

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE HIDRÓGRAFOS PARA ESTIMAR LA RECARGA DE
AGUA SUBTERRÁNEA DONDE SE UBICA EL PROYECTO PILOTO DE
RECARGA EN CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO.**

POR:

RAQUEL RIVAS SALMERÓN

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA**



“Análisis estadístico de hidrógrafos para estimar la recarga de agua subterránea donde se ubica el proyecto piloto de recarga en Chihuahua, Chih., México”. Tesis presentada por Raquel Rivas Salmerón como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Rafael Astorga Bustillos
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Martha Lorena Calderón Fernández
Coordinador(a) Académico

Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
Director(a) de Tesis

Junio del 2017

Comité:

Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
M.I. Martha Lorena Calderón Fernández
Dr. Eduardo Florencio Herrera Peraza

© Derechos Reservados

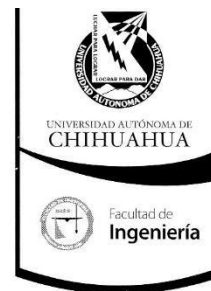
Raquel Rivas Salmerón.
Domicilio Conocido, Calle S/N.
Témoris, Chihuahua.
C.P.33380

JUNIO/2017

13 de junio de 2017

ING. RAQUEL RIVAS SALMERÓN

Presente



En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dra. Carmen Julia navarro Gómez** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE HIDRÓGRAFOS PARA ESTIMAR LA RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA DONDE SE UBICA EL PROYECTO PILOTO DE RECARGA EN CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO”**.

ÍNDICE

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Índice de Ilustraciones

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

- 1.1 Introducción
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Justificación
- 1.4 Objetivo general
- 1.5 Objetivos específicos
- 1.6 Problemática
- 1.7 Hipótesis
- 1.8 Normatividad

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 3. RECARGA DE ACUÍFEROS Y MÉTODOS PARA ESTIMARLA

- 3.1 Recarga
- 3.2 Fluctuación del nivel estático
- 3.3 Hidrógrafos de Pozos
- 3.4 Evolución piezométrica
- 3.5 Medición de los niveles piezométricos o estáticos
- 3.6 Métodos para estimar la recarga
- 3.7 Método de fluctuación de los niveles freáticos (FNF).

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

CAPÍTULO 6. ZONA DE ESTUDIO

- 6.1 Ubicación
- 6.2 Hidrología superficial y subterránea
- 6.3 Fisiografía
- 6.4 Clima
- 6.5 Geología

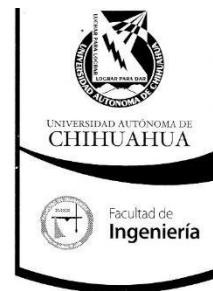
Facultad de Ingeniería

Circuito No. 1, Campus Universitario 2

Chihuahua, Chih. C.P. 31125

Tel. (614) 442-9500 www.fing.uach.mx





CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Resultados

7.2 Discusión

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

8.2 Recomendaciones

Bibliografía

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. FERNANDO RAFAEL ASTORGA
BUSTILLOS

Facultad de Ingeniería

Circuito No. 1, Campus Universitario 2

Chihuahua, Chih. C.P. 31125

Tel. (614) 442-9500 www.fing.uach.mx



Dedicatoria

A mi hermosa Familia

Papi Miguel, Mami Dolores, al amor de mi vida mi hija Debanhi Valeria, hermanos (as): Yesy, Magaly, Martin, Jonathan, Pano, Miguel y Máximo. Mi hermosa familia. Principalmente está dedicada a ustedes porque por ustedes soy el ser humano que soy, sus consejos, valores, amor, paciencia, enseñanzas me formaron para lograr este gran sueño de terminar esta Maestría.

Agradecimientos

A Dios.

Por prestarme vida y salud para llegar a este logro tan importante y por su infinito amor.

A Mi Padre Miguel.

Por todo su apoyo, su amor, los valores enseñados y por la motivación diaria para seguir luchando para lograr mí objetivo. Por ser mi gran pilar como persona y amigo en mi caminar diario. Te adoro papi. **A**

Mi Madre Dolores.

Por sus consejos, por su amor, por ser mi amiga, por todas sus enseñanzas y motivación para obtener este logro tan valioso. Te adoro mamita.

A mi hija Debanhi Valeria.

Por llegar a mi vida en esta etapa tan especial, tu viniste a ser mi mayor motivación para seguir luchando y cada logro mío será tuyo también mi princesa. Simple mente te amo.

A mis hermanos y hermanas.

Yesy y Martin por la paciencia que me han tenido al estar estudiando conmigo, Miguel, Pano, Máximo, Jonathan, Magaly; gracias por ser los mejores hermanos, por su apoyo incondicional, sus consejos y su todo su amor. Siempre en mi corazón.

A mis amigos y amigas.

Por su presencia en cada instante, por los momentos de felicidad y el apoyo mutuo en nuestra formación profesional. Gladys desde la licenciatura a mi lado, mi mejor amiga gracias por siempre estar a mi lado cuando te necesitaba y por tu apoyo para obtener este logro. Liz gracias por tus consejos, apoyo y por los momentos de felicidad que sirvieron para llegar hacer posible este objetivo. Los (as) quiero. **Al Tío.**

Por estar siempre a mi lado, motivándome, dándome consejos para que tomara las mejores decisiones, gracias por ser el mejor amigo y formar parte de mi vida. Gracias por ayudarme a ser una mejor persona y porque este logro también es tuyo.

A Conacyt

Gracias por el apoyo que se me brindo y por hacer real mí sueño de obtener mi Maestría.

A mis profesores

Gracias por todos los conocimientos que me ayudaron a llegar a esta etapa tan importante en mi educación.

A la facultad de Ingeniería, UACH.

Por ser mi casa de estudios durante estos años y gracias por darme el crecimiento profesional con el que cuento.

Con todo mi cariño Raquel...

Resumen

El contenido de agua dulce en nuestro planeta es limitado, la cual se puede encontrar distribuida principalmente en depósitos subterráneos y superficiales, siendo la más escasa de estas el agua superficial por lo que el agua subterránea es la fuente principal para el abastecimiento de agua potable. Se estudió el acuífero Tabalaopa-Aldama ubicado al noroeste del estado de Chihuahua, localizado entre los paralelos $28^{\circ}31'59.1''$ N y $29^{\circ}0'9.3''$ N de latitud norte y los meridianos $106^{\circ}11'17.5''$ O y $105^{\circ}52'3.0''$ O de longitud este. Ubicándose la balsa de infiltración dentro de las coordenadas $28^{\circ}40'14.80''$ N y $106^{\circ}0'21.33''$ siendo esta la zona de estudio. Se estima la recarga de agua subterránea utilizando el método fluctuación de niveles freáticos (FNF), monitoreando los niveles estáticos de 20 pozos de observación aledaños a la balsa de infiltración. Se analizan datos históricos de precipitación de la zona y se observa si existe relación entre estos y las fluctuaciones de los niveles freáticos de los pozos después de que se inició con la recarga de agua tratada. Se generan diferentes hidrógrafos de los pozos lo cual muestra si el pozo genera alguna recarga, descarga o si el nivel sigue igual que la medición anterior. Se hace un análisis de componentes principales con la herramienta estadística multivariante y se analizan con el software MiniTab; observándose que con los datos que se cuenta por el momento no son suficientes para un resultado confiable con mencionado programa. Se observó en los hidrógrafos que el agua precipitada si tiene influencia en el agua recargada en la fluctuación de los niveles freáticos y por consiguiente el agua subterránea recargada en este acuífero.

Palabras clave: Agua subterránea, Método Fluctuación de Niveles Freáticos (FNF), Hidrógrafos, Recarga de agua, Acuífero Tabalaopa Aldama, Análisis de Componentes Principales y MiniTab.



Índice de contenido

Dedicatoria.....	1
Agradecimientos	2
Resumen	3
Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	7
Índice de Ilustraciones	9
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 ANTECEDENTES.....	12
1.3 JUSTIFICACIÓN	14
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.6 PROBLEMÁTICA.....	14
1.7 HIPÓTESIS.....	15
1.8 NORMATIVIDAD	15
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	15
CAPÍTULO 3. RECARGA DE ACUÍFEROS Y MÉTODOS PARA ESTIMARLA.	18
3.1 RECARGA.....	18
3.2 FLUCTUACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO	22
3.3 HIDRÓGRAFOS DE POZOS	23
3.4 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA.....	24
3.5 MEDICIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS O ESTÁTICOS	24
3.6 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA RECARGA	25
3.7 MÉTODO DE FLUCTUACIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS (FNF).	33
CAPITULO 4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	34
CAPITULO 5. METODOLOGÍA.	39
CAPÍTULO 6. ZONA DE ESTUDIO	81
6.1 UBICACIÓN	81



6.2 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA	82
6.3 FISIOGRAFÍA	84
6.4 CLIMA	85
6.5 GEOLOGÍA	86
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
7.1 RESULTADOS.	88
7.2 DISCUSIÓN	91
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
8.1 CONCLUSIONES	92
8.2 RECOMENDACIONES.....	93
Bibliografía	94
Curriculum Vitae	95



Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de pozos de monitoreo, JMAS 2017	40
Tabla 2. Niveles estáticos (m) de pozos de observación de Ene-Dic. 2015. JMAS 2017.....	41
Tabla 3. Niveles estáticos (m) de pozos de observación de Ene-Sep. 2016, JMAS 2017	43
Tabla 4. Niveles Estáticos de los pozos de observación de 2001-2012, JMAS 2017	44
Tabla 5. Coordenadas de ubicación de Estaciones Meteorológicas	46
Tabla 6. Precipitación Estación JCAS. Datos JCAS, 2017	47
Tabla 7. Precipitación Estación Potabilizadora, Datos JCAS, 2017	48
Tabla 8. Precipitación Estación Protección Civil, Datos JCAS, 2017	49
Tabla 9. Precipitación Estación La Mesa. Datos Conagua, 2017.....	49
Tabla 10. Precipitación Estación Chihuahua. Datos Conagua, 2017	50
Tabla 11. Recarga de los pozos de extracción del 2001-2012 con método FNF	74
Tabla 12. Recarga en los pozos de observación 2015 con método FNF	76
Tabla 13. Recarga en los pozos de observación 2016 con método FNF	78
Tabla 14. Recarga en los pozos de observación 2015 y 2016 con método FNF	79



Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de la distribución del agua en el subsuelo	19
Figura 2. Ciclo Hidrológico.....	20
Figura 3(a).Esquema de una balsa de infiltración	21
Figura 3(b).Balsa de infiltración en Chihuahua	21
Figura 4. Representación del nivel freático en un pozo	23
Figura 5. Representación gráfica de Hidrógrafos.....	24
Figura 6. Sonda de nivel, para mediciones piezométricas.....	25
Figura 7. Localización de la red de pozos de monitoreo. Elaboración propia con datos de JMAS Y ArcMap 10.1, Enero 2017	45
Figura 8. Ubicación de las estaciones meteorológicas	52
Figura 9. Hidrógrafo del pozo Tabalaopa Aldama #3	53
Figura 10. Hidrógrafo del pozo Tabalaopa Aldama #4	53
Figura 11. Hidrógrafo del pozo Aeropuerto 1	54
Figura 12. Hidrógrafo del pozo Aeropuerto 2	54
Figura 13. Hidrógrafo del pozo Robinson III	55
Figura 14. Hidrógrafo del pozo Concordia.....	55
Figura 15. Hidrógrafo del pozo Leon #2	56
Figura 16. Hidrógrafo del pozo Laguna #1	56
Figura 17. Hidrógrafo del pozo Concordia #1.....	57
Figura 18. Hidrógrafo del pozo Concordia #2.....	57
Figura 19. Hidrógrafo del pozo Leon #3	58
Figura 20. Unión de hidrógrafos de pozos	59
Figura 21(a). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015	59
Figura 21(b). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015	60
Figura 21(c). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015	60
Figura 21(d). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015	61
Figura 21(e). Hidrógrafo pozo observación 1, 2016.	61
Figura 21(f). Hidrógrafo pozo observación 1, 2016.....	62

Figura 22(a). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015	62
Figura 22(b). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015	63
Figura 22(c). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015	63
Figura 22(d). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015	64
Figura 22(e). Hidrógrafo pozo observación 2, 2016	64
Figura 22(f). Hidrógrafo pozo observación 2, 2016.....	65
Figura 23 (a). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015	65
Figura 23 (b). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015	66
Figura 23 (c). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015	66
Figura 23 (d). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015	67
Figura 23 (e). Hidrógrafo pozo observación 3, 2016	67
Figura 23 (f). Hidrógrafo pozo observación 3, 2016.....	68
Figura 24. Hidrógrafos de pozos de observación en el 2015	69
Figura 25. Hidrógrafos de pozos de observación en el 2016	69
Figura 26. Hidrógrafos de pozos de observación 2015-2016.....	70
Figura 27. Unión de hidrógrafos de N.E de pozos de observación del 2015-2016.....	70
Figura 28. Hidrógrafo de noria Robinson III.....	71
Figura 29. Hidrógrafo de pozo Pemex #3	71
Figura 30. Hidrógrafo de pozos Pemex #2.....	72
Figura 31. Hidrógrafo de pozo Pemex #4	72
Figura 32. Unión de hidrógrafos de pozos de observación del 2015-2016.....	73
Figura 33. Ubicación de zona de estudio (Balsa de infiltración)	81
Figura 34. Red Hidrográfica de la zona de estudio (Balsa de Infiltración), Enero 2017	83
Figura 35. Fisiografía de la zona de estudio (Balsa de infiltración), Enero 2017	84
Figura 36. Clima en la Balsa de infiltración. Elaboración propia Enero 2017. Con datos (INEGI,2010) y ArcMap 10.1.....	85
Figura 37. Geología de las Colindancias a la Balsa de infiltración en Chihuahua (Elaboración propia con ArcMap 10.1. Enero 2017.).....	87



Índice de Ilustraciones

Imagen #1. Toma de muestra de niveles estáticos en pozo de observación.....	39
Imagen #2. Canaleta de llenado de agua a la Balsa de infiltración	39
Imagen #3. Se muestran pozos de observación y sonda eléctrica para medir niveles de agua.....	40



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

El contenido de agua dulce en nuestro planeta es muy poco (o limitado), la cual se puede encontrar distribuida principalmente en depósitos subterráneos, superficiales y congelada en los polos, siendo la más escasa de estas el agua superficial por lo que el agua subterránea es la fuente principal para el abastecimiento de agua potable (Jacobus, et al., 2002).

La población mundial se ha incrementado en las últimas décadas destacando una mayor concentración de la población en zonas urbanas, es por ello que se debe desarrollar una administración del recurso hídrico subterráneo con el fin de lograr una explotación sostenible logrando así tener información confiable del volumen de extracción idóneo de este recurso sin exceder la tasa de recarga del acuífero.

Para una gestión del recurso hídrico se deben considerar factores naturales como el suelo, topografía, vegetación, uso del agua, el clima y factores antropogénicos como el patrón de uso del recurso hídrico, bombeo, etc. Estos factores dan como resultado patrones de comportamiento de puntos específicos de monitoreo (pozos), de los cuales se consideran los hidrógrafos puntuales para determinar variables hidrogeológicas locales según las características constructivas de los pozos y del material de donde captan el agua para su explotación (Moon et al., 2004). Cabe mencionar que los datos obtenidos de variables hidrogeológicas tienen una dependencia espacial y temporal que las hace únicas en comparación con el conjunto de datos. Así que para organizar, presentar, interpretar y simular estas variables del monitoreo de los puntos de observación se utilizan herramientas estadísticas (Rodríguez, 2013), con este análisis estadístico puede sugerirse la mejor frecuencia de monitoreo y además se calculan los periodos de descensos y ascenso de agua (Morelio y Torres, 2002).



De modo que con un programa de monitoreo se conoce el comportamiento hidrográfico de los pozos, que tiene múltiples aplicaciones, entre las más importantes son estimar la disponibilidad del agua subterránea y su evolución, así como la operación y la sostenibilidad económica del recurso. Todo comienza con la medida de los niveles del agua subterránea a intervalos de tiempo en un periodo determinado. Por lo que se han establecido diferentes métodos, para el diseño de redes de monitoreo de los niveles del agua subterránea que faciliten utilizar los recursos económicos disponibles para resultados de manera efectiva (Briseño et al., 2011). Dicho diseño se define como el análisis de comportamiento del agua subterránea en un periodo de tiempo prolongado, que tiene la finalidad de documentar diferentes condiciones como la recopilación de datos físicos, utilizándose como sistema de administración y gestión de la explotación (De la Rosa, 2010).

Es importante para una gestión adecuada de los recursos hídricos con un enfoque de desarrollo sostenible, considerar la comprensión de la variabilidad espacial de la precipitación y su escurrimiento, que inciden en la posibilidad y porcentaje del volumen que puede ser infiltrado y llegar a ser una porción de la recarga de agua subterránea (Cai, 2016).

La aportación del ciclo hidrológico en la recarga del acuífero puede darse de manera natural o artificial (inducida por acción antropogénica sea controlada o no). La recarga artificial controlada consiste en la inducción de agua al acuífero, mediante variedad de sistemas como balsas de infiltración, pozos de recarga profunda, zanjales y otros mecanismos. Una de las más usuales son las balsas de infiltración; las cuales son excavaciones en terreno permeable cerca de la fuente de agua disponible (Agencia Catalana del agua, 2016). De manera que esta tecnología se aplica con diferentes objetivos siendo los más comunes: atenuar efectos de sobreexplotación, tales como abatimiento de los niveles del agua y asentamientos del terreno, por esta razón se recomienda en los proyectos de recarga artificial incluir un programa de monitoreo que, en forma periódica, antes y durante la operación de



las obras de recarga, registre las variaciones de los niveles piezométricos (Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA, 2003).

Dicho monitoreo registra las variaciones de los niveles piezométricos y proporciona datos valiosos que son empleados para una gran variedad de aplicaciones tales como la descripción, estudio y documentación de los cambios en la condición del acuífero (De la Rosa, 2010).

Existen varios métodos para estimar la recarga de agua subterránea como el modelado sencillo de los registros de precipitación y profundidad de niveles de agua subterránea (hidrógrafos), fluctuaciones del nivel freático (FNF) en pozos y el uso de análisis de componentes principales (ACP) para analizarlos (Risser et al., 2005).

El método (FNF), requiere datos suficientes de fluctuación de niveles potenciométricos de los pozos de monitoreo y pluviometría para estimar la recarga directa. Este método se puede aplicar a los sistemas donde ocurre una respuesta rápida de ascenso de niveles tras la ocurrencia de precipitaciones, que aumenta conforme a la cantidad de eventos precipitación-recarga disponibles (Varni et al., 2013).

Las elevaciones del nivel estático que se mide en un pozo nunca son constantes, esto se debe a la extracción de manera regional por una disminución en la recarga, generando una relación directa entre el aumento de niveles piezométricos, con la precipitación que prevalece en la zona o más allá de la zona de estudio y el efecto de la geología, en la recarga en diferentes momentos (Moon et al., 2004).

1.2 ANTECEDENTES

En diversos países como EEUU, Holanda, India, Australia entre otros 57 países se estima que existían 367 sistemas de recarga artificial para el año 2007 (IGRAC, 2013). Por lo que la recarga artificial se ha posicionado como una herramienta eficaz para solucionar problemas de intrusión salina en acuíferos costeros, controlar el fenómeno de subsidencia,



mejorar la calidad del recurso hídrico subterráneo tanto como la del agua de recarga, recuperar niveles piezométricos y almacenamiento entre otros usos (Murray R., 2009). El método Fluctuación de Niveles Freáticos (FNF) para estimar la recarga ha sido aplicado en algunos lugares como Korea, Australia, y Wisconsin, Estados Unidos , con la finalidad de comprender las características dinámicas del ciclo hidrológico y estimar las tasas de recarga (Ordens, 2011; Dripps, W.R.,2012).

Se realizó un estudio en el área medanosa del sur de península Valdés en Argentina para la estimación de la recarga en esta zona árida con los métodos más convenientes para este tipo de zona, que son: Balance Hídrico local y fluctuación de niveles freáticos (FNF). Ya que es importante utilizar más de un método para poder comparar resultados y validarlos con observaciones de campo (Álvarez, et al., 2013).

Por otra parte (Núñez et al., 2008) analizaron y actualizaron el conocimiento de la hidrodinámica de los sistemas de flujo subterráneo para cierto periodo de tiempo, por medio de las redes piezométricas que integran la información de niveles estáticos de las áreas piloto de monitoreo del acuífero y con información de los mapas temáticos interactivos, desarrollados en el sistema de información geográfica, permitió conocer las características hidráulicas e hidrogeológicas de cualquier punto dentro del acuífero, conocimientos que apoyarán a los usuarios y a las autoridades para que realicen la planeación y administración del agua subterránea en términos de sustentabilidad.

En Querétaro se eligió el diseño óptimo espacio-temporal de la red de monitoreo de los niveles del agua subterránea el cual consistió en seleccionar, de entre 19 pozos preexistentes en la zona. Estos mediante el método Herrera y Pinder, en los que se utilizan criterios de optimización y geohidrológicos que dependen del conocimiento del área de estudio (Briseño et. al, 2011).



1.3 JUSTIFICACIÓN

La recarga que genera las escasas precipitaciones en los acuíferos del Estado de Chihuahua han sido estudiadas por diversos modelos convencionales principalmente por la determinación del Balance hídrico. Sin embargo este trabajo de investigación propone usar el método FNF y herramientas estadísticas para correlacionar las variables obtenidas; esto por su sencillez y por la respuesta inmediata que pueden presentar. De esta manera se puede conocer si realmente las precipitaciones influyen en el nivel piezométrico en el área de la zona de recarga artificial (balsa de infiltración) en cierto periodo de tiempo a estudiar y por consiguiente en la recarga de acuífero Tabalaopa-Aldama.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Analizar las fluctuaciones de los niveles freáticos en la zona del proyecto piloto de recarga y definir su comportamiento en un periodo de tiempo mediante la herramienta estadística de análisis multivariante.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información de precipitación y fluctuación de los niveles de agua.
- Definir la red de monitoreo que integran los pozos de observación en la zona.
- Generar información piezométrica de los pozos de observación para conocer los cambios en los niveles.
- Interpretar y analizar información Geohidrológica de la zona.
- Construir los hidrógrafos con los datos piezométricos de los pozos de observación.
- Analizar la información.

1.6 PROBLEMÁTICA

El acuífero Tabalaopa-Aldama se encuentra sobreexplotado ya que hay una creciente demanda de agua subterránea y una lenta renovación del recurso, por lo que se ha recurrido



a la recarga de agua artificial mediante una balsa de infiltración, pero se desconoce cuál es la evolución de los niveles de agua que se tienen en esta balsa y si el agua precipitada influye en la recarga en la balsa de infiltración, esto es un problema a resolver porque la mayor parte del agua precipitada se evapora, lo que conlleva que la infiltración y escurrimientos sean reducidos.

1.7 HIPÓTESIS

Es posible identificar el impacto de la precipitación o recarga en la fluctuación de los niveles freáticos con el método de Fluctuación de Niveles Freáticos (FNF) y análisis de Hidrógrafos de los pozos, en la zona influenciada por el proyecto de recarga de agua en Chihuahua, Chihuahua, México.

1.8 NORMATIVIDAD

La Norma Oficial Mexicana. NOM-014-CONAGUA-2003 establece los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Así como los de monitoreo en todo proyecto de recarga que en forma periódica, antes y durante la operación registre las fluctuaciones de los niveles piezométricos en el domo de recarga y sus inmediaciones. La red de monitoreo debe contar con un mínimo de tres 3 pozos, en los cuales se tiene una frecuencia y protocolo de monitoreo.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

“ACTUALIZACION DE MEDICIONES PIEZOMETRICAS DEL ACUIFERO DE TABALAOPA, CHIHUAHUA”. Elaborado por Moro Ingeniería S.A. en 2004.

El principal objetivo fue la actualización de la piezometría para elaborar las configuraciones del nivel estático correspondiente.

Después de realizar las configuraciones con datos previos, se verificaron en campo los pozos piloto y se modificó la red de monitoreo, quedando integrada por 30 pozos piloto. Una vez



definida la red, se midieron los niveles para el 2004 que se utilizaron para realizar la interpretación de la información y elaborar planos de configuraciones e hidrógrafos de pozos. La configuración del nivel estático evidencio que los valores mayores de profundidad al nivel estático se presentan en la parte sur y noroeste, las más someras en la porción centro y noroeste del valle.

A lo largo del Río Chuviscar no se registran abatimientos lo cual confirma que en esa zona ha disminuido la extracción de agua o que existe una mayor recarga, esta última posibilidad es posible debido a la alta permeabilidad de los materiales que conforman el lecho del río, lo que favorece una mayor infiltración.

“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS HIDROGEOLÓGICOS DE OPERACIÓN PARA LOS POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA” elaboró la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería. Bionerge Ernesto Harmon García, (2012).

Cuyo objetivo fue evaluar mediante un análisis estadístico las principales fuentes de abastecimiento del Acuífero Chihuahua Sacramento.

Determinar la dirección preferencial del flujo subterráneo del ACHS, el caudal específico, el abatimiento regional anual promedio y la evolución de la calidad del agua.

“DETERMINACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE AGUA EN EL ACUÍFERO TABALAOPA-ALDAMA, ESTADO DE CHIHUAHUA”. Elaboró el Instituto de Recursos Humanos Naturales Especiales de Hidrociencias-Colegio de Postgrados (2000), bajo contrato de Comisión Nacional del Agua llevo a cabo el estudio.

La principal aportación del estudio fue la elaboración de planos de elevación, evolución de los niveles estáticos del acuífero y la determinación del se determinó el balance físico y su disponibilidad por el REPDA. Como resultado se concluyó que se encuentra sobreexplotado y que existe disponibilidad.



“PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE LOS VALLES DE SAUZ Y TABALAOPA CHIHUAHUA. PARA PROPORCIONAR AGUA EN BLOQUE A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, CHIH.” Realizó PROYESCO. SA (1981), bajo contrato de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Dirección General de Captación y Conducciones de Agua, Subdirección de Estudios, Planes y Programas.

Con los objetivos de cuantificar las extracciones y determinar por medio de un balance las conducciones de explotación que prevalecían en las zonas con la finalidad de determinar volúmenes disponibles para la extracción.

Cuya aportación es que el acuífero Tabalaopa-Aldama esta sobreexplotado en forma en forma local tiene disponibilidad para la estructuración de volúmenes adicionales, contemplando la perforación de las dos baterías de pozos en este acuífero para la extracción.

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO MEDIANTE EL EMPLEO DE LA MEDIA MÓVIL”. Elaboró la tesis Víctor Emir Villegas (2011). El principal objetivo fue identificar los periodo de sequias y humedad que ha presentado el estado de Chihuahua en los últimos años, a partir de un análisis de medias móviles de las precipitaciones y temperaturas registradas en las estaciones climatológicas con registro histórico amplio y localizados en puntos representativos del Estado.

“ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA OROGRAFÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN HISTÓRICA EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA”. Elaboró la tesis Ángel Omar Alcázar Martínez (2011).

El principal objetivo es establecer la relación que existe entre la ruta de los eventos ciclónico y las precipitaciones registradas en las estaciones climatológicas ubicadas en los puntos estratégicos que pudieran haber registrado el paso de dicho evento. Esto en distintos puntos



del estado de Chihuahua principalmente si existen zonas de riesgo de inundaciones o pérdida económica debido al gran afluente de agua que transita hacia aguas abajo.

“SIMULACIÓN HIDROLÓGICA EN LA ZONA NO SATURADA: ZONA AGRÍCOLA DE TABALAOPA-ALDAMA, CHIHUAHUA”. Elaboró tesis José Alfredo Rodríguez Pineda (1993).

Su principal objetivo es el conocimiento y cuantificación más exacta de los procesos que interviene en el ciclo hidrológico y así conocer en su magnitud la recarga a los acuíferos, ocasionada por la infiltración de precipitación por retorno de riego o por la infiltración en ríos o canales sin revestir. Calculando el balance hidrológico de la zona saturada mediante un proceso de simulación con el código de computadora SWACROP.

Concluye que con la simulación del flujo en la zona no saturada muestran que el valle Tabalaopa-Aldama tiene un buen potencial de recarga que puede ser aprovechado para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Chihuahua y Aldama. Los altos contenidos de gravas y boleas en el perfil del suelo no saturado favorecen los procesos de infiltración y percolación del agua; y que por lo tanto el valle en la llanura de inundación del Río Chuviscar tiene una gran capacidad de recarga.

CAPÍTULO 3. RECARGA DE ACUÍFEROS Y MÉTODOS PARA ESTIMARLA.

3.1 RECARGA

La recarga es la entrada de un volumen de agua a la zona saturada para llegar a formar parte del agua subterránea. El agua que se recarga se va infiltrando y descendiendo por las grietas o huecos de la roca, hasta que llega al límite impermeable que impide el paso de ella hacia niveles inferiores.

Se definen dos zonas: La zona saturada (todos los huecos rellenos de agua) y la zona no saturada (los huecos no están rellenos de agua o lo están parcialmente). Entre estas zonas



hay un límite denominado superficie piezométrica o nivel freático (Universidad Málaga, 2016). Como se puede mostrar en la Figura 1.

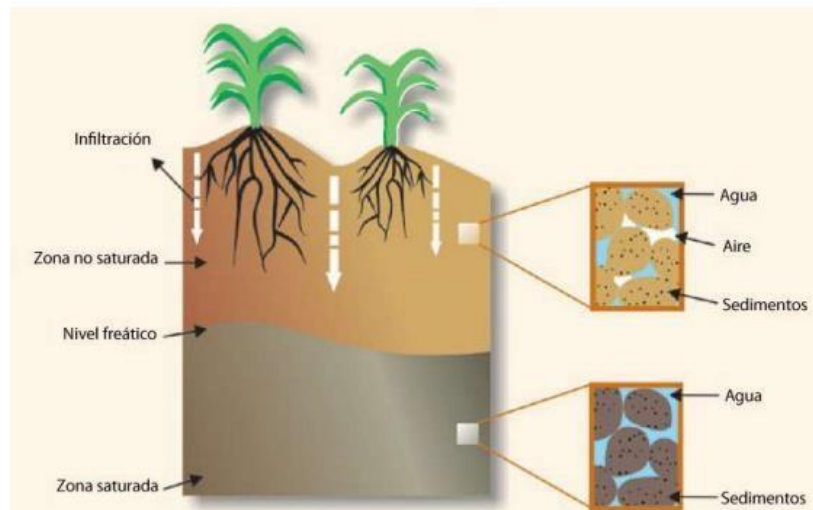


Figura 1. Esquema de la distribución del agua en el subsuelo.

<http://www.lneg.pt/download/3056/fig3.jpg>, 2017. Visitada 10 Febrero 2017.

La recarga puede ser de manera natural o artificial. Dentro del ciclo hidrológico las precipitaciones (lluvia, nieve, etc) son la principal fuente hídrica de recarga natural que puede tener distintos destinos una vez que alcanza el suelo (Ver Figura 2 del ciclo hidrológico). La precipitación se divide en tres fracciones que son: escorrentía como la parte que se desliza por la superficie del terreno, primero como arroyada difusa y luego como agua encauzada, formando arroyos y ríos. Otra parte se evapora desde las capas superficiales del suelo o pasa a la atmósfera con la transpiración de los organismos, especialmente las plantas; nos referimos a esta parte como evapotranspiración. Por último se infiltra en el terreno y pasa a ser agua subterránea (<https://independent.academia.edu/CesarRubin>, 2017).



Figura 2. Ciclo Hidrológico. Tomada de USGS en Enero, 2017.

La parte que se infiltra en relación al total precipitado depende de la litología (material geológico que aflora en la superficie) influye a través de su permeabilidad, la cual depende de la porosidad y composición del sustrato. Otras serán las pendientes pronunciadas, la presencia de vegetación densa que reduce el agua que llega al suelo, pero extiende en el tiempo el efecto de las precipitaciones, el agua que moja las hojas se desprende poco a poco, y de esta manera reduce la cantidad que escurre y aumenta la infiltración (<http://civilgeeks.com/2011/09/17/recarga-natural-de-acuiferos/>, 2016).

La recarga artificial es una técnica de gestión de recursos hídricos extendida a nivel mundial. Que consiste en la introducción expresa de agua al acuífero, mediante variedad de sistemas como balsas de infiltración, pozos de recarga profunda, zanjas y otros mecanismos. El sistema más utilizado es el uso de balsas de infiltración en superficie. Se trata de excavaciones en terreno permeable cerca de la fuente de agua disponible. (Ver Figura 3(a) muestra el sistema de una balsa y Figura 3(b) la balsa del proyecto piloto en chihuahua).

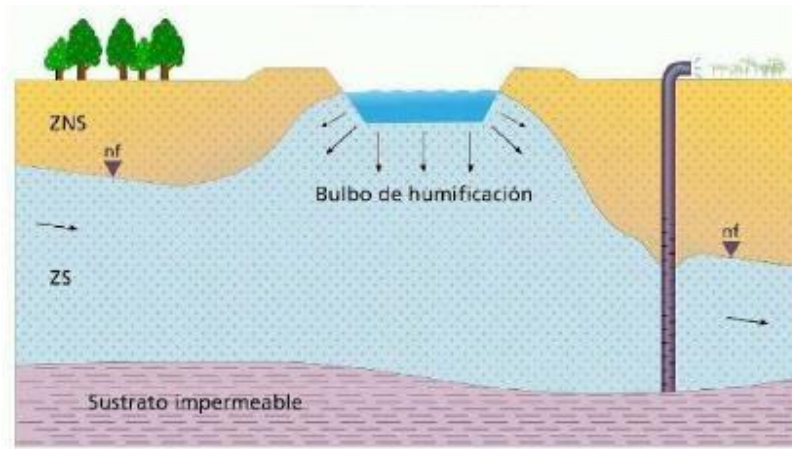


Figura 3(a).Esquema de una balsa de infiltración.



Figura 3(b).Balsa de infiltración en Chihuahua.

Las ventajas principales de las balsas de infiltración frente a otros sistemas de recarga son: bajos costos de construcción y mantenimiento, elevados tiempos de residencia del agua en la zona no saturada, mejora de la calidad del agua durante la infiltración, seguimiento sencillo de las tasas de infiltración, valorización ambiental de espacios naturales, vida útil elevada de las instalaciones. Por el contrario, la mayor desventaja es la necesidad de grandes



extensiones de superficie permeable disponible (esfera del agua, <http://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/recarga-artificial-de-acuiferos>, 2017).

3.2 FLUCTUACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO

Es la observación de las variaciones de niveles piezométrico en un cierto punto o pozos de observación, que proporciona información sobre procesos de recarga o descarga del acuífero y por consiguiente la evolución en el almacenamiento de agua en el acuífero. Las mediciones de la fluctuaciones que se presentan en los niveles de agua subterránea, producido por causas naturales o artificiales, se refiere a la piezometría en los acuíferos (CNA, 2007). Mediante pozos de observación debidamente localizados y distribuidos en las áreas de estudio, es posible determinar las superficies piezométricas, efectuando lecturas periódicas de los niveles estáticos del agua subterránea, que son en si lo que interesan para el estudio del comportamiento del acuífero. En el caso de acuífero libres, la superficie piezométrica coincide con el nivel freático mientras que en los acuíferos confinados la superficie queda representada por la altura que alcanza el nivel del agua y que puede quedar por encima o debajo del suelo, dependiendo de la diferencia de presiones que haya ente un plano de referencia y los puntos observados (Figura 4 muestra la representación del nivel freático, tomada de (<http://www.areaciencias.com/ecologia/aguassubterraneas.html>, 2017)). Del procesamiento de datos piezométricos, pueden obtenerse diversas graficas de las cuales las más útiles son: **hidrógrafos de pozos**, planos de profundidad al nivel agua, configuraciones piezométricas, evolución piezométrica y perfiles piezométricos.

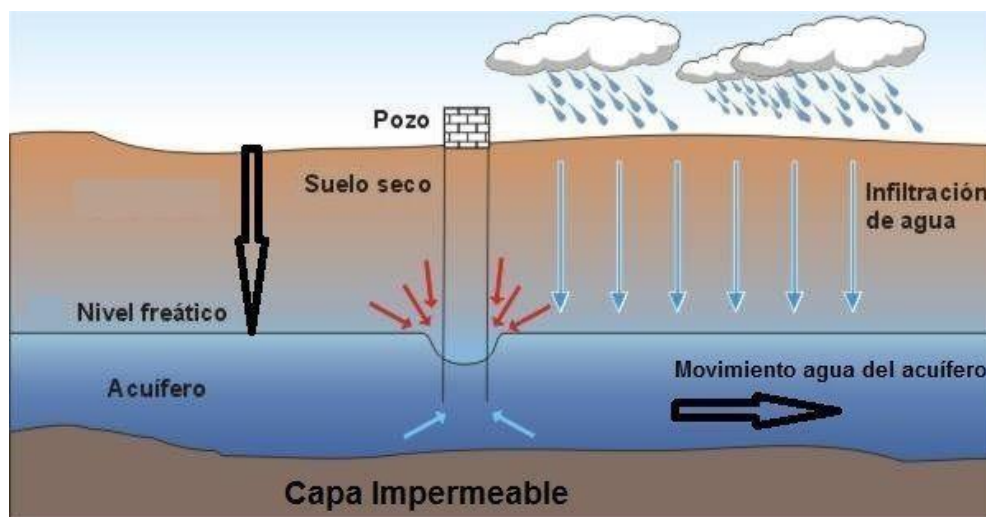


Figura 4. Representación del nivel freático en un pozo.

3.3 HIDRÓGRAFOS DE POZOS

Es la representación gráfica del comportamiento del nivel estático con respecto al tiempo y los datos de precipitación donde el intervalo de tiempo puede variar de horas, meses y años (<http://www.aecr.org/web/congresos/1999/25RER/paginas/II8.html>, 2017). En la figura 5 se muestra la representación de los mismos.

En las variaciones de los niveles surge un ascenso o descenso en los periodos en que el acuífero tiene una recarga o descarga; debido a factores naturales y artificiales tales como precipitación y las extracciones de agua en periodos de bombeo. A partir de los hidrógrafos se puede hacer una depuración de los datos obtenidos en relación al nivel estático observado en ocasiones, cuando la medición de este hayan sido afectada por el bombeo en el pozo o en alguno cercano; o en su caso se haya tomado una lectura errónea por un falso contacto en la sonda o la medición de la longitud del cable introducido presentó error, así que el nivel estático observado sea falso (Ortiz, 2005). La forma del hidrógrafo para diferentes puntos en cada pozo, cambia debido a diferentes factores como velocidad de infiltración, relieve, geología y la cubierta vegetal (Moon et al., 2004).

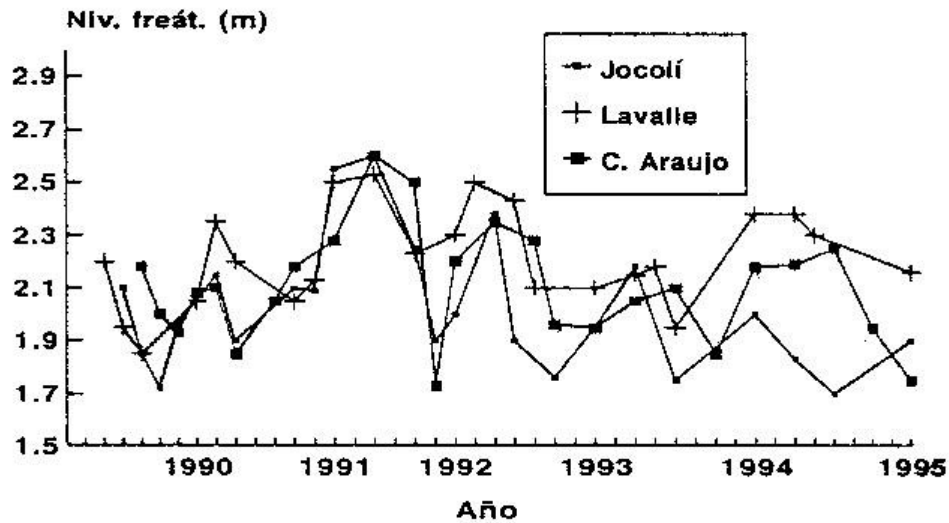


Figura 5. Representación gráfica de Hidrógrafos.

3.4 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

La evolución piezométrica se refiere a los cambios que sufre el nivel estático durante un intervalo de tiempo, producidos por la acción combinada de recarga y descarga de agua subterránea en el acuífero. Con los datos obtenidos en los pozos de observación, se grafican curvas de igual evolución del nivel estático, interpolando valores, siempre y cuando se tomen encuentra los factores que puedan influir en ellas, como son: determinación de zona de bombeo, zonas de recarga y descarga, forma de la superficie freática, tipo de acuífero. Las curva de igual evolución debidamente graficadas, nos ayudan a cuantificar el cambio que haya sufrido el acuífero en su almacenamiento, pudiendo notarse zonas de recuperación o abatimiento dependiendo de las condiciones que se encuentre la zona de estudio; así mismo, son de gran utilidad en la calibración de los modelos de simulación del comportamiento de los acuíferos (<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4142/Capitulo5.pdf>, visitada 2017).

3.5 MEDICIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS O ESTÁTICOS

Las mediciones piezométricas instantáneas se realizan mediante una “sonda de nivel” que se basa en la observación de la profundidad del agua mediante el cierre de un circuito



eléctrico cuando un elemento detecta el agua. Contando este de un electrodo, cable eléctrico y un detector. La medida que surge es la profundidad del nivel estático que tiene el pozo en ese momento (<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH12.pdf>).

Esta sonda se muestra en la Figura 6.

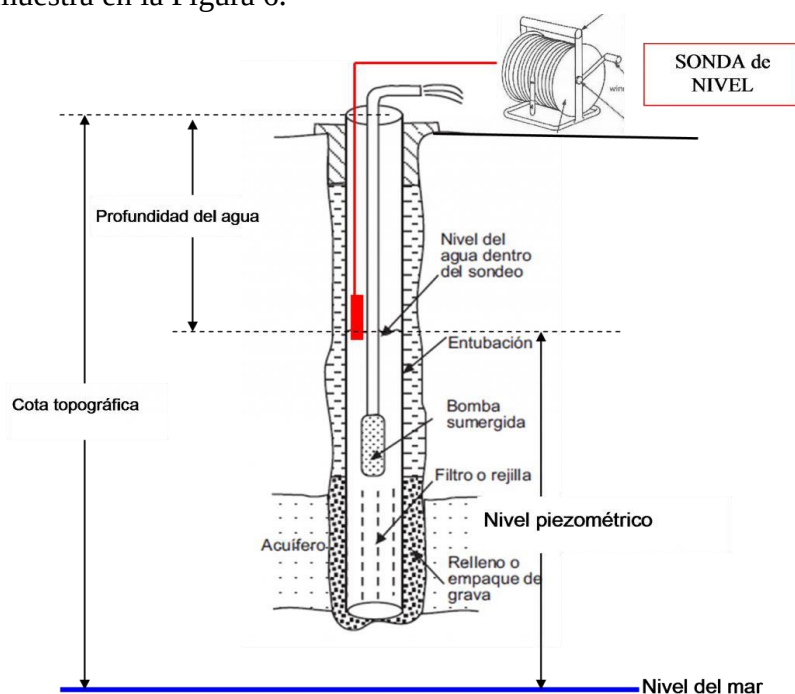


Figura 6. Sonda de nivel, para mediciones piezométricas. (<http://fdetonline.com/aguas-subterraneas-acuiferosii/>, visto en Enero del 2017.)

3.6 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA RECARGA

(Samper, 1997), utiliza la siguiente clasificación para los diferentes métodos de estimación de recarga: Medidas directas, balance de agua, técnicas de Darcy, técnicas de trazadores y métodos empíricos.

3.6.1 Medidas directas.

Son costosas y proporcionan únicamente medidas puntuales. Toman en cuenta solo medidas de recarga producida por la precipitación y la que se da por pérdidas de canales. El método que se puede aplicar es el lisímetro (Lerner et al., 1990), y los diferentes componentes del balance son medidos con exactitud los lisímetros son tanques o bloques instrumentados



llos de suelo alterado o inalterado, con o sin vegetación donde el flujo que circula a través de él puede ser medido; el bloque de suelo es aislado hidrológicamente del suelo que lo rodea, pero es una muestra representativa porque tiene la misma vegetación y está expuesto al mismo clima.

El balance de agua que realiza un lisímetro se basa en la medida del volumen de todos los componentes del mismo y puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$I+P=ET+ES+R\pm\Delta S \quad 1$$

ET= evapotranspiración

P=precipitación

I= aporte debido al riesgo

R= recarga

ES= escorrentía superficial

ΔS =cambio en el almacenamiento

Donde todos los componentes pueden ser medidos excepto la ET.

Medidores de infiltración

Los medidores de infiltración han sido desarrollados para medir recarga en canales de riego y ríos. Consiste en una “campana de filtración” que se introduce dentro del sedimento en la base de un canal; junto al cilindro está un tanque de agua, la tasa a la cual el agua dentro del cilindro se infiltra es determinada por cambios en el volumen del tanque (Lerner et al., 1990). El cilindro es insertado mientras la manguera se deja abierta para permitir que escape el aire y el exceso de agua. La bolsa plástica permanece sujeta a la manguera y flota justo bajo la superficie. El volumen de la bolsa es medido luego de que haya pasado un tiempo y la tasa de infiltración se calcula con la siguiente expresión:

$$q = \frac{(V_1 - V_2)}{(\pi \cdot r^2 \cdot t)} \quad 2$$

Donde:

q=tasa de infiltración (L/T) V_1 =volumen inicial (L3) V_2 =volumen luego de un tiempo t (L3) r= radio interno del cilindro de infiltración.



Con los medidores de infiltración las mediciones se hacen en corto tiempo. Un requisito indispensable para el uso de este método es que la base del canal debe ser suave para poder insertar el cilindro y evitar dificultades que den tasas de infiltración alta.

3.6.2 Balance de agua

Para hacer el balance hídrico se aplica el principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido, definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua. La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes, este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial, en la no saturada y en la saturada (Samper F.J., 1997). La expresión más sencilla puede ser:

$$R = P - E_s - ET - \Delta S \quad 3$$

Donde:

R = recarga

P = precipitación

E_s = escorrentía

ET = evapotranspiración

ΔS = cambio en el almacenamiento

Esta ecuación es válida si se asume que la recarga es igual al flujo subterráneo o descarga y si se toma la precipitación (P) como única entrada al sistema, luego de asumir que la divisoria de la cuenca coincide con la divisoria de aguas subterráneas y por lo tanto no hay entrada de flujo desde acuíferos vecinos (Freeze y Cherry, 1979).

Tipos de balance

El autor (Scanlon et al., 2002) clasifican estos balances en los diferentes tipos:

Balance de humedad del suelo: En el cual la lluvia y la evapotranspiración potencial constituyen los datos de entrada al balance y la evapotranspiración real y la recarga son los datos de salida. Este método corresponde al esquema de balance de la Figura (5). Un aspecto crítico en el uso de un modelo de balance es el intervalo de tiempo usado. Si se utilizan



largos intervalos manteniendo los mismos parámetros se pueden presentar valores de recarga muy bajos o inclusive nulos. Puede realizarse por dos métodos:

1. Medidas de caudal: La manera más sencilla para estimar las pérdidas por transmisión a lo largo de un canal ya sea natural o de irrigación es mediante un balance de agua del flujo. La recarga en un canal se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$R = Q_{A.Arriba} - Q_{A.Abajo} + \sum Q_{entra} + \sum Q_{sale} - E - \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad 4$$

Q= caudal

$Q_{A.Arriba}$ = Flujo aguas arriba

$Q_{A.Abajo}$ = Flujo aguas abajo

Q_{entra} = Flujo que llega de los arroyos tributarios, efluentes urbanos e irrigación.

Q_{sale} = Flujo que sale

E= Evaporación de cuerpos superficiales de agua o lechos de río

ΔS = Cambio en almacenamiento en el canal y en la zona no saturada

2. Encharcamiento: La recarga se estima midiendo la disminución del nivel del agua luego de haber aislado una sección del canal. Cuando las perdidas por evaporación y cualquier precipitación que entra han sido tomada en cuenta, la caída neta en el nivel de agua se atribuye a la infiltración. La tasa de pérdidas por infiltración por unidad de longitud se calcula con la siguiente expresión.

$$Q = (d_1 - d_2) \frac{(W_1 + W_2)}{(2t)} \quad 5$$

Donde:

q= tasa de infiltración por unidad de longitud (L³/T/L)

d₁=profundidad media inicial (L)

d₂= profundidad media después de un tiempo t (L)

W₁= ancho promedio inicial (L)

W₂= ancho promedio para después de un tiempo t (L)

El uso de este método no es muy conveniente debido a que el canal debe estar fuera de servicio por varios días y es más costoso que usar medidores de infiltración.

Fluctuación del Nivel Freático: El volumen almacenado producto de un aumento del nivel freático es igual a la recarga, luego de tener en cuenta otros flujos de entrada y salida como



pozos de bombeo y flujo entre acuíferos. Este método es quizás el más utilizado para estimar la recarga. Entre sus ventajas, cabe citar su sencillez e independencia respecto al mecanismo de desplazamiento del agua en la zona no saturada (Healy y Cook, 2002). Se utiliza la siguiente expresión para estimar la recarga:

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad 6$$

S_y = rendimiento específico

h = altura del nivel freático t = tiempo

La altura del nivel freático se determina en los pozos. El cual es representativo de un área de al menos varios metros cuadrados, por lo que no corresponde a una medida puntual. Sin embargo, el método tiene sus limitaciones (Healy y Cook, 2002):

1. Proporciona mejores resultados si se aplica para niveles freáticos superficiales.
2. Los pozos deben localizarse de manera que los niveles freáticos sean representativos de toda el área de recarga.
3. El método no se puede tener en cuenta para recarga en condiciones estables.
4. Identificar la causa de las fluctuaciones del nivel freático es un asunto complejo así como calcular el valor del rendimiento específico debido a la heterogeneidad del acuífero.

3.6.3 Método de trazadores

Estos son sustancias que se encuentran en el agua y se pueden detectar por medios visuales o analíticos (López R, 1997) y sirven para definir caminos preferenciales de flujo (Hendrickx y Walter, 1997), identificar mecanismos responsables de generación de flujo, identificar fuentes de solutos y sistemas de contaminación, determinar fuentes de recarga etc. (Kendall y Caldwell, 1998). El principio general del método de trazadores es el balance de masa del trazador, en el cual se asume que el agua y el trazador son transportados a la misma tasa, se utiliza la siguiente ecuación:

$$r Tr = p Tp + fd \quad 7$$



Donde

r = tasa de recarga promedio

Tr = concentración promedio del trazador en la recarga

p = precipitación promedio

TP = concentración promedio del trazador en la precipitación

fd = masa del trazador en la zona vadosa

Para que se presente el caso ideal, la concentración del trazador debería incrementar con la profundidad hasta que se alcance una concentración estable. Esto indica que no se puede presentar evaporación bajo esta profundidad y que la ecuación 7 puede ser aplicada.

3.6.4 Aproximación de Darcy

Consiste en encontrar valores de cabezas hidráulicas a partir de las ecuaciones de Richards, en la zona no saturada, y Boussinesq, en la zona saturada, contando con datos de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y contenido de humedad, y mediante el uso de técnicas analíticas o modelos numéricos; según la simplicidad de las condiciones de campo o la cantidad de simplificaciones asumidas. Con las cabezas hidráulicas se determina la velocidad de filtración o el flujo de agua, teniendo este valor se halla el caudal y con este último se realiza un balance de masa donde se conoce el volumen de agua que entra y sale del sistema y se estima el volumen de agua que queda almacenado en él, que equivale a la recarga.

La ley Darcy relaciona la velocidad de infiltración (q) con la conductividad hidráulica (k) y el gradiente hidráulico ($i = \partial h / \partial z$)

$$q = -k \cdot i = -k \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad 8$$

Siendo z la altura sobre el nivel de referencia

Para obtener las ecuaciones de flujo en la zona no saturada y en la zona saturada, se combinan las ecuaciones de Darcy con la ecuación de continuidad:

Para la zona no saturada:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right) = R_w \quad 9$$



$(\partial\theta/\partial t)$ = variación de la humedad con el tiempo.

$(\partial q/\partial z)$ = variación de q con la dirección recorrida

R_w = Extracción de agua por la raíces (en algunas ocasiones este no es tomado en cuenta).

Cambiando la ecuación 8 y 9 se obtiene la siguiente expresión.

$$(\partial/\partial t) = (\partial/\partial z) k(\theta) (\partial h/\partial z) = R_w \quad 10$$

La cual se aplica para flujo vertical (porque solo involucra una dirección) en la zona no saturada y se conoce como la ecuación de Richards (1931).

Para la zona Saturada:

$$\text{Masa que entra} = \rho \cdot q + (\partial \rho q / \partial z) (\partial z) \quad 11$$

Por lo tanto

$$\text{Diferencia de masa} = -\rho (\partial q / \partial z) - (\partial h / \partial z) \quad 12$$

Utilizando la ley de Darcy se tiene:

$$\partial q / \partial z = -k (\partial / \partial z) (\partial h / \partial z) \quad 13$$

Y combinando las ecuaciones 11 y 12 se obtiene la ecuación de Boussinesq o ecuación de flujo en la zona saturada

$$\text{En una dirección S/T } (\partial h / \partial t) = k (\partial / \partial z) (\partial h / \partial z) = k v^3 h \quad 14$$

$$\text{En dos direcciones S } (\partial h / \partial t) = (\partial / \partial z) (T \partial h / \partial z) + (\partial / \partial y) (T \partial h / \partial y) \quad 14$$

La ecuación de Boussinesq es una combinación de la Ec. de Richards y la ecuación de Darcy. La de Richard para obtener una recarga potencial y la Boussinesq o ecuación de flujo en la zona saturada una estimación de la recarga real.

$$S \partial h / \partial t = \partial / \partial z (T \partial h / \partial z) + \partial / \partial y (T \partial h / \partial y) \quad 15$$

Las expresiones anteriores se pueden resolver analíticamente o por métodos numéricos cuando las suposiciones son simplistas o inapropiadas se considera un modelo numérico.

Las técnicas empíricas correlacionan la recarga con otras variables hidrológicas que se pueden medir como precipitación, temperatura, elevación, flujo en canales, etc. Esta relación se usa para extrapolar los registros de recarga en el tiempo y transponer los estimativos a



otras áreas de recarga de características similares. El método más simple para estimar la recarga es el uso de relaciones empíricas entre la recarga y la precipitación:

$$R = f * P \quad \text{ó} \quad R = k_1 (P - K_2) \quad 16$$

Donde f , k_1 y k_2 son constantes empíricas que varían probablemente con el terreno y el clima y corresponden a una zona particular.

Estas expresiones tienen algún valor para los investigadores siempre y cuando las constantes se hayan obtenido luego de un estudio cuidadoso, sin embargo, después de tener la correlación se utilizan como modelos de “cajas negras”, haciendo estimaciones de la recarga sin considerar la hidrogeología de la zona y sin tener en cuenta la confiabilidad de los resultados (Lerner et al., 1990). Este tipo de métodos tiene un grado de validez bastante limitado, ya que expresiones para una cuenca se pueden aplicar a otra solo si hay una gran similitud entre ellas (Samper F.J., 1997). Un problema que se presenta con el uso de este método es el efecto de los niveles de agua subterránea en la recarga, ya que niveles altos o colgados reducirán la tasa de recarga. La profundidad del agua subterránea es el factor más difícil de correlacionar entre diferentes áreas, y por lo tanto los métodos empíricos trabajan mejor cuando el nivel freático es profundo y no ocurren “colgamientos” del nivel. Otro problema adicional se presenta cuando hay explotación de los recursos subterráneos ya que la recarga puede variar pero los métodos empíricos no pueden estimar este cambio debido a que ellos no cuentan con modelos del proceso (Lerner et al., 1990). En general, las fórmulas empíricas relacionan pérdidas por filtración con uno o más de los siguientes factores (Lerner et al., 1990):

1. El tipo y la condición del suelo
2. La profundidad o flujo de agua en el canal
3. El perímetro mojado.

En este estudio se utilizará el método de Fluctuación de Niveles Freáticos (FNF) ya que reúne las condiciones para aplicarse a esta zona de estudio.



3.7 MÉTODO DE FLUCTUACIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS (FNF).

Se utilizará para observar la relación que hay entre las fluctuaciones de los niveles freáticos y las precipitaciones, y de esta manera conocer la respuesta a la recarga que se tienen en el acuífero en periodo de lluvias o sequías en la zona de estudio.

Es uno de los métodos más utilizados para estimar la recarga en un acuífero. Una de sus ventajas es que su sencillez e independencia en cuanto al mecanismo de desplazamiento del agua en la zona no saturada. Tomando en cuenta que los ascensos del nivel freático se deben a la recarga del acuífero, (Healy y Cook, 2002). La ecuación que se utiliza para estimar la recarga por este método es:

$$R = \Delta S_{GW} = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad 17$$

Donde:

R= Recarga

h= nivel freático

t= tiempo

S_y= almacenamiento específico (porosidad efectiva).

Para que la ecuación sea correcta se asume que el agua que llega al nivel freático formará parte del flujo subterráneo y la evapotranspiración desde el nivel freático, el aporte al flujo base o al flujo regional subterráneo y otras salidas o entradas al sistema subterráneo son nulas. De no ser así, la recarga obtenida será válida para el punto de medición, mientras que la recarga regional al acuífero será menor. La altura del nivel freático se determina mediante la medición de los niveles freáticos en pozos de observación, el cual es representativo en un área de al menos varios metros cuadrados, por lo tanto no puede ser una medida puntual (Vélez Y Vázquez, 2004).

Esta técnica se adecua mejor con períodos de tiempo cortos y en regiones con niveles freáticos someros con respuestas rápidas del nivel freático (Crosbie et al., 2005). Por ello la importancia de aplicarlo en la estimación de la recarga de la balsa de infiltración al acuífero. Las fluctuaciones en el nivel freático responden a un promedio de las condiciones de recarga



en la zona. La recarga es función del almacenamiento específico, la variación del nivel freático en un intervalo de tiempo. (Vélez y Vásquez, 2004). Existe un retardo entre el aporte de la recarga al nivel freático y su redistribución a otros términos, tales como el flujo base o la evatranspiración por lo que, si el método se aplica dentro de este retardo se contabiliza toda el agua que ingresa por recarga. Siendo válido esto en cortos periodos de tiempo, que van desde horas a días (Marcelo R. Varni).

Para determinar S_y a la profundidad de fluctuación del nivel freático. Se define como (Healy, 2010).

$$S_y = \emptyset - S_r \quad 18$$

Donde:

$\emptyset$ = es la porosidad

S_r = la retención específica.

Para determinar S_y se utilizan métodos de laboratorio, balances de agua, prácticas de bombeo y análisis de respuesta del nivel freático a la recarga.

Varni (2013), dice que la respuesta del nivel freático a los eventos de recarga es muy rápida debido a su poca profundidad, a las vías preferenciales de flujo, y al flujo pistón que se produce en la matriz porosa, lo que concluye que el agua que se añade al acuífero no es la que se ha infiltrado recientemente, sino la que ya se encontraba en los poros del suelo en los eventos de recarga. Así que el volumen almacenado es producto del aumento del nivel freático es igual a la recarga, luego de tener otros flujos de entrada y salida al acuífero.

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Es una técnica de análisis multivariante de reducción de datos. Cuyo objetivo es transformar un conjunto de variables originales, en un nuevo conjunto de variables sin perder información, combinación lineal de las originales, llamadas componentes principales, componentes o factores. Este trata de encontrar estos factores, que se caracterizan por estar relacionados y exponer el mayor porcentaje de varianza total. Para medir la cantidad de



información incorporada en una componente se utiliza la varianza. Así que cuanto mayor sea la varianza mayor es la información incorporada en la componente. Esta técnica nos sirve para interpretar la relación entre las diferentes variables.

En este estudio se utilizó para extraer factores, y revelar patrones en un gran conjunto de datos. Los componentes principales se definen como sigue: supongamos que x es un vector de p variables aleatorias (en este estudio, son niveles de agua subterránea y precipitaciones). El primer paso para buscar la función lineal $\alpha_1^T x$ de los elementos x que tiene una varianza máxima, donde α_1 es un vector constante de p , $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1p}$, y T denota transposición, así que:

$$\alpha_1^T x = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1p}x_p = \sum_{j=1}^p \alpha_{1j}x_j \quad 19$$

A continuación se busca la función lineal $\alpha_2^T x$, no correlacionada con $\alpha_1^T x$, que tiene la varianza máxima, y así sucesivamente, de modo que se encuentra k th, una función lineal $\alpha_k^T x$ que tiene una varianza máxima que no está correlacionada con $\alpha_1^T x, \alpha_2^T x, \dots, \alpha_{k-1}^T x$. La variable derivada k th, $\alpha_k^T x$, es la k th PC. Hasta p , se puede encontrar PCs, pero se espera que, en general, la mayor parte de la variación en x sea contabilizada por m PCs, donde $m \ll p$. La transformación en PCs reduce la complejidad.

Habiendo definido PCs, necesitamos saber cómo encontrarlos. Para derivar la forma de los PCs, considere primero que $\alpha_1^T x$; α_1 maximiza $\text{var}[\alpha_1^T x] = \alpha_1^T \Sigma \alpha_1$, donde Σ es una matriz de covarianza conocida de x , el vector de variables aleatorias. Está claro que, tal como está el máximo no se alcanzara para el finito α_1 , por lo que se debe imponer una restricción de normalización. La restricción más conveniente aquí es $\alpha_1^T \alpha_1 = 1$ (es decir la suma de los cuadrados de los elementos de α_1 es igual a 1). Para maximizar $\alpha_1^T \Sigma \alpha_1$ sujeto a $\alpha_1^T \alpha_1 = 1$, utilice el método multiplicador de Lagrange y maximice.

$$\alpha_1^T \Sigma \alpha_1 - \lambda (\alpha_1^T \alpha_1 - 1) \quad 20$$



Donde λ es un multiplicador de Lagrange. La diferenciación con respecto a α_1 da

$$\sum \alpha_1 - \lambda \alpha_1 = 0 \quad 21$$

o

$$(\sum - \lambda I_p) \alpha_1 = 0 \quad 22$$

Donde I_p es el $(p \times p)$ de la matriz de identidad. Así, λ es un valor propio de $\sum$, y α_1 es el auto vector correspondiente. Para decidir cuál de los p auto vector es el valor maximizador de α_1 , note que la cantidad a maximizar es

$$\alpha_1^T \sum \alpha_1 = \alpha_1^T \lambda \alpha_1 = \lambda \alpha_1^T \sum \alpha_1 = \lambda \quad 23$$

Así que λ debe ser lo más grande posible. Así, α_1 es el autovector correspondiente al autovalor más grande de $\sum$, y $\text{var}[\alpha_1^T x] = \alpha_1^T \sum \alpha_1 = \lambda_1$ es el autovalor más grande. En general, la k th PC de x es $\alpha_k^T x$ y $\text{var}[\alpha_k^T x] = \lambda_k$, donde λ_k es la k th el valor más grande de $\sum$, y α_k es el auto vector correspondiente (Jolliffe, 1986).

Al ordenar el λ_k en orden descendente los PCs correspondientes representan las formas geométricas (representadas por el vector, α_k) que sucesivamente contiene la mayor semejanza con todas los niveles de agua observados, siempre que cada componente no este correlacionado con todos los componentes previamente calculados. Cada valor propio representa la varianza explicada por su PC. El paso final en el procedimiento de PCA es identificar patrones sistemáticos de variabilidad espacial y temporal en la matriz original de los niveles de agua. Esto se logra mediante el cálculo de las covarianzas subyacentes o la estructura de correlación de los datos. Esa estructura es inherente a los autovectores (α_k), calculados a partir de la covarianza o matriz de correlaciones, que son la base de las cargas y las puntuaciones. Las cargas de componentes principales (PCL) pueden visualizarse como una medida de la similitud espacial entre las variables de niveles de agua y cada PC. Esta similitud se expresa como una relación ponderada proporcionada por el producto de las matrices, E y Λ , de manera que



$$l_{ik} = \alpha_{ik} \lambda_k^{1/2}$$

24

Donde l_{ik} es la carga de kth PC en la ith variable de niveles de agua (es decir, el coeficiente de correlación entre el componente kth y la variable ith). Para el conjunto completo de variables y componentes, la ecuación (24) se convierte en

$$L_{ik} = E \Lambda^{1/2}$$

25

Y L se denomina matriz de carga de componentes, las puntuaciones de los componentes principales (PCS) es una medida de la similitud temporal entre el patrón observado de los niveles de agua para una fecha dada y cada PC. Las puntuaciones de componentes se calculan como el producto interno entre la observación del nivel de agua y un PC.

$$c_{in} = \alpha T_i X_n$$

26

Donde c_{in} es la puntuación de la nth observado en el ith sobre el componente principal. Para todas las observaciones y componentes, la Ec.26 se convierte en

$$C = E^T X$$

27

C se denomina matriz de las puntuaciones de las componentes, y X es una matriz de observación. Las puntuaciones en cualquier PC individual tendrán una media de cero, una desviación estándar igual al valor propio del componente, y no estarán correlacionadas con las puntuaciones de todos los demás componentes (Winter et al, 2000).

Este estudio utilizó PCA para clasificar los datos de nivel de agua medios en los pozos de monitoreo en hidrógrafos con variación similar. Se agruparon los sitios que mostraban características FNF similares y se determinaron las curvas características de las fluctuaciones que son las puntuaciones de componentes para cada PC, como representativos de cada tipo. Primero probamos la validez de aplicar el análisis de factores a nuestros datos de nivel de agua.

El análisis factorial de los datos de nivel de agua produjo PCs con las varianzas totales explicadas. Los valores propios iniciales indican longitudes de vectores propios. Si este valor de un componente es algo, la proporción del componente en el grupo padre es relativamente



grande. El % acumulativo se calcula como la acumulación de varianza. El número de factores se determinó por el criterio de % acumulativo, que es el coeficiente de variación correspondiente a la covarianza e indica la cantidad de varianza explicada por cada valor propio. La cantidad total de varianza explicada por los factores.

El procedimiento maximiza la varianza de cara de factores en cada vector, bajo restricción de que los factores permanecen ortogonales. La matriz P se gira para producir una nueva matriz F

$$F = PR \quad 28$$

Donde P es la matriz de carga de factores R(qxq) es la matriz de rotación, F(nxq) es la matriz de carga del factor varimax, q denota el número de factores y n denota el número de objetos.(Sena et al 2000). La matriz de componentes rotados se analizó para cada estación. Los niveles de agua fluctúan de acuerdo con las variables hidrogeológicas relacionadas con la superficie (cantidad, duración e intensidad), lo niveles de corrientes, el espesor y los materiales de la zona vadosa y la geología de la roca. Se seleccionaron pozos de monitoreo para cada una de las fluctuaciones basadas en PCLs y caracterizando las características distintivas de cada tipo. Como la zona vadosa es profunda, el nivel de agua subterránea cambia suavemente y parece reflejar las condiciones de recarga estacionales y de relativamente largo plazo. El porcentaje relativamente alto de componentes de arcilla en la zona vadosa retarda el movimiento vertical del agua infiltrada, resultando en una curva de FNF (Fluctuación de nivel freático) que es suave con baja amplitud. En este estudio comparamos los cambios en el nivel de agua con la precipitación acumulada y analizamos como la fluctuación del agua subterránea se relaciona con la precipitación correspondiente. La razón de recarga de las aguas subterráneas se calculó como la proporción del aumento del nivel de agua subterránea y la precipitación acumulada durante el periodo lluvioso. Todo esto es realizado con en el software MiniTab.



CAPITULO 5. METODOLOGÍA.

La metodología inició recopilando, analizando e interpretando bibliografía a nivel mundial, regional y local de zonas donde se han aplicado estudios con objetivos similares al que se realiza en esta tesis.

Después se ubican los pozos actuales existentes, de la JMAS de Chihuahua y se recopilan datos de los Niveles Estáticos de pozos de monitoreo, prosiguiendo a integrar toda la información existente para definir una red de monitoreo a trabajar así como los periodos de muestreo en los pozos aledaños a la zona de estudio. En las imágenes 1 2, y 3 se muestra como se realizaba la colección de datos y lugar donde se llevaba a cabo.



Imagen #1. Toma de muestra de niveles estáticos en pozo de observación.



Imagen #2. Canaleta de llenado de agua a la Balsa de infiltración



Imagen #3. Se muestran pozos de observación y sonda eléctrica para medir niveles de agua.

Se tomaron en cuenta los 3 pozos perforados alrededor de la balsa, dos de ellos con 40 metros de profundidad y el otro de 70 metros. Se eligieron los demás pozos que conformarían la red, esto en base a las variables hidrogeológicas de cada pozo. Se observan 17 pozos más con ubicaciones a 1 Km a la redonda aproximadamente y una poco más de donde se ubica la balsa. Para conformar una red de monitoreo de 20 pozos en los cuales se tienen idas al sitio para tomar mediciones, que ha ido variando de días, semanas y meses; estas medidas se toman introduciendo una sonda eléctrica en el pozo, para registrar los niveles estáticos del agua desde la boca del pozo hasta el nivel de agua estático que se encuentra en ese momento.

En este estudio los periodos de muestreo en los 3 pozos de observación fueron variando de 2, 5, 15, 30 días. La coordenadas de ubicación de esta red de monitoreo se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de pozos de monitoreo, JMAS 2017.

RED DE POZOS DE MONITOREO, JMAS CHIHUAHUA			
POZOS	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN (M)
Planta 1 Observación	28°40'16.85"N	106°0'22.70" O	1370
Planta 2 Observación	28°40'14.12" N	106°0'21.00"O	1366
Planta 3 Observación	28°40'16.38N	106°0'21.38" O	1369



Noria Robinson 3	28°40'29.21" N	106°0'36.81" O	1366
Pemex 2	28°40'56.62" N	106°0'8.06" O	1360
Pemex 3	28°40'57.37" N	106°0'9.37" O	1360
Pemex 4	28°40'58.84" N	106°0'11.40" O	1359
Robinson #3	28°40'7.80" N	106°0'4.84" O	1367
Tabalaopa Aldama #3	28°41'45.38" N	106°1'4.86" O	1385
Tabalaopa Aldama #4	28°41'24.42" N	106°0'59.56" O	1383
Siaz	28°39'33.78" N	105°59'23.15" O	1380
Leon 2	28°39'55.30" N	106°1'45.78" O	1390
Leon 3	28°39'29.74" N	106°1'58.02" O	1388
Paseos de Concordia 1	28°40'9.05" N	105°59'7.83" O	1373
Paseos de Concordia 2	28°40'13.72" N	105°58'47.31" O	1372
Aeropuerto 1	28°38'51.29" N	106°0'11.30" O	1392
Aeropuerto 2	28°39'13.17" N	105°59'57.66" O	1386
Concordia	28°38'41.34" N	106°1'1.68" O	1398
La laguna 1	28°39'7.37" N	105°59'27.55" O	1391

En la Tabla 2 se muestra cómo han evolucionado los niveles estáticos en los pozos de observación desde Marzo-Diciembre 2015.

Tabla 2. Niveles estáticos (m) de pozos de observación de Ene-Dic. 2015. JMAS 2017.

NIVELES ESTÁTICOS POZOS OBSERVACIÓN JMAS 2015							
Pozos	Planta 1 Observación	Planta 2 Observación	Planta 3 Observación	Noria Robinson 3	Pemex 2	Pemex 3	Pemex 4
01/MAR/2015	7.35	8.73	7.82				
01/ABR/2015	10.74	12.1	10.05				
01/MAY/2015	10.9	13.8	9.3				
01/JUN/2015	10.4	16.2	9.9				2.7
01/JUL/2015	9.95	15.3	4.3				3.35
12/AGO/2015	5.55	4.85	4.2	4.4			3.56
15/AGO/2015	6.95	4.5	3.85				
17/AGO/2015	9.25	9.25	8	4.3	8.3	5.3	3
18/AGO/2015	10.02	8.4	8				



20/AGO/2015	9.1	6.2	6.05				
24/AGO/2015	11.3	9	9.35	8.5	8.45	5.5	3.1
28/AGO/2015	11	5.5	5.45	4.4			
30/AGO/2015	9.8	7.65	7.9				
01/SEP/2015	10.05	8.8	8.9		8.85	4.02	3.56
02/SEP/2015	10.5	3.9	5.05				
03/SEP/2015	10	8.85	4.82				
05/SEP/2015	15	10.9	9.95				
08/SEP/2015	10.8	7.95	6				
10/SEP/2015	10.4	12.9	9.3				
11/SEP/2015	8.05	5.5	4				
14/SEP/2015	8.55	8.6	6.6				
16/SEP/2015	10.2	8.65	9.05				
17/SEP/2015	11.05	6.35	4.85	4.3			
20/SEP/2015	7.05	4.85	4.5				
23/SEP/2015	8.35	7.15	6.75				
28/SEP/2015	9.35	7.75	7.05				
03/OCT/2015	9.03	7.25	9.05				
05/OCT/2015	9.4	6.7	6.56				
12/OCT/2015	13.15	11.15	7.05	4.4	4.40		3
19/OCT/2015	13.16	13.08	7.05				
20/OCT/2015	11.7	5.4	7.05				
03/DIC/2015	9.8	10.12	9				
09/DIC/2015	15.2	13.95	11				
10/DIC/2015	13.75	7.15	7				
22/DIC/2015	14.97	12.12	7				
23/DIC/2015	12.65	6.25	7.05				



Tabla 3. Niveles estáticos (m) de pozos de observación de Ene-Sep. 2016, JMAS 2017.

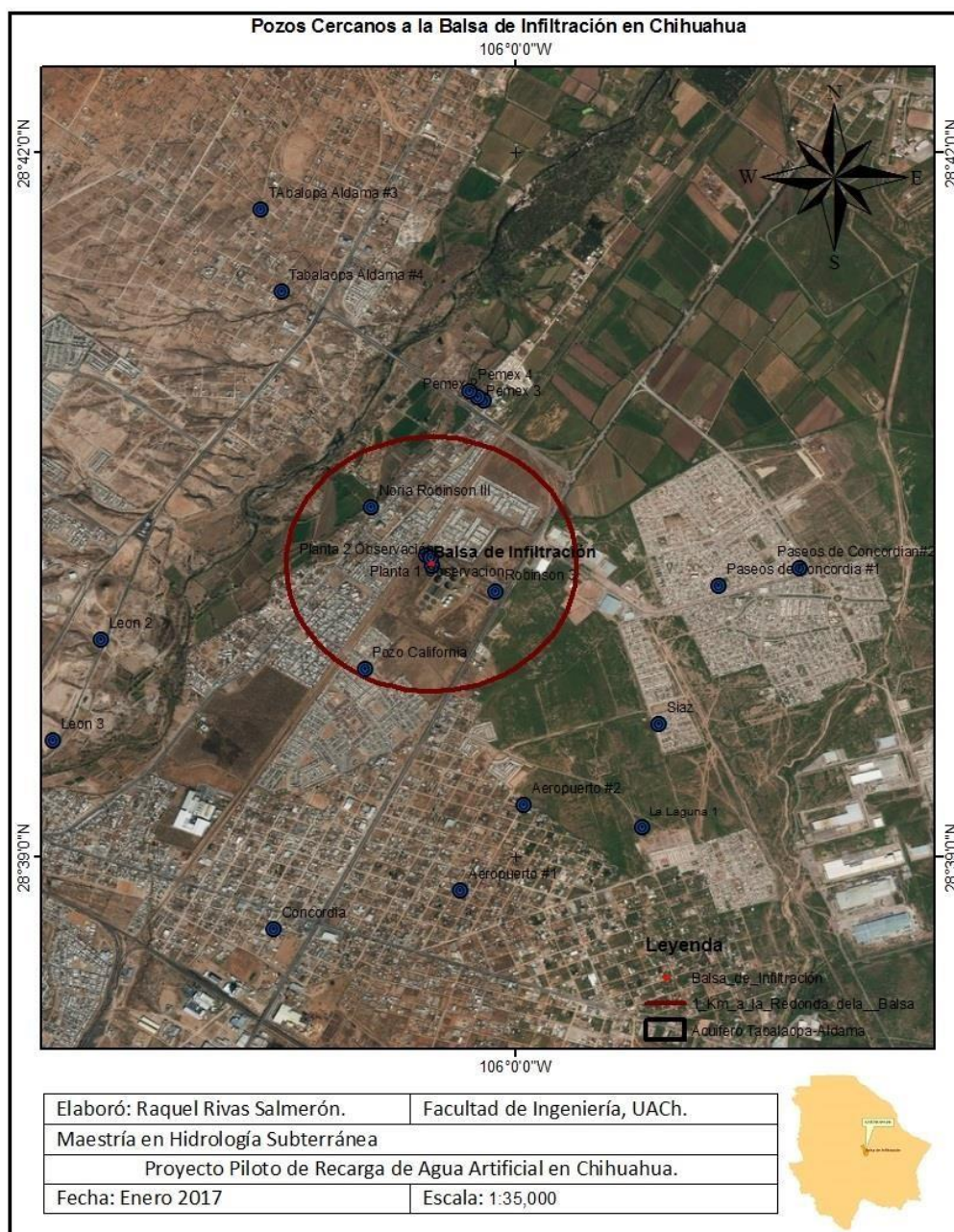
NIVELES ESTÁTICOS DE POZOS OBSERVACIÓN JMAS ENE-SEP 2016							
Pozos Observación	Planta 1 Observación	Planta 2 Observación	Planta 3 Observación	Noria Robinson 3	Pemex 2	Pemex 3	Pemex 4
12/ENERO/2016	13.9	17.4	12.8				
27/ENERO/2016	17.9	19.15	15.8				
28/ENERO/2016	16.9	5.45	8.45				
01/FEBR/2016	12.03	8.25	7.4	4.35	8.45		3.50
05/FEB/2016	12.2	11.85	9.75				
06/FEB/2016	12	9.05	5.7				
07/FEB/2016	15.43	4.45	5.25				
18/FEB/2016	14.2	11.6	11.2				
19/FEB/2016	13.7	6.95	8				
19/FEB/2016	13.55	5.73	5.5				
25/FEB/2016	12.6	8.9	9.45				
26/FEB/2016	12.2	4.5	5	4.35		5.7	
27/FEB/2016	18	16.35	19	4.5	8	5.5	3.6
04/MARZO/2016	12	4.35	5.4				
18/MARZO/2016	10.6	4.45	8.3				
29/MARZO/2016	11.15	6.5	9.3	4.5	8.35	5.95	3.15
26/ABRIL/2016	8.2	12.6	6.62				
27/ABRIL/2016	7.83	6.25	9.85				
04/MAYO/2016	8.6	6.8	9.95	4	8.55	6.35	3.85
05/MAYO/2016	8.85	3.25	3.7				
11/MAYO/2016	9.35	7.35	8				
12/MAYO/2016	9.7	2.6	3.2				
18/MAYO/2016	7.95	5.5	5.2				
19/MAYO/2016	7.25	2.75	3.1				
22/JUNIO/2016	8	2.75	3.8				
14/JULIO/2016	4	4	3.55				
19/SEP/2016	3.9	3.65	3.8				
20/SEP/2016	7.95	5	3.65				
22/SEP/2016	7.8	3.25	3.45				



Tabla 4. Niveles Estáticos de los pozos de observación de 2001-2012, JMAS 2017.

NIVELES ESTÁTICOS DE LA RED DE POZOS DE EXTRACCIÓN, JMAS												
Pozo	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Robinson #3		99.7	99.7	99.7	91.8	104.0	104	71	102	95.5	102.65	102.65
Tabalaopa Aldama #3	128.4	130.85	131	133	133	132	137	142	133.6	132	139.5	137
Tabalaopa Aldama #4	134.9	138.4	140	141	142	142	142	137.7	133.1	142	150	140.5
Siaz							145.5	105.65	104.2	154.5	154.85	123.35
Leon 2			64.5	64.5	64.5	93.55	65.65	90	72.9	72.9	72.9	71
Leon 3							78.8	102.25	37.15	37.15	37.15	104.7
Paseos de Concordia 1						126.3	91.9	104.2	96	89	105.3	103.94
Paseos de Concordia 2							95.5	59.17	94.4	97.6	146.3	146.3
Aeropuerto 1	80.35	80.4	80.4	82.2	81.1	83.15	104	95.15	86	92	127	93.5
Aeropuerto 2	82.2	87.3	92.4	91.5	90.1	90.6	93	130.1	120	102	154	110.1
Concordia		64.3	64.8	64	70	70	70	72.9	71	68	125	125
La laguna 1				97.5	102	102	102	95.55	102.2	102	102.25	102.25

En la Figura 7 se observa la distribución de la red de monitoreo de pozos de la balsa de infiltración.



De la Conagua se recopilan datos históricos de precipitación (mm) de las estaciones meteorológicas que influyen en la zona de estudio (balsa de infiltración) en el acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua. Para elegir los registros a emplear se observa la información de las estaciones meteorológicas que influyen en la zona de estudio (Balsa de infiltración)



de las cuales nos interesan los datos de precipitación y a su vez la confiabilidad de los mismos. Reuniendo un total de 5 estaciones para analizar sus datos. Dos de ellas a cargo de la Conagua siendo estas: La Mesa, Universidad. Y las otras 3 a cargo de la JCAS estas son: JCAS, Potabilizadora y Protección Civil. En la Tabla 5 se muestran las coordenadas de ubicación de las estaciones.

Tabla 5. Coordenadas de ubicación de Estaciones Meteorológicas.

Estación Meteorológica	Latitud	Longitud	Elevación
JCAS	28° 38' 27" N	106° 4' 42" W	1440
Potabilizadora	28° 37' 28.6" N	106° 06' 00.9" W	1431
Protección Civil	28° 41' 01.1" N	106° 04' 58.4" W	1339
Chihuahua	28°40'14.97" N	106°1'51.59'	1433
La Mesa	28°46'33.13'	105°57'48.08'	1250

En la Tabla 6 se muestra los datos de precipitación acumulada registrados mensualmente donde se observa cómo ha ido variando del 2001-2017, así como su precipitación acumulada anual de la estación JCAS.



Tabla #6. Precipitación Estación JCAS. Datos JCAS, 2017.

PRECIPITACIÓN (mm) DE ESTACIÓN JCAS													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	P.A
2001	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	65	123.7	13	0.5	8.2	3.8	214. 2
2002	<u>0</u>	18.6	<u>0</u>	2.2	25.2	49.6	126. 8	60.8	29.2	35.8	0.8	0.2	349. 2
2003	5	6.2	<u>0</u>	0.8	11.2	27.2	69.2	41.8	69.6	87.6	<u>0</u>	<u>0</u>	318. 6
2004	33.8	<u>2.8</u>	73	9.2	15.4	76.6	125	54.4	94.6	81.4	59.8	4.4	630. 4
2005	21.4	9.6	2.4	<u>0</u>	76.8	0.6	44.6	79.6	56	37	<u>0</u>	7.4	335. 4
2006	1.2	<u>0</u>	1.8	<u>0</u>	5	9	39	146.6	72.2	15.2	<u>0</u>	18.4	308. 4
2007	21.2	<u>0.2</u>	5	0.4	3	46.4	64.6	110.4	48.8	0.8	9.6	4.2	314. 6
2008	5.4	0.6	1.4	<u>0</u>	18	20.8	124. 8	168.4	138.8	16.2	0.2	0.6	495. 2
2009	<u>0.4</u>	2.4	6.4	1.8	21.2	44.2	103. 8	76	54.2	19.4	9.2	6	345
2010	19	14	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	43.6	<u>0</u>	<u>0</u>	76.6
2011	1.6	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	5.8	69.2	65	24.8	4.4	10.6	<u>0</u>	181. 4
2012	<u>1</u>	2	<u>1</u>	10.4	7.4	7.2	97.8	50.8	74.4	3.2	15.2	<u>1</u>	271. 4
2013	9	2.4	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	22.8	181. 6	83.8	76.6	10.2	30.4	15.4	432. 2
2014	1.2	<u>0</u>	1.4	1.2	0.6	9	24.2	101.6	122.2	6	23	4	294. 4
2015	14.8	7	19.8	6.6	<u>1.2</u>	15.8	92.8	22.8	32	37.4	33.8	2.4	286. 4
2016	<u>0</u>	9.4	3	0.2	4.8	19.4	17.2	162.8	69.4	15.2	13.8	23.8	339
2017	8.4	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	8.4



La tabla 7 muestra la precipitación mensual de la estación potabilizadora del 2001-2016, así como también la precipitación acumulada anual de la misma.

Tabla 7. Precipitación Estación Potabilizadora. Datos JCAS, 2017.

PRECIPITACIÓN (MM) DE LA ESTACION POTABILIZADORA													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	P.A. cum. Anual
2001	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	7.6	2	10.7	2.8	23.1
2002	<u>0</u>	17	0.4	0.6	28.4	33.8	134	39.8	16.6	36.8	0.8	0.2	308.4
2003	5.2	5.8	<u>0</u>	1	7	30.6	35	51.6	73.2	87.4	<u>0</u>	<u>0</u>	296.8
2004	28.6	<u>0</u>	67	8.2	7.2	55.8	130.6	90.2	38.4	73	62.4	5.6	567
2005	19	8	2.4	<u>0</u>	0.2	<u>0</u>	29	71	61.8	73.4	<u>0</u>	7.6	272.4
2006	2.2	0.4	<u>0</u>	<u>0</u>	4.2	10.4	52.4	148.8	72.8	12.8	0	12.4	316.4
2007	25.6	<u>0</u>	3.2	0.4	40.2	2.8	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	76.8
2008													
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010													
2011													
2012	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	7.6	53.8	48	51.2	2.8	7.8	0.6	171.8
2013	7.2	0.8	<u>0</u>	<u>0</u>	1	27.2	122.8	63.6	71.4	8.4	27.8	5.6	335.8
2014	<u>0</u>	<u>0</u>	0.6	<u>0</u>	<u>0</u>	1.4	6.6	16.8	160	7	25.2	8.8	226.4
2015	13.4	5.8	14.8	5.8	0.6	14.4	87.6	17.2	29.2	36.2	23.6	<u>0.2</u>	248.8
2016	<u>0</u>	0.2	3.2	13.4	<u>0</u>	66.4	32	150.6	70	13.2	<u>0</u>	<u>0</u>	349



Tabla 8. Precipitación Estación Protección Civil. Datos JCAS, 2017.

PRECIPITACIÓN (MM) DE LA ESTACIÓN PROTECCIÓN CIVIL													
Año	Ene ro	Febr ero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septie mbre	Oct ubre	Novie mbre	Dicie mbre	P.Ac um. Anua l
2010	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	1.2	1.2
2011	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u> <u>0.2</u>	0
2012	0.8	1.6	0.6	4.8	8.8	2.8	79.2	20.6	66.8	3.2	13.4		202.8
2013	6.2	2	<u>0</u>	<u>0</u>	2.8	14	152.8	45.2	56.8	6.4	25.4	8.8	320.4
2014	0.2	0.4	3.2	<u>0</u>	0.6	5.8	12.4	66.8	148	6	26.6	2	272
2015	17. 8	7.6	22.4	8	5.2	11.2	91	35.4	24	34.6	29.4	<u>1</u>	287.6
2016	<u>0</u>	0.6	5.8	26 8.4	14.2	41	49.4	165.8	69.2	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	614.4

Tabla 9. Precipitación Estación La Mesa. Datos Conagua, 2017.

PRECIPITACIÓN (MM) DE LA ESTACIÓN LA MESA													
Año	Ene ro	Febr ero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos to	Sept iem bre	Octubr e	Novi embr e	Dicie mbre	P. Acu m. Anua l
2001	9.5 2	4.02	<u>1.02</u>	22.5 2	22.5 5	5.55	52.0 8	61.5 5	27.0 5	3.01	2.54	4.02	215. 43
2002	<u>0.0 0</u>	16.5 1	<u>0.00</u>	4.02	25.0 1	43.51	81.5 8	45.5 3	25.0 0	42.55	3.52	0.01	287. 24
2003	2.3 2	76.4 5	2.19	0.01	8.02	10.57	61.0 4	79.5 9	5.51	28.62	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	274. 32
2004	31. 52	6.01	63.0 2	1.01	16.0 0	64.50	43.7 3	29.0 0	9.10	20.00	61.0 0	<u>0.00</u>	344. 89
2005	11. 00	8.00	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	28.0 0	2.00	23.0 0	44.0 0	35.0 0	68.01	<u>0.00</u>	12.0 0	231. 01
2006	0.0 1	2.00	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	19.23	52.0 9	139. 53	41.5 1	35.01	<u>0.00</u>	16.0 1	305. 39
2007	42. 04	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	71.0 0	52.53	19.0 3	71.0 2	102. 04	<u>0.00</u>	9.00	4.02	370. 68



2008	3.0 1	<u>0.00</u>	4.00	<u>0.00</u>	20.0 0	17.02	115.05	72.0 4	44.0 2	13.00	0.01	<u>0.00</u>	288.15
2009	0.0 1	<u>0.00</u>	9.50	0.01	<u>0.00</u>	17.51	28.0 2	66.02	40.0 5	25.01	<u>0.00</u>	21.0 0	207.13
2010	14	16.0 2	<u>0</u>	24.0 2	16.5	33.01	125	15.0 1	84.1 1	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	327.67
2011	2	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	2.01	41.5 3	84.05	5.01	<u>0</u>	13.5	<u>0</u>	148.1
2012	2	1.51	0.01	12.0 2	18.5 2	1.03	85.0 5	35.0 4	114.53	3.02	7.01	<u>0</u>	279.74
2013	11	0.01	<u>0</u>	0.01	8.01	9.02	264	68.5 3	83.0 5	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	443.66
2014	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	0.03	<u>0</u>	45.2 2	74.3 5	127.72	13	25.7 1	0.03	286.06
2015	14.05	14.5 1	24.0 3	9.23	0.01	7.01	65.3	56.1	13.5 1	52.11	34.6 2	<u>0</u>	290.48
2016	<u>0</u>	<u>0</u>	2.8	11.9	49.3 1	50.9	52.3	143.95	65.1 4	83.1	9.51	22.8 1	491.72
2017	0.0 1												0.01

Tabla 10. Precipitación Estación Chihuahua. Datos Conagua, 2017.

PRECIPITACIÓN (MM) ESTACIÓN CHIHUAHUA 2010-2017													
Años	Enero	Febr ero	Marz o	Abril	May o	Junio	Julio	Agosto	Septie mbre	Oct ubre	Novi e mbre	Dici emb re	Pre. Acu m Anu al
2001	8.10	3.60	4.10	29.2	9.60	20.3 7	64.40	107.30	6.03	<u>2.70</u>	9.81	4.00	269. 21
2002	<u>0.00</u>	27.7 0	<u>0.00</u>	5.10	16.2 0	55.5 0	151.10	151.10	33.60	53.6 0	1.20	0.10	495. 2
2003	5.70	9.60	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	16.1 0	28.6 3	79.61	45.51	85.22	71.8 0	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	342. 17
2004	40.10	<u>1.90</u>	53.2 1	11.0 2	2.70	65.2 0	140.01	80.80	125.5 0	50.0 1	66.8 0	2.90	640. 15



2005	14.3	15.9	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	90.0 0	<u>0.00</u>	67.60	103.1 0	61.90	70.4 0	<u>0.00</u>	8.70	431. 9
2006	1.5	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	9.80	21.0 0	43.10	113.9 0	94.00	8.60	<u>0.00</u>	29.6 0	321. 5
2007	28.8	<u>0.00</u>	8.50	<u>0.00</u>	16.8 0	39.3 0	48.60	90.20	44.40	11.8 0	6.90	2.70	298
2008	5.0	0.20	3.10	<u>0.00</u>	19.5 0	12.6 0	150.4 0	152.1 0	107.1 0	38.9 0	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	488. 9
2009	0.03	<u>0.00</u>	17.7 0	1.10	18.1 4	51.5 4	64.44	58.22	55.53	31.3 1	11.2 1	7.01	316. 23
2010	21.3	17.2 1	<u>0</u>	12.1 2	17.5 1	28.6 3	244.9 1	48.42	95.31	0.01	<u>0</u>	2.7	488. 12
2011	1	0.01	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	1.81	66.22	76.8	3.43	19.1	12	0.01	180. 38
2012	1	2.04	0.32	8.22	15.6 1	5.8	152	34.84	107.7 2	4.41	12.7 2	<u>0.1</u>	344. 78
2013	8.8	3.3	<u>0</u>	1.1	5.7	27.1	248.9 2	53.1	156.3 7	10.7 2	43.4 3	3.41	561. 95
2014	0.01	0.02	2.1	<u>0</u>	1	10.5	27.71	160.4	157.4 1	13.5	23.8 1	2.7	399. 16
2015	22.44	15.0 1	36.1 3	9.1	6	14.3 1	99.1	56	36.13	37.3 1	39.8	<u>1</u>	372. 33
2016	<u>0</u>	0.01	2.11	25	19.7 1	86.4 4	88.56	167.9 3	105.4 1	23.1 2	11.6	33.5	563. 39
2017	0.51												0.51



En la Figura 8 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas, tomadas en cuenta para este estudio.

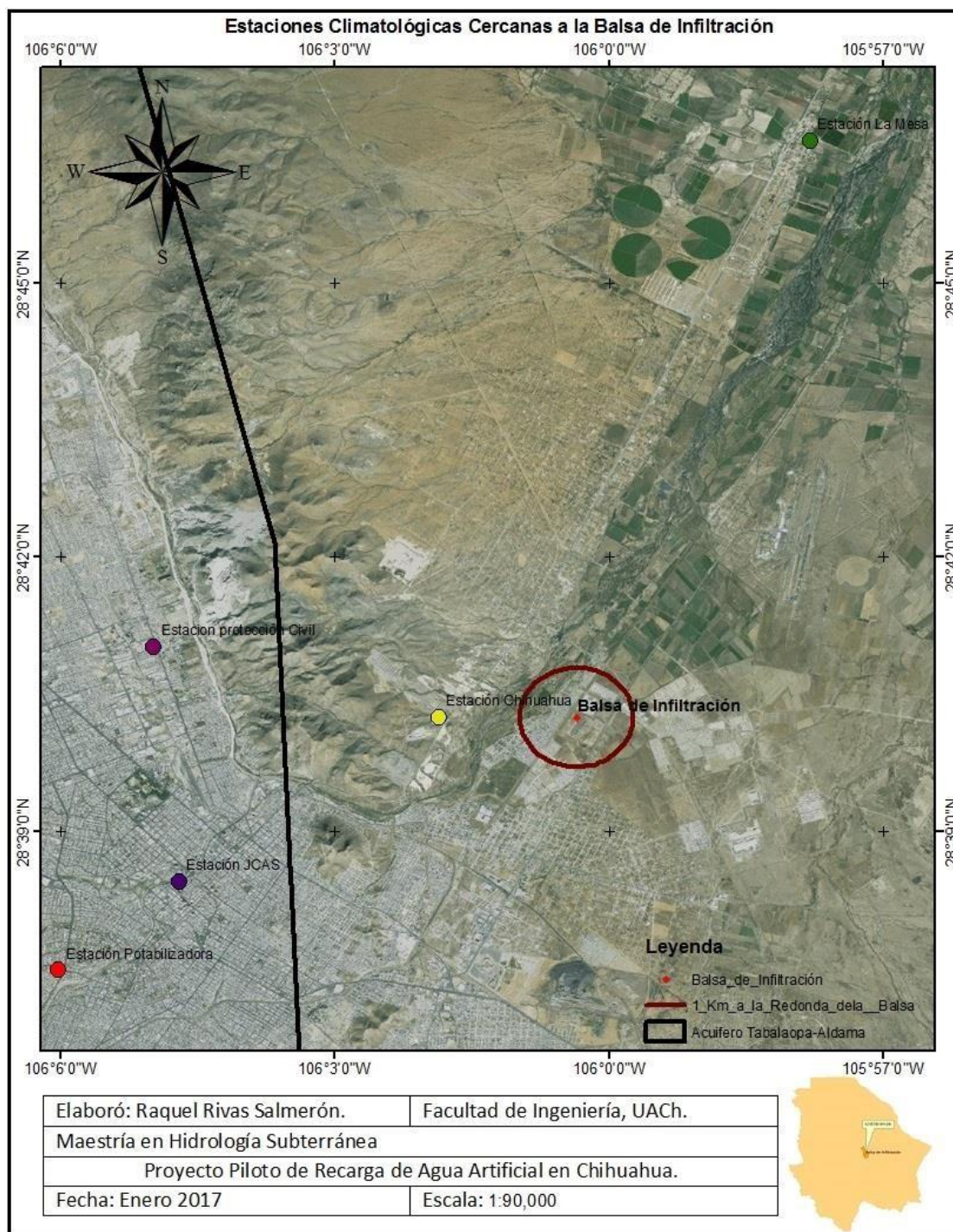


Figura 8. Ubicación de las estaciones meteorológicas.



Utilizando los datos de niveles de agua subterránea, se generan hidrógrafos de cada pozo, mostrados en las figuras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 Y 19.

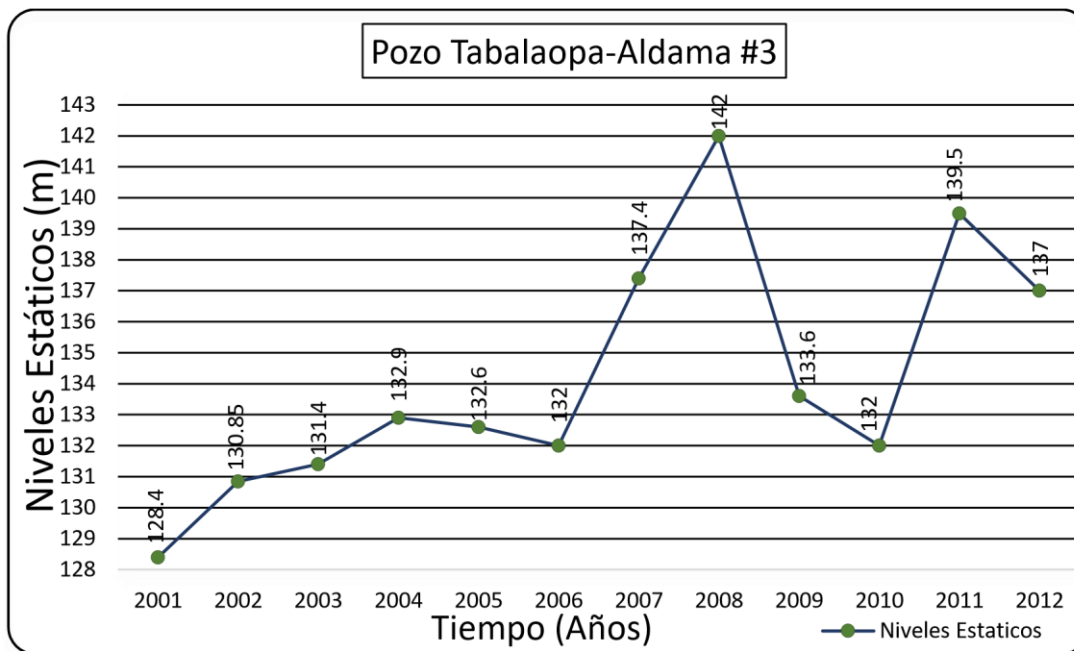


Figura 9. Hidrógrafo del pozo Tabalaopa Aldama #3.

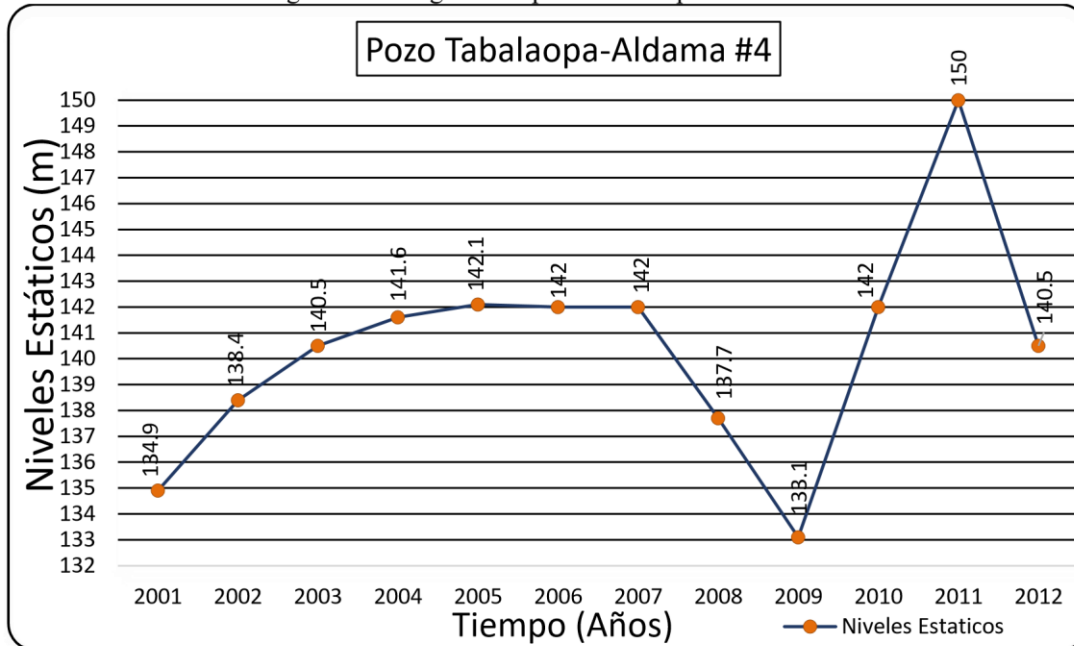


Figura 10. Hidrógrafo del pozo Tabalaopa Aldama #4.

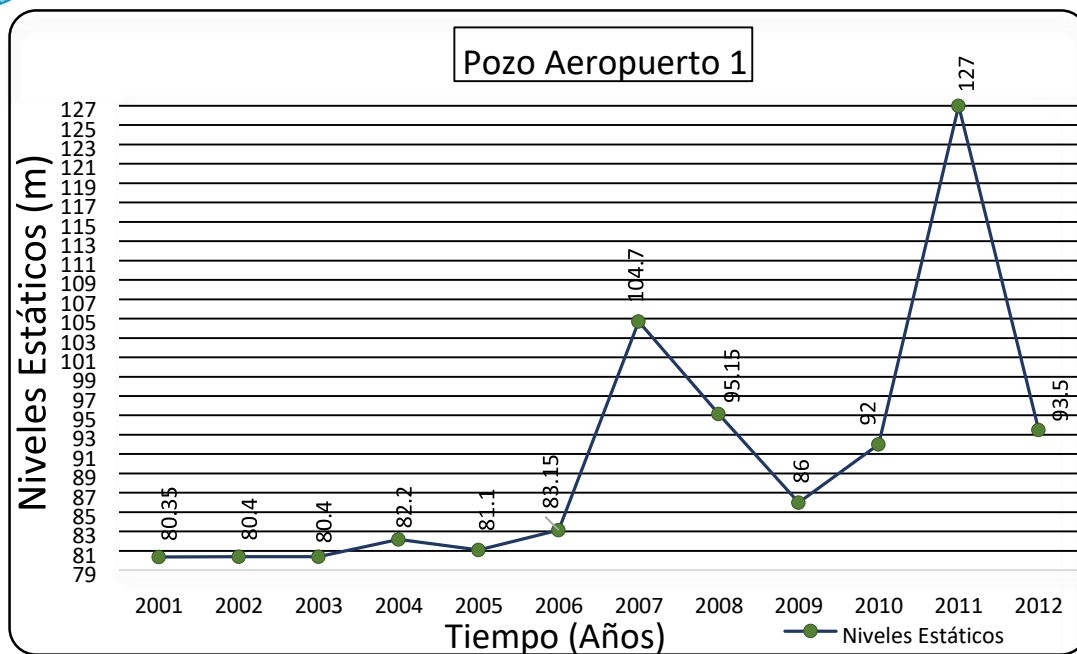


Figura 11. Hidrógrafo del pozo Aeropuerto 1.

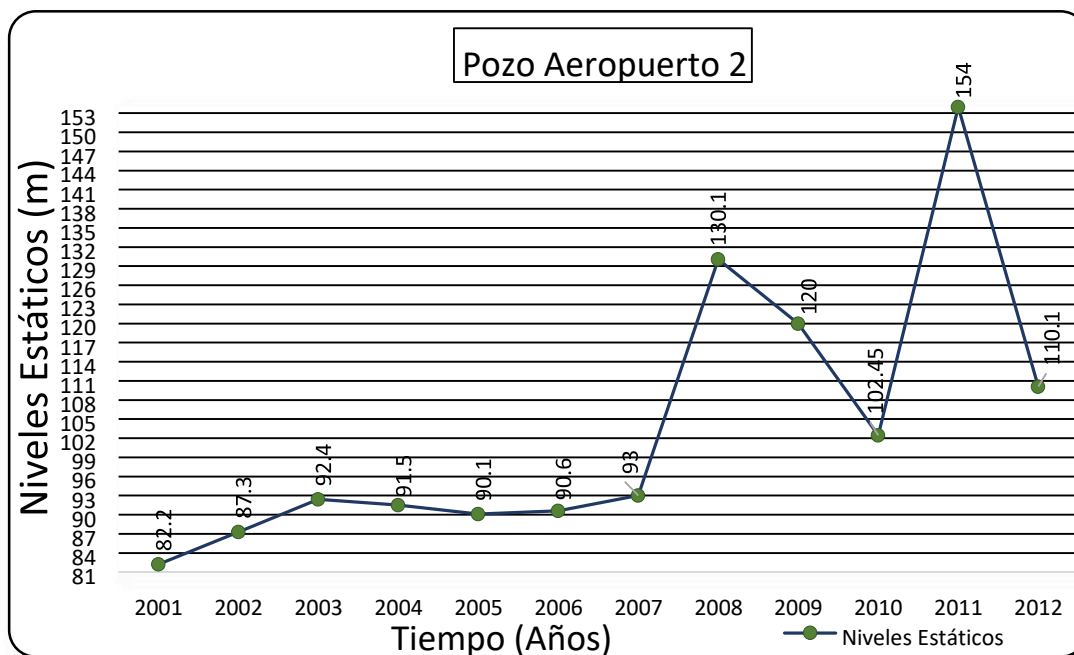


Figura 12. Hidrógrafo del pozo Aeropuerto 2.

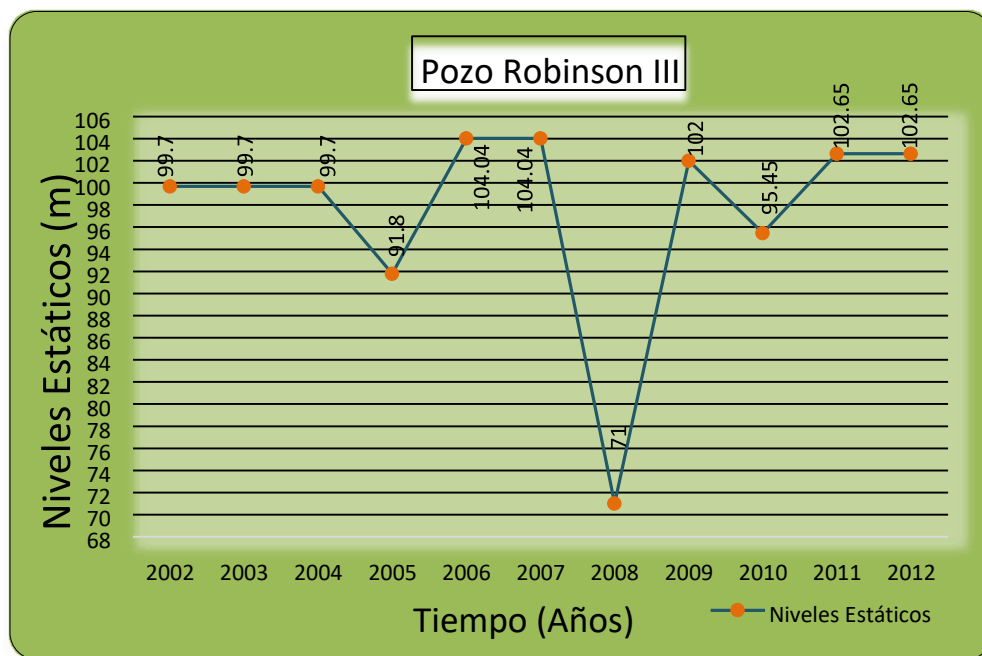


Figura 13. Hidrógrafo del pozo Robinson III.

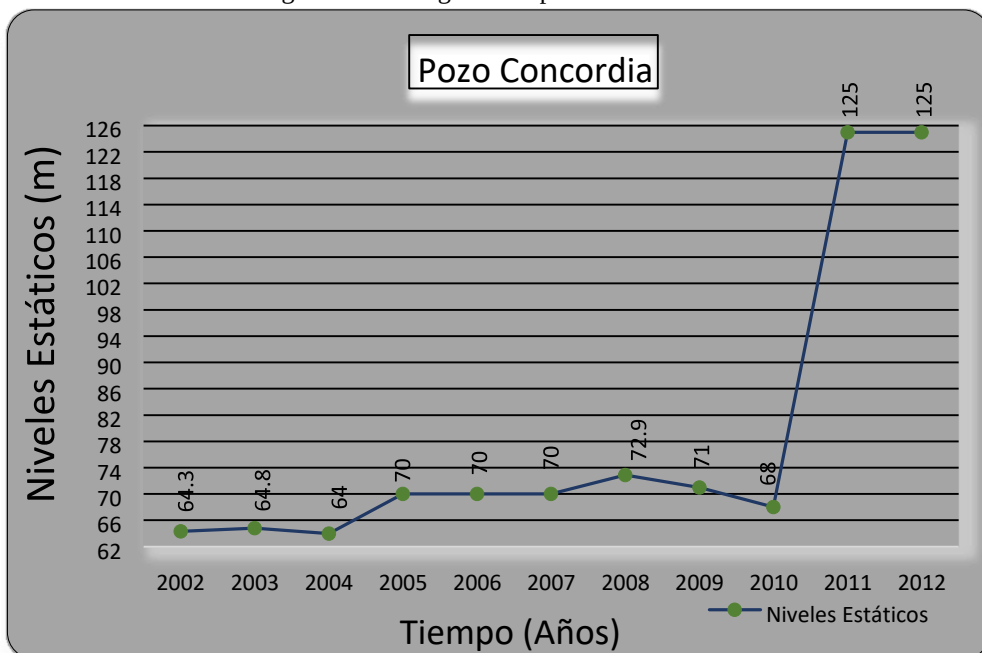


Figura 14. Hidrógrafo del pozo Concordia

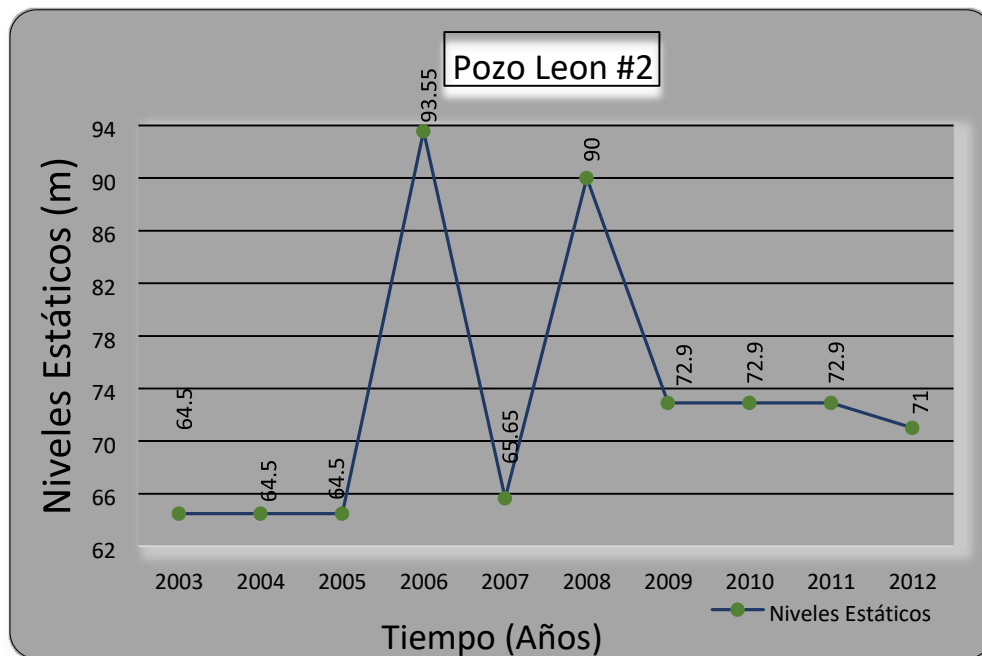


Figura 15. Hidrógrafo del pozo Leon #2.

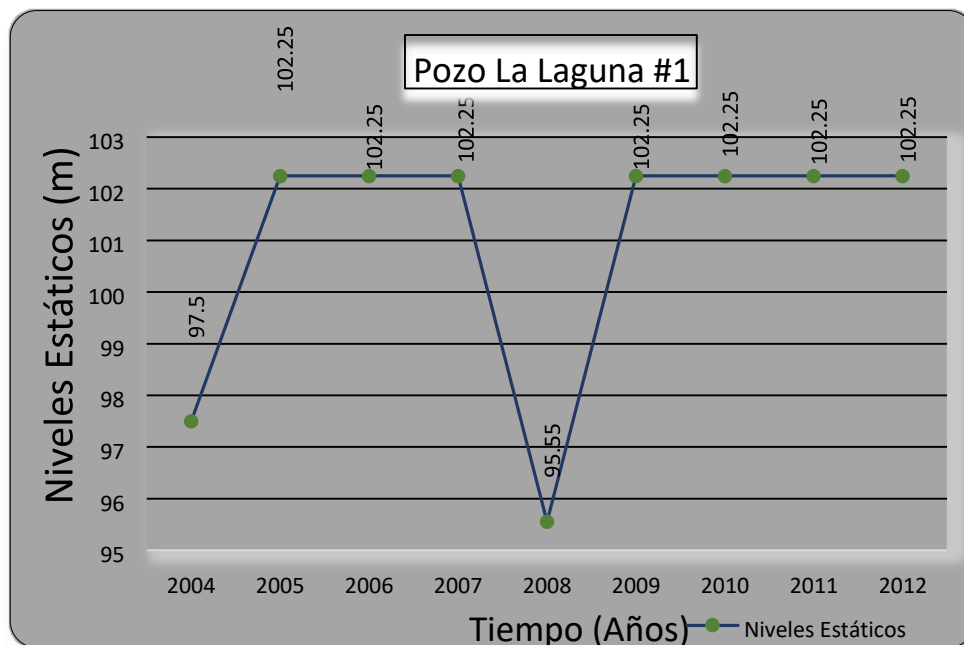


Figura 16. Hidrógrafo del pozo Laguna #1.

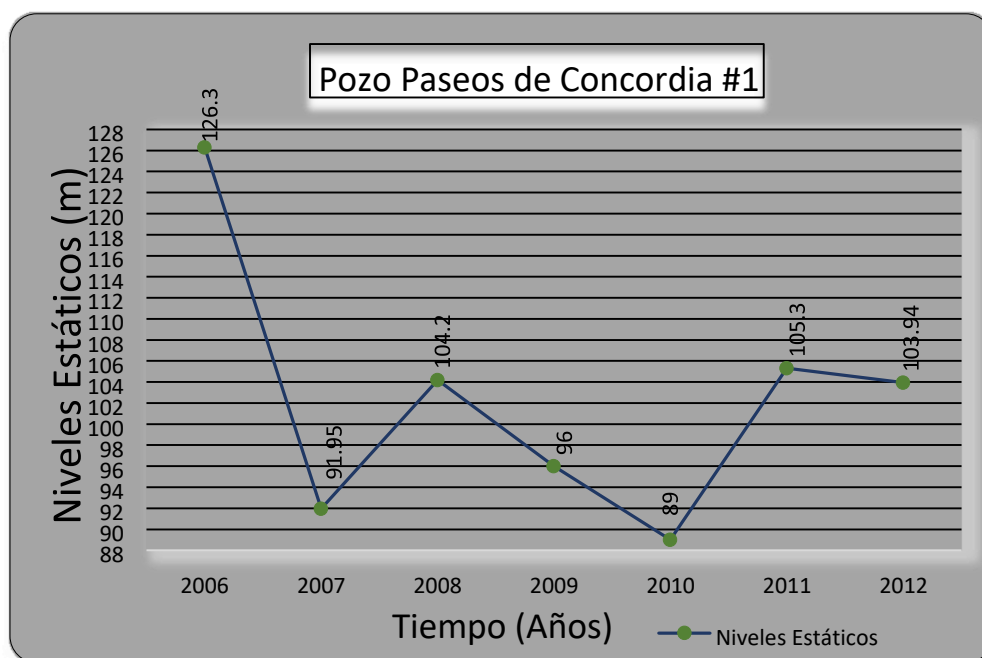


Figura 17. Hidrógrafo del pozo Paseos de Concordia #1

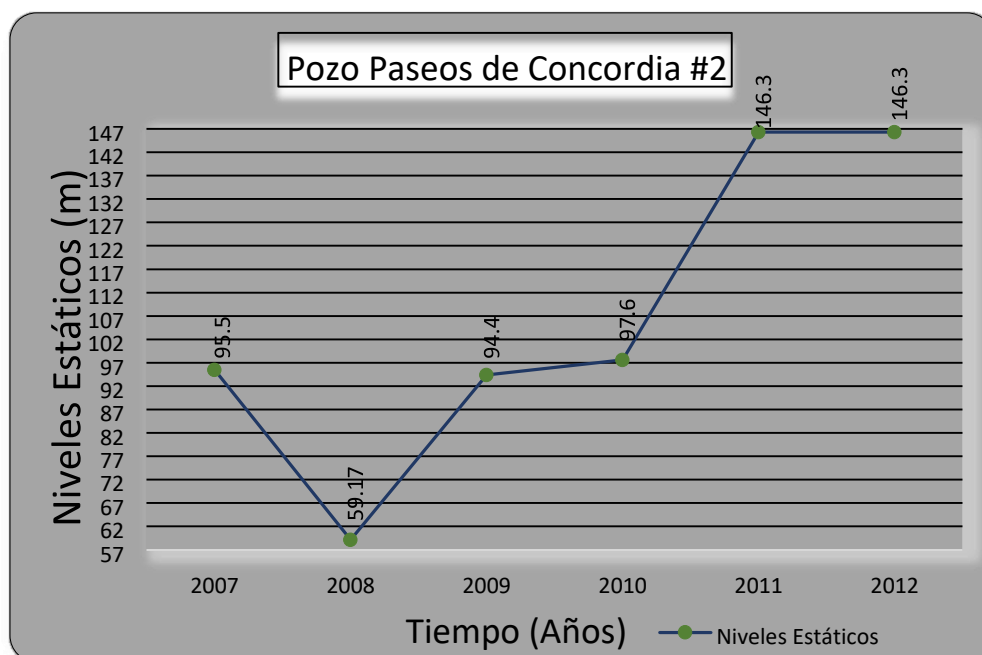


Figura 18. Hidrógrafo del pozo Paseos de Concordia #2.

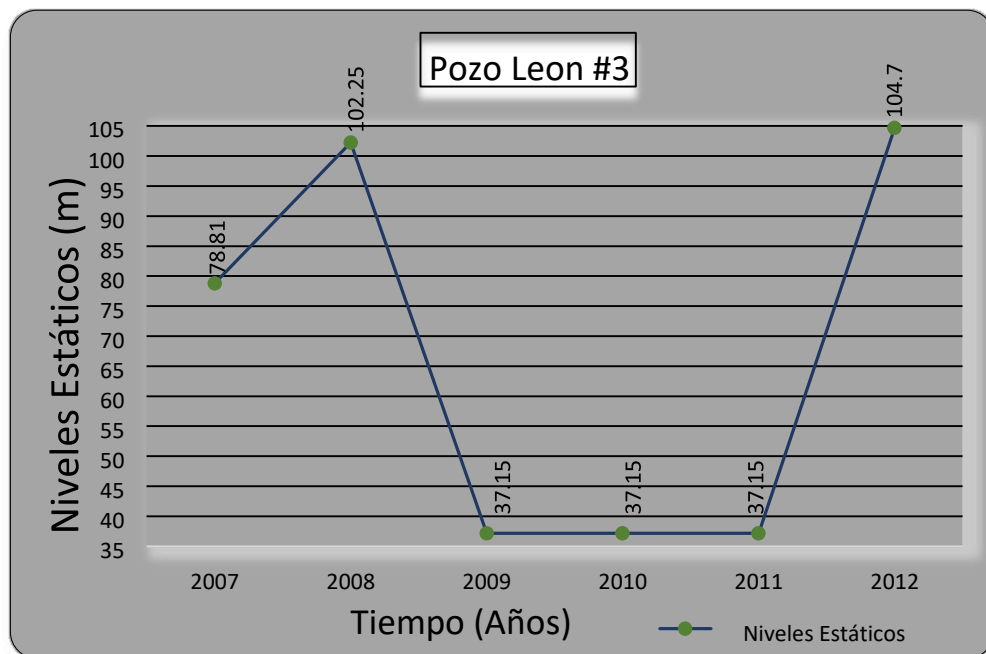


Figura 19. Hidrógrafo del pozo Leon #3.

En la gráfica 20 se muestra la unión de todos los hidrógrafos de los pozos de extracción para observar el comportamiento de los niveles estáticos en una misma área del año 2001 al 2012. De igual manera en la figura 21 se realizó grafico para de los pozos de observación unidos y analizar mejor su comportamiento en el año 2015 y en la figura 22 las medidas de los pozos de observación en el año 2016.

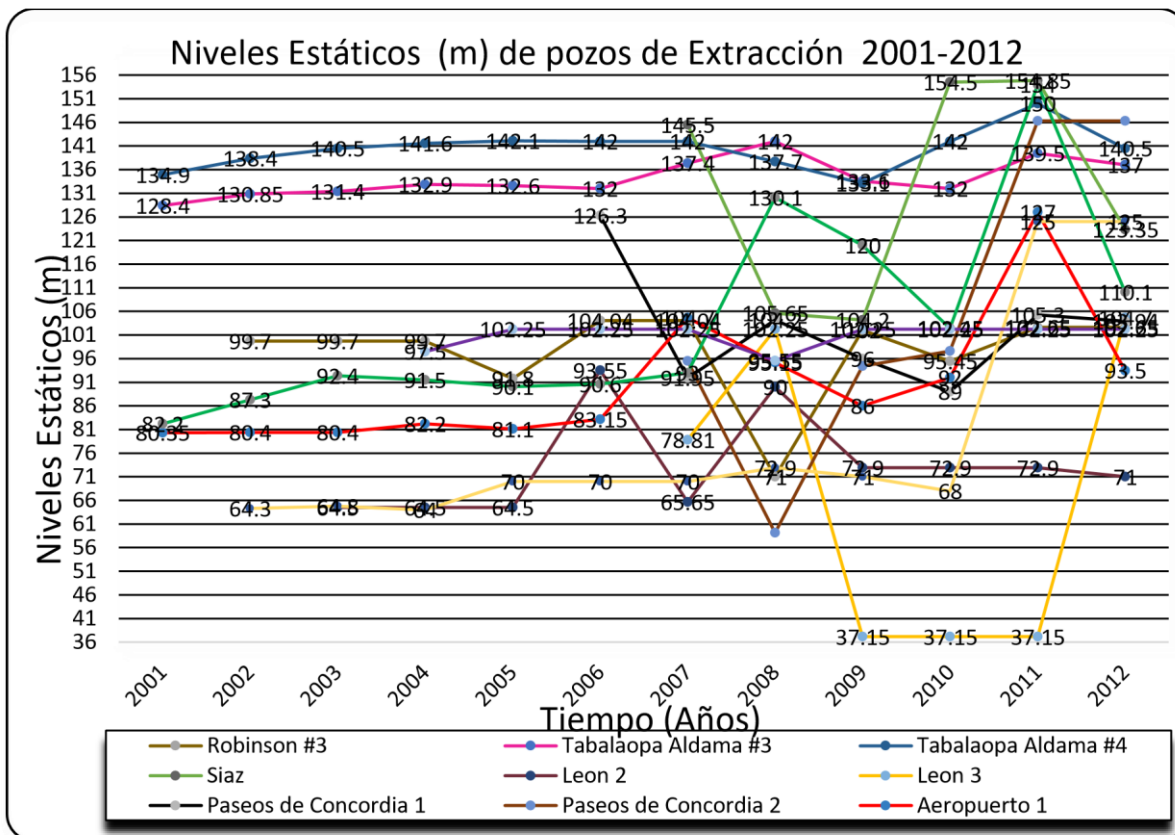


Figura 20. Unión de Hidrógrafos de pozos.

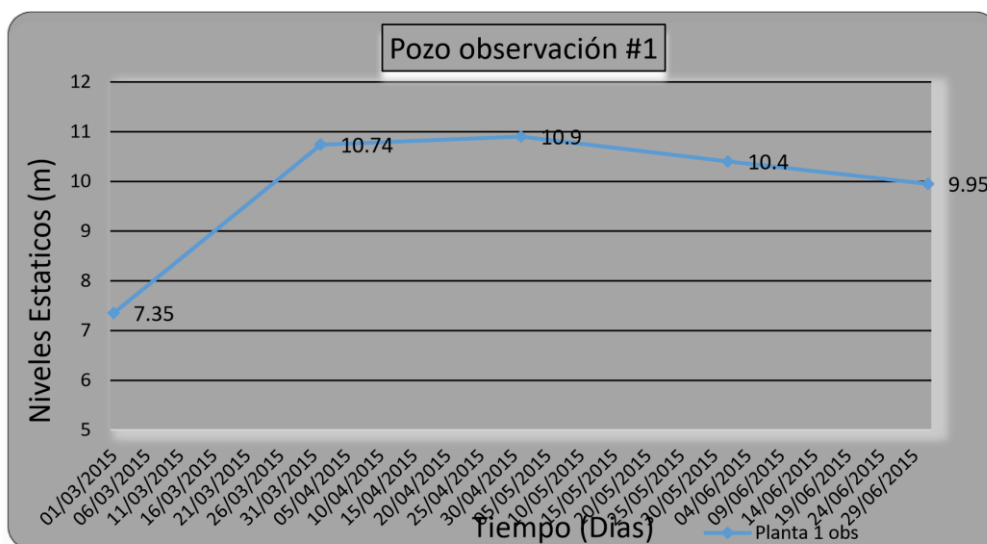


Figura 21(a). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015.

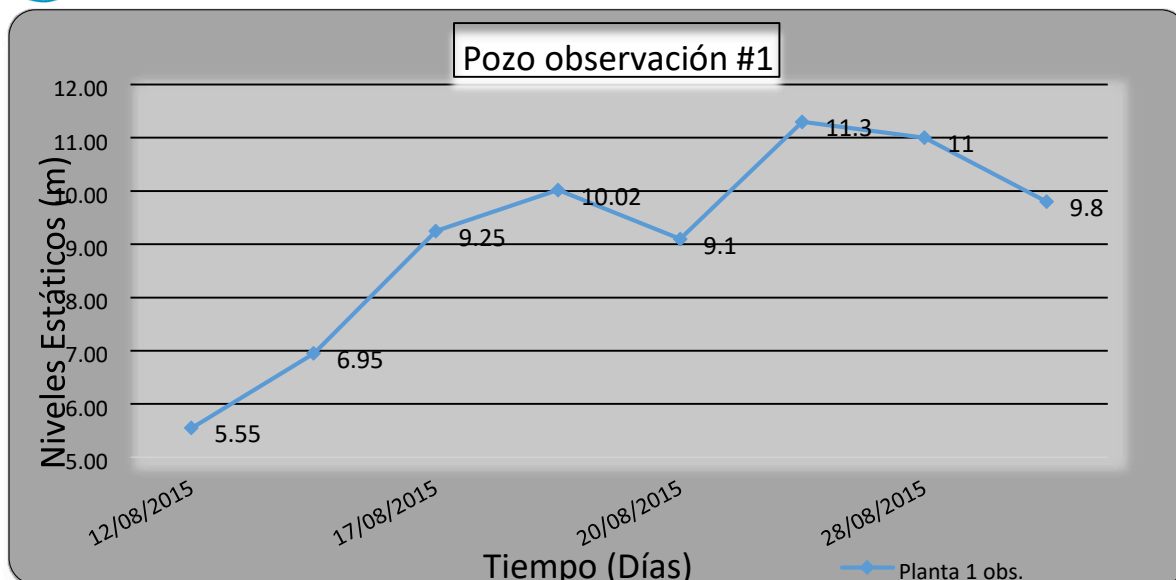


Figura 21(b). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015.

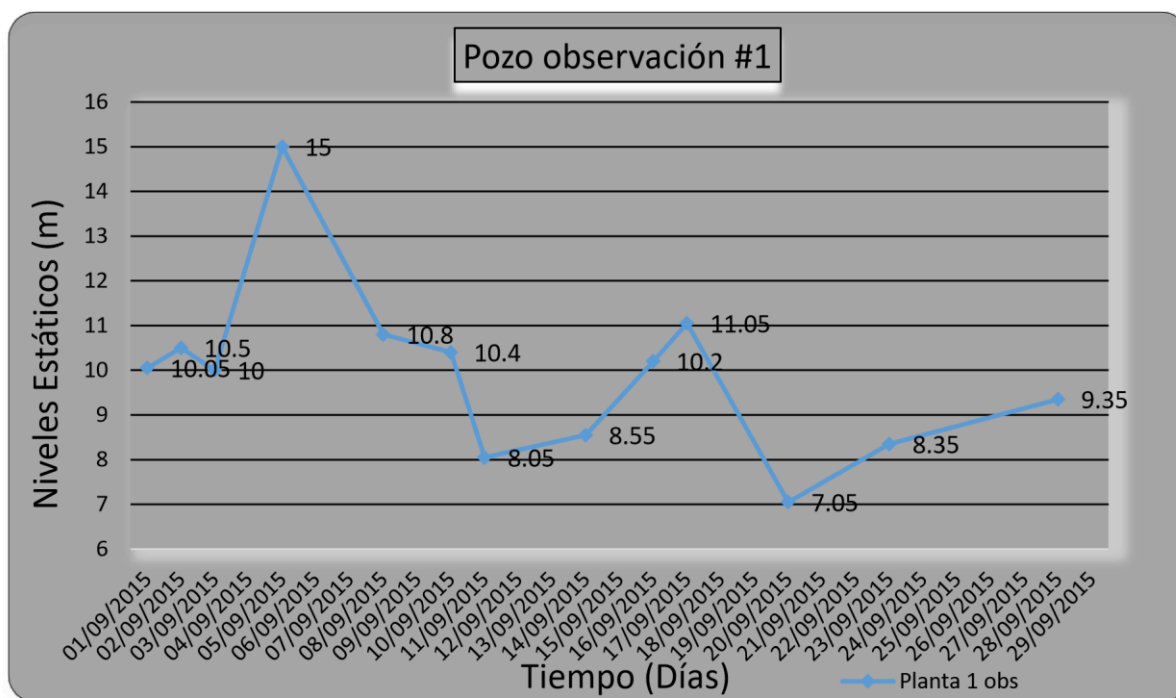


Figura 21(c). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015.

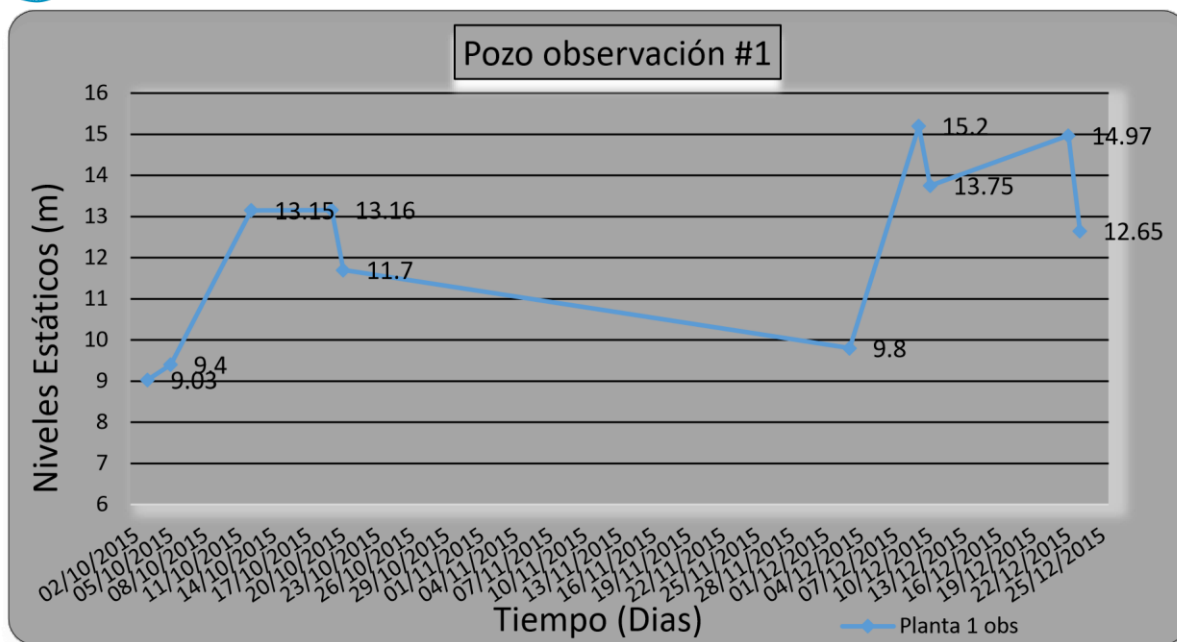


Figura 21(d). Hidrógrafo pozo observación 1, 2015.

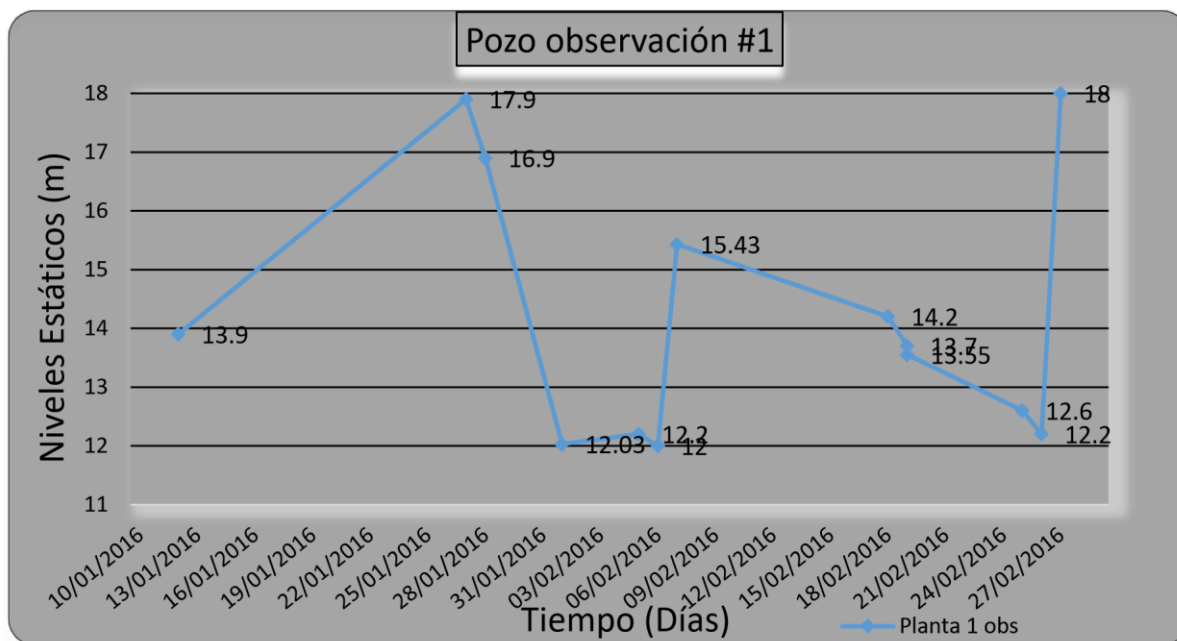


Figura 21(e). Hidrógrafo pozo observación 1, 2016.

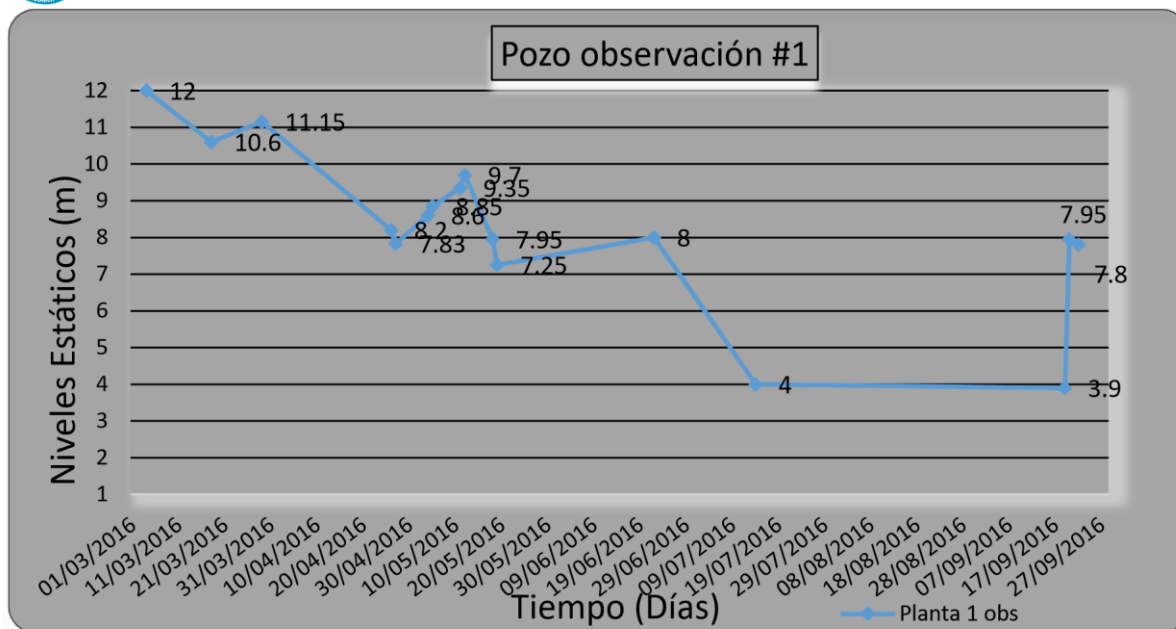


Figura 21(f). Hidrógrafo pozo observación 1, 2016.

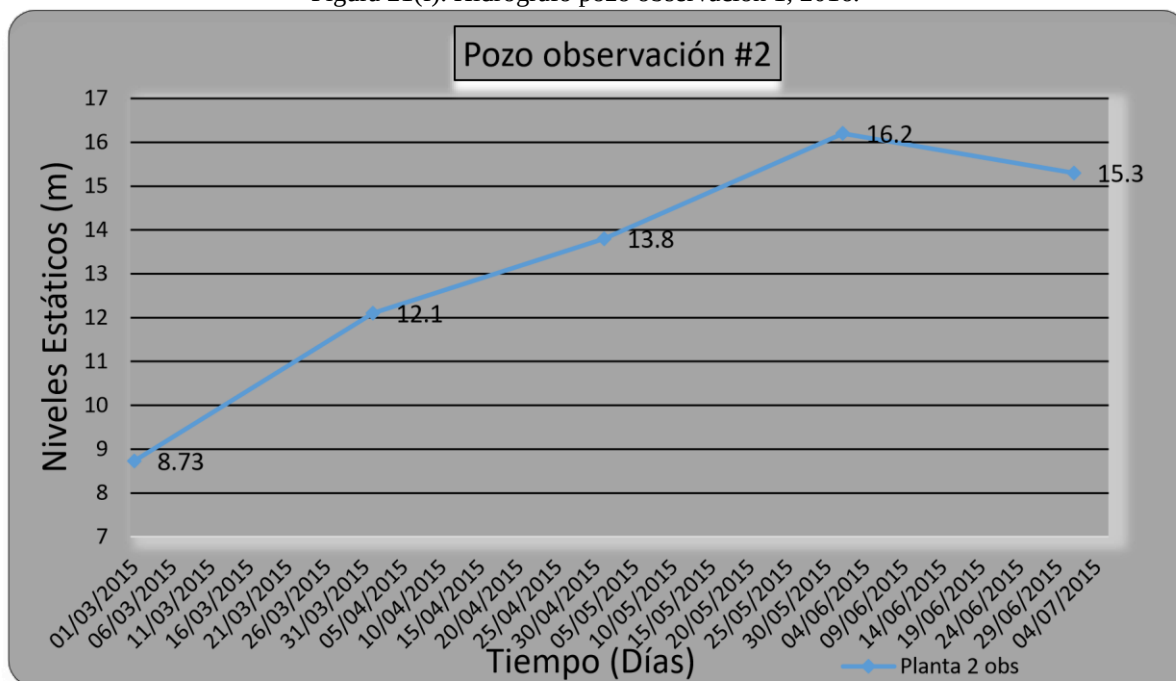


Figura 22(a). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015.

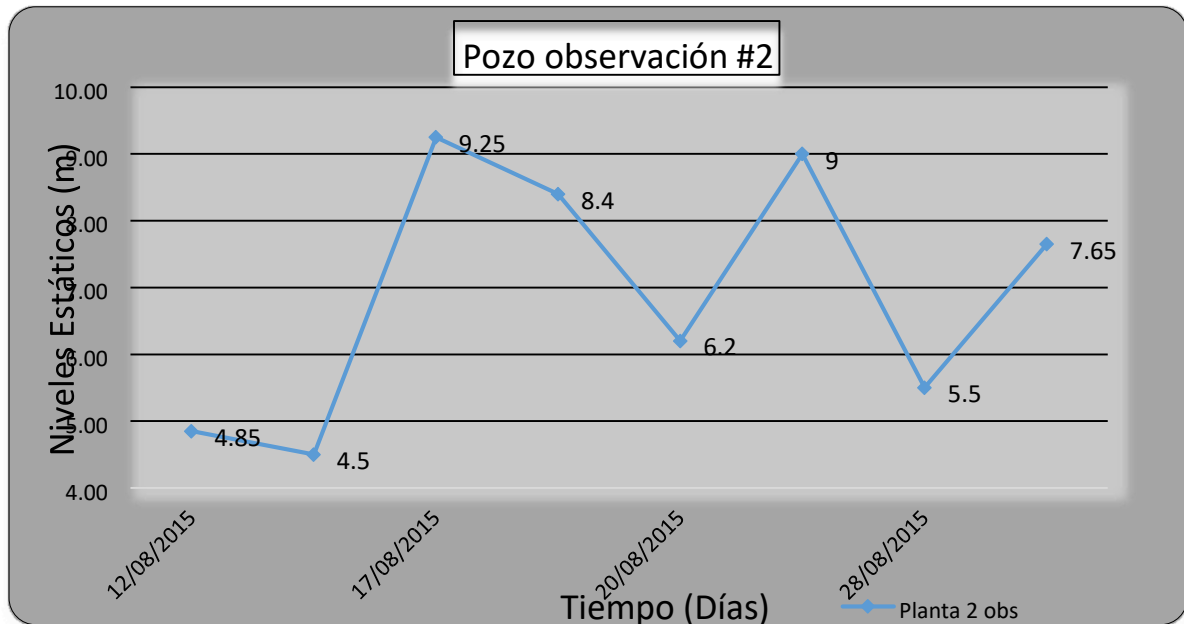


Figura 22(b). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015.

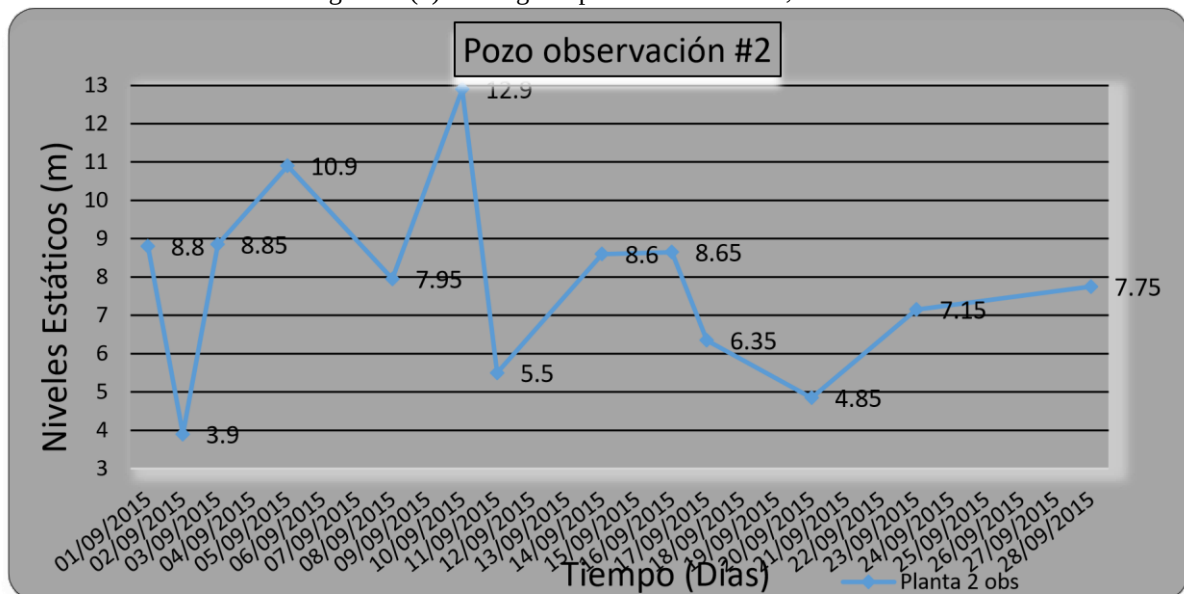


Figura 22(c). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015.

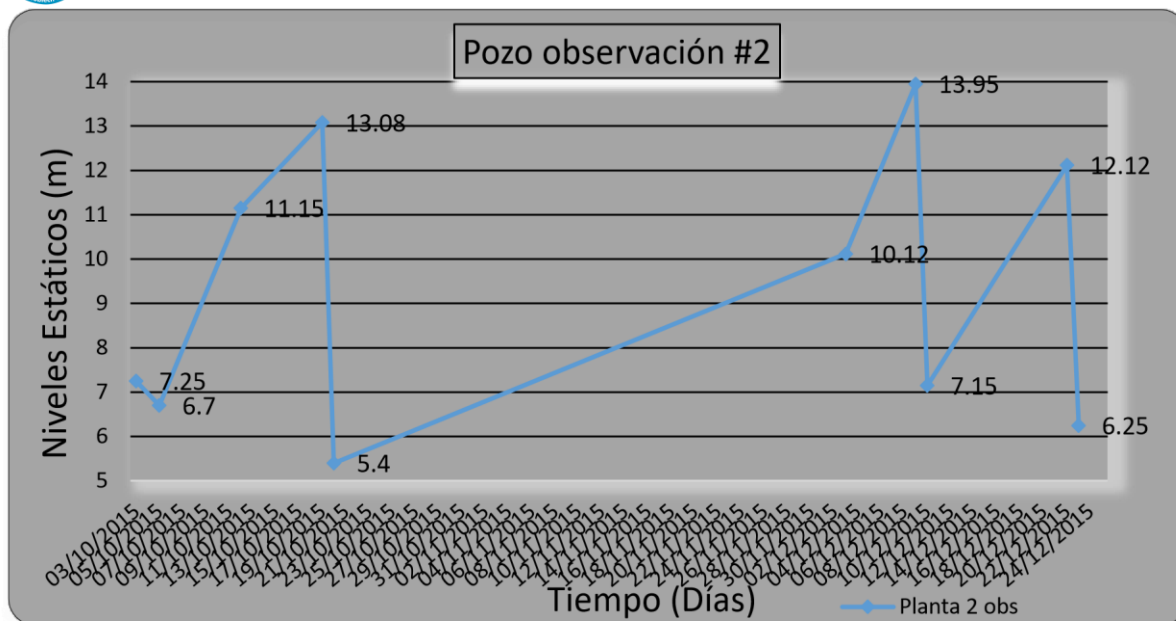


Figura 22(d). Hidrógrafo pozo observación 2, 2015.

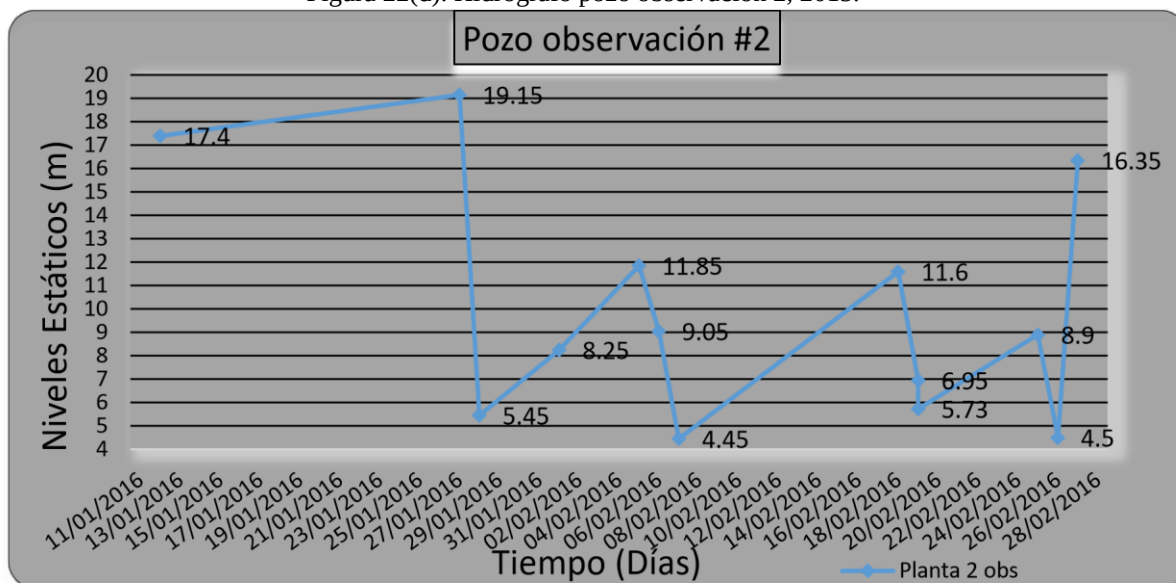


Figura 22(e). Hidrógrafo pozo observación 2, 2016.

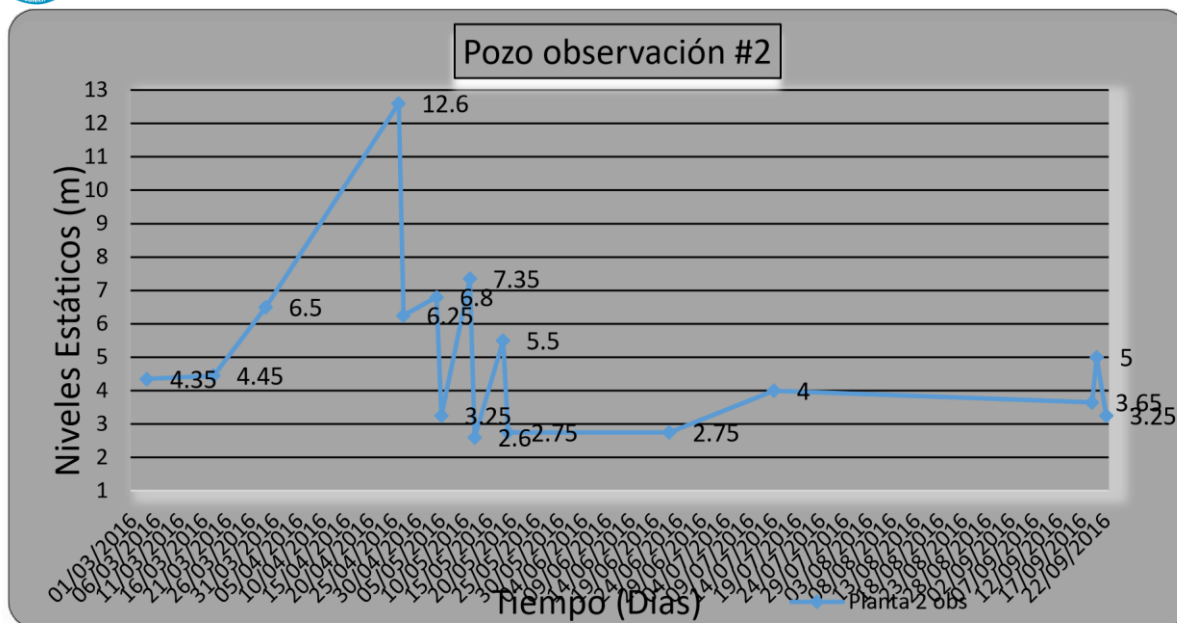


Figura 22(f). Hidrógrafo pozo observación 2, 2016.

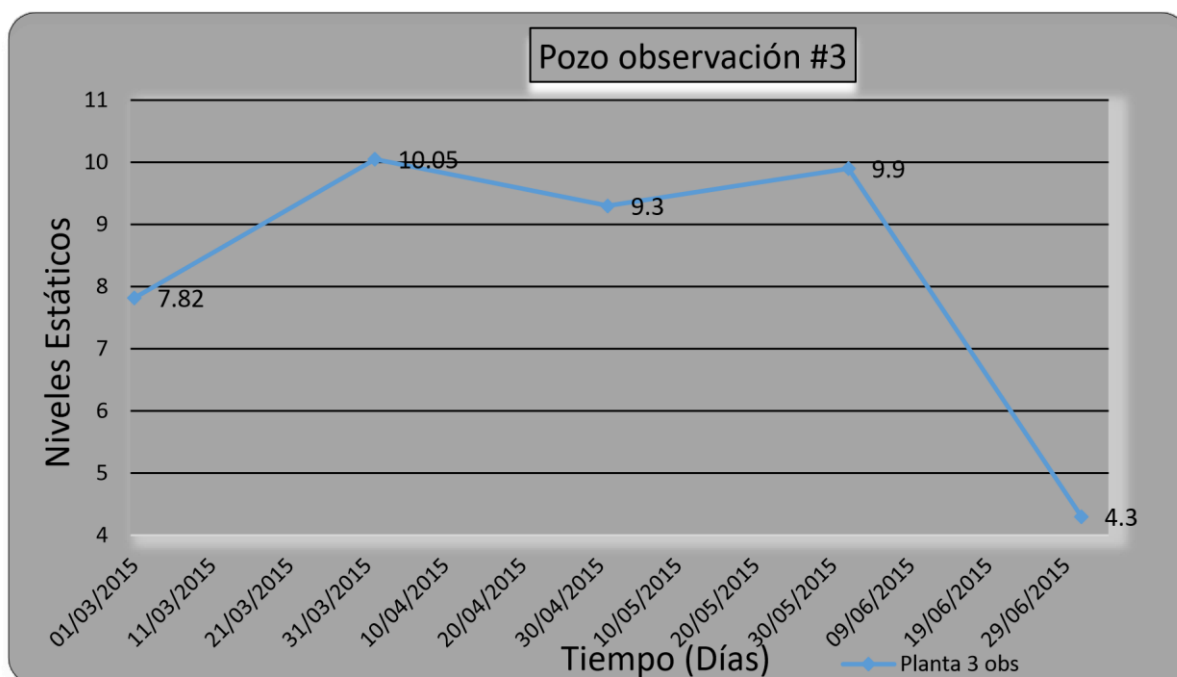


Figura 23 (a). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015.

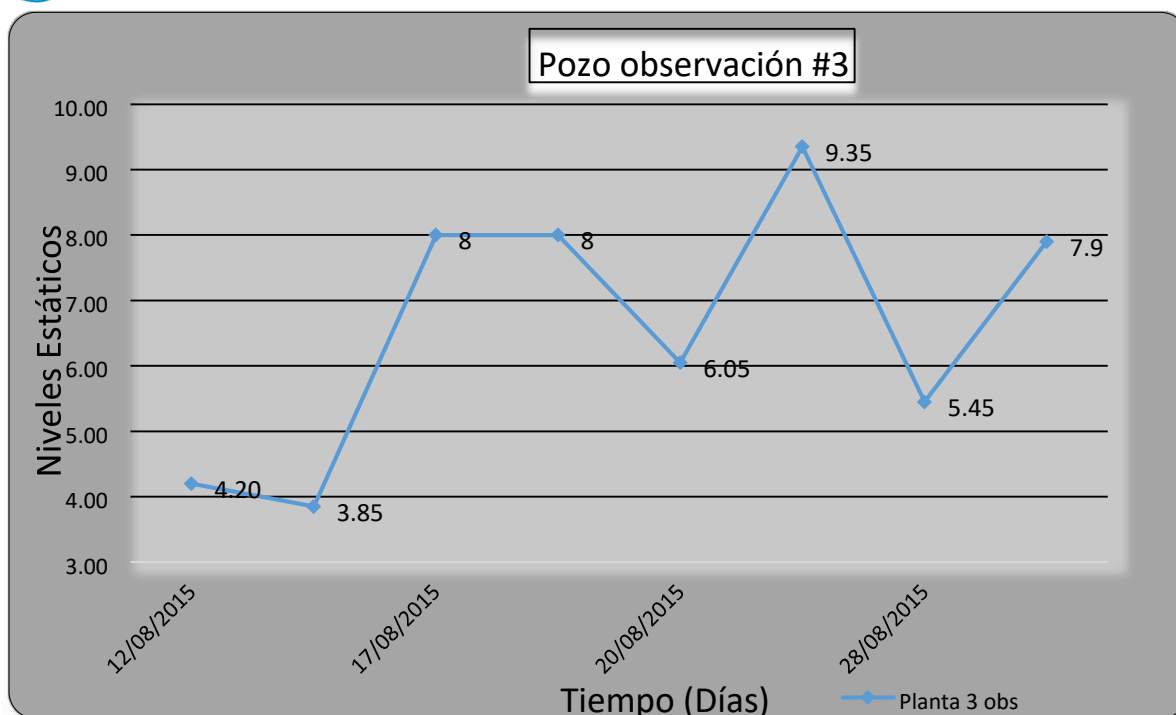


Figura 23 (b). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015.

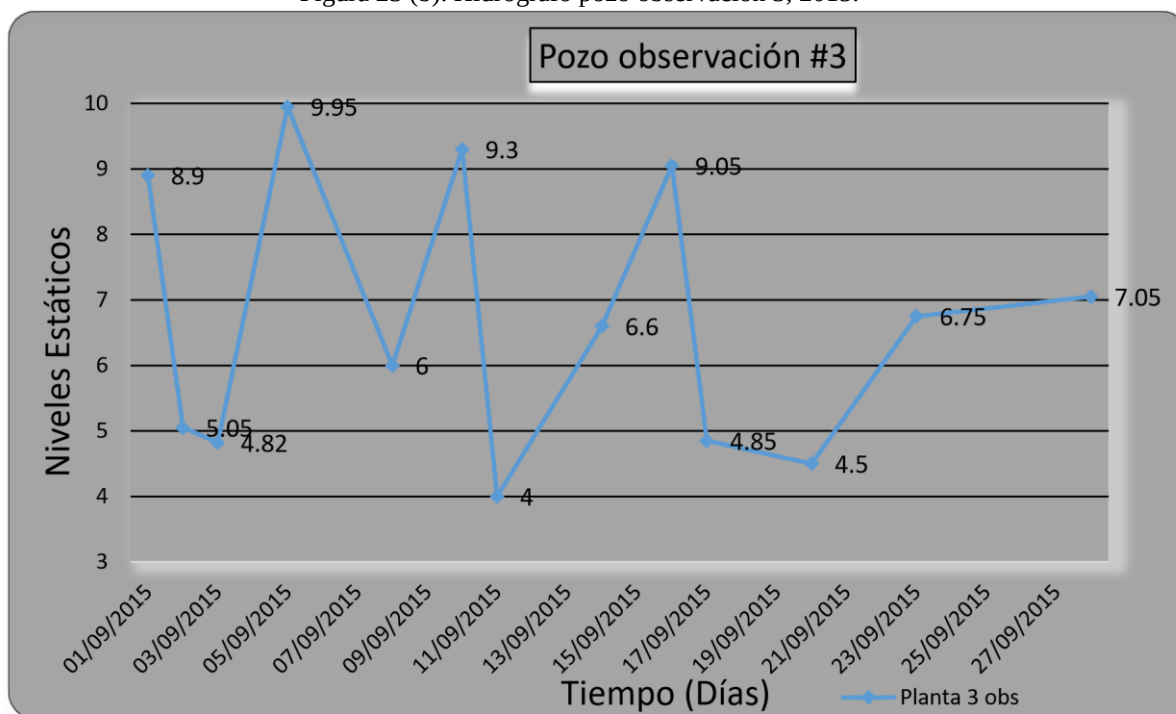


Figura 23 (c). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015.

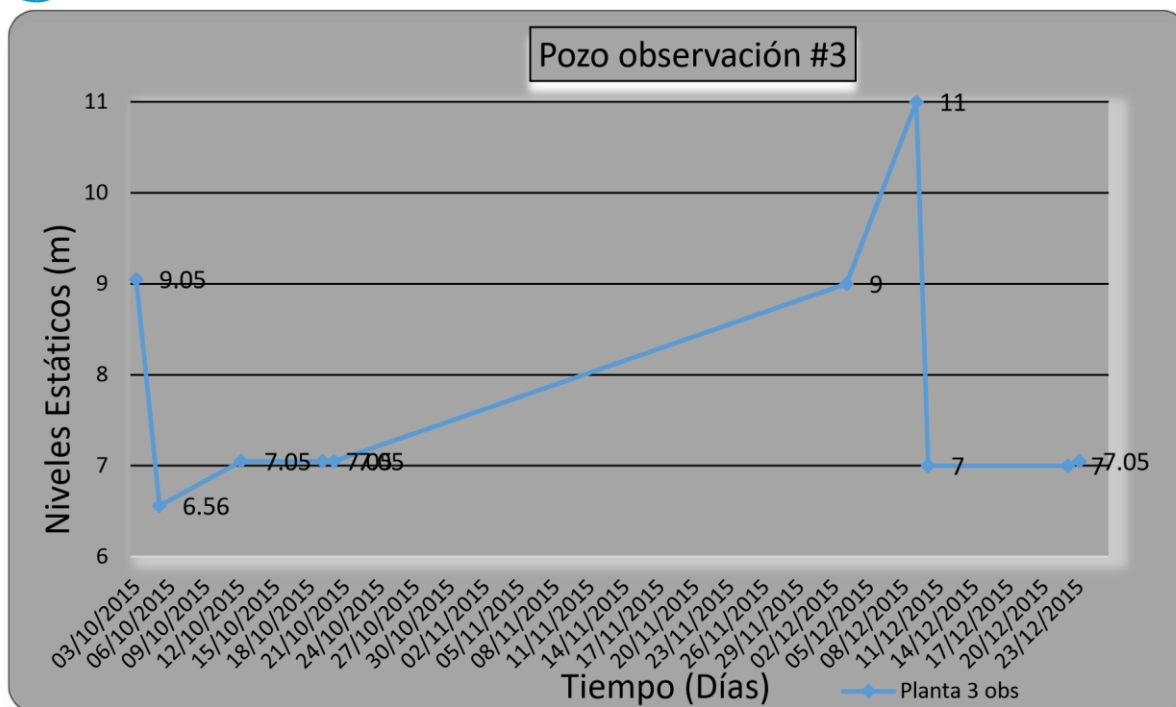


Figura 23 (d). Hidrógrafo pozo observación 3, 2015.

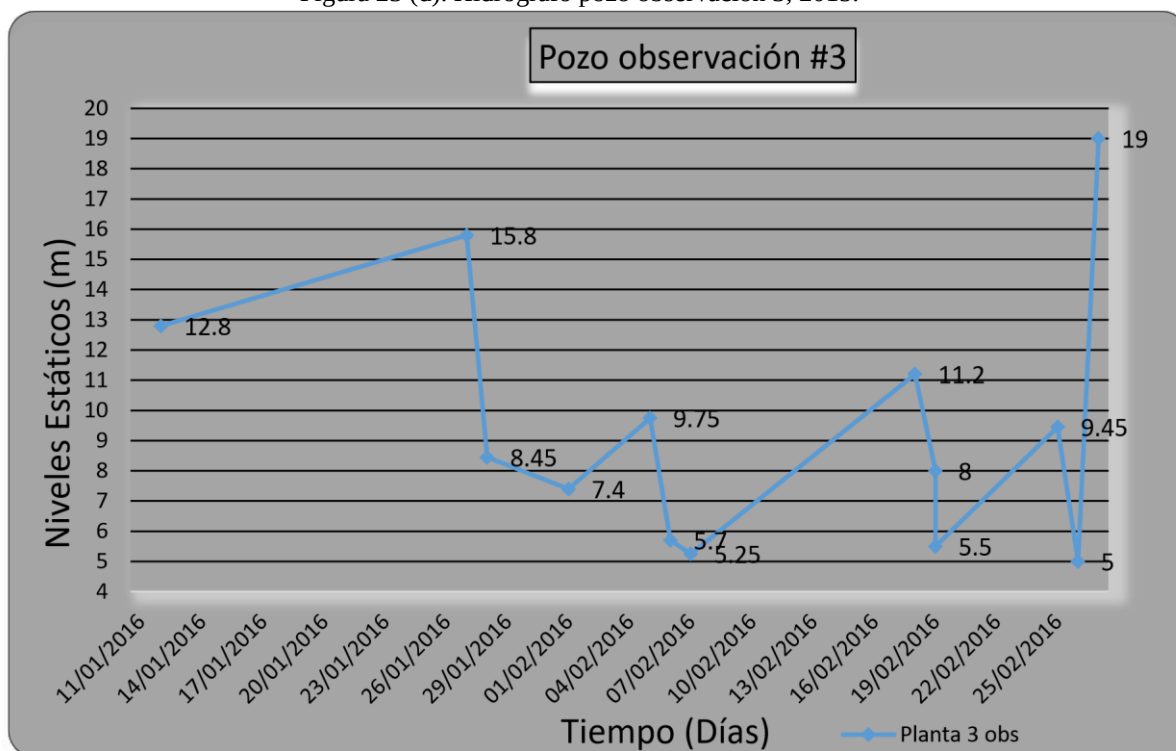


Figura 23 (e). Hidrógrafo pozo observación 3, 2016.

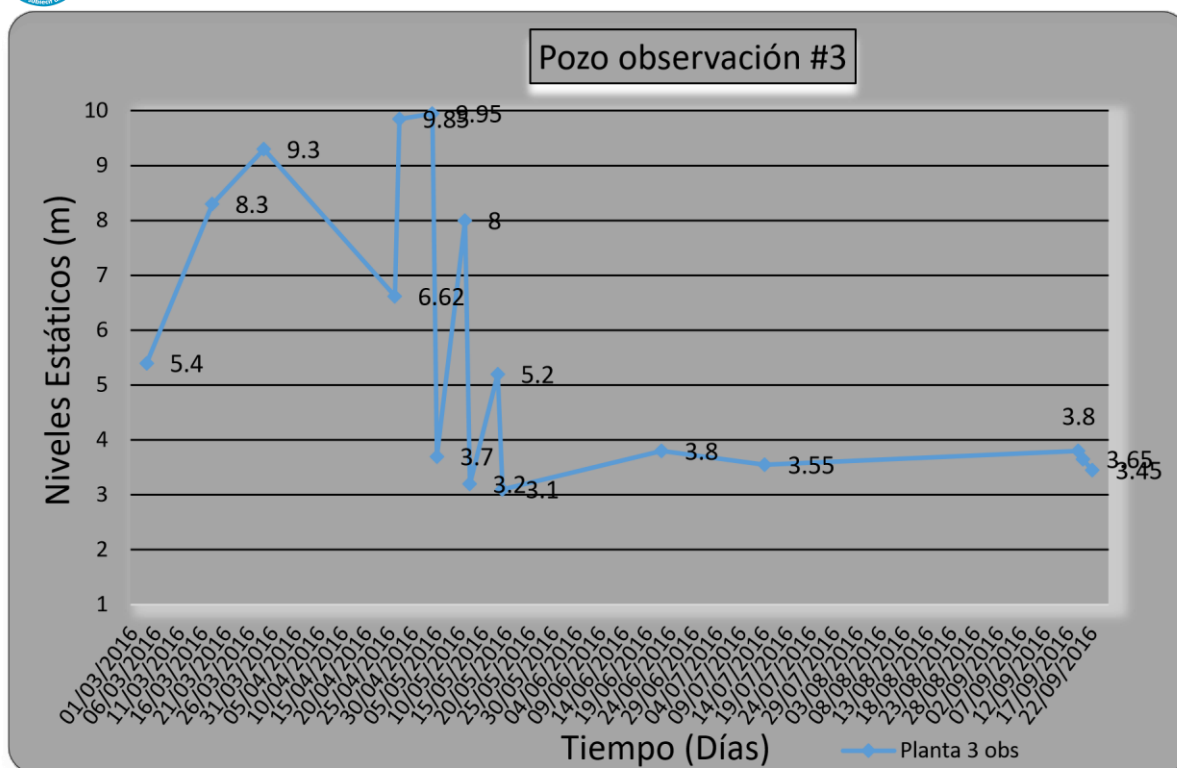


Figura 23 (f). Hidrógrafo pozo observación 3, 2016



La figura 24 muestra la gráfica de hidrógrafos de los pozos de 3 observaciones en el 2015.

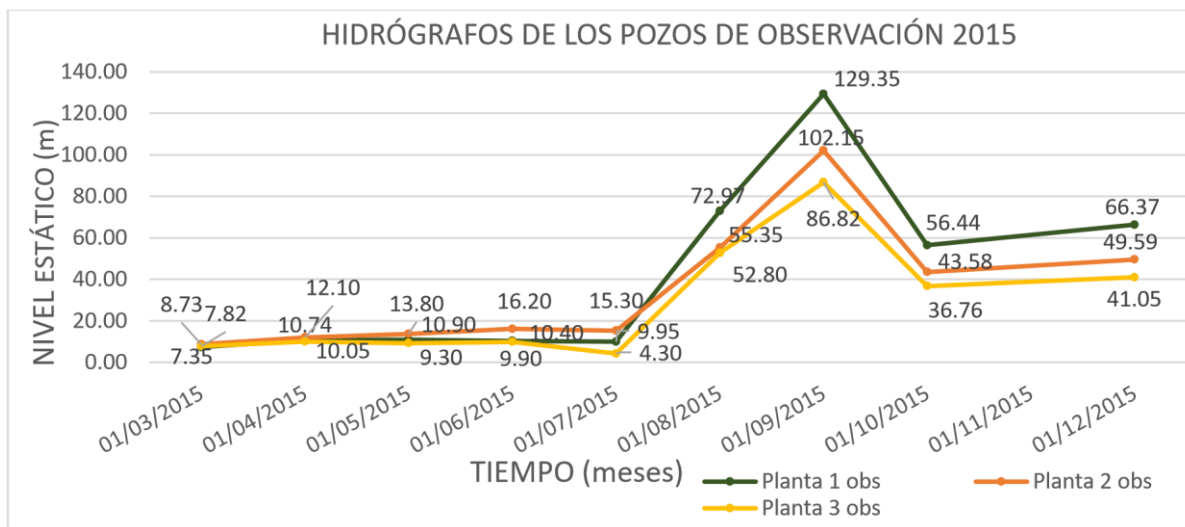


Figura 24. Hidrógrafos de pozos de observación en el 2015.

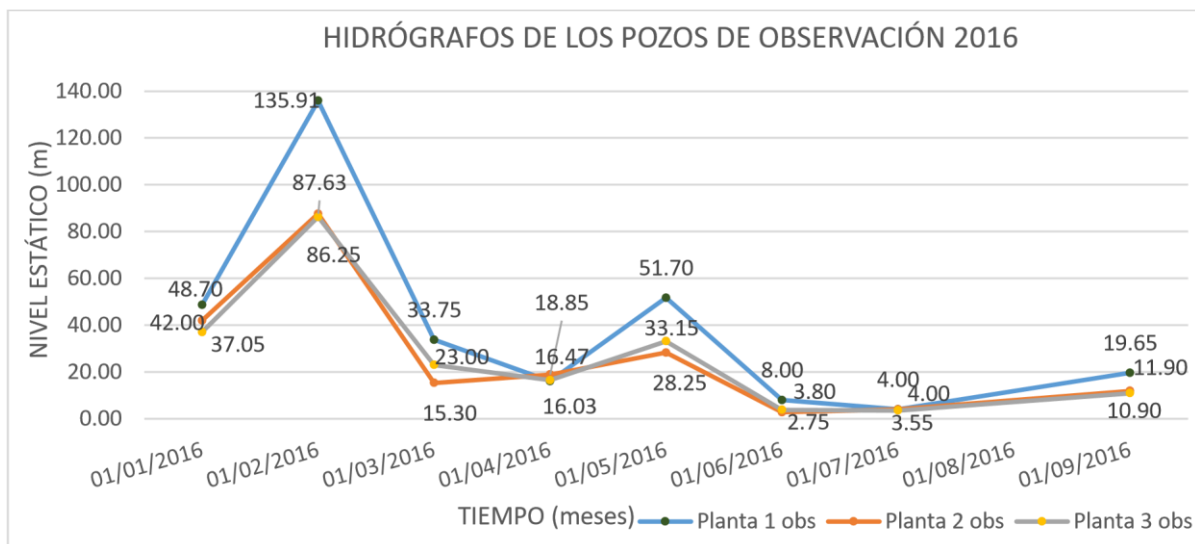


Figura 25. Hidrógrafos de pozos de observación en el 2016.

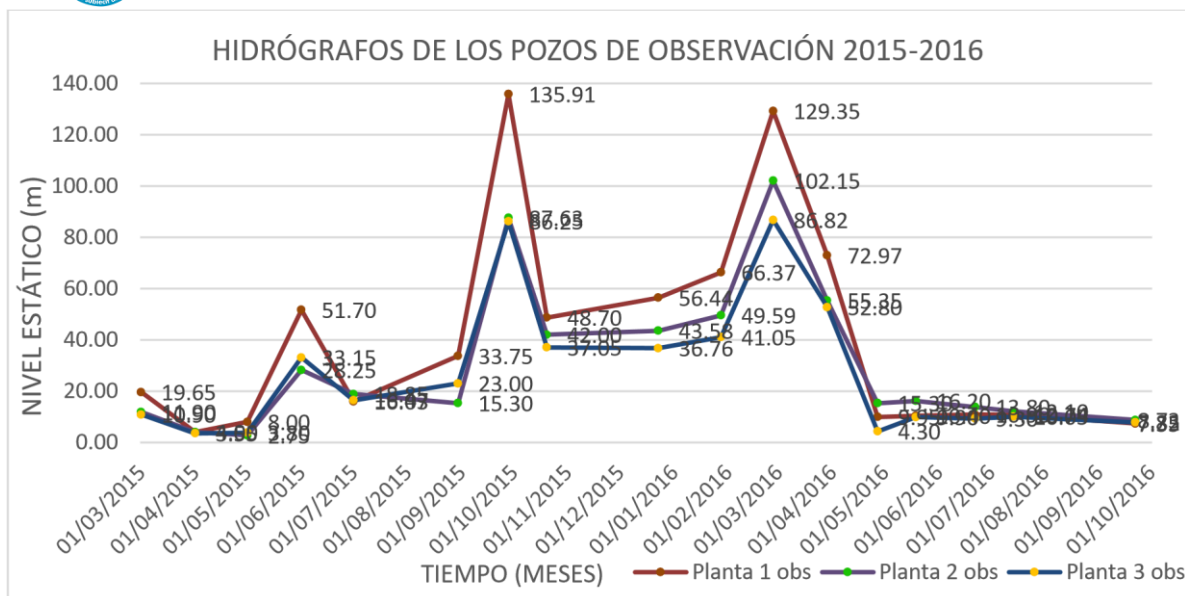


Figura 26. Hidrógrafos de pozos de observación 2015-2016.

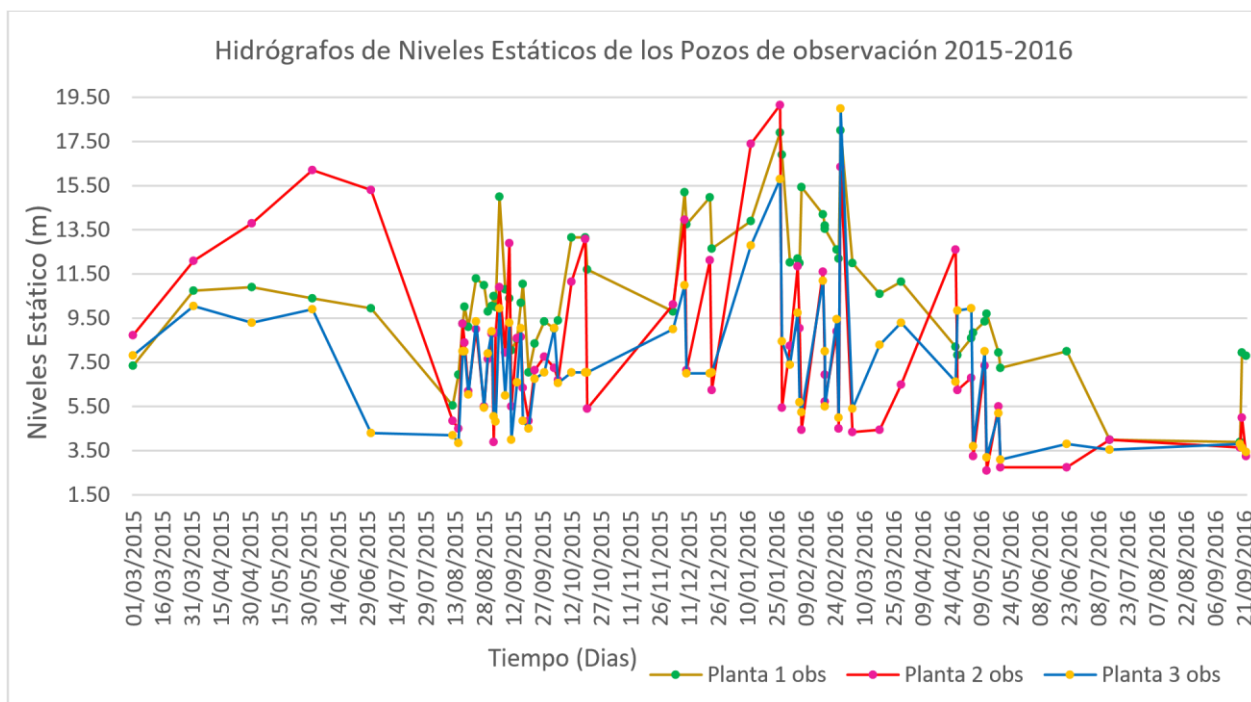


Figura 27. Unión de hidrógrafos de N.E de pozos de observación del 2015-2016.

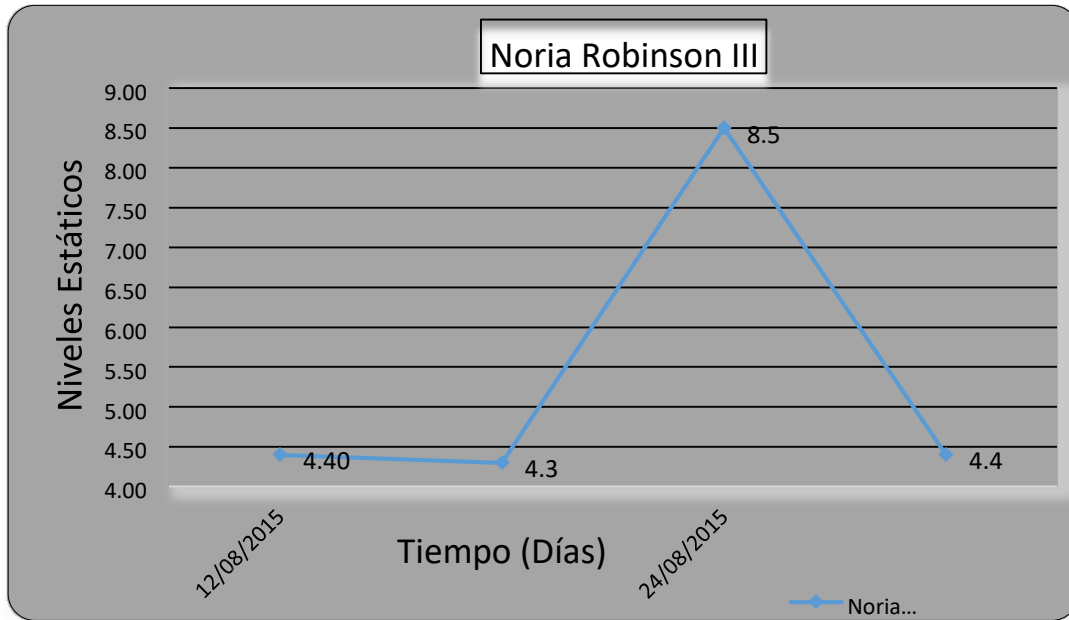


Figura 28. Hidrógrafo de noria Robinson III.

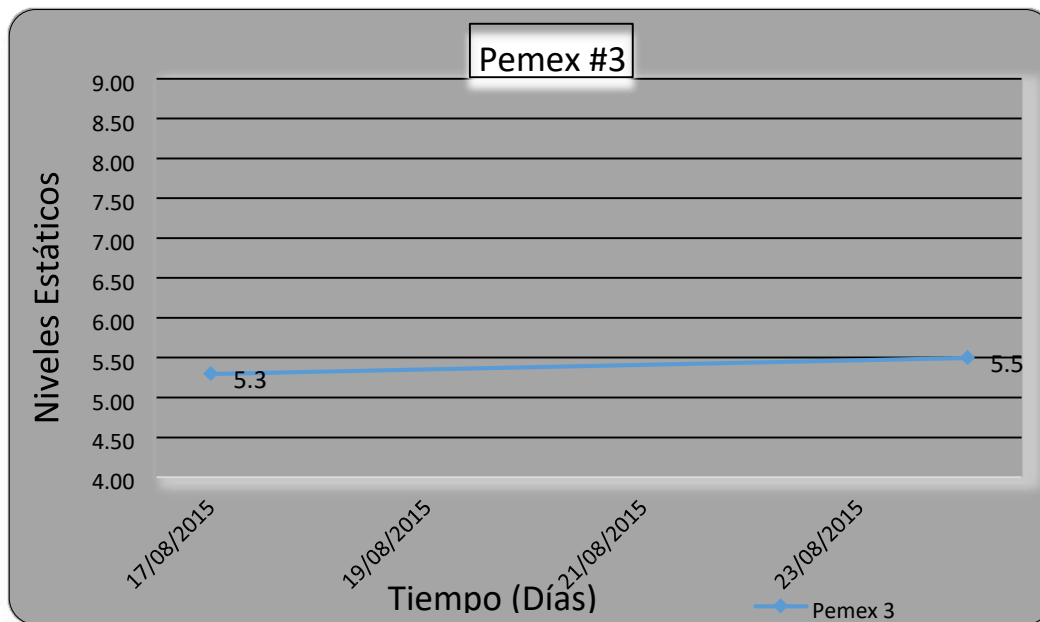


Figura 29. Hidrógrafo de pozo Pemex #3.

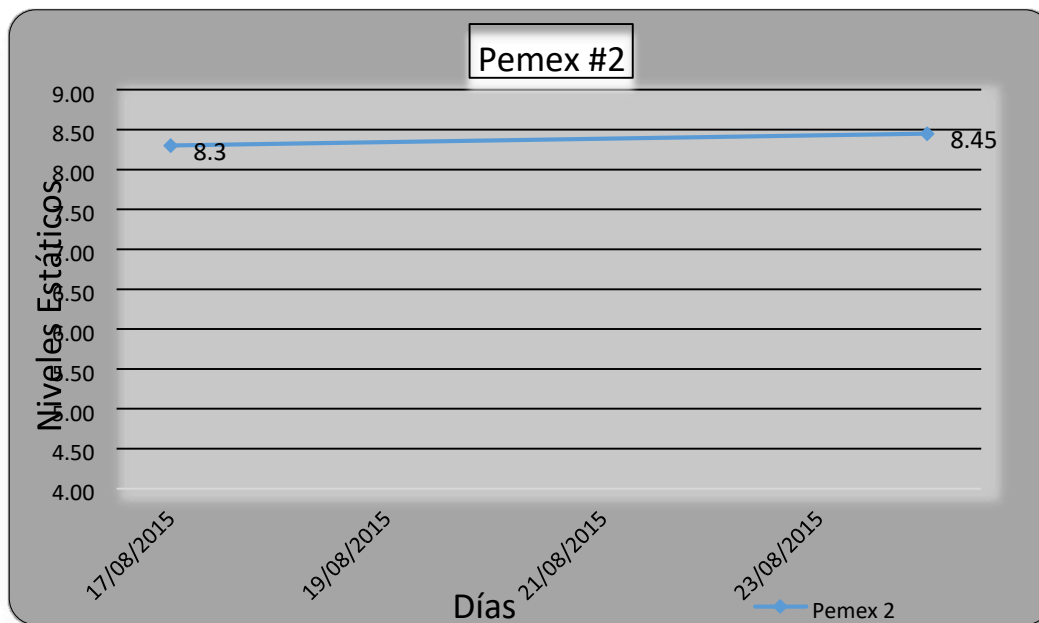


Figura 30. Hidrógrafo de pozos Pemex #2.

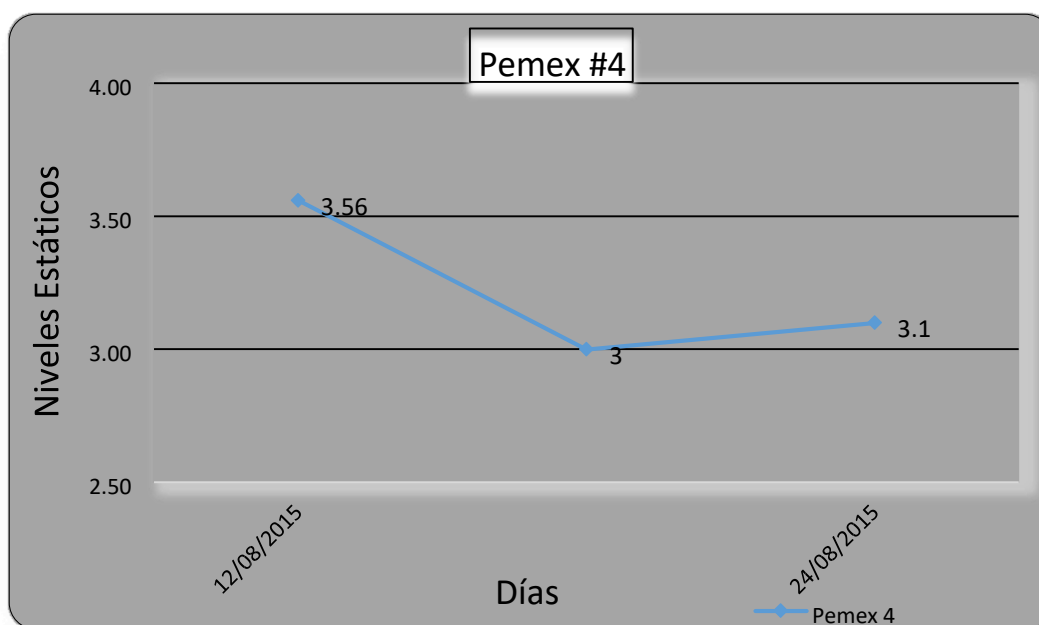


Figura 31. Hidrógrafo de pozo Pemex #4.

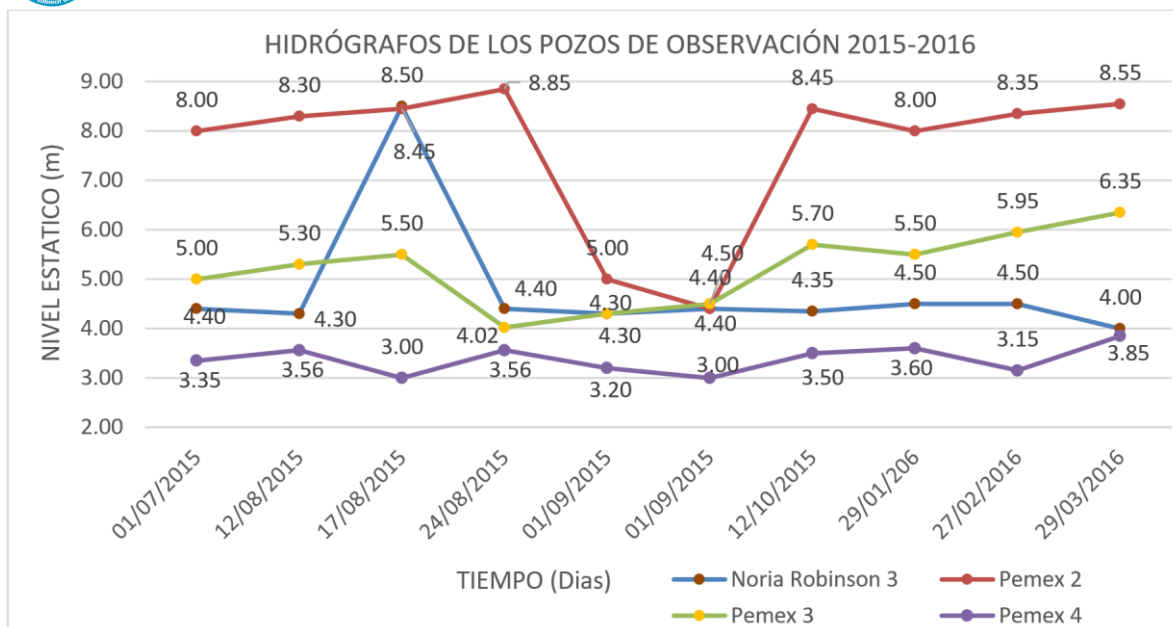


Figura 32. Unión de hidrógrafos de pozos de observación del 2015-2016.



Con el método Fluctuación de Niveles Freáticos (FNF) se obtiene la recarga en la zona de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama, donde se utiliza la formula siguiente:

$$R = \Delta S_{GW} = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \text{ Donde:}$$

R= Recarga

Δh = diferencia del nivel freático

Δt = diferencia de tiempo

S_y = Almacenamiento específico (porosidad efectiva).

En base al estudio realizado por la (CONAGUA, 2015), se considera un coeficiente de almacenamiento de 0.07 para el acuífero Tabalaopa-Aldama.

En la Tablas 11, 12, 13 y 14 se obtiene la recarga con el método FNF, de los pozos analizados. De esta manera observamos si hay recarga de agua subterránea o no mostrándose con datos negativos, positivos los abatimientos o descargas y los cero significa que no hay recarga ni descarga en dicho periodo.

En la tabla 11 se analizan 12 pozos de extracción de los años del 2001 al 2012. Observándose que del 2008 al 2009 existió la mayor recarga en todos los pozos y después se muestra del año 2011 al 2012. Del año 2001 al 2002, del 2002 al 2003 y del 2010 al 2011 se observan solo abatimientos.

Tabla 11. Recarga de los pozos de extracción del 2001-2012 con método FNF.

NIVELES ESTÁTICOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN DEL 2001-2012.												
POZOS	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Robinson #3	99	99.7	99.7	99.7	91.8	104.0 4	104.0 4	71	102	95.45	102.6 5	102.6 5
Tabalaopa Aldama #3	128. 4	130.8 5	131. 4	132. 9	132.6	132	137.4	142	133.6	132	139.5	137
Tabalaopa Aldama #4	134. 9	138.4	140. 5	141. 6	142.1	142	142	137.7	133.1	142	150	140.5
Siaz							145.5	105.6 5	104.2	154.5	154.8 5	123.3 5
Leon 2			64.5	64.5	64.5	93.55	65.65	90	72.9	72.9	72.9	71



Leon 3							78.81	102.25	37.15	37.15	37.15	104.7
Paseos de Concordia 1						126.3	91.95	104.2	96	89	105.3	103.94
Paseos de Concordia 2							95.5	59.17	94.4	97.6	146.3	146.3
Aeropuerto 1	80.35	80.4	80.4	82.2	81.1	83.15	104.7	95.15	86	92	127	93.5
Aeropuerto 2	82.2	87.3	92.4	91.5	90.1	90.6	93	130.1	120	102.45	154	110.1
Concordia	64	64.3	64.8	64	70	70	70	72.9	71	68	125	125
La laguna 1				97.5	102.25	102.25	102.25	95.55	102.25	102.25	102.25	102.25

Δh_{h2h1}	Δh_{h3h2}	Δh_{h4h3}	Δh_{h5h4}	Δh_{h6-h5}	Δh_{h7-h6}	Δh_{h8-h7}	$\Delta h_{(h9h8)}$	Δh_{h10h9}	Δh_{h11h10}	Δh_{h12h11}	Δt Tiempo (Años)	Sy Rendi miento específico .
0.7	0	0	-7.9	12.24	0	-33.04	31	-6.55	7.2	0	1	0.07
2.45	0.55	1.5	-0.3	-0.6	5.4	4.6	-8.4	-1.6	7.5	-2.5	2	0.07
3.5	2.1	1.1	0.5	-0.1	0	-4.3	-4.6	8.9	8	-9.5	3	0.07
0	0	0	0	0	145.5	-39.85	-1.45	50.3	0.35	-31.5	4	0.07
0	64.5	0	0	29.05	-27.9	24.35	-17.1	0	0	-1.9	5	0.07
0	0	0	0	0	78.81	23.44	-65.1	0	0	67.55	6	0.07
0	0	0	0	126.3	-34.35	12.25	-8.2	-7	16.3	-1.36	7	0.07
0	0	0	0	0	95.5	-36.33	35.23	3.2	48.7	0	8	0.07
0.05	0	1.8	-1.1	2.05	21.55	-9.55	-9.15	6	35	-33.5	9	0.07
5.1	5.1	-0.9	-1.4	0.5	2.4	37.1	-10.1	-17.55	51.55	-43.9	10	0.07
0.3	0.5	-0.8	6	0	0	2.9	-1.9	-3	57	0	11	0.07
0	0	97.5	4.75	0	0	-6.7	6.7	0	0	0	12	0.07
R01-02= Sy $\Delta h/\Delta t$	R02-03= Sy $\Delta h/\Delta t$	R03-04= Sy $\Delta h/\Delta t$	R04-05= Sy $\Delta h/\Delta t$	R0506= Sy $\Delta h/\Delta t$	R0607= Sy $\Delta h/\Delta t$	R0708= Sy $\Delta h/\Delta t$	R0809= Sy $\Delta h/\Delta t$	R0910= Sy $\Delta h/\Delta t$	R1011= Sy $\Delta h/\Delta t$	R11-12= Sy $\Delta h/\Delta t$		
0.049	0	0	-0.553	0.8568	0	-2.3128	2.17	-0.4585	0.504	0		



0.1715	0.0385	0.105	-0.021	-0.042	0.378	0.322	-0.588	-0.112	0.525	-0.175
0.245	0.147	0.077	0.035	-0.007	0	-0.301	-0.322	0.623	0.56	-0.665
0	0	0	0	0	10.185	-2.7895	-0.1015	3.521	0.0245	-2.205
0	4.515	0	0	2.0335	-1.953	1.7045	-1.197	0	0	-0.133
0	0	0	0	0	5.5167	1.6408	-4.557	0	0	4.7285
0	0	0	0	8.841	-2.4045	0.8575	-0.574	-0.49	1.141	-0.0952
0	0	0	0	0	6.685	-2.5431	2.4661	0.224	3.409	0
0.0035	0	0.126	-0.077	0.1435	1.5085	-0.6685	-0.6405	0.42	2.45	-2.345
0.357	0.357	-0.063	-0.098	0.035	0.168	2.597	-0.707	-1.2285	3.6085	-3.073
0.021	0.035	-0.056	0.42	0	0	0.203	-0.133	-0.21	3.99	0
0	0	6.825	0.3325	0	0	-0.469	0.469	0	0	0

En la tabla 12 se muestran medidas del año 2015 y en la tabla 13 del 2016, de las cuales se analiza la recarga con el método FNF, representado la recarga con datos negativos y los positivos abatimientos o descarga, realizado esto en los 3 pozos de observación aledaños a la balsa de infiltración.

Tabla 12. Recarga en los pozos de observación 2015 con método FNF.

	P.O. 1	P.O.2	P.O.3.				P.O. 1	P.O.2	P.O.3.
	Δh	Δh	Δh	t		Sy	R=SY ($\Delta h/\Delta t$)	R=SY ($\Delta h/\Delta t$)	R=SY ($\Delta h/\Delta t$)
01/04/2015	3.39	3.37	2.23	1	días	0.07	0.2373	0.2359	0.1561
01/05/2015	0.16	1.70	-0.75	1	días	0.07	0.0112	0.1190	-0.0525
01/06/2015	-0.50	2.40	0.60	1	días	0.07	-0.0350	0.1680	0.0420
01/07/2015	-0.45	-0.90	-5.60	1	días	0.07	-0.0315	-0.0630	-0.3920
12/08/2015	-4.40	-10.45	-0.10	42	días	0.07	-0.0073	-0.0174	-0.0002
15/08/2015	1.40	-0.35	-0.35	3	días	0.07	0.0327	-0.0082	-0.0082
17/08/2015	2.30	4.75	4.15	2	días	0.07	0.0805	0.1663	0.1453
18/08/2015	0.77	-0.85	0.00	1	días	0.07	0.0539	-0.0595	0.0000



20/08/2015	-0.92	-2.20	-1.95	2	días	0.07	-0.0322	-0.0770	-0.0683
24/08/2015	2.20	2.80	3.30	4	días	0.07	0.0385	0.0490	0.0578
28/08/2015	-0.30	-3.50	-3.90	4	días	0.07	-0.0053	-0.0613	-0.0683
30/08/2015	-1.20	2.15	2.45	2	días	0.07	-0.0420	0.0753	0.0858
01/09/2015	0.25	1.15	1.00	1	días	0.07	0.0175	0.0805	0.0700
02/09/2015	0.45	-4.90	-3.85	1	días	0.07	0.0315	-0.3430	-0.2695
03/09/2015	-0.50	4.95	-0.23	1	días	0.07	-0.0350	0.3465	-0.0161
05/09/2015	5.00	2.05	5.13	2	días	0.07	0.1750	0.0718	0.1796
08/09/2015	-4.20	-2.95	-3.95	3	días	0.07	-0.0980	-0.0688	-0.0922
10/09/2015	-0.40	4.95	3.30	2	días	0.07	-0.0140	0.1733	0.1155
11/09/2015	-2.35	-7.40	-5.30	1	días	0.07	-0.1645	-0.5180	-0.3710
14/09/2015	0.50	3.10	2.60	3	días	0.07	0.0117	0.0723	0.0607
16/09/2015	1.65	0.05	2.45	2	días	0.07	0.0578	0.0018	0.0858
17/09/2015	0.85	-2.30	-4.20	1	días	0.07	0.0595	-0.1610	-0.2940
20/09/2015	-4.00	-1.50	-0.35	3	días	0.07	-0.0933	-0.0350	-0.0082
23/09/2015	1.30	2.30	2.25	3	días	0.07	0.0303	0.0537	0.0525
28/09/2015	1.00	0.60	0.30	5	días	0.07	0.0140	0.0084	0.0042
03/10/2015	-0.32	-0.50	2.00	5	días	0.07	-0.0045	-0.0070	0.0280
05/10/2015	0.37	-0.55	-2.49	2	días	0.07	0.0130	-0.0193	-0.0872
12/10/2015	3.75	4.45	0.49	7	días	0.07	0.0375	0.0445	0.0049
19/10/2015	0.01	1.93	0.00	7	días	0.07	0.0001	0.0193	0.0000
20/10/2015	-1.46	-7.68	0.00	1	días	0.07	-0.1022	-0.5376	0.0000
03/12/2015	-1.90	4.72	1.95	43	días	0.07	-0.0031	0.0077	0.0032
09/12/2015	5.40	3.83	2.00	6	días	0.07	0.0630	0.0447	0.0233
10/12/2015	-1.45	-6.80	-4.00	1	días	0.07	-0.1015	-0.4760	-0.2800
22/12/2015	1.22	4.97	0.00	12	días	0.07	0.0071	0.0290	0.0000
23/12/2015	-2.32	-5.87	0.05	1	días	0.07	-0.1624	-0.4109	0.0035



Tabla 13. Recarga en los pozos de observación 2016 con método FNF.

	P.O. 1	P.O.2	P.O.3.				P.O. 1	P.O.2	P.O.3.
	Δh	Δh	Δh	Δt		Sy	R=SY ($\Delta h/\Delta t$)	R=SY ($\Delta h/\Delta t$)	R=SY ($\Delta h/\Delta t$)
12/01/2016	1.25	11.15	5.75	19	días	0.07	0.0046	0.0411	0.0212
27/01/2016	4.00	1.75	3.00	15	días	0.07	0.0187	0.0082	0.0140
28/01/2016	-1.00	-13.70	-7.35	1	días	0.07	-0.0700	-0.9590	-0.5145
01/02/2016	-4.87	2.80	-1.05	3	días	0.07	-0.1136	0.0653	-0.0245
05/02/2016	0.17	3.60	2.35	4	días	0.07	0.0030	0.0630	0.0411
06/02/2016	-0.20	-2.80	-4.05	1	días	0.07	-0.0140	-0.1960	-0.2835
07/02/2016	3.43	-4.60	-0.45	1	días	0.07	0.2401	-0.3220	-0.0315
18/02/2016	-1.23	7.15	5.95	11	días	0.07	-0.0078	0.0455	0.0379
19/02/2016	-0.50	-4.65	-3.20	1	días	0.07	-0.0350	-0.3255	-0.2240
19/02/2016	-0.15	-1.22	-2.50	24	horas	0.07	-0.0004	-0.0036	-0.0073
25/02/2016	-0.95	3.17	3.95	6	días	0.07	-0.0111	0.0370	0.0461
26/02/2016	-0.40	-4.40	-4.45	1	días	0.07	-0.0280	-0.3080	-0.3115
27/02/2016	5.80	11.85	14.00	1	días	0.07	0.4060	0.8295	0.9800
04/03/2016	-6.00	-12.00	-13.60	6	días	0.07	-0.0700	-0.1400	-0.1587
18/03/2016	-1.40	0.10	2.90	14	días	0.07	-0.0070	0.0005	0.0145
29/03/2016	0.55	2.05	1.00	11	días	0.07	0.0035	0.0130	0.0064
26/04/2016	-2.95	6.10	-2.68	27	días	0.07	-0.0076	0.0158	-0.0069
27/04/2016	-0.37	-6.35	3.23	1	días	0.07	-0.0259	-0.4445	0.2261
04/05/2016	0.77	0.55	0.10	7	días	0.07	0.0077	0.0055	0.0010
05/05/2016	0.25	-3.55	-6.25	1	días	0.07	0.0175	-0.2485	-0.4375
11/05/2016	0.50	4.10	4.30	6	días	0.07	0.0058	0.0478	0.0502



12/05/2016	0.35	-4.75	-4.80	1	días	0.07	0.0245	-0.3325	-0.3360
18/05/2016	-1.75	2.90	2.00	6	días	0.07	-0.0204	0.0338	0.0233
19/05/2016	-0.70	-2.75	-2.10	1	días	0.07	-0.0490	-0.1925	-0.1470
22/06/2016	0.75	0.00	0.70	33	días	0.07	0.0016	0.0000	0.0015
14/07/2016	-4.00	1.25	-0.25	22	días	0.07	-0.0127	0.0040	-0.0008
19/09/2016	-0.10	-0.35	0.25	35	días	0.07	-0.0002	-0.0007	0.0005
20/09/2016	4.05	1.35	-0.15	1	días	0.07	0.2835	0.0945	-0.0105
22/09/2016	-0.15	-1.75	-0.20	2	días	0.07	-0.0053	-0.0613	-0.0070

En la tabla 14 se muestra los datos de 4 pozos de la extracción a cargo de la JMAS con datos de 2015 al 2016, donde se analizan estos con el método FNF para obtener la recarga producida en los siguientes periodos.

Tabla 14. Recarga en los pozos de observación 2015 y 2016 con método FNF.

Niveles Estático (m)				
Tiempo (meses)	Noria Robinson	Pemex 2	Pemex 3	Pemex 4
01/07/2015	4.40	8.00	5.00	3.35
12/08/2015	4.30	8.30	5.30	3.56
17/08/2015	8.50	8.45	5.50	3.00
24/08/2015	4.40	8.85	4.02	3.56
01/09/2015	4.30	5.00	4.30	3.20
20/09/2015	4.40	4.40	4.50	3.00
12/10/2015	4.35	8.45	5.70	3.50
29/01/2016	4.50	8.00	5.50	3.60
27/02/2016	4.50	8.35	5.95	3.15
29/03/2016	4.00	8.55	6.35	3.85

Δh	Δh	Δh	Δh	Tiempo (t)		Sy	$R=Sy \Delta h/\Delta t$	$R=Sy \Delta h/\Delta t$	$R=Sy \Delta h/\Delta t$	$R= Sy \Delta h/\Delta t$
-0.100	0.300	0.300	0.210	19	días	0.07	-0.0004	0.0011	0.0011	0.0008
4.200	0.150	0.200	-0.560	5	días	0.07	0.0588	0.0021	0.0028	-0.0078



-4.100	0.400	-1.480	0.560	7	días	0.07	-0.041	0.0040	-0.0148	0.0056
-0.100	-3.850	0.280	-0.360	7	días	0.07	-0.001	-0.0385	0.0028	-0.0036
0.100	-0.600	0.200	-0.200	24	horas	0.07	0.0003	-0.0018	0.0006	-0.0006
-0.050	4.050	1.200	0.500	41	días	0.07	-0.0001	0.0069	0.0020	0.0009
0.150	-0.450	-0.200	0.100	57	días	0.07	0.0002	-0.0006	-0.0002	0.0001
0.000	0.350	0.450	-0.450	28	días	0.07	0.000	0.0009	0.0011	-0.0011
-0.500	0.2000	0.400	0.700	30	días	0.07	-0.0012	0.0005	0.0009	0.0016

Se utilizó la herramienta estadística MiniTab para analizar los resultados, correlacionando los datos de FNF y precipitación, de esta manera se comparan los cambios de nivel de agua con la precipitación y observando como fluctúan las aguas subterráneas en relación con la precipitación correspondiente.



CAPÍTULO 6. ZONA DE ESTUDIO

6.1 UBICACIÓN

El acuífero Tabalaopa-Aldama está ubicado al noroeste del estado de Chihuahua, localizado entre los paralelos $28^{\circ}31'59.1''$ N y $29^{\circ}0'9.3''$ N de latitud norte y los meridianos $106^{\circ}11'17.5''$ O y $105^{\circ}52'3.0''$ O de longitud este (SEMARNAT,2016). Ubicándose la balsa de infiltración que es la zona de estudio dentro de las mismas con coordenadas $28^{\circ}40'14.80''$ N y $106^{\circ}0'21.33''$ O como se muestra en la Figura 33. Está a una elevación de 1369 msnm.

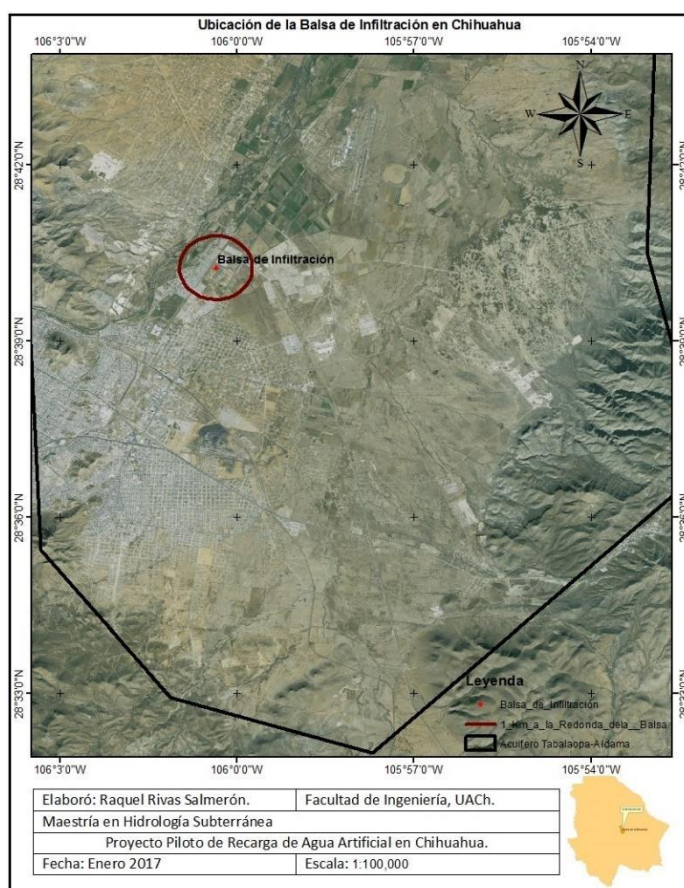


Figura 33. Ubicación de zona de estudio (Balsa de infiltración)



6.2 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA

El acuífero es de tipo libre, está localizado en la cuenca hidrográfica del Río Chuvíscar, el cual es un afluente del Río Conchos, formando a su vez parte de la cuenca de Río Bravo. Y recibe como afluentes al arroyo el Rejón, Río Sacramento y el Arroyo del Nogal Mocho (Conagua, 2015).

Las corrientes superficiales que se presentan en la superficie del acuífero son efímeras y estacionales, en periodos de estiaje no existe flujo en los arroyos, mientras que el Río Chuvíscar existe un escurrimiento prácticamente continuo debido a descarga de aguas residuales tratadas en la Ciudad de Chihuahua.

Sobre el Río Chuvíscar se encuentran la Presa Chihuahua y la Presa Chuvíscar; que tienen la función de controlar avenidas, evitar inundaciones y suministrar agua potable a la Ciudad de Chihuahua. Los principales afluentes del Río Chuvíscar son el Mimbres, ubicado al norte, los Nogales al sur y El Cacahuatal y Santa Eulalia en la porción sureste.

El drenaje predominante dendrítico-paralelo se presenta en el centro-norte del acuífero, el drenaje radial se observa en los cerros el Coronel y Cerro Grande. En la porción sureste del acuífero el drenaje es dendrítico rectangular y poco desarrollado, drena de sureste a noroeste sobre el Arrollo Santa Eulalia. Este se mueve en un relieve suave y se conforma por lomeríos, constituido por pequeños arroyos, con cauces estrechos y de poca profundidad que conforme avanza a las partes más bajas del valle van desapareciendo por infiltración.

En este acuífero la fuente principal de recarga es el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas, una menor fuente de recarga está representada por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle y por los retornos de riego agrícola. (SEMARNAT, 2016).



En figura 34 se representa la Red Hidrográfica de la zona de estudio (Balsa de Infiltración), con anterioridad mencionada.

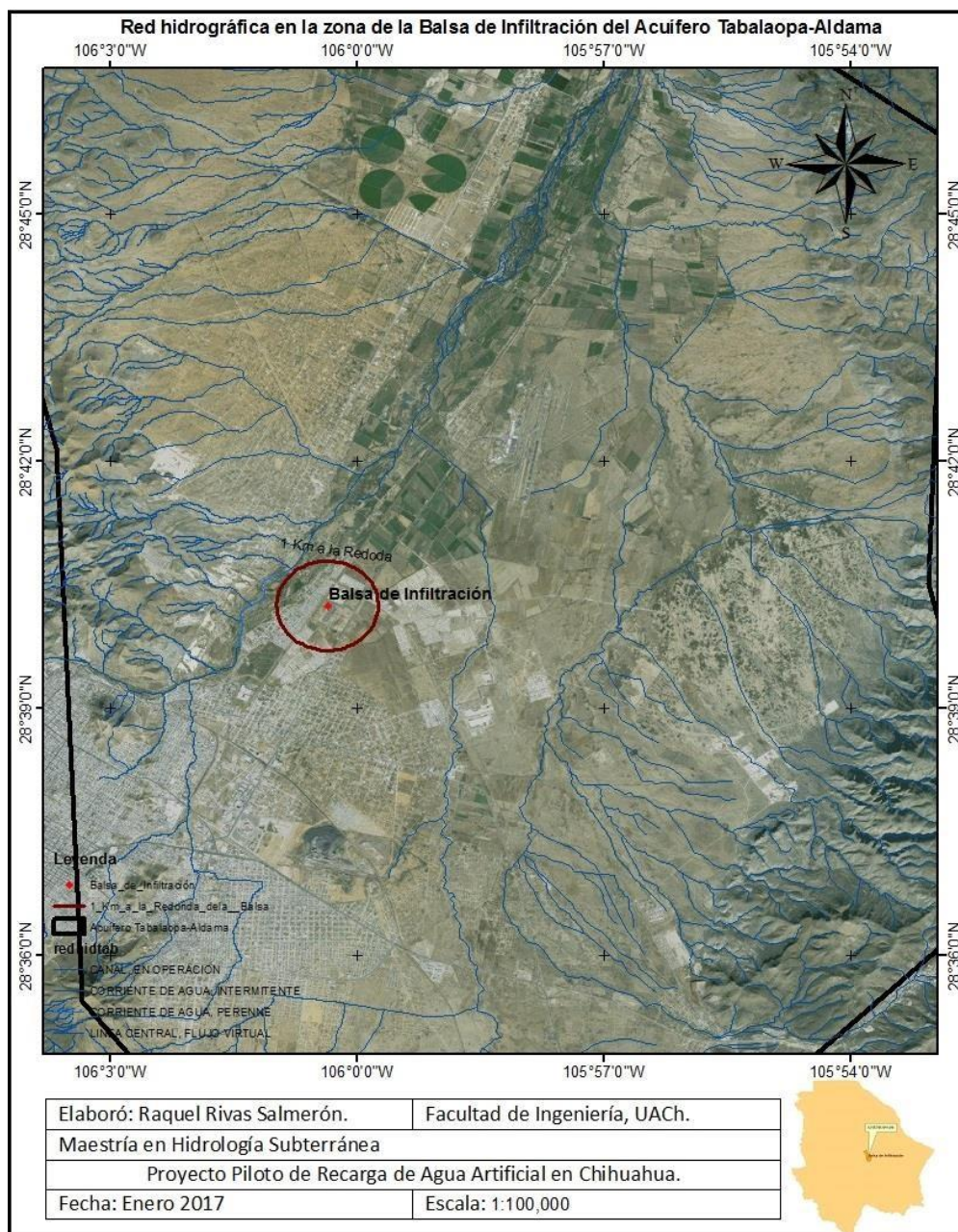


Figura 34. Red Hidrográfica de la zona de estudio (Balsa de Infiltración), Enero 2017.



6.3 FISIOGRAFÍA

De acuerdo a estudios de la (CONAGUA, 2015) se encuentra ubicado dentro de la provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. La topografía del área son pliegues de tipo anticlinal y sinclinales presentados como depresiones que fueron rellenadas por material aluvial. Los cuales fueron formados por ruptura y fallamiento del terreno. El valle Tabalaopa-Aldama tiene origen tectónico; siento un sinclinal cerrado en su porción norte, que es drenado desde esta parte y hasta su porción sur por el Arroyo del Nogal Mocho, donde desemboca al Rio Chuviscar que cruza el valle con rumbo noreste; hacia el oeste y este limitado por sierras formadas por rocas volcánicas. En la figura 35 se observa como la balsa de infiltración está emplazada en una llanura, la subprovincia del bolsón de Mapimí y en la provincia de sierras y llanuras del norte.

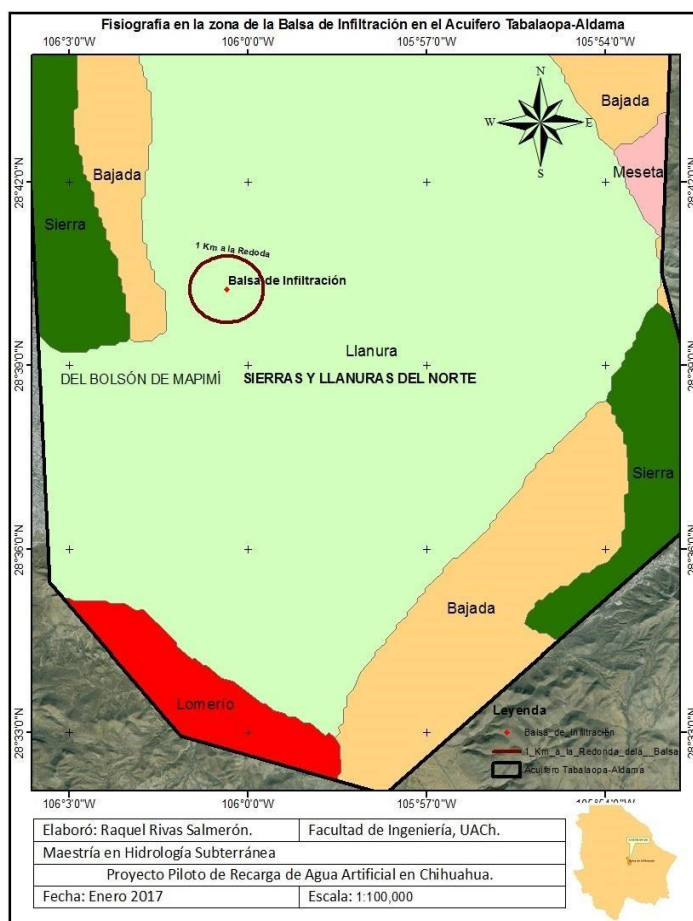


Figura 35. Fisiografía de la zona de estudio (Balsa de infiltración), Enero 2017.



6.4 CLIMA

De acuerdo a la clasificación de (INEGI, 2015), el clima del Valle Tabalaopa-Aldama es de tipo seco Semicálido BS₀hw (w) y seco templado BS₀kw, con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 17.5°C y precipitación media anual de 395mm, presentándose en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre (Semarnat, 2016).

Mostrándose la distribución de estos climas en la Figura 36, donde se observa que la balsa de infiltración hay un clima BS₀hw(w).

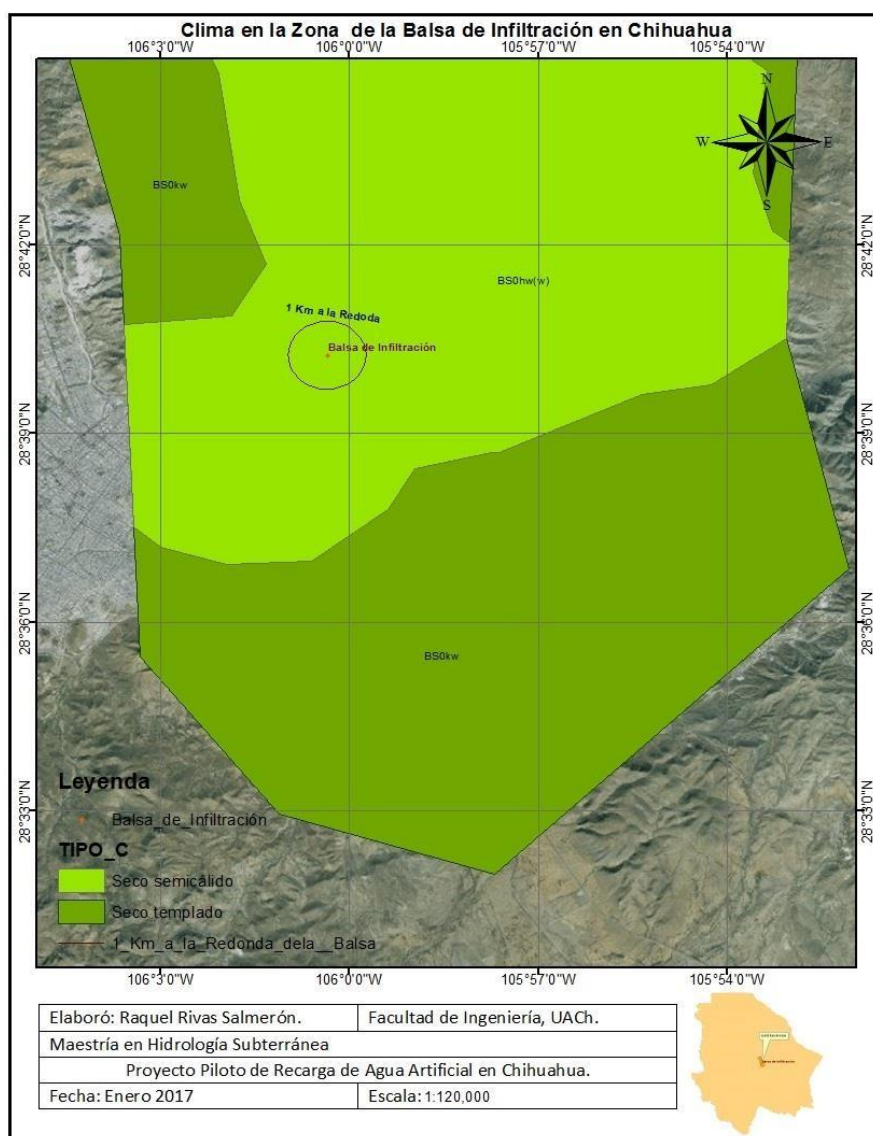


Figura 36. Clima en la Balsa de infiltración. Elaboración propia Enero 2017. Con datos (INEGI, 2010) y ArcMap 10.1.



6.5 GEOLOGÍA

En todo lo largo del valle de Tabalaopa-Aldama se presenta material aluvial y conglomerado, siendo estas las unidades más recientes. En la superficie del acuífero afloran brechas riolíticas, derrames fisúrales de andesita, tobas e ignimbritas. Hacia la parte central predominan los depósitos fluviales de gravas y arenas poco consolidados, limos y arcillas no consolidados. Desde el punto geohidrológico, esta unidad tiene potencial hidrológico escaso, debido a su génesis sedimentaria (Lutita y arenisca cementada), sin embargo la deformación siempre está acompañada de fracturamiento secundario, lo cual puede ocasionar una permeabilidad media a baja. Debido a su granulometría gruesa sin cementar, en los abanicos aluviales se consideran como zonas potenciales de recarga natural (Semarnat, 2016). En base a información geológica, pruebas de bombeo y cortes litológicos de pozos ubicados en el área, se identifica la presencia de un acuífero que se encuentra alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de arenas intercaladas como limo y arcillas, con espesores que varían de 50 a 800 m. Debajo de este paquete aluvial, existe una secuencia vulcanoclásticas como riolitas, toba y piroclastos, cuyas permeabilidades varían de bajo a media lo cual genera la posibilidad de que el acuífero este conformado por dos medio, granular y fracturado (Conagua, 2015), por lo que estructuralmente se presentan fallas normales, al surgir un evento distensivo de cuencas y sierras, provocan el fracturamiento en las rocas volcánicas.

En la Figura 37 se observa la geología en la zona de estudio (balsa de infiltración) plasmada en aluvión y conglomerado.

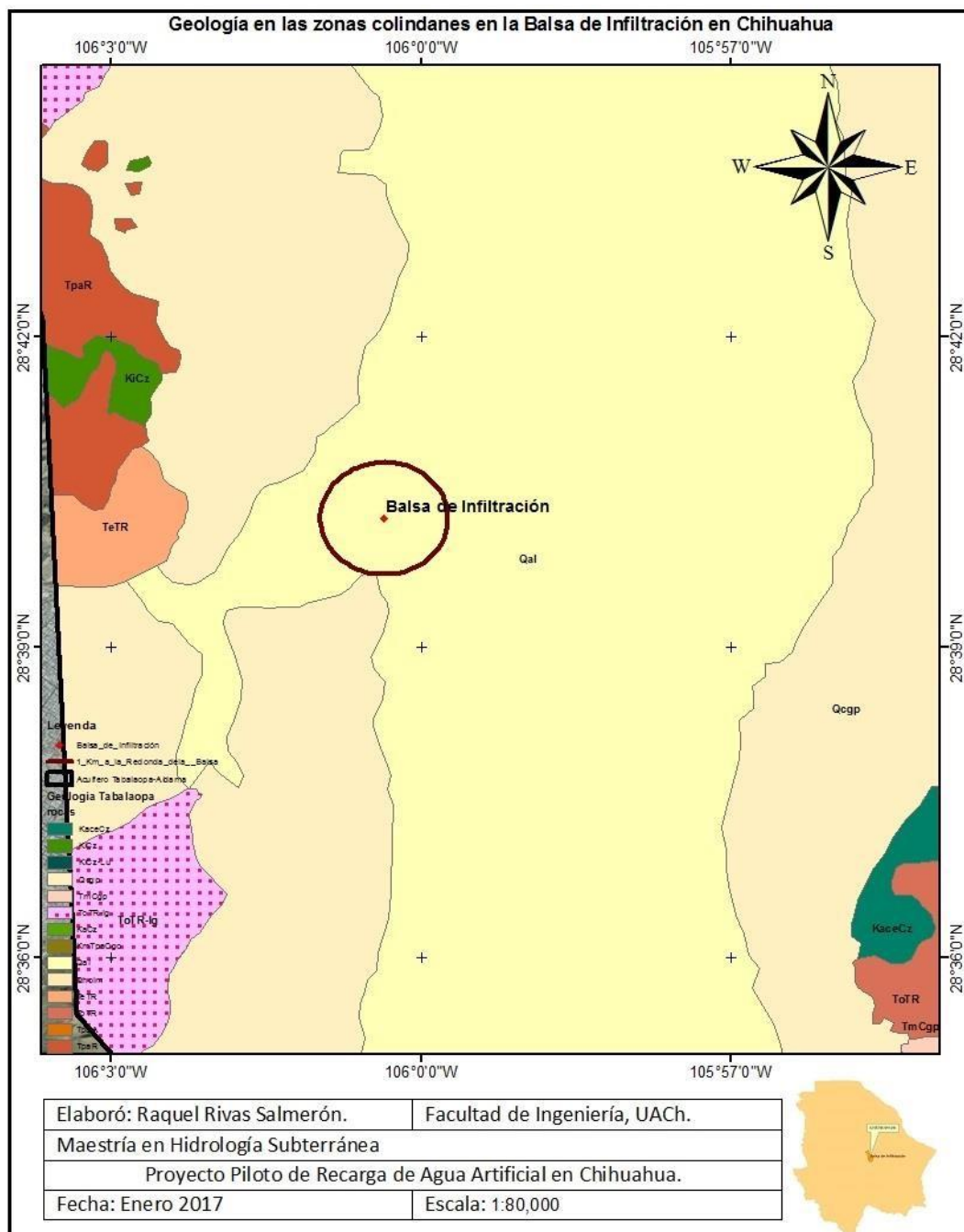


Figura 37. Geología de las Colindancias a la Balsa de infiltración en Chihuahua (Elaboración propia con ArcMap 10.1. Enero 2017.)



CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 RESULTADOS.

En los hidrógrafos de los pozos de extracción se observaron en pozo Robinson los mayores abatimientos en 2006, 2007, 2011 y 2012 y recargas 2005, 2008 y 2010. En Tabalaopa Aldama 3 en 2008 y 2011 y recarga en 2009, 2010 y 2012, en Aeropuerto 1 en el 2007 y 2011 y recarga en 2009 y 2012. Tabalaopa Aldama 4 2010 y 2011 y recarga 2009 y 2012, en Aeropuerto 2 en 2008 y 2011 y recarga 2009, 2010 y 2012, en Concordia en 2011 y 2012 y recarga en 2004 y 2010, en Leon 2 2006 y 2008 y recarga 2005, 2007, 2009 y 2012. En Laguna 1 2005, 2006 y recarga 2004 y 2008, Concordia 1 en 2006, 2008 y 2011 y recarga 2007, 2009, 2010 y 2012. Leon 3 2008 y 2012 y recarga 2009, 2010 y 2011. Concordia 2 2009, 2011 y 2012 las recargas en 2008.

En los hidrógrafos de los pozos de monitoreo Pemex 2 se observaron recargas de 8.0m en Julio 2015 y fue abatiéndose hasta 8.85m en Agosto 2015, luego surge una recarga hasta 4.40m en Septiembre 2015 y para Octubre del 2015 un abatimiento a 8.45m hasta llegar con un pequeño abatimiento de 8.55m en marzo 2016. En la Noria Robinson 3 de Julio a Agosto 2015 se generó un abatimiento de 4.40m a 8.50m y en Septiembre una recarga de 4.30m hasta llegar a 4.0m en Marzo 2016. Pemex 3 en Julio 2015 inicia un abatimiento a de 5.0m a 5.50m para Agosto 2015 y para el 24 de Agosto una recarga a 4.02m hasta abatirse a 6.35m el 29 Marzo 2016. Pemex 4 este pozo se mantuvo de 3.35m en Julio hasta 3.85m en Marzo 2016, con pequeñas recargas y abatimiento hasta el 29 de Marzo con 3.85m. Así que los abatimientos más representativos en estos pozos fueron del 12 Agosto 2015 a 24 Agosto 2015 y Recargas del 24 Agosto a 1 Septiembre 2015.

En los hidrógrafos del pozo de observación #1 se muestran las mayores recargas de Junio 2016 hasta Septiembre 2016 y los abatimientos más representativos en Enero-Febrero 2016. En el Pozo de observación #2 se tienen las mayores recargas en Junio 2016 y los abatimientos en Enero 2016. En el observación #3 mayores recargas en Junio 2016 y mayor

abatimiento en Febrero 2016. En los 3 se tiene el mismo patrón de recargas y abatimientos, notándose que en el mes de febrero no hay lluvias y por lo tanto no hay influencia de agua precipitada en el agua que está siendo infiltrada en la balsa, y la recarga inicia en Junio que es al mismo tiempo inician las lluvia y se nota influencia de esta en la recarga al acuífero ya que los niveles freáticos tienen un notable acenso.

El análisis de la recarga con el método FNF se observa que del año 2010 al 2011 hay mayor abatimiento de agua subterránea ya que es en todos los 12 pozos y después en el año 2005-2006 en 5 pozos y en 2 muy poca recarga y en 5 de ellos ni abatimientos ni recarga surgió de un año al otro. El año donde se observa mayores recarga es de los años 2008 al 2009 excepto en 3 pozos y después del 2011 al 2012 excepto en 1 pozo y en 4 de ellos no existió recarga ni abatimientos. Del año 2001 al 2002, del 2002 al 2003 y del 2010 al 2011 se observan solo abatimientos en todos los pozos.

Con el método FNF Se observa que del día 17 al 24 de Agosto 2015 se observa una mayor recarga en la noria Robinson representada con datos negativos y mayor abatimiento el 12 Agosto 2015. Y 24 Agosto 2015 al 01 de Septiembre 2015 se observa recarga en el pozo Pemex 4 y mayor abatimiento el 20 Septiembre 2015. En el pozo Pemex 3 se observa recarga el 17 Agosto 2015 y mayores abatimientos el 12 agosto 2015 y 24 Agosto 2015. En pozo Pemex 2 mayor abatimiento el 17 Agosto 2015 y mayor recarga el 12 Agosto 2015.

Con el mismo método en el pozo de observación #1 se observa la mayor recarga el 11 de Septiembre el 2015 y el mayor abatimiento el 27 de Febrero 2016, en Pozo Observación #2 la mayor recarga el 28 de Enero 2016 y mayor abatimiento 27 de Febrero 2016, en Pozo observación #3 la mayor recarga el 28 de Enero 2016 y mayor abatimiento el 26 Febrero 2016. Al igual que en los otros 2 pozos. En el pozo uno se observan mayores eventos de Recarga que abatimiento a diferencia del pozo 2 y 3 que son mayores los abatimientos que las recargas.

Las mayores precipitaciones en la estación de la JCAS fueron registradas en Julio 2013 y las menores en Octubre 2010, en la Potabilizadora las mayores en Septiembre 2014 y las menores en Mayo 2007, en Protección Civil en Julio 2012 y las menores en Diciembre 2011, en la Mesa las más representativa en Julio 2013 y la menor en Agosto 2001, En estación Chihuahua Julio 2013 y menores en Septiembre 2003. Por lo que se observa que en el mes de Julio es cuando mayores mm de precipitación son registrados y en Septiembre inician a disminuir, analizadas estas del 2001 al 2016.

La información analizada con los hidrógrafos generados con las fluctuaciones de los niveles freáticos, con el método FNF ambos comparados con la precipitaciones registradas se observa como en los dos existen mayores abatimientos cuando es temporada de sequía o pocas lluvias y las mayores recargas cuando en la región están las lluvias, por lo tanto las precipitaciones si tienen influencia en el agua que se está recargando al acuífero Tabalaopa-Aldama con el agua infiltrada en la Balsa.

Los datos de los pozos de monitoreo por el momento son pocos por el momento e insuficientes para un manejo multivariante asertivo y confiable.



7.2 DISCUSIÓN

El propósito de este trabajo es estudiar la influencia climática en la recarga de este pequeño sistema, sobre todo desde el punto de vista de la precipitación, su distribución a lo largo del año y la naturaleza de los eventos unidos a la cantidad realmente infiltrada.

Ampliar el conocimiento acerca del funcionamiento hidrológico del sistema para poder contribuir a realizar una mejor gestión de los recursos hídricos en la zona y en todo el acuífero Tabalaopa Aldama.

Se podrá utilizar el software MiniTab cuando se cuente con más datos de los niveles piezométricos de los pozos de observación para así poder correlacionarlos con los datos de precipitación y realizar su análisis multivariante con mayor precisión.



CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

La metodología utilizada integra el uso de los sistemas de información geográfica, técnicas multivariadas y estadísticas para determinar si la precipitación interactúa con el agua que se está infiltrando en la balsa de infiltración en Chihuahua, Chih. Cuando se cuente con los datos suficientes para analizarlos con el software MiniTab.

Los tiempos de recarga de la precipitación realmente hace que el nivel de agua aumente y depende tanto de las condiciones de precipitación como el entorno hidrogeológico de la estación de monitoreo, el espesor y la textura de la zona vadosa.

El método utilizado supone que todos los aumentos en el nivel de agua son causados por la recarga de la precipitación debido a que utilizamos datos de agua subterránea procedentes del acuífero poco profundo y no confinado.

Esta metodología puede ser aplicada para cualquier zona a pequeña y gran escala como se observó en estudios anteriores.

Los resultados encontrados servirán para posteriores investigaciones de recarga en el acuífero Tabalaopa-Aldama.



8.2 RECOMENDACIONES

Continuar recopilando datos de niveles estáticos en pozos de observación por un mayor periodo de tiempo y las mediciones sea en periodos constantes para llegar a obtener resultados más precisos y acertados para poder analizarlos con los softwares estadísticos y así determinar la correlación que hay con otros sistemas.

Que la información de las precipitaciones en las estaciones climatológicas se presente en tiempos iguales en todas las estaciones para poder correlacionar de una mejor manera.

Que se realicen futuros estudios en el área para conocer con más certeza si el agua que se está recargando en la balsa de infiltración está influenciada por otros factores antropogénicos ya que es importante determinar exactamente que ha tenido influencia para que los niveles de agua fluctúen constantemente y en algunos casos de una manera muy repentina.



Bibliografía

- [Agencia Catalana del Agua (ACA), e. Á.-C. (20 de 05 de 2016). Esfera del agua.com. Obtenido de Esfera del agua.com: <http://www.esferadelagua.es/agua-ytecnologia/recarga-artificial-de-acuiferos>]
- [Cai, Z. (2016). Analysis of groundwater-level response to rainfall and recharge estimates in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology*, 71-84]
- [Carlos M. Ordens, A. D. (2011). Groundwater recharge to a sedimentary aquifer in the topographically closed Uley South Basin, South Australia. *Hydrogeology Journal*, 61-72]
- [Dennis W. Risser, William J. Gburek, and Gordon J. Folmar. (2005-5038). Comparison of Methods for Estimating Ground-Water Recharge and Base Flow at a Small Watershed Underlain by Fractured Bedrock in the Eastern United States. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 31 p]
- [Dripps, W. (2012). An Integrated Field Assessment of Groundwater Recharge . *Hydrology Journal*, 15-22]
- [Iardino, G. G. (2010). Metodología para la estimacion de la recarga directa del sistema de acuífero fisurado por el metodo de fluctuacion de la superficie libre (WTF) en la mina; "Arenal", departamento de Rivera. *Geology XXI century: the key of the natural resources development*, (p. 1CD)]
- [IGRAC. (2013). Artificial Recharge of Groundwater in the World. International Groundwater Resources Assessment Center]
- [Jacobus J. de Vries, I. S. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 5-17]
- [Morelio, L. y. (2002). Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38-45]
- [Murray, R. (2009). Artificial recharge, the intentional banking and treating of water in aquifers. *Water affairs and forestry*. Republic of South Africa]
- [Richard W. Healy, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 91-109]
- [RISSER, D., & GBUREK, W. a. (2005). Comparison of methods for estimating groundwater recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 31 p]
- [Rodríguez, K. L. (2013). Herramientas estadísticas para el manejo de recursos hidráulicos subterráneos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 73-88]
- [Sang-Ki Moon, N. C. (2004). Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 198-209]
- [Varni, M. R. (Agosto 2013). Aplicación de varias metodologías para la Estimar la recarga al acuífero Pampeano, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 67-85]



Curriculum Vitae

Soy Raquel Rivas Salmerón, tengo 26 años, vivo en la comunidad de Témoris, Chihuahua. Soy ingeniero Civil titulado en Nov/2014, egresada de la Facultad de Ingeniería, UACH. Soy Pasante de Ingeniería en Minas en proceso de Titulación, egresado en Dic/2014 de la Facultad de Ingeniería, UACH. Soy Egresado en Dic/2016, de la Maestría en Hidrología Subterránea, en la Facultad de Ingeniería, UACH. Estudio Ingles en Harmon Hall.

Realice mis prácticas profesionales en el periodo Jun-Jul 2013 en Palmarejo Chihuahua, con la empresa Coeur. En el Area de Mina Subterránea, realizando las tareas de apoyo a supervisores de mina, explotación de minerales, avances diarios, carga de explosivos y acarreo de mineral a la planta de molienda. Estando a cargo del Ing. Sergio Sotelo Alcantar. En el periodo Jun-Jul 2014 realice de nuevo prácticas en la misma empresa y en la misma área. En el periodo Dic-Ene 2013 estuve como practicante en el área de proyectos de ingeniería, en la empresa minera Agnico Eagle. Realizando tareas de apoyo a supervisores de proyectos de ingeniería civil y topografía, supervisando la construcción de un taller mecánico en mina subterránea, construcción de puentes, muros de mampostería e instalación de Gas Lp en lavandería de la Mina. Realice mi servicio social de ingeniería civil en la coordinación de ingeniería civil en la facultad de ingeniería, UACH. Apoyando en actividades académicas a docentes y alumnos. Estando a cargo del Ing. Adrián Orpinel Ureña. El servicio de ingeniería en minas y metalurgia lo realice en el laboratorio de suelos y concreto, en la facultad de ingeniería, UACH. Como asistente de laboratorio. Estando a cargo del Ing. Raymundo Caballero. Manejo los programas: ArcGis, Auto Cad, Opus, IDRISI, GMS, Civil Cad, WinSev, EasyGPS y Office. Cuento con un curso de Acreditación de inglés, manejo de estación total, curso Cype para diseño de estructuras y manejo de equipo de Geofísica Syscal Junior

Domicilio Permanente: Calle S/N, Domicilio Conocido. Email:raque_rs28@hotmail.com
Témoris, Chihuahua. C.P.33380. Cel: 6144884713.

Esta tesis fue mecanografiada por Raquel Rivas Salmerón.