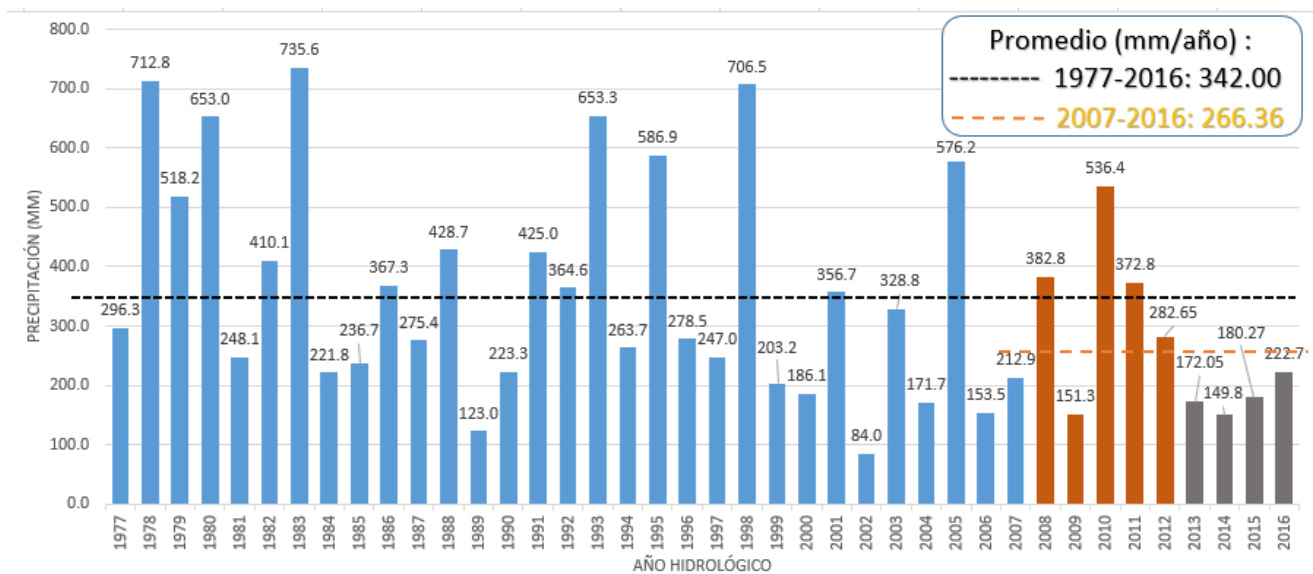


Figura 7.- Precipitación media anual (mm) durante el periodo 1977-2016. Información para 1977-2007 de Campos-Gaytán (2008), 2008-2012 de Herrera et al. (2017) y 2013-2016 de la SEFOA (2017). Promedio 1977-2016 y 2007-2016, ambos utilizados en el modelo.

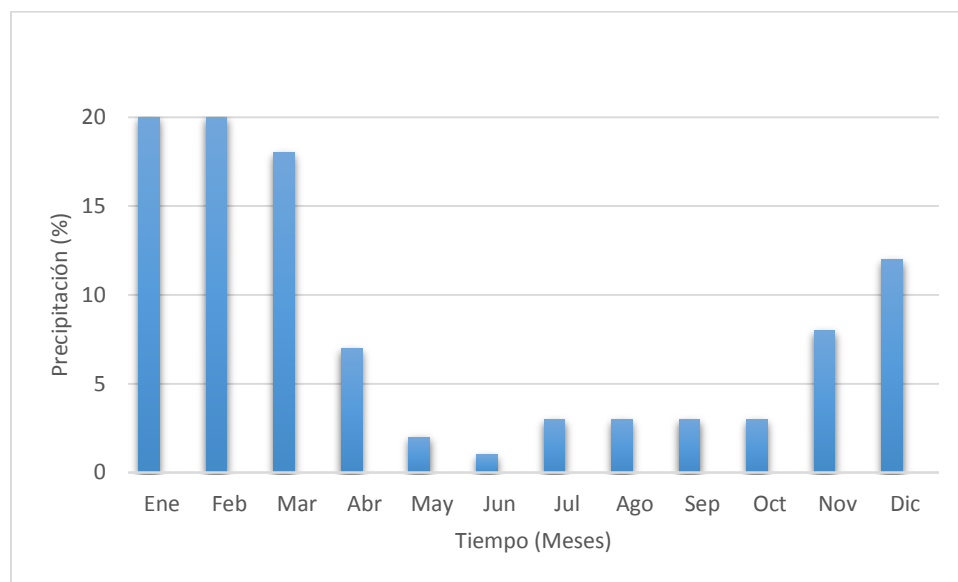


Figura 8.- Esquema de comportamiento de la precipitación media mensual (Campos-Gaytán, 2008), considerada en la simulación del flujo de agua subterránea

III.1.6. Recarga del modelo

Para el desarrollo del modelo de simulación, por concepto de recarga natural mediante la infiltración, se ha considerado lo establecido por Ponce *et al.* (1999) con base en estudios realizados a cuencas vecinas a la zona de estudio, las cuales cuentan con climatología, fisiografía y vegetación similar, dejando, el volumen de recarga infiltrada, relacionado a un porcentaje de la precipitación que cae directamente sobre la zona activa del modelo. Este factor es solo el primero de tres que intervienen para determinar la recarga total del acuífero.

El valor de recarga total que se incluye en el modelo se compone de la siguiente manera: Las entradas de agua subterránea al AG se componen por las precipitaciones que se presentan en la zona de la subcuenca Guadalupe (punto 1) y por los escurrimientos superficiales de la subcuenca Ojos Negros (punto 2). Durante la simulación se han considerado: 1.- La recarga por infiltración en la zona activa del modelo como un porcentaje de la precipitación directa en la zona (10%), y otro porcentaje para la recarga por el frente de montaña (7%). Este último, se refiere al porcentaje considerado para recarga, en relación a la precipitación que se presenta en el resto de la subcuenca Guadalupe, el cual se considera como recarga en celdas perimetrales del modelo; 2.- El volumen de agua registrado como escurrimiento superficial en la estación Agua Caliente (ubicada en la entrada noreste del modelo), proveniente de la subcuenca Ojos Negros se incluyó de manera directa como recarga del acuífero en las celdas ubicadas en el margen noreste del dominio de flujo.

La distribución de las recargas se muestra en la Figura 9, la cual indica el porcentaje de recarga por el frente de montaña que corresponde a cada zona. Por la zona (h) se recarga el 100% del escurrimiento superficial proveniente de la subcuenca Ojos Negros.

La recarga se incluye conforme el comportamiento de la precipitación mostrado en la Figura 8, es decir, no es un promedio mensual directamente extraído del anual, este se afecta por el porcentaje de lluvia que se precipita en el mes que se esté evaluando por el modelo.

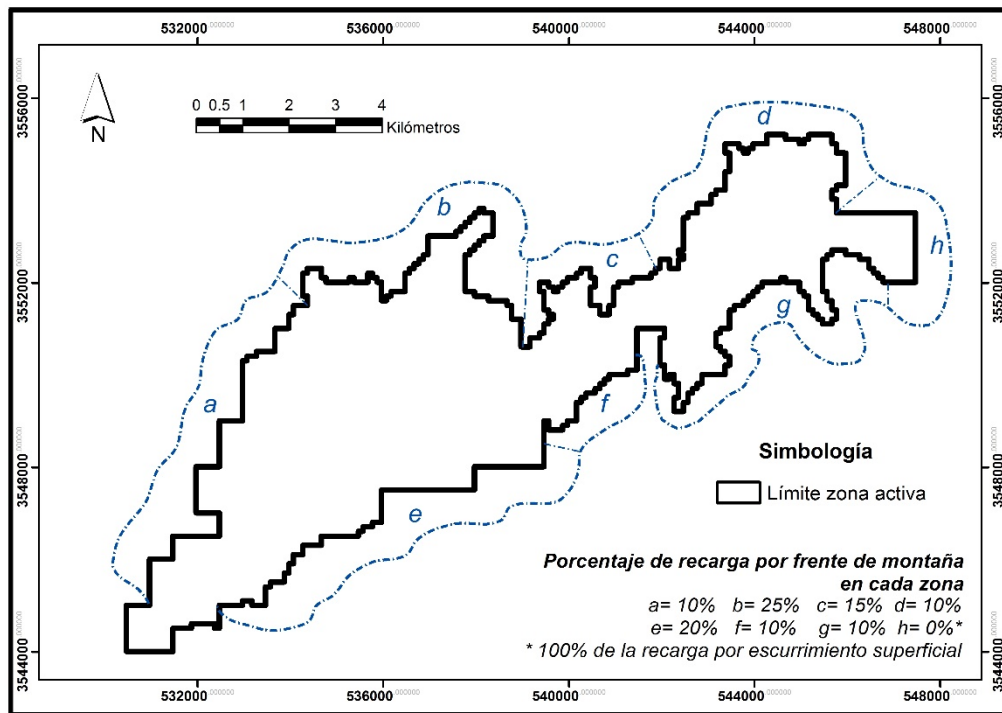


Figura 9.- Distribución de la recarga por el frente de montaña considerada durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG

III.1.7. Carga constante

Debido a que, a lo largo de 30 años (1977-1998) se observó que en las celdas ubicadas en la salida del acuífero (celdas suroeste) el nivel freático se ha mantenido constante, con una variación de menos de 2 m (Campos-Gaytán, 2008), la frontera suroeste se ha considerado durante el periodo completo de simulación (condiciones estacionaria y transitoria) como una frontera de carga constante específica (Specified Head Boundary).

III.1.8. Evapotranspiración

Se consideró como descarga de agua del modelo, debido al proceso de evapotranspiración, una tasa de 240 y 60 mm/año (Campos-Gaytán, 2008) y cuya distribución se muestra en la Figura 10. La primera de estas zonas asociada con vegetación que alcanza en promedio los 3 m de altura como son arboles de olivo, principalmente, en la Zona El Porvenir; y la segunda de estas, con plantas que presentan una altura

mucho menor, como son vid, alfalfa, forrajes y hortalizas, por mencionar algunas, representativas de la Zona Calafia.

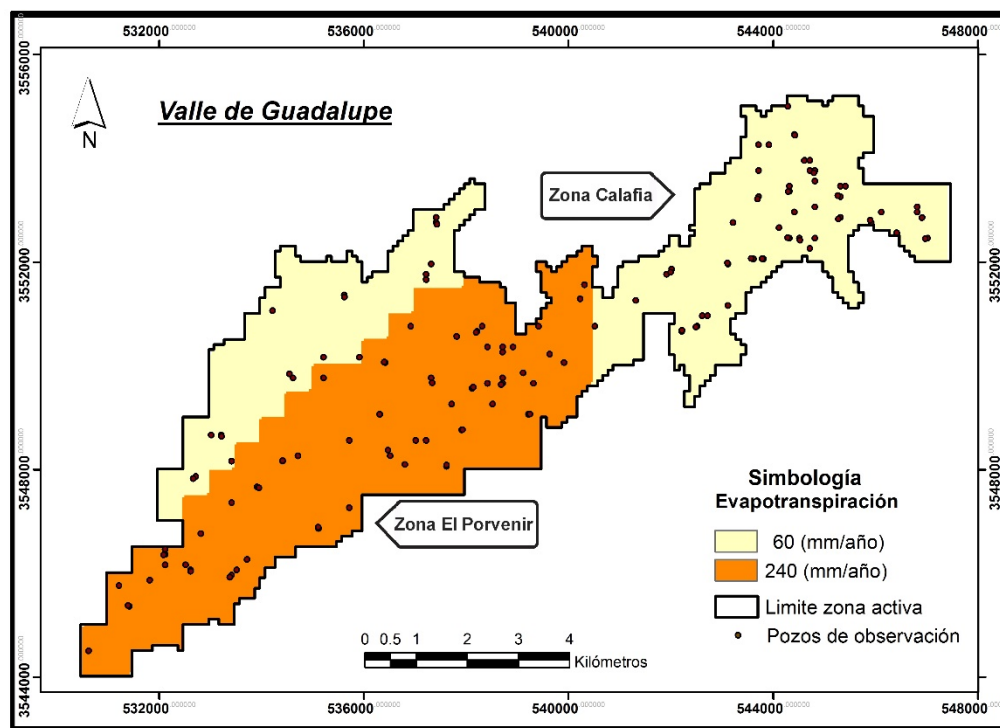


Figura 10.- Tasa de pérdidas por evapotranspiración y ubicación de pozos de observación para fines de calibración, consideradas durante la simulación del agua subterránea en el AG

IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN (nivel freático calculado)

IV.1. Condición Estacionaria

Como primer paso en la simulación del modelo del AG, se ha fijado como objetivo la representación del estado estacionario, es decir, reproducir los niveles freáticos del acuífero en la fecha que se supone que éste se encuentra en equilibrio. Por tal razón, al igual que Campos-Gaytán (2008), se estableció como fecha de condiciones estacionarias al mes de febrero de 1984, debido a que, entre los años de 1978 y 1983, en su mayoría, se registraron lluvias superiores al promedio anual en esta región. La recarga al acuífero por infiltración producto de este periodo de lluvias continuó hasta febrero de 1984, fecha en que se registraron los niveles más altos en pozos monitoreados en la zona por la CONAGUA (Campos-Gaytán, 2008). Aunado a lo anterior, se consideró que la operación de los pozos en la zona provocaba

un efecto mínimo, el cual se podría despreciar y, por lo tanto, asumir que el acuífero se encontraba a su máxima capacidad.

Para realizar la comparativa de resultados simulados por el modelo y lo observado en campo, se ingresaron los registros de 105 pozos (Figura 10) para evaluar la condición transitoria, de los cuales 35 cuentan con información de febrero de 1984 y se utilizaron para calibrar la condición estacionaria (Tabla IV).

Tabla IV.- Obras de extracción con observaciones del nivel freático en febrero de 1984 (CONAGUA, 1998).

No. y tipo de Obra	Celda		Nivel Observado en febrero de 1984 (m)	No. y tipo de Obra	Celda		Nivel Observado en febrero de 1984 (m)
	i	j			i	j	
N-21	102	15	297.80	P-138	53	88	321.2
N-23	97	19	298.90	P-139	52	85	320.3
N-24	98	13	313.10	P-152	70	71	315.1
N-26	94	22	298.40	P-158	58	88	321.1
N-27	94	26	300.90	P-159	59	85	321.3
P-33	88	29	302.80	P-188	44	132	340.1
P-44	82	35	304.40	P-191	28	133	343
P-55	73	48	311.10	P-194	18	138	341.4
P-68	95	36	301.00	P-195	29	142	344.9
P-94	54	53	316.1	P-232	48	95	325.4
P-102	87	52	309.4	P-254	52	90	322.7
P-110	83	58	312.5	P-259	18	148	346.7
P-112	42	57	321.8	P-265	33	148	348
P-117	38	73	319	P-270	26	162	352.4
P-118	28	75	330.5	P-272	26	169	356.4
P-122	55	65	316.1	P-287	13	138	342
P-130	58	74	318	P-290	11	145	344.5
P-131	63	78	318.1				

Se realizó la simulación para estudiar el comportamiento del acuífero en condiciones de estado estacionario. Con los datos de esta simulación se ha producido la configuración de niveles freáticos calculados y, en la Figura 11, se comparan con los observados en campo.

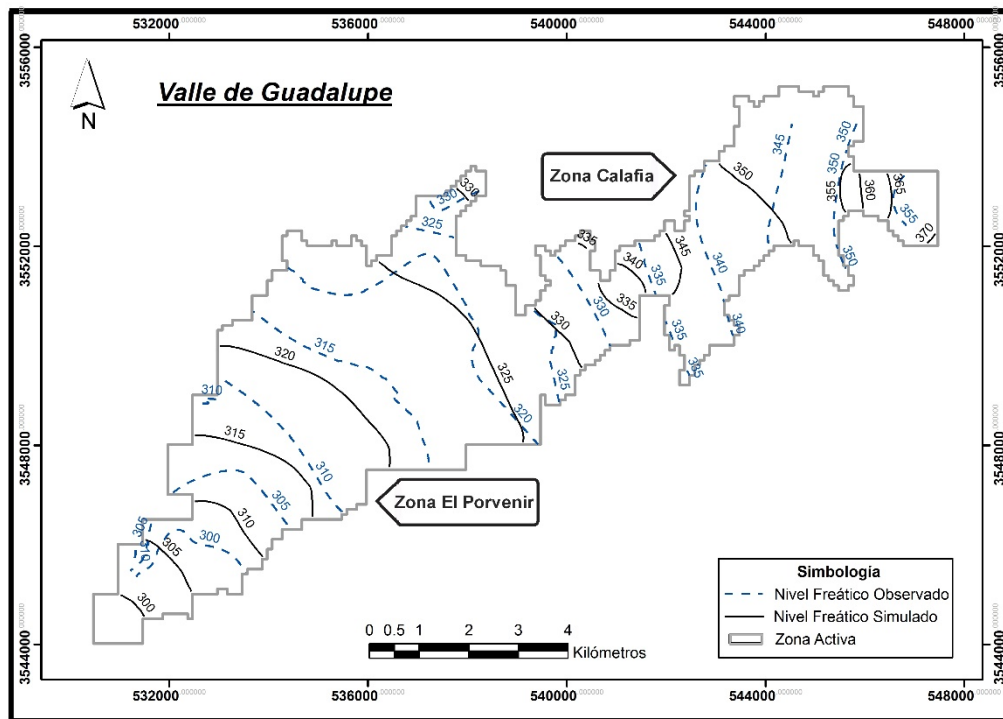


Figura 11.- Comparación de las elevaciones del nivel freático calculado y observado en el AG en condiciones estacionarias (febrero 1984).

En la Figura 12 se muestra la relación entre las elevaciones del nivel freático observado y calculado, donde la mayoría de las elevaciones coinciden con una tendencia de la línea de 45° . No obstante, algunos puntos muestran un desfase con respecto a esta línea, lo cual, podría obedecer a un error en la medición, al momento de capturar o procesar la información, no solo en relación al ajuste del modelo.

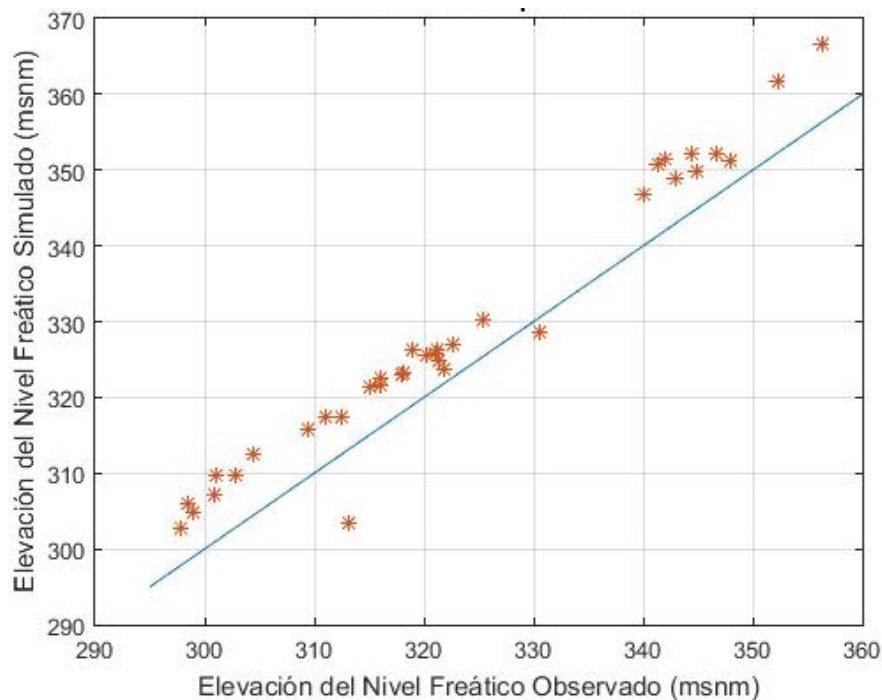


Figura 12.- Diagrama de dispersión de las elevaciones del nivel freático observado vs simulado.

Para el análisis cuantitativo de los resultados, se utilizó el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) como estadístico para comparar el ajuste que presenta el modelo. En la Tabla V, se muestra el RMSE y los residuales obtenidos, máximo y mínimo (diferencia entre la lectura observada en campo y lo calculado por el modelo).

Tabla V.- Estadísticos de resultados (con base en las elevaciones del nivel freático observado vs calculado)

Condición de Simulación	RMSE (m)	Residual Máximo (m)	Residual Mínimo (m)
Estado Estacionario	6.48	-10.19	+1.8

IV.1.1. Ecuación de Balance

La ecuación de balance resultante para la condición estacionaria del AG queda de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de Almacenamiento}$$

$$\text{Cambio de Almacenamiento} = 0$$

$$\text{Recarga Vertical} + \text{Recarga por el frente de montaña} + \text{Esgurrimiento superficial} - \text{Evaporación} - \text{Drenes} - \text{Carga constante} = 0$$

En la Tabla VI se muestran los resultados obtenidos para las variables de la ecuación de balance en estado estacionario.

Tabla VI.- Resultados de las variables de la ecuación de balance para la condición estacionaria (febrero de 1984)

<u>Entradas</u>	$m^3/\text{día}$	$m^3/\text{año}$	%
¹ Precipitación + ² Recarga por frente de montaña + ³ Esgurrimiento	96,974.46	35,395,677.00	100%
TOTAL	96,974.46	35,395,677.00	100.00%
<u>Salidas</u>			
Evaporación	11,592.22	4,231,160.3	11.95%
Drenes	76,935.02	28,081,282.3	79.31%
⁴ Carga constante	8,474.45	3,093,174.25	8.74%
TOTAL	97,001.69	35,405,616.85	100.00%
Entradas - Salidas =	-27.23	$m^3/\text{día}$	
Porcentaje de discrepancias =	0.03%		
¹ Recarga Vertical en la zona acuífera			
² Recarga por precipitación en la subcuenca Guadalupe (sin incluir la zona acuífera)			
³ Esgurrimiento superficial registrado en la estación Agua Caliente			
⁴ Agua que sale del sistema debido a la restricción por la cota que se le asigna al modelo en la zona sur-oeste			

En la Figura 13 se muestran los volúmenes totales resultantes de la simulación del flujo de agua subterránea en el AG en estado estacionario. Se puede observar que un gran volumen de agua sale del

acuífero por los drenes incluidos en el modelo, los cuales cuentan con la característica de funcionar a partir de que el nivel dentro de la celda alcanza la cota que representa los tres metros por debajo de la elevación del terreno natural. El trazo de los drenes sigue la trayectoria del Arroyo Guadalupe dentro del dominio de flujo.

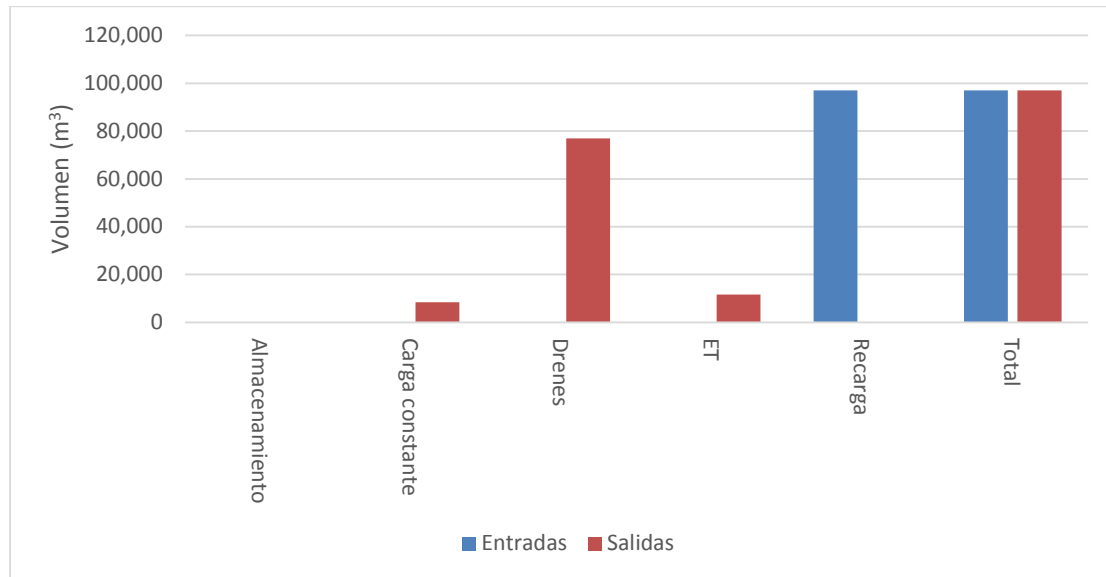


Figura 13.- Volúmenes totales para las variables que integran la ecuación de balance durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG en estado estacionario

En los resultados se observa que la magnitud de agua que sale del acuífero por los drenes es cuantiosa (hasta un 79% del total de las salidas del modelo), esto podría obedecer a que el acuífero en tales fechas (febrero de 1984) se encontraba en su capacidad máxima, por las lluvias extraordinarias presentadas en años inmediatos anteriores, por lo que el flujo de agua alcanza el nivel al cual estos funcionan.

IV.2. Condición Transitoria

Se realiza la simulación del acuífero en condiciones transitorias, para lo cual, se considera la extracción de los pozos agrícolas y los construidos por la CESPE, para el suministro de agua a la ciudad de Ensenada. El periodo de simulación es el comprendido desde febrero de 1984 hasta diciembre de 2016. La información del nivel freático observado dentro del acuífero, para la comparación con lo simulado por el modelo en condiciones transitorias, se obtuvo mediante la recopilación de información disponible en instituciones gubernamentales tales como la CEA, la CESPE, y el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Valle de Guadalupe.

Para la simulación del acuífero en condiciones transitorias se incluyeron 105 obras hidráulicas (pozos y norias) que operan en la región, cuyos gastos promedio se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII.- Gasto promedio de extracción para las obras que intervienen en la simulación del estado transitorio

<i>No. y tipo de Obra</i>	<i>Ubicación en el dominio del flujo</i>		<i>Qmed (m³/día)</i>	<i>No. y tipo de Obra</i>	<i>Ubicación en el dominio del flujo</i>		<i>Qmed (m³/día)</i>	<i>No. y tipo de Obra</i>	<i>Ubicación en el dominio del flujo</i>		<i>Qmed (m³/día)</i>
	<i>i</i>	<i>j</i>			<i>i</i>	<i>j</i>			<i>i</i>	<i>j</i>	
N-19	113	8	-0.03	P-58	78	48	-82.94	N-98	38	48	-17.70
N-21	108	13	-652.57	N-59	73	43	-652.57	P-99	78	63	-51.29
N-22	103	18	-0.03	N-61	78	43	-328.77	N-100	78	63	-49.32
N-23	103	18	-0.03	N-64	43	103	-116.53	N-101	88	53	-49.32
N-24	98	13	-652.57	N-65	103	33	-24.66	N-102	88	48	-49.32
N-25	98	23	-1172.60	P-66	98	33	-34.13	P-102	88	48	0.00
N-25	8	148	-116.53	P-67	43	108	-116.53	N-103	88	48	-49.32
N-26	98	23	-116.53	P-68	98	33	-116.53	P-104			
N-27	94	26	-652.57	P-69	98	38	-16.44	N-108	78	68	-116.53
N-28	93	28	-652.57	N-70	48	108	-116.53	N-109	88	43	-652.57
N-29	93	23	-44.55	N-70	58	38	-116.53	N-110	83	58	-222.92
N-30	93	28	-0.03	N-71	63	78	-116.53	P-110	83	58	0.00
N-32	93	28	-0.03	N-72	93	38	-50.36	P-112	43	58	-163.14
P-33	88	28	-116.53	N-77	73	58	-652.57	P-113	43	58	-0.03
N-35	88	28	-16.44	P-82	73	63	-652.57	P-114	83	48	-116.53
N-36	93	33	-66.10	P-83	68	63	-821.92	P-115	43	73	-202.74
N-37	23	153	-116.53	P-84	68	78	-116.53	P-116	43	73	-427.70
N-38	88	33	-652.57	P-86	73	68	-652.57	P-117	43	73	-0.03
N-42	88	33	-0.03	P-87	73	68	-0.03	P-118	28	73	-163.14
P-44	83	33	-652.57	P-88	63	58	-652.57	P-119	48	78	-652.57
P-46	83	43	-652.57	P-89	63	53	-230.14	P-120	58	73	-0.03
P-47	103	33	-32.88	N-90	58	53	-163.14	P-121	63	63	-652.57
P-48	78	38	-652.57	N-91	58	48	-51.07	P-122	53	68	-652.57
N-50	68	33	-83.56	N-92	53	48	-163.14	P-123	58	68	-652.57
P-53	68	48	-652.57	N-93	63	58	-0.03	P-124	58	68	-0.03
N-55	38	103	-116.53	P-94	53	53	-163.14	P-125	63	68	-0.03
P-55	73	48	0.00	N-95	48	53	-17.88	P-126	68	68	-652.57
N-57	73	48	-164.38	P-96	38	48	-171.23	P-127	63	63	-0.03

Tabla VII. - Continuación.

No. y tipo de Obra	Ubicación en el dominio del flujo		Qmed (m³/día)	No. y tipo de Obra	Ubicación en el dominio del flujo		Qmed (m³/día)	No. y tipo de Obra	Ubicación en el dominio del flujo		Qmed (m³/día)
	i	j			i	j			i	j	
P-128	63	68	-164.63	N-181	38	118	-652.57	N-234	48	103	-652.57
P-129	63	73	-652.57	P-814	33	123	-652.57	N-237	48	103	-0.03
P-130	58	73	-279.45	N-185	33	128	-0.03	N-240	43	98	-0.03
P-131	63	78	0.00	P-186	33	128	-272.22	P-254	53	88	-652.57
P-132	53	78	-652.57	P-188	43	133	-652.57	P-258	13	148	-0.03
P-133	53	83	-652.57	P-191	28	133	-1696.15	P-259	18	148	-0.03
P-134	58	83	-652.57	P-192	28	138	-652.57	P-260	18	153	-657.53
P-135	58	83	-0.03	P-193	23	138	-652.57	P-261	18	153	-821.92
P-136	58	83	-0.03	P-194	18	138	-871.23	P-262	18	153	-273.97
P-137	53	83	-0.03	P-195	28	143	-652.57	P-263	23	153	-0.03
P-138	53	88	-1.51	P-197	18	143	-739.73	P-264	33	148	-345.21
P-139	53	83	-0.03	P-198	23	148	-328.77	P-265	33	148	-1397.26
P-140	53	88	-0.03	P-199	18	148	-821.92	P-266	33	143	-652.57
P-141	48	93	-998.21	P-200	23	153	-652.57	P-270	23	163	-460.27
P-143	48	93	-575.34	N-201	23	153	-0.03	P-271	23	163	-0.03
P-151	73	73	-652.57	P-202	23	153	-0.03	P-272	23	168	-1972.60
P-152	73	73	-0.03	N-213	73	93	-652.57	P-273	23	168	-493.15
P-153	68	68	-0.03	P-214	63	98	-82.49	P-274	28	168	-760.38
P-158	58	88	-652.57	P-215	63	98	-164.38	P-276	43	128	-0.03
P-159	58	88	-0.03	N-216	58	93	-652.57	N-278	53	98	-0.03
P-160	58	83	-0.03	N-220	58	93	-0.03	P-279	38	123	-202.74
P-171	48	123	-652.57	N-224	53	93	-0.03	P-280	18	153	-534.25
N-172	48	123	-0.03	N-225	53	93	-2.88	P-287	13	138	-4880.27
P-173	48	128	-0.03	N-226	53	98	-1095.89	P-290	8	148	0.00
P-174	48	128	-329.07	N-227	58	48	-652.57	P-693	23	163	-0.03
P-175	43	128	-888.57	N-228	48	98	-32.88				
N-176	38	113	-652.57	P-232	48	98	-0.03				
N-178	38	113	-0.03	P-233	43	98	-652.57				

Las configuraciones del nivel freático analizadas durante la simulación del acuífero en condiciones transitorias, corresponden a la operación del acuífero en el periodo de febrero de 1984 hasta diciembre de 2016 (Figura 14).

Los niveles freáticos calculados para diciembre de 2016 van desde los 295 m en la zona suroeste (El Porvenir), hasta los 335 m en la zona noreste (Calafia).

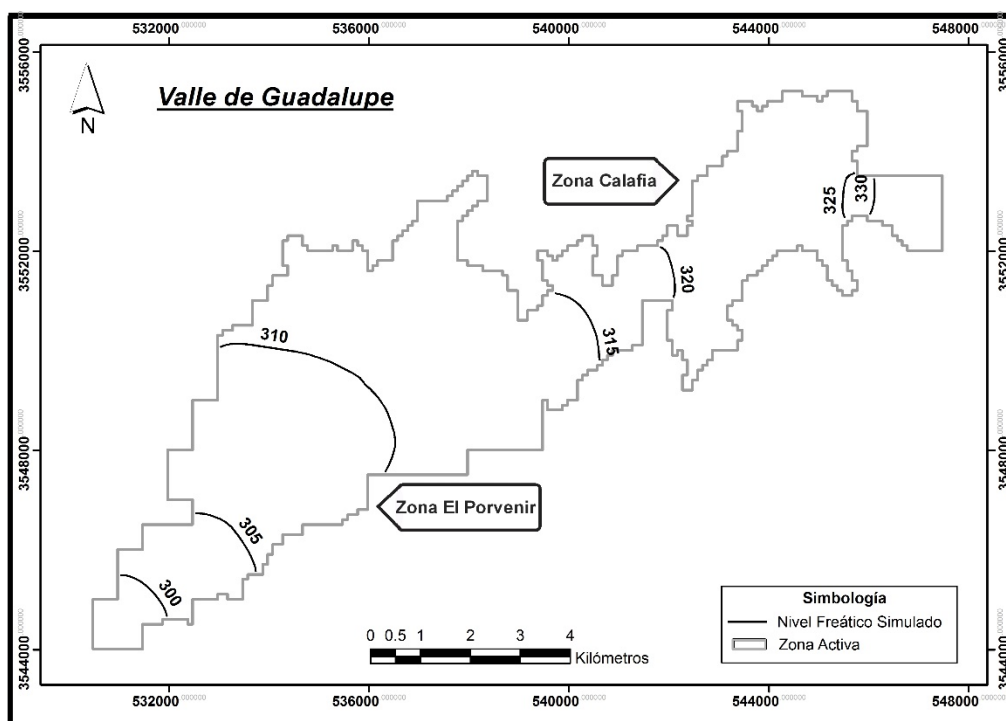


Figura 14.- Configuración del nivel freático calculado para el AG en estado transitorio para diciembre 2016, simulación en el ModelMuse

Para realizar la calibración del modelo se ingresaron al modelo desarrollado en MODFLOW-NWT (Niswonger *et al.*, 2011) los datos observados en 105 obras hidráulicas en distintas fechas, las cuales se listan en la Tabla VIII, y cuya ubicación se mostró en la Figura 10.

Tabla VIII.- Fechas con observaciones del nivel freático en las obras hidráulicas del AG consideradas para la calibración del modelo

Feb / 1984	Jul / 2004	Abr / 2011
May / 1985	Nov / 2004	Nov / 2011
Jun / 1988	Abr / 2005	Jun / 2012
Abr / 1990	Mar / 2008	Nov / 2012
May / 1998	Nov / 2008	Dic / 2013
Sep / 2001	Mar / 2009	Nov / 2014
Mar / 2003	Nov / 2009	Dic / 2015
Mar / 2004	Abr / 2010	Dic / 2016
May / 2004	Nov / 2010	

Como resultado de la comparación, de los niveles observados en campo contra lo obtenido por el modelo de simulación en condición transitoria, se obtuvo un error cuadrático medio de 7.87 m (Figura 15), el cual se considera buen ajuste para un modelo de análisis regional, y representa de manera adecuada el comportamiento observado en campo.

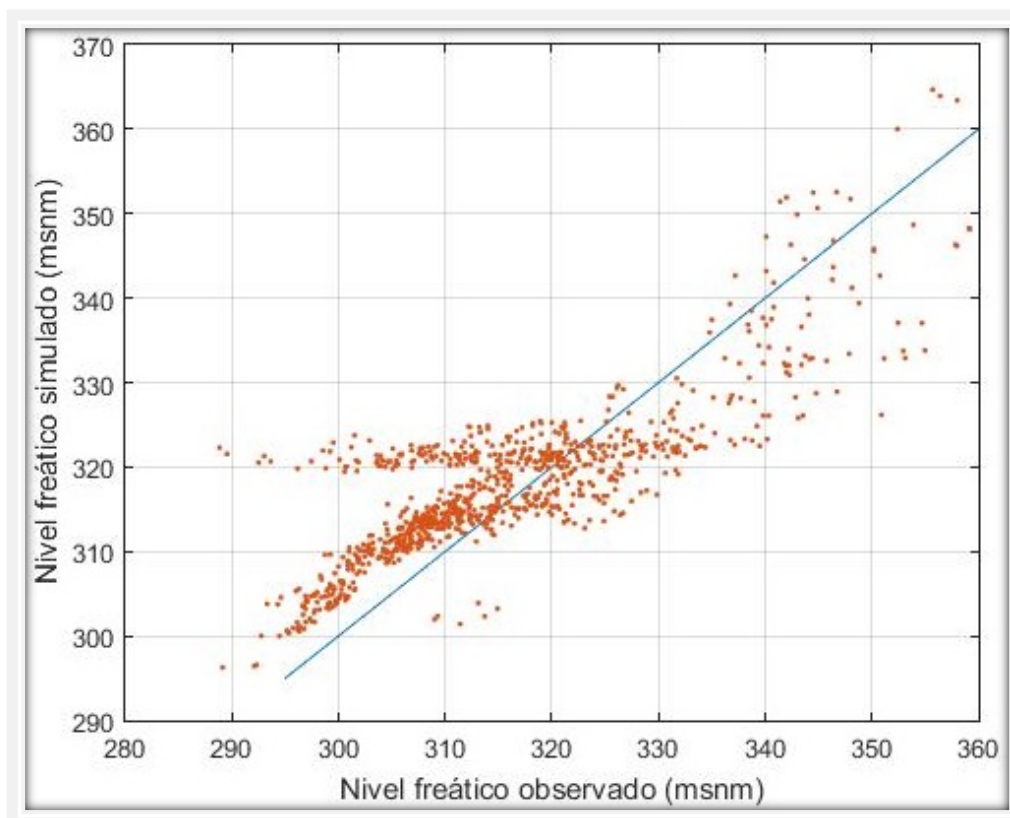


Figura 15.- Niveles freáticos observado vs calculado, para la condición transitoria (febrero 1984-diciembre 2016)

Entre los motivos del desfase observado en algunos de los niveles obtenidos por el modelo y la tendencia de la línea de 45°, podría obedecer a la información topográfica y del basamento impermeable ingresada, la cual se obtuvo de un modelo que contaba con una resolución de celda de 500 x 500 m.

Lo anterior, limita la ventaja de representar de mejor manera las transiciones físicas del terreno que un modelo de mejor resolución (100 x 100 m) ofrece y, por consecuencia, también el comportamiento del flujo de agua subterránea simulado; al ser estos dos elementos (topografía y basamento) las barreras físicas más relevantes para este modelo.

IV.2.1. Ecuación de balance

Los volúmenes totales acumulados al final del periodo de simulación (diciembre de 2016), correspondientes a las variables que integran la ecuación de balance, durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG en estado transitorio, se pueden ver en la Figura 16.

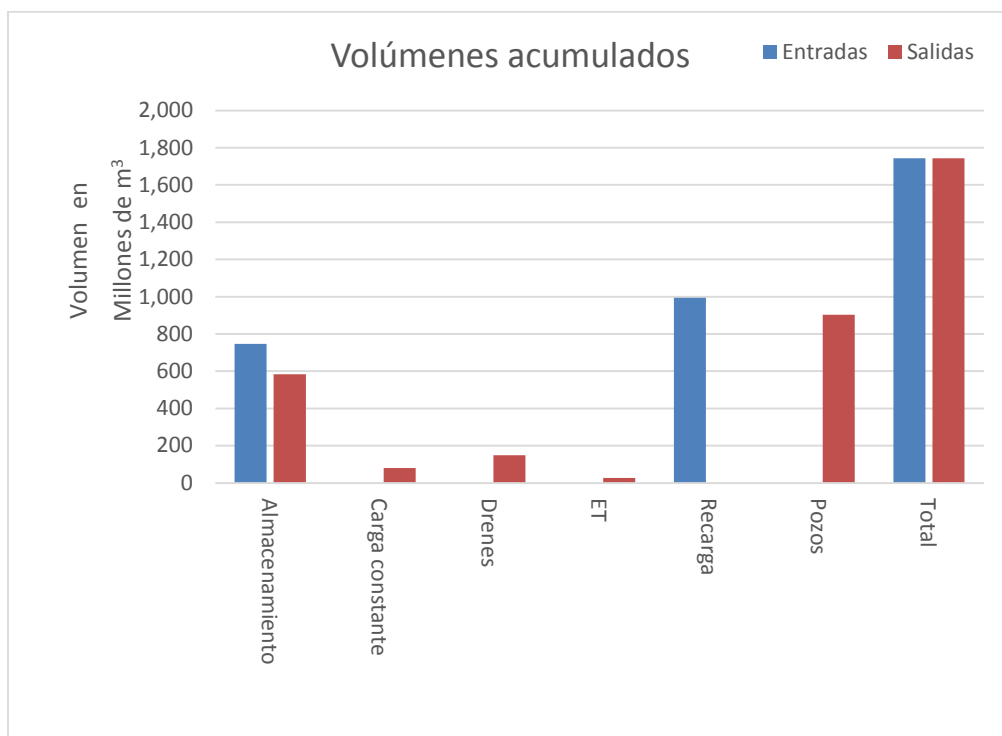


Figura 16.- Volúmenes totales para las variables que integran la ecuación de balance durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AG en estado transitorio

En la Figura 17 se muestra la configuración de las elevaciones de los niveles freáticos observado y simulado para una de las fechas que integran la condición transitoria (diciembre de 2016). Para esta condición, el volumen promedio anual de recarga natural es de 31.1 Mm³/año y en cuanto a las descargas por extracción de pozos 28.17 Mm³/año.

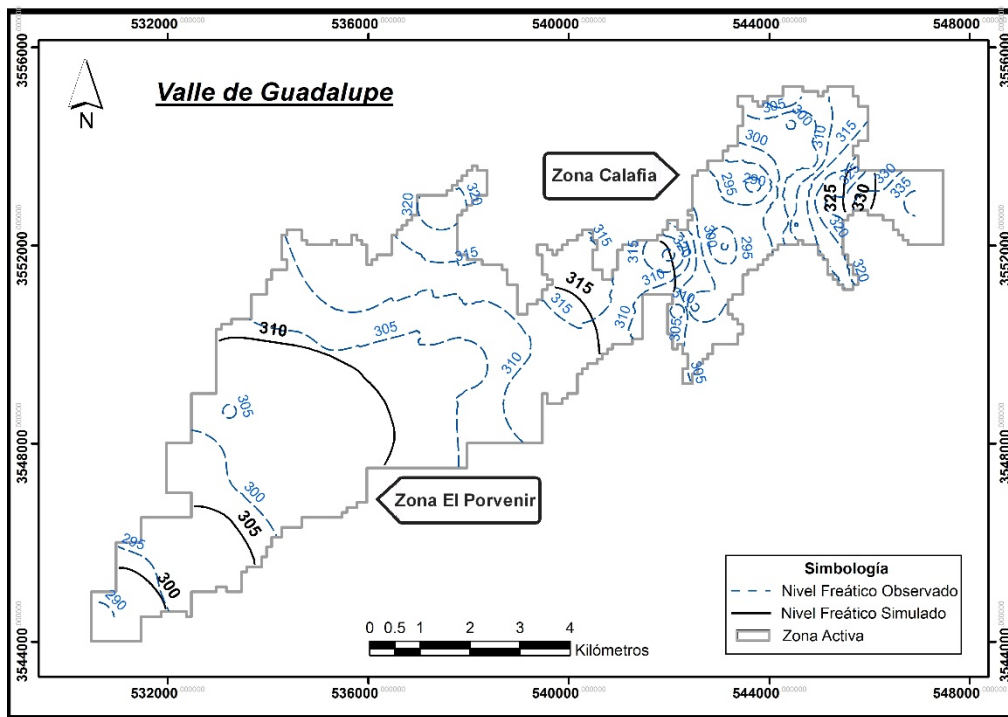


Figura 17.- Niveles freáticos calculado y observado en condición transitoria, correspondientes a diciembre de 2016

En la Figura 18 se muestra los hidrogramas de algunos de los pozos utilizados para la calibración del estado transitorio, en los cuales se puede comparar el nivel freático calculado para todo el periodo de la simulación y las elevaciones del nivel freático observado en campo. Los hidrogramas correspondientes al total de pozos considerados para la calibración del modelo en condiciones transitorias se muestran en el Apéndice A.

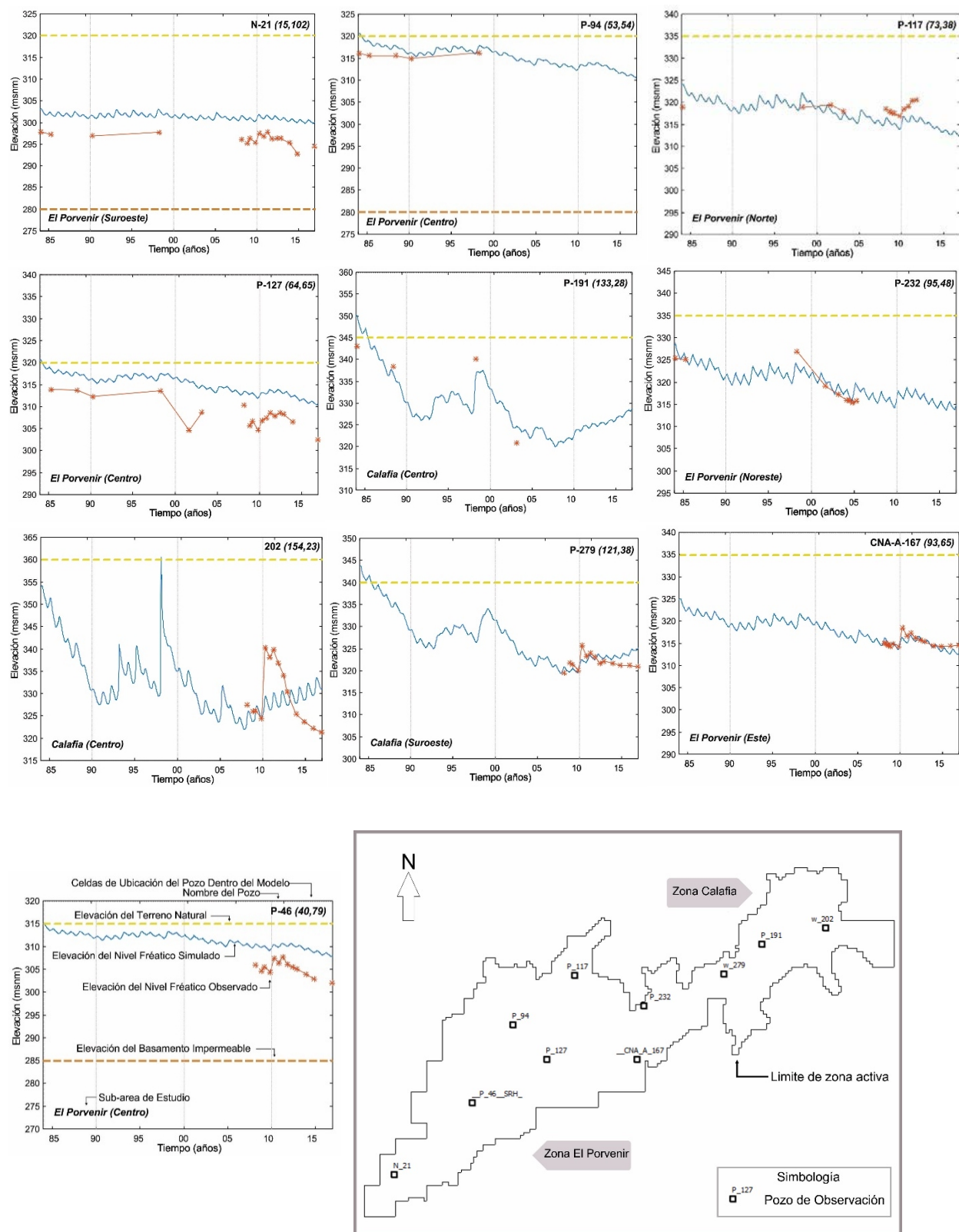


Figura 18.- Hidrogramas de pozos de observación ubicados en el AG

V. MODELO DE OPTIMIZACIÓN

El modelo de optimización aplicado al AG se desarrolló con la finalidad de contar con una herramienta que, combinada con el modelo de simulación para el AG, permita generar estrategias de manejo del agua en el acuífero y poder tomar decisiones con base en argumentos técnicos, matemática y numéricamente hablando. Si bien existen distintos factores que pueden modificar los resultados esperados que se generan con este tipo de modelos, como la disminución o aumento de las precipitaciones, fallas en equipos de extracción o recarga, entre otros; no obstante, contar con un panorama a largo plazo permite implementar estrategias conducentes hacia un objetivo definido, ya sea evitar la sobreexplotación, recuperar el acuífero o, simplemente, extraer la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda requerida por la población, evitando con esto, gastos innecesarios a las dependencias u organismos operadores.

Respecto a los modelos de optimización que se utilizan para el manejo de aguas subterráneas, existen distintas técnicas para encontrar la solución del mismo, las cuales se pueden englobar en métodos exactos y métodos heurísticos. Los métodos heurísticos no garantizan que la solución encontrada sea la óptima, se basan en encontrar una solución cercana a la óptima, con lo que logran agilizar el proceso de solución. En cambio, los métodos exactos, si el tiempo computacional continua por el tiempo suficiente, garantizan encontrar la solución óptima (Horne et al., 2016).

Para encontrar la solución del modelo de optimización aplicado al AG, se utilizó el software Ground-Water Management-Version Independent (GWM-VI) (Banta y Ahlfeld, 2013), desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey, USGS). El GWM-VI utiliza la técnica de aproximación de la matriz de respuesta (*response-matrix approach*) para resolver distintos tipos de modelos de gestión de agua subterránea formulados con variables del tipo lineal, no lineal y lineales binarias mixtas (*Mixed-binary linear*), mediante tres tipos de soluciones, Programación Lineal (LP) utilizando Simplex para los que tengan variables de comportamiento lineal, Programación Lineal Secuencial (*Sequential Linear Programming*, SLP) cuando la formulación de problema sea no lineal, y mediante el algoritmo de crecimiento y poda (*branch and bound*) para las formulaciones binarias mixtas (Banta y Ahlfeld, 2013).

En los casos donde se resuelve con LP, la matriz de coeficientes resultante se utiliza para completar la formulación lineal y se resuelve mediante el Método Simplex. Cuando la programación es no lineal, se resuelve mediante SLP, cuya técnica consiste en la linealización repetida de las características no lineales del problema a resolver y, en estos casos, los coeficientes de respuesta se recalculan para cada iteración

(Ahlfeld, Barlow y Mulligan, 2005). Si este proceso no converge, mediante el empleo de SLP, se repite la iteración hasta cumplir con los criterios establecidos por el usuario.

GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013) permite resolver problemas de manejo de agua subterránea mediante la combinación directa de los modelos de simulación y de optimización. Este utiliza los archivos del modelo de simulación generado en MODFLOW-NWT (Niswonger *et al.*, 2011) y los aplica para encontrar la solución óptima de manejo de agua subterránea, bajo las condiciones incluidas en el modelo de optimización.

El modelo de optimización generado para GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013) se compone básicamente de 3 partes: las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones.

GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013) permite incluir en los modelos distintos tipos de variables de decisión, para este caso en particular se incluyeron las referentes a las tasas de bombeo (de extracción o recarga) para cada pozo incluido en la estrategia de manejo. Estas se refieren a la cantidad de agua que se debe extraer o recargar en cada periodo de tiempo de los pozos propuestos y que componen la solución óptima.

V.1. Función Objetivo

En cuanto a funciones objetivo se refiere, GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013) permite maximizar o minimizar la suma de las variables de decisión que el desarrollador requiera en su modelo. En este caso particular, se requiere maximizar la suma total de las extracciones y las recargas de cada pozo, para cada periodo activo durante la simulación.

La función objetivo planteada es:

$$\text{Maximizar } [-(QT_{ext_{1t}} + \dots + QT_{ext_{nt}}) + (QT_{rec_{1t}} + \dots + QT_{rec_{nt}})] \quad (1)$$

donde QT_{ext_1} hasta QT_{ext_n} hacen referencia al gasto total de los “ n ” pozos de extracción considerados desde el tiempo **1** hasta el tiempo “ t ” que se incluyen para la solución óptima. Mientras que, QT_{rec_1} hasta QT_{rec_n} son referentes al gasto total de los pozos de recarga desde el tiempo **1** hasta el tiempo “ t ” que se incluyen para la solución óptima.

La alternativa de manejo del agua subterránea propuesta para el AG considera 10 pozos de extracción y 5 de recarga artificial, para los escenarios analizados durante el periodo completo de la simulación - optimización. El criterio con el que se seleccionó el número de pozos de extracción que serían opción para el modelo de optimización se basó en el volumen máximo de extracción por pozo y la demanda máxima anual total a satisfacer, por lo que se incluyó un número suficiente de pozos que, sumando su capacidad máxima de bombeo, sea capaz de satisfacer como mínimo la demanda anual total que se pretenda satisfacer y con esto evitar que esta situación se convierta en una restricción adicional. Por otra parte, para el numero de pozos de recarga artificial disponibles para el modelo de optimización, se consideró un numero adecuado que represente las diferentes zonas geográficas del acuífero.

La inclusión de pozos de optimización, tanto de bombeo para extracción como de recarga artificial, establece el tipo de obra de ingeniería necesaria para la reutilización del agua tratada y su posterior aprovechamiento, lo cual no se manifestaba de manera explícita en otros trabajos realizados para esta zona de estudio.

V.2. Restricciones

GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013) permite cuatro tipos de restricción que, a su vez, se pueden subdividir en otras. A continuación, se describen solamente aquellos tipos considerados en este modelo:

a) Restricción de extracción por pozo (Restricción de Variable de Decisión):

$$QP_{nmin} < QP_{nt} \leq QP_{nmax} \quad (2)$$

donde QP_{nmin} y QP_{nmax} son los gastos mínimo y máximo, respectivamente, del pozo “n”, ya sea de extracción o recarga para cada determinado tiempo “t”.

b) Restricción de extracción o recarga total (Restricción de suma lineal):

$$\sum_{i=1}^n QP_{ext_i^t} \leq QT_{nec}^t \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n QP_{rec_i^t} \leq QT_{nec}^t \quad (4)$$

donde QP es el gasto óptimo de extracción o recarga para el pozo i en el periodo de tiempo t , y QT_{nec}^t es el gasto total requerido (o demanda) para un tiempo determinado, en el caso de los pozos de extracción es el volumen máximo que se pretende extraer y para los pozos de recarga artificial es el volumen máximo disponible para este fin.

c) Restricción de carga hidráulica:

$$\begin{aligned} HP_{ext} &> H_{min} \\ HP_{rec} &< H_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

donde HP_{ext} y HP_{rec} son las elevaciones del nivel freático calculado para los pozos de extracción y recarga, respectivamente, para un determinado periodo de tiempo, toda vez que se implementen las tasas de bombeo y recarga establecidas como la solución óptima. H_{max} y H_{min} son las elevaciones del nivel freático calculado que han sido establecidas como máximas y mínimas permitidas en los pozos de extracción y recarga, respectivamente.

V.3. Descripción del proceso de solución del modelo de optimización

La función objetivo, las restricciones y otros archivos necesarios para la ejecución del GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013) (por ejemplo, **OUT**, **DECVAR** y otros que se describirán más adelante) se deben programar y generar mediante archivos de texto.

Para encontrar la solución numérica del modelo de optimización, en primer lugar, GWM-VI calcula una matriz de respuesta. Lo cual, consiste en utilizar el proceso de flujo de agua subterránea de MODFLOW para calcular el cambio en la carga disponible (elevaciones del nivel freático) en cada celda donde se ubican las restricciones, y que resulta de una perturbación de la variable de cantidad de flujo. De esta manera, se calculan los coeficientes de conforman la matriz de respuesta. Para llevar a cabo todo este procedimiento de evaluación y cálculo se emplea el programa MMProc; el cual, se encarga de preparar los archivos de entrada para MODFLOW (incluidos los de entrada controlados por el modelo de optimización GWM-VI), ejecutar MODFLOW, extraer los valores obtenidos de la simulación del flujo de agua subterránea, interpretar la información y reportar los valores.

La programación del modelo en GWM-VI se realiza mediante la utilización de archivos de texto (con extensión “*.txt”). Los cuales, se encuentran declarados en el archivo con extensión “*.GWM”, junto

con la ruta de ubicación de los mismos. A continuación, se enumeran los tipos de archivos de entrada al GWM-VI utilizados en esta modelación, con base en el problema analizado en esta tesis.

1.- **OUT**, archivo donde se especifica el nombre del archivo de salida, en el cual se hace la escritura de los resultados del modelo de optimización.

2.- **DECVAR**, en este archivo se declara el tipo, los nombres y número de variables incluidas en el modelo.

3.- **OBJFNC**, archivo donde se especifica el tipo de función objetivo y la propia función a utilizar; para este caso, maximizar.

4.- **VARCON**, archivo que contiene los límites permitidos más bajo y más alto de la variable declarada; en este caso, se refiere a la cantidad mínima y máxima de extracción o recarga del pozo optimizado.

5.- **SUMCON**, este archivo es del tipo restricción, en el cual se especifica la relación lineal de las variables y se establece el total máximo o mínimo de ella. Se puede indicar que el lado izquierdo de la ecuación sea mayor o igual que, menor o igual que, o simplemente igual que el lado derecho de la ecuación. Para este trabajo, se establecieron dos condiciones, la primera, que la suma del volumen bombeado de todos los pozos optimizados destinados para extracción sea igual o menor que una demanda específica y segundo, que, para los pozos de recarga artificial, la suma total del volumen recargado sea igual o menor al volumen disponible de las fuentes de abastecimiento.

6.- **HEDCON**, archivo donde se declara la información correspondiente a la restricción de la elevación del nivel freático en la celda que se quiera evaluar. Se debe especificar la ubicación de la celda dentro del dominio de flujo (renglón y columna), si se condiciona que el nivel evaluado sea mayor que, igual que o menor que, un predeterminado nivel al inicio de la modelación, así como el periodo en el cual se evaluará. Para esta tesis se estableció un nivel mínimo al cual puede descender la elevación del nivel freático calculado para la celda donde se ubican los pozos de extracción optimizados, así como un nivel máximo al que puede llegar tal elevación calculada para los pozos de recarga artificial.

7.- **SOLN**, en este archivo se define el tipo de solucionador que se utilizará en la modelación (como LP o SLP, incluso existe la opción que no solucione el problema de optimización como tal, por lo que solo generará la matriz de respuesta), número de iteraciones máximas permitidas, coeficientes de convergencia, entre otros.

8.- **CONTROL**, en este archivo se indica la manera en que será invocada la simulación en MODFLOW (la ubicación de los archivos que componen el modelo de simulación y ubicación del archivo ejecutable de la versión de MODFLOW que se desea utilizar para este fin), rutinas adicionales utilizadas en el proceso iterativo de solución y cuál método de procesamiento se desea utilizar (computación en serie o en paralelo).

9.- **NAM**, aquí se definen los nombres y ubicación de los archivos de MODFLOW que se emplearán en el modelo de simulación.

Básicamente, con los tipos de archivos presentados hasta el momento se determinan las características del modelo de optimización; más adelante, se describe detalladamente la información que se incluyó en ellos para definir cada escenario simulado.

En la Figura 19 se presenta un esquema del procedimiento que sigue GWM-VI y su interacción con MODFLOW para encontrar la solución. Los recuadros con fondo blanco representan el proceso del GWM-VI; la elipse con fondo gris representa los archivos de entrada preparados por el usuario (**OUT**, **DECVAR**, **OBJFCN**, **VARCON**, **SUMCON**, **HEDCON** y **SOLN**); las elipses en color azul representan los archivos de plantilla y de instrucción generados por GWM-VI y sus subrutinas; las elipses con fondo negro representan archivos de entrada, el archivo ejecutable y los archivos de salida que componen una simulación MODFLOW (Banta y Ahlfeld, 2013).

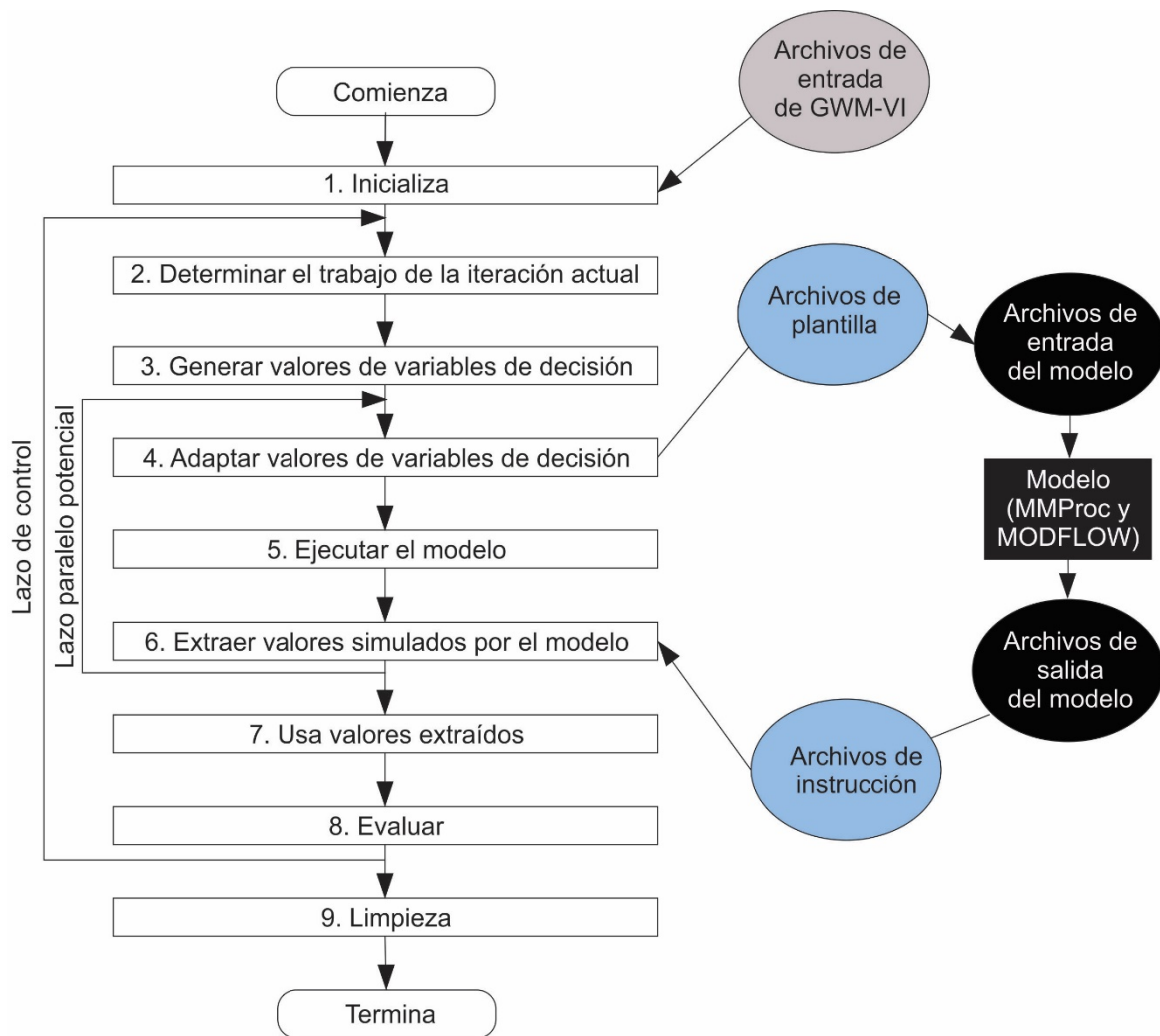


Figura 19.- Diagrama de flujo esquemático del GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013)

V.4. Caso de estudio sintético

El modelo de optimización planteado en las **ecuaciones 1-5** fue aplicado a un caso de estudio sintético; cuyo desarrollo se muestra a continuación.

Se consideró un modelo del flujo de agua subterránea que consistía de 6 renglones y 10 columnas, con celdas cuadradas de 400 m por lado, el cual, se emplea para la simulación de un acuífero libre con un espesor de 248 m. El acuífero cuenta con 2 pozos de extracción, el gasto del Pozo_1 es de 10,250 m³/día y el del Pozo_2 es de 9,350 m³/día (Figura 20). No se incluye recarga alguna y la simulación se realiza en condiciones transitorias, considerando 6 intervalos de tiempo (en días).

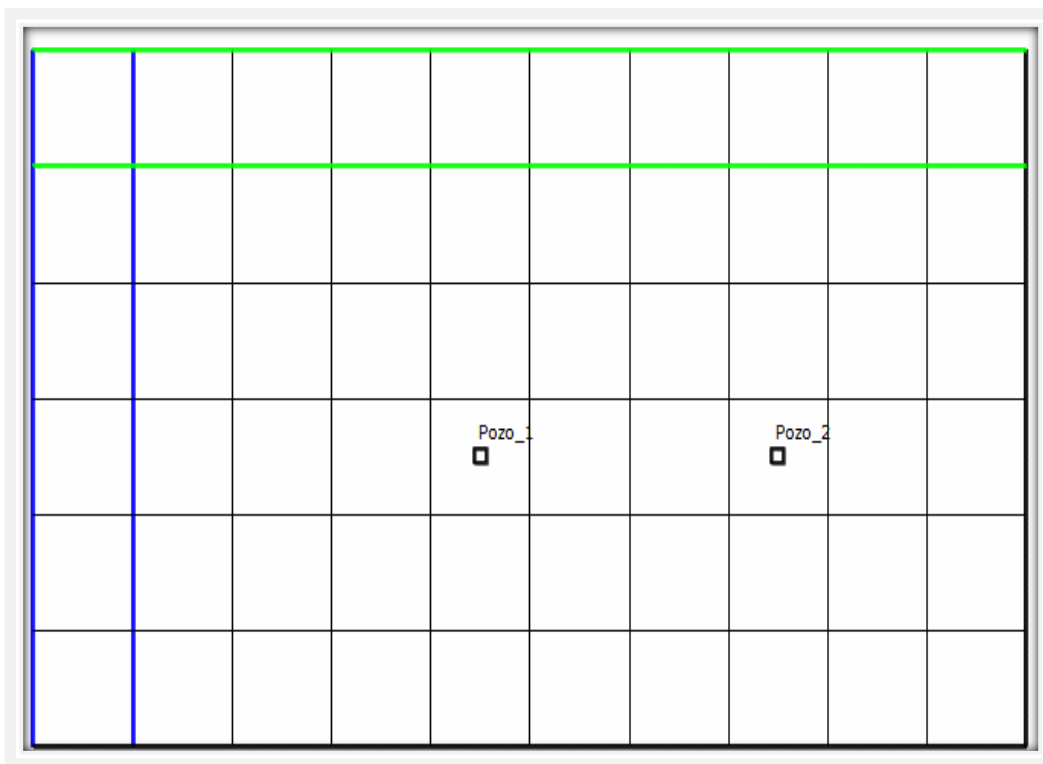


Figura 20.- Caso de estudio sintético considerado para la simulación del flujo de agua subterránea con MODFLOW (mediante el empleo de ModelMuse) y la optimización con GWM-VI.

Tabla IX.- Información del modelo, caso de estudio sintético.

Descripción	Cantidad	Unidad
Largo de celda (cuadrada)	400	m
Columnas	10	
Renglones	6	
Cota terreno natural	258	m
Cota basamento impermeable	10	m
Nivel carga inicial	250	m
Conductividad Hidráulica (K)	50	m/día
Extracción Pozo 1	10,250	m ³ /día
Extracción Pozo 2	9,350	m ³ /día

En la tabla IX se muestra un resumen de las condiciones en que se ejecutó el modelo. Mientras que, en la Figura 21 se puede observar las elevaciones del nivel freático obtenidas.

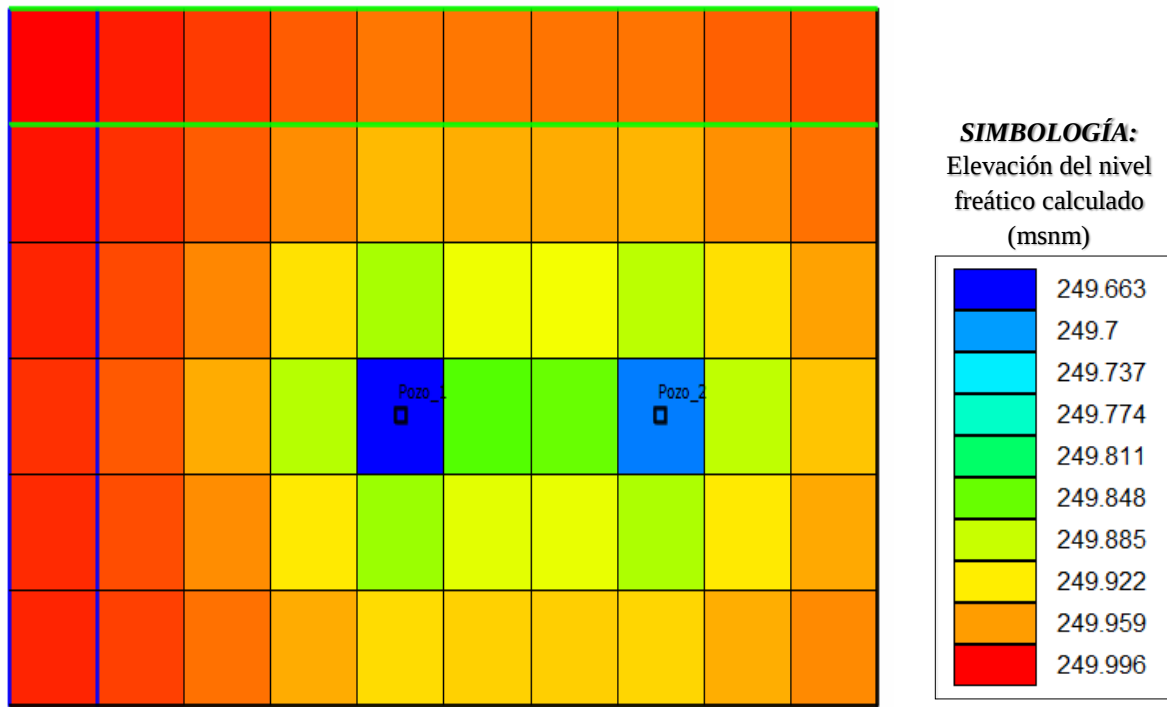


Figura 21.- Elevaciones del nivel freático calculadas para el último periodo de simulación, considerando el modelo del caso de estudio sintético.

Como siguiente paso, se aplicó el modelo de optimización mediante el empleo del software GWM-VI. El escenario planteado cuenta con la inclusión de 6 pozos de extracción adicionales y 1 de recarga (Figura 22).

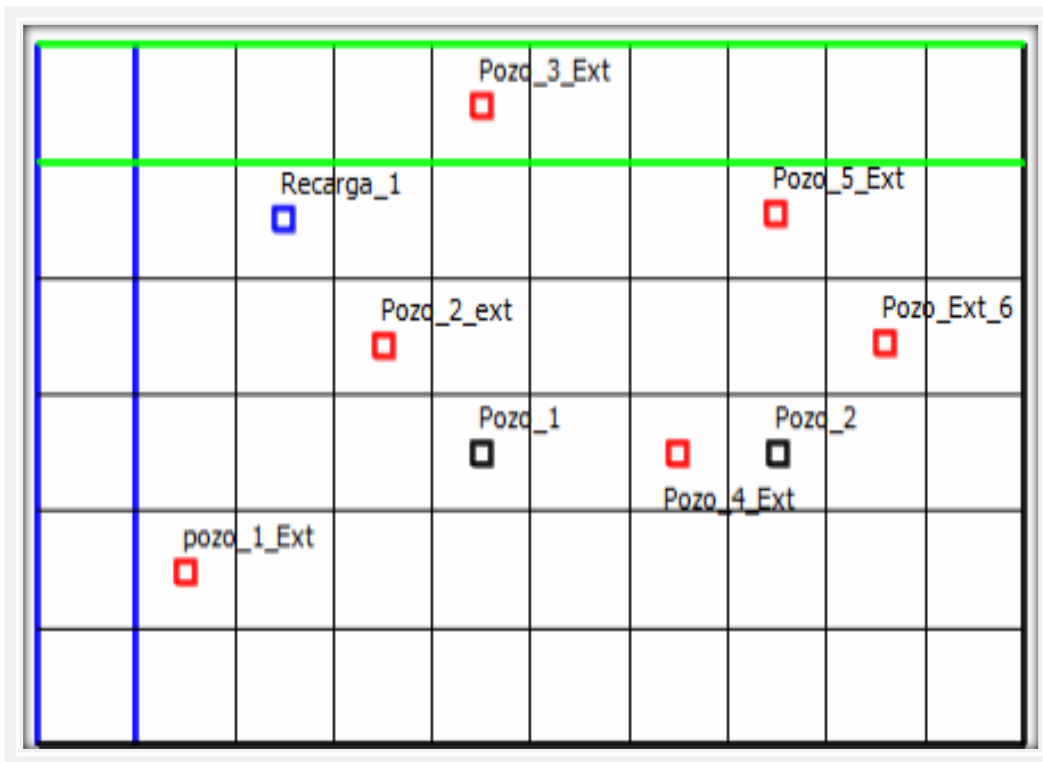


Figura 22.- Ubicación de los pozos incluidos en el escenario de optimización para el modelo del caso de estudio sintético.

Los recuadros negros representan los pozos originales, mientras que, los recuadros en rojo y en azul representan los pozos de extracción y recarga, respectivamente, agregados para la optimización.

La función objetivo (similar a la ecuación 1) considerada en este caso de estudio sintético es maximizar el bombeo de los 6 pozos de extracción nuevos, para lo cual, se debe considerar a su vez el volumen de agua disponible en el acuífero más el volumen agregado por el pozo de recarga restante. Los 2 pozos originales continúan con la extracción asignada inicialmente.

Las restricciones de carga (similar a la ecuación 2) se establecieron de la siguiente forma:

- La cota 240 m es la mínima (más baja) que puede alcanzar la elevación del nivel freático en las celdas donde se ubican los pozos de extracción, para que, éstos puedan continuar funcionando.
- La cota 250 m es la máxima (más alta) que puede alcanzar la elevación del nivel freático en las celdas donde se ubican el pozo de recarga, para que, éste pueda continuar su funcionamiento.

La restricción de extracción total (similar a la ecuación 3) no se ha incluido en este escenario, ya que, para este caso de estudio sintético no se requiere alcanzar un volumen total determinado al final de ningún periodo.

La restricción de extracción y recarga por pozo, se estableció en 2,000,000 m³ como máximo para la extracción y 70,000 m³ para la recarga, esto en cada periodo de simulación.

Con base en lo planteado para este caso de estudio sintético, se generan en total 42 variables de decisión y 42 restricciones, debido a que cada uno de los 7 pozos cuentan con 6 periodos de simulación y en cada uno de ellos puede extraerse un volumen diferente.

Para encontrar la solución se utilizó la opción de SLP; cuyos resultados correspondientes a la solución óptima se pueden observar en la Tabla X.

Tabla X.- Volúmenes de extracción y recarga correspondientes a la solución óptima del caso de estudio sintético [En m³].

Pozo	Periodo					
	1	2	3	4	5	6
Pozo_1_Ext	697,919.80	320,460.40	279,309.60	247,270.30	221,081.50	199,046.30
Pozo_2_Ext	695,364.50	316,158.30	274,039.30	241,772.90	215,950.70	194,698.40
Pozo_3_Ext	593,507.60	221,647.90	184,756.90	157,074.10	135,559.20	118,439.60
Pozo_4_Ext	685,618.20	298,687.60	251,926.30	217,125.10	189,961.40	167,978.80
Pozo_5_Ext	655,457.70	256,937.10	205,190.20	168,067.90	139,911.60	117,780.00
Pozo_6_Ext	658,116.70	263,889.30	216,794.00	183,910.50	159,233.30	139,728.20
Recarga_1	52,329.89	70,000.00	70,000.00	70,000.00	70,000.00	70,000.00

A manera de comprobar el cumplimiento de todas las restricciones, se incluyeron los volúmenes de extracción y recarga en el modelo desarrollado en ModelMuse, y se llevó a cabo la simulación en condiciones transitorias de seis intervalos de tiempo de un día. Los resultados de dicha simulación se muestran en la Figura 23. En ella, se puede apreciar que las celdas donde se ubican los pozos de extracción y recarga cumplen con las restricciones establecidas para el modelo para el periodo de simulación completo.

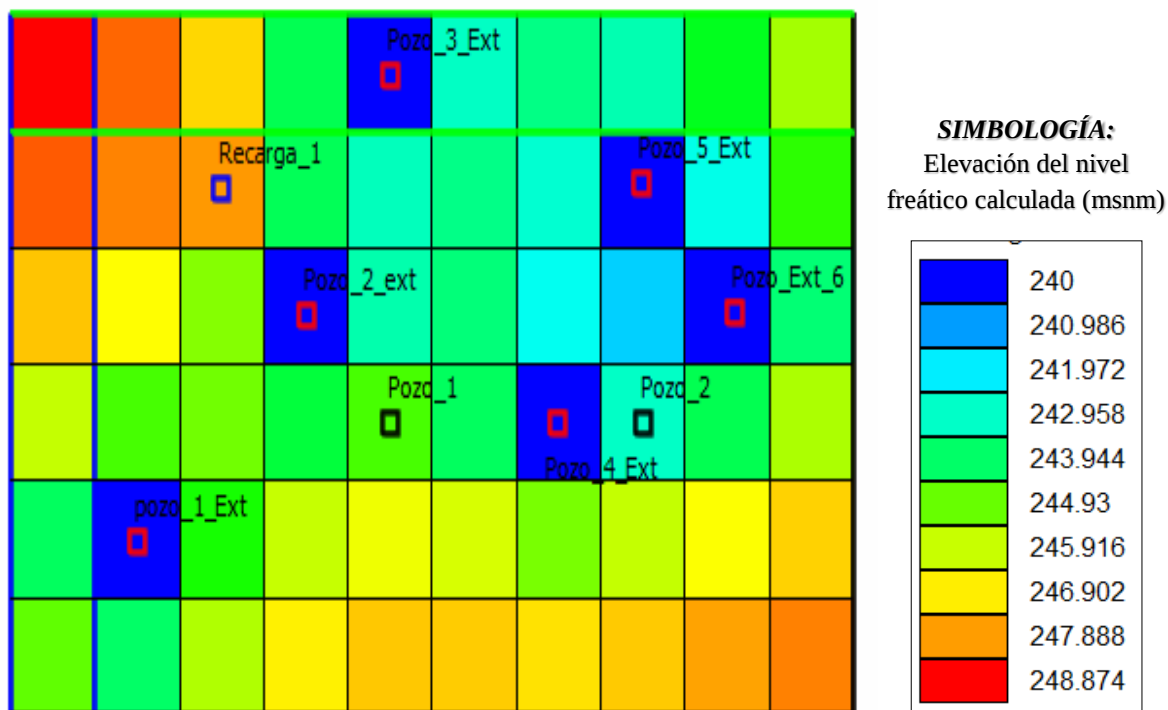
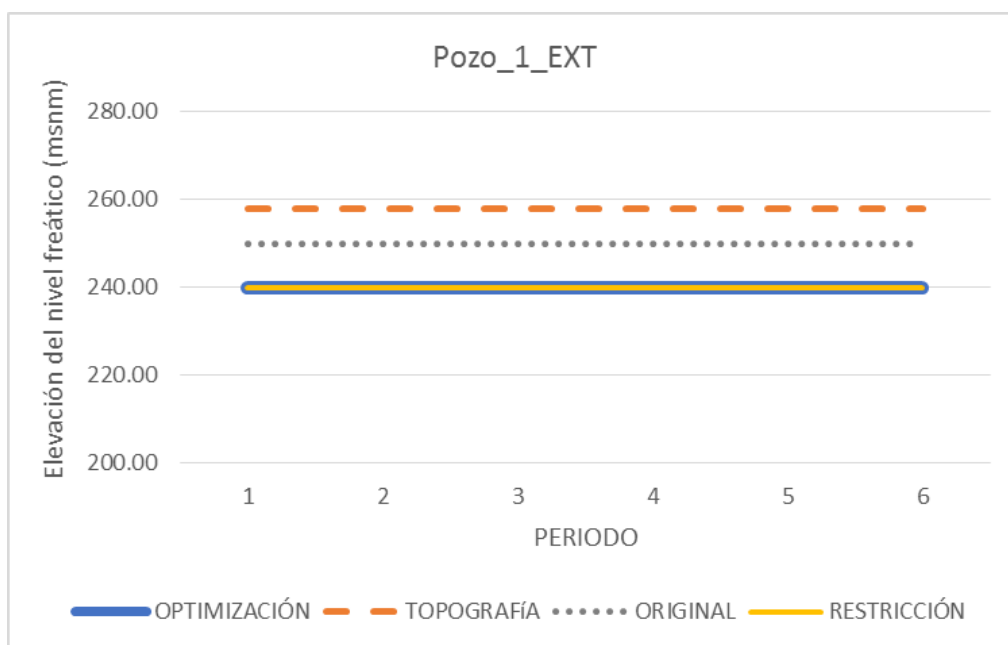


Figura 23.- Elevaciones del nivel freático calculadas para el último periodo de simulación del caso de estudio sintético, en el cual se considera los volúmenes de extracción y recarga resultantes del proceso de optimización.

En cuanto a los pozos de extracción optimizados (Pozo_1_Ext hasta Pozo_6 Ext) el comportamiento del nivel freático fue el mismo, descendió hasta los 240 m, el cual era el mínimo permitido por la restricción de carga aplicada al modelo de optimización (Figura 24, inciso a); no sucediendo lo mismo para el pozo de recarga, este sólo alcanzó el nivel máximo permitido por la restricción al inicio de la simulación – optimización y después esta tendencia fue en descenso (Figura 24, inciso b). La restricción de extracción máxima no se alcanzó en ninguno de los pozos (Figura 25, inciso a), debido que la capacidad de bombeo hipotética era muy grande ($2,000,000 \text{ m}^3/\text{día}$); caso contrario de lo observado para el pozo de recarga artificial, el cual si alcanzó el volumen máximo de recarga (Figura 25, inciso b), ya que ésta contaba con una capacidad de recarga de $70,000 \text{ m}^3/\text{día}$ solamente.

A)



B)

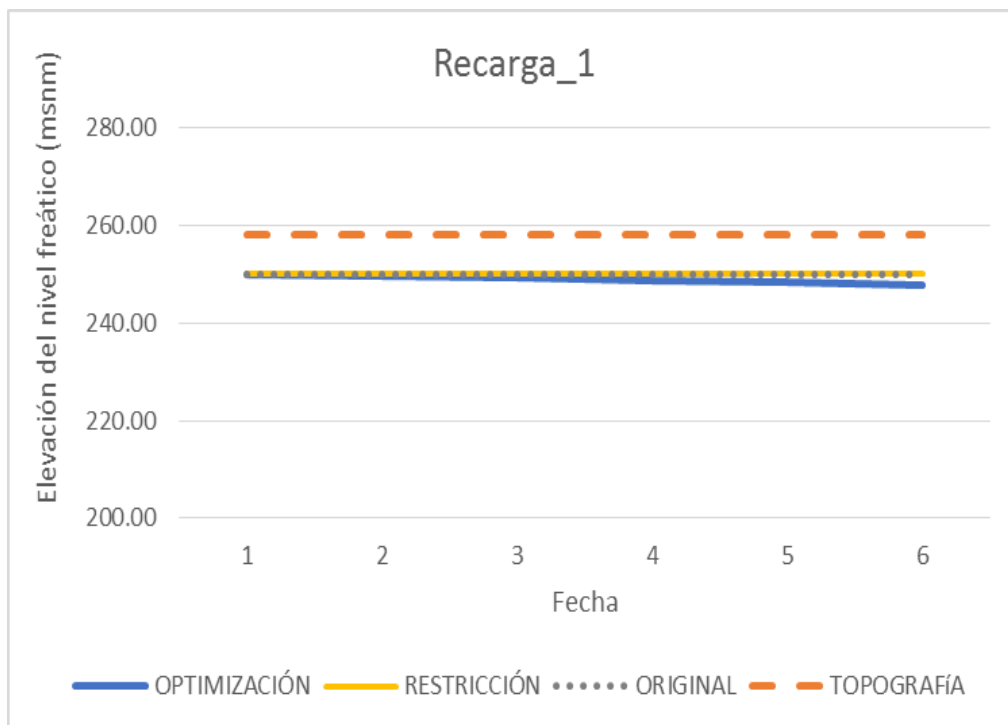
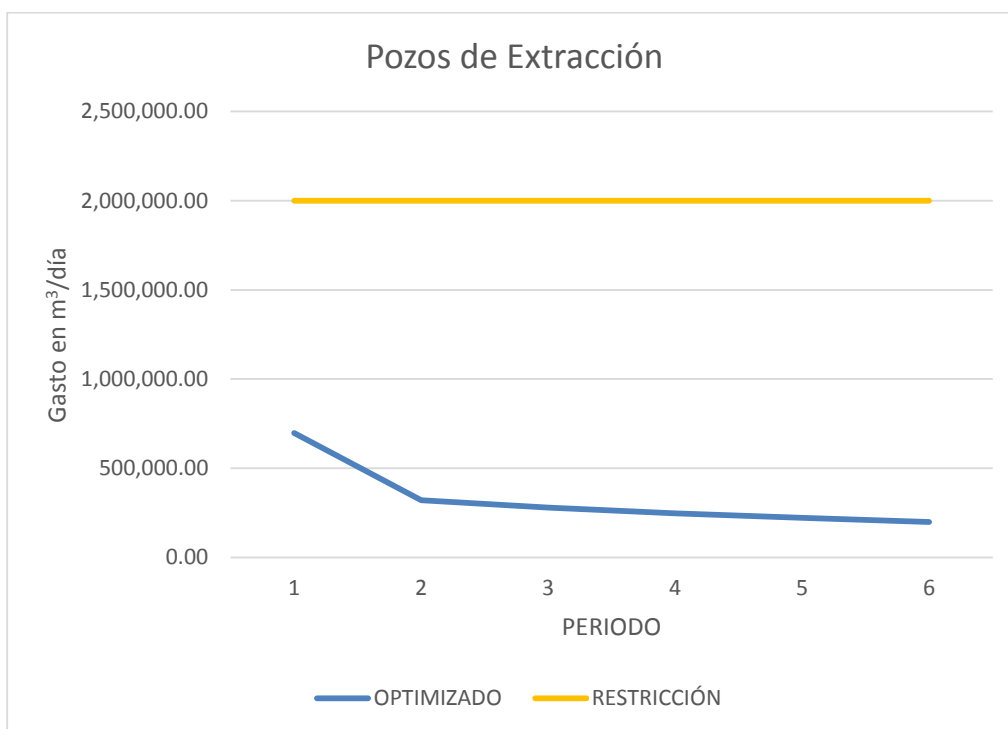


Figura 24.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en los pozos optimizados durante el periodo 1-6 para el caso de estudio sintético: A) Pozo de extracción optimizado Pozo_1_EXT y B) Pozo de recarga optimizado Recarga_1.

Descripción de las series: **OPTIMIZACIÓN**, línea azul, representa el comportamiento del nivel freático en el pozo utilizando el modelo de simulación - optimización; **ORIGINAL**, gris punteada, representa el nivel freático utilizando únicamente el modelo de simulación, sin incluir las extracciones o recargas de los pozos optimizados; **RESTRICCIÓN**, línea amarilla, nivel freático establecido como máximo (pozos optimizados de recarga artificial) o mínimo (pozos de extracción optimizados) y; **TOPOGRAFÍA**, naranja discontinua; elevación del nivel topográfico en la celda donde se ubica el pozo.

A)



B)

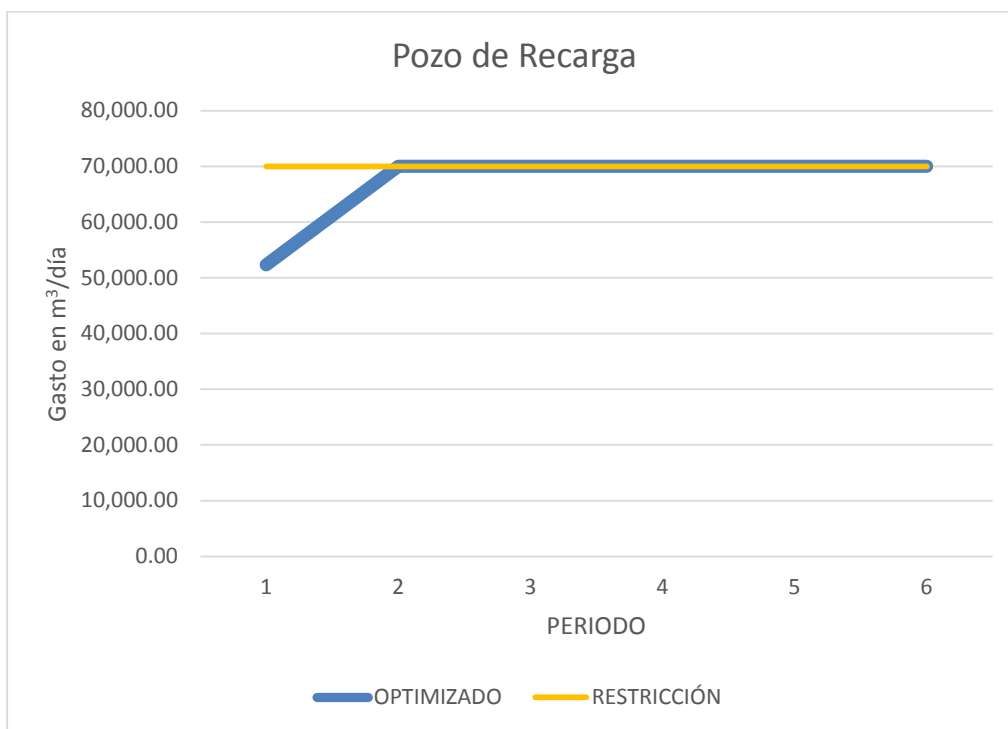


Figura 25.- Gastos de extracción y recarga resultante para los pozos optimizados durante el periodo 1-6 considerando el caso de estudio sintético: A) Pozos de extracción (Pozo_1_Ext hasta Pozo_1_Ext 6), y B) Pozo de recarga Recarga_1).

Descripción de las series: OPTIMIZADO, línea azul, indica el gasto de extracción o recarga resultante de la solución del modelo de simulación – optimización para el pozo analizado y; RESTRICCIÓN, línea amarilla, representa el gasto máximo permitido en el modelo de optimización para este pozo.

V.5. Modelo de optimización en Acuífero Guadalupe

Para la aplicación del modelo de optimización al AG se propusieron 4 escenarios de manejo del agua a futuro para un periodo de 19 años (2017-2035), de los cuales, 2 de ellos contemplan a su vez dos distintas opciones de restricción, cuya diferencia entre ellas radica en que, la primera permite el descenso del nivel freático, en la celda donde se ubican los pozos de extracción optimizados, hasta una profundidad que represente ~80m por debajo del nivel de terreno natural como máximo (restricción de carga *normal*) y la segunda restricción solo permite un descenso de hasta ~6m por debajo del nivel freático observado al inicio de la simulación (restricción de carga *sustentable*). Las diferencias de los escenarios y sus restricciones se describen de manera más detallada a continuación:

V.5.1. Escenario Optimista

Se simuló el flujo subterráneo considerando que la precipitación promedio anual para el periodo 2017-2035 será de 342 mm, con esto se asume que el promedio de lluvia durante el periodo completo analizado en el modelo de simulación - optimización es equivalente al promedio observado durante los años de 1977-2016, por lo que, la recarga natural del acuífero corresponde al producto de tal precipitación afectada por el porcentaje establecido anteriormente (10% de la precipitación que cae directamente en la zona activa del modelo y 7% de lo que se precipita en el resto de la subcuenca Guadalupe), lo que genera una recarga natural anual de 31.1 Mm³. En cuanto a las salidas del modelo los pozos incluidos para este escenario (agrícolas y CESPE) generan una extracción anual de 28.17 Mm³. En este escenario participan los pozos de extracción que actualmente operan en el acuífero y se incluyen, además, 10 pozos de extracción y 5 de recarga artificial optimizados.

V.5.2. Escenario Pesimista

Para este escenario, se evalúa de qué manera se comportaría el acuífero si en la zona se presentaran precipitaciones de acuerdo al comportamiento presentado desde el año 2007-2016, estableciendo un promedio de 266 mm anuales, por lo que la recarga natural del acuífero sería menor a la considerada en el escenario optimista (quedando en 26.51 Mm³/año). La descarga anual generada por los pozos que actualmente se ubican en el acuífero, dentro de la zona activa del modelo, se estableció en 28.17 Mm³ (igual que en el escenario optimista). En este escenario, participan los pozos de extracción que actualmente operan en el acuífero y los 10 pozos de extracción y 5 de recarga artificial optimizados.

V.5.3. Escenario actual (Statu Quo)

En este escenario el promedio de precipitación considerado para establecer la recarga natural es de 266 mm/año, el observado durante el periodo 2007-2016, lo que genera una recarga natural de 26.51 Mm³/año. Aquí, de igual manera, se incluyen los pozos que actualmente operan en la zona; sin embargo, no se incluyen los volúmenes de extracción generados por los pozos de la CESPE, debido a que, por su baja disponibilidad, a últimas fechas estos pozos han dejado de suministrar agua a la ciudad de Ensenada, por lo cual se establece una extracción anual de 20.63 Mm³/año, para este escenario. Otra diferencia con los anteriores escenarios, es que solo se agregan los 10 pozos de extracción optimizados, dejando fuera la opción de recarga artificial.

En la Figura 26 se muestra la ubicación de los 15 pozos propuestos para la optimización.

V.5.4. Escenario de recarga adicional

A diferencia de los escenarios desarrollados anteriormente, los cuales incluyen simulación-optimización para el periodo 2017-2035, en este escenario se realiza la simulación del flujo de agua subterránea considerando una recarga artificial de agua subterránea para el periodo señalado, cuyo volumen adicional por recargarse es agua residual tratada proveniente de la ciudad de Tijuana, BC, México. La recarga natural es de 28.51 Mm³/año, generada por precipitaciones proyectadas con un promedio de 266 mm/año, al igual que en otros escenarios, pero se incluye una recarga adicional generada por la propuesta que existe actualmente por parte de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) de enviar un gasto de 1,000 l/s de agua tratada para uso agrícola en la zona de estudio.

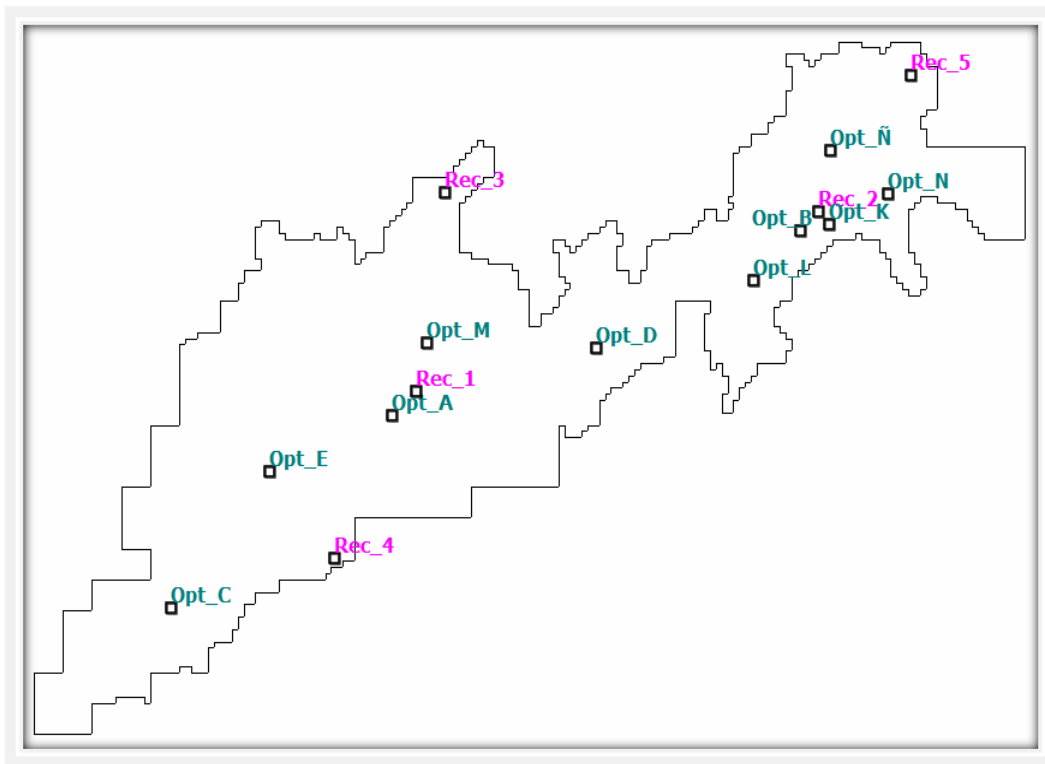


Figura 26.- Ubicación de pozos de extracción y recarga propuestos para el modelo de optimización.

Los 10 pozos en color Verde (Opt_A-Opt_E y Opt_K-Opt_Ñ) son pozos de extracción y los que se encuentran en color magenta (Rec_1 - Rec_5) son pozos de recarga.

V.6. Variables del modelo de optimización

Con la función objetivo (**ecuación 1**) se pretende maximizar el gasto de bombeo de los 10 pozos de extracción y los 5 pozos de recarga propuestos en cada intervalo de tiempo, adicionalmente, a los pozos que ya se encuentran operando dentro del acuífero, los cuales se consideran con la misma tasa de bombeo actual (promedio hasta 2016) para su proyección 2017-2035.

Los intervalos de tiempo que el modelo de optimización tomará en consideración para la solución, se establecieron a manera que representen las dos temporadas de precipitación observadas en el acuífero, temporada seca y temporada de lluvias, por lo que se establece dos periodos anuales con una proyección de 19 años (2017-2035). La manera en que se determinaron los 2 periodos anuales para los que se obtiene la solución óptima de los pozos, está dada por el comportamiento de extracción de los pozos agrícolas, es decir, con base en lo publicado por Campos-Gaytán (2008) se observó que los pozos agrícolas presentan una tasa de extracción del 13% del total anual en los meses donde no ocurren precipitaciones

dentro de la zona del acuífero y en mucho menor magnitud (~2%) en los meses donde sí existen precipitaciones (Figura 27).

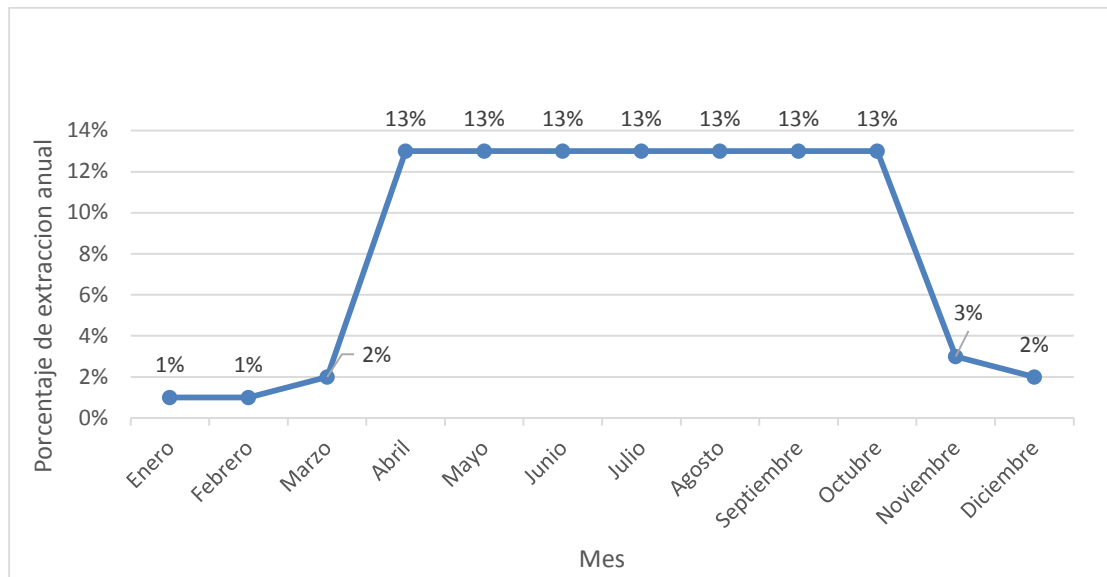


Figura 27.- Comportamiento mensual de extracción de los pozos agrícolas (Campos-Gaytán, 2008).

Debido al comportamiento observado se determinó establecer las variables de decisión (cantidad a extraer de los pozos de optimización) solo en los meses de marzo y octubre de cada año y una última para diciembre de 2035, por lo cual el total de variables es de 585 [(15 pozos optimizados x 2 tasas de extracción al año x 19 años) + (15 referentes a diciembre de 2035 de los 15 pozos)].

Lo anterior se puede interpretar de la siguiente manera: El modelo de optimización nos proporciona el volumen de extracción permitido para marzo y octubre de cada año (2017-2035) y diciembre de 2035 de cada uno de los pozos optimizados. El volumen que nos proporciona el modelo para el mes de marzo de 2017 de determinado pozo, equivale al volumen acumulado hasta ese mes, por lo que se divide entre 3 para conocer la extracción permitida desde ese pozo, en los meses de enero, febrero y marzo de 2017; en el caso de la tasa obtenida para marzo de los siguientes años (2018-2035) se dividió entre 5 para obtener la cantidad a extraer en noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo; la cantidad de agua que se da como solución para el mes de octubre, se divide entre 7 para determinar el volumen de agua óptimo para los meses de abril a octubre del año correspondiente y; por último, lo obtenido para diciembre de

2035 se dividió entre 2 para establecer el volumen de extracción en noviembre y diciembre de ese año. Este mismo criterio se utiliza para los pozos de recarga artificial optimizados.

Establecer de esta manera las variables de decisión permite ahorrar en gran manera el tiempo computacional que se emplea para obtener la solución óptima de cada escenario, debido a que los pozos presentan un comportamiento uniforme y permite realizar este acomodo.

La restricción de variable de decisión (**ecuación 2**) que determina el gasto mínimo y máximo que puede ser extraído o recargado, según el pozo que se analice, se estableció como 0 y 8,000 m³/día, respectivamente. QP_{nmin} se estableció como cero, para asegurar la no negatividad. El gasto máximo de extracción o recarga para cada pozo QP_{nmax} se determinó tomando como base las tasas de extracción registradas históricamente por la CESPE para los pozos ubicados en los distintos acuíferos que suministran agua a la ciudad de Ensenada.

La restricción de suma lineal (**ecuación 3**) se establece para cada intervalo de tiempo analizado y garantiza que el volumen extraído anualmente por todos los pozos sea igual o menor al necesario para cumplir con lo que se tiene asignado por la CONAGUA. Al mismo tiempo la recarga total anual debe ser menor o igual al volumen disponible que producen las plantas de tratamiento que se propone envíen agua a la zona.

Actualmente, el modelo de simulación incluye pozos para extracción de agua de uso agrícola con un promedio de ~21 Mm³/año, más un promedio de ~8 Mm³/año por concepto de suministro de agua a la ciudad de Ensenada desde los pozos de la CESPE, para el periodo de validación 1984-2016. Mientras que, el volumen total concesionado por la CONAGUA para la extracción del acuífero asciende a 40 Mm³/año. Por lo tanto, en este trabajo, se considera satisfacer mediante los pozos optimizados, para el periodo 2017-2035, una demanda anual de aproximadamente 11 Mm³/año, para los escenarios Optimistas y Pesimistas y, 19 Mm³/año para el escenario Statu Quo, debido a que, en este último no se consideran los pozos de CESPE. Para con esto alcanzar el total concesionada por la CONAGUA.

Por otra parte, el volumen objetivo para los pozos de recarga artificial se asume como el disponible en las distintas fuentes que podrían enviar agua al AG, como lo son: agua proveniente de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Antonio de los Buenos (Tijuana), El Sauzal (Ensenada), Francisco Zarco (Local) y La Morita (Tijuana), cuyos aportes acumulan un volumen aproximado de 27 Mm³/año (Tabla XI).

Tabla XI.- Gasto considerado para recarga por fuente

PTAR	Gasto considerado para recarga (m ³ /s)
San Antonio de los Buenos	0.600
La Morita	0.200 *
El Sauzal	0.036
Francisco Zarco	0.015
Total anual	26.8 Mm ³ /año

* Debido a que se encuentran en pláticas para utilizar en riego agrícola directo el volumen que pudiera producirse en La Morita, este gasto se considerara disponible solo por temporal (es decir, únicamente en los meses donde existan precipitaciones en la localidad).

Con esta restricción (**ecuación 3**) se garantiza que la suma total de las extracciones sea igual o menor a la demanda concesionada, y la suma de las recargas sea igual o menor al volumen producido por las plantas de tratamiento.

Al mismo tiempo, esta restricción está sujeta por otra condición: la distribución temporal de los requerimientos de los pozos agrícolas y la disposición mensual del agua tratada producida en las diferentes fuentes disponibles, por lo que la demanda objetivo mensual de extracción y recarga no es constante. Esto obedece a lo observado en la Figura 30, donde se muestran los porcentajes promedio de extracción de los pozos que operan actualmente en la zona del modelo y que se utilizaron para establecer la demanda máxima mensual objetivo y con esto evitar que se esté extrayendo (o recargando, según sea el pozo analizado) un volumen innecesario, es decir, si se observó que en julio, según el comportamiento actual, se extrae el 13% del total anual, este mismo porcentaje se establece para la restricción con respecto a la demanda anual requerida por todos los pozos optimizados, por lo que, para el mes de julio la suma de las extracciones de los pozos optimizados debe ser igual o menor a 2,470,307.84 m³, el 13% de los 19,002,236 m³ establecido como demanda anual objetivo.

Para establecer los porcentajes del volumen máximo mensual a recargar artificialmente, se tomó en consideración el comportamiento de lo generado por las plantas de tratamiento que se involucran en el modelo (mostradas en la Tabla XI), el cual se mantiene de alguna manera constante (7% – 9% mensual).

En la Tabla XII se muestra la distribución mencionada para las demandas incluidas en los escenarios proyectados.

Tabla XII.- Volumen mensual máximo por pozo de optimización.

	Volumen máximo (m³/año)	
	Extracción	Recarga
Enero	190,023.68	2,098,940.94
Febrero	190,023.68	1,979,140.22
Marzo	380,047.36	2,183,419.86
Abril	2,470,307.84	2,122,141.96
Mayo	2,470,307.84	2,208,352.77
Junio	2,470,307.84	2,207,419.00
Julio	2,470,307.84	2,328,307.69
Agosto	2,470,307.84	2,465,826.94
Septiembre	2,470,307.84	2,298,489.67
Octubre	2,470,307.84	2,322,730.92
Noviembre	570,071.04	2,245,884.89
Diciembre	380,047.36	2,366,690.86
Total Anual	19,002,368	26,827,345.73

Como se mencionó con anterioridad, los intervalos de tiempo de análisis para el modelo de optimización se han definido como marzo y octubre de cada año, por lo que el gasto máximo, con base a la información recolectada, que se podría extraer de los pozos de optimización debido a la restricción establecida sería de: 760,095 m³ para marzo del primer año, 17,292,155 m³ para octubre de cada año y 1,710,213 m³ para marzo de cada año (a partir del segundo año de simulación-optimización). De igual manera se considera para los pozos de recarga artificial.

Cabe mencionar que, para este trabajo, se asume que el agua tratada considerada para recarga artificial del acuífero cumple con la calidad requerida por las normas NOM-014-CONAGUA-2003 (SEMARNAT, 2009) y la NOM-015-CONAGUA-2007 (SEMARNAT, 2009), las cuales regulan los requisitos para la recarga artificial con agua tratada y las características de las obras para el mismo fin, en este país.

Por último, para considerar la restricción de carga hidráulica (**ecuación 4**) se manejan dos tipos de restricción, los cuales se definen de la siguiente manera:

1) Restricción de carga *normal*

Para este modelo ***Hmax*** se determina con la elevación del terreno natural menos 3 metros en la celda donde se ubique el pozo de recarga y ***Hmin*** corresponde a 80 m o 30 m (en promedio, según la zona de ubicación del pozo analizado, el primer valor es para los pozos ubicados en la zona Calafia y el segundo para los ubicados en la zona El Porvenir) por debajo de la cota de la superficie topográfica. Lo anterior, se ha definido con la finalidad de que la elevación del nivel freático, debido a la recarga artificial, no alcance el nivel en el que se activan las pérdidas por evapotranspiración durante la simulación, que es cuando el agua dentro del acuífero podría alcanzar los 3 m de profundidad con respecto a la superficie topográfica. En cambio, para los pozos de extracción los 80 o 30 m que determinan la restricción, es la profundidad promedio a la que se tienen habilitados actualmente los pozos de extracción existentes en la zona Calafia y El Porvenir, respectivamente. Esta restricción la revisará el modelo dos veces al año, en los meses de marzo y octubre.

Estas elevaciones del nivel freático permitido se establecen de manera constante para todo el periodo de la simulación-optimización (2017-2035), como se muestran en la Tabla XIII.

Tabla XIII.- Elevación del nivel freático resultante permitido en cada pozo donde se establece una restricción de carga hidráulica para la *restricción normal*.

No.	Pozo	Tipo	Ubicación		Nivel límite msmm
			Renglón	Columna	
1	Opt A	Extracción	64	67	≥ 245
2	Opt B	Extracción	34	137	≥ 200
3	Opt C	Extracción	95	29	≥ 285
4	Opt D	Extracción	53	102	≥ 290
5	Opt E	Extracción	73	46	≥ 285
6	Rec 1	Recarga	60	71	≤ 317
7	Rec 2	Recarga	31	140	≤ 342
8	Rec 3	Recarga	28	76	≤ 347
9	Rec 4	Recarga	87	57	≤ 317
10	Rec 5	Recarga	9	156	≤ 377
11	Opt K	Extracción	33	142	≥ 240
12	Opt L	Extracción	42	129	≥ 240
13	Opt M	Extracción	52	73	≥ 270
14	Opt N	Extracción	28	152	≥ 300
15	Opt Ñ	Extracción	21	142	≥ 200

2) Restricción de carga *sustentable*:

En esta condición ***Hmax*** se establece con base en el nivel freático que presenta el acuífero al inicio de la simulación-optimización (enero de 2017), permitiendo un descenso máximo de 6 m de este nivel (este valor permite “absorber” las fluctuaciones en el nivel freático que se pudieran presentar incluso sin el modelo de optimización, es decir, por la propia naturaleza del acuífero, evitando que se genere una violación a esta restricción); con esto se busca mantener, recargar o lograr un descenso mínimo en los niveles actuales del acuífero al mismo tiempo que se logra la extracción total anual de los 40 Mm³ que se establecieron como demanda de extracción máxima. En la Tabla XIV se muestra las elevaciones del nivel freático establecidas para esta restricción *sustentable*.

Tabla XIV.- Elevaciones del nivel freático definidas para cada pozo donde se ha fijado una restricción de carga hidráulica para la restricción sustentable.

No.	Pozo	Tipo	Ubicación		Nivel límite msmm
			Renglón	Columna	
1	Opt A	Extracción	64	67	≥ 305
2	Opt B	Extracción	34	137	≥ 318
3	Opt C	Extracción	95	29	≥ 302
4	Opt D	Extracción	53	102	≥ 313
5	Opt E	Extracción	73	46	≥ 305
6	Rec 1	Recarga	60	71	≤ 317
7	Rec 2	Recarga	31	140	≤ 342
8	Rec 3	Recarga	28	76	≤ 347
9	Rec 4	Recarga	87	57	≤ 317
10	Rec 5	Recarga	9	156	≤ 377
11	Opt K	Extracción	33	142	≥ 319
12	Opt L	Extracción	42	129	≥ 318
13	Opt M	Extracción	52	73	≥ 305
14	Opt N	Extracción	28	152	≥ 322
15	Opt Ñ	Extracción	21	142	≥ 319

En resumen, los escenarios de manejo del agua a futuro aplicados al AG que fueron estudiados en esta tesis son:

Escenario 1: Este escenario asume condiciones promedio del periodo 1977-2016, es decir, es un escenario Optimista que considera una recarga natural base igual a 31.1 Mm³/año y una descarga igual a 28.17 Mm³/año; además, considera una restricción de carga *normal*.

Escenario 2: En este escenario se asume condiciones promedio (similares a las del escenario 1); sin embargo, aquí se considera una restricción de carga *sustentable*.

Escenario 3: Este escenario asume condiciones promedio del periodo 2007-2016, es decir, es un escenario Pesimista que considera una recarga natural igual a 26.51 Mm³/año y una descarga igual a 28.17 Mm³/año; además, considera una restricción de carga *normal*.

Escenario 4: En este escenario se asume condiciones promedio similares a las del escenario 3 (promedio del periodo 2007-2016); sin embargo, aquí se considera una restricción de carga *sustentable*.

Escenario 5: Este escenario asume condiciones promedio del periodo 2007-2016 en cuanto a la recarga natural (26.51 Mm³/año) y la descarga de los pozos actuales de 20.63 Mm³/año, es decir, es el escenario Statu Quo; además, considera una restricción de carga *normal*.

Escenario 6: En este escenario se asume condiciones promedio del periodo 2007-2016 (26.51 Mm³/año recargados naturalmente) y la descarga generada por los pozos actuales de 20.63 Mm³/año; además, se considera la recarga artificial adicional de un volumen de agua residual tratada equivalente a 1,000 l/s (31.54 Mm³/año).

Las demás condiciones, tal como función objetivo y restantes restricciones se mantienen constantes para todos los escenarios.

VI. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS OPTIMIZADOS

El modelo de optimación se resuelve mediante Programación No Lineal, SLP, y el proceso de simulación-optimización tarda 9 hr y 40 min para encontrar la solución de cada uno de los escenarios, casos Optimistas y Pesimistas; mientras que, para encontrar la solución del escenario Statu Quo se invierte 5 hr con 25 min. El equipo utilizado cuenta con un procesador Intel® Xeon® @3.50 GHz y 4 Gb de memoria RAM.

VI.1. Escenario 1: Escenario optimista, recarga natural de 31.1 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.1 Mm³/año, y restricción de carga normal

Al aplicar el modelo de simulación-optimización a este escenario se logró un volumen total de extracción anual de 40.0 Mm³; es decir, lo establecido como máximo para la función objetivo. De los pozos de extracción optimizados se obtiene un volumen de 11.8 Mm³ anuales en promedio. Con respecto a los

pozos de recarga artificial, el modelo permite un volumen de recarga anual promedio de 16.2 Mm³. El cual, no corresponde al volumen máximo disponible; no obstante, si representa el volumen máximo necesario para cumplir con las restricciones planteadas. En las Tablas XV y XVI se muestra una comparativa anual entre los modelos de simulación originales y los volúmenes obtenidos para los pozos incluidos en la optimización (los volúmenes son anuales durante el periodo completo de simulación-optimización).

Tabla XV.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 1 con restricción de carga normal.

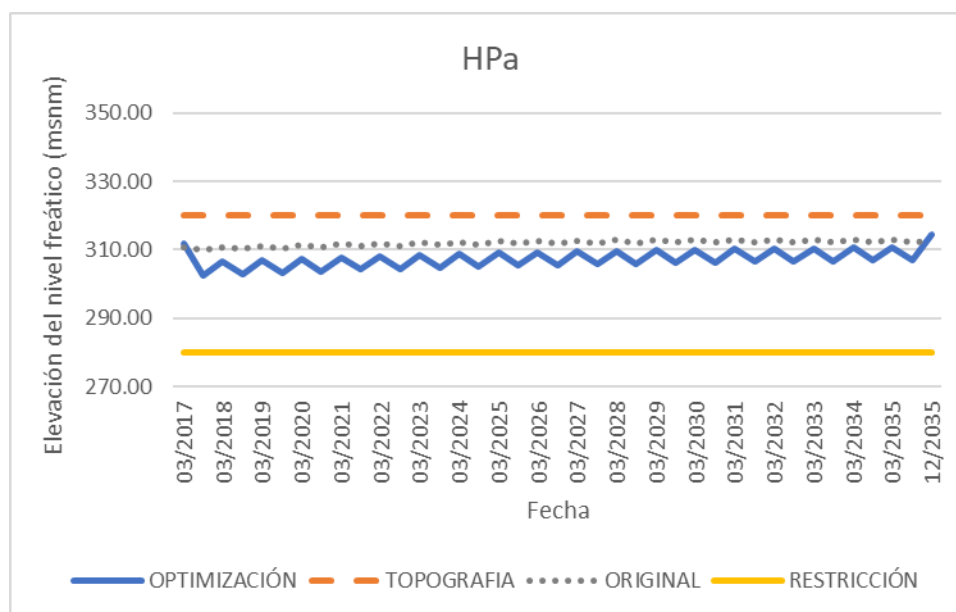
Año	Entradas			Salidas		
	Pozos Recarga Optimización	Recarga Natural	Total	Pozos Extracción Originales	Pozos Optimización	Total
	<i>P.R.O.</i>	<i>R.N.</i>	<i>P.R. + R.N.</i>	<i>P.E.</i>	<i>P.E.O.</i>	<i>P.E. + P.E.O.</i>
2017	15,511,296.00	31,100,138.00	46,611,434.00	28,173,668.00	11,235,228.00	39,408,896.00
2018	17,616,276.00	31,100,142.00	48,716,418.00	28,173,672.00	11,826,560.00	40,000,232.00
2019	17,333,112.00	31,100,128.00	48,433,240.00	28,173,660.00	11,826,556.00	40,000,216.00
2020	17,039,148.00	31,100,128.00	48,139,276.00	28,173,664.00	11,826,544.00	40,000,208.00
2021	16,777,848.00	31,100,152.00	47,878,000.00	28,173,672.00	11,826,536.00	40,000,208.00
2022	16,546,424.00	31,100,160.00	47,646,584.00	28,173,648.00	11,826,560.00	40,000,208.00
2023	16,341,720.00	31,100,160.00	47,441,880.00	28,173,648.00	11,826,560.00	40,000,208.00
2024	16,158,616.00	31,100,160.00	47,258,776.00	28,173,648.00	11,826,544.00	40,000,192.00
2025	16,008,808.00	31,100,176.00	47,108,984.00	28,173,648.00	11,826,544.00	40,000,192.00
2026	15,883,216.00	31,100,160.00	46,983,376.00	28,173,616.00	11,826,576.00	40,000,192.00
2027	15,763,872.00	31,100,160.00	46,864,032.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2028	15,662,208.00	31,100,160.00	46,762,368.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2029	15,564,192.00	31,100,160.00	46,664,352.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2030	15,474,032.00	31,100,160.00	46,574,192.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2031	15,401,616.00	31,100,160.00	46,501,776.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2032	15,316,320.00	31,100,160.00	46,416,480.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2033	15,256,624.00	31,100,160.00	46,356,784.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2034	15,179,296.00	31,100,064.00	46,279,360.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2035	19,717,088.00	31,100,096.00	50,817,184.00	28,169,600.00	12,421,952.00	40,591,552.00
Promedio	16,239,563.79	31,100,146.53	47,339,710.32	28,173,445.05	11,826,770.53	40,000,215.58

Tabla XVI.- Comparativa de extracciones y recarga aplicando el modelo de simulación-optimización (m³).

<i>ORIGINAL</i>		<i>OPTIMIZACIÓN</i>	
Entradas:		Entradas:	
RECARGA (NATURAL)	= 31,100,146.53	RECARGA (NATURAL)	= 31,100,146.53
		POZOS DE RECARGA ARTIFICIAL OPTIMIZADOS	= 16,239,563.79
PROMEDIO POR AÑO	= 31,100,146	PROMEDIO POR AÑO	= 47,339,710.32
Salidas:		Salidas:	
POZOS	= 28,173,445.05	POZOS	= 28,173,445.05
		POZOS DE DESCARGA OPTIMIZADOS	= 11,826,770.53
PROMEDIO POR AÑO	= 28,173,445.05	PROMEDIO POR AÑO	= 40,000,215.58

Las restricciones de carga establecidas (elevaciones del nivel freático) para este escenario se cumplieron en cada uno de los pozos. En la Figura 28 se muestra la evolución del nivel freático en algunos de los pozos de extracción y recarga para el periodo completo de simulación-optimización (con base en el escenario analizado). Mientras que, en el Apéndice B se muestra las gráficas de resultados del total de los pozos para este escenario.

A)



B)

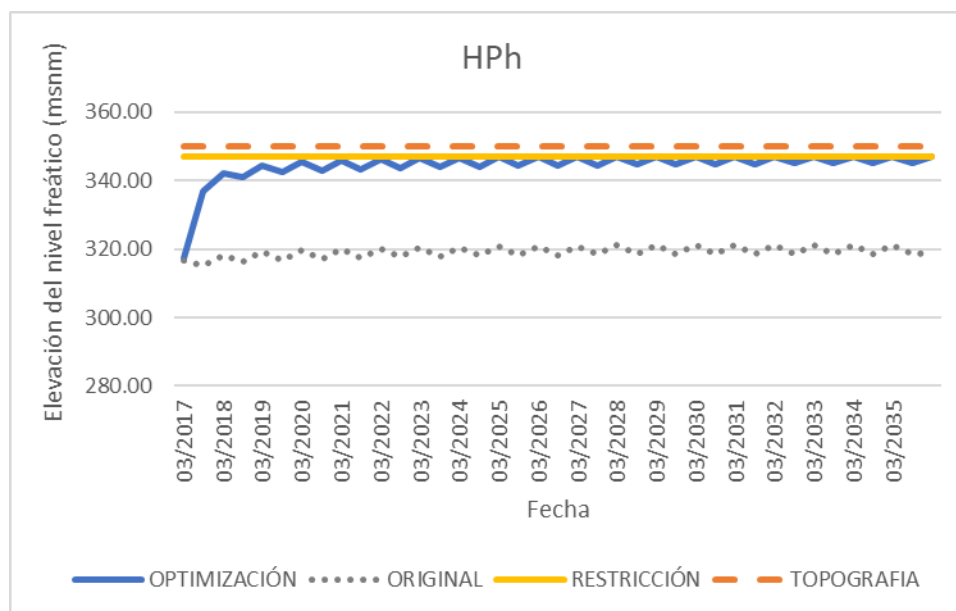


Figura 28.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en los pozos optimizados durante el periodo 2017-2035 para el escenario 1: A) Pozo de extracción optimizado HPa, y B) Pozo de recarga optimizado HPh.

Descripción de las series: OPTIMIZACIÓN, línea azul, representa el comportamiento del nivel freático en el pozo utilizando el modelo de simulación - optimización; ORIGINAL, gris punteada, representa el nivel freático utilizando únicamente el modelo de simulación, sin incluir las extracciones o recargas de los pozos optimizados; RESTRICCIÓN, línea amarilla, nivel freático establecido como máximo (pozos optimizados de recarga artificial) o mínimo (pozos de extracción optimizados) y; TOPOGRAFÍA, naranja discontinua; elevación del nivel topográfico en la celda donde se ubica el pozo.

Por otra parte, en la Figura 29 se puede observar el ritmo de extracción para los pozos optimizados, así como la restricción definida para cada uno de ellos. Con base en este ritmo, se puede comprobar que el gasto de extracción o recarga no rebasa el máximo permitido. Nuevamente, el resto de las gráficas correspondientes a los gastos de los pozos de extracción y recarga se muestran en el Apéndice C.

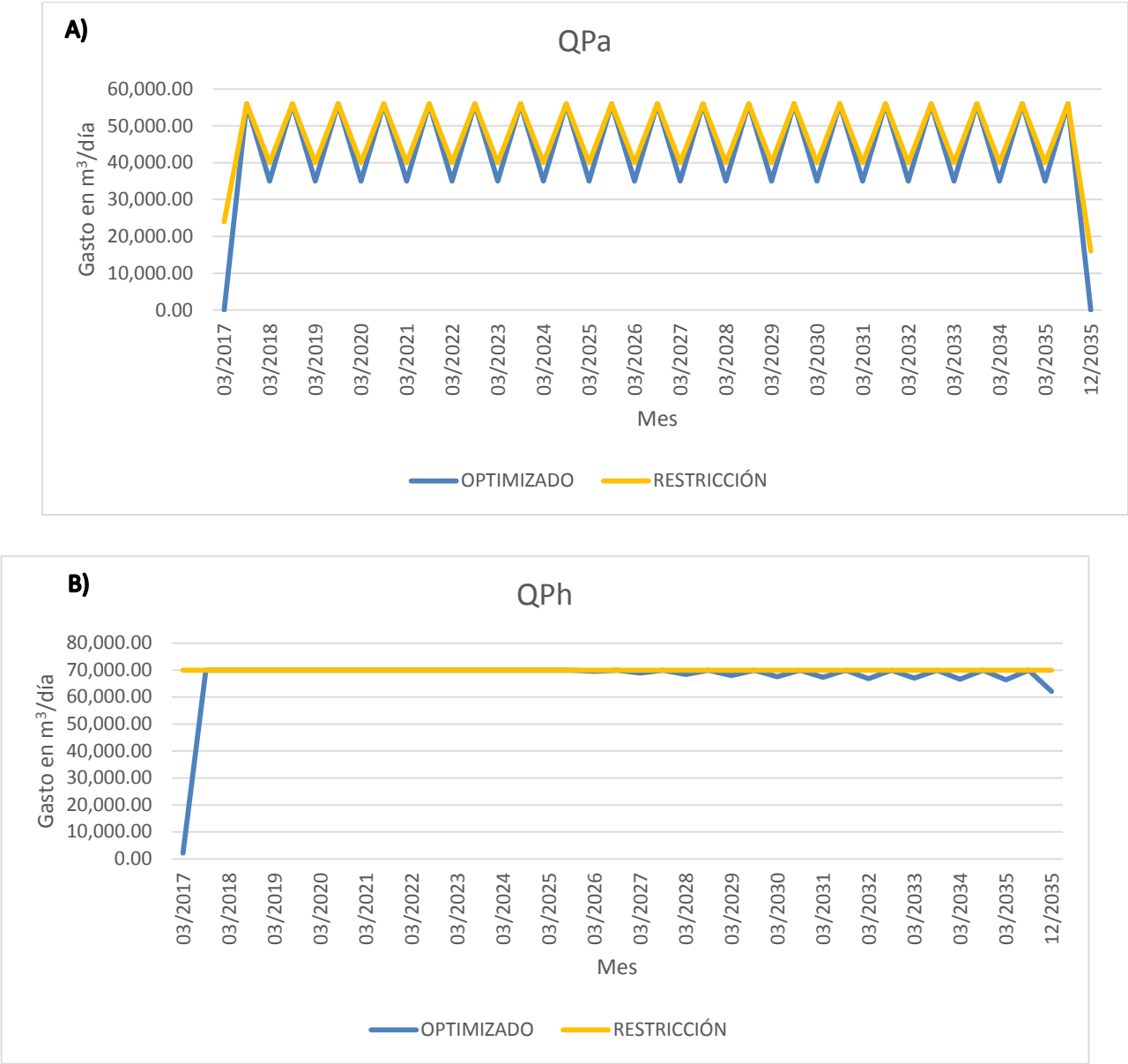


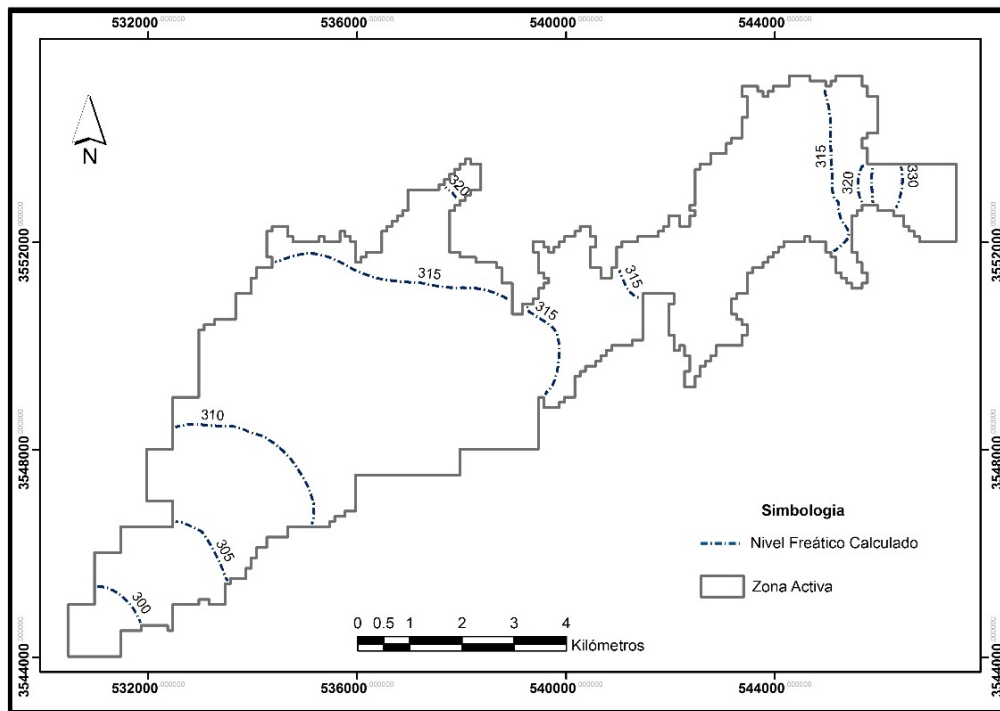
Figura 29.- Gastos de extracción y recarga resultante para los pozos optimizados durante el periodo 2017-2035 considerando el escenario 1: A) Pozo de extracción QPa, y B) Pozo de recarga QPh.

Descripción de las series: **OPTIMIZADO**, línea azul, indica el gasto de extracción o recarga resultante de la solución del modelo de simulación – optimización para el pozo analizado, y **RESTRICCIÓN**, línea amarilla, representa el gasto máximo permitido en el modelo de optimización para este pozo.

En la Figura 29 (inciso B) se muestra que el pozo de recarga artificial “h” (QPh) alcanza el gasto máximo definido en la restricción (de manera similar al comportamiento del gasto observado en los pozos de recarga artificial “g” y “j”). Siendo éste el motivo principal por el cual no se alcanza el volumen máximo de recarga que se tiene disponible de las distintas plantas de tratamiento incluidas como fuente de abastecimiento durante el periodo completo de simulación-optimización.

Por otra parte, en la Figura 30 se muestra el nivel freático simulado sin el modelo de optimización y la diferencia de nivel que se genera utilizando el modelo de optimización. Se puede observar que existe una recuperación en el acuífero como resultado de la recarga artificial y al mismo tiempo se logra extraer el volumen adicional concesionado.

A)



B)

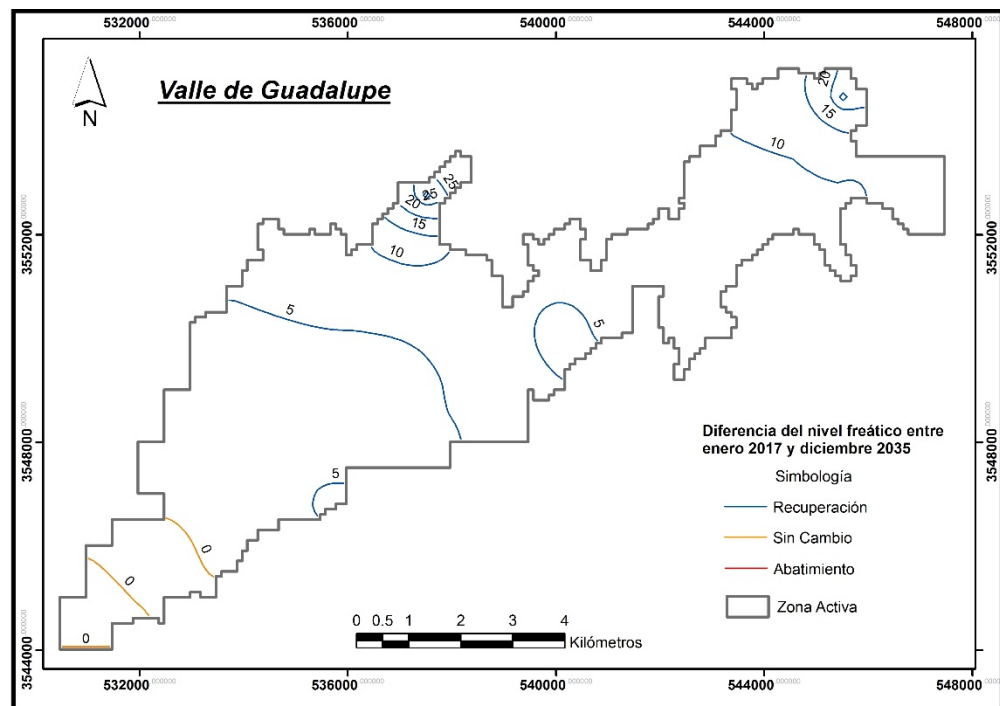


Figura 30.- A) Elevaciones del nivel freático calculadas para diciembre de 2035. La cual, ha sido evaluada considerando únicamente la simulación del flujo de agua subterránea en el AG con una condición optimista del comportamiento en el acuífero, pero sin incluir el proceso de optimización, y B) Diferencia entre las elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y aquellas que resultaron del proceso de simulación-optimización considerando el escenario 1 para diciembre de 2035.

Las líneas en color azul representan una recuperación en el nivel freático resultante; las líneas en color amarillo indican las zonas donde el nivel freático resultante final es igual al inicial, y las curvas en color rojo indican un abatimiento en el nivel freático.

VI.2. Escenario 2: Escenario optimista, recarga natural de 31.1 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.1 Mm³/año, y restricción de carga sustentable.

Con base en los resultados de la simulación-optimización considerando el escenario 2, el volumen anual de extracción total promedio es de 39.4 Mm³ (es decir, este volumen se redujo en 0.6 Mm³/año con respecto al obtenido en los resultados del escenario 1) (Tabla XVII). Mientras que, el volumen óptimo de recarga artificial anual promedio es de 15.45 Mm³ (es decir, este volumen disminuyó en 0.75 Mm³/año con respecto al obtenido para el escenario 1).

Tabla XVII.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 1 con restricción de carga sustentable.

Año	Entradas			Salidas		
	Pozos Recarga Optimización	Recarga Natural	Total	Pozos extracción	Pozos Optimización	Total
	P.R.O.	R.N.	P.R. + R.N.	P.E.	P.E.O.	P.E. + P.E.O.
2017	15,316,316.00	31,100,138.00	46,416,454.00	28,173,668.00	7,354,480.00	35,528,148.00
2018	17,185,976.00	31,100,142.00	48,286,118.00	28,173,672.00	8,788,516.00	36,962,188.00
2019	16,752,436.00	31,100,128.00	47,852,564.00	28,173,660.00	9,699,100.00	37,872,760.00
2020	16,358,956.00	31,100,128.00	47,459,084.00	28,173,664.00	10,459,576.00	38,633,240.00
2021	16,025,188.00	31,100,152.00	47,125,340.00	28,173,672.00	10,996,232.00	39,169,904.00
2022	15,740,896.00	31,100,160.00	46,841,056.00	28,173,648.00	11,376,208.00	39,549,856.00
2023	15,472,360.00	31,100,160.00	46,572,520.00	28,173,648.00	11,679,696.00	39,853,344.00
2024	15,258,728.00	31,100,160.00	46,358,888.00	28,173,648.00	11,826,576.00	40,000,224.00
2025	15,087,832.00	31,100,176.00	46,188,008.00	28,173,648.00	11,826,544.00	40,000,192.00
2026	14,951,584.00	31,100,160.00	46,051,744.00	28,173,616.00	11,826,576.00	40,000,192.00
2027	14,837,360.00	31,100,160.00	45,937,520.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2028	14,749,152.00	31,100,160.00	45,849,312.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2029	14,675,920.00	31,100,160.00	45,776,080.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2030	14,617,472.00	31,100,160.00	45,717,632.00	28,173,664.00	11,826,528.00	40,000,192.00
2031	14,575,728.00	31,100,160.00	45,675,888.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2032	14,527,712.00	31,100,160.00	45,627,872.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2033	14,501,568.00	31,100,160.00	45,601,728.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2034	14,459,664.00	31,100,064.00	45,559,728.00	28,173,664.00	11,826,592.00	40,000,256.00
2035	19,028,928.00	31,100,096.00	50,129,024.00	28,169,600.00	12,421,952.00	40,591,552.00
Promedio	15,480,198.74	31,100,146.53	46,580,345.26	28,173,445.05	11,203,575.58	39,377,020.63

Los resultados del escenario 2 sugieren que se lograría evitar el descenso de los niveles actuales, o al menos mantenerlos en un margen mínimo, y prácticamente alcanzar el volumen de extracción máximo

buscado, si ocurrieran las condiciones planteadas para este escenario. Obviamente, lo anterior se logra por el volumen de recarga artificial que ingresa al acuífero y la condición optimista en cuanto a las precipitaciones que se consideran para este escenario.

Con las restricciones de carga hidráulica definidas para el escenario 2 se pretende evitar o lograr un mínimo descenso de la elevación del nivel freático que se presenta al inicio de la simulación (enero de 2017). De acuerdo con los resultados de este escenario, dicho objetivo ha sido alcanzado. En la Figura 31 se muestra el comportamiento de la elevación del nivel freático y las restricciones de algunos pozos utilizados para este escenario. En el Apéndice D se muestra todas las gráficas de este tipo generadas para el escenario 2.

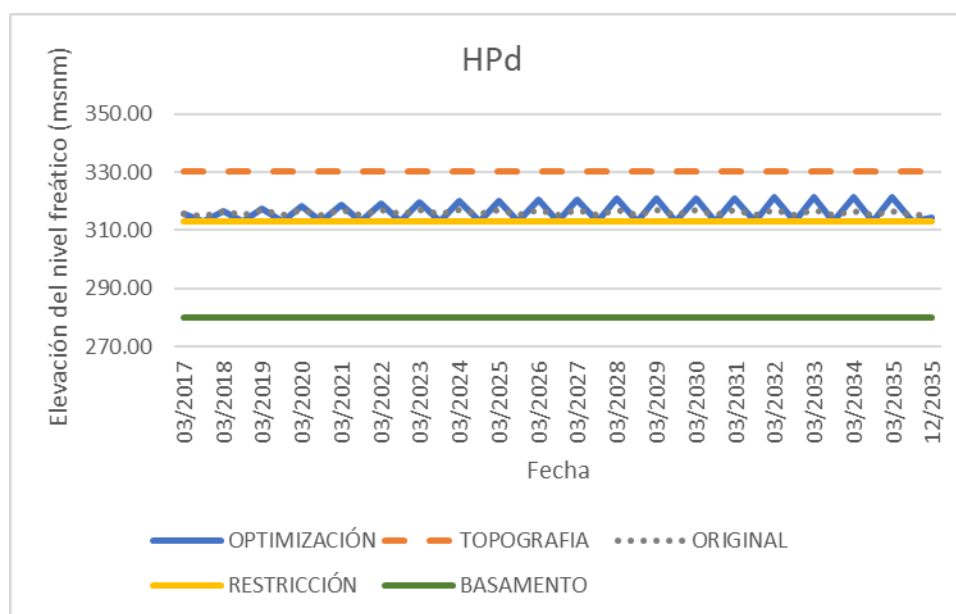


Figura 31.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en el pozo “d” (QPd) para el escenario 2.

Descripción de las series: OPTIMIZACIÓN, línea azul, representa el comportamiento del nivel freático en el pozo utilizando el modelo de simulación - optimización; TOPOGRAFÍA, naranja discontinua; elevación del nivel topográfico en la celda donde se ubica el pozo; ORIGINAL, gris punteada, representa el nivel freático utilizando únicamente el modelo de simulación, sin incluir las extracciones o recargas de los pozos optimizados; RESTRICCIÓN, línea amarilla, nivel freático establecido como máximo (pozos optimizados de recarga artificial) o mínimo (pozos de extracción optimizados), y BASAMENTO, línea verde, representa el nivel al cual se encuentra el basamento impermeable en la celda donde se ubica el pozo analizado.

En algunos de los pozos, no se alcanza el gasto de extracción máximo permitido, debido a que, primero se alcanza la restricción de carga hidráulica, tal como es el caso del pozo “d” (QPd; Figura 32); lo anterior

cobra sentido si recordamos que la finalidad más relevante de este escenario es mantener en un rango mínimo el descenso del nivel freático dentro del acuífero, mediante la inclusión de restricciones sustentables. Este comportamiento se observó en los demás pozos (Apéndice E) y, en general, en los escenarios donde se incluyeron estas restricciones sustentables. Este mismo tipo de limitante es la causante de que no se alcance el volumen máximo establecido como demanda a satisfacer de 40 Mm³/año.

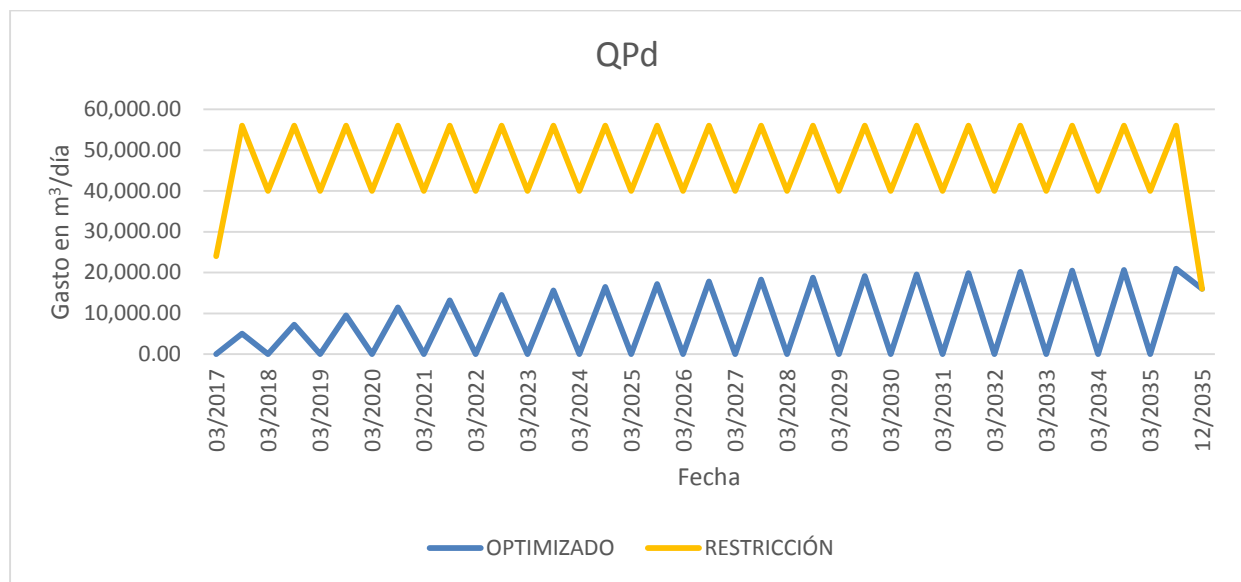


Figura 32.- Gastos de extracción para el pozo “d” (QPd) durante el escenario 2.

Descripción de las series: OPTIMIZADO, línea azul, indica el gasto de extracción o recarga resultante de la solución del modelo de simulación – optimización para el pozo analizado y; RESTRICCIÓN, línea amarilla, representa el gasto máximo permitido en el modelo de optimización para este pozo.

La diferencia de elevaciones del nivel freático entre lo simulado en enero de 2017, contra los simulado-optimizado para diciembre de 2035 se muestra en la Figura 33. En la cual, se puede observar una recuperación, por lo que, se ha logrado el objetivo con las restricciones definidas para este escenario.

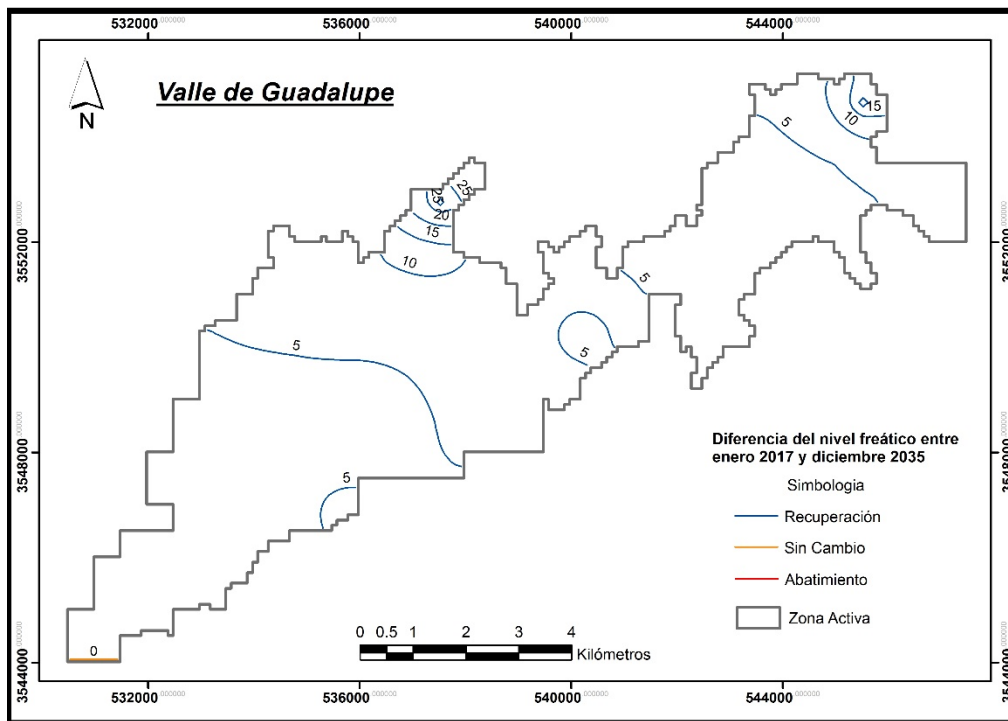


Figura 33.- Diferencia del nivel freático entre enero de 2017 y diciembre de 2035 aplicando el modelo de optimización (escenario 2).

Las líneas en color azul representan una recuperación en el nivel freático resultante; las líneas en color amarillo indican las zonas donde el nivel freático resultante final es igual al inicial, y las curvas en color rojo indican un abatimiento en el nivel freático.

VI.3. Escenario 3: Escenario pesimista, recarga natural de 26.51 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.17 Mm³/año y; restricción de carga normal.

Para este escenario 3 (el primero de la condición Pesimista), el modelo de simulación-optimización generó una extracción igual a la demanda anual establecida como función objetivo. En cuanto a los pozos de recarga artificial incluidos en la optimización de este escenario, éstos recargan, como se muestra en la Tabla XVIII, en promedio 17.2 Mm³/año (es decir, los pozos considerados en este escenario logran en promedio hasta un millón de metros cúbicos anuales, adicionales a los alcanzados en el escenario 1).

Tabla XVIII.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 3 con restricción de carga normal.

Año	Entradas			Salidas		
	Pozos Recarga Optimización	Recarga Natural	Total	Pozos extracción	Pozos Optimización	Total
	P.R.O.	R.N.	P.R. + R.N.	P.E.	P.E.O.	P.E. + P.E.O.
2017	15,615,678.00	26,515,440.00	42,131,118.00	28,173,668.00	11,235,228.00	39,408,896.00
2018	17,801,006.00	26,515,436.00	44,316,442.00	28,173,672.00	11,826,560.00	40,000,232.00
2019	17,547,340.00	26,515,444.00	44,062,784.00	28,173,660.00	11,826,556.00	40,000,216.00
2020	17,221,968.00	26,515,440.00	43,737,408.00	28,173,664.00	11,826,544.00	40,000,208.00
2021	16,631,528.00	26,515,440.00	43,146,968.00	28,173,672.00	11,826,536.00	40,000,208.00
2022	16,235,736.00	26,515,440.00	42,751,176.00	28,173,648.00	11,826,560.00	40,000,208.00
2023	16,319,960.00	26,515,440.00	42,835,400.00	28,173,648.00	11,823,296.00	39,996,944.00
2024	16,543,504.00	26,515,440.00	43,058,944.00	28,162,272.00	11,835,616.00	39,997,888.00
2025	16,627,616.00	26,515,440.00	43,143,056.00	28,120,768.00	11,877,280.00	39,998,048.00
2026	16,690,096.00	26,515,440.00	43,205,536.00	28,073,392.00	11,925,808.00	39,999,200.00
2027	16,836,736.00	26,515,392.00	43,352,128.00	28,037,280.00	11,962,912.00	40,000,192.00
2028	17,016,640.00	26,515,392.00	43,532,032.00	28,010,752.00	11,989,440.00	40,000,192.00
2029	17,099,536.00	26,515,392.00	43,614,928.00	27,995,360.00	12,004,832.00	40,000,192.00
2030	17,066,064.00	26,515,392.00	43,581,456.00	27,986,400.00	12,013,792.00	40,000,192.00
2031	17,011,152.00	26,515,392.00	43,526,544.00	27,981,088.00	12,019,168.00	40,000,256.00
2032	17,217,008.00	26,515,392.00	43,732,400.00	27,977,536.00	12,022,720.00	40,000,256.00
2033	17,308,992.00	26,515,392.00	43,824,384.00	27,975,136.00	12,025,120.00	40,000,256.00
2034	17,364,800.00	26,515,392.00	43,880,192.00	27,973,344.00	12,026,912.00	40,000,256.00
2035	21,920,064.00	26,515,392.00	48,435,456.00	27,972,096.00	12,619,456.00	40,591,552.00
Promedio	17,161,864.42	26,515,417.26	43,677,281.68	28,077,950.32	11,921,807.16	39,999,757.47

En la Figura 34 se muestra la evolución del pozo “d” utilizando el modelo de optimización para el escenario 3 en el periodo 2017-2035. En el Apéndice F se muestran todas las gráficas generadas para este escenario 3, en cuanto a esta restricción se refiere.

En la Figura 35 se observa el comportamiento del pozo “d” frente a la restricción de variable de decisión (**ecuación 2**), que establece el volumen máximo que se puede extraer, la cual no se alcanza en ningún punto del periodo de simulación - optimización, debido a que se llega primero a la restricción de carga hidráulica (Figura 34). Esta situación, únicamente, sucede para este pozo, ya que, los demás alcanzan primero la restricción de extracción máxima. El resto de las gráficas de este tipo, para el escenario 3, se incluyen en el Apéndice G.

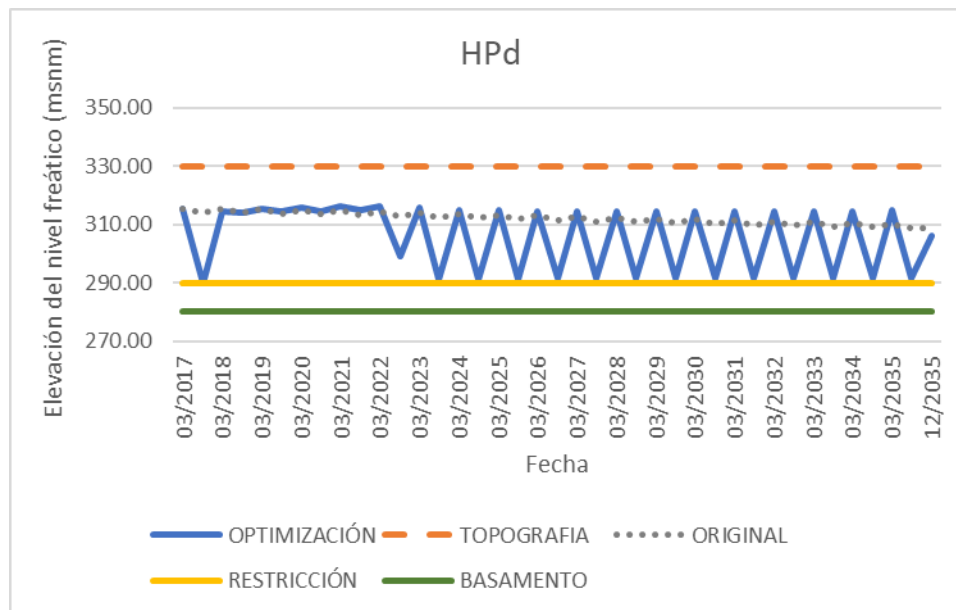


Figura 34.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en el pozo “d” (HPd) para el escenario 3.

Descripción de las series: **OPTIMIZACIÓN**, línea azul, representa el comportamiento del nivel freático en el pozo utilizando el modelo de simulación - optimización; **TOPOGRAFÍA**, naranja discontinua, elevación del nivel topográfico en la celda donde se ubica el pozo; **ORIGINAL**, gris punteada, representa el nivel freático utilizando únicamente el modelo de simulación, sin incluir las extracciones o recargas de los pozos optimizados; **RESTRICCIÓN**, línea amarilla, nivel freático establecido como máximo (pozos optimizados de recarga artificial) o mínimo (pozos de extracción optimizados), y **BASAMENTO**, línea verde, representa el nivel al cual se encuentra el basamento impermeable en la celda donde se ubica el pozo analizado.

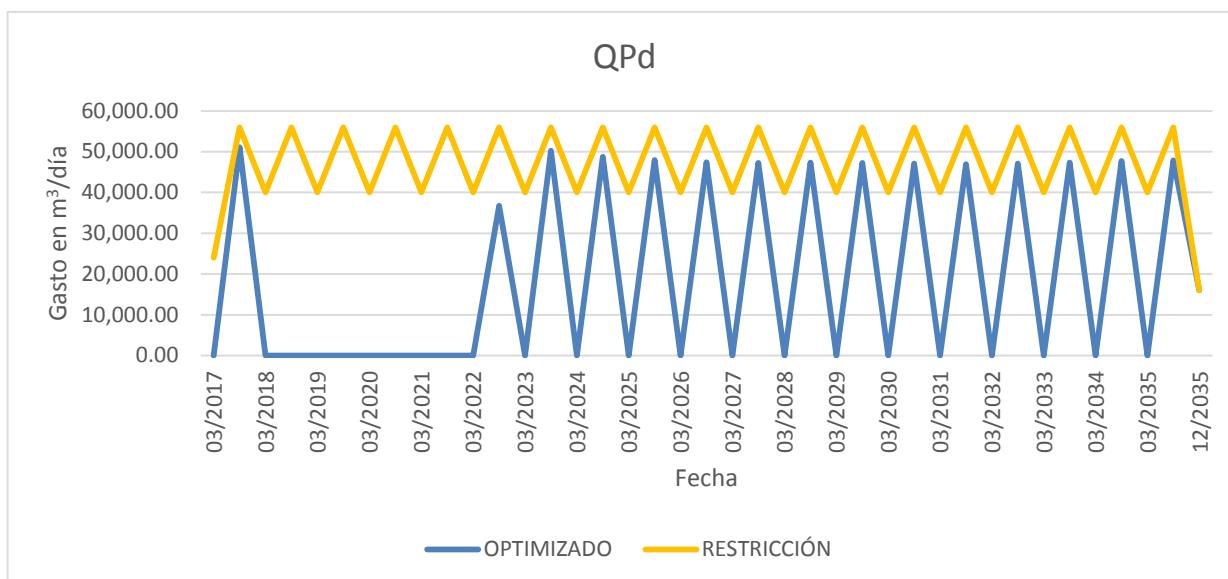


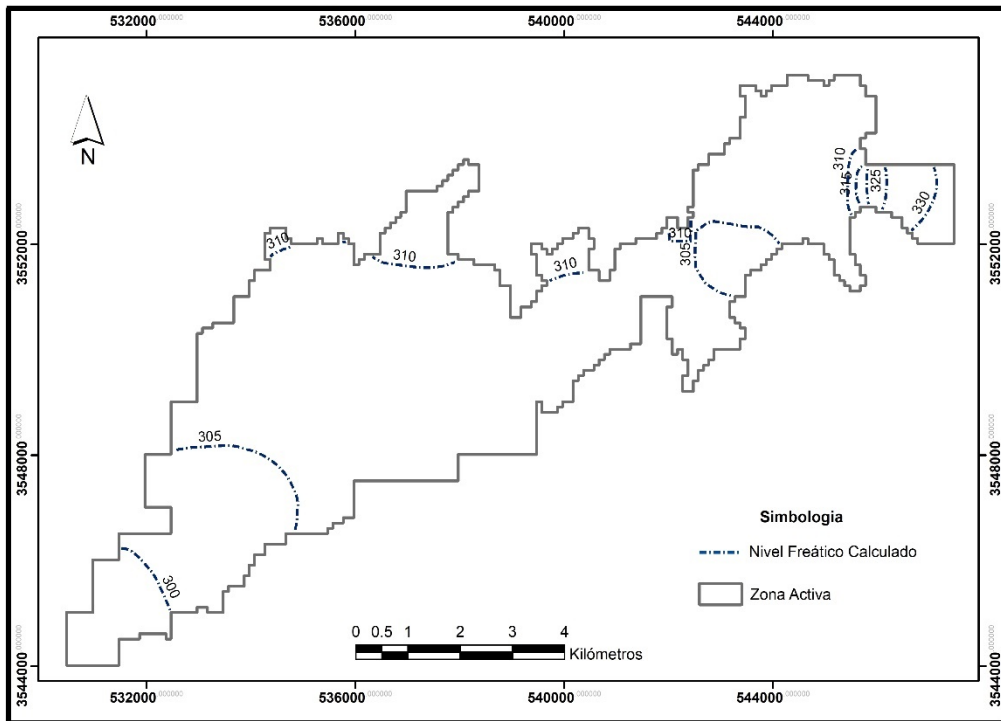
Figura 35.- Gastos de extracción para el pozo “d” (QPd) durante el escenario 3.

Descripción de las series: **OPTIMIZADO**, línea azul, indica el gasto de extracción o recarga resultante de la solución del modelo de simulación – optimización para el pozo analizado, y **RESTRICCIÓN**, línea amarilla, representa el gasto máximo permitido en el modelo de optimización para este pozo.

Como resultado de la simulación del escenario 3, sin considerar el proceso de optimización, se obtiene las elevaciones del nivel freático presentadas en la Figura 36 (inciso A). En cambio, en la Figura 36 (inciso B) se muestra la diferencia de elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y aquellas que resultaron de la simulación-optimización para diciembre de 2035 considerando el escenario 3.

Con base en los resultados del escenario 3, se puede observar que, como consecuencia de la disminución de la recarga natural se producen zonas en las que existe una disminución en la elevación de los niveles freáticos a lo largo del periodo de simulación-optimización, sobre todo en la zona noreste del modelo (Zona Calafia), lo cual no se presentaba en los anteriores escenarios (Figura 30, inciso B y Figura 33). A pesar de lo anterior, predominan las zonas con recuperación del nivel freático, al igual que en los escenarios anteriores, aunque no en igual magnitud.

A)



B)

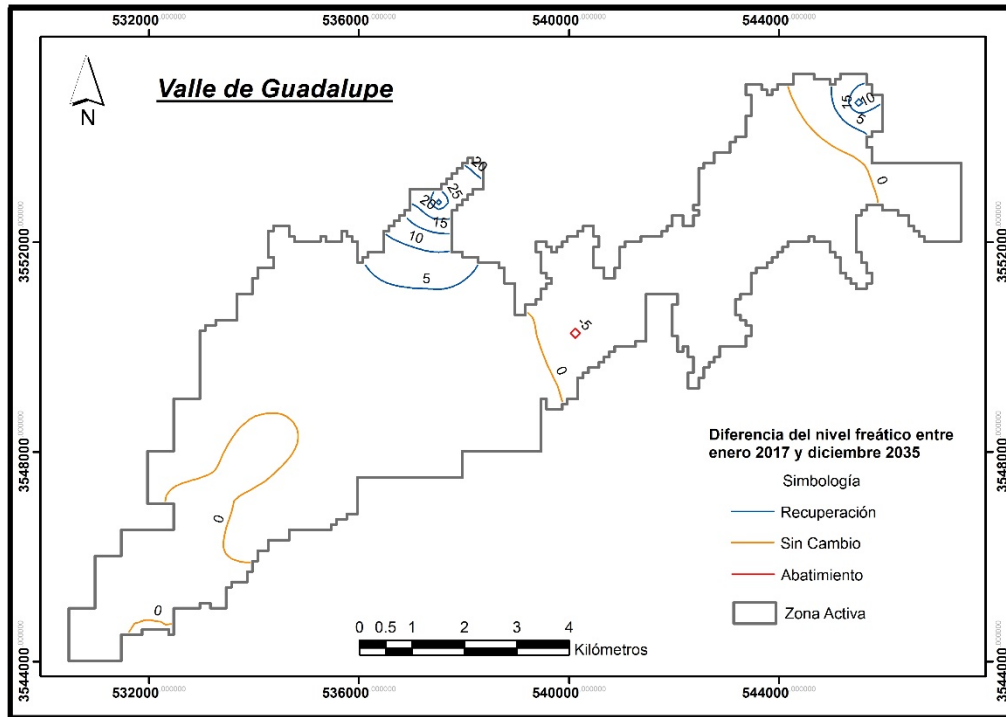


Figura 36.- A) Elevación del nivel freático calculado para diciembre de 2035, considerando la ocurrencia de una condición pesimista en el acuífero y sin incluir el proceso de optimización. B) Diferencia de las elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y aquellas que resultaron del proceso simulación-optimización para diciembre de 2035 considerando el escenario 3.

Las líneas en color azul representan una recuperación en el nivel freático resultante; las líneas en color amarillo indican las zonas donde el nivel freático resultante final es igual al inicial, y las curvas en color rojo indican un abatimiento en el nivel freático.

VI.4. Escenario 4: Escenario pesimista, recarga natural de 26.51 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 28.17 Mm³/año, y restricción de carga sustentable.

Aplicando el modelo de optimización bajo las condiciones del escenario 4, se obtiene una extracción anual promedio de 38 Mm³/año, equivalente a 2 Mm³/año por debajo de lo definido como valor objetivo. En la Tabla XIX se muestra el comportamiento de las extracciones anuales.

Tabla XIX.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 4 con restricción de carga sustentable.

Año	Entradas			Salidas		
	Pozos Recarga Optimización	Recarga Natural	Total	Pozos extracción	Pozos Optimización	Total
	P.R.O.	R.N.	P.R. + R.N.	P.E.	P.E.O.	P.E. + P.E.O.
2017	15,408,928.00	26,515,440.00	41,924,368.00	28,173,668.00	6,902,676.00	35,076,344.00
2018	17,481,194.00	26,515,436.00	43,996,630.00	28,173,672.00	7,900,792.00	36,074,464.00
2019	17,195,542.00	26,515,444.00	43,710,986.00	28,173,660.00	8,451,020.00	36,624,680.00
2020	16,938,044.00	26,515,440.00	43,453,484.00	28,173,664.00	8,926,720.00	37,100,384.00
2021	16,724,564.00	26,515,440.00	43,240,004.00	28,173,672.00	9,310,408.00	37,484,080.00
2022	16,551,344.00	26,515,440.00	43,066,784.00	28,173,648.00	9,615,712.00	37,789,360.00
2023	16,411,928.00	26,515,440.00	42,927,368.00	28,173,648.00	9,857,248.00	38,030,896.00
2024	16,298,360.00	26,515,440.00	42,813,800.00	28,162,272.00	10,061,008.00	38,223,280.00
2025	16,209,392.00	26,515,440.00	42,724,832.00	28,120,768.00	10,252,256.00	38,373,024.00
2026	16,132,192.00	26,515,440.00	42,647,632.00	28,073,392.00	10,410,576.00	38,483,968.00
2027	16,073,488.00	26,515,392.00	42,588,880.00	28,037,280.00	10,524,960.00	38,562,240.00
2028	16,024,016.00	26,515,392.00	42,539,408.00	28,010,752.00	10,609,952.00	38,620,704.00
2029	15,980,160.00	26,515,392.00	42,495,552.00	27,995,360.00	10,676,992.00	38,672,352.00
2030	15,949,024.00	26,515,392.00	42,464,416.00	27,986,400.00	10,725,312.00	38,711,712.00
2031	15,922,096.00	26,515,392.00	42,437,488.00	27,981,088.00	10,763,200.00	38,744,288.00
2032	15,901,648.00	26,515,392.00	42,417,040.00	27,977,536.00	10,789,376.00	38,766,912.00
2033	15,878,880.00	26,515,392.00	42,394,272.00	27,975,136.00	10,812,576.00	38,787,712.00
2034	15,867,808.00	26,515,392.00	42,383,200.00	27,973,344.00	10,826,144.00	38,799,488.00
2035	20,437,376.00	26,515,392.00	46,952,768.00	27,972,096.00	11,441,792.00	39,413,888.00
Promedio	16,493,999.16	26,515,417.26	43,009,416.42	28,077,950.32	9,939,932.63	38,017,882.95

En este caso, se muestra como ejemplo, en la Figura 37, los resultados del pozo “j” (HPj), el cual es de recarga artificial y se observa que la restricción no alcanza el máximo nivel permitido. También se puede apreciar que la tendencia del acuífero en esta celda, aun sin el modelo de optimización aplicado (Serie ORIGINAL) es de disminución, corriendo el riesgo de alcanzar en un futuro el nivel del basamento

impermeable (280 msnm); este tipo de situación son las que se pretenden evitar con los modelos de simulación – optimización, continuar aplicando estrategias que lleven a estos escenarios. En el Apéndice H se puede apreciar el total de gráficas de este tipo para el escenario 4.

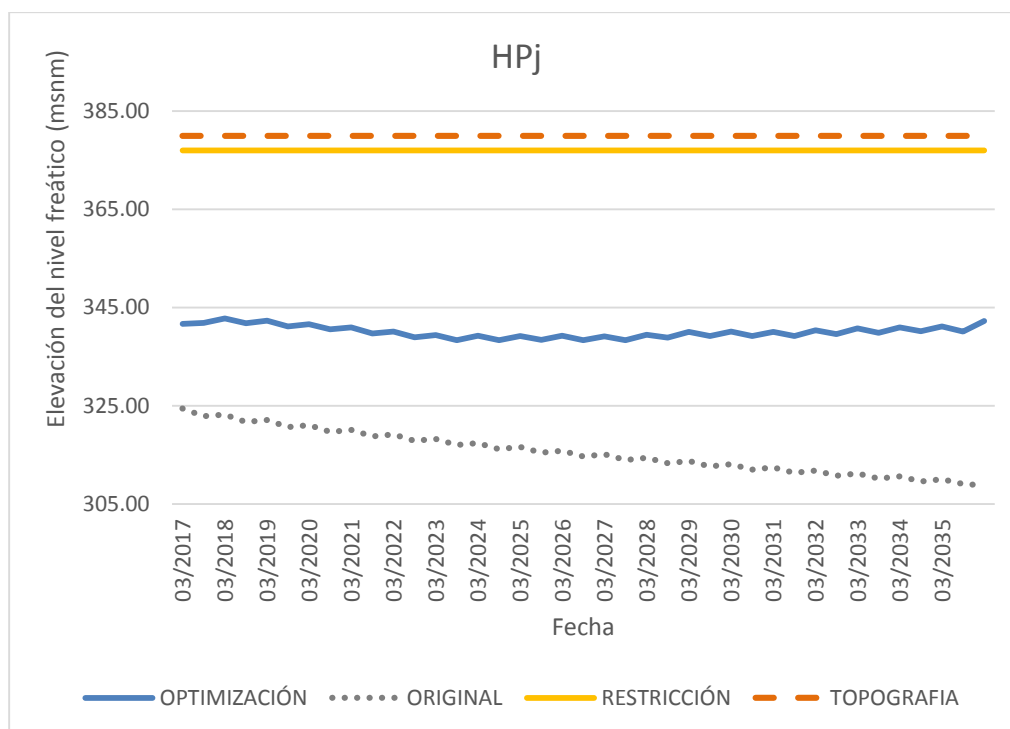


Figura 37.- Comportamiento de la elevación del nivel freático en el pozo “j” (HPj) para el escenario 4.

Descripción de las series: OPTIMIZACIÓN, línea azul, representa el comportamiento del nivel freático en el pozo utilizando el modelo de simulación - optimización; TOPOGRAFÍA, naranja discontinua; elevación del nivel topográfico en la celda donde se ubica el pozo; ORIGINAL, gris punteada, representa el nivel freático utilizando únicamente el modelo de simulación, sin incluir las extracciones o recargas de los pozos optimizados; RESTRICCIÓN, línea amarilla, nivel freático establecido como máximo (pozos optimizados de recarga artificial) o mínimo (pozos de extracción optimizados) y; BASAMENTO, línea verde, representa el nivel al cual se encuentra el basamento impermeable en la celda donde se ubica el pozo analizado.

Para este pozo “j” (Qpj), la restricción que sí se alcanza en su nivel límite permitido, es la referente al volumen máximo de recarga. Si observamos la Figura 38, nos podemos percatar que la tasa de bombeo optimizada coincide con dicha restricción, para todo el periodo de simulación – optimización de este escenario. El Apéndice I muestra las gráficas de comportamiento de esta restricción para el total de los pozos incluidos en este escenario 4.

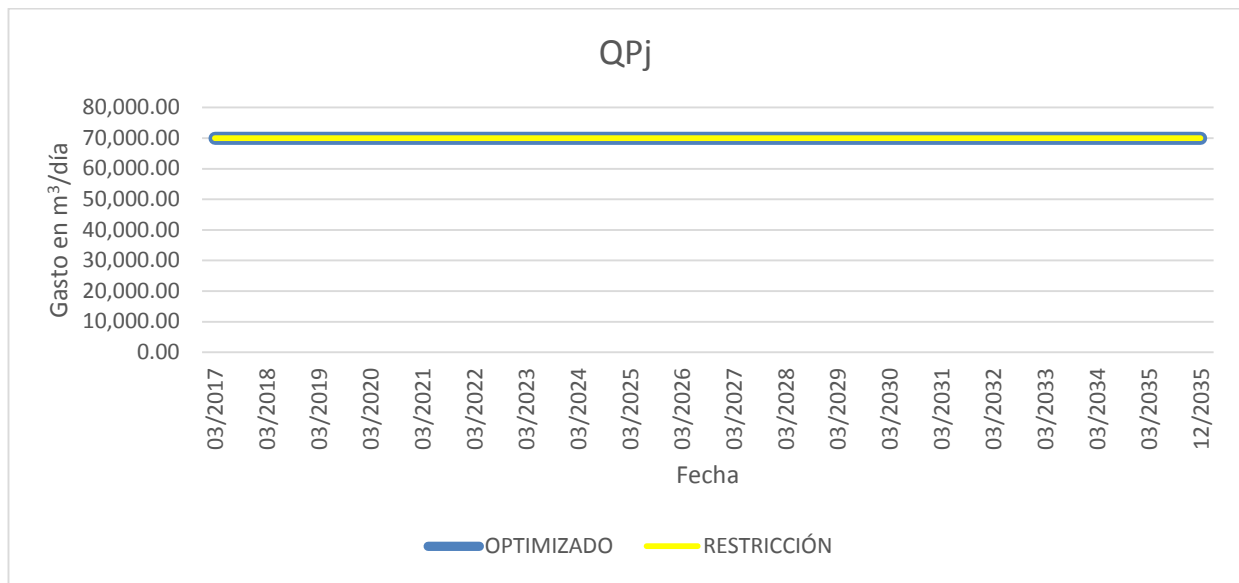


Figura 38.- Gastos de extracción para el pozo “j” (QPj) durante el escenario 4

Descripción de las series: OPTIMIZADO, línea azul, indica el gasto de extracción o recarga resultante de la solución del modelo de simulación – optimización para el pozo analizado y; RESTRICCIÓN, línea amarilla, representa el gasto máximo permitido en el modelo de optimización para este pozo.

Con base en los resultados, la diferencia de elevaciones entre los niveles freáticos calculado para enero de 2017 y aquellas obtenidas del proceso de simulación-optimización para diciembre de 2035, considerando las condiciones del escenario 4, muestra que se logra mantener en un nivel mínimo, incluso en su mayoría se observa una recuperación en el acuífero (Figura 39).

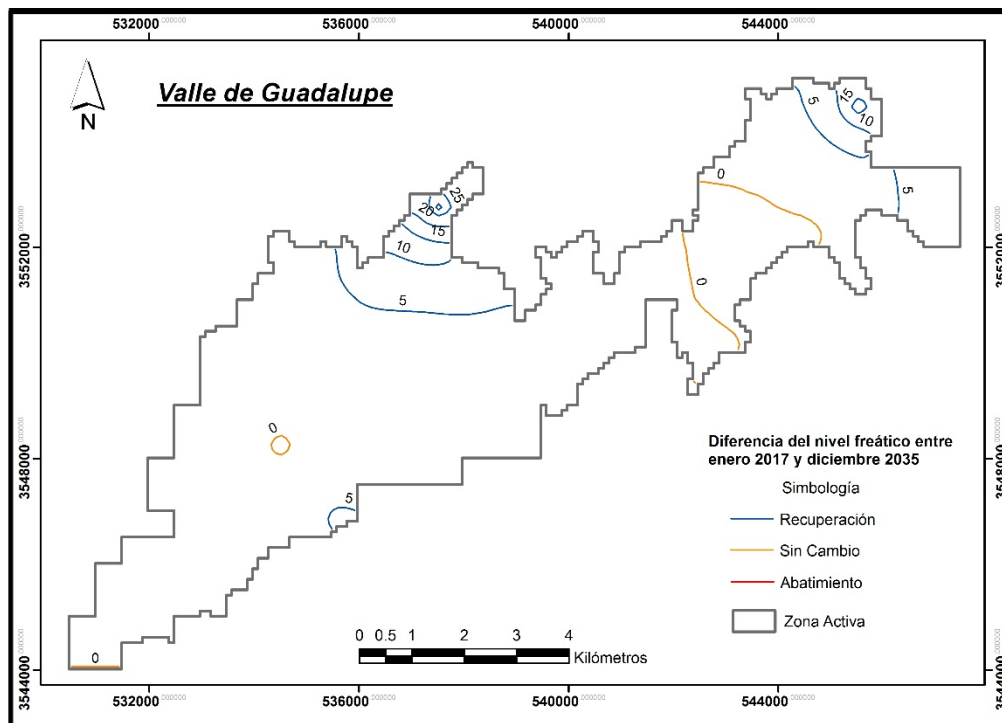


Figura 39.- Diferencia de las elevaciones del nivel freático calculadas para enero de 2017 y aquellas obtenidas del proceso simulación-optimización para diciembre de 2035 considerando las condiciones del escenario 4.

Las líneas en color azul representan una recuperación en el nivel freático resultante; las líneas en color amarillo indican las zonas donde el nivel freático resultante final es igual al inicial, y las curvas en color rojo indican un abatimiento en el nivel freático.

VI.5. Escenario 5: Escenario Statu Quo, recarga natural de 26.51 Mm³/año, descarga de pozos actuales de 20.63 Mm³/año, y restricción de carga normal.

Para el escenario 5 (Statu Quo) solo se alcanzó un volumen anual de extracción promedio de 36.6 Mm³/año (Tabla XX), por lo que, se hace evidente que no incluir pozos de recarga artificial evita que se cumpla con la condición de extraer hasta 40 Mm³/año.

Tabla XX.- Valores anuales de extracción y recarga resultantes del modelo de optimización para el escenario 5 con restricción de carga normal.

Año	Entradas			Salidas		
	Pozos Recarga	Recarga Natural	Total	Pozos extracción	Pozos Optimización	Total
	P.R.	R.N.	P.R. + R.N.	P.E.	P.E.O.	P.E. + P.E.O.
2017	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,936.00	17,607,732.00	38,241,668.00
2018	0.00	26,515,436.00	26,515,436.00	20,633,940.00	18,356,168.00	38,990,108.00
2019	0.00	26,515,444.00	26,515,444.00	20,633,944.00	18,136,736.00	38,770,680.00
2020	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,916.00	17,941,148.00	38,575,064.00
2021	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,904.00	17,679,024.00	38,312,928.00
2022	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,904.00	17,364,096.00	37,998,000.00
2023	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,928.00	17,017,976.00	37,651,904.00
2024	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,952.00	16,718,656.00	37,352,608.00
2025	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,952.00	16,452,736.00	37,086,688.00
2026	0.00	26,515,440.00	26,515,440.00	20,633,952.00	16,205,664.00	36,839,616.00
2027	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,952.00	15,956,992.00	36,590,944.00
2028	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,952.00	15,545,792.00	36,179,744.00
2029	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,952.00	15,129,536.00	35,763,488.00
2030	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,824.00	14,681,728.00	35,315,552.00
2031	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,824.00	14,389,280.00	35,023,104.00
2032	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,824.00	13,860,768.00	34,494,592.00
2033	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,824.00	13,738,720.00	34,372,544.00
2034	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,824.00	13,267,040.00	33,900,864.00
2035	0.00	26,515,392.00	26,515,392.00	20,633,824.00	13,376,736.00	34,010,560.00
Promedio	0.00	26,515,417.26	26,515,417.26	20,633,901.47	15,969,817.26	36,603,718.74

Otro de los efectos de no incluir el volumen para recarga artificial es el descenso general de las elevaciones de los niveles freáticos en los distintos pozos de extracción optimizados. En la Figura 40 se puede observar este comportamiento en el pozo “n” (HPn). El resto de las gráficas de este tipo, para este escenario, se incluyen en el Apéndice J.

En la Figura 41 se muestra el comportamiento del gasto de extracción para el pozo “n” (QPn) durante el escenario 5. El Apéndice K incluye el resto de las comparativas entre los resultados optimizados para cada pozo y la restricción establecida para este escenario.

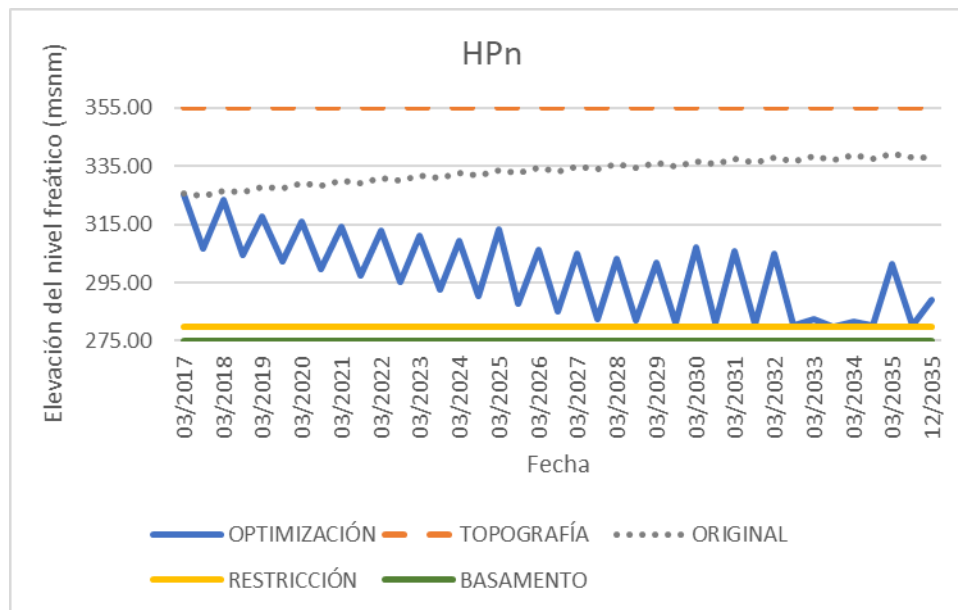


Figura 40.- Comportamiento del nivel freático en el pozo “n” (HPn) para el escenario 5.

Descripción de las series: OPTIMIZACIÓN, línea azul, representa el comportamiento del nivel freático en el pozo utilizando el modelo de simulación - optimización; TOPOGRAFÍA, naranja discontinua; elevación del nivel topográfico en la celda donde se ubica el pozo; ORIGINAL, gris punteada, representa el nivel freático utilizando únicamente el modelo de simulación, sin incluir las extracciones o recargas de los pozos optimizados; RESTRICCIÓN, línea amarilla, nivel freático establecido como máximo (pozos optimizados de recarga artificial) o mínimo (pozos de extracción optimizados), y BASAMENTO, línea verde, representa el nivel al cual se encuentra el basamento impermeable en la celda donde se ubica el pozo analizado.

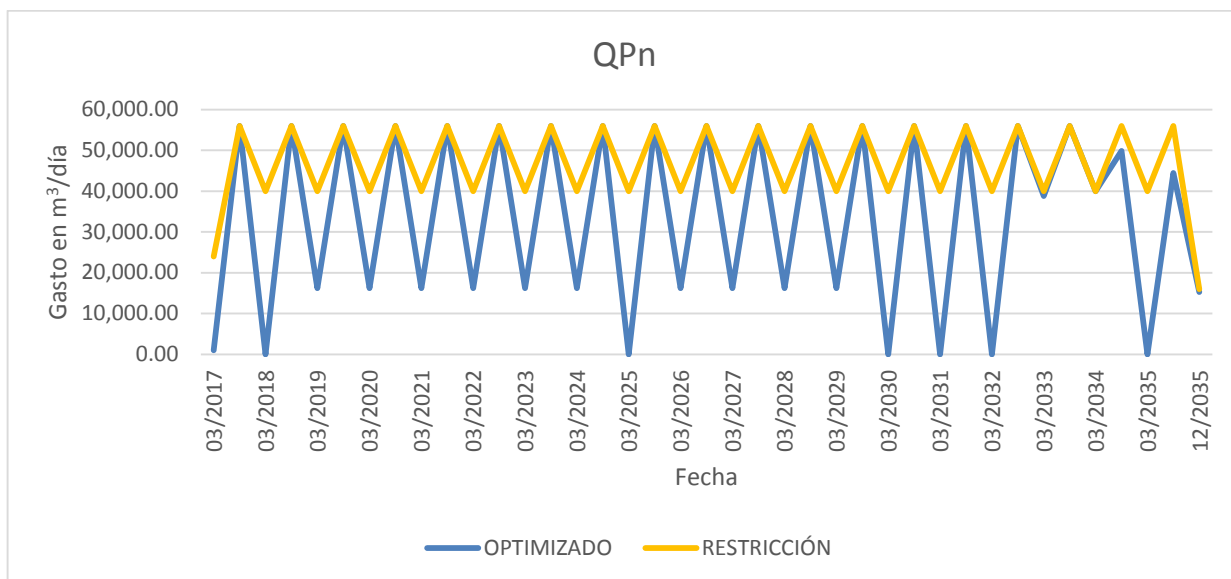


Figura 41.- Gastos de extracción para el pozo “n” (QPn) durante el escenario 5.

Descripción de las series: OPTIMIZADO, línea azul, indica el gasto de extracción o recarga resultante de la solución del modelo de simulación – optimización para el pozo analizado, y RESTRICCIÓN, línea amarilla, representa el gasto máximo permitido en el modelo de optimización para este pozo.

Para este escenario 5, la diferencia de elevaciones del nivel freático al inicio y al final de la simulación-optimización es significativamente diferente (Figura 42), que va desde los 0.40 m hasta los 34.64 m, en promedio 16.88 m. Esta situación, surge como consecuencia de la no inclusión de un volumen de recarga artificial; en la cual, se pueden observar algunas celdas secas dentro del acuífero (al oeste de la zona Calafia).

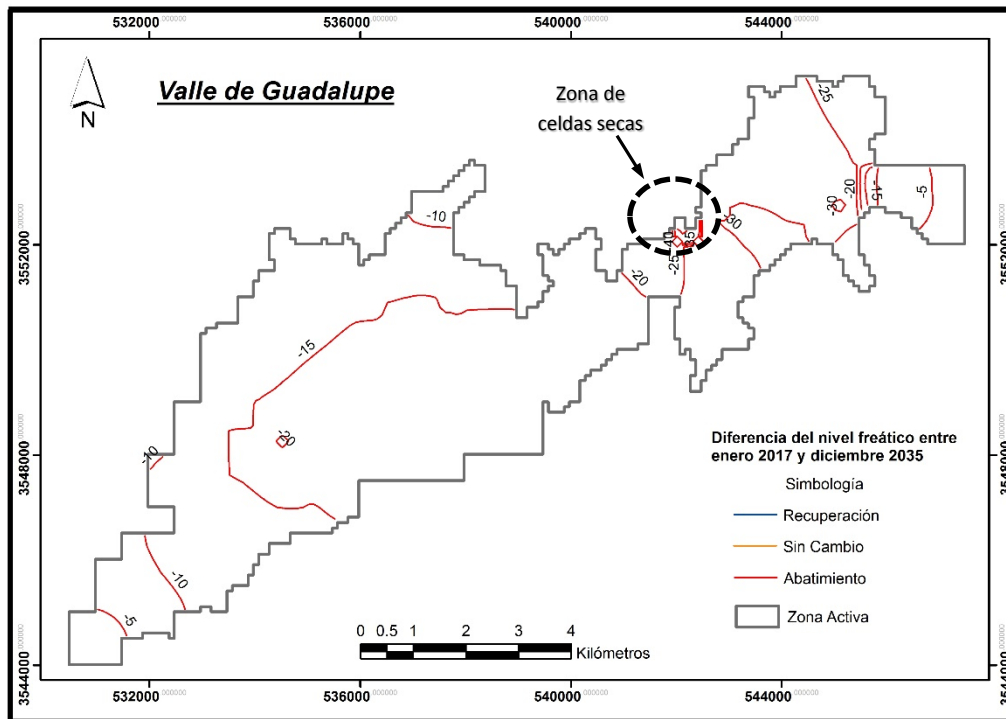


Figura 42.- Diferencia de las elevaciones del nivel freático calculado para enero de 2017 y diciembre de 2035 aplicando el modelo de optimización a las condiciones del escenario 5.

Las líneas en color azul representan una recuperación en el nivel freático resultante; las líneas en color amarillo indican las zonas donde el nivel freático resultante final es igual al inicial, y las curvas en color rojo indican un abatimiento en el nivel freático.

Del análisis de los resultados se puede inferir algunas de las consecuencias por desarrollar cada uno de los distintos escenarios de manejo del agua a futuro en el AG que aquí se plantearon, entre los cuales, se incluyen aquellos donde se considera aprovechar el volumen total de extracción concesionado por la CONAGUA, evitar la sobreexplotación y utilizar de manera adecuada el volumen de agua disponible que las PTAR's podrían aportar para su recarga artificial.

VI.6. Escenario 6: Escenario de recarga adicional, recarga natural de 26.51 Mm³/año + 31.54 Mm³/año de recarga adicional de agua tratada, descarga de pozos actuales de 20.63 Mm³/año, y restricción de carga normal.

Para la simulación de este escenario se consideró la recarga artificial de 1,000 l/s (31.54 Mm³/año) de agua residual tratada, adicional a la recarga natural por precipitaciones. Esto, debido a que en la actualidad se encuentra en desarrollo una propuesta por organismos gubernamentales y privados para enviar dicha cantidad de agua al Valle de Guadalupe. El agua enviada se utilizaría para riego agrícola, por lo que se estaría recargando al acuífero por medio de infiltración directa. Uno de los aspectos en los que se ha centrado la atención de los productores locales de vid, es la calidad de agua que será enviada de la planta de tratamiento ubicada en Tijuana, BC, y lo que ocurriría al mezclarse con aquella que actualmente se encuentra en el acuífero proveniente de la lluvia. Hasta el momento no se encuentra definido con exactitud las zonas que se beneficiarían con el líquido por parte de los organismos que desarrollan esta propuesta; sin embargo, por la preocupación de la calidad mencionada, se considera que la zona de fosas podría ser una opción viable, debido que estas áreas son la que presentan agua de menor calidad, en cuanto a concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) y que incluso, con la calidad del agua enviada, podría presentar una mejora en este aspecto. Por esta situación, se considera en el escenario 6, que la recarga se realizaría en un total de 726 celdas del modelo, cuya ubicación se muestra en la Figura 43.

Con base en los resultados del escenario 6, se destaca que en el cuarto año de simulación (específicamente, diciembre de 2020) las elevaciones del nivel freático calculado alcanzarían las elevaciones del nivel de terreno natural en la zona de la fosa El Porvenir (Figura 43). Esto refleja que enviar agua a este ritmo (1,000 l/s) no resultaría óptimo para la zona, al enviar más agua de la necesaria para satisfacer las condiciones de extracción actuales, por lo que se estaría invirtiendo un recurso económico de manera innecesaria y, por otra parte, pudiendo incluso generar un problema de calidad en el agua que actualmente se encuentra en el acuífero.

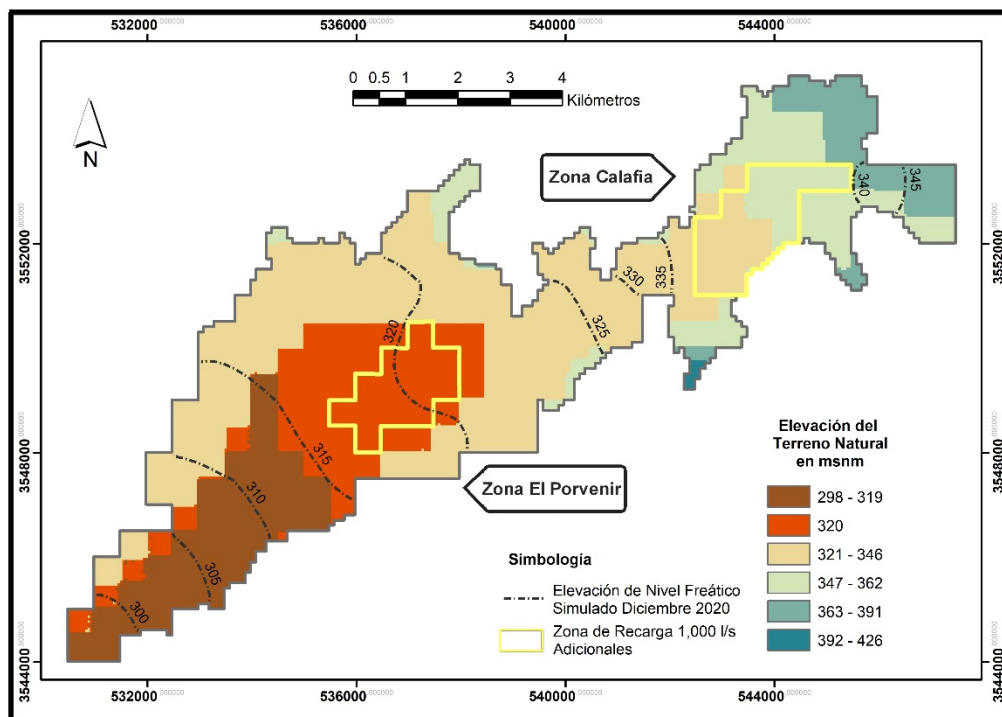


Figura 43.- Zona considerada para la recarga adicional de 1,000 l/s, elevación del terreno natural y curvas de elevación del nivel freático simulado para diciembre 2020 (escenario 6).

Una vez analizados todos los resultados, cabe mencionar que el modelo desarrollado podría utilizarse de muchas otras maneras, además de las aquí incluidas. Dentro de las variantes que se pudieran aplicar en escenarios futuros encontramos:

- Ritmo de extracción menor para pozos existentes.
- Incluir dentro de los pozos de optimización los operados por la CESPE.
- Ubicar pozos de extracción y recarga solo en áreas de predios propiedad del gobierno.

VII. DISCUSIÓN

Durante el desarrollo de esta tesis se presentaron diversas dificultades en cuanto a falta de información actual, sobre todo en lo referente a escurrimiento superficial, por lo que, es de resaltar el funcionamiento y la utilidad del modelo de simulación – optimización aquí desarrollado, en cuanto a la calibración y los resultados obtenidos.

Las modificaciones realizadas al modelo de simulación, con la información general que se encuentra disponible hasta 2016, se considera muy importante, debido que con esto se adecua el comportamiento del acuífero frente a las modificaciones físicas de la zona activa o las tendencias de precipitación más recientes dentro de la cuenca, las cuales, en la última década, han presentado una tendencia a disminuir en su promedio anual, en comparación con lo que se incluye en la versión sobre la cual se basa este trabajo y que fue calibrada con información hasta 2005. Esta actualización también permite incluir un número mayor de mediciones de campo para los pozos de observación y con esto, contar con una mayor cantidad de información para calibrar el modelo y mejorar la calidad del mismo.

Una característica a destacar de este trabajo es la georreferenciación de todos los elementos que intervienen en el modelo de simulación, destacándose la ubicación con mayor precisión de los pozos de extracción y observación utilizados. Esto también permite la inclusión de manera más sencilla y precisa de información futura como pozos nuevos, futuras reubicaciones o definir de manera correcta la ubicación en campo de los pozos que se están proponiendo como solución para la optimización del acuífero.

Otra de las ventajas que presenta este modelo es el tamaño de celda, la mejora a la resolución de estas permite observar de mejor manera los cambios de nivel freático entre ellas, así como una forma más suavizada y real de incluir la información del modelo, caso contrario de lo que ocurre con celdas de mayor tamaño.

Muchas de estas ventajas se lograron gracias a las opciones que ofrece el software que se desarrolló, MODFLOW-NWT, el cual, se basa en uno de los más utilizados a nivel mundial para el desarrollo de modelos de simulación - optimización: MODFLOW (Harbaugh, 2005). En trabajos como los de Zekri et al. (2015), Singh, Bürger y Cirpka (2013), Elçi y Ayvaz (2014), Chiu, Nishikawa y Martin (2012), Sreekanth, Moore y Wolf (2016), se pueden observar modelos desarrollados, tanto para acuíferos reales como sintéticos, con esta herramienta. El utilizar un software tan popular se puede traducir en la

posibilidad de contar con actualizaciones constantes y que el formato del modelo no se vuelva obsoleto. El utilizar este software, permitió también la conexión con GWM-VI (Banta y Ahlfeld, 2013), diseñado principalmente para trabajar en conjunto en el desarrollo de modelos de simulación – optimización.

Contar con información actual y precisa, en cuanto a niveles freáticos observados, condiciones físicas (topografía superficial, basamento impermeable, entre otras), escurrimientos superficiales o datos de precipitación pluvial, podría beneficiar al ajuste del modelo de simulación. Encontramos situaciones como la de la estación hidrométrica Agua Caliente, que registra los escurrimientos superficiales ubicada al inicio de la zona activa, la cual, solo presenta información oficial hasta 1992. Por otra parte, las estaciones climatológicas presentan una problemática similar, al no contar con información de manera continua, ya sea, por detener su funcionamiento o iniciar sus operaciones en fechas recientes. Debido a lo anterior, se considera recomendable establecer más estaciones que logren registrar los escurrimientos superficiales, por lo menos a la entrada y salida de la zona del arroyo, con el objetivo de contar con mayor información disponible para incluir en los modelos que se pudieran desarrollar en el futuro.

Otro aspecto que se podría mejorar es la discretización de la topografía y el basamento impermeable, debido a que se incluyó lo publicado por Campos-Gaytán et al. (2014) y esta se encuentra en celdas de 500 m x 500 m, por lo que al utilizar un promedio al centro de la celda podría existir una diferencia al trabajar, en este modelo, con celdas de 100 m x 100 m para la simulación.

Cabe mencionar, que se buscó utilizar información publicada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía (INEGI), a través de un modelo digital de elevaciones (MDE), el cual fue extraído del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), específicamente del área del estado de Baja California. No obstante, se observó la existencia de zonas (principalmente en el área de las fosas) donde se presentan diferencias de hasta 20m con respecto a lo reportado en Campos-Gaytán (2008), en las cartas impresas del INEGI y en la información proporcionada por COTAS. Por lo que se acudió al campo para realizar mediciones de la cota del terreno superficial con equipo de *GPS* marca “Garmin,” modelo GPSMAP 62s. Una vez analizadas estas mediciones, se observó que lo publicado en Campos-Gaytán (2008), en cartas del INEGI y en información del COTAS, representaban de mejor manera la situación actual de la topografía; por lo que, se utilizó esta información para la simulación. Utilizar información publicada en línea por el INEGI sería de gran utilidad por el fácil acceso y la resolución que se puede obtener de ella; sin embargo, al encontrarse las diferencias tan significativas en las zonas centrales del

modelo (fosa Calafia y fosa El Porvenir), en este modelo, desafortunadamente, no se consideró adecuado incluirla.

En lo que respecta a la manera en que el modelo de optimización presenta los resultados (un volumen óptimo acumulado para marzo y otro acumulado para octubre), cabe resaltar, que el comportamiento mensual de extracción de los pozos agrícolas que actualmente operan en el acuífero permitió que se utilizaran solo dos cantidades anuales y con estas determinar la cantidad de agua que se extraería, a manera de promedio, en cada uno de los meses restantes del año. Si se modificaran las condiciones de operación de los pozos existentes que se tomaron como base para determinar la aplicación de este criterio y se observara que ya no exista una tendencia constante por temporadas (ritmo de extracción en periodo de lluvias y otro en periodo de temporada seca), podría considerarse la opción de modificar esta manera en que se programó el modelo y tener que adecuarse a la nueva estrategia; lo cual podría significar la necesidad de obtener los volúmenes óptimos de extracción para cada mes en cada uno de los pozos y, con esto, requerir más tiempo computacional para la solución del modelo, al tener que incluir un número mucho mayor de variables de decisión.

Por último, mencionar que con lo aquí realizado, se logró establecer el tipo de obra (estaciones de bombeo) y sus características de operación para reutilizar el agua tratada en esta zona, como una opción puntual, específica y con resultados esperados de manera clara, lo cual no se había presentado hasta ahora.

VIII. CONCLUSIONES

Mediante los resultados de este trabajo se propone una solución al desabasto del agua potable para la ciudad de Ensenada, considerando la combinación óptima de las diferentes fuentes de abastecimiento disponibles en la zona del AG.

Nos queda claro que no siempre lo más sencillo es lo más económico, es decir, de las fuentes analizadas en esta propuesta, el agua que se encuentra en el acuífero es la más fácil de extraer, debido a las modificaciones que se tendrían que hacer al sistema que actualmente opera, como construcción de estaciones nuevas de bombeo para extracción y recarga, líneas de conducción, personal operativo, entre otras; sin embargo, las consecuencias que se producen no siempre se toman en cuenta y a largo plazo podría reflejarse la sobreexplotación o la intrusión salina en el AG.

Analizando los resultados podemos concluir distintas situaciones en cuanto al futuro del acuífero y sus niveles freáticos simulados:

En cuanto a los escenarios donde las restricciones *normales* son aplicadas, las cuales permiten el descenso del nivel freático en algunos pozos optimizados hasta 80m por debajo de la superficie topográfica, el uso de pozos para recarga artificial incluso logró una recuperación del nivel freático a 2035 en distintos puntos, lo cual es de destacar, debido a que la finalidad principal de estos escenarios es lograr extraer 40 Mm³/año, incluso permitiendo hasta cierto punto el abatimiento del AG.

Para los escenarios donde se aplicaron las restricciones de características *sustentables* (las que permiten un descenso en los niveles freáticos de los pozos de extracción optimizados de hasta 6 m por debajo de su nivel al momento de iniciar la simulación), se logró cumplir el objetivo de no permitir un abatimiento considerable de los niveles freáticos, además de lograr prácticamente la meta de 40 Mm³/año de extracción total. Al igual que los escenarios anteriores donde se permite la recarga artificial, la inclusión de este volumen permite al acuífero cumplir con las restricciones y al mismo tiempo alcanzar la demanda establecida.

Mientras que, la ocurrencia de escenario *Statu Quo* presenta una tendencia al abatimiento de los niveles freáticos y sólo permite la extracción promedio de 36.6 Mm³/año, debido a que no se incluyeron pozos para recarga artificial. No en todos los pozos donde se incluye una restricción al nivel mínimo se llega a éste, sin embargo, se observó que de continuar con el ritmo de extracción propuesto para este escenario sólo es cuestión de tiempo para que éstos la alcancen, logrando incluso, descender hasta el nivel del basamento impermeable.

Para el escenario 6, respecto a la simulación de la recarga artificial adicional en el AG, con 1,000 l/s de agua residual tratada, se puede concluir que no se considera factible utilizar en su totalidad el volumen propuesto. Lo anterior, generaría un aumento excesivo en las elevaciones de los niveles freáticos dentro del acuífero, alcanzando incluso el nivel de terreno natural en algunas zonas en los primeros cuatro años, afectando con esto las áreas cultivadas.

Este trabajo ejemplifica el beneficio de la utilización de agua residual tratada a manera de recarga artificial, con la finalidad de alcanzar un mayor volumen de extracción para usos agrícolas y para la población en general. Al mismo tiempo permite conocer el ritmo de extracción y recarga óptimo para satisfacer las restricciones de niveles permitidos (máximos y mínimos) dentro del acuífero, capacidad de extracción/recarga de los equipos de bombeo que se consideran para los escenarios y disponibilidad temporal de las fuentes de abastecimiento. Si bien en esta tesis se generan un total de 6 escenarios, se

podría realizar distintas modificaciones a los modelos de simulación u optimización para representar distintas situaciones que pudieran ocurrir en un futuro dentro de la zona del AG, las cuales podrían estar definidas por organismos operadores o usuarios locales.

Lo aquí presentado podría utilizarse como base para el análisis de otros acuíferos, no solo de los que ya tienen problemas y así evitar la problemática que actualmente presenta la ciudad de Ensenada.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Ahlfeld, D.P., Baker, K.M., and Barlow, P.M. (2009) GWM-2005—A Groundwater-Management Process for MODFLOW-2005 with Local Grid Refinement (LGR) capability: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A33, 65 p.
- Ahlfeld, D.P., Barlow, P.M., and Mulligan, A.E. (2005) GWM—A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000): U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072, 124 p.
- Anderson, M.P. y W.W. Woessner. (1992). Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press.
- Andrade M. (1997). Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California (Agosto de 1997). Grupo Agroindustrial del Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja California.
- Arreguín, F. y Alcocer, V. (2004). Modelación sistémica del uso eficiente del agua. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX, núm. 3, julio-septiembre. México.
- Banta, E.R., Ahlfeld, D.P., 2013, GWM–VI—Groundwater management with parallel processing for multiple MODFLOW versions: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A48, 33 p.,
- Campos-Gaytán, J.R., Kretzschmar T. y Herrera-Oliva C.S. (2014). Future groundwater extraction scenarios for an aquifer in a semiarid environment: case study of Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Northwest Mexico. Environmental Monitoring and Assessment, vol. 186, número 11.
- Campos-Gaytán, J.R. (2008). Simulación del flujo subterráneo en el acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de doctorado.
- Chávez, A. (1992). Optimización del bombeo en el acuífero de Villa de Reyes, San Luis Potosí. Ingeniería Hidráulica en México, enero-abril (pp. 99-107). México.
- Chiu, Y., Nishikawa, T., Martin, P. (2012) Hybrid-Optimization Algorithm for the Management of a Conjunctive-Use Project and Well Field Design. Ground Water, 50(1), 103-117.
- Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEA), (2014). Informe Mensual diciembre 2013. Recuperado el 25 de octubre de 2014 de: <http://www.ceabc.gob.mx/indicadores.html>
- Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEA), (2017), Informe Mensual diciembre 2016 indicadores de gestión (en lineal): Baja California, México, informe disponible en <<http://www.cea.gob.mx/indicadores.html>>, consultado en junio de 2017.

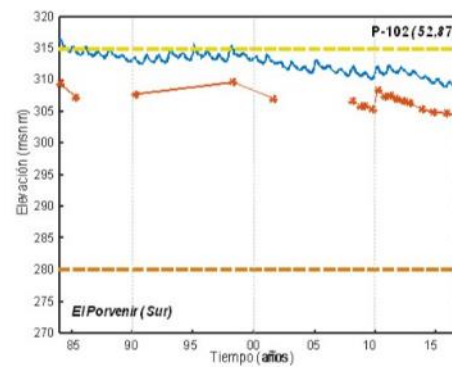
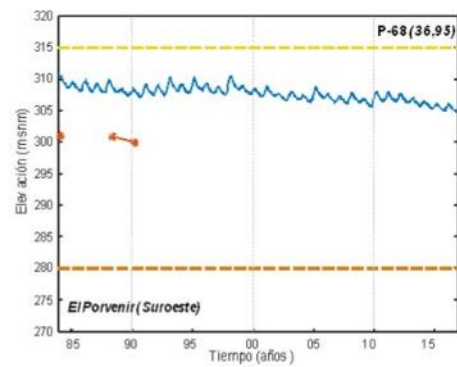
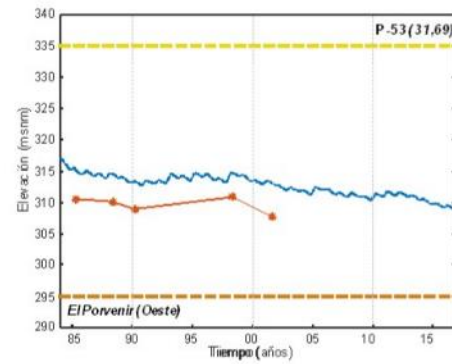
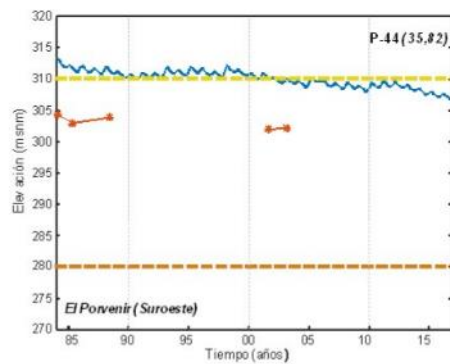
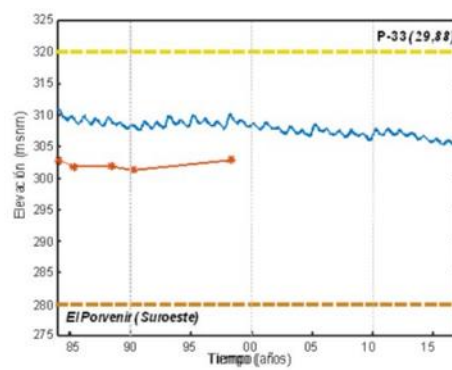
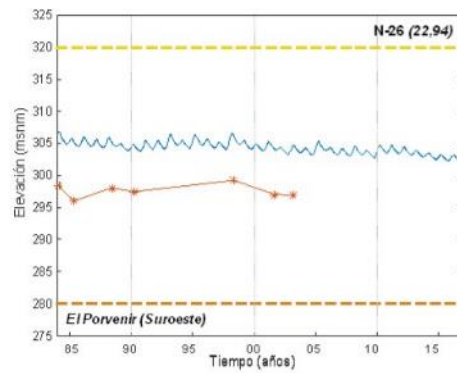
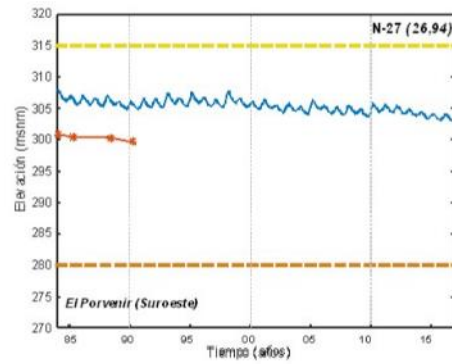
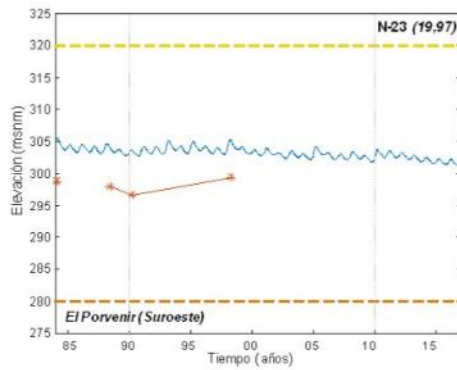
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (1998), Censo de aprovechamientos para extracción de aguas subterráneas. Acuífero BC-07 Valle de Guadalupe, B.C. Gerencia Regional de la Península de Baja California. Subgerencia Regional Técnica. Reporte técnico. 8 pp.
- Comisión Nacional del Agua (2011). Estadísticas del Agua en México, edición 2011. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua (2015). Ubicación de aprovechamientos subterráneos y cuencas hidrográficas. (En línea: <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/MenuKMZ.html>, consultado el 2 de septiembre de 2015). México.
- Elçi, A., Ayvaz, M. T. (2014) Differential-Evolution algorithm based optimization for the site selection of groundwater production wells with the consideration of the vulnerability concept. *Journal Of Hydrology*, 511, 736-749.
- Figueroa Núñez, A. (2013) Conducción de agua tratada de El Sauzal hasta el Valle de Guadalupe. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California.
- Harbaugh, A.W. (2005) MODFLOW-2005, The US Geological Survey Modular Ground-water Model: The Ground-water Flow Process, Reston, VA, EUA, United States Geological Survey Techniques and Methods 6-A19.
- Horne, A., Szemis, J.M., Kaur, S., Webb, J.A., Stewardson, M.J., Costa, A., Boland, N. (2016) Optimization Tools for Environmental Water Decisions: A review of Strengths, Weaknesses, and Opportunities to Improve Adoption. *Environmental Modelling & Software*, 84, 326–338.
- Nishikawa, T. (1998) Water-resources optimization model for Santa Barbara, California. *Journal of water resources planning and management*. Septiembre-octubre.
- Niswonger, R.G., Panday, Sorab, Ibaraki, Motomu (2011). MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A37, 44 p.
- Ponce, V.M., R.P. Pandey y S. Kumar. (1999). Groundwater recharge by cannel infiltration in El Barbon Basin, Baja California, Mexico. *Journal of Hydrology*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009, 18 de agosto). Norma oficial mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009, 18 de agosto). Norma oficial mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013, 20 de diciembre). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos

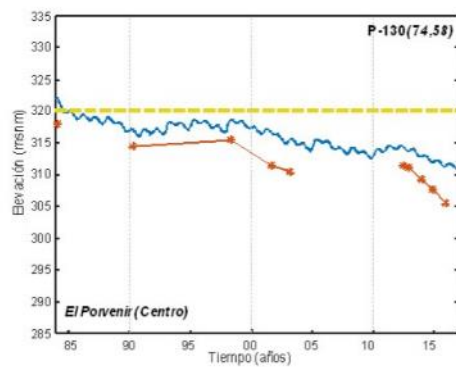
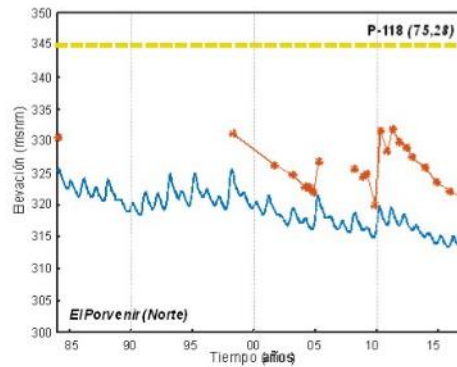
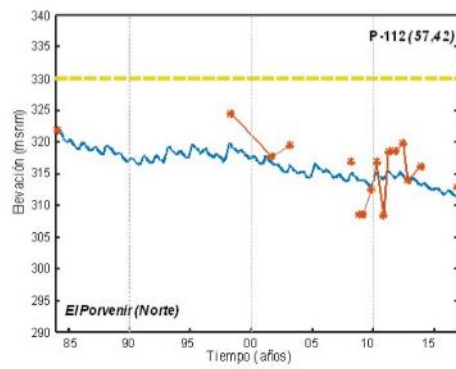
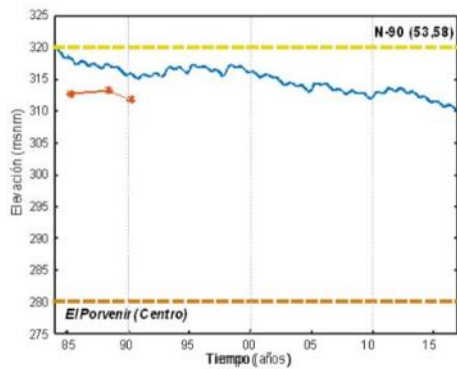
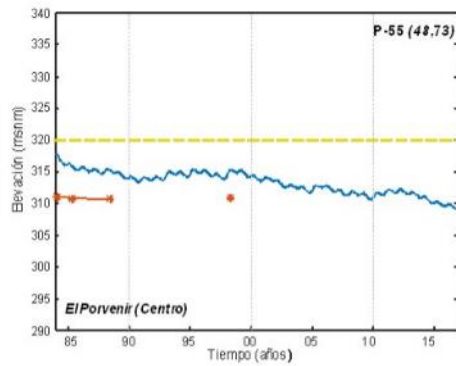
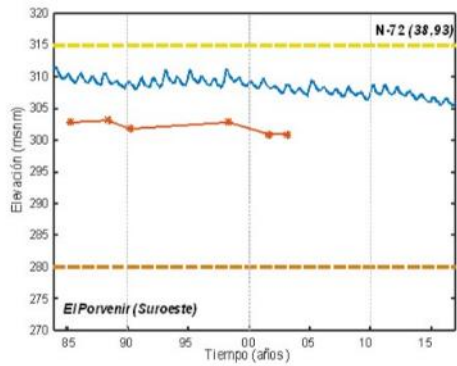
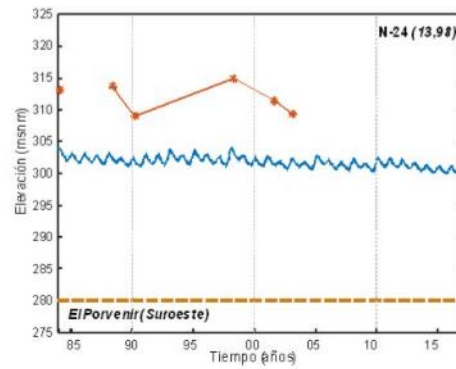
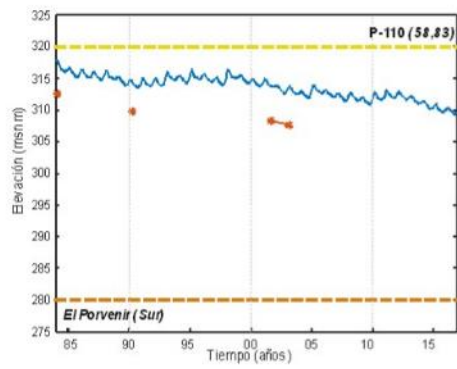
Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Diario Oficial de la Federación.

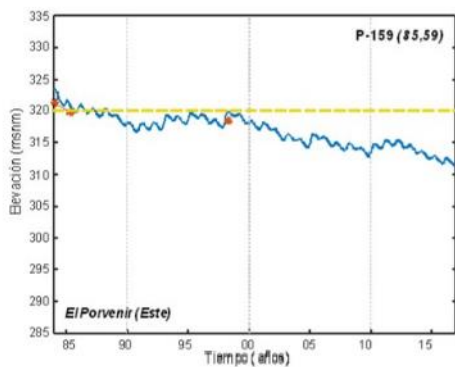
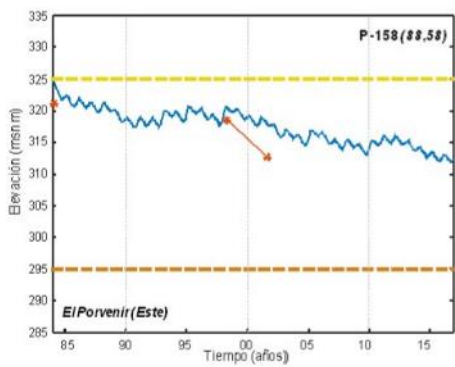
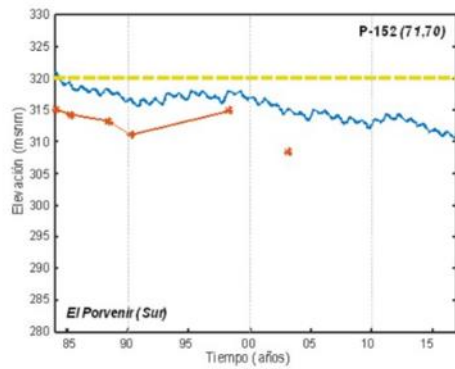
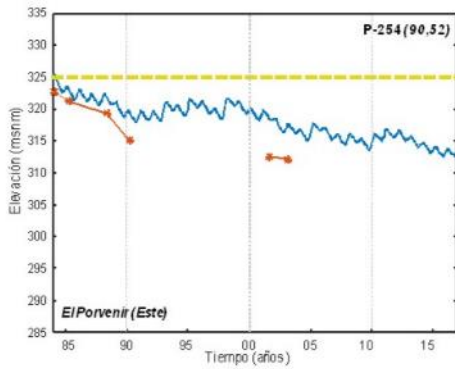
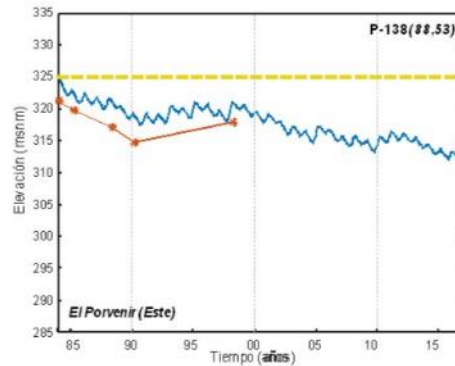
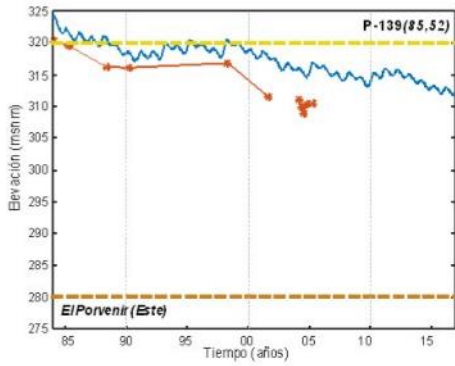
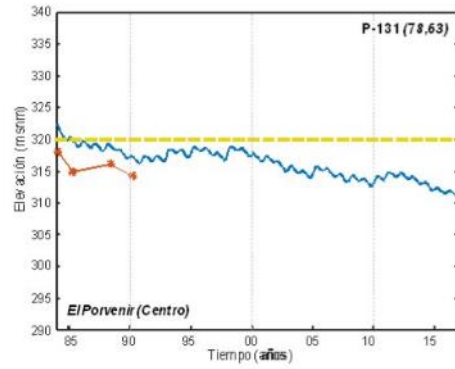
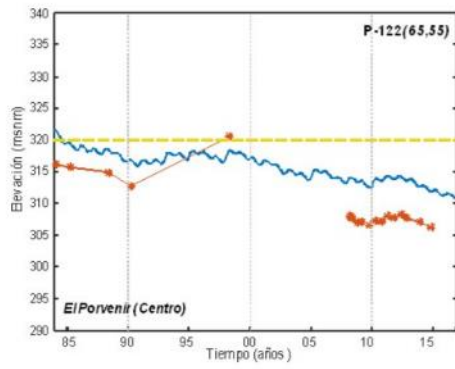
- Singh, A., Bürger, C. M., Cirpka, O. A. (2013) Optimized Sustainable Groundwater Extraction Management: General Approach and Application to the City of Lucknow, India. Water Resources Management, 27(12), 4349-4368.
- Sreekanth, J., Moore, C., Wolf, L. (2016) Pareto-based efficient stochastic simulation–optimization for robust and reliable groundwater management. Journal Of Hydrology, 533, 180-190.
- Waller, C. Mendoza, L. Medellín, J. Lund, J. (2009). Optimización económico-ingenieril del suministro agrícola y urbano: una aplicación de reúso del agua en Ensenada, Baja California, México. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XXIV, núm. 4.
- Zekri, S., Triki, C., Al-Maktoumi, A., Bazargan-Lari, M.. (2015) An Optimization-Simulation Approach for Groundwater Abstraction under Recharge Uncertainty. Water Resources Management, 29(10), 3681-3695.

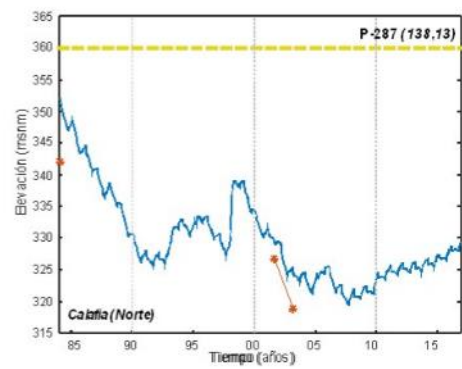
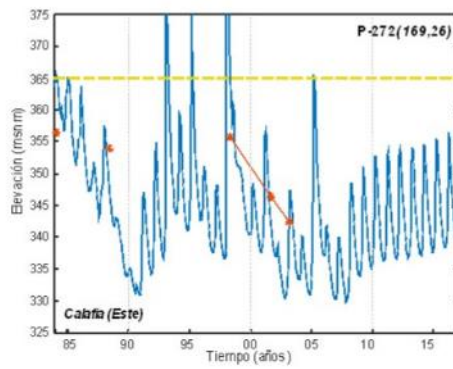
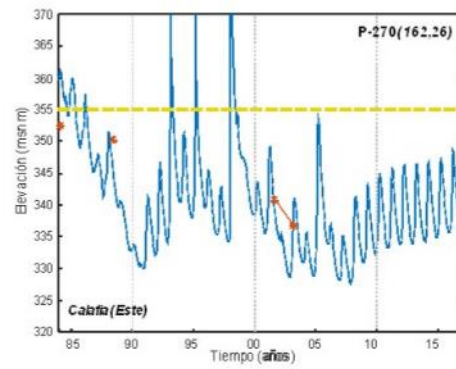
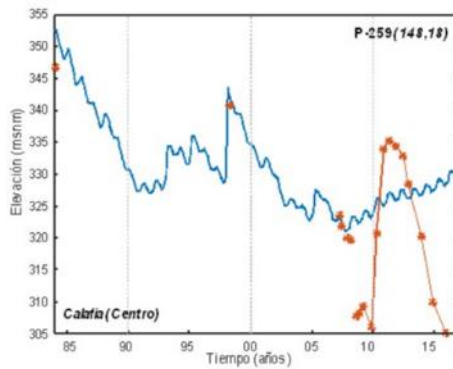
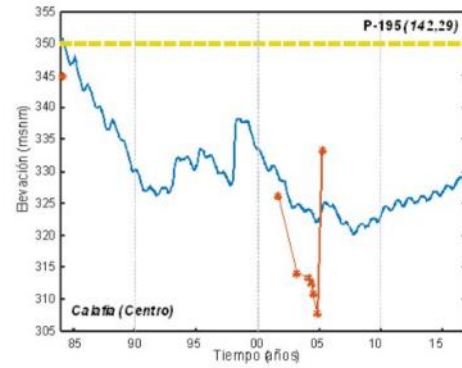
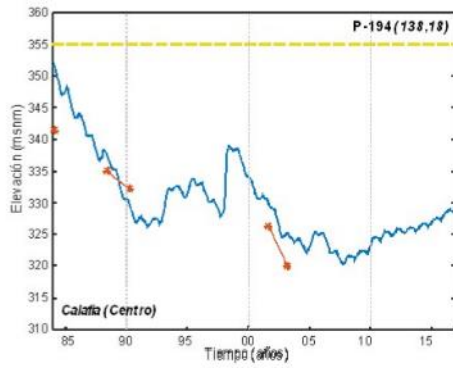
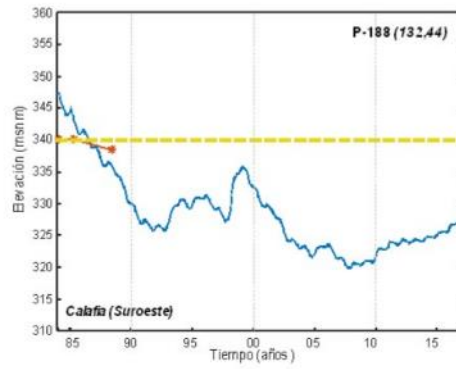
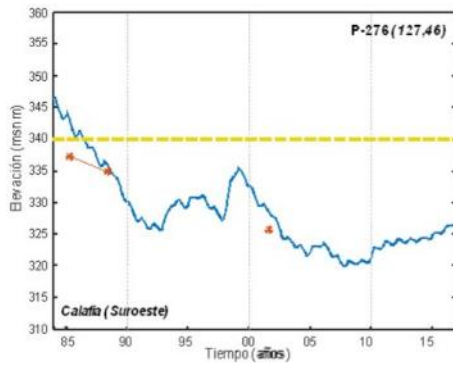
APÉNDICE A

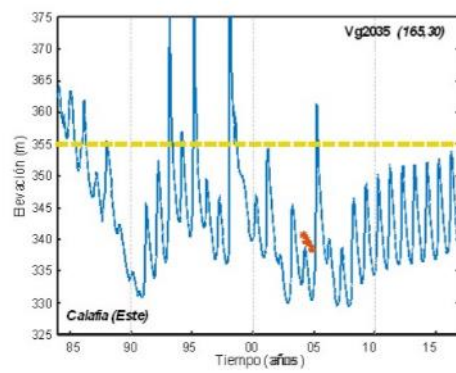
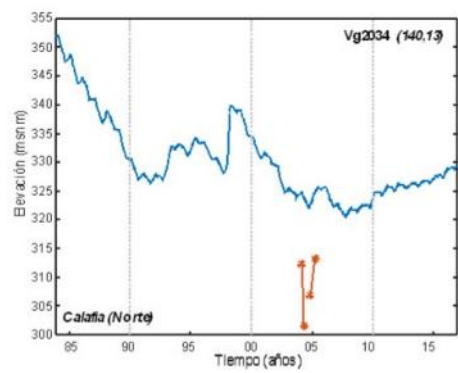
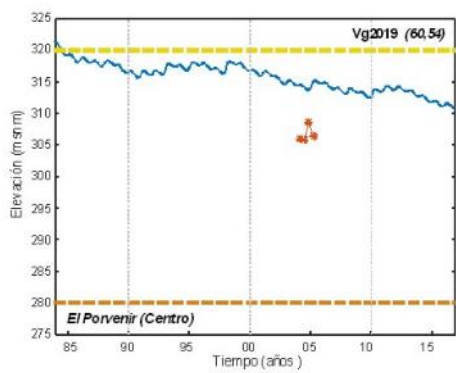
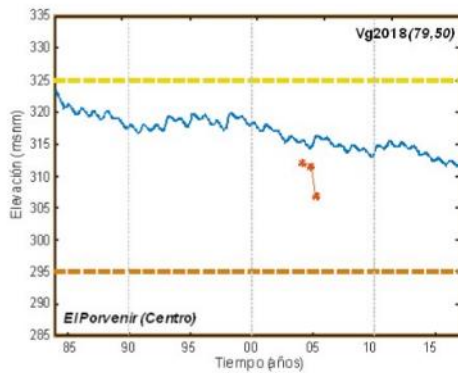
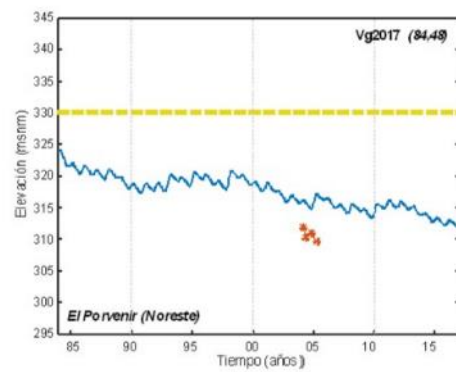
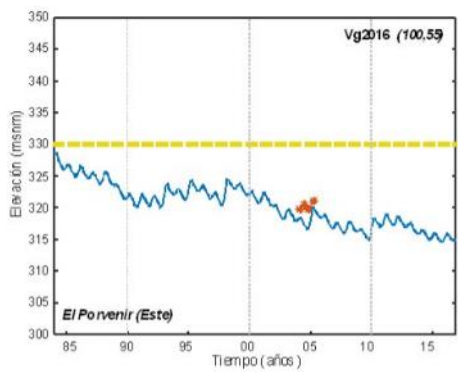
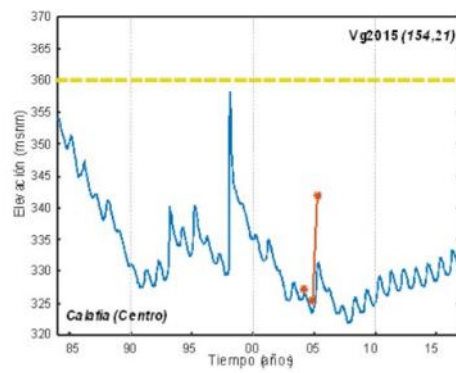
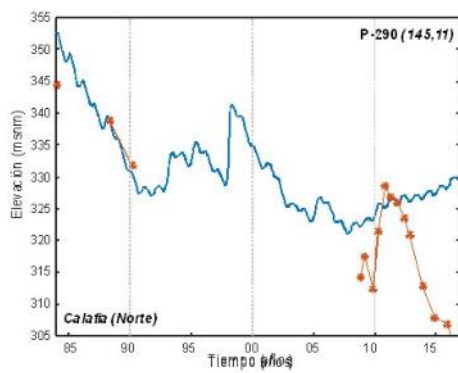
Hidrogramas de pozos de observación utilizados para la calibración del modelo de simulación febrero de 1984 – diciembre de 2016.

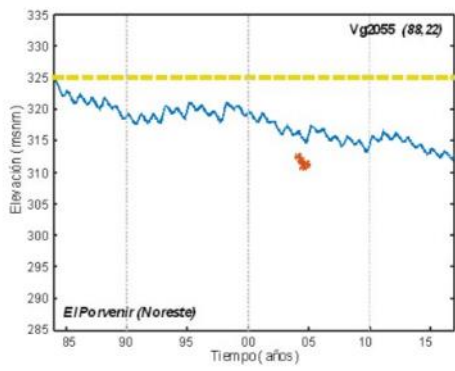
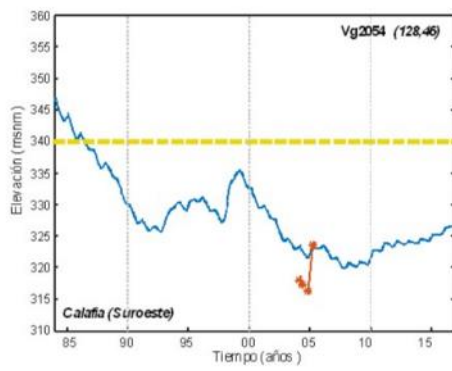
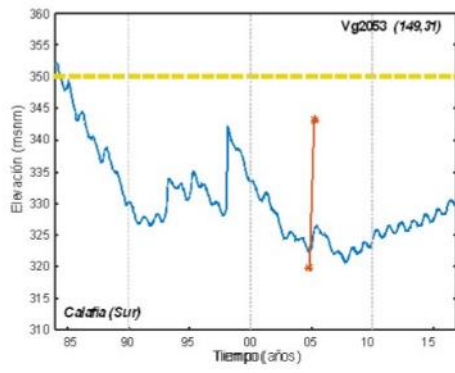
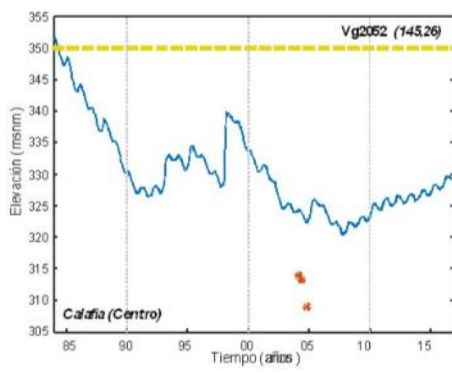
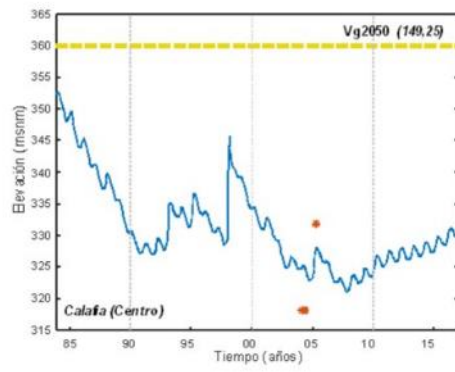
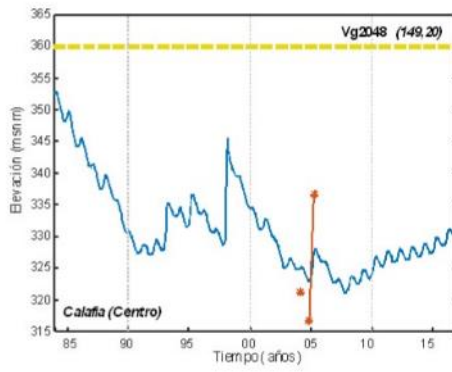
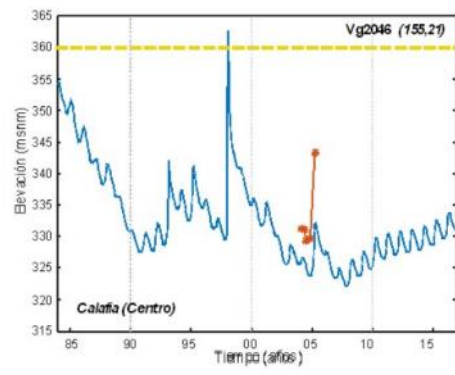
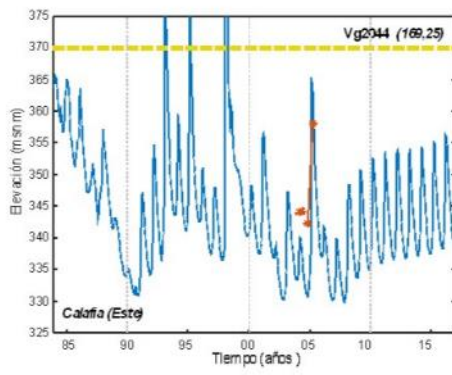


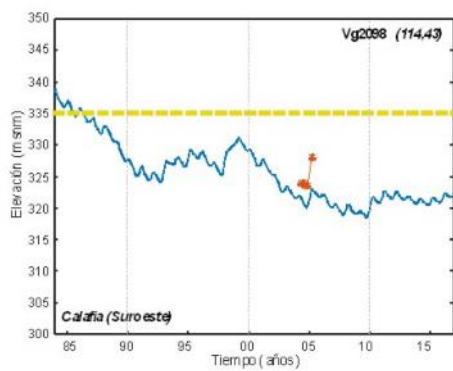
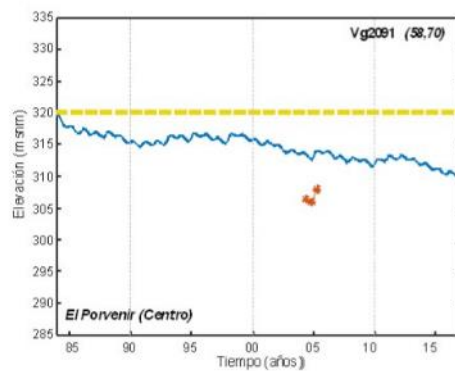
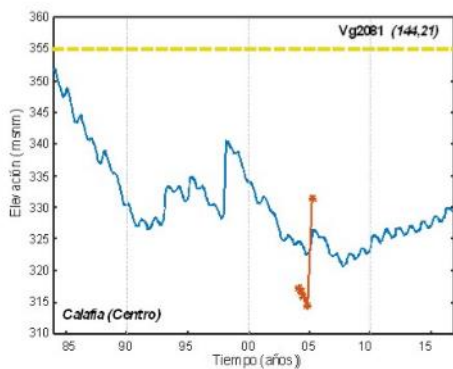
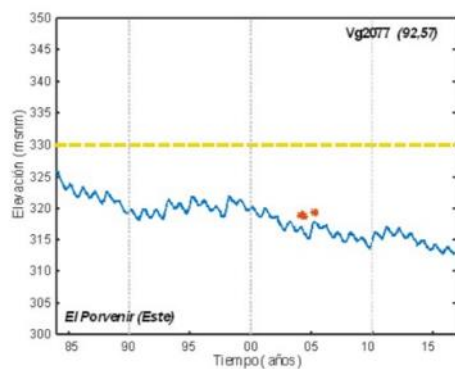
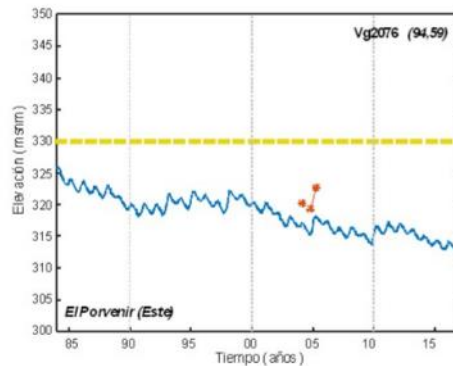
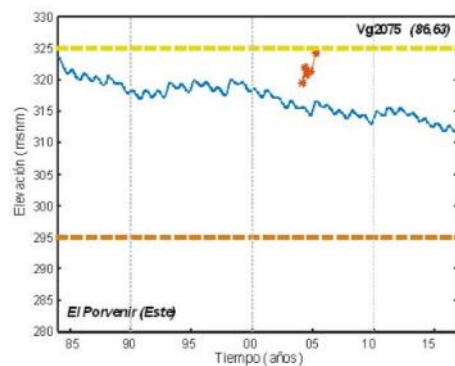
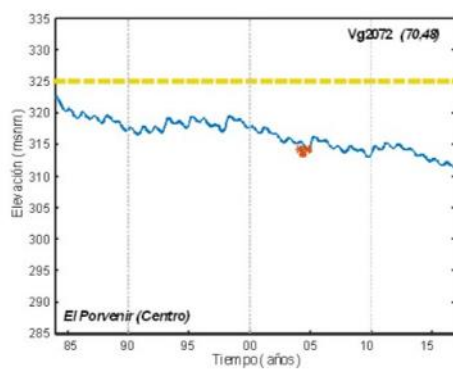
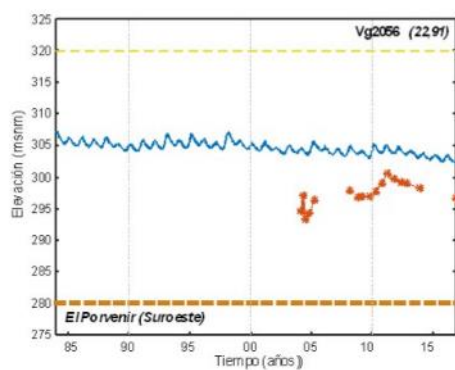


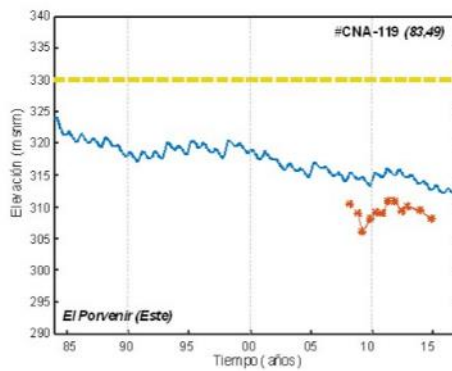
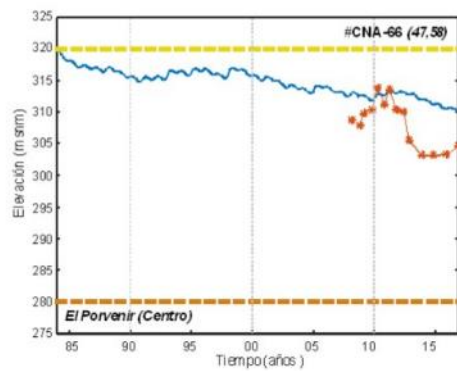
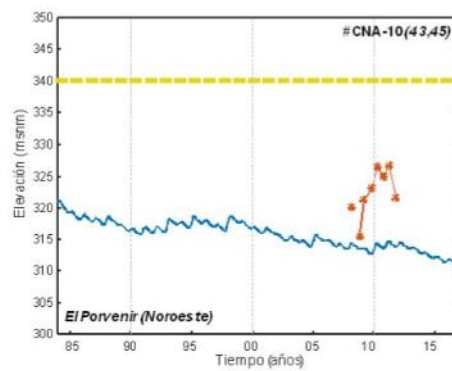
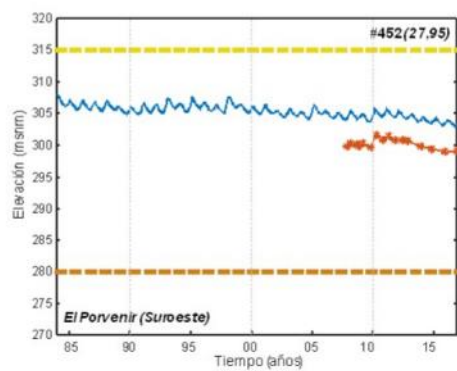
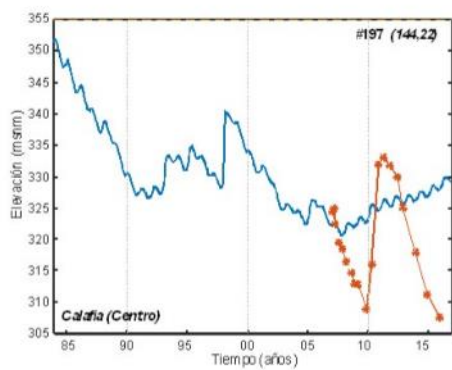
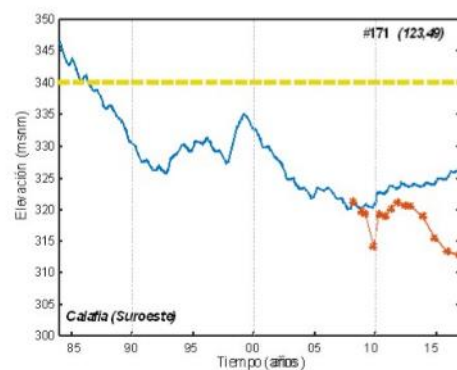
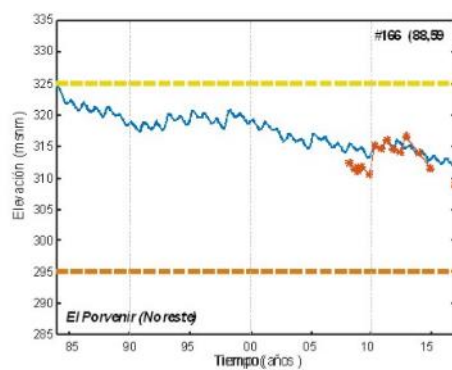
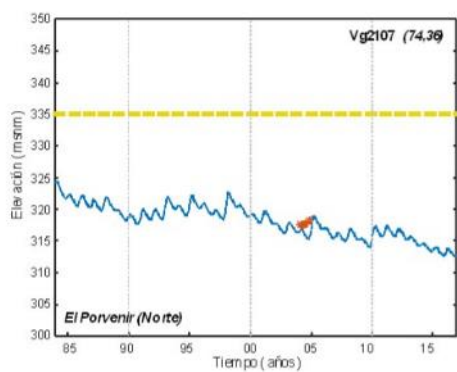


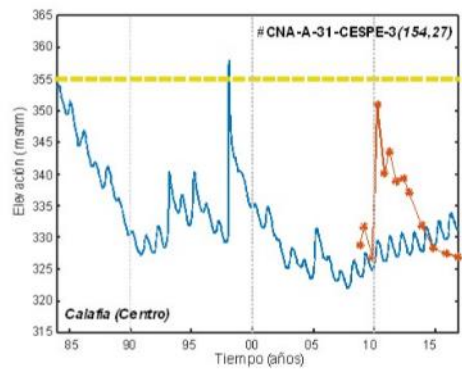
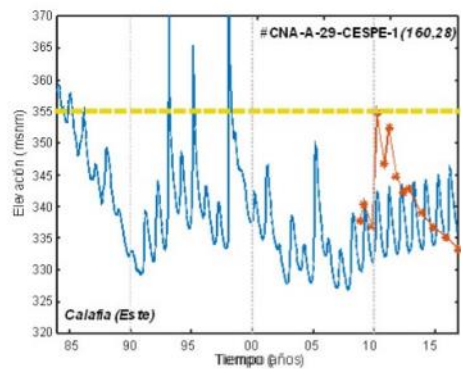
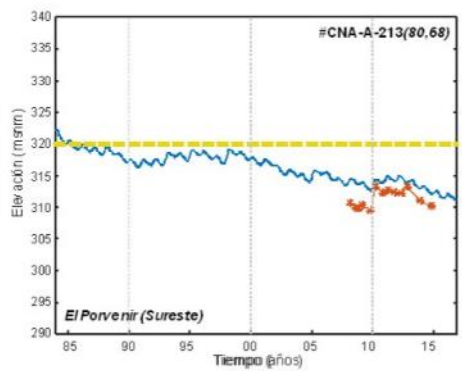
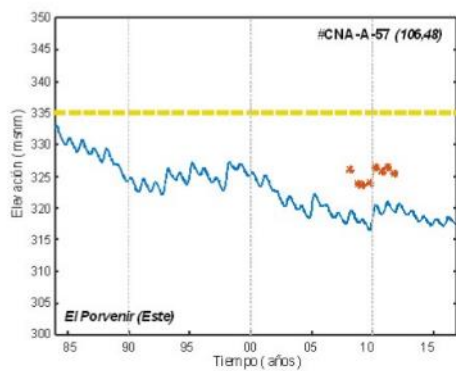
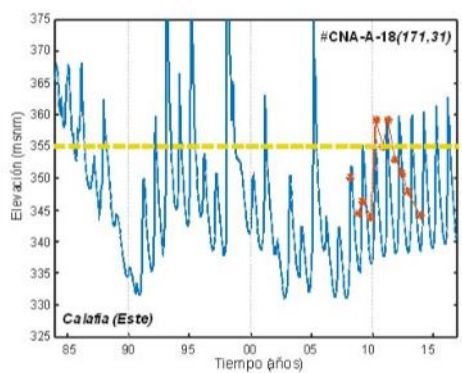
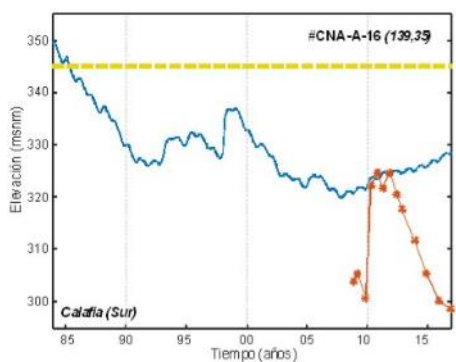
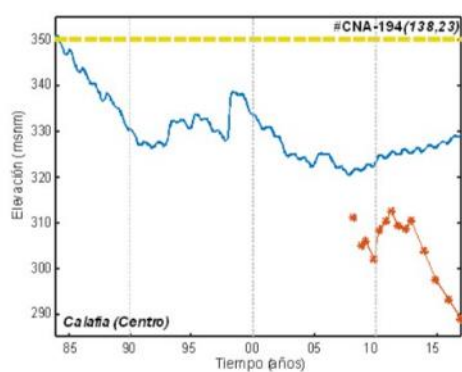
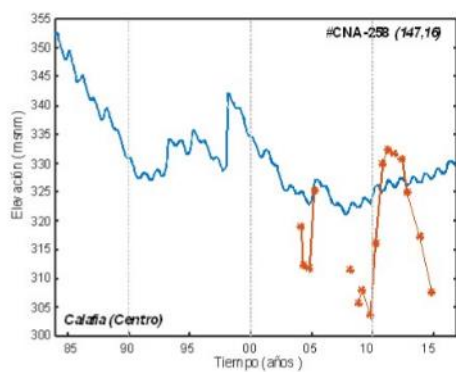


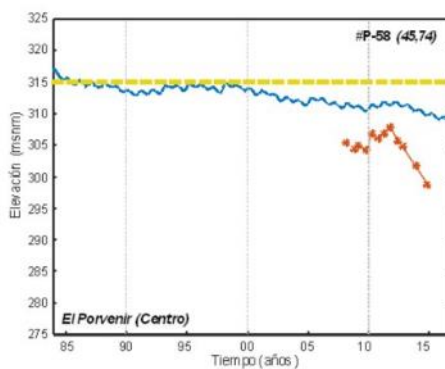
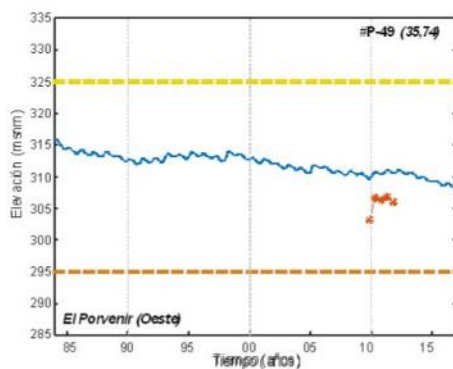
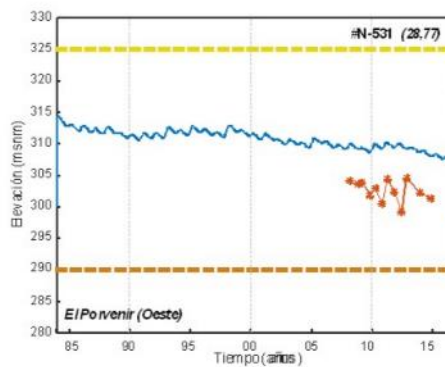
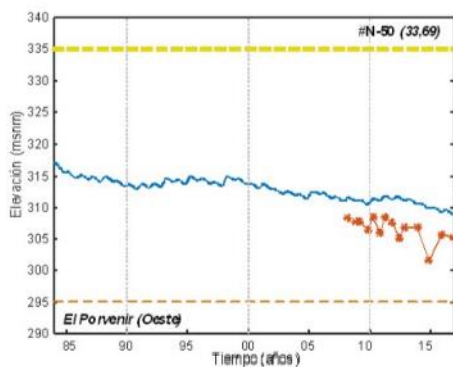
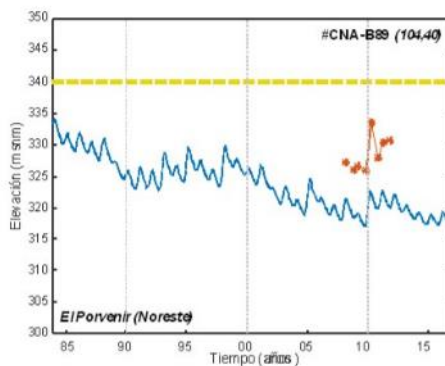
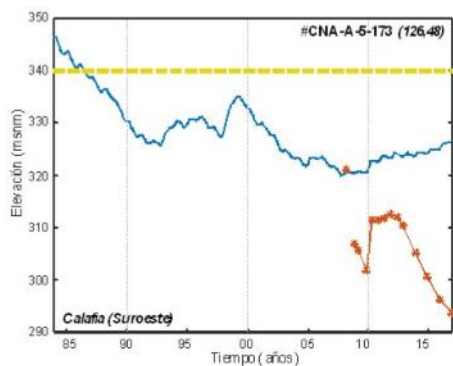
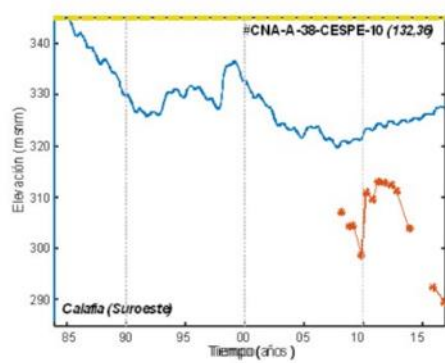
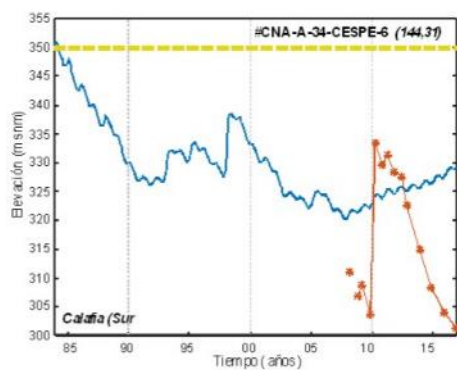


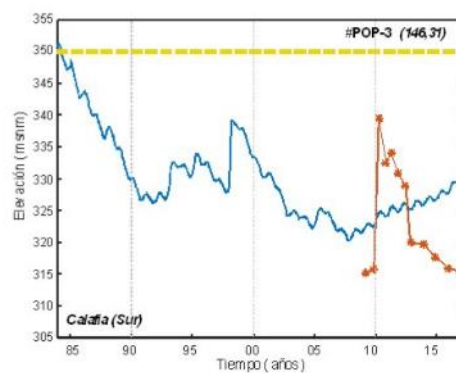
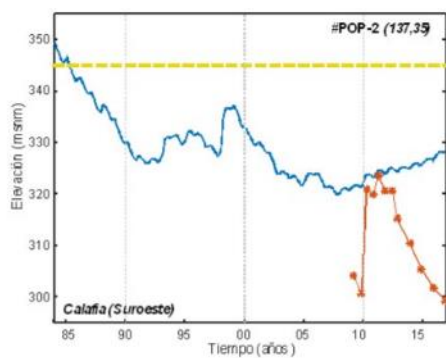
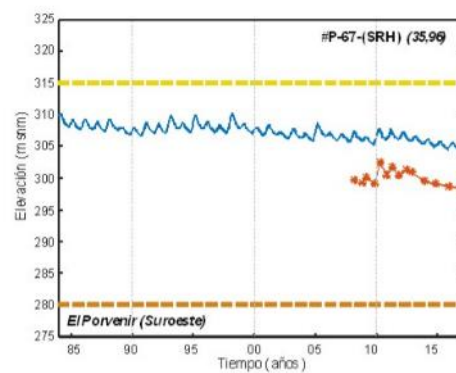
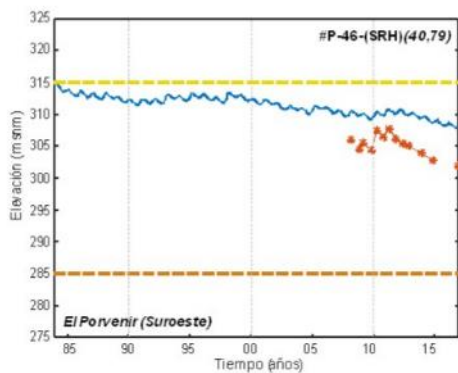
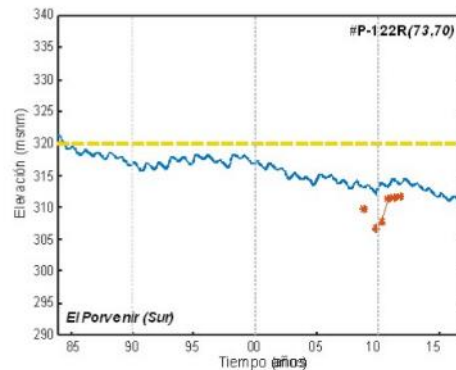
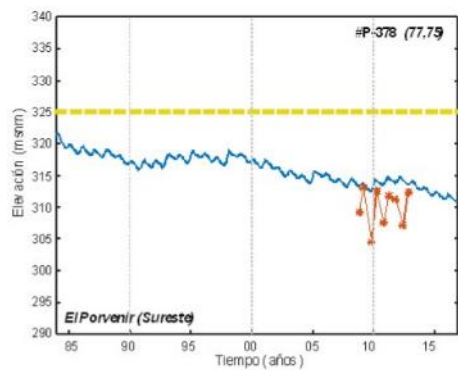
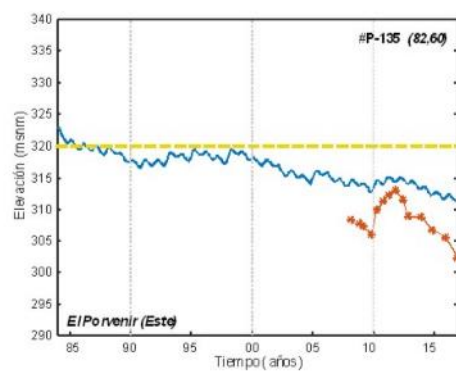
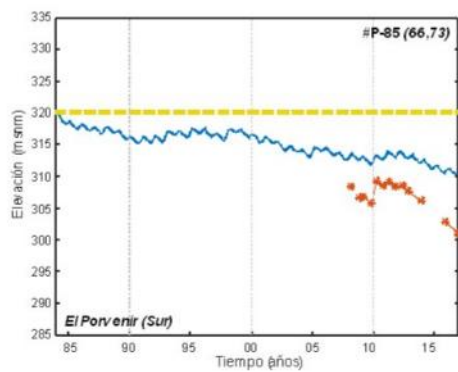


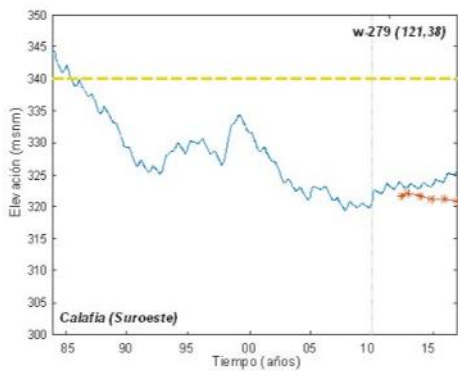
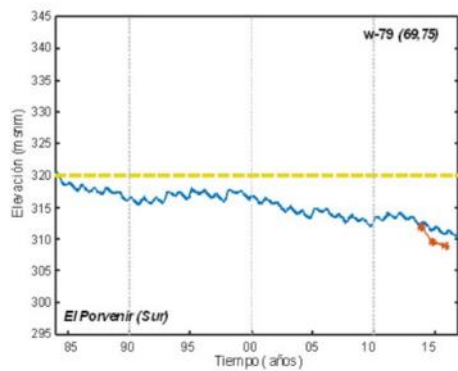
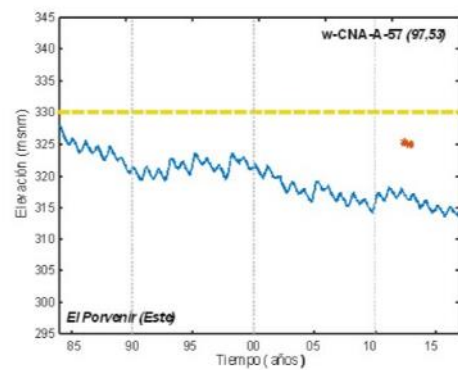
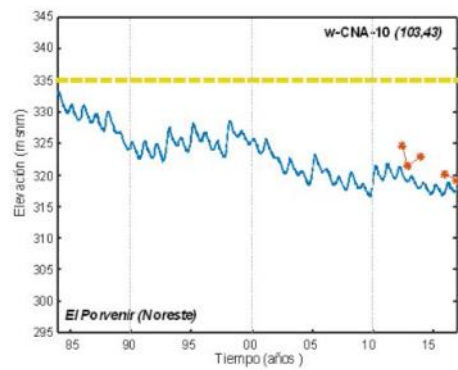
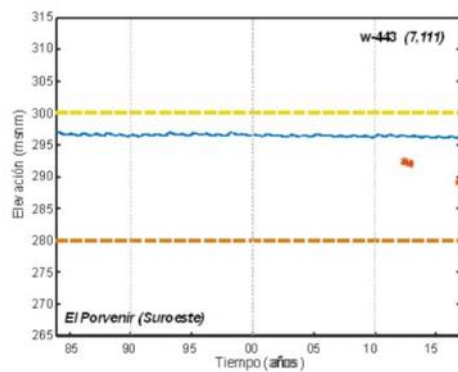
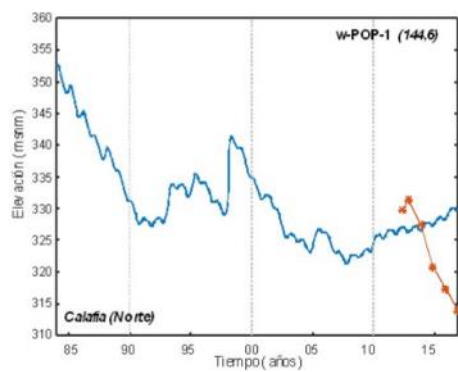








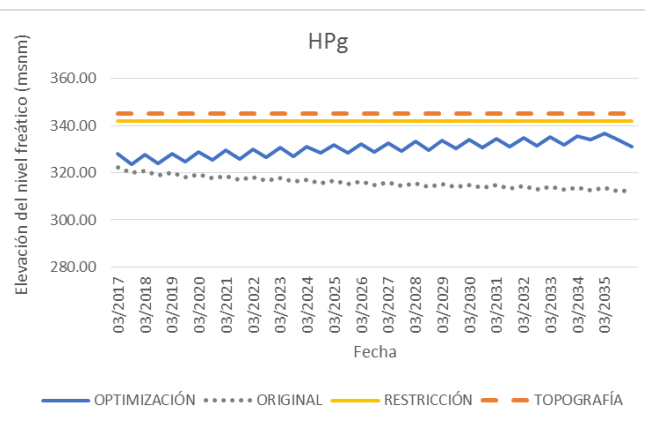
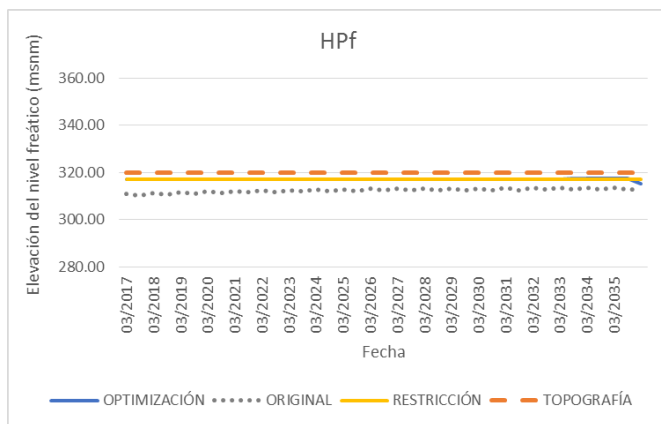
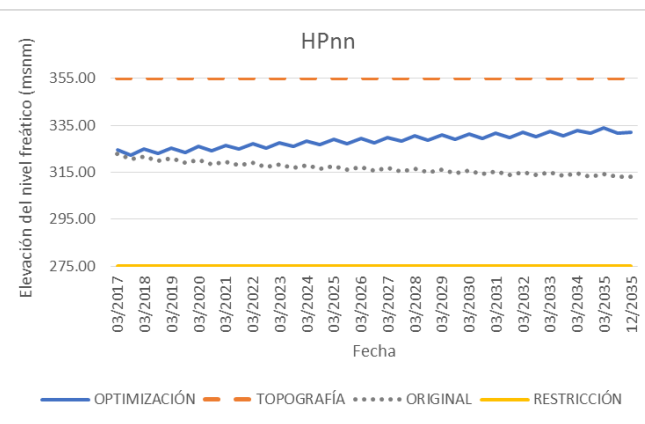
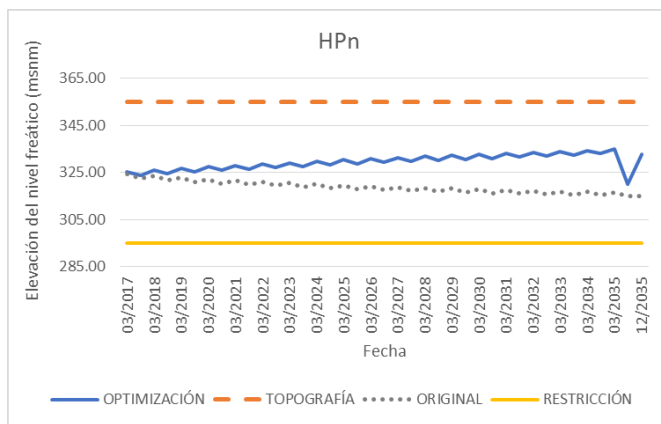
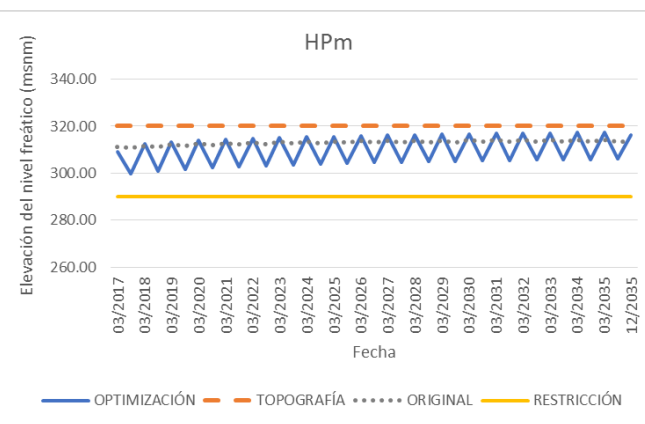
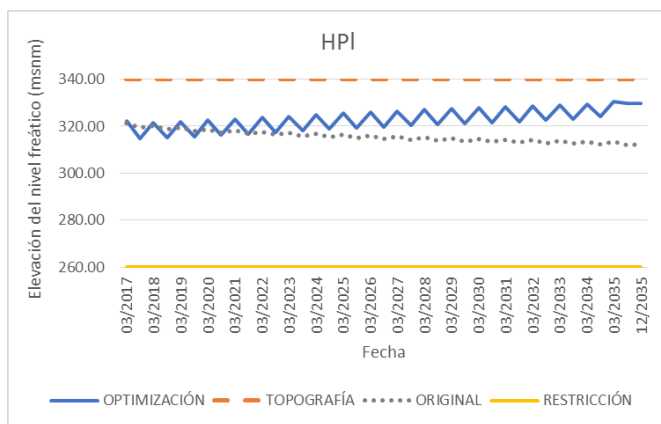


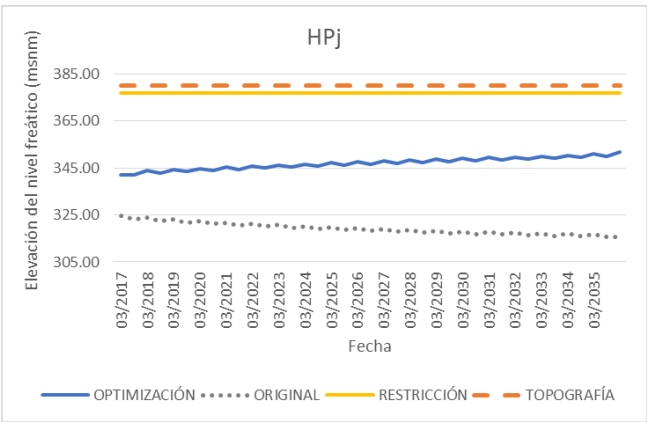
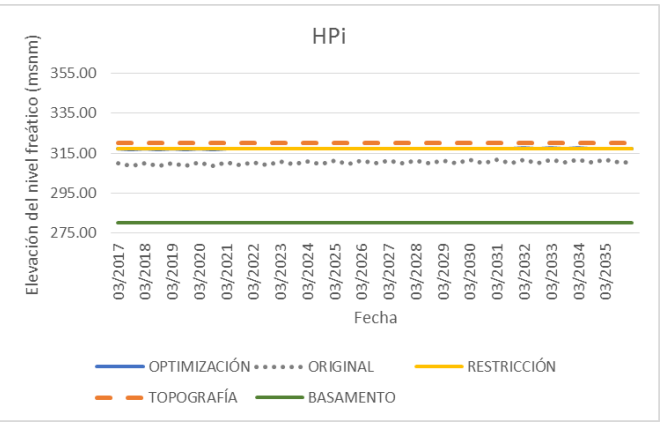
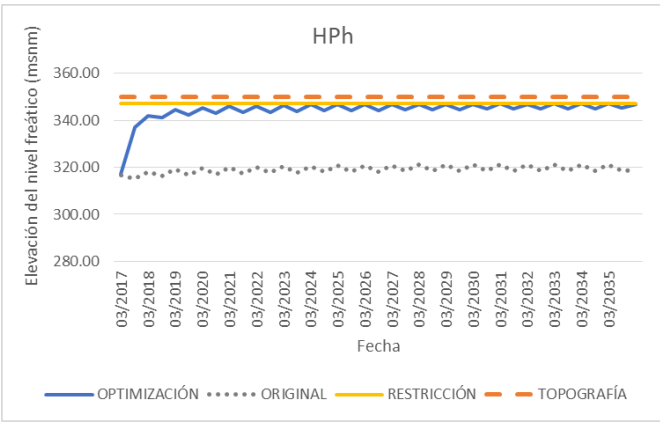


APÉNDICE B

Graficas de comportamiento del nivel freático para los pozos optimizados del escenario 1. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.

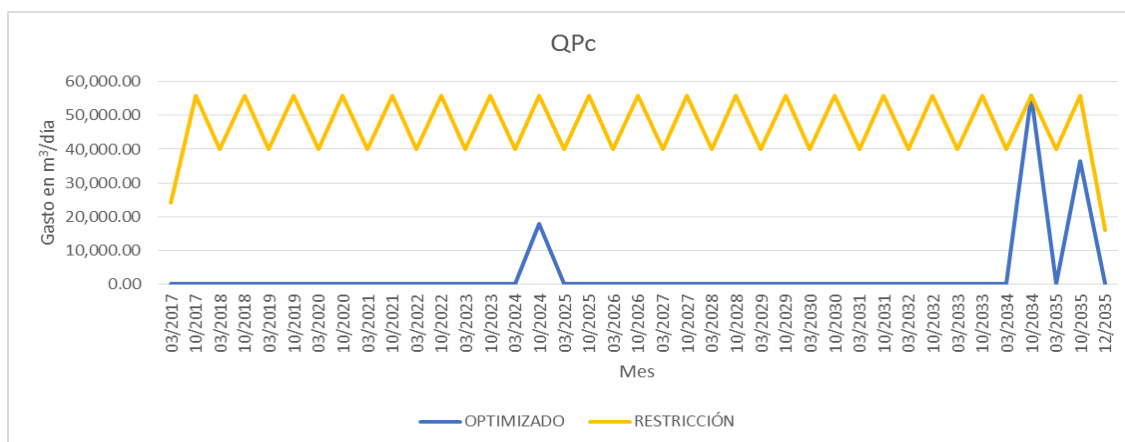
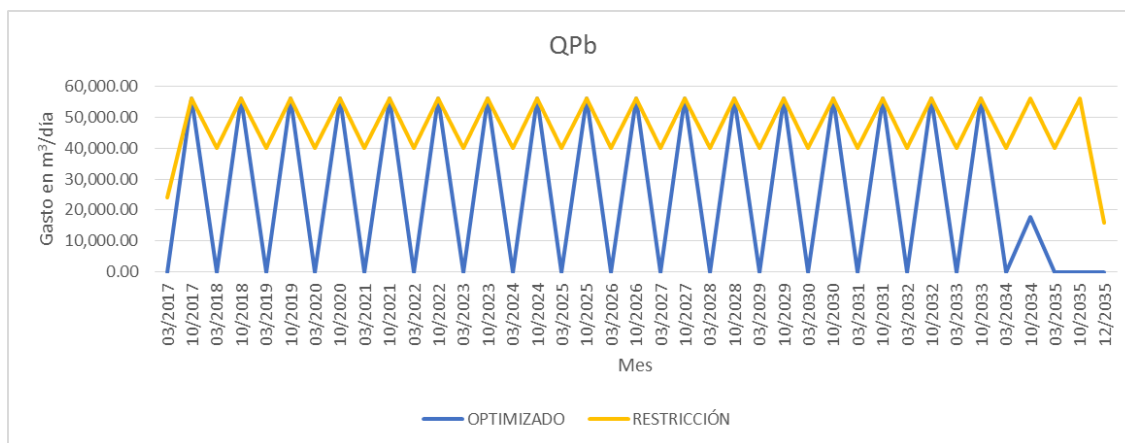
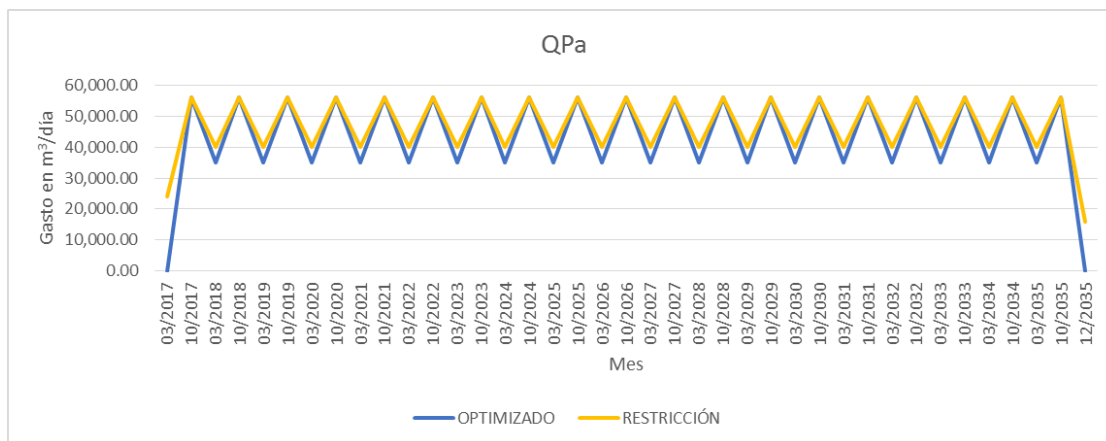


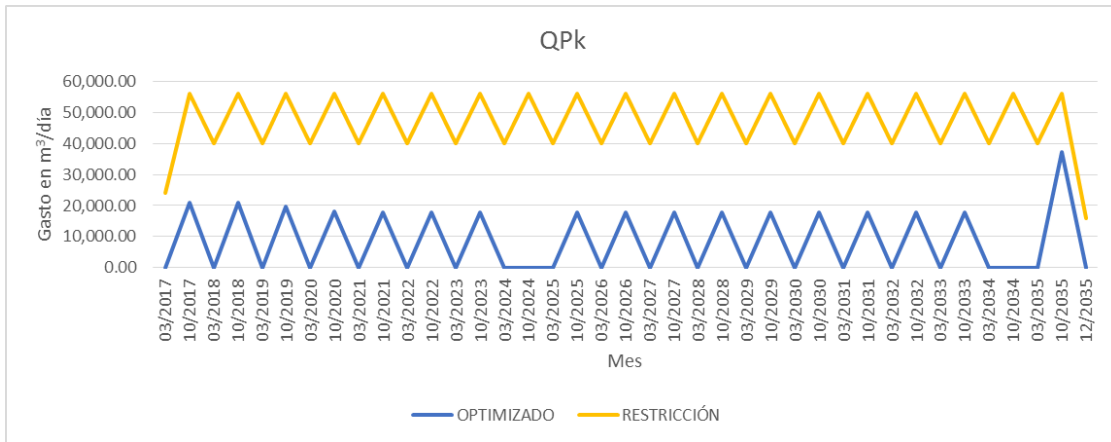
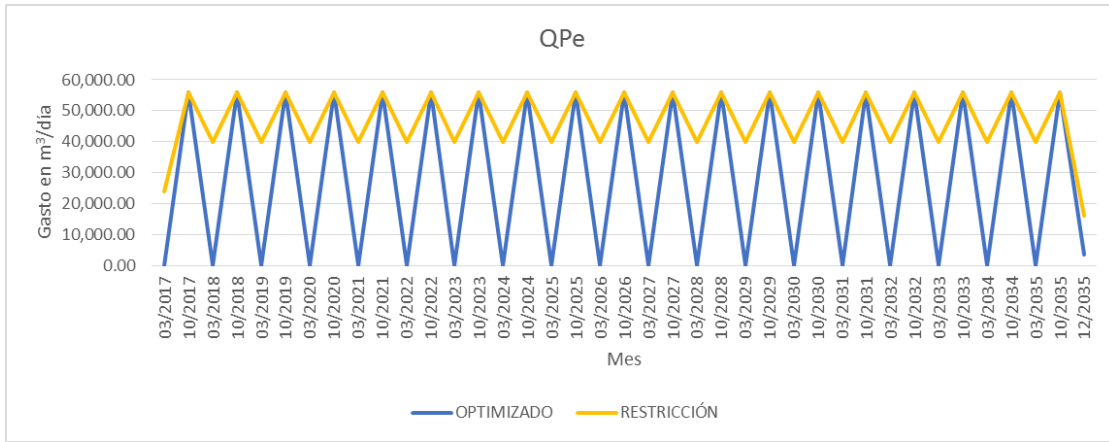
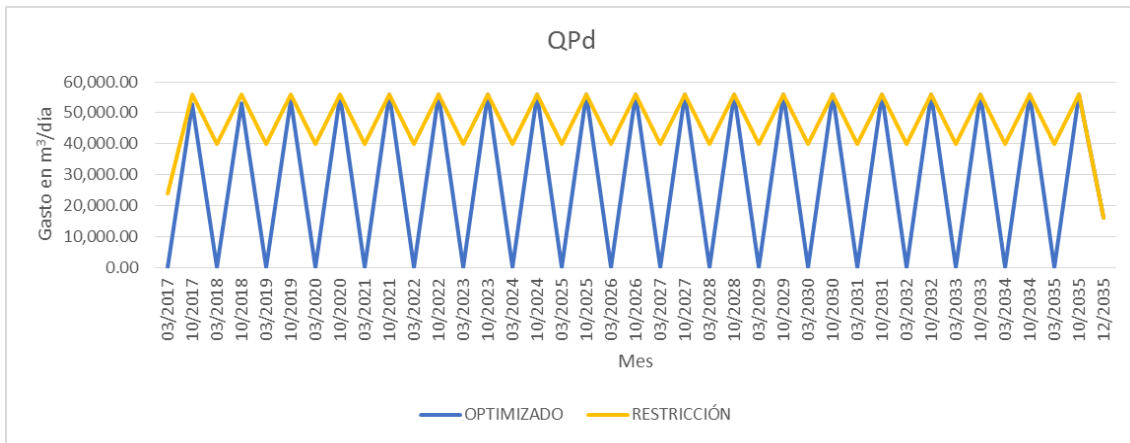


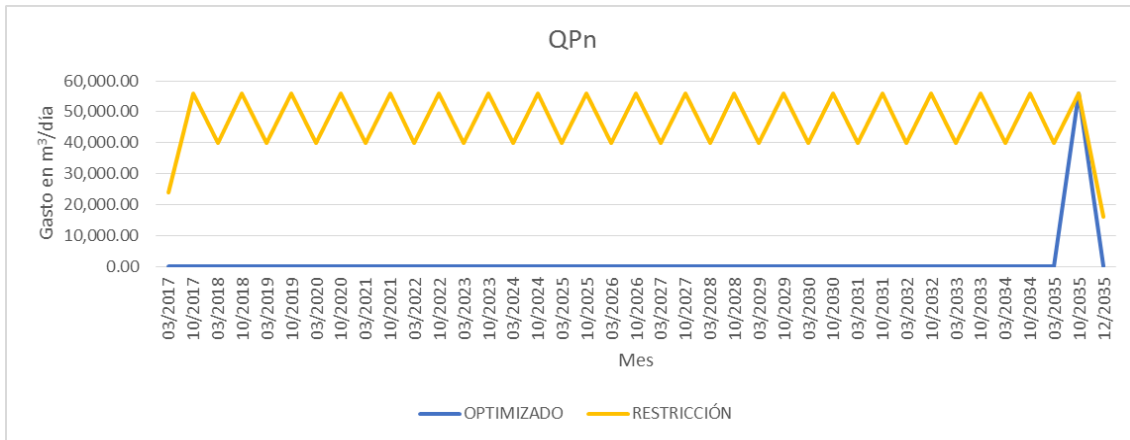
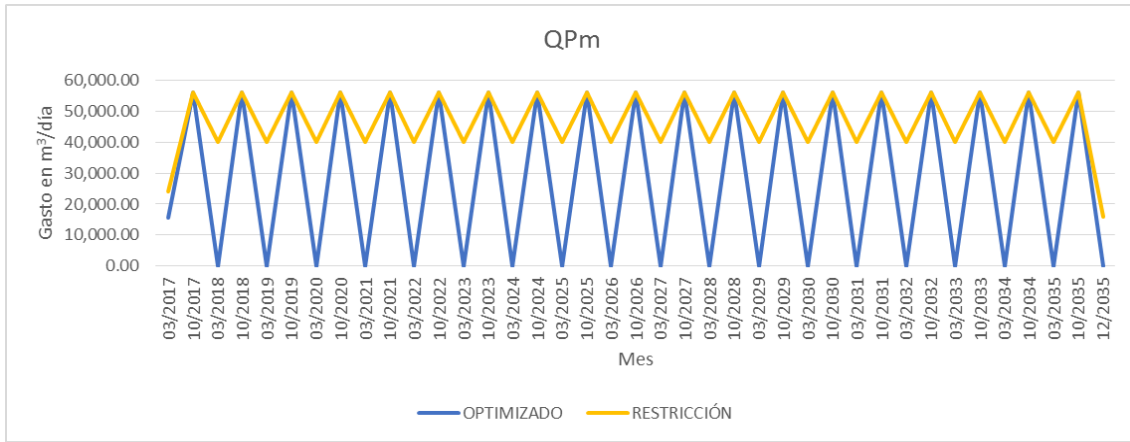
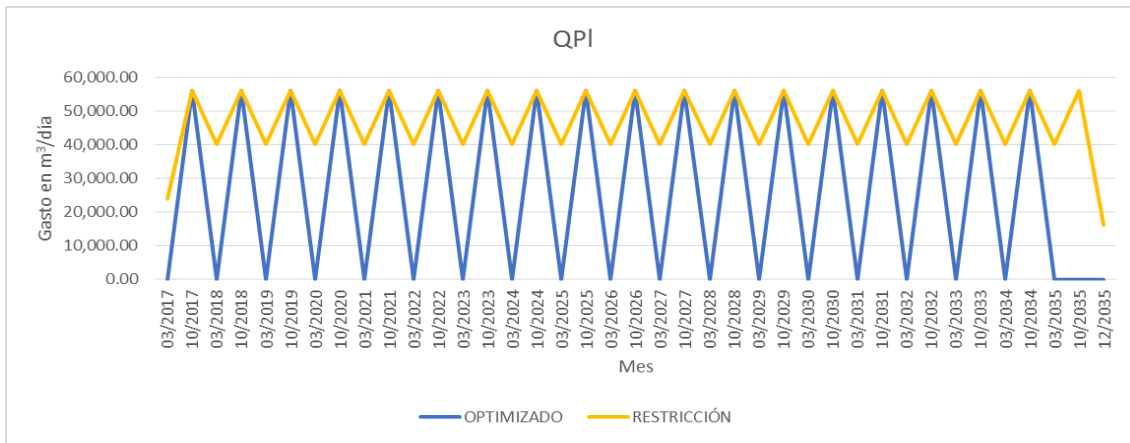


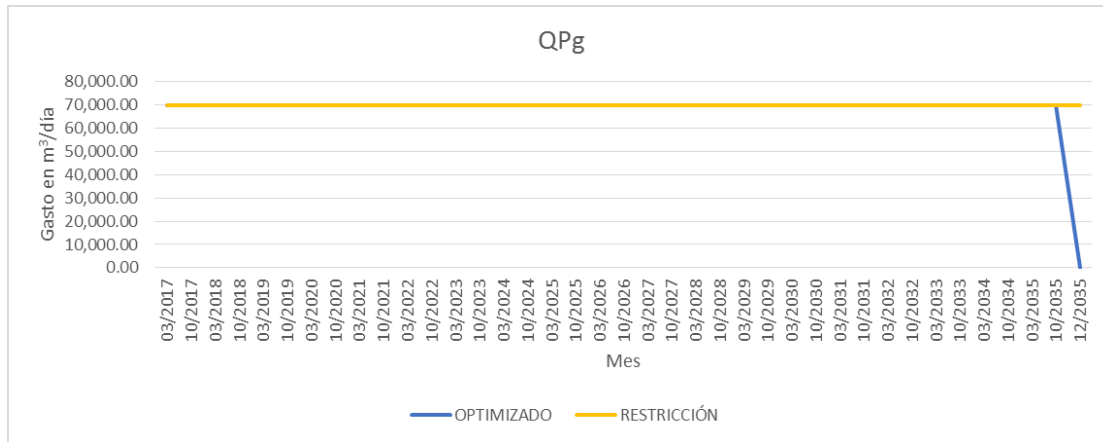
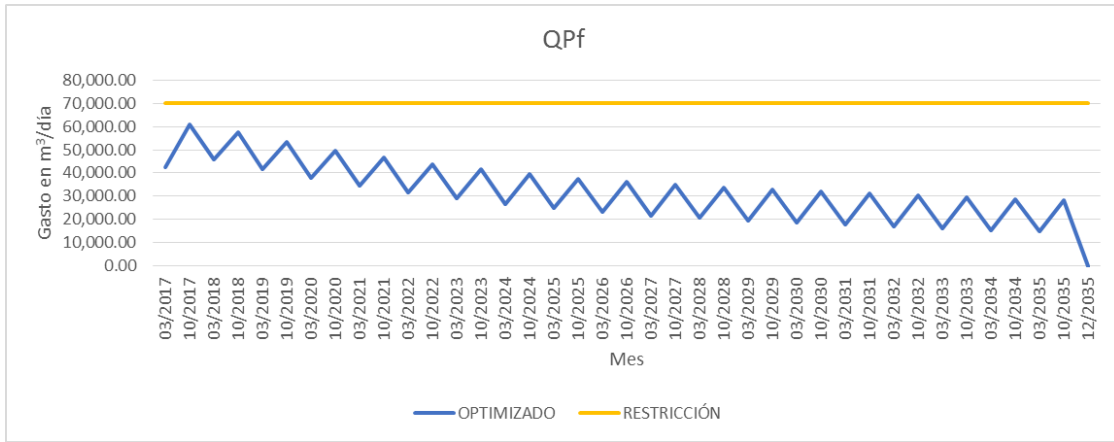
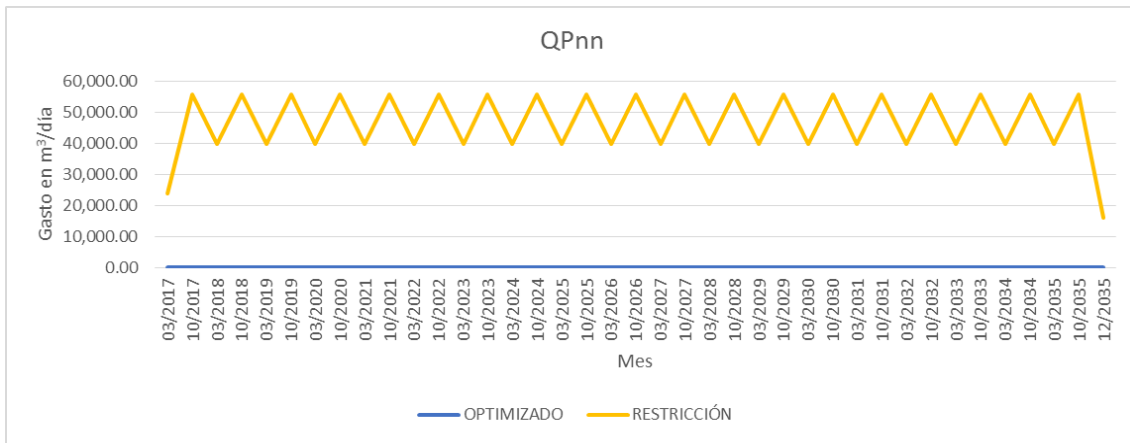
APÉNDICE C

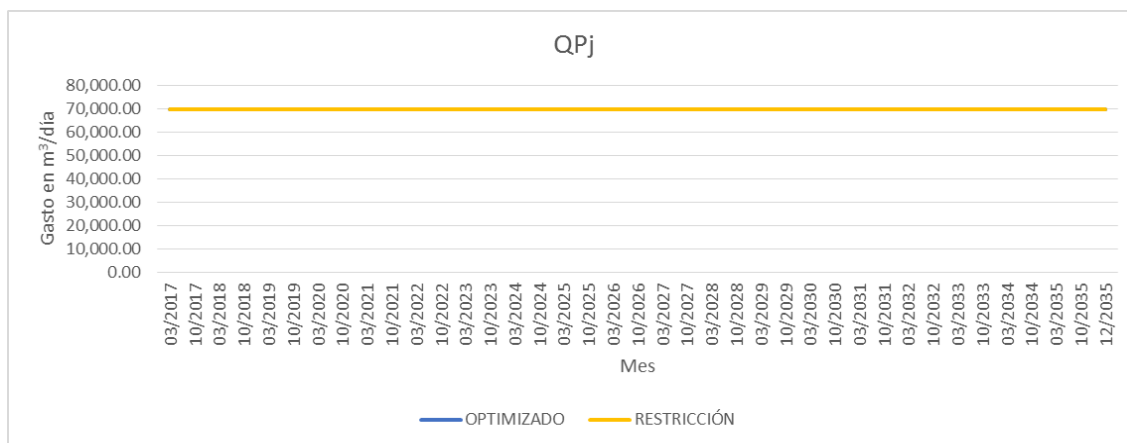
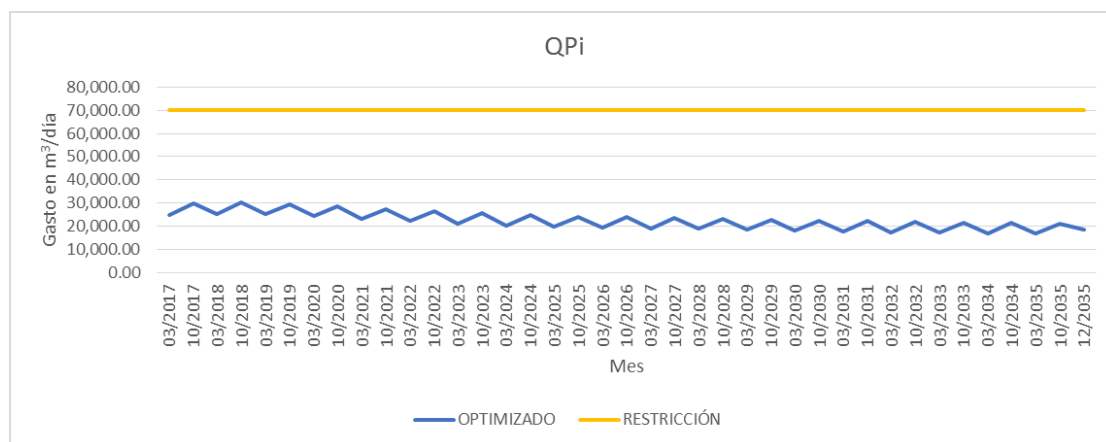
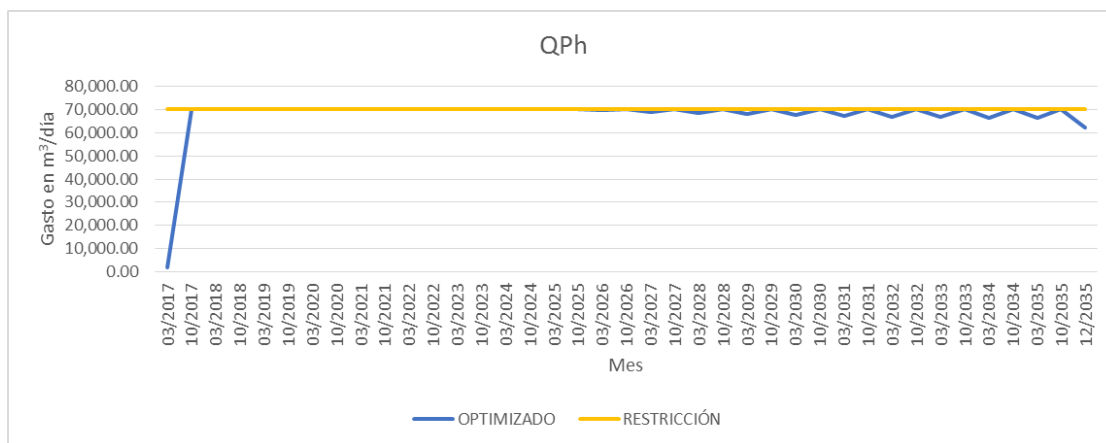
Graficas de tasa de extracción para los pozos optimizados del escenario 1. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.







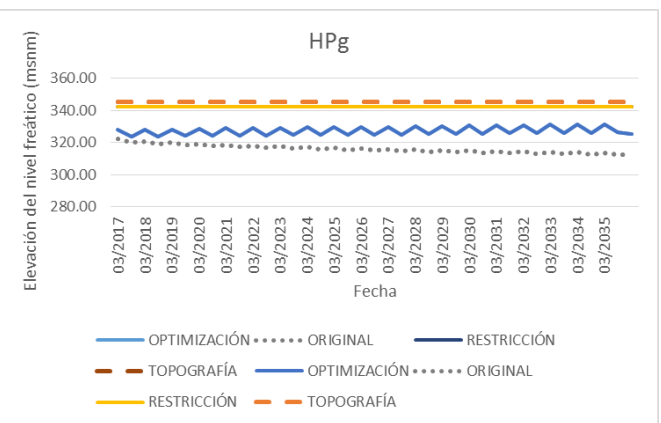
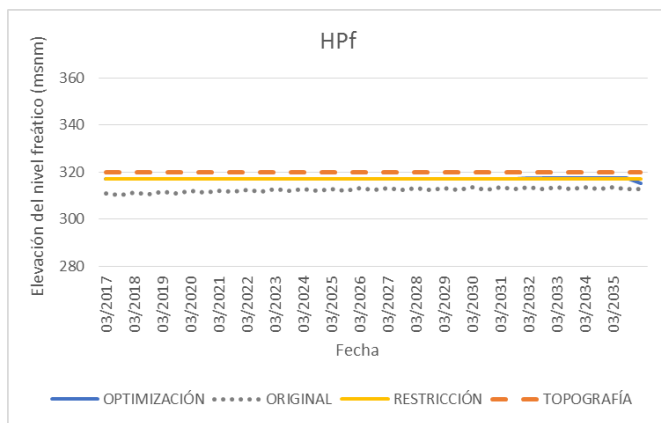
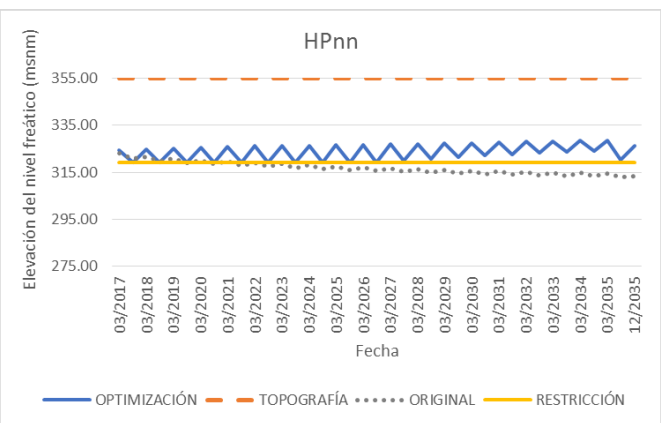
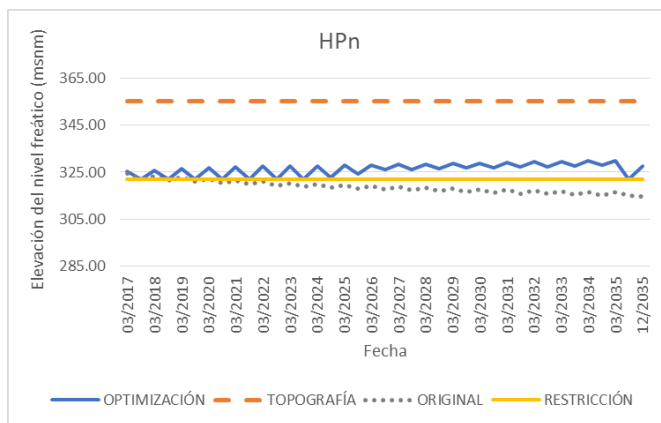
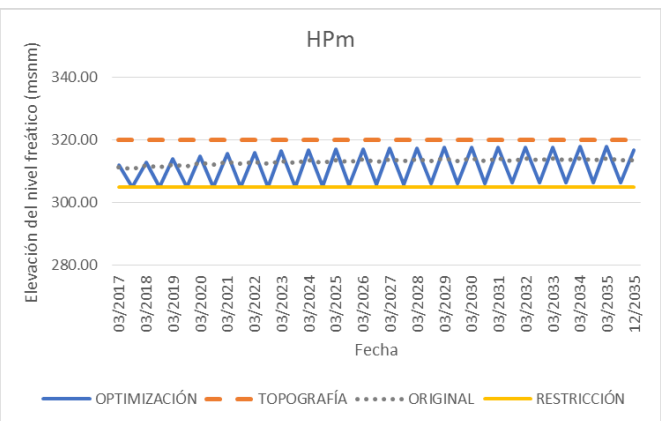
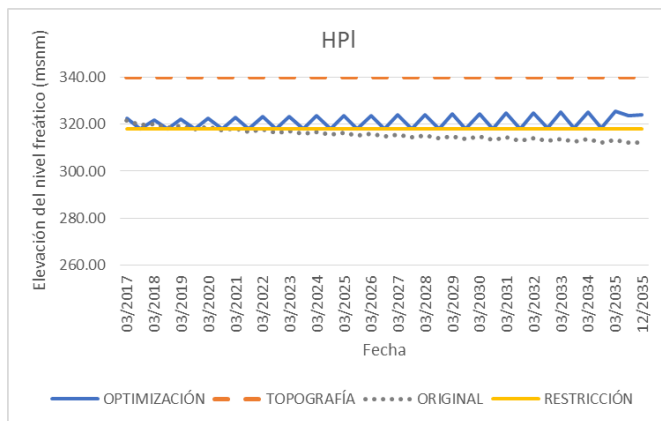


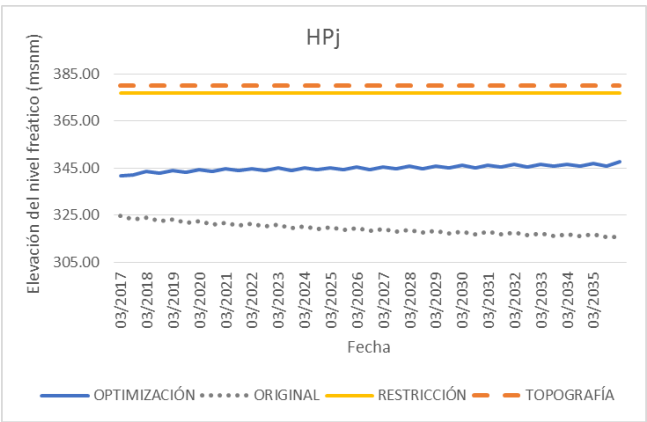
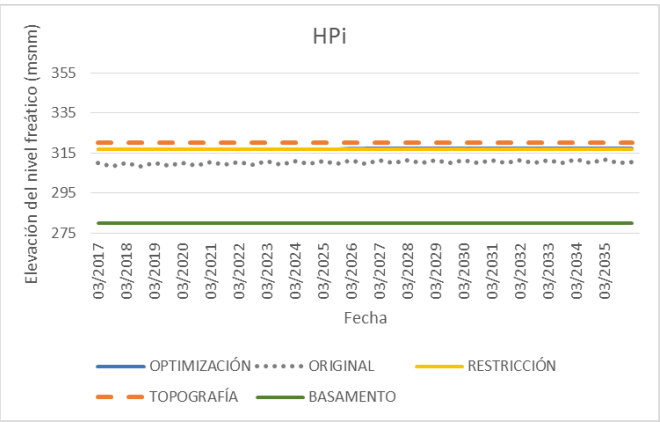
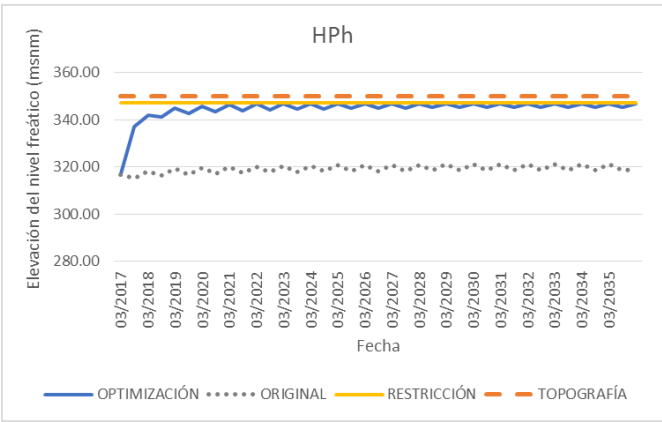


APÉNDICE D

Graficas de comportamiento del nivel freático para los pozos optimizados del escenario 2. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.

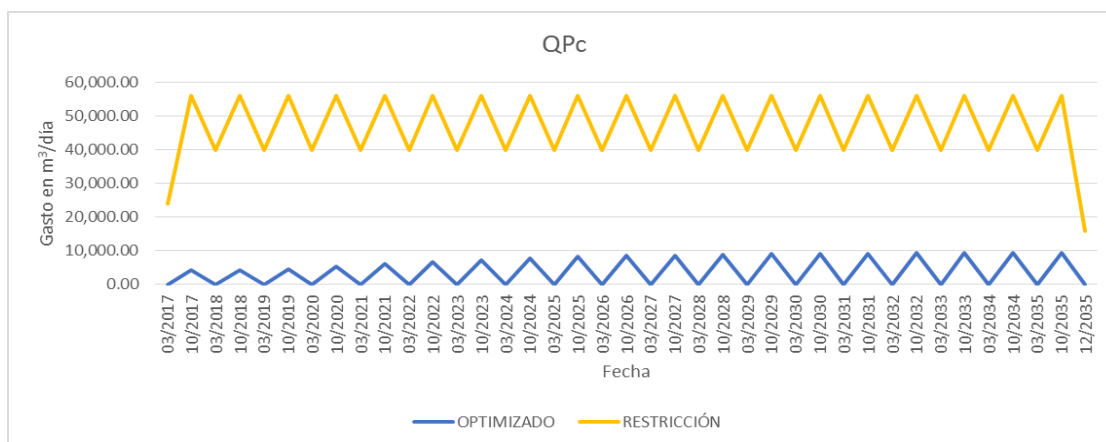
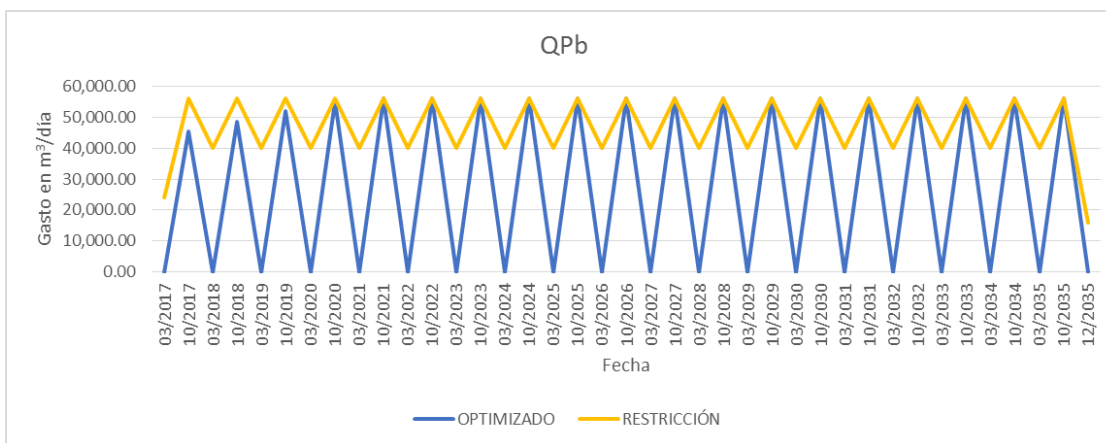
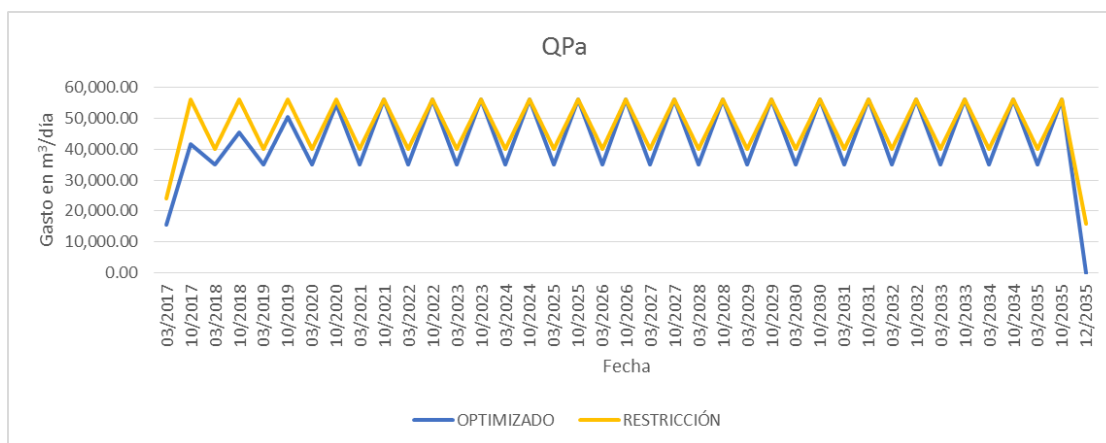


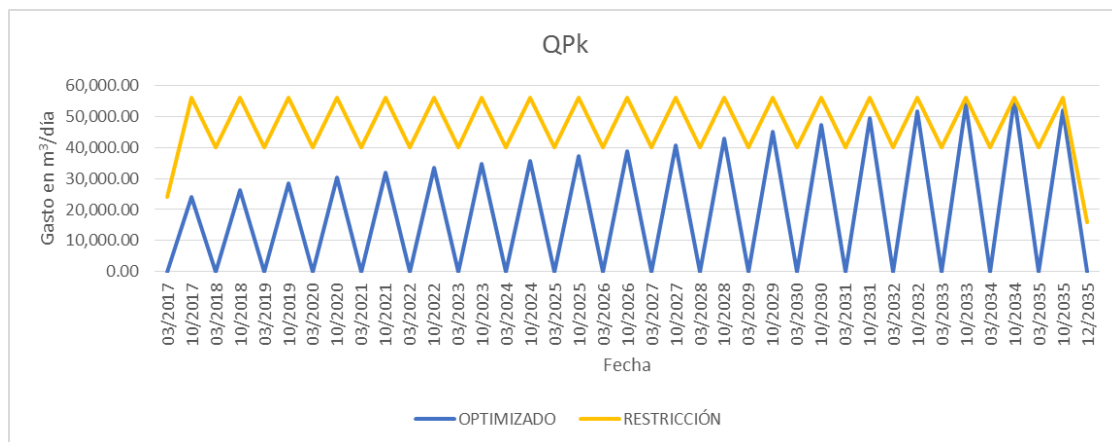
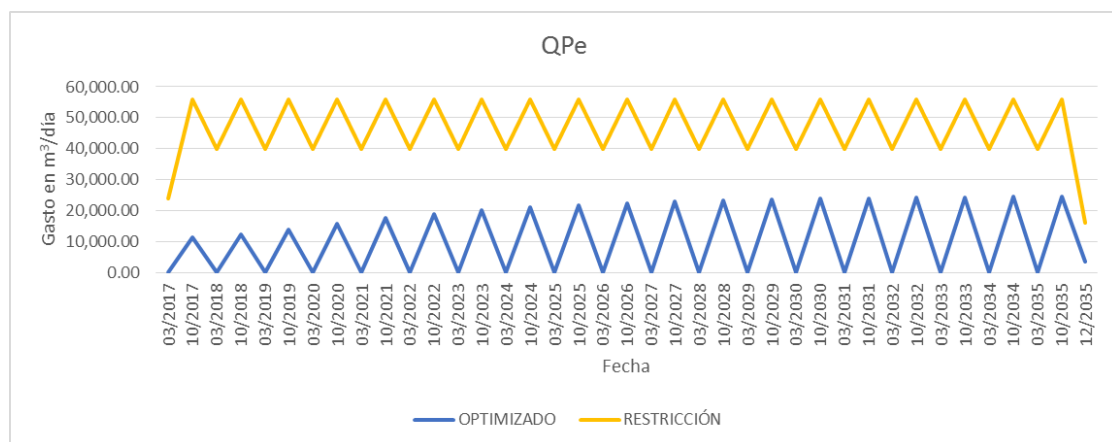
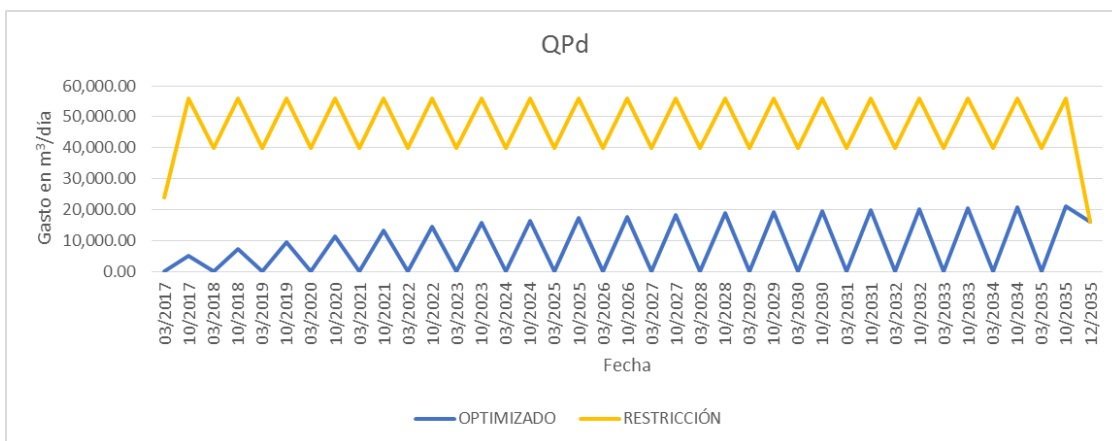


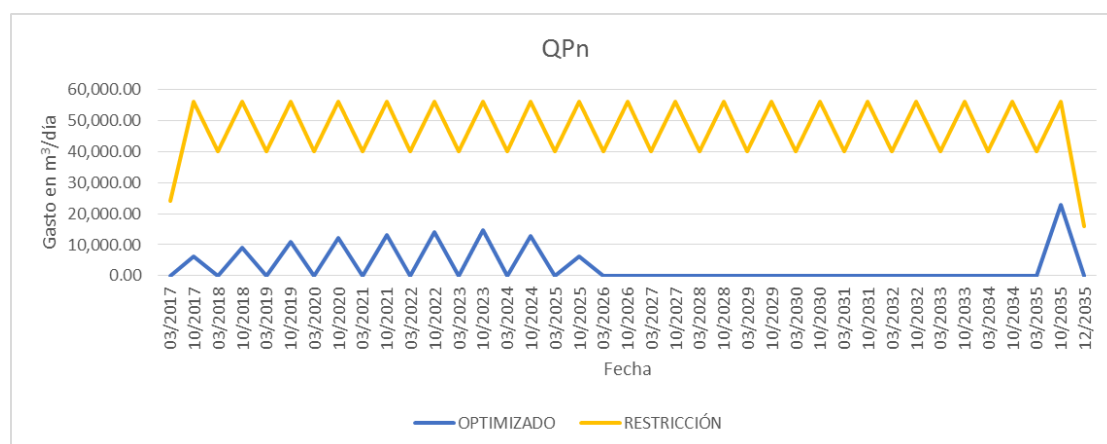
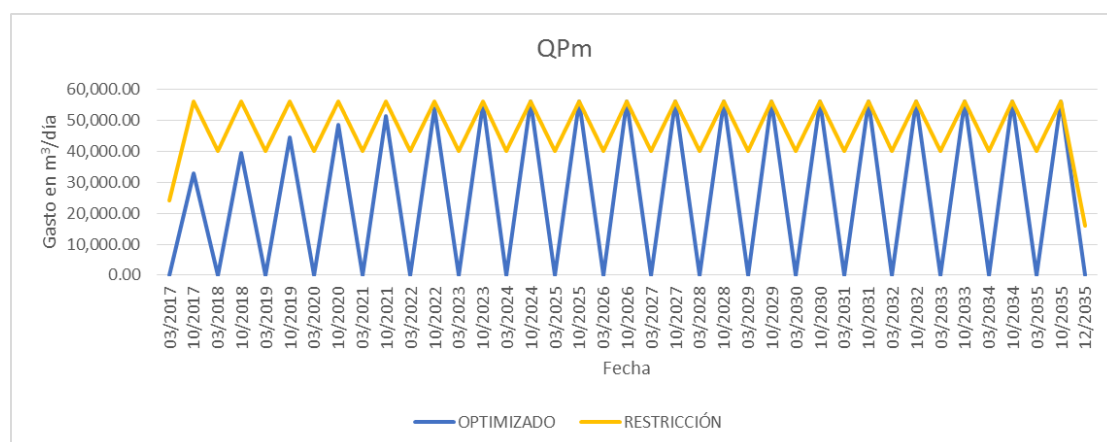
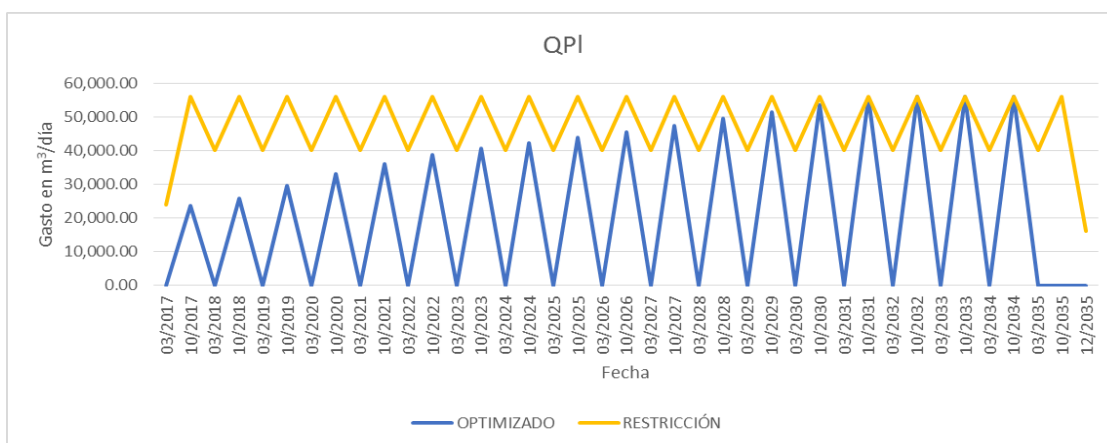


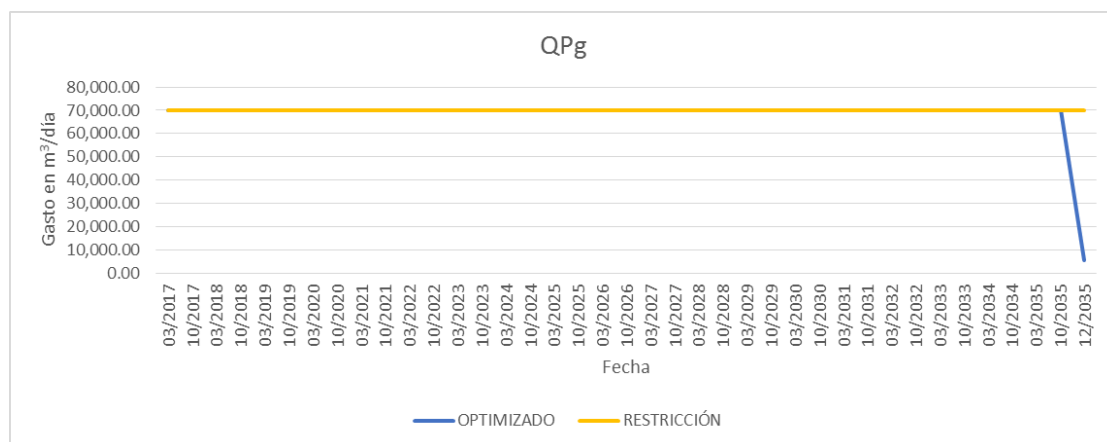
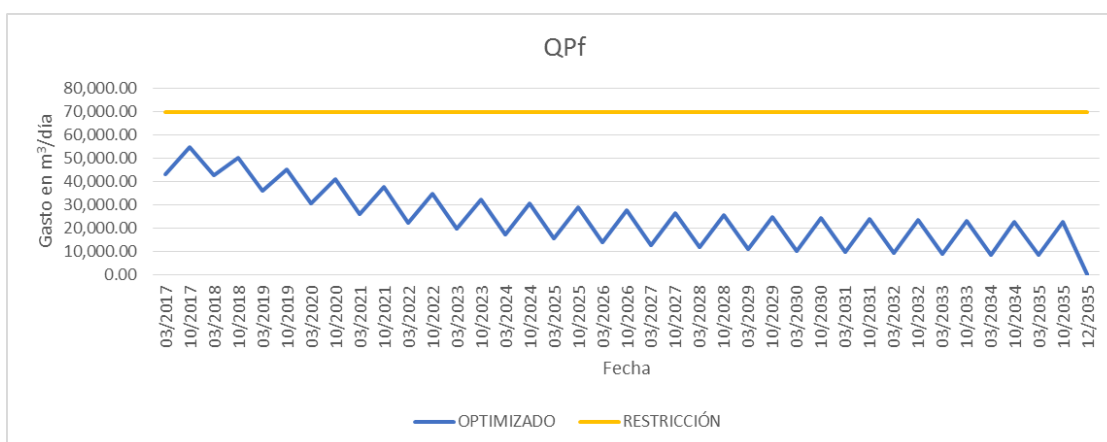
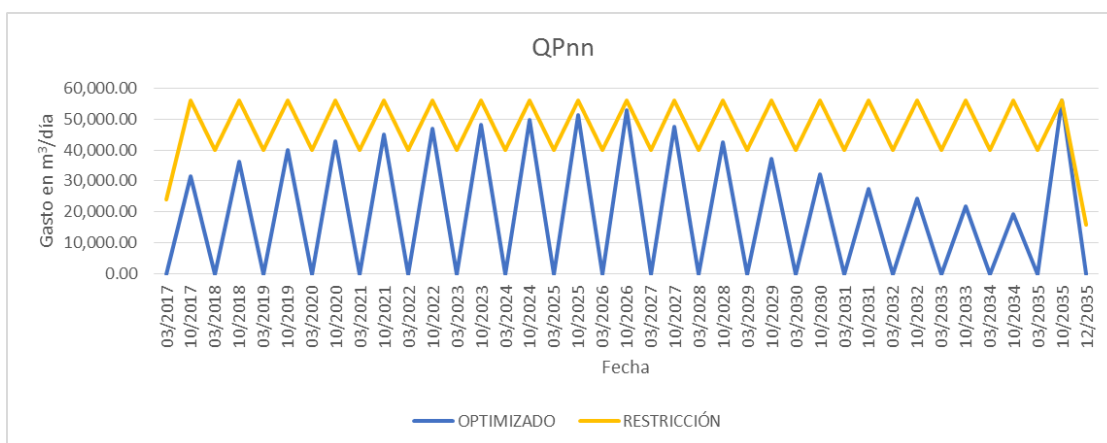
APÉNDICE E

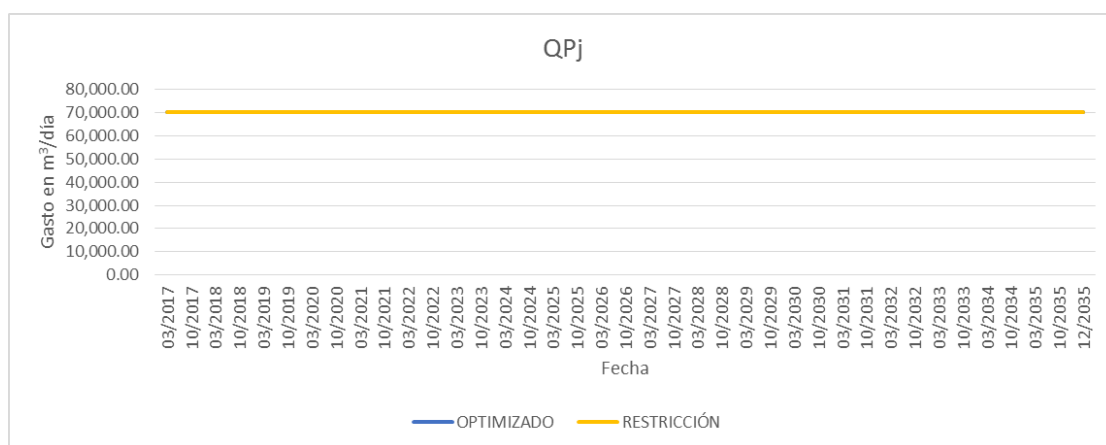
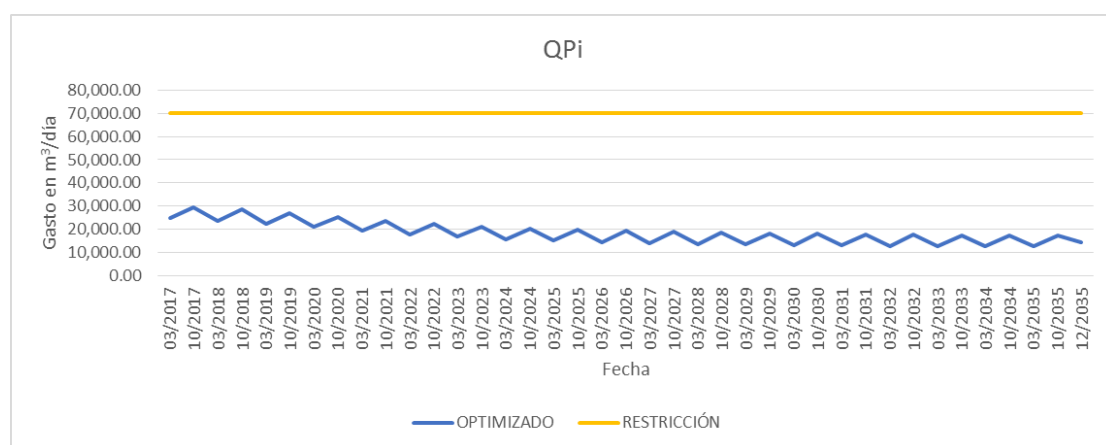
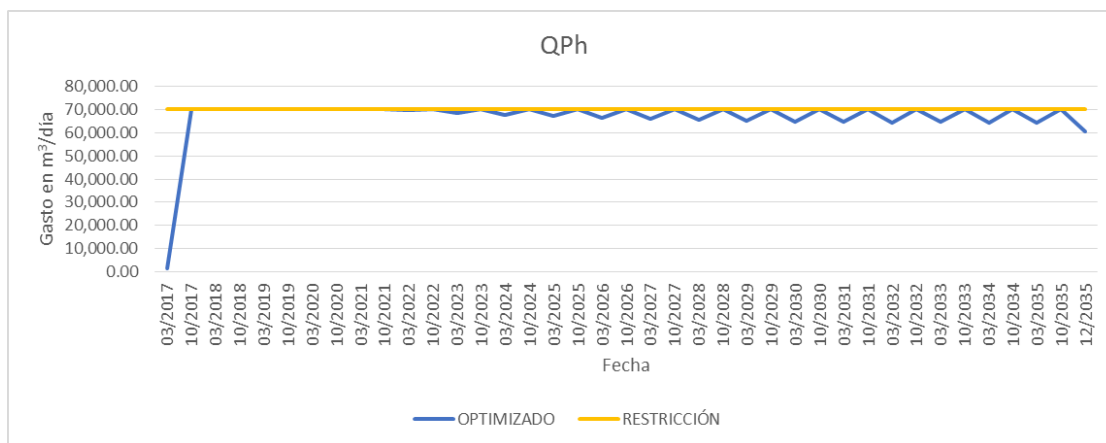
Graficas de tasa de extracción para los pozos optimizados del escenario 2. *Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.*





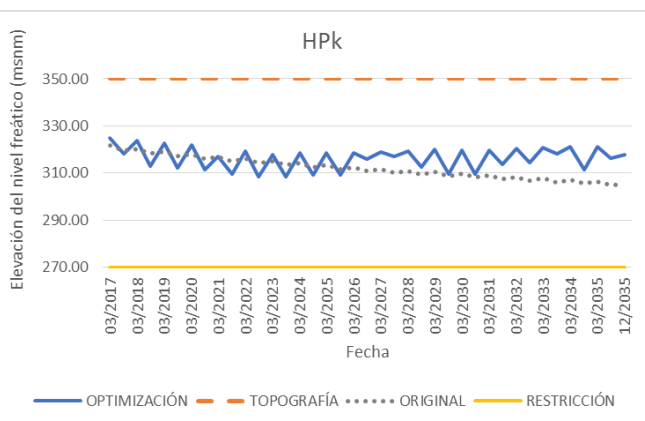
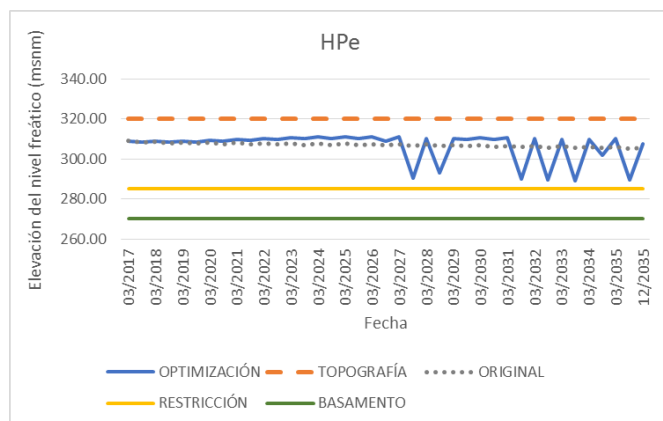
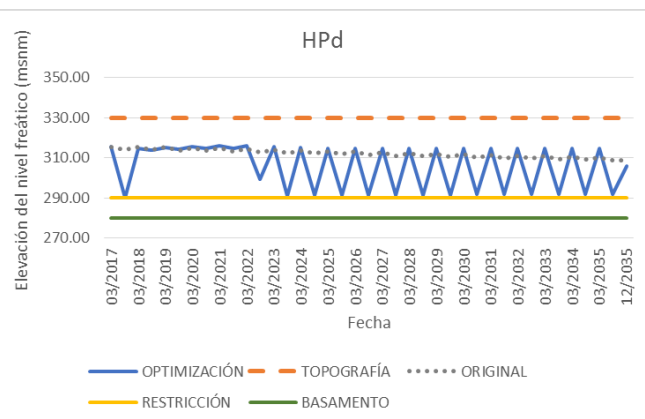
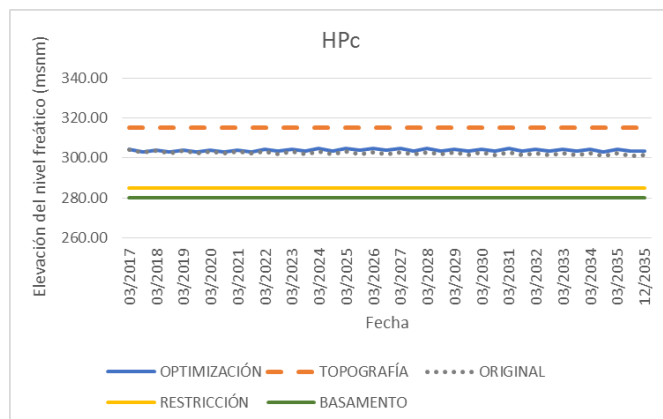
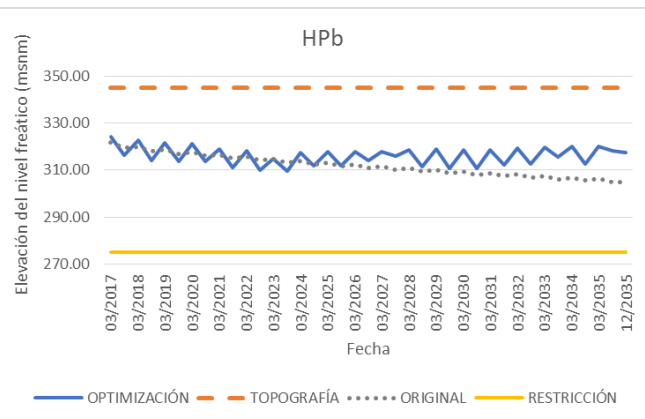
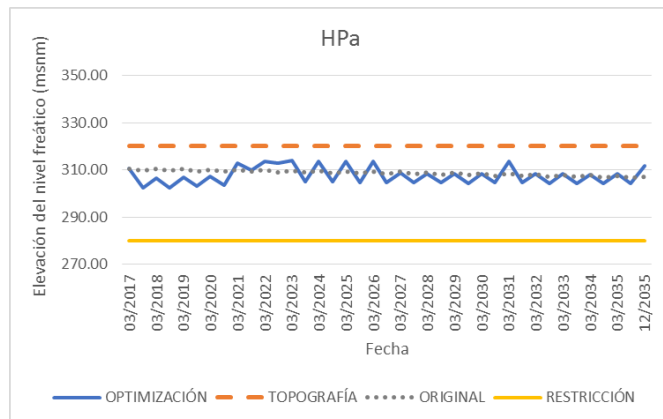


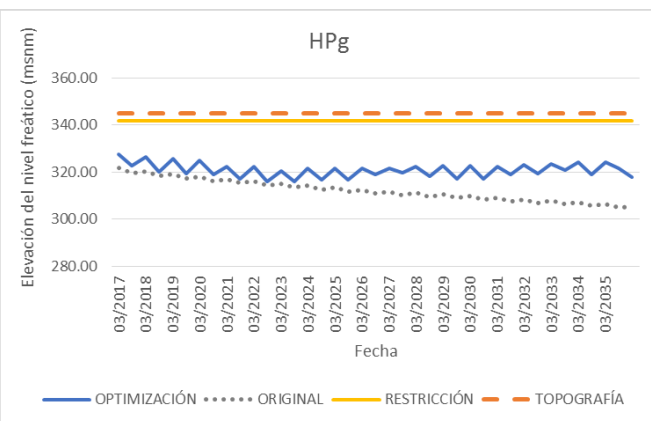
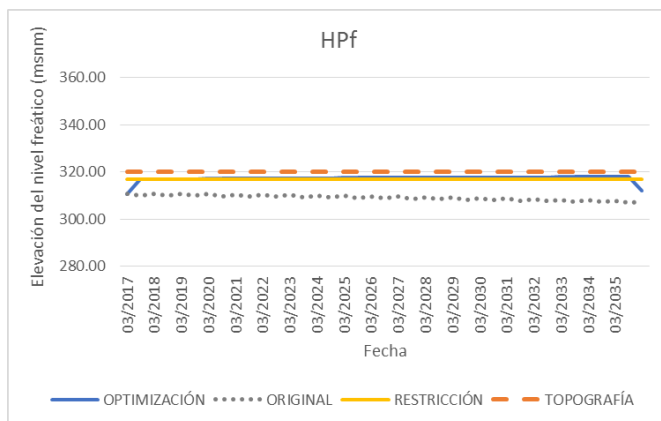
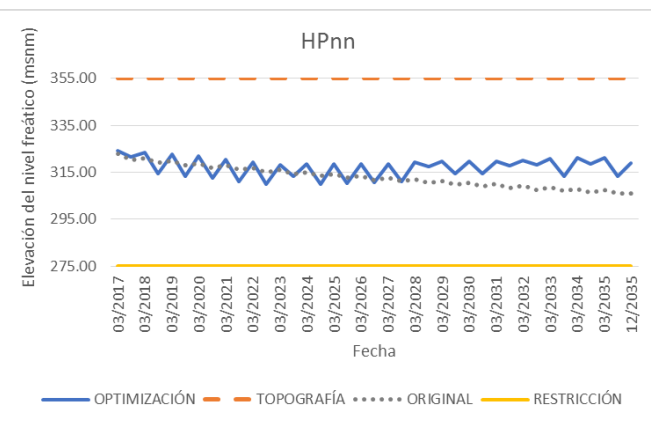
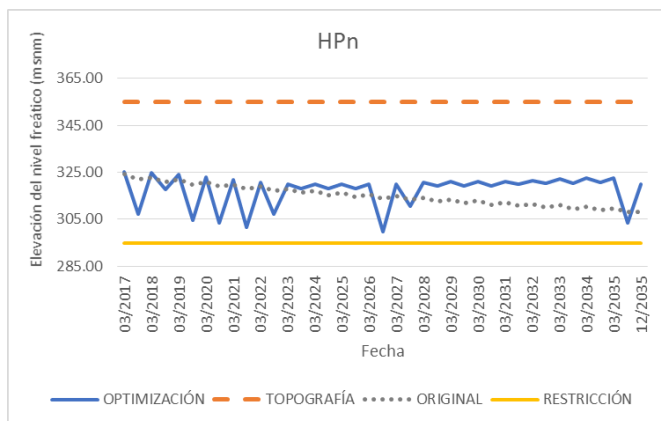
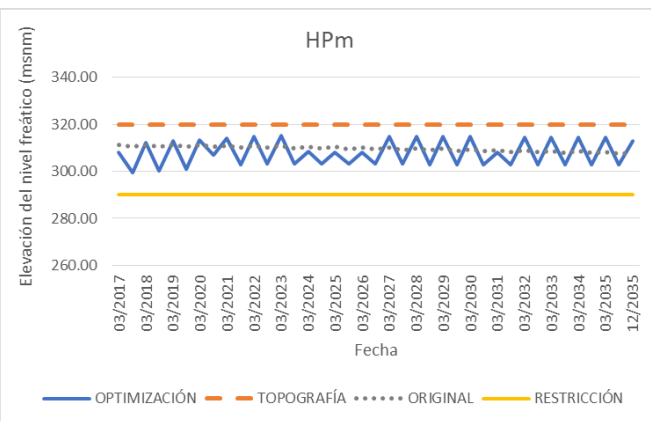
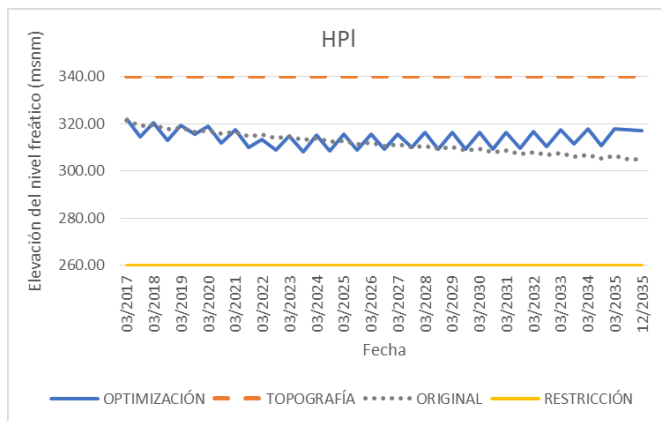


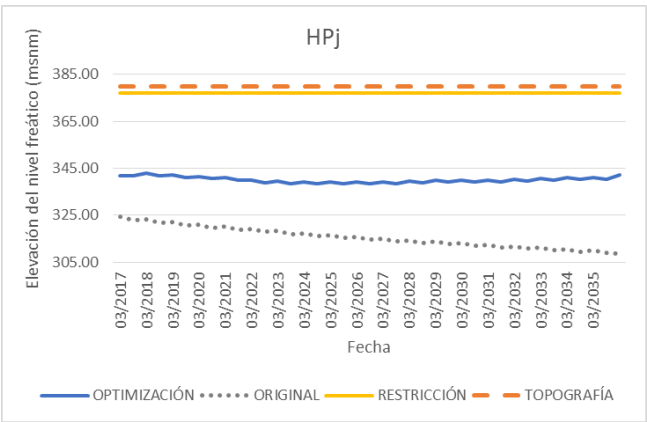
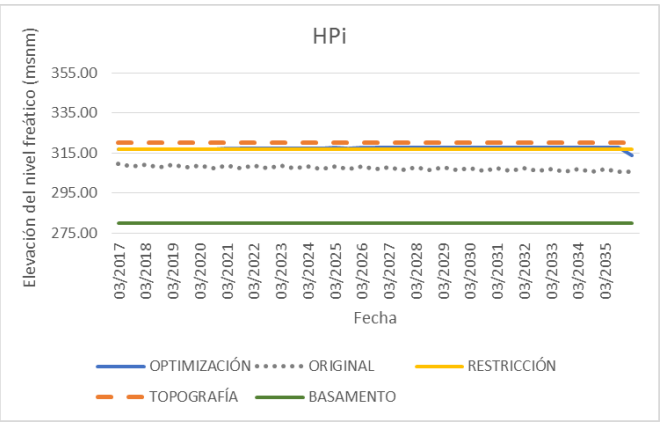
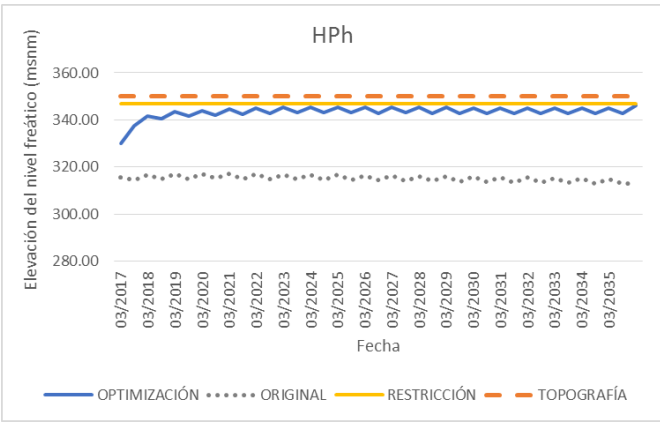


APÉNDICE F

Graficas de comportamiento del nivel freático para los pozos optimizados del escenario 3. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.

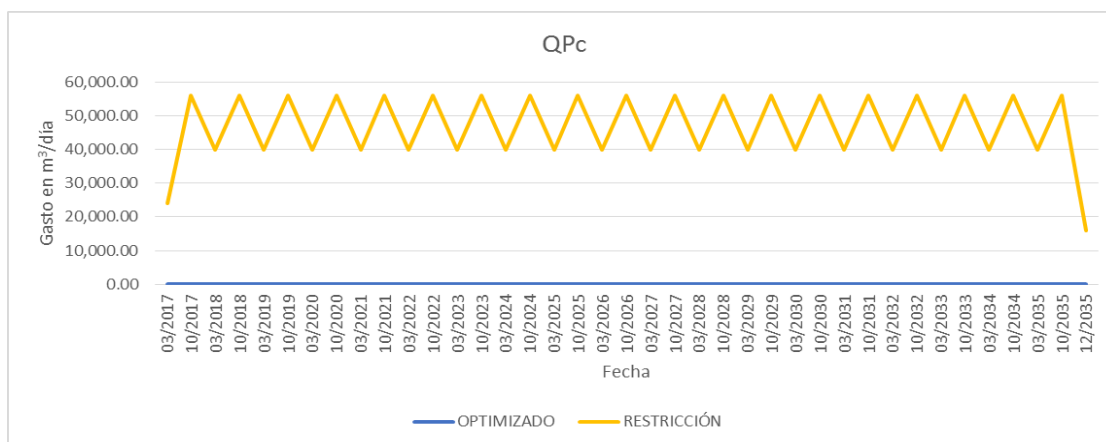
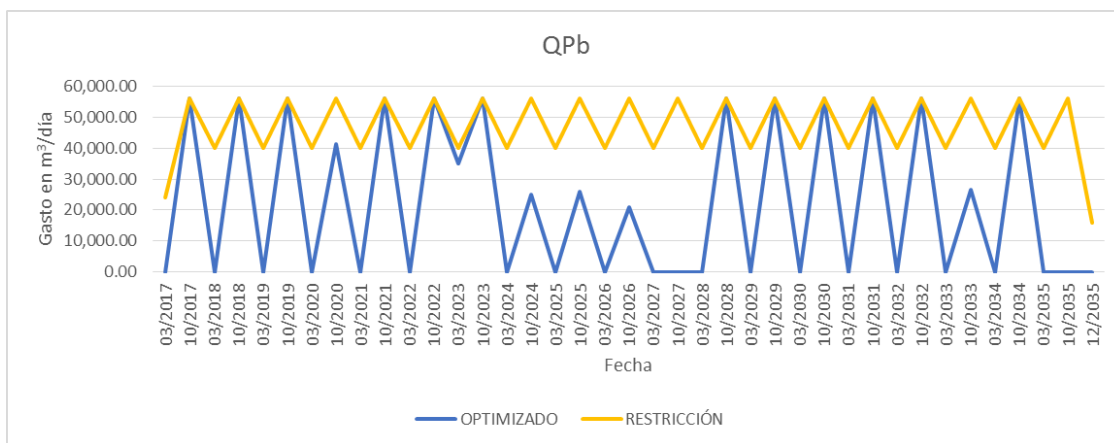
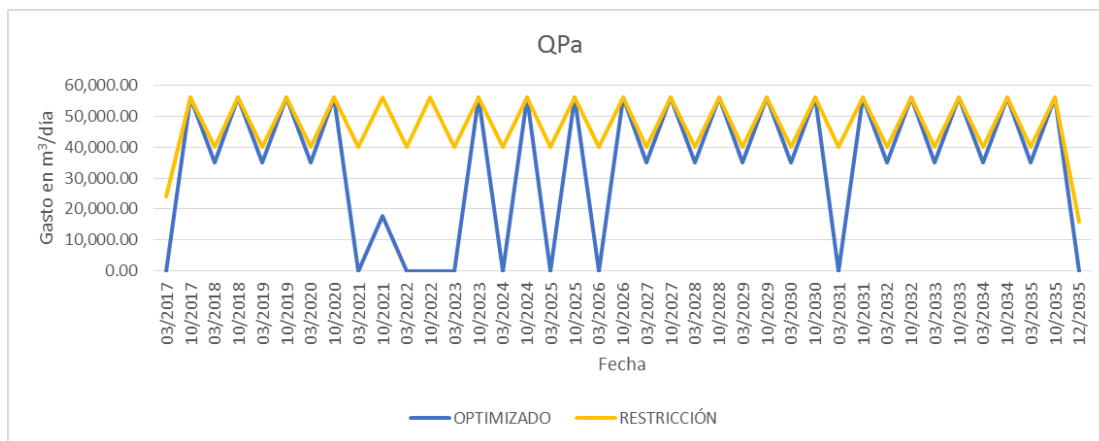


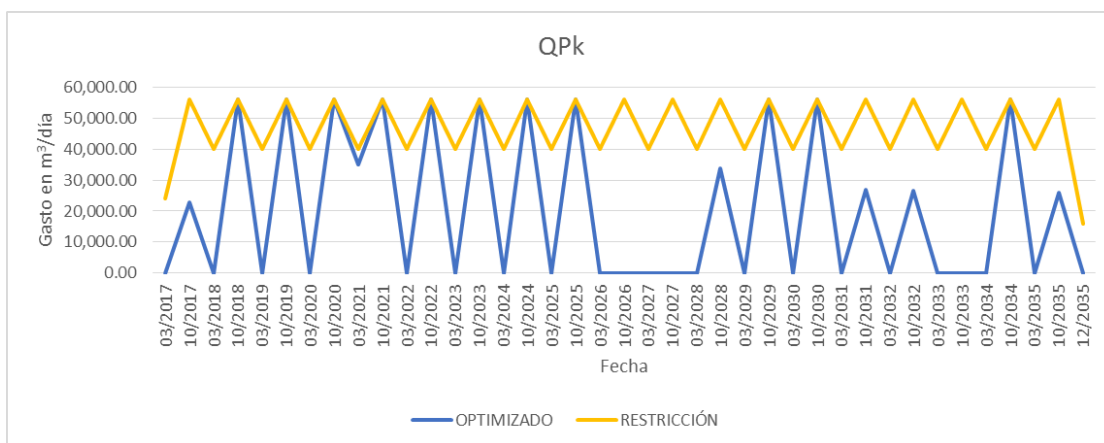
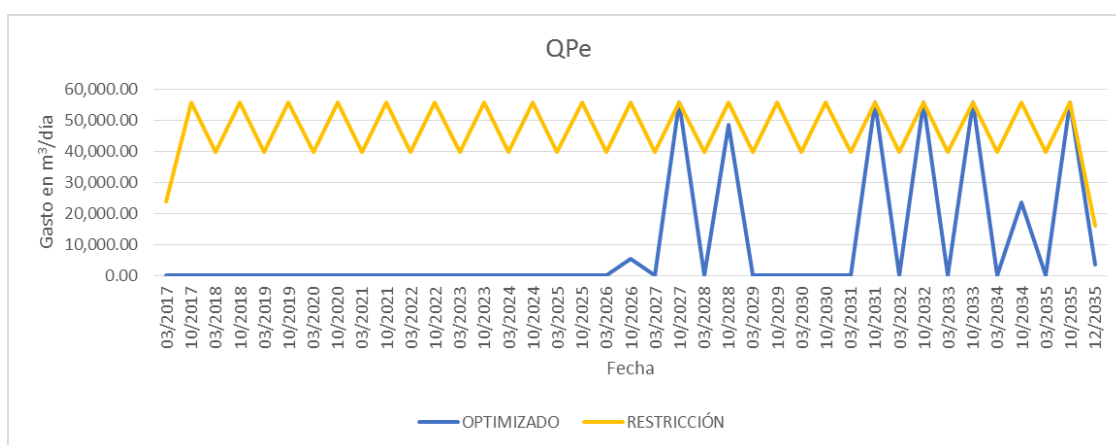
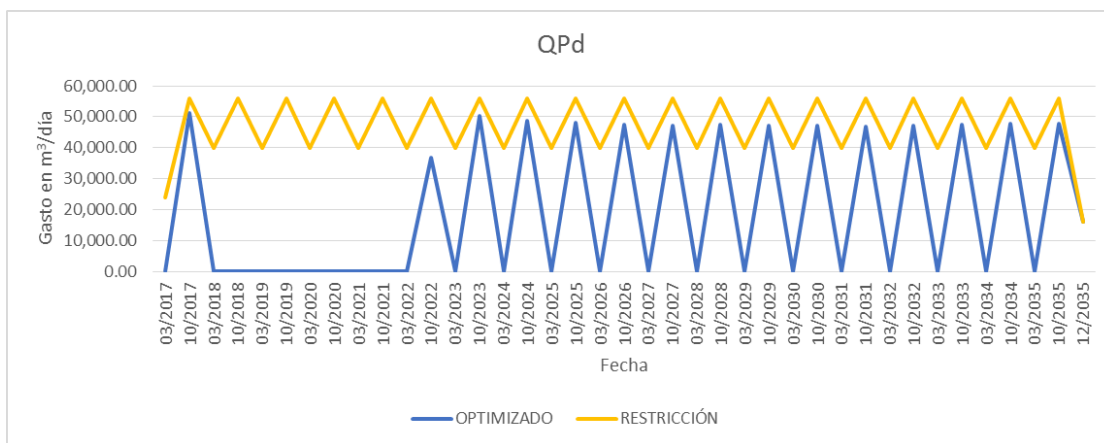


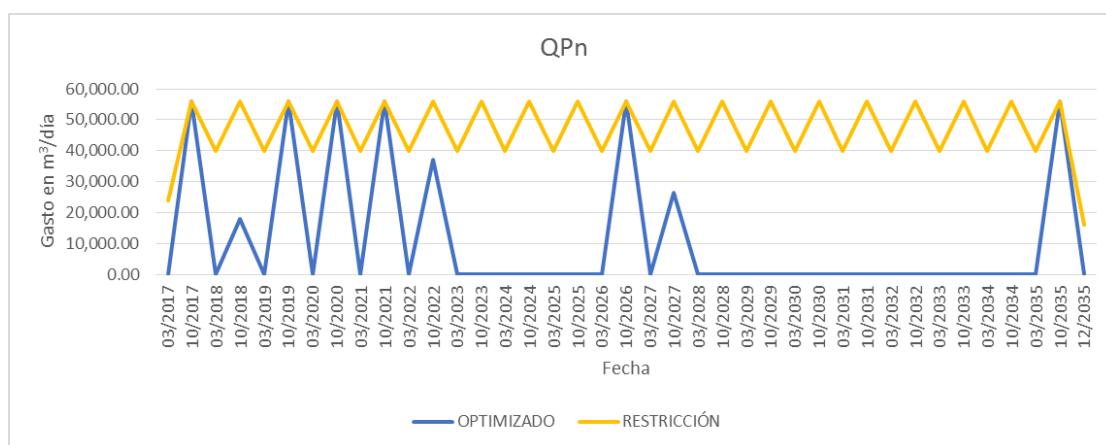
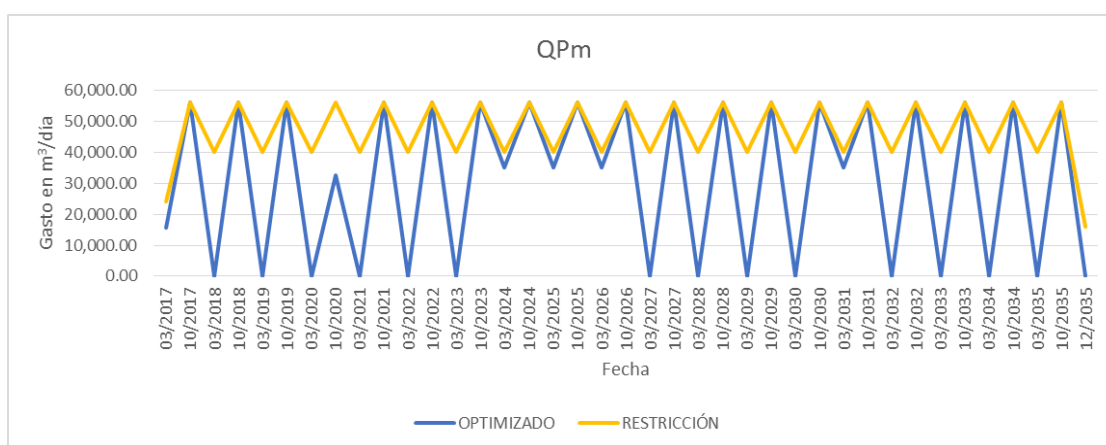
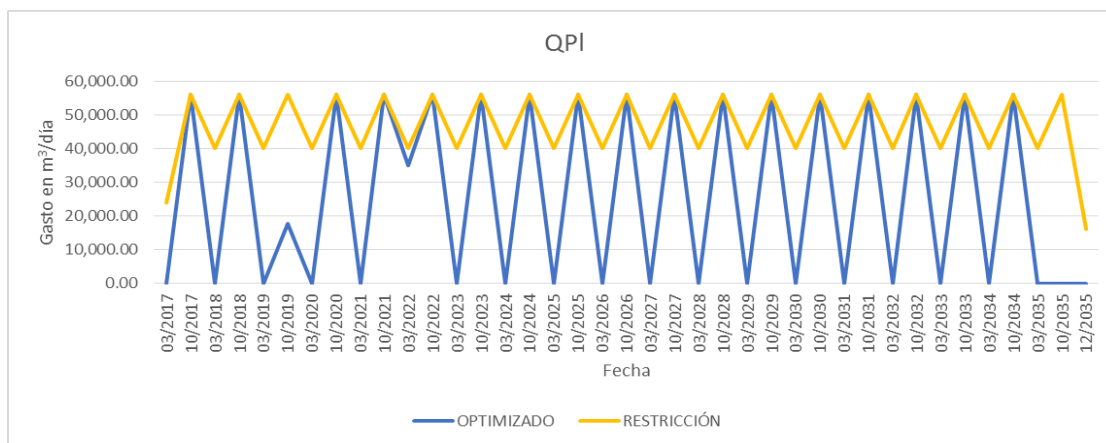


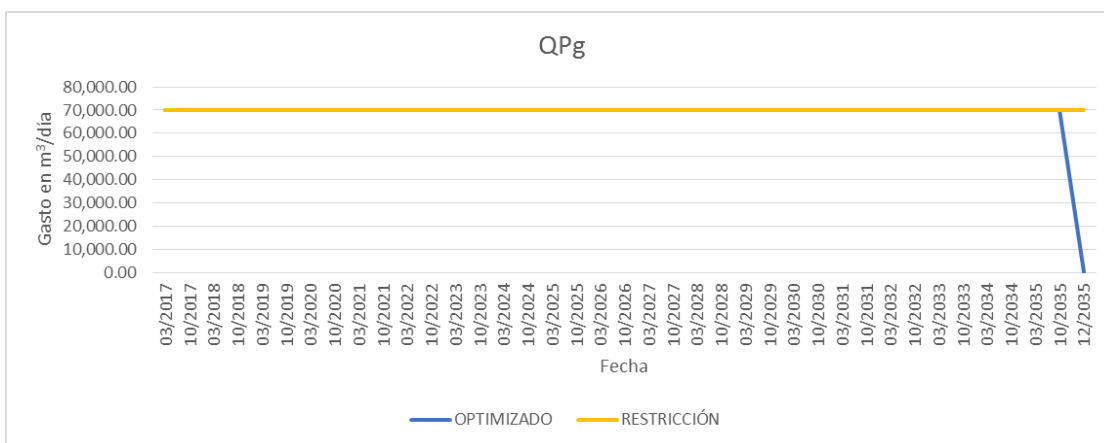
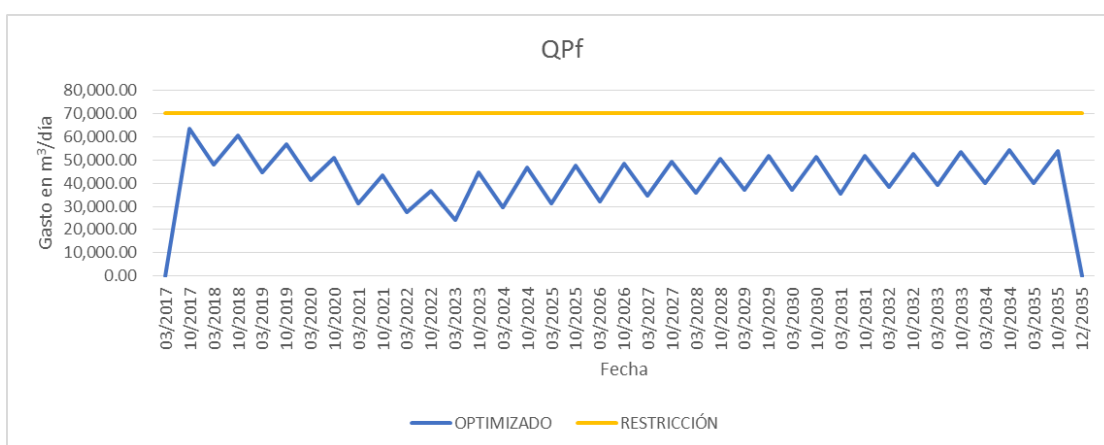
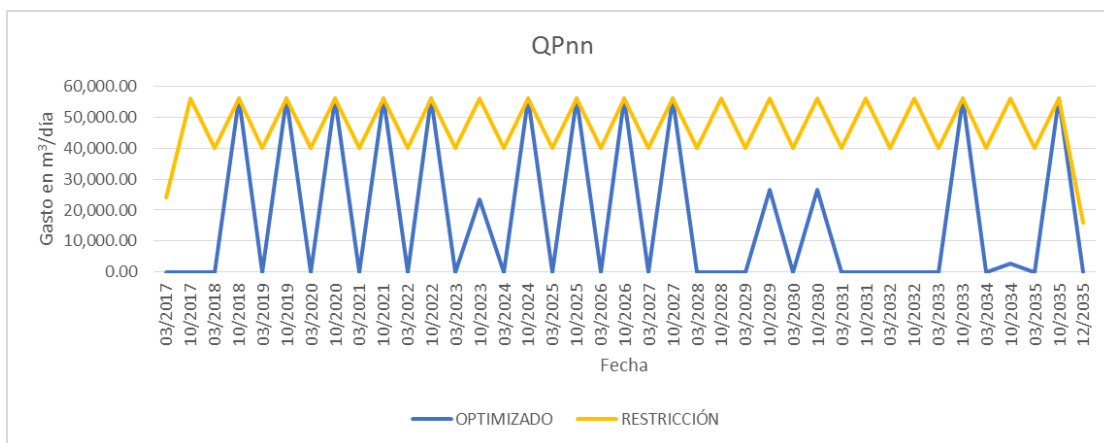
APÉNDICE G

Graficas de tasa de extracción para los pozos optimizados del escenario 3. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.





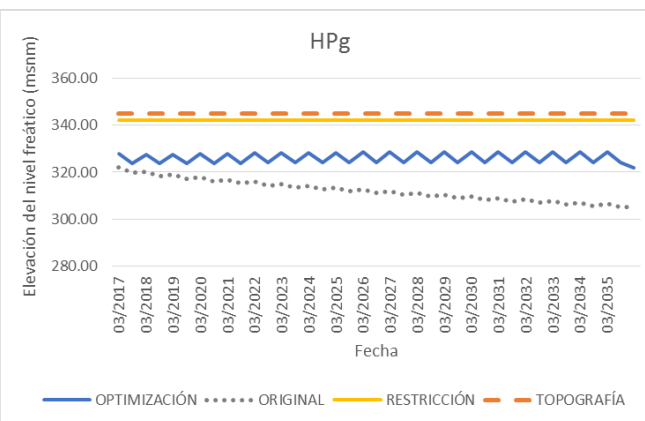
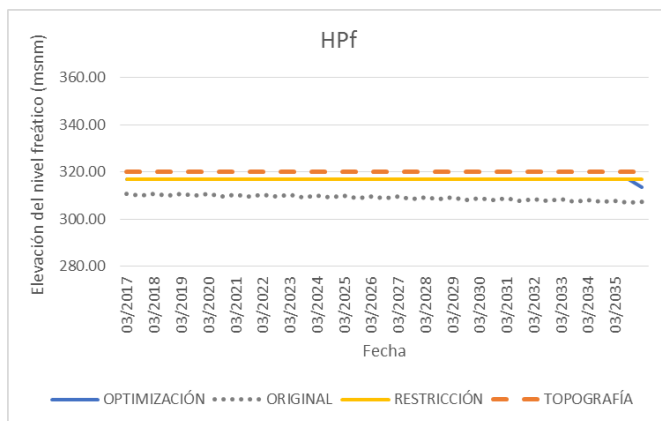
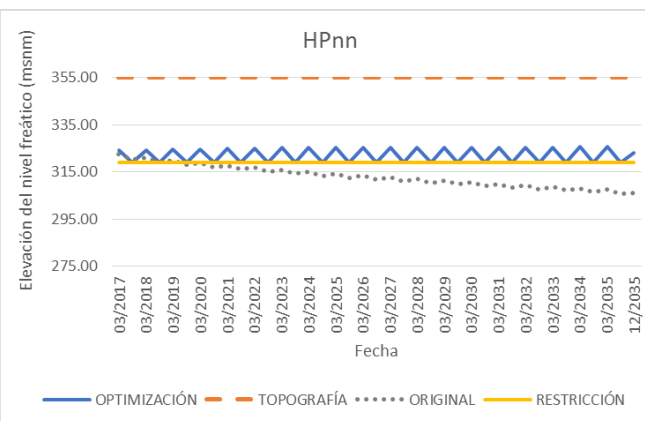
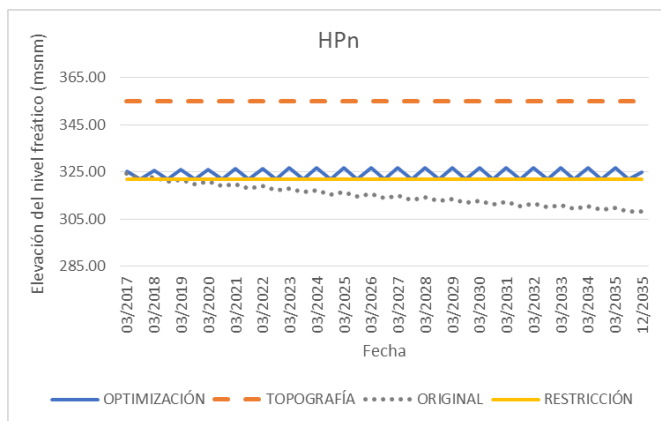
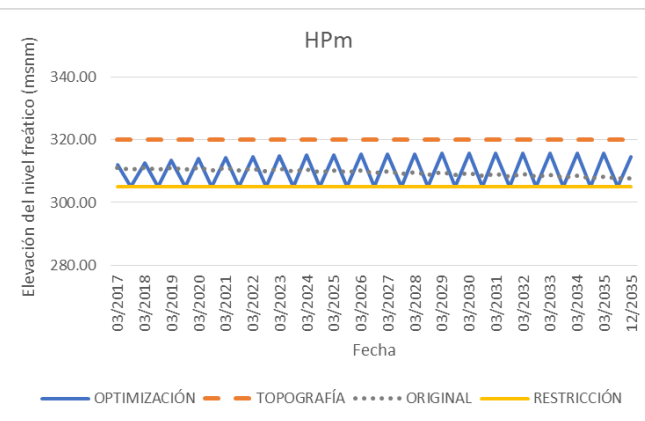
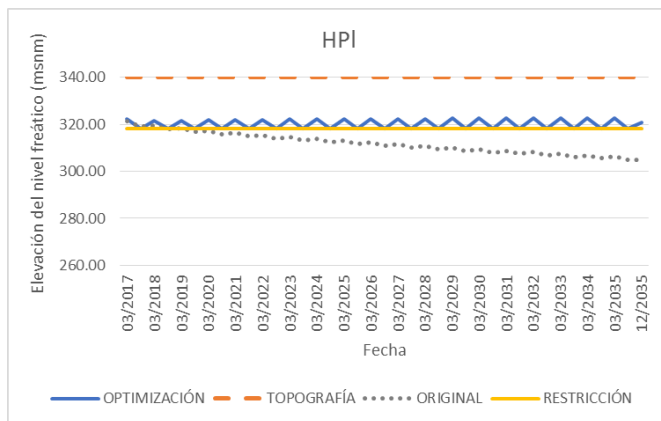


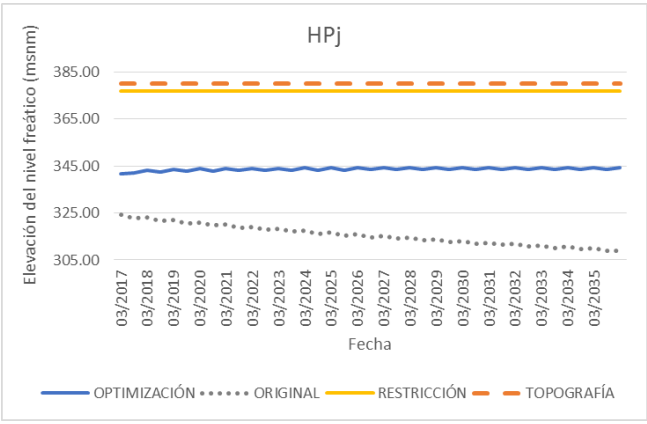
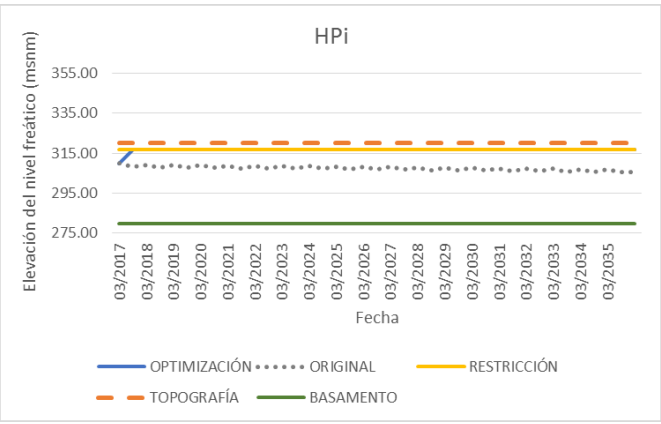
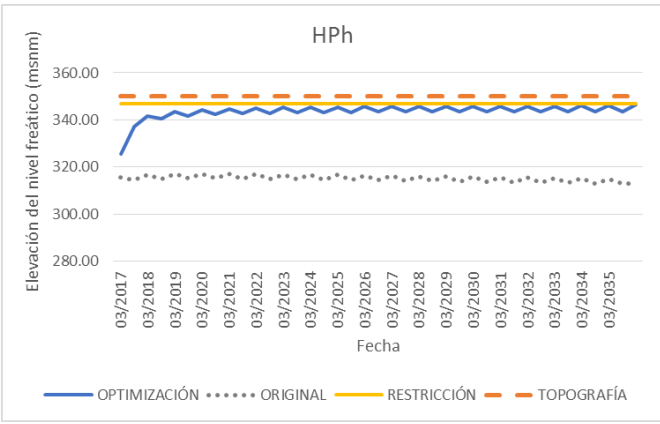


APÉNDICE H

Graficas de comportamiento del nivel freático para los pozos optimizados del escenario 4. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.

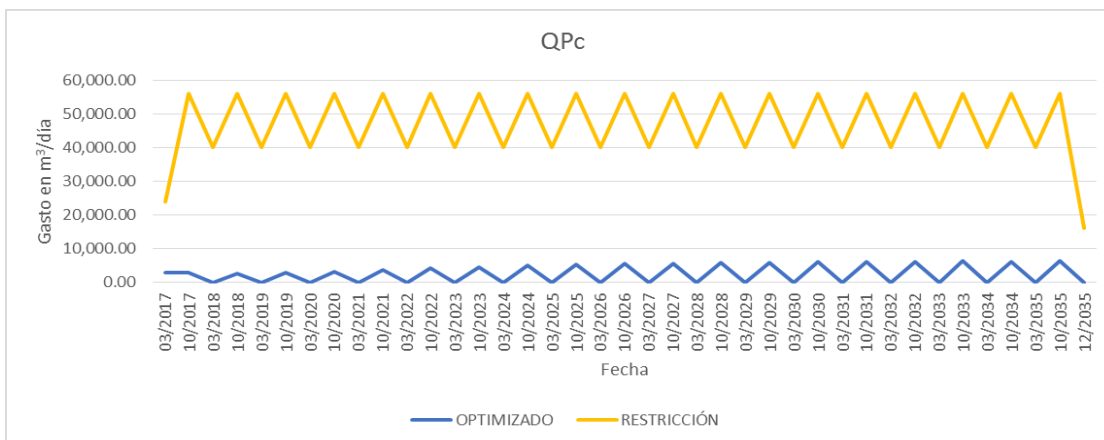
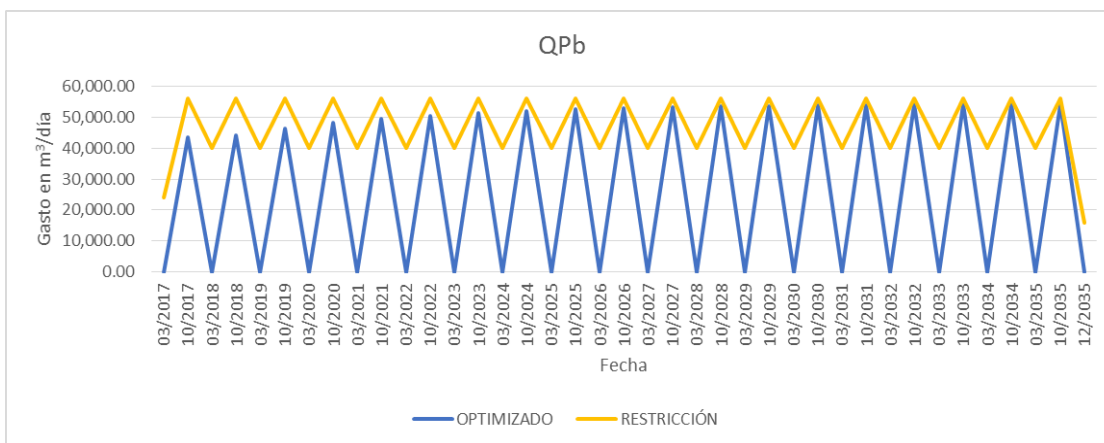
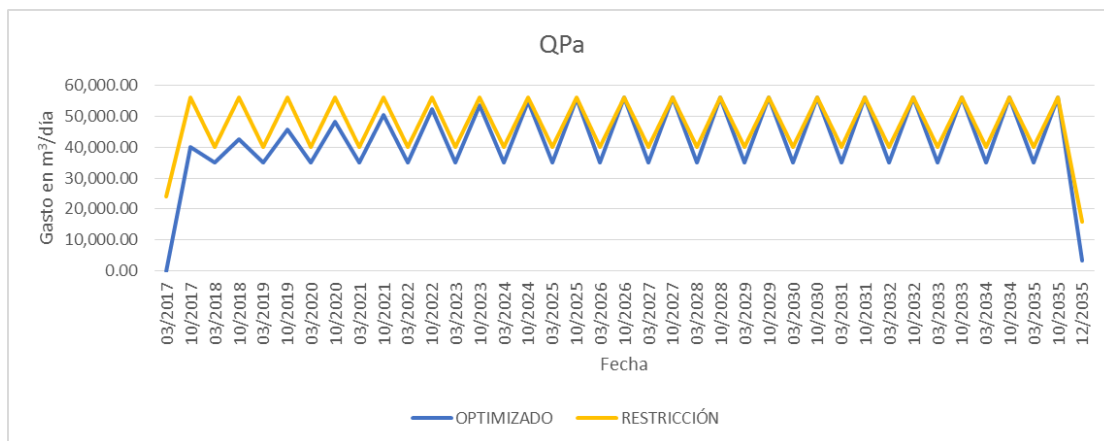


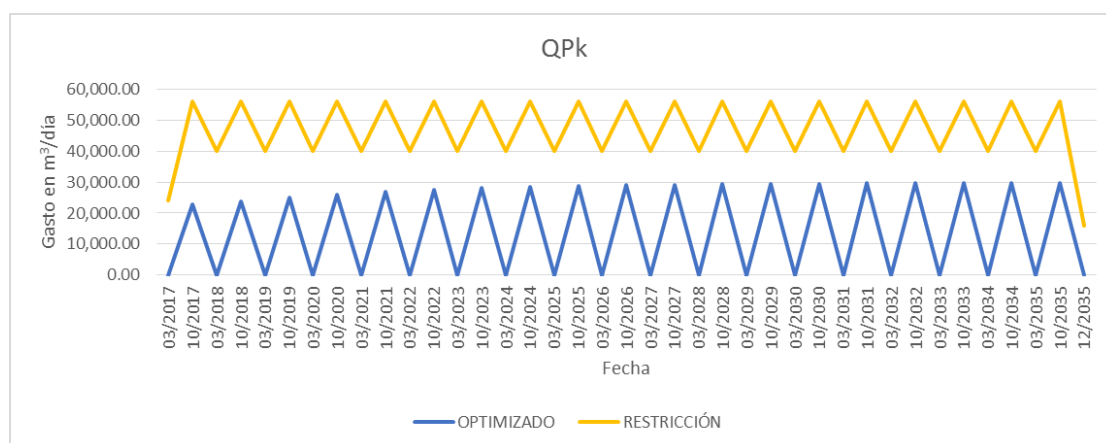
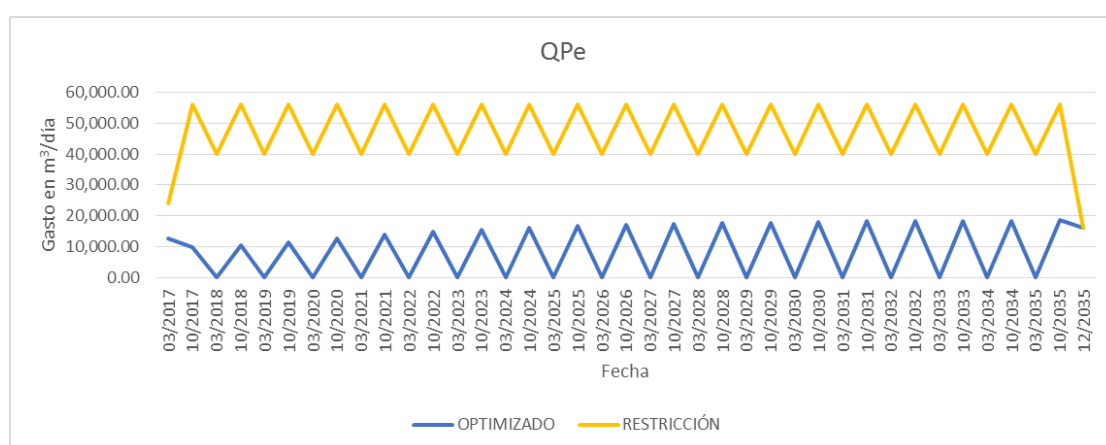
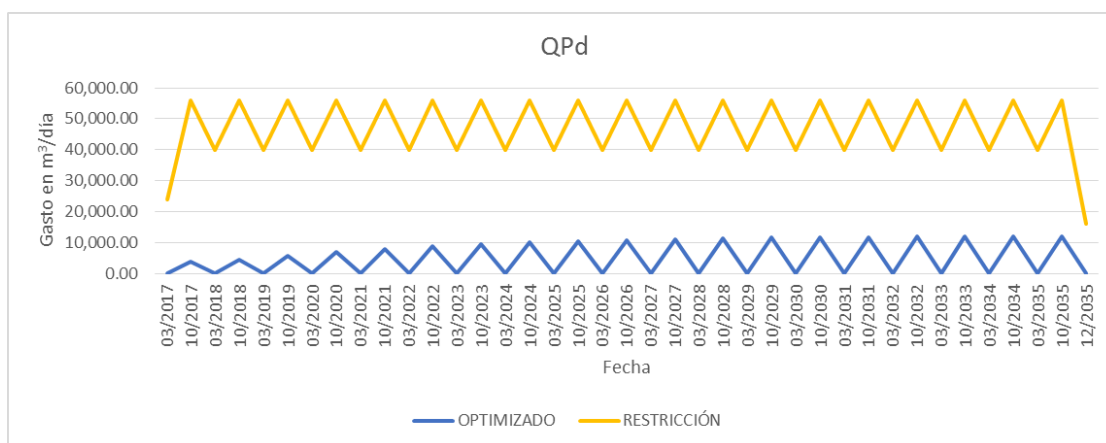


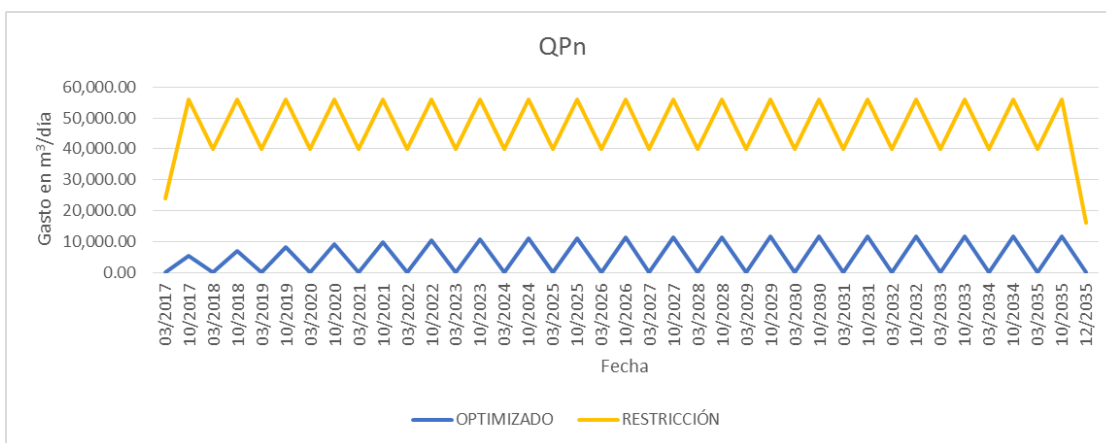
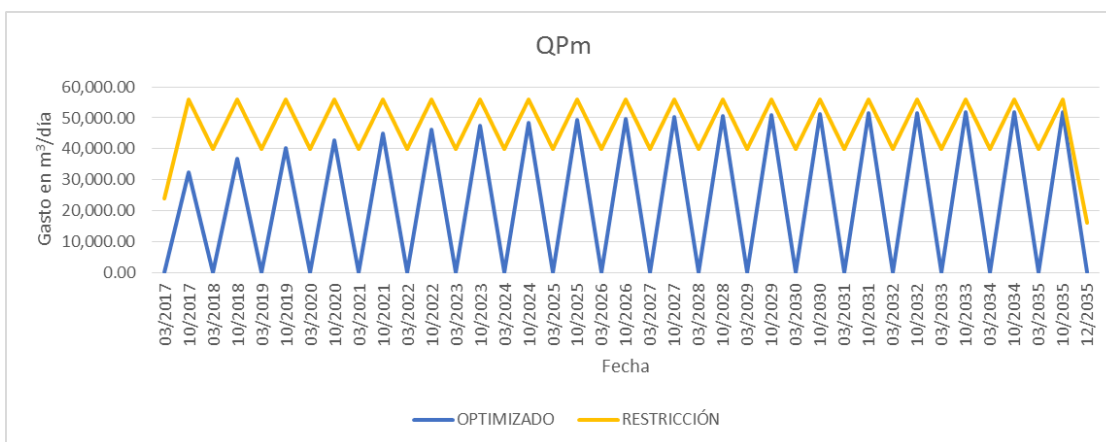
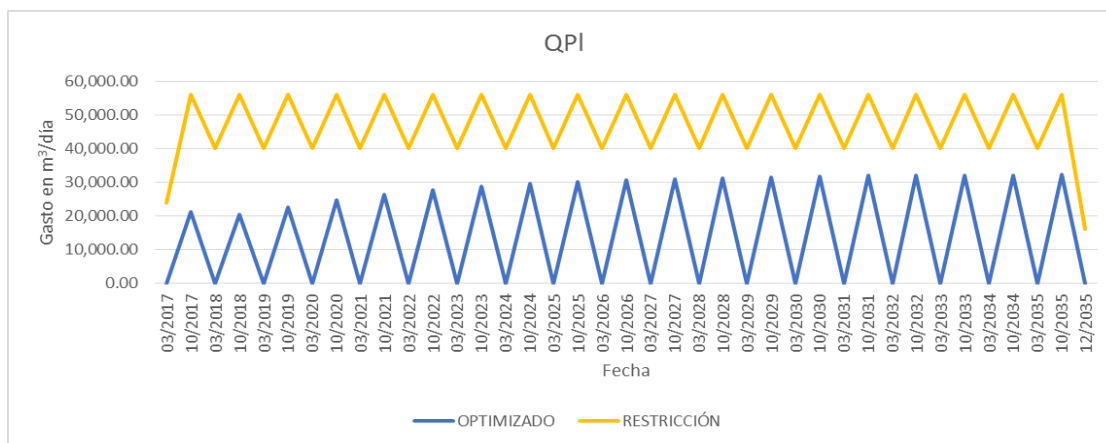


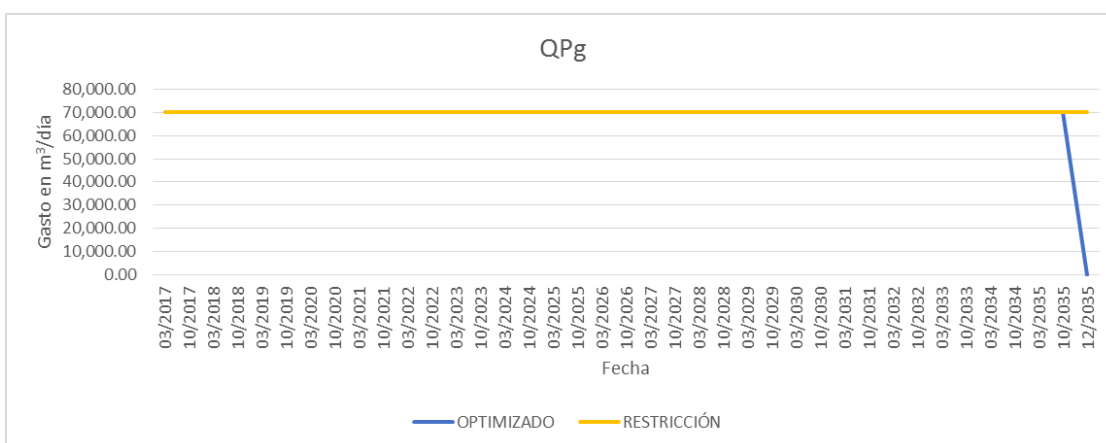
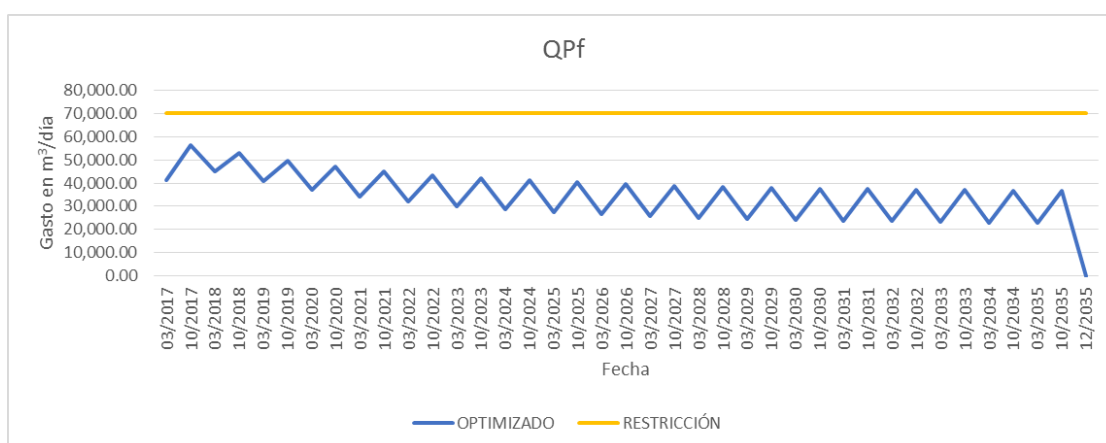
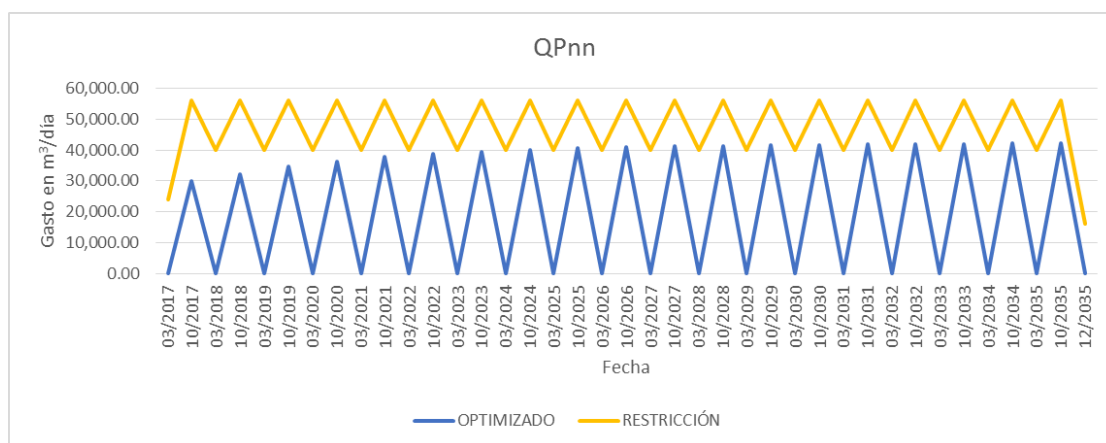
APÉNDICE I

Graficas de taza de extracción para los pozos optimizados del escenario 4. *Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn; Pozos de recarga Pf – Pj.*



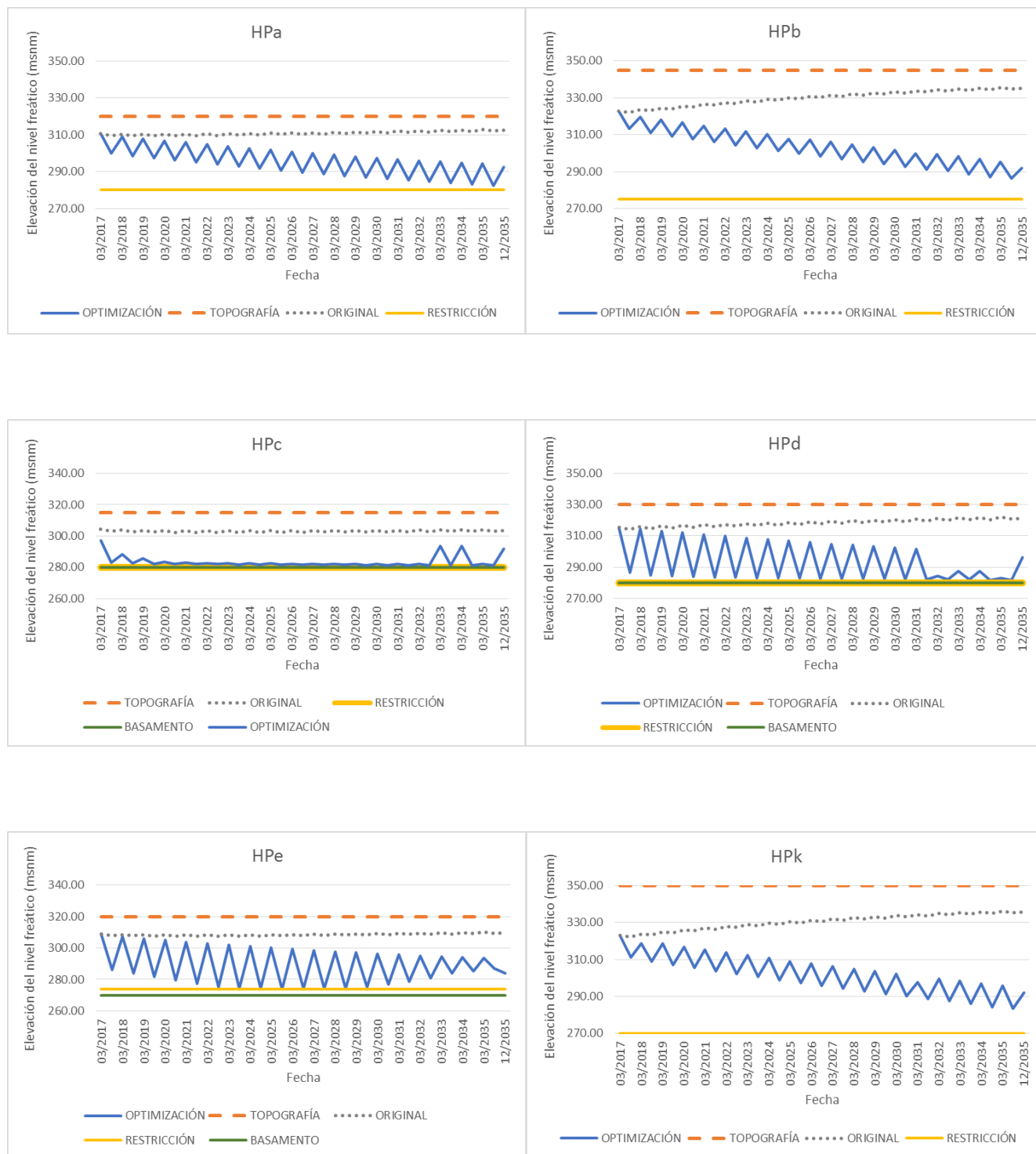


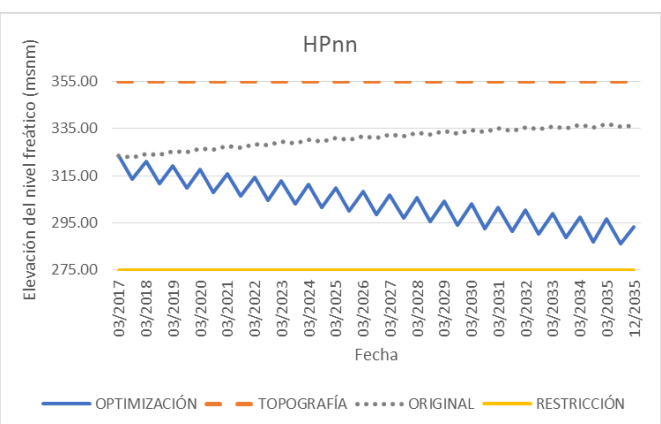
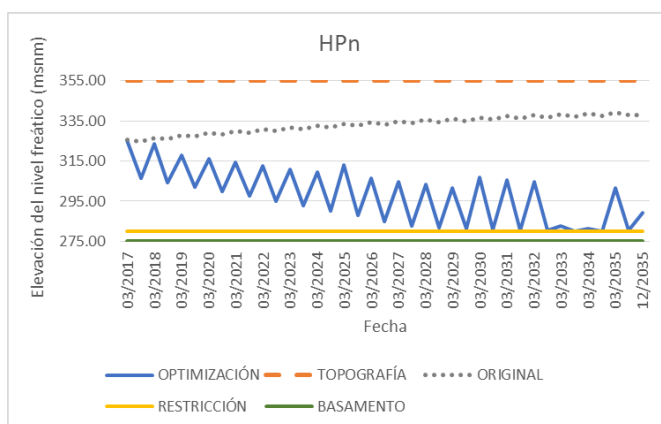
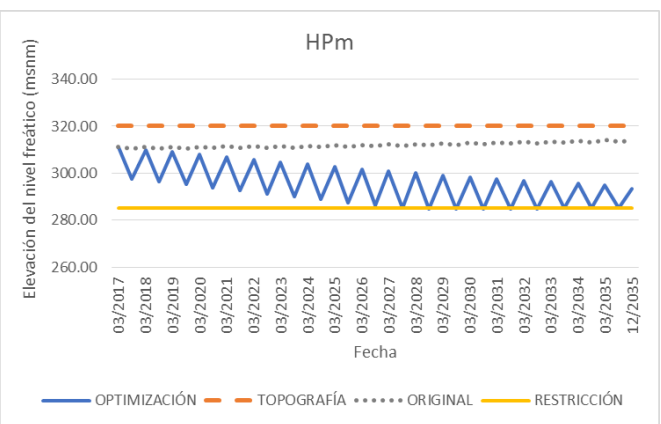
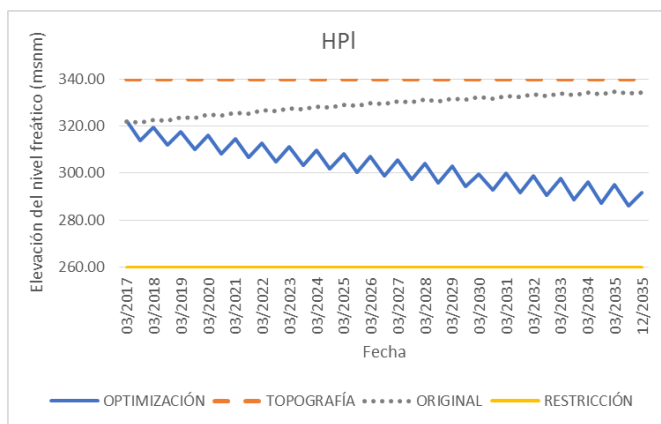




APÉNDICE J

Graficas de comportamiento del nivel freático para los pozos optimizados del escenario 5. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn.





APÉNDICE K

Graficas de tasa de extracción para los pozos optimizados del escenario 5. Pozos de extracción: Pa – Pe y Pk – Pnn.



