

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



**“DISEÑO DE SISTEMA WELLPOINT PARA ABATIMIENTO DEL
NIVEL FREÁTICO EN SUELOS ARENOSOS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:
ING. DAVID ARMANDO BELTRÁN VARGAS

DIRECTOR DE TESIS
DR. FERNANDO GARCÍA PÁEZ

CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. MANUEL MARTINEZ MORALES

CULIACÁN DE ROSALES, SINALOA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REPOSITORIO INSTITUCIONAL



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Me faltarían páginas para agradecer a todas las personas que se han involucrado en la realización del presente proyecto, merecen reconocimiento especial las siguientes:

Primeramente doy gracias a Dios por permitirme culminar una etapa más en mi proceso de formación profesional, por estar siempre presente en cada momento de mi vida, por darme salud, fortaleza y capacidad para lograr los objetivos que me he propuesto.

A mis padres, por ser mi pilar fundamental, por su amor, su apoyo incondicional, su confianza, por todos sus esfuerzos y sacrificios, por sus enseñanzas que me han convertido en la persona que soy hoy en día. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que han estado ahí para mí. Mi amor, respeto y gratitud eterno para ustedes.

A mi familia, en especial a mis hermanos, Juan Carlos y Juan Fernando, quienes a pesar de las situaciones, siempre han estado ahí acompañándome y animándome a seguir adelante.

A mi novia Marcia, quien siempre me ha apoyado, me ha dado ánimos, me ha motivado a salir adelante en cada objetivo propuesto, por confiar en mí y estar ahí en todo momento.

A todos mis amigos que me acompañaron en esta etapa, en especial los de Santa Cruz, mi segunda familia, no alcanzaría a mencionarlos a todos quienes me procuraron, me dieron palabras de ánimo, apoyo, a quienes entre sus bromas también sentía su afecto y cariño, de forma que me motivaban a continuar con mi formación, a superarme día a día.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, mi alma máter, por abrirme las puertas una vez más y permitirme continuar con mi formación profesional, por haberme brindado tantas oportunidades; así también agradezco al Programa de Maestría en Ingeniería de la Construcción, a la coordinadora Alejandra Brambila, por su paciencia, atención, tiempo, apoyo y dedicación a lo largo de esta etapa; a todos los docentes que con sabiduría, conocimiento, experiencia y apoyo, fueron formándome personal y profesionalmente, mi total respeto y admiración.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por permitirme realizar mi estancia de intervención y formarme para desarrollar el presente proyecto; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su valiosa beca con la que fue posible realizar mis estudios, gracias por su apoyo para la formación de profesionistas más preparados.

Por último y no menos importante, a mi director Dr. Fernando García Páez y a mi codirector el Dr. Manuel Martínez Morales, quienes me instruyeron, formaron y guiaron en el desarrollo de mi proyecto de intervención, mis grandes mentores, gracias por compartir sus conocimientos, su experiencia y por su apoyo incondicional, gracias por sus valiosos comentarios y sobretodo que desarrollaron en mí un gusto e interés por la Hidrogeología, mi respeto y admiración total para ustedes.

DEDICATORIA

El proyecto de intervención está dedicado a mis tres grandes orgullos y pilares de vida:

En la memoria de mi mamita, Alicia Sigueko Kuroda Martínez, gracias por su gran amor, por siempre haber estado ahí para mí, apoyándome y sintiéndose orgullosa de su nieto, la amo, por siempre su muchachito bonito.

A mis padres, Librado Beltrán Medina y Alicia Guadalupe Vargas Yanagui, todo lo que soy hoy en día es gracias a ustedes, por su amor, confianza y apoyo incondicional, por estar presentes en el caminar de mi vida, bendiciéndome, aconsejándome, acompañándome y dándome las fuerzas para continuar con mis metas propuestas. Los amo.

RESUMEN

En construcciones por debajo del nivel freático, pueden presentarse problemas como la disminución de las propiedades y características resistentes del suelo y tener presión hidráulica adicional.

Para analizar el problema es necesario hacer estudios hidrológicos, geotécnicos y la combinación de ellos permitirá determinar el nivel freático y su variación. Las soluciones pueden ser pozos profundos o sistema wellpoint, el objetivo es proponer un sistema que permita realizar la construcción sin que haya afectación alguna con su entorno mediante el uso de la modelación numérica que permite evaluar escenarios y comprender el comportamiento del acuífero ante diversas situaciones.

PALABRAS CLAVE

Abatimiento, nivel freático, wellpoint, agua subterránea, modelación.

ABSTRACT

In constructions below the water table, problems such as decreased properties and strength characteristics of the soil and additional hydraulic pressure can occur.

To analyze the problem, it is necessary hydrological and geotechnical studies and the combination of them will allow the determination of the water table and its variation. The solutions can be deep wells or a wellpoint system, the objective is to propose a system that allows the construction to be carried out without affecting the environment or constructions close to the dewatering project by using numerical modeling that allows evaluating scenarios and understanding the behavior of the aquifer in various situations.

KEYWORDS

Dewatering, water table, wellpoint, groundwater, modeling.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
PALABRAS CLAVE	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. PRESENTACIÓN	1
I.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO	2
II. FUNDAMENTO TEÓRICO	4
II.1. HIPÓTESIS	4
II.2. MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL	4
II.3. ESTADO DEL ARTE	6
II.4. MARCO TEÓRICO	9
II.4.1. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA	9
II.4.2. ACUÍFERO	9
II.4.3. FLUJO DE AGUA EN SUELOS HACIA LAS EXCAVACIONES	10
II.4.4. POSIBLES AFECTACIONES EN LAS EXCAVACIONES POR FLUJO SUBTERRÁNEO	11
II.4.5. PERMEABILIDAD DE DIFERENTES SUELOS	13
II.4.6. LEY DE DARCY	13
II.4.7. SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS	14
II.4.8. ECUACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	15
II.4.9. TÉCNICAS DE CONTROL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	17
II.4.10. ETAPAS DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO SUBTERRÁNEO	18
II.4.11. SISTEMA WELLPOINT	19
II.4.12. COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE CONTROL DE AGUA SUBTERRÁNEA	21

II.4.13. MODELADO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO.	21
II.4.14 APLICACIONES Y OBJETIVOS DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
II.4.15. MODFLOW Y MODELMOUSE	24
II.4.16. INFORMACIÓN NECESARIA PARA REALIZAR UN PROYECTO DE ABATIMIENTO.....	25
II.5. MARCO LEGAL.....	26
III. PROYECTO DE INTERVENCIÓN	28
III.1. OBJETIVOS GENERALES.....	28
III.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
III.3. JUSTIFICACIÓN.....	28
III.4. METODOLOGÍA	29
III.4.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES	29
III.4.2. ESTUDIOS E INGENIERÍA BÁSICA	29
III.4.3. ESTUDIOS E INGENIERÍA DE DETALLE	30
III.4.4. RECURSOS TÉCNICOS Y PROCEDIMIENTOS	30
III.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
III.5.1. MÉTODOS Y MODELOS DE ANÁLISIS DE LOS DATOS SEGÚN TIPO DE VARIABLES.....	31
III.5.2. PROGRAMAS A UTILIZAR PARA ANÁLISIS DE DATOS.....	31
III.6. CASO DE ESTUDIO “TORRE TRES RÍOS” CULIACÁN, SINALOA.	32
III.6.1. MODELO CONCEPTUAL	32
III.6.2. PROYECTO EJECUTIVO Y ANTECEDENTES.....	32
III.6.3. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	39
III.6.4. IMPLEMENTACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....	41

III.6.5. DISEÑO	41
III.6.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO	48
III.6.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO	49
III.6.8. EVALUACIÓN	73
III.7. DISEÑO DEL SISTEMA WELLPOINT	73
IV. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN	75
IV.1. PLAN DE ACCIÓN	75
IV.2. ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO.....	75
V. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO	78
V.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	78
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	85
PLANO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	85
GRÁFICA DEL REGISTRO DE AFORO.....	86
MÉTODOS DE ÁNALISIS DE ENSAYOS DE BOMBEO.....	87
CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO	88
BALANCE EN LA ZONA.....	89

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. 3° nivel de wellpoint.	6
Ilustración 2. 4° nivel de wellpoint insuficiente.	6
Ilustración 3. Diseño del sistema de abatimiento.	7
Ilustración 4. Puerto de Ngqura. Vista satelital.	7
Tabla 1. Investigaciones recientes sobre abatimiento de nivel freático	8
Ilustración 5. Flujo subterráneo.	9
Ilustración 6. Tipos de acuíferos.	10
Ilustración 7. Deslizamiento de talud.	11
Ilustración 8. Sifonamiento del suelo.	12
Ilustración 9. Levantamiento de fondo.	12
Tabla 2. Coeficiente "k" de permeabilidad en suelos	13
Ilustración 10. Esquema para la deducción de flujo transitorio	16
Ilustración 11. Rango de aplicación de técnicas para control de flujo subterráneo mediante bombeo.	17
Ilustración 12. Sistema wellpoint y ejemplar de punta de lanza.	20
Ilustración 13. Esquema conceptual sistema wellpoint	20
Tabla 3. Comparativa entre sistemas de control de agua subterránea	21
Ilustración 14. Modelo evaluado por Diferencias Finitas y Elementos Finitos	23
Ilustración 15. MODFLOW-MODELMUSE.	25
Ilustración 16. Torre Santa María – Torre Tres Ríos.	32
Ilustración 17. Desarrollo Urbano Tres Ríos (Torre Tres Ríos señalada).	33
Ilustración 18. Acuífero Río Culiacán.	34
Ilustración 19. Elevación del nivel estático en msnm (2010).	35
Ilustración 20. Estratigrafía representativa de la zona de estudio.	36
Ilustración 21. Zona de estudio ubicada en SIATL.	37
Tabla 4. Tabla de datos climatológicos representativos de la zona de estudio (SIATL).	37
Ilustración 22. Gráfica de datos climatológicos de la zona.	38
Ilustración 23. Curvas de nivel – Topografía de la zona de estudio.	38
Ilustración 24. Superficie generada a partir de las curvas de nivel de la zona de estudio.	39
Tabla 5. Resumen del modelo hidrogeológico.	40

Ilustración 25. Malla definitiva utilizada para la modelación eje XY.	42
Ilustración 26. Estratigrafía considerada para el modelo matemático.	43
Ilustración 27. Modelo en sus diferentes planos y vista tridimensional.	43
Ilustración 28. Modelo con condiciones de frontera Norte – Sur (Estado Estacionario).	45
Ilustración 29. Elevación del nivel estático (msnm) en condiciones iniciales, estado estacionario.	49
Ilustración 30. Resultados gráficos del modelo en estado estacionario.	50
Ilustración 31. Elevación nivel estático estado transitorio (Enero).	50
Ilustración 32. Elevación nivel estático estado transitorio (Febrero).	51
Ilustración 33. Elevación nivel estático estado transitorio (Marzo).	51
Ilustración 34. Elevación nivel estático estado transitorio (Abril).	52
Ilustración 35. Elevación nivel estático estado transitorio (Mayo).	52
Ilustración 36. Elevación nivel estático estado transitorio (Junio).	53
Ilustración 37. Elevación nivel estático estado transitorio (Julio).	53
Ilustración 38. Elevación nivel estático estado transitorio (Agosto).	54
Ilustración 39. Elevación nivel estático estado transitorio (Septiembre).	54
Ilustración 40. Elevación nivel estático estado transitorio (Octubre).	55
Ilustración 41. Elevación nivel estático estado transitorio (Noviembre).	55
Ilustración 42. Elevación nivel estático estado transitorio (Diciembre).	56
Tabla 6. Niveles piezométricos observados en campo.	56
Ilustración 43. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Enero).	57
Ilustración 44. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Febrero).	57
Ilustración 45. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Marzo).	58
Ilustración 46. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Abril).	58
Ilustración 47. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Mayo).	59
Ilustración 48. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Junio).	59
Ilustración 49. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Julio).	60
Ilustración 50. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Agosto).	60
Ilustración 51. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Septiembre).	61
Ilustración 52. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Octubre).	61
Ilustración 53. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Noviembre).	62

Ilustración 54. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Diciembre).	62
Ilustración 55. Ubicación del pozo de observación.	63
Tabla 7. Nivel simulado – nivel observado.	63
Ilustración 56. Gráfica de calibración datos observados – datos simulados.	64
Ilustración 57. Ubicación de los pozos – Propuesta sistema wellpoint “Torre Tres Ríos”.	65
Ilustración 58. Nivel freático con sistema wellpoint (Enero).	66
Ilustración 59. Nivel freático con sistema wellpoint (Febrero).	67
Ilustración 60. Nivel freático con sistema wellpoint (Marzo).	67
Ilustración 61. Nivel freático con sistema wellpoint (Abril).	68
Ilustración 62. Nivel freático con sistema wellpoint (Mayo).	68
Ilustración 63. Nivel freático con sistema wellpoint (Junio).	69
Ilustración 64. Nivel freático con sistema wellpoint (Julio).	69
Ilustración 65. Nivel freático con sistema wellpoint (Agosto).	70
Ilustración 66. Nivel freático con sistema wellpoint (Septiembre).	70
Ilustración 67. Nivel freático con sistema wellpoint (Octubre).	71
Ilustración 68. Nivel freático con sistema wellpoint (Noviembre).	71
Ilustración 69. Nivel freático con sistema wellpoint (Diciembre).	72

I. INTRODUCCIÓN

I.1. PRESENTACIÓN

El abatimiento de nivel freático es un proceso en el área de la Ingeniería Civil que permite mediante las técnicas adecuadas disminuir el nivel estático del agua subterránea, utilizado en zonas donde el acuífero se encuentra por encima de la cota de interés, de tal forma que se pueda realizar la excavación y cimentación del proyecto en condiciones secas, con mayor estabilidad y seguridad.

La modelación matemática se ha aplicado desde hace varios años, incluyendo los sistemas de aguas subterráneas. Debido a la gran variabilidad y elevada complejidad que puede presentarse en el flujo subterráneo se han ido mejorando las metodologías de análisis con el propósito de representar el comportamiento del sistema subterráneo de la manera más apegada a la realidad. En el área de hidrogeología es posible evaluar la respuesta que sufriría un sistema ante cambios inesperados de tal forma que puede analizarse la capacidad predictiva del mismo y así realizar un plan para actuar y mitigar antes de que éste pueda ocasionar alguna afectación al proyecto.

El proyecto de intervención que se mostrará en el presente documento consiste en el desarrollo de un modelo matemático ubicado dentro del acuífero Río Culiacán con clave 2504 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el Desarrollo Urbano Tres Ríos en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, donde se verá el comportamiento que tiene el abatimiento del nivel freático mediante sistema wellpoint y así conocer la interferencia que ocasionan los pozos para el proyecto de la Torre Tres Ríos para de esa manera con los resultados obtenidos se pueda diseñar un sistema wellpoint definitivo que permita controlar el flujo subterráneo del sitio. El modelo será evaluado con el código numérico de diferencias finitas MODFLOW 2005 y la interfaz gráfica MODELMOUSE, ambas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), el diseño del sistema wellpoint se basa principalmente en el manual C750 “Groundwater control: design and practice” de la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA por sus siglas en inglés “Construction Industry Research and Information Association”).

El objetivo del presente es analizar la predicción del modelo para poder diseñar un sistema wellpoint que permita controlar de forma eficiente el flujo subterráneo y pueda ser un proyecto ejemplo para poder estandarizar el proceso de abatimiento del nivel freático considerando la metodología en la intervención y aplicando los conocimientos para llevarlos a la práctica, pasando de la forma “convencional” a un proceso más óptimo, considerando siempre los factores de que cada proyecto es distinto y se debe evaluar cada aspecto mencionado en el documento.

A continuación se presenta una breve reseña de los capítulos que conforman el documento:

- Introducción, en donde se expone un panorama de la situación que se va a tratar, el problema, la intención y el alcance del proyecto.
- Fundamento teórico, que contextualiza la situación de los procedimientos para el abatimiento del nivel freático, el comportamiento del flujo subterráneo, leyes que la gobiernan, así como sus ecuaciones, ejemplos de proyectos que abordan dicha temática y el marco legal que lo sustenta.
- Proyecto de intervención, donde se describen los objetivos del proyecto, explica la naturaleza e importancia para la que el proyecto merezca ser realizado, la forma en cómo se realizará (procedimientos o técnicas), las características importantes a destacar para el desarrollo del mismo y el análisis de los resultados obtenidos.
- Estrategias de implementación, que describe la manera en cómo se debe implementar los elementos que fueron identificados en el análisis de resultados y darlo a conocer para que el sector de la construcción pueda participar y beneficiarse de los beneficios al llevar a la práctica el abatimiento del nivel freático.
- Administración del proyecto, que muestra el calendario y recursos necesarios para ejecutar el proyecto de intervención.
- Conclusiones y recomendaciones, donde se exponen las ideas esenciales a las que se llegó después de plantear el proyecto, iniciativas que no se encuentran dentro del alcance del proyecto pero pueden ser consideradas para futuros proyectos.
- Referencias, que lista las fuentes citadas para sustentar y desarrollar el proyecto.
- Anexos, cuya sección permite conocer a fondo aspectos específicos que en el desarrollo del cuerpo principal no conviene ser tratado.

I.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO

La presencia del nivel freático en un proyecto de construcción puede generar muchos conflictos, afectando desde la excavación, diseño de cimentaciones, muros, estructuras y el mismo proceso de construcción, dando lugar a retrasos y rediseños importantes en el proyecto.

Los estudios hidrológicos, geotécnicos e hidrogeológicos nos proporcionan información acerca de la profundidad del nivel freático y las posibles variaciones que pueda presentar.

Para trabajar en seco en el fondo de una excavación, es preciso el abatimiento del nivel freático de modo que el agua se filtre a través de elementos de drenaje o agotamiento.

En construcciones bajo esta condición del nivel freático es necesario considerar la fuerza actuante del agua en el suelo, los ciclos de carga y descarga, las expansiones y contracciones que puedan presentarse debido a los cambios de humedad en el suelo.

Al momento de abatir el nivel freático de una construcción es normal que las paredes de excavación lleguen a ser inestables, o que la zona excavada empiece a inundarse.

Hoy en día, la mayoría de los abatimientos de nivel freático donde se presentan estos problemas en Sinaloa, los técnicos utilizan pozos de aforo para “determinar” el gasto y la potencia de la bomba que se debe usar para controlar el nivel freático, sin embargo cuando

éste varía y que no se presta atención a las causas de carga y descarga, usan bombas de mayor o menor potencia, como si fuera a “prueba y error” la selección de bomba y control del nivel freático, ¿será una solución eficiente para el problema planteado?, ¿cuál es el conocimiento que hay sobre el problema entre las personas que realizan este tipo de procedimientos?, ¿qué no se ha logrado conocer, determinar o verificar para estandarizar un proceso? A manera de encontrar un diseño eficiente de un sistema para abatir y controlar el nivel freático mediante el uso de sistemas wellpoint se realizará el presente proyecto de intervención.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

II.1. HIPÓTESIS

La aplicación de la modelación numérica servirá como herramienta para el diseño de un sistema wellpoint que resolverá los problemas de filtración de agua subterránea en la excavación, asentamientos en predios vecinos, ayudará a controlar la estabilidad del talud de las excavaciones, aportará seguridad y mayor control a los procesos constructivos del proyecto así como también será útil para la toma de decisiones en el proceso de abatimiento controlado del nivel freático.

II.2. MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL

El esfuerzo del hombre para controlar el agua precede a lo largo de la historia, desde las ruinas de las civilizaciones de Babilonia y Egipto donde existe evidencia de acueductos, túneles y sistemas de abastecimiento de agua, las obras principalmente eran destinadas a suministrar agua ya que es un recurso vital para las civilizaciones sin embargo es importante mencionar que si el agua era trasladada a lugares donde no había, significa que se tuvo que desecar o dejar de abastecer otro lugar donde había agua, por lo tanto hubo una deshidratación implícita para abastecerlas.

Los antiguos sistemas para abastecimiento de agua trabajaban bajo el transporte por gravedad, donde era posible el control de los niveles del suelo, obras de construcción y excavaciones que hacían práctico el paso del agua hacia su destino. Con el tiempo, las técnicas e implementación de dispositivos mecánicos se fueron desarrollando gradualmente.

Uno de los principales promotores de que se realizara investigaciones e innovaciones en ésta área, fue sin lugar a dudas la minería; la búsqueda de oro, plata, cobre, hierro, carbón hizo que en el siglo XVIII junto con la Revolución Industrial, se desarrollaran nuevos sistemas donde se aprovechaba no sólo la fuerza humana, de animales o incluso del viento, sino que la implementación de motores que a pesar de no ser muy eficientes comparados con los estándares actuales, cumplían y satisfacían las necesidades que requería y el costo era menor que la mano de obra de los trabajadores y los animales, Watt quien diseñó el motor clasificó cada uno según el número de caballos que reemplazó, el término caballos de fuerza aún persiste en la actualidad.

Las innovaciones que trajeron consigo la Revolución Industrial y a medida que los científicos iban haciendo descubrimientos en mecánica, química, física y electricidad, los ingenieros iban logrando progresos en la construcción, transporte, comunicación y el entendimiento de las cosas que nos rodean.

El misterio del flujo de agua subterránea se mantuvo envuelto durante el siglo XIX en los procesos, hasta que Darcy en 1856, declaró su ley de flujo de fluidos a través de medios porosos y se empezaron a aplicar en algunos de los procesos.

En el siglo XX todavía con las leyes existentes apuntaban y se creía que los flujos de agua subterránea eran desconocidos, irracionales, no se podían determinar; a la fecha, existen personas que fungen como “adivinos del agua” quienes utilizan palos bifurcados, varillas de latón o péndulos para la localización de corrientes subterráneas. La gente que tiene conocimiento en el área el término “Hidrología” viene a la mente, donde se pueden tener conocimientos y aplicaciones de las mismas para poder definir potenciales acuíferos y simplificar algunos patrones mediante la observación, sin embargo no es fácil discernir y mucho menos ver cómo se comporta el movimiento de las aguas subterráneas hasta que nos encontramos con ellas en alguna excavación o que por cuenta propia empieza a emerger del suelo.

Durante este siglo, el predrenaje mediante pozos y zanjas siguieron aplicándose principalmente en Europa, en los cuales hubo situaciones favorables y otras donde hubo fracasos. Al final del siglo, los wellpoint empezaron a surgir, lanzas de diámetro pequeño conducidas en la tierra y conectadas a un sistema de succión. Fue hasta el año 1901 donde se realizó una desecación exitosa a través de wellpoints en una arena limpia, de tamaño fino y medio en Gary, Indiana.

Con el paso del tiempo, se introdujeron varios conceptos innovadores, como los puntos de referencia que tenían alta área de infiltración y se pretendía localizar los pozos en esos lugares para tener mayor eficiencia y se empezaron a utilizar en los pozos, filtros de arenas para estabilización de la misma. Gracias a esto, las técnicas de desecación comenzaron a desarrollarse rápidamente mediante uso de válvulas, bombas centrífugas, bombas de vacío, se innovaron las técnicas de instalación.

En 1930, los pioneros de estos procesos de desecación: Thomas Gill y Byron Prugh, junto con los pioneros en Mecánica de Suelos: Terzaghi, Casagrande, Taylor y Peck, proponían teorías y realizaban investigaciones de laboratorio para dar soporte a los procesos de desecación.

Todas estas investigaciones, innovaciones y avances hicieron que los ingenieros cada vez intentaran excavaciones más y más profundas, en esos tiempos para la búsqueda de petróleo, y abastecimiento de agua, pero debe reconocerse que el proceso de desecación, tiene que reducirse a bases científicas, si en la práctica se desea asegurar el éxito.

A medida que iba evolucionando la tecnología e innovaciones de desecación, los métodos de control de flujo de agua subterránea se iban descubriendo. El suelo, el agua y las demandas de estos tipos de proyectos son muy variables, por lo que requieren ser analizados meticulosamente.

Cualquier conclusión que basemos en teoría, siempre debe ser considerada también por el juicio y la experiencia. El practicante exitoso de estos métodos de desecación, es la persona que entiende la teoría y la respeta, pero que se niega a dejar que la teoría anule el juicio. Cuando lo teórico coincide con el juicio práctico y experiencia, el ingeniero procede a realizar el proceso con seguridad y confianza, por otro lado, cuando hay desacuerdo, se debe tener precaución hasta que se entiendan las partes. Considerando la teoría y el juicio práctico, la desecación puede realizarse bajo cualquier condición.

A lo largo de la historia han existido procesos de remover el agua del suelo por medio de pozos, lanzas, zanjas u otros dispositivos que van desde monumentos reconocidos mundialmente como lo puede ser la Torre Eiffel en París, Francia, hasta la actualidad como la torre Tres Ríos en la ciudad de Culiacán, Sinaloa en México.

II.3. ESTADO DEL ARTE

Los elementos conceptuales que se relacionan de manera directa con el proyecto de intervención, son los factores que influyen en el flujo de agua subterránea y los procedimientos realizados para abatir o controlar dicho flujo de manera que se puedan realizar los trabajos de construcción.

A manera de una reseña histórica sobre el nivel de desarrollo alcanzado por investigaciones y proyectos, se tratarán algunos proyectos que son de interés para el desarrollo y evolución del presente proyecto de intervención.

Uno de los más grandes proyectos en 1990 en Kuwait fue la mejora de la planta de tratamiento de aguas residuales en Jahra, una ciudad a 30 km de Kuwait. El proyecto incorporaba la construcción de una estación de bombeo para recoger las aguas residuales a través de una línea de red en toda la ciudad. El nivel freático se encontraba a 4 m bajo la superficie del suelo y las especificaciones decían que se debía bajar 16 m dicho nivel, lo cual significaba 20 m debajo de la superficie.

Para realizar el proyecto se evaluó un sistema wellpoint de 4 niveles para realizar la excavación abierta en donde se “garantizaba” que no se tendría problemas con el nivel freático en la excavación, sin embargo el uso de fórmulas empíricas para el cálculo de la conductividad hidráulica del sitio, no fue similar en la práctica; siendo el resultado con la fórmula de Hazen de 30 l/s y en la práctica se obtuvo 150 l/s, cinco veces mayor que la calculada. El sistema que se estaba llevando a cabo no era el adecuado para las condiciones.



Ilustración 1. 3° nivel de wellpoint.



Ilustración 2. 4° nivel de wellpoint insuficiente.

El uso de fórmulas empíricas para determinar la conductividad hidráulica debe evaluarse cuidadosamente en relación con la geología e hidrología del sitio antes de que pueda usarse para diseñar un sistema de abatimiento de nivel freático (Shaqour y Hasan, 2008).

En el año de 2002, la Autoridad de Puertos Nacionales de Sudáfrica adjudicó un contrato para la construcción del puerto de Ngqura, el contrato tenía incluido el diseño de las obras temporales, incluido el abatimiento del nivel freático.

Se realizaron estudios geohidrológicos y el proyecto fue ideal para la implementación del método observacional, propuesto por Terzaghi y desarrollado por Peck en 1969, cuya definición según el documento CIRIA 185 como “un proceso de diseño continuo, gestionado e integrado, de control, monitoreo y evaluación de la construcción, que permite a modificaciones previamente definidas, ser incorporadas durante o después de la construcción, según corresponda. Todos estos aspectos tienen que ser demostrablemente robustos. El objetivo es lograr una mayor economía en general sin comprometer la seguridad” (Nicholson et al., 1999).

El método observacional, es de una manera práctica un método de prueba y error.

Con los resultados obtenidos del estudio geohidrológico, se diseñó, modeló e implementó un sistema de abatimiento que constaba de 43 pozos profundos perimetrales espaciados a 50 metros, 28 pozos profundos internos colocados en dos líneas paralelas fuera de la excavación, 12 bombas de superficie que drenaban zanjás internas y un muro rompeolas de cemento de bentonita de aproximadamente 1.2 km y 20 m de profundidad (Vermeulen y Day, 2005).

Donde los pozos perimetrales actuaban como una barrera del flujo subterráneo para la excavación de los límites externos al mar, el muro rompeolas para la recarga del mar, y los pozos profundos internos para vaciar el agua en el área principal de la excavación.

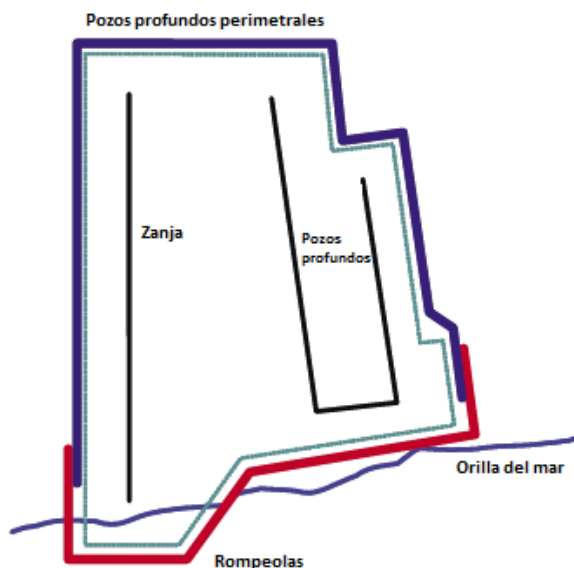


Ilustración 3. Diseño del sistema de abatimiento. Ilustración 4. Puerto de Ngqura. Vista satelital.

La participación de México en estos temas de investigación y proyectos, es escasa. En forma práctica se utilizó en la ciudad Culiacán, Sinaloa, México, la construcción de la Torre Tres Ríos ubicada en Boulevard Lic. Diego Valadés, un edificio de 21 niveles con área comercial y oficinas.

Los estudios hidrológicos y de mecánica de suelos permitieron idealizar el comportamiento del nivel freático, que inicialmente se encontraba a una profundidad de 7 metros para el mes de julio, subió a los 4.26 metros en octubre; respuesta del acuífero ante los efectos de la recarga producida por la temporada de lluvias y la influencia del Río Tamazula, mientras que para noviembre, éste ya se encontraba por debajo de los 4.80 metros, lo que hace referencia que el acuífero se encuentra en proceso de descarga. (Cueto, 2010)

Para este proyecto en particular, era necesaria la construcción por debajo del nivel freático, por lo que se tuvo que hacer un rebajamiento del nivel debido a que el comportamiento del flujo subterráneo tenía recargas por la precipitación pluvial y la influencia del Río Tamazula, y también de descarga como las salidas por flujo horizontal y evapotranspiración.

El sistema utilizado fue pozos profundos, distinto al wellpoint o pozos punta, la decisión tomada y el inapropiado control del nivel freático ocasionó inconvenientes en la estabilidad de la excavación y en el predio vecino donde se presentaron asentamientos, debido tal vez a la mala práctica del pozo profundo, donde con una debida planeación y control pudo haber sido un factor determinante para el éxito del proyecto.

Este tipo de problemática es latente a nivel global y se han realizado investigaciones a través de modelos matemáticos para determinar flujos de agua subterránea y la optimización de los sistemas de abatimiento para el control del nivel freático y es donde le da lugar al presente proyecto de intervención. Por mencionar algunas investigaciones recientes:

Tabla 1. Investigaciones recientes sobre abatimiento de nivel freático

Título de la Investigación	Año	Autor
Control de las aguas subterráneas en la ingeniería civil. Interacción entre la obra y el medio hidrogeológico, síntesis de métodos de control y aplicación de modelos matemáticos.	2010	Ferrer Granell
Optimización de un abatimiento del nivel freático para una excavación mediante el programa Modflow	2015	Hidalgo Pérez
Métodos de abatimiento del nivel freático	2015	Rodríguez, Andrés
Aplicación de la modelación matemática del flujo del agua subterránea a la ingeniería civil. Estudio del rebajamiento de niveles piezométricos en el delta del Llobregat	2018	Muñoz del Prado

En México, se han realizado proyectos donde se ha utilizado el sistema wellpoint para rebajar el nivel freático como lo son: la terminal petrolera Dos Bocas en el estado de Tabasco, reparaciones de líneas de agua potable en Cutzmala, el gasoducto “Los Ramones” que atraviesa el estado de Nuevo León, en Topolobampo para cruces carreteros y ferroviarios se realizó abatimiento de aguas y en la plaza “La Isla” en Cancún. Por lo tanto aplicación en México existe, sin embargo no hay cálculo de diseño ni ninguna normatividad o reglamento que lo regule.

II.4. MARCO TEÓRICO

En este apartado se presenta una recopilación de investigaciones previas y consideraciones teóricas que sustentan el proyecto, permitiendo la interpretación, análisis y evaluación de los resultados que se buscan y presentar las conclusiones.

II.4.1. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

El estudio del agua y su presencia en cualquiera de sus formas naturales, se le denomina hidrología, sin embargo los profesionales que se especializan en el agua subterránea son considerados como hidrogeólogos. (Cashman y Preene, 2001)

La hidrogeología estudia el origen, distribución, circulación y propiedades del agua que sirve para comprender el flujo de agua subterránea y así para fines del proyecto conocer su comportamiento y controlar el mismo con el sistema de abatimiento adecuado.

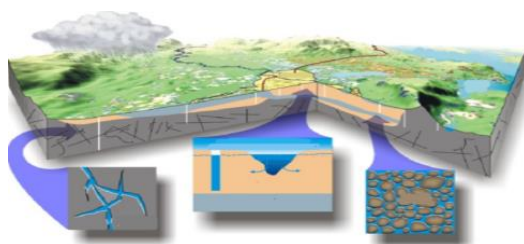


Ilustración 5. Flujo subterráneo

La mayor parte de las obras en la construcción se desplantan a una profundidad importante debajo de la superficie del terreno y es común que se requiera la excavación del suelo o roca hasta el nivel de resistencia necesaria. En suelos donde la construcción se ubica por debajo del nivel freático, que es el lugar donde las aguas subterráneas alcanzan un punto máximo de profundidad, es necesario disminuir dicho nivel para proceder con los procesos constructivos.

II.4.2. ACUÍFERO

Según la Ley de Aguas Nacionales, se entiende por acuífero a “cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo” (De la Federación, 1992)

En resumen, un acuífero es una formación geológica que almacena agua y es capaz de transmitirla de manera que pueda ser aprovechada como recurso.

Las características fundamentales de un acuífero son la baja velocidad en el flujo subterráneo, los grandes volúmenes de reserva y el tiempo de renovación del agua en el sistema.

Según el comportamiento hidráulico, los acuíferos se pueden clasificar en:

1. Acuífero libre.- No se encuentra limitado por un techo impermeable, por lo que se encuentra a cierta profundidad.
2. Acuífero confinado.- La parte superior se encuentra limitado por un techo impermeable, de manera que el agua se encuentra superior a la presión atmosférica.
3. Acuífero semiconfinado.- Es como el acuífero confinado, sin embargo, el techo es una formación geológica muy poco permeable.

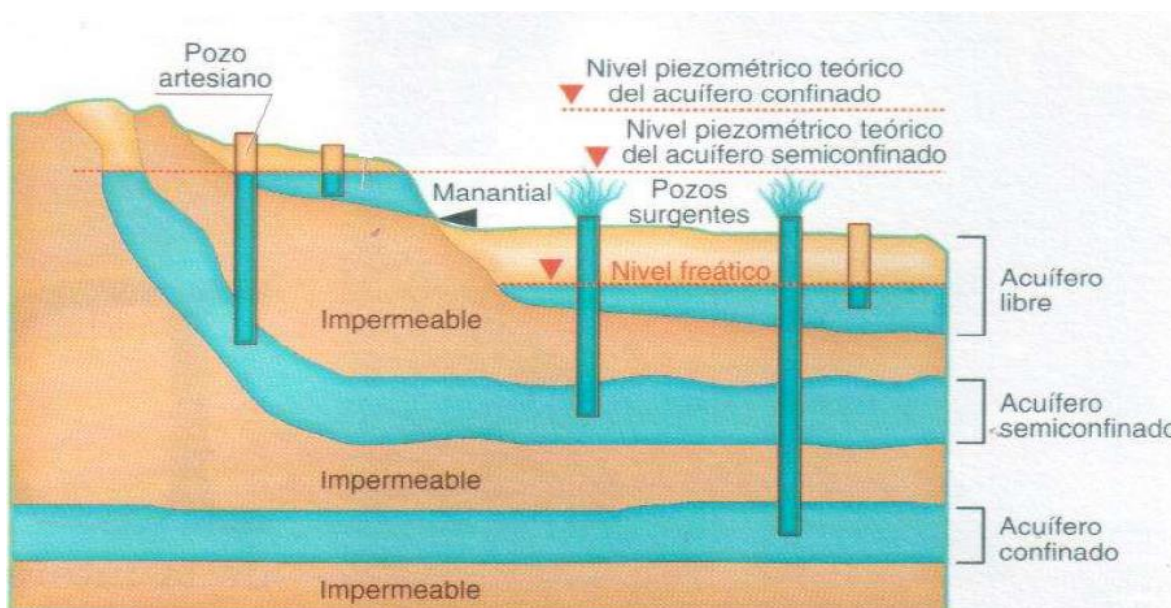


Ilustración 6. Tipos de acuíferos. (Hidalgo et al., 2015)

II.4.3. FLUJO DE AGUA EN SUELOS HACIA LAS EXCAVACIONES

Según Angelone, Garibay y Casaux, el agua en suelos proviene de distintas fuentes: Agua de sedimentación, es aquella incluida en suelos al depositarse en sus partículas y el agua de infiltración, como lluvias, corriente de agua o hielos, mares, ríos, lagos, etc. (Angelone et al., 2006)

Las excavaciones que alcanzan profundidades mayores a la del nivel freático, requieren el abatimiento de ese nivel por debajo del desplante con la finalidad de evitar la erosión, la falla de taludes o para lograr la disminución de presión en los elementos de soporte provisionales que aseguren condiciones adecuadas para trabajar en seco.

Para abatir el nivel freático se toman en cuenta las características generales del suelo, una de las más importantes es la permeabilidad, dependiendo de ella puede requerirse bombear un volumen importante de agua en suelos muy permeables como gravas y arenas, o un volumen de agua mínimo en suelos poco permeables como las arcillas. En mecánica de suelos se le conoce con el símbolo de “ k ”.

En una publicación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en México, define la permeabilidad como “las propiedades de infiltración de las masas de tierra (roca y suelo)

que se determinan a partir del tamaño, la forma y el número relativo de conductos de agua, así como por las características de la interacción físico-química de las partículas sólidas del suelo con el flujo de infiltración”. (Zhilenkov et al., 1987).

II.4.4. POSIBLES AFECTACIONES EN LAS EXCAVACIONES POR FLUJO SUBTERRÁNEO.

Cuando una excavación se realiza por debajo del nivel freático, existe el riesgo de que sea inestable, se inunde o cause otras afectaciones si no se toman medidas para prevenirlo. A continuación se mostrarán algunas de las posibles afectaciones que pueden ocurrir:

- Deslizamiento de taludes.

Una forma de rotura habitual en los suelos por esfuerzo cortante. Unos de los factores que más afecta a la resistencia de corte de un suelo es el estado tensional del mismo y la presión intersticial del fluido que rellena sus poros. Si el suelo de un talud es drenado, se tendrá garantizada la estabilidad, caso contrario, si existen filtraciones hacia el talud, la presión intersticial crece y el talud será más tendido buscando el ángulo de reposo.

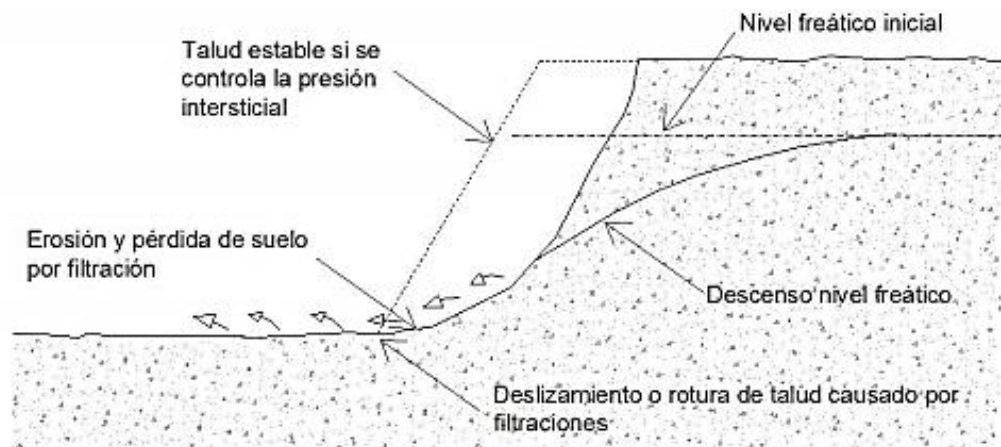


Ilustración 7. Deslizamiento de talud (CIRIA C750, 2016).

- Sifonamiento del suelo.

En esta situación, el suelo pierde toda su resistencia y pasa a tener un comportamiento como si fuera un fluido, también conocido como fludificación ocasionando un efecto similar a lo que se conoce como “arenas movedizas”.

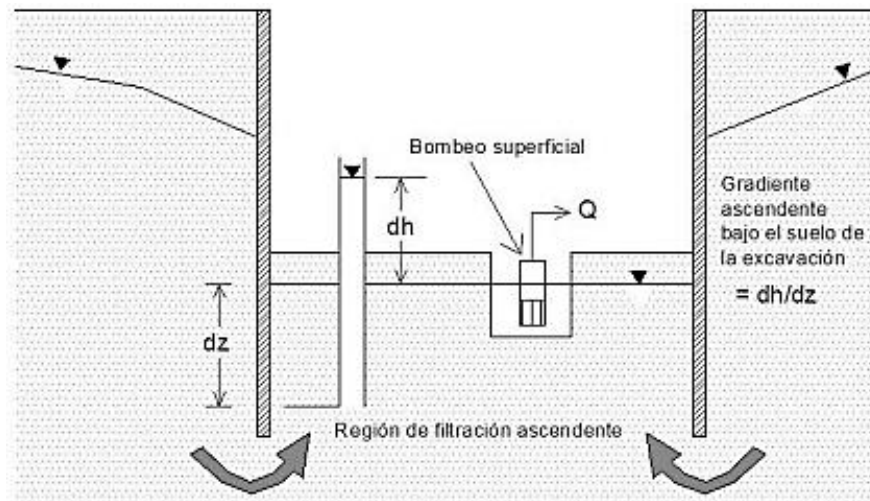


Ilustración 8. Sifonamiento del suelo (CIRIA C750, 2016).

- Levantamiento de fondo.

También conocido como rotura de fondo, sucede cuando el peso del estrato que ocupa el lugar de la excavación es de igual peso o menor que el empuje de subpresión generado por el flujo subterráneo.

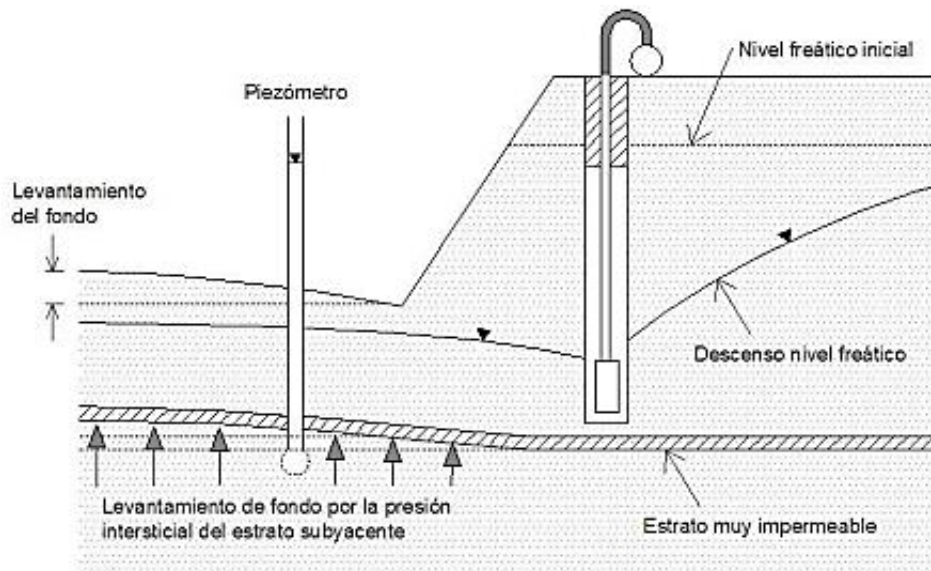


Ilustración 9. Levantamiento de fondo (CIRIA C750, 2016).

- Filtración de agua en el fondo de la excavación y/o sus laterales.

Es uno de los problemas más comunes al no considerar la posibilidad de filtración del flujo subterráneo o bien, realizar una mala praxis en la técnica para controlar el flujo, ya sea sistema de bombeo, muros pantallas o cualquier elemento que se plantee para prevenir la filtración del agua.

II.4.5. PERMEABILIDAD DE DIFERENTES SUELOS

La permeabilidad se define como la capacidad de un fluido para atravesar un medio poroso, considerando que los suelos no son sólidos ideales, sino que están formados normalmente por 2 o 3 fases, que pueden ser partículas sólidas, líquidas y gas, entonces es un medio poroso el cual permite el flujo subterráneo del agua; en la siguiente tabla se presentan los valores típicos del coeficiente de permeabilidad “k” de suelos granulares, suelos finos y mezclas de éstos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Tabla 2. Coeficiente "k" de permeabilidad en suelos (Juárez y Rico, 1976).

Suelo	k, cm/s
Grava uniforme (GP)	0.2 a 1 o más
Grava bien graduada (GW)	5×10^{-2} a 0.3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3} a 0.2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3} a 0.1
Arena limosa (SM)	10^{-3} a 5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4} a 10^{-3}
Limo (ML)	5×10^{-5} a 10^{-4}
Arcilla (CL)	10^{-5} a 10^{-8}
Arcillas coloidales (CH, OH)	10^{-8} a 10^{-10}

La permeabilidad en los suelos tiene un efecto decisivo sobre el costo y las dificultades que se pueden presentar en muchas operaciones constructivas, como lo puede ser una excavación; es por ello la importancia de estudiar y determinar las características del suelo.

II.4.6. LEY DE DARCY

El ingeniero Henry Darcy en 1856, presentó un informe sobre el flujo del agua a través de medios porosos, en el cual encontró que para velocidades pequeñas el caudal Q es:

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = k \cdot i \cdot A \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde: Q: caudal o gasto [cm^3 / seg]

∂V : variación del volumen en un diferencial de tiempo

∂t : diferencial de tiempo

k: coeficiente de permeabilidad [cm / seg]

i: gradiente hidráulico [adimensional]

A: sección transversal del filtro [cm^2]

Si se considera la ecuación de continuidad:

$$Q = v * A \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde: Q: caudal o gasto [cm^3 / seg]

v: velocidad [cm / seg]

A: área transversal [cm^2]

Es posible relacionarlos de tal forma que:

$$v = k * i \quad (\text{Ecuación 3})$$

Esa expresión es conocida como la Ley de Darcy en donde concluyó mediante experimentación que esa constante k, era propia y característica del medio poroso, aunque su nombre correcto es conductividad hidráulica.

El gradiente hidráulico es la relación entre la diferencia de nivel piezométrico entre dos puntos y la distancia entre ambos, medida según el recorrido del flujo.

La ley de Darcy es únicamente válida para el caso en que el régimen sea laminar. Para evaluar si el régimen es realmente laminar hay que acudir al denominado número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas de un fluido.

$$R_e = \frac{\rho * v * d}{\mu} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde: v = Velocidad del fluido

d = Tamaño medio de las partículas, se considera el d_{10} en medios granulares

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad dinámica

El flujo de agua en régimen laminar es válida para casi todos los fluidos que circulan lentamente a través de pequeños poros en el subsuelo.

II.4.7. SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS

El conjunto de acuíferos que confinan o semiconfinan a los niveles más permeables constituyen el sistema hidrogeológico de una determinada región.

Desempeñan dos funciones principales:

1. Almacenan importantes volúmenes de agua (función de embalse subterráneo), y
2. Transmiten el agua desde las áreas de recarga a las áreas de descarga (función de conducto subterráneo).

Un sistema hidrogeológico se dice que está en régimen permanente o estacionario cuando el potencial hidráulico permanece constante a lo largo del tiempo en todos sus puntos. Físicamente significa que en el sistema entra tanta agua como sale, y por lo tanto no hay variación en el almacenamiento.

Por el contrario un sistema hidrogeológico está en régimen transitorio o no permanente cuando el potencial hidráulico varía a lo largo del tiempo; indicando un estado de no equilibrio en el que el almacenamiento del sistema pierde o gana un cierto volumen de agua en el tiempo considerado.

II.4.8. ECUACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

En las Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Cimentaciones en el apartado 7.2.2. “Control de flujo de agua”, indica que el gasto y el abatimiento provocado por el bombeo se debe calcular mediante la teoría del flujo en régimen transitorio en el suelo y se debe escoger el sistema de acuerdo al tipo de suelo.

En un sistema, es común que cambie las situaciones en las que se encuentra, el cual tiene que evolucionar hasta alcanzar una situación de equilibrio en el tiempo (Hidalgo et al., 2015), para ello se considera esta ecuación donde está involucrado la ecuación de Darcy, Laplace y Poisson de manera general se interpreta así:

$$\text{Volumen saliente} = \text{Volumen entrante} - \text{Volumen extraído}$$

La ecuación de Laplace es la primera de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el flujo en medios porosos. Se refiere al flujo en condiciones de régimen permanente y en ausencia de fuentes y sumideros. Esta ecuación, como todas las ecuaciones del flujo en medios porosos, se obtiene aplicando conjuntamente la ecuación de la continuidad y la ley de Darcy. El flujo se estudia aceptando, de una parte, que la masa entrante debe ser igual a la saliente, y que ambas, dentro del medio poroso, están condicionadas por los planteamientos de Darcy.

Laplace no integra en sus planteamientos la existencia de fuentes y sumideros. Sin embargo, y aún en problemas de régimen permanente, es preciso incluir bombeos y recargas (fuentes y sumideros) asociados a problemas reales. La ecuación de Poisson de flujo en medios porosos en régimen permanente, y con posibilidad de integrar bombeos y recargas, puede desarrollarse con la ayuda del siguiente esquema:

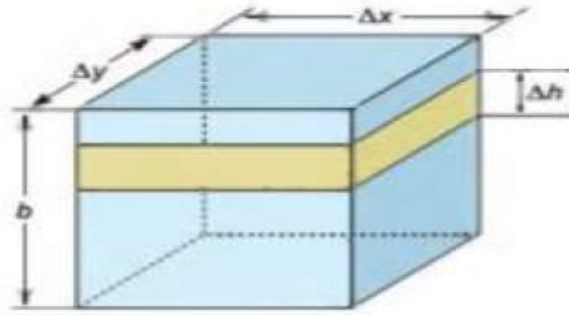


Ilustración 10. Esquema para la deducción de flujo transitorio (Hidalgo et al., 2015).

De tal manera que:

$$R(x, y) = \frac{Q}{\Delta x * \Delta y} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Y siendo:

$$T = k * b \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde: k = conductividad hidráulica

b = potencia del acuífero

Se obtiene la ecuación de Poisson:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -\frac{R(x, y)}{T} \quad (\text{Ecuación 7})$$

En donde si R(x,y) es positiva, existe una recarga y si es negativa, hay un bombeo. Todo lo dicho para la resolución de la ecuación de Laplace es válido para la de Poisson.

Sin embargo, esta última es más realista y completa y se ajusta mejor a la mayoría de los problemas reales que suelen presentarse.

La ecuación del flujo en régimen transitorio es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde: $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$: Suma de caudales entrantes por caras laterales

$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$: Volúmenes desalmacenados en la unidad de tiempo

$\frac{R(x,y,t)}{T}$: Bombeos o recargas en la unidad de tiempo

II.4.9. TÉCNICAS DE CONTROL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las técnicas disponibles para el control de aguas subterráneas se dividen en dos principales: Las que excluyen el agua mediante excavación y las que tratan el agua mediante bombeo (Cashman y Preene, 2001).

Cada técnica tiene variedad de sistemas o métodos empleados, por ello es necesario entender las ventajas y desventajas de cada uno y su mejora aplicación, como dice Powers “es esencial conocer las características del proyecto para el cual el control de agua subterránea se necesita” (Powers et al., 2007).

Para casos prácticos, se puede considerar el manual CIRIA C750, el rango de aplicación de técnicas mediante bombeo para el control del flujo subterráneo en suelos con permeabilidad definida y el rebajamiento del nivel freático deseado.

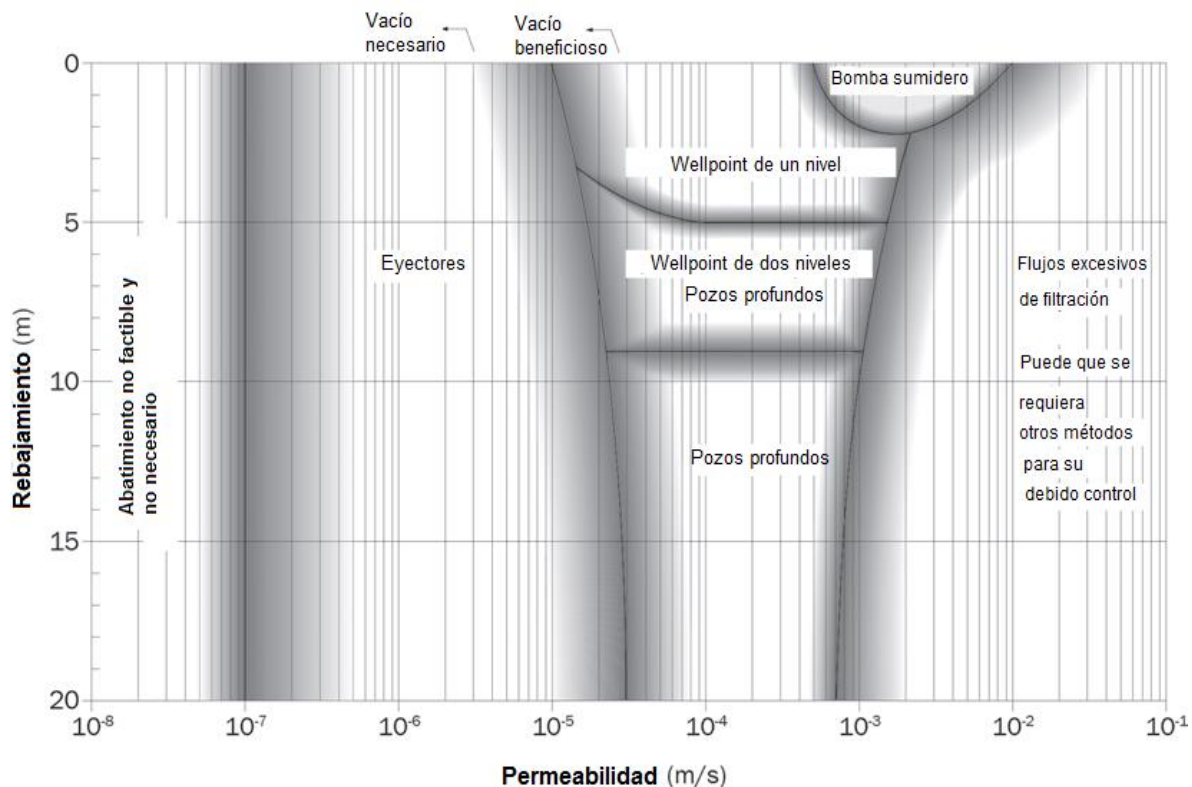
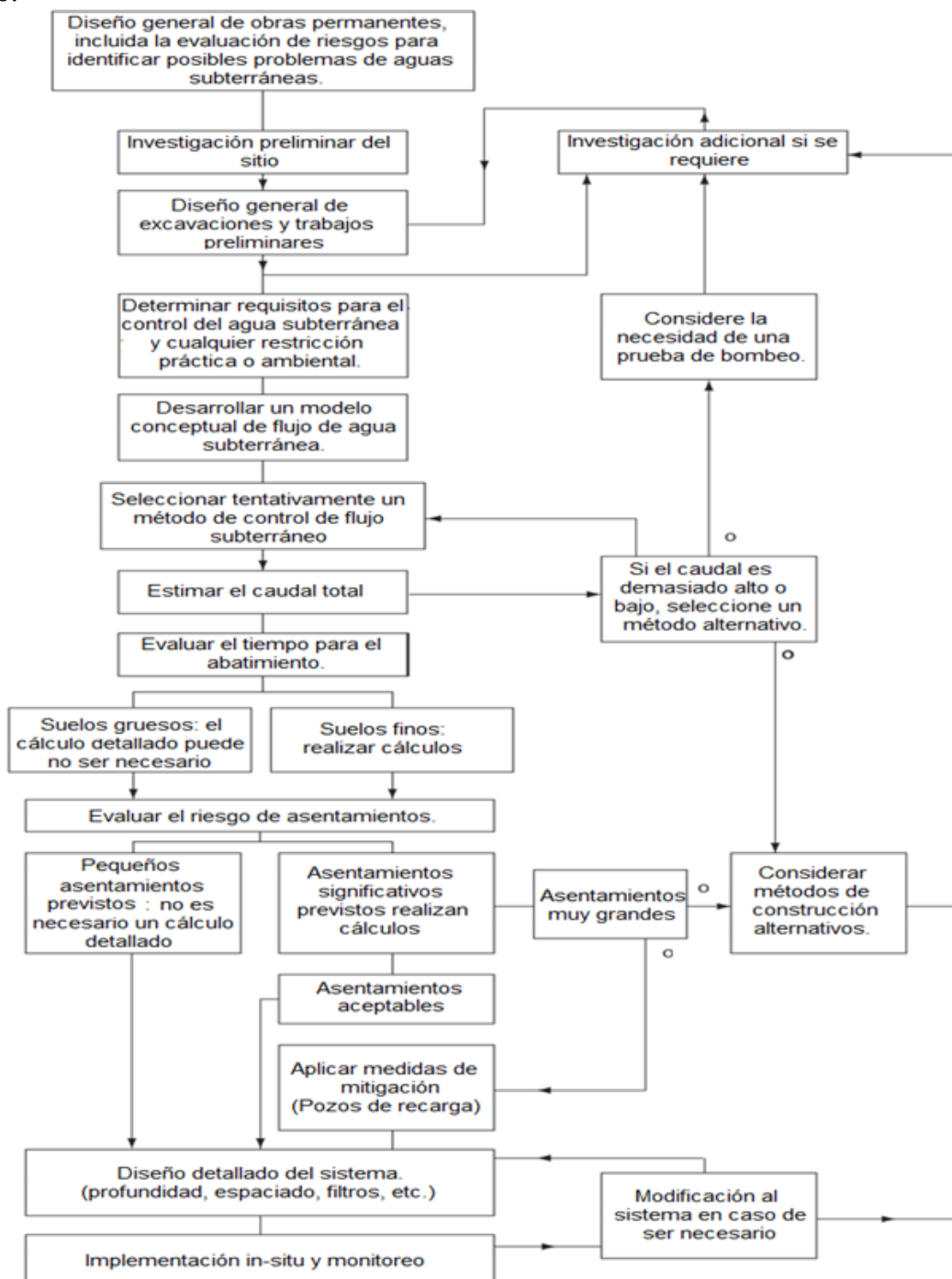


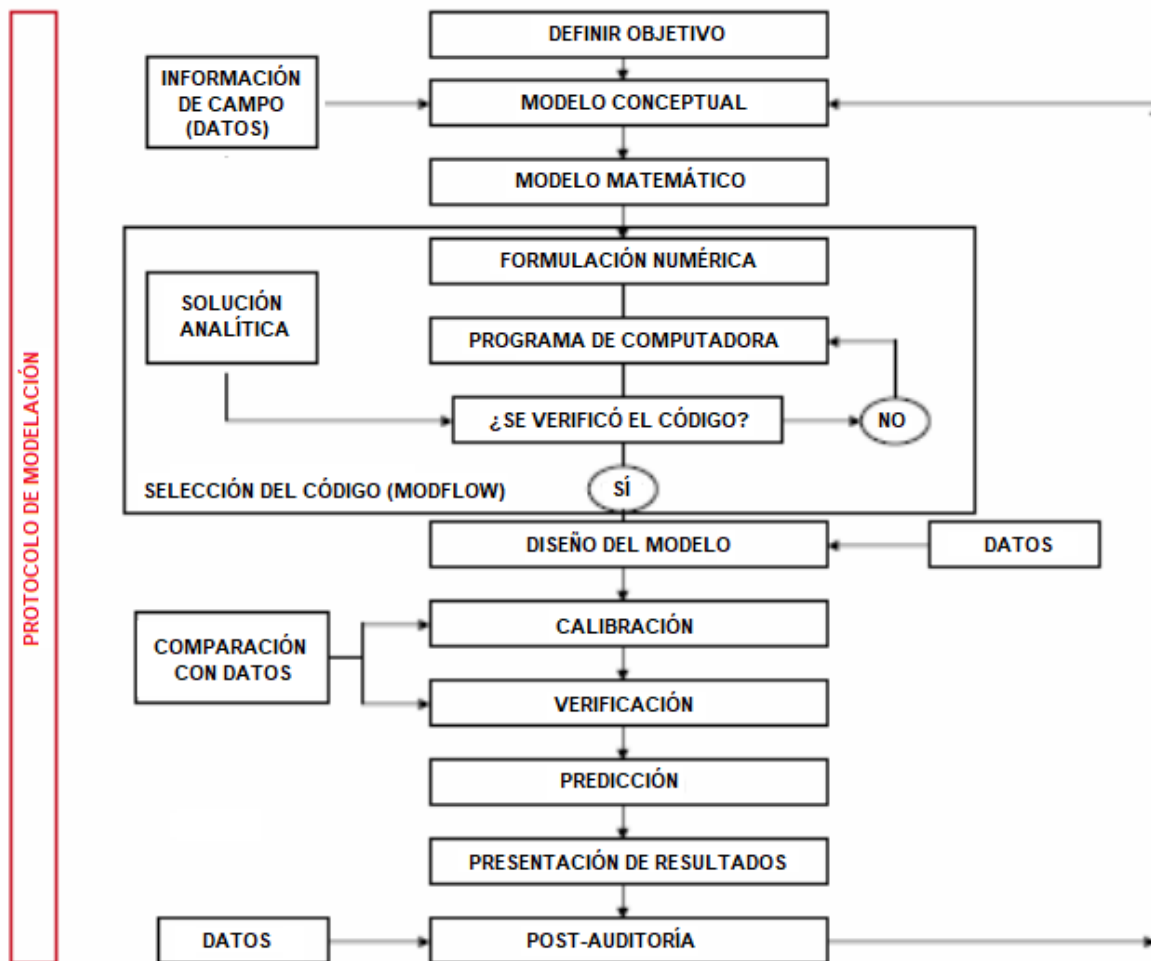
Ilustración 11. Rango de aplicación de técnicas para control de flujo subterráneo mediante bombeo (Preene et al., 2016).

II.4.10. ETAPAS DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO SUBTERRÁNEO

La idea sobre cómo se comportará el suelo y el flujo subterráneo se le conoce como modelo conceptual. Un modelo conceptual es la base de todos los diseños ya sea por método numérico o analítico. A continuación se presenta un diagrama mostrando las principales etapas del análisis y diseño para sistemas de control de flujo subterráneo según el manual C750:



En el cuadro de “Desarrollar un modelo conceptual de flujo de agua subterránea” radica gran parte del trabajo y se puede desglosar en el modelo hidrogeológico conceptual que es la información y caracterización de la zona de estudio, y su implementación dentro del modelo matemático por diferencias finitas del cual surge otro procedimiento que Anderson, Woessner y Hunt propusieron en el año 2015 y se presenta a continuación:



En donde de forma conjunta, una vez teniendo la información de campo necesaria para el modelo conceptual hidrogeológico, puede someterse al protocolo de modelación, analizar los resultados y si son favorables, proceder con las siguientes etapas que considera el manual C750.

II.4.11. SISTEMA WELLPOINT

El sistema forma parte del método por bombeo para control de aguas subterráneas, consiste en un equipo autoaspirante para el bombeo por vacío del agua en terrenos donde el nivel freático se encuentra por encima de la zona de trabajo.

Es un sistema eficaz que mediante lanzas hincadas en el terreno, aspira e impulsa las aguas del nivel freático, mediante una bomba de vacío, a través de conducciones y las lleva al punto de desagüe deseado.

Este sistema es aplicable a suelos cuyo coeficiente de permeabilidad varía de 10^{-2} a 10^{-4} cm/s lo que indica según la Tabla 1 del coeficiente de permeabilidad en suelos que funciona en arenas.

La principal ventaja que presenta el sistema wellpoint junto a su versatilidad para funcionar en diversos terrenos reside en los gradientes generados. Al tener múltiples lanzas en el sistema (el número de lanzas varía en función del terreno, tamaño de la obra y caudal a extraer, pero en general se instala el número adecuado para que haya una separación de 1 a 3 metros por lanza), los gradientes hidráulicos son muy pequeños puesto que se recoge agua desde muchos puntos, lo que es muy bueno y garantiza la estabilidad del flujo del acuífero.

Este sistema solo puede abatir el nivel freático hasta unos 6.0 m de profundidad, que es la máxima altura de succión posible por la presión atmosférica, sin embargo atendiendo el manual de CIRIA C750, lo recomendable es 5.0 m de profundidad, si se requiere el abatimiento a mayor profundidad se recomienda la instalación en un sistema de circuitos escalonados.

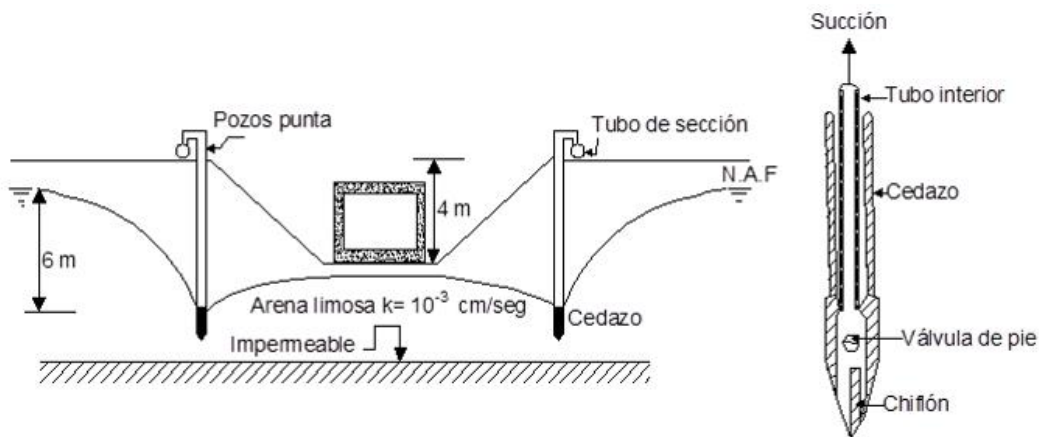


Ilustración 12. Sistema wellpoint y ejemplar de punta de lanza.

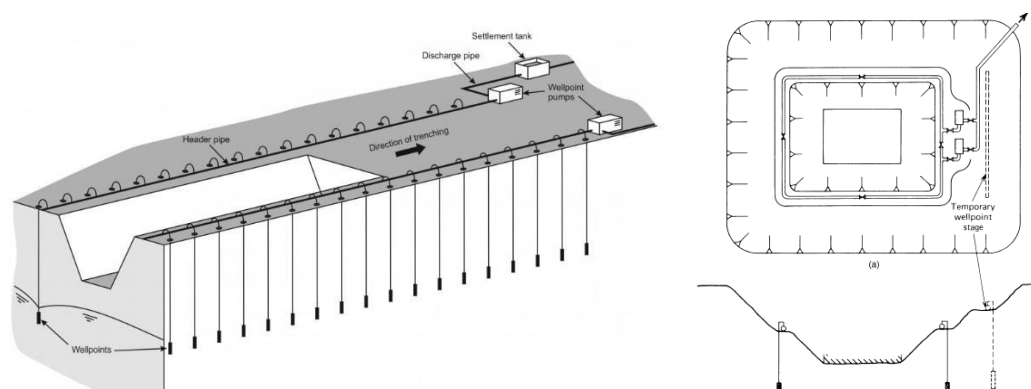


Ilustración 13. Esquema conceptual sistema wellpoint.

II.4.12. COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE CONTROL DE AGUA SUBTERRÁNEA

“Es esencial conocer las características del proyecto para el cual el control de agua subterránea se necesita” (Powers et al., 2007).

El proyecto donde se planee realizar un control de flujo subterráneo es importante conocer las características que tiene, sus alcances y también la eficiencia que tiene con respecto a otras técnicas, de tal forma que se escoja la técnica que mejor se ajusta al proyecto. Es por ello que la siguiente tabla muestra las técnicas, su eficiencia y características para ser utilizados:

Tabla 3. Comparativa entre sistemas de control de agua subterránea

CONDICIONES	WELLPOINT	POZO PROFUNDO	EYECTORES	DRENAJE HORIZONTAL
SUELO				
ARENAS LIMOSAS Y ARCILLOSAS	BUENO	POBRE A JUSTO	BUENO	BUENO
ARENAS LIMPIAS Y GRAVAS	BUENO	BUENO	POBRE	BUENO
SUELOS ESTRATIFICADOS	BUENO	POBRE A JUSTO	BUENO	BUENO
ARCILLA O ROCA	JUSTO A BUENO	POBRE	JUSTO A BUENO	BUENO
HIDROLOGÍA				
ALTA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	BUENO	BUENO	POBRE	BUENO
BAJA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	BUENO	POBRE A JUSTO	BUENO	BUENO
RECARGA PRÓXIMA	BUENO	POBRE	POBRE A BUENO	BUENO
RECARGA REMOTA	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO
TIEMPO				
ABATIMIENTO RÁPIDO	OK	INSATISFACTORIO	OK	OK
ABATIMIENTO LENTO	OK	OK	OK	OK
EXCAVACIÓN				
SUPERFICIAL (< 6M ABAJO DEL NIVEL FREÁTICO)	OK	OK	OK	OK
PROFUNDA (> 6M ABAJO DEL NIVEL FREÁTICO)	MÚLTIPLE NIVEL	OK	OK	EQUIPO ESPECIAL
CARACTERÍSTICAS				
ESPACIADO ENTRE POZOS	1 - 3 M	> 15 M	3 - 6 M	-
RANGO DE CAPACIDAD				
POR UNIDAD	0.4 - 95 L / MIN	0.4 - 11360 L / MIN	0.4 - 150 L / MIN	-
SISTEMA TOTAL	BAJO - 18930 L / MIN	BAJO - 227125 L / MIN	BAJO - 3785 L / MIN	BAJO - 7570 L / MIN
EFICIENCIA CON DISEÑO PRECISO	BUENO	JUSTO	POBRE	BUENO

II.4.13. MODELADO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO.

El modelo conceptual comprende la geometría y las condiciones del flujo de agua subterránea.

Un método de análisis basado en la aplicación directa de una solución teórica estándar (por ejemplo, de un libro de texto) se llama modelo analítico. En este se consigue una solución exacta para las ecuaciones que gobiernan el flujo de agua subterránea. No obstante, para poder encontrar dichas soluciones se deben de asumir varias hipótesis significativas que

acotan en gran medida el ámbito de aplicación a casos teóricos e ideales, y fijando las condiciones específicas del acuífero o condiciones de contorno invariables con el tiempo.

Por otra parte, se encuentra la modelación y análisis de acuíferos por medio de métodos numéricos. A diferencia de los modelos por métodos analíticos, los modelos numéricos renuncian a conocer cuál es la solución exacta de la ecuación diferencial, a cambio de poder encontrar una aproximación a ésta, y de transformar una ecuación diferencial en un conjunto de ecuaciones algebraicas con posibilidad resolutive.

Esta metodología permite el análisis de cualquier escenario y condiciones variables posibles (siempre que se respeten las consideraciones introducidas, sea un modelo con solución convergente válida y no genere problemas numéricos) y, dada la progresiva y exorbitante mejora computacional que se está viviendo en la sociedad, son los métodos más empleados y los que otorgan unos resultados más fiables. La selección del enfoque de modelado debe ser proporcional a la complejidad de las condiciones del proyecto.

En ingeniería geotécnica, generalmente es necesario hacer simplificaciones para llegar a un modelo de una situación real, que es susceptible de análisis. El secreto del éxito es no ignorar ningún factor, que podría destruir la aplicabilidad del modelo conceptual adoptado.

Para aplicar un modelo analítico que podría haberse realizado previamente a mano, usando una hoja de cálculo con rutinas de cálculo generalmente escrito por el diseñador del sistema para cada proyecto.

Para aplicar un modelo numérico, generalmente un paquete de modelado de aguas subterráneas escrito por un productor de software geotécnico, que permite límites y geometrías complejas. Dichos paquetes también pueden ofrecer alta calidad de información gráfica y permite que los cálculos se repitan fácilmente para estudios paramétricos.

Las etapas para el proceso de modelado son las siguientes:

1. Desarrollo del modelo conceptual.
2. Selección del software y configuración del modelo numérico.
3. Verificación y calibración.
4. Predicción y evaluación.

El modelo matemático a desarrollarse recurre a métodos numéricos que permiten resolver la ecuación del flujo en casi cualquier supuesto; dentro de la modelación hidrogeológica los métodos numéricos más conocidos y utilizados son: Método de Diferencias Finitas y de Elementos Finitos.

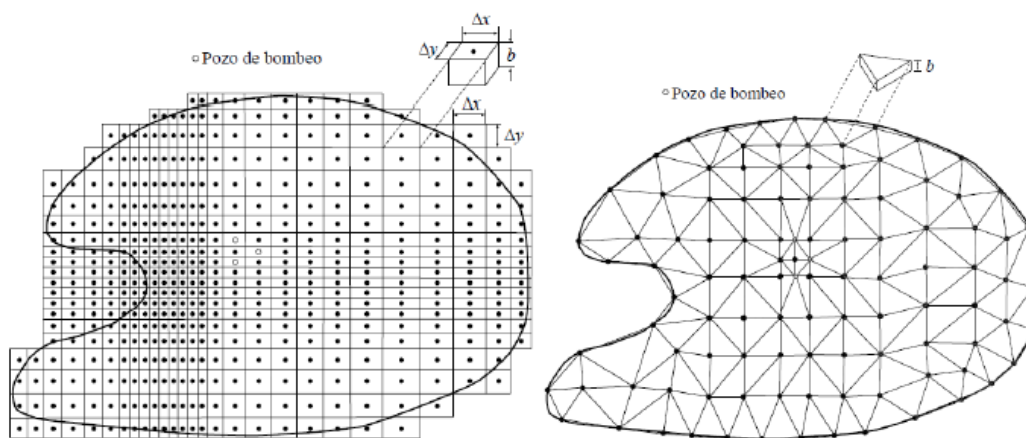


Ilustración 14. Modelo evaluado por Diferencias Finitas y Elementos Finitos. (Muñoz, 2018)

A continuación se presenta una tabla comparativa entre ambos métodos:

Método de las Diferencias Finitas	Método de los Elementos Finitos
Limitación en discretización del modelo. Uso muy extendido. Gran cantidad de documentación. Existencia de software de libre acceso. Verificación de ecuación de balance en cada celda.	Mayor versatilidad en refinamiento local. Menos uso y poca documentación. Software comercial y de poca aplicación. No verifica ecuación de balance en cada elemento.

II.4.14 APLICACIONES Y OBJETIVOS DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las aplicaciones que tiene la modelación de flujo subterráneo comprenden áreas desde el punto de interés de la Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental, Ingeniería Geotécnica, Hidrología Subterránea e Hidráulica, a continuación se muestran algunas de ellas:

- Ingeniería Civil:

Abatimiento de nivel freático.

Control de flujo subterráneo.

Control de asentamientos y estabilidad en las excavaciones.

- Ingeniería Ambiental:

Estudios de impacto ambiental.

Dispersión de contaminación en flujo subterráneo.

Tiempo de viaje del flujo.

Diseño de sistemas de remediación.

Delimitación de áreas de protección de las fuentes de agua subterránea.

Atenuación natural de zonas contaminadas.

- Ingeniería Geotécnica:

Infiltración en presas.

Drenaje.

Construcción de minas a cielo abierto, control del nivel freático.

Entradas y presiones a los túneles.

- Hidráulica e Hidrología Subterránea:

Abastecimiento de agua.

Diseño de campo de pozos.

Interferencia entre pozos.

Sustentabilidad del campo de pozos.

Las mencionadas anteriormente son algunas de las aplicaciones en donde la modelación de flujo subterráneo sin embargo existen más aplicaciones e incluso, puede haber combinación de ellas para un mismo proyecto.

Los objetivos de un modelo de agua subterránea puede ser de carácter: Predictivo o interpretativo.

Los modelos predictivos son utilizados para predecir las consecuencias de una acción realizada o cambio en la zona de estudio, observar la evolución del nivel freático u objeto de interés para que de esa forma pueda ser un factor importante en la toma de decisiones para los objetivos del proyecto. Los modelos interpretativos son utilizados para estudiar e interpretar situaciones actuales, sistemas dinámicos, comportamiento del sistema, así como organizar y comparar los datos disponibles de campo para llevar un control del proyecto.

II.4.15. MODFLOW Y MODELMOUSE

MODFLOW es un programa que efectúa el modelo de agua subterránea por el método de diferencias finitas. MODFLOW originalmente fue diseñado solamente como un modelo de flujo de agua subterránea. Los diseñadores del programa vieron la solución de adicionar ecuaciones relacionadas a través de paquetes.

El movimiento en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante a través del medio poroso en el suelo puede ser descrito por la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Como podemos observar, la ecuación 9 comparada con la ecuación 8 son muy similares, sólo que con las variables de permeabilidad consideradas, lo cual nos indica que el programa es ideal para el modelo de agua subterránea en régimen transitorio.

Dentro del código MODFLOW existen los denominados “paquetes”, que permiten introducir una gran diversidad de condiciones singulares que existan en la realidad que se quiere representar con el modelo como, por ejemplo:

- Presencia de lagos y humedales en el sistema, y su afección al acuífero, e interacción con la red de cauces superficiales.
- Recarga por precipitación/retornos de riego, y evapotranspiración.
- Presencia de un acuitardo (formación semipermeable que transmite muy lentamente el agua en su interior y produce una recarga vertical al acuífero en contacto con el mismo).
- Recarga o bombeo del acuífero mediante pozos.
- Barreras naturales o artificiales que impiden el flujo horizontal.
- Drenajes al acuífero por medio artificial o por manantiales.
- Transporte de sustancias (contaminantes) arrastrada por el flujo subterráneo.

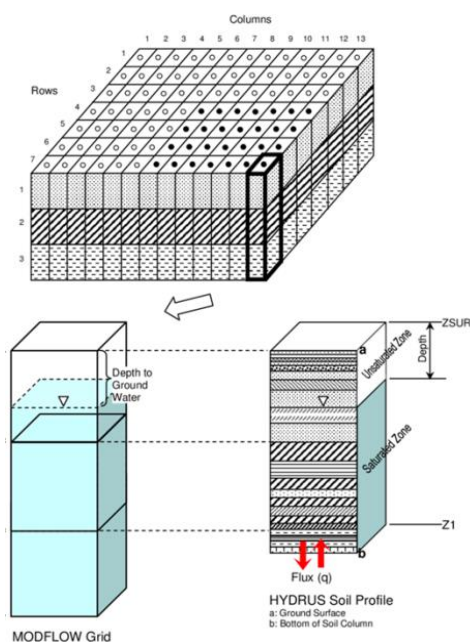


Ilustración 15. MODFLOW-MODELMUSE

MODEL MUSE es un interfaz de usuario para la modelación, es la plataforma de pre y postprocesamiento que implementa MODFLOW. Esta plataforma es de gran utilidad debido a su "diseño por objetos" que optimiza la conceptualización de condiciones de bordes y otros elementos del modelo, disminuyendo el tiempo de construcción y mejora la interpretación de los datos de salida. Ambos programas son de libre acceso, y pertenecen al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

II.4.16. INFORMACIÓN NECESARIA PARA REALIZAR UN PROYECTO DE ABATIMIENTO

La investigación del sitio es esencial para describir las condiciones del flujo subterráneo adecuadamente; para identificar posibles problemas de aguas subterráneas; y, en última instancia, para permitir el agua subterránea medidas de control como lo son los sistemas de abatimiento para ser diseñadas. La información que se presenta a continuación es necesaria para diseñar los sistemas de abatimiento.

1. PROYECTO CONSTRUCTIVO
 - Profundidad y tamaño de excavación.
 - Método constructivo.
 - Programa de obra.

2. GEOLÓGICA
 - Origen geológico
 - Antecedentes históricos de depósito.
 - Geomorfología y topografía.
3. MECÁNICA DE SUELOS
 - Perfil y estratigrafía del suelo.
 - Parámetros característicos del suelo.
4. HIDROLÓGICA
 - Recargas.
 - Ríos, lagos, mar.
 - Precipitación.
5. HIDROGEOLÓGICA
 - Comportamiento y nivel del flujo subterráneo.
 - Presión de poros.
 - Permeabilidad.
6. AMBIENTAL
 - Calidad del agua.
 - Descarga del agua.
 - Riesgos del acuífero/flujo.

II.5. MARCO LEGAL

En México, no existe una normatividad específica que regule o controle los procesos de abatimiento de nivel freático, sin embargo, en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en el artículo 172 sobre las investigaciones que deben realizarse para verificar que la edificación que se construye no cause daños o sea afectada por edificaciones colindantes ni instalaciones que prestan servicios y en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones en el apartado 5.1.4 de estabilidad de estructuras vecinas donde dice que de ser necesario las estructuras adyacentes a las excavaciones deben reforzarse a manera que aseguren la zona donde se está trabajando y de manera muy particular en el apartado 7 sobre los procedimientos constructivos donde menciona que debe definirse el procedimiento constructivo como parte del estudio de mecánica de suelos con el propósito de que se eviten daños a las estructuras e instalaciones vecinas y a los servicios públicos por vibraciones o desplazamiento vertical y horizontal del suelo y en el subapartado 7.2.2 habla sobre el control de flujo de agua, sin embargo para ellas no hace referencia a ninguna norma que regule dicho apartado, también tratándose de la responsabilidad civil del constructor al momento de realizar cualquier procedimiento y las afectaciones que esta pueda tener con su entorno (Gobierno del Distrito Federal, 2004).

A manera de atender éste apartado de la responsabilidad civil, atendiendo el Código Civil en el artículo 839 que dice “en un predio no pueden hacerse excavaciones o construcciones que hagan perder el sostén necesario al suelo de la propiedad vecina; a menos que se hagan las obras de consolidación indispensables para evitar todo daño a este predio” y relacionándolo con los artículos 1910 y 1915 del mismo que dice que aquél que ocasione alguna afectación está obligado a reparar el daño o perjuicio siempre y cuando el daño se haya producido como consecuencia de la mala técnica, negligencia o inobservancia del quien lo cause (De la Federación, 2019). Considerando de igual manera la Ley de Obras Públicas y Servicios relacionados con las mismas en el artículo 67 donde dice que “las responsabilidades y los daños y perjuicios que resultaren por su inobservancia serán a cargo del contratista” (De la Federación, 2016).

Desde la perspectiva ambiental, en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en el artículo 1, fracción V dice que se debe propiciar el desarrollo sustentable y establecer bases para el aprovechamiento sustentable, la preservación y de ser posible la restauración del suelo, el agua y demás recursos naturales, de manera que sean compatibles con la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas (De la Federación, 2012). Así como también los capítulos I y II de la misma Ley que nos habla sobre el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos y la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo y sus recursos que nos hablan más específicamente sobre la materia. En su reglamento, en el artículo 5, menciona que para realizar alguna actividad de drenaje o desecación de cuerpos de agua, se debe evaluar en materia ambiental.

III. PROYECTO DE INTERVENCIÓN

III.1. OBJETIVOS GENERALES

Diseñar un sistema wellpoint eficiente que sirva de soporte para sistemas de abatimiento de nivel freático controlado apoyado en resultados obtenidos de la modelación numérica.

III.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar en la región los procesos actuales utilizados para el abatimiento de nivel freático usando wellpoint.
- Establecer los procedimientos principales para el adecuado control y abatimiento de nivel freático mediante wellpoint atendiendo las especificaciones del Manual CIRIA C750.
- Idealizar el modelo conceptual de flujo de agua subterránea de un proyecto.
- Diseñar un sistema wellpoint atendiendo los procedimientos mencionados del manual C750 y que cumpla con las características del comportamiento del flujo subterráneo.
- Evaluar el modelo matemático que, por medio del análisis de la ecuación del flujo mediante el método numérico de diferencias finitas, sea capaz de representar adecuadamente el comportamiento del acuífero cuando sobre él se aplica una obra de abatimiento del nivel freático mediante sistema wellpoint, para emplear este modelo como herramienta de control, optimización y apoyo para la toma de decisiones.

III.3. JUSTIFICACIÓN

La problemática es latente a nivel global en las construcciones bajo nivel freático. En los últimos años han ido creciendo las investigaciones para la optimización de sistemas de abatimiento de nivel freático.

En México, actualmente no existe una normativa que regule los procedimientos de abatimiento de nivel freático y mediante el análisis documental de casos de estudio no existe estandarización e investigación alguna.

Los procedimientos actualmente utilizados en la región por los técnicos en el área, utilizan metodología a prueba y error para el abatimiento del nivel freático, sin embargo no hay un control adecuado ocasionando afectaciones en su entorno.

Las consecuencias que éste problema ocasiona al entorno abarcan lo ambiental, económico y social que pueden evitarse si existe un adecuado diseño de sistema wellpoint desde la planeación del proyecto.

Desde la perspectiva ambiental, estamos hablando sobre la desecación de un lugar mediante la extracción del agua subterránea, los procesos implicados durante la instalación del sistema, el agotamiento del nivel freático y la deposición del agua extraída hacia donde se dirigirá y qué control se tendrá sobre ella.

Desde la perspectiva económica, si se hace una adecuada planeación sobre la implementación de un sistema eficiente para el abatimiento de nivel freático, evitará mermas como retrasos en el programa del proyecto y rediseños del mismo.

Desde la perspectiva social, al calcular y diseñar un sistema eficiente wellpoint para controlar el nivel freático se evitará ocasionar algún conflicto por la disminución del contenido de humedad en el suelo donde puede presentarse asentamientos y por consiguiente daños en estructuras o vialidades vecinas si no se tiene un adecuado control del mismo nivel freático. Es ahí donde una buena planeación, diseño e implementación de un buen sistema wellpoint para abatir y controlar de manera eficiente el nivel freático aplica para la evaluación del proyecto de intervención.

Los resultados obtenidos a partir de éste podrán servir como base para la estandarización de un proceso de abatimiento de nivel freático para las empresas que se dediquen a la construcción donde se presente el nivel freático por encima del proyecto para su adecuado control.

III.4. METODOLOGÍA

La metodología en general a seguir para las técnicas de abatimiento de nivel freático en la construcción se describe en el apartado “Etapas del análisis y diseño de sistemas de control de flujo subterráneo”, sin embargo a continuación se presentarán consideraciones importantes dentro de la misma metodología.

III.4.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Para el cálculo y diseño de un sistema wellpoint las variables a considerar las propiedades físicas del suelo y en general del acuífero donde se realizará el proyecto para abatir el nivel freático, las características más importantes son la permeabilidad (conductividad hidráulica) y transmisividad que se puede determinar a partir de una prueba de bombeo, es necesario conocer el comportamiento del flujo de agua subterránea, así como las características hidrogeológicas de la zona, su geología, las recargas y descargas que puedan existir en el sistema donde se va a abatir el nivel freático, y por último ya considerando el diseño del sistema wellpoint es la bomba a utilizar, las dimensiones, separaciones y condiciones mismas del sistema que marca el manual CIRIA C750.

III.4.2. ESTUDIOS E INGENIERÍA BÁSICA

Para determinar si el diseño e implementación del sistema wellpoint es el adecuado, se deben realizar estudios de mecánica de suelos para determinar las características propias del suelo, así como su estratigrafía, para determinar permeabilidad, puede realizarse “in situ” a partir de sondeos o pozos, consistentes en la medida de la pérdida de la columna de agua con relación a lo que se ha inundado en la perforación, o bien realizarse la prueba en una muestra inalterada en laboratorio, también es importante en caso de ser necesario pruebas de bombeo en varios puntos de interés para determinar la transmisividad del acuífero, así como su conductividad hidráulica y cómo es el comportamiento del nivel freático, para finalizar y tener una idea general del modelo conceptual se requiere conocer la topografía

donde por medio de imágenes satelitales y la aplicación de software compatible, se generará la topografía de la zona de estudio, es importante realizar un análisis de las características hidrológicas, geotécnicas, hidrogeológicas y ambientales de la zona, un estudio que puede ser importante para determinar la litología del acuífero es una prueba geofísica de resistividad eléctrica vertical, donde nos permite idealizar cómo es el comportamiento y la composición del subsuelo en el acuífero a modelar, sin embargo es necesario considerar qué pruebas, métodos o técnicas aplicar, de otra manera, puede existir otro método que sea más eficiente y económico como lo observado en la Ilustración 11.

III.4.3. ESTUDIOS E INGENIERÍA DE DETALLE

Una vez determinadas las características del suelo, el comportamiento del nivel freático y las características hidrológicas y geológicas del mismo entorno, se evalúa si está dentro de las condiciones para que se diseñe el sistema wellpoint, donde se considerará para su diseño una guía del Reino Unido de la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA por sus siglas en inglés “Construction Industry Research and Information Association”) que considera las variables que puedan existir dentro del mismo sistema, como el espaciado entre lanzas, la cantidad de lanzas, los radios de influencia que ocasionan, bombas y todo en la cuestión técnica y además tiene apartado sobre el cuidado ambiental y los posibles asentamientos que puedan ocasionarse en el suelo debido al proceso de abatimiento del nivel freático.

La guía a utilizar será CIRIA C750 para el control de flujo subterráneo, diseño y práctica, la cual proporciona información y orientación sobre los métodos de abatimiento utilizados para controlar las aguas subterráneas como parte de las obras temporales para proyectos de construcción (Preene et al., 2016).

Para el modelado y control del flujo de agua subterránea se alimentará con los datos de los estudios de ingeniería básica y con criterio profesional el código MODFLOW con el apoyo de la interfaz gráfica MODELMOUSE, los cuales interpretarán y simularán el flujo, así como el sistema propuesto, en principio se realizará un modelo en estado estacionario, posteriormente un modelo en estado transitorio con sus respectivas recargas, ese modelo será calibrado con los datos observados en campo procurando ser lo más fiel lo modelado y lo observado, para así una vez calibrado ese modelo someterlo al sistema wellpoint, donde se observará el comportamiento que el sistema tendrá ante dicha acción (abatimiento), procurando cumplir con el criterio de lograr el abatimiento en la zona de interés solamente. Una vez obtenido ese criterio, se tiene la ubicación, cantidad de pozos, espaciado y el gasto que extraerá el sistema wellpoint, por lo que se reduce a un problema de redes, en donde ya se definirá la caracterización propia del sistema. Las etapas del proceso para un proyecto de abatimiento de nivel freático se encuentra a detalle en el apartado II.4.10.

III.4.4. RECURSOS TÉCNICOS Y PROCEDIMIENTOS

Los recursos y procedimientos a utilizar son principalmente los que indique la guía CIRIA C750 y el código numérico MODFLOW con el apoyo de la interfaz MODELMOUSE para el desarrollo adecuado del proyecto de intervención.

Para la caracterización del modelo conceptual, se recurre a bases de datos de CONAGUA, INEGI, así como también la información de los estudios realizados en la zona de interés del proyecto “Torre Tres Ríos” y del acuífero en general modelado.

Teniendo como apoyo para el diseño del sistema wellpoint la siguiente bibliografía:

Construction dewatering and groundwater control: new methods and applications. (Cashman et al., 2001)

Groundwater lowering in construction: A practical guide. (Powers et al., 2007)

III.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III.5.1. MÉTODOS Y MODELOS DE ANÁLISIS DE LOS DATOS SEGÚN TIPO DE VARIABLES

A partir del modelo básico conceptual, existe una multitud de diseño y probabilidades. Por ello debe ser entendido con detalle el comportamiento del flujo subterráneo. En cualquier caso siempre es conveniente realizar métodos numéricos, cuya extensión, uso, alcance y aplicación es idóneo para proyectos de esta complejidad, a diferencia de un método analítico que si bien puede dar resultados buenos, su uso y alcance es para proyectos más simples.

Una vez realizada la modelación, los resultados obtenidos en el código numérico MODFLOW a través de la interfaz MODELMOUSE, dando solución por el método de diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos, se procede a realizar una calibración propuesta por Anderson, Woessner y Hunt.

Una vez que se tiene el modelo definitivo, se rescata las características importantes del diseño del sistema de abatimiento wellpoint, como el espaciado de pozos, el gasto de bombeo, su ubicación y el abatimiento que este ocasiona, de tal forma que el resto del sistema se puede solucionar analíticamente como un problema de redes de distribución.

III.5.2. PROGRAMAS A UTILIZAR PARA ANÁLISIS DE DATOS.

Se presentarán los datos de manera cuantitativa en tablas, las modelaciones y variaciones que pudieran presentarse utilizando los programas MODFLOW y MODELMOUSE para el flujo de agua subterránea que se necesita para determinar características y condiciones al sistema wellpoint y Excel para análisis comparativo y calibración del modelo.

III.6. CASO DE ESTUDIO “TORRE TRES RÍOS” CULIACÁN, SINALOA.

III.6.1. MODELO CONCEPTUAL

En este apartado se describe el modelo que se va a desarrollar a lo largo de este proyecto de intervención del caso de estudio de la “Torre Tres Ríos”, contextualizado y caracterizado geográfica, hidrológica, climatológica y geológicamente para comprender lo que se va a representar y los datos que se disponen para que éste represente una aproximación de situación de lo observado en campo.

III.6.2. PROYECTO EJECUTIVO Y ANTECEDENTES

El proyecto fue una obra realizada en el año 2010, en donde se tiene contemplado construir dos niveles de estacionamiento que se encuentra por abajo del nivel natural de terreno, donde se estima que se realizará una excavación del orden de 6.50 metros de profundidad, incluyendo la cimentación por pilas del edificio. El personal de dirección y construcción realizaron los trabajos de la construcción de la “hermana menor” a escasos metros de la misma, conocida como la torre “Santa María” en el año 2003.

El proyecto “Torre Tres Ríos” es un edificio de 21 niveles con área comercial en las primeras plantas y espacios para oficinas en la parte superior; se encuentra en la zona de mayor desarrollo de la ciudad y es una de las torres más altas de Culiacán.

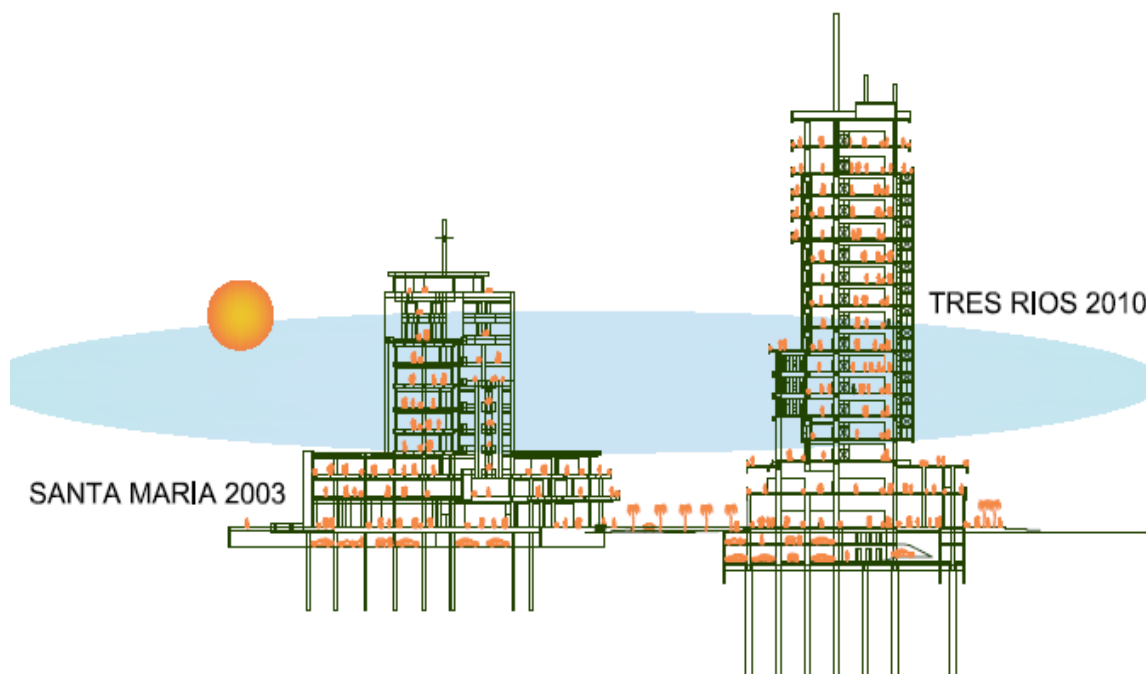


Ilustración 16. Torre Santa María – Torre Tres Ríos

III.6.2.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN

La zona del proyecto se ubica en el Blvd. Francisco Labastida Ochoa #1695, Desarrollo Urbano Tres Ríos en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, cuya coordenada geográfica es 24.8158, -107.4019.

El área en general de sus alrededores es conocida como Desarrollo Urbano Tres Ríos pues cuenta con plazas, torres y centros comerciales, universidades, parques, hospitales, servicios de salud, escuelas y demás que propician el crecimiento turístico, económico y social de la población.

El desarrollo es llamado Tres Ríos pues abarca las riveras de los ríos Humaya y Tamazula, los cuales se unen y forman el río Culiacán. La elevación media de la zona de estudio es de 40 msnm.



Ilustración 17. Desarrollo Urbano Tres Ríos (Torre Tres Ríos señalada)

III.6.2.2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La zona de estudio pertenece al acuífero Río Culiacán definido con la clave 2504 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del Estado de Sinaloa.

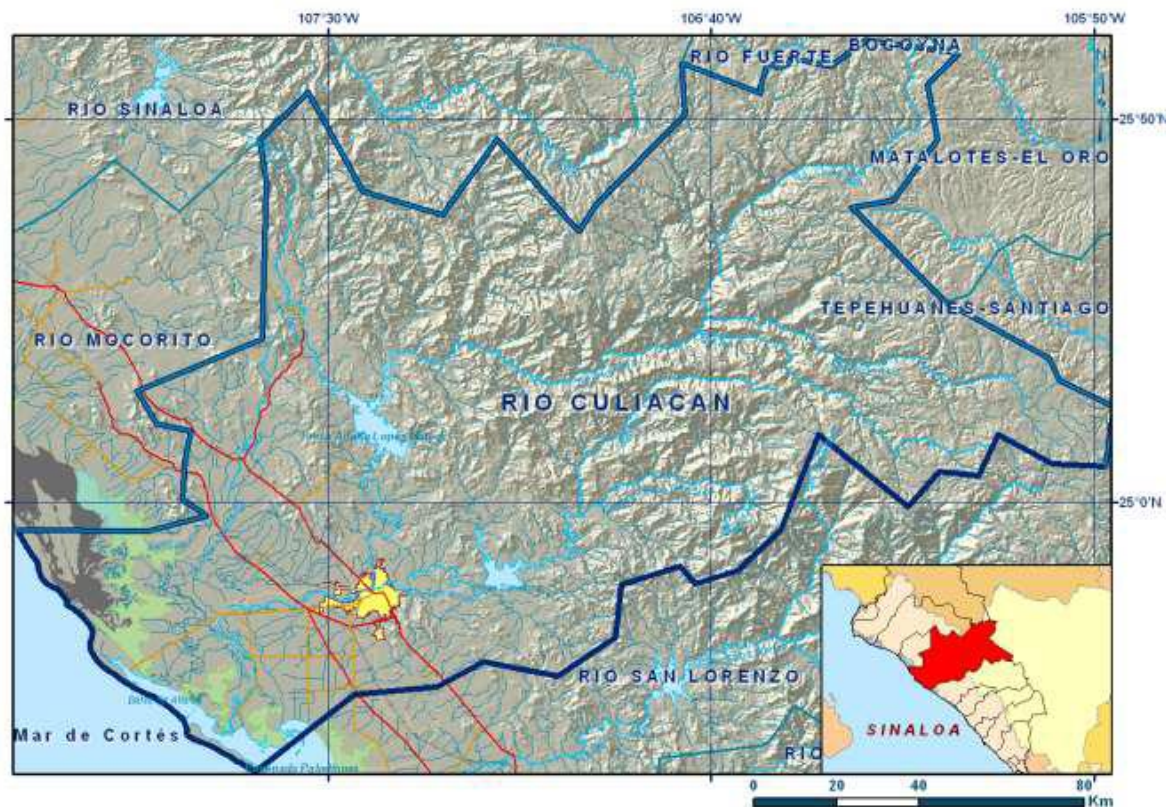


Ilustración 18. Acuífero Río Culiacán (ciudad de Culiacán sombreado de amarillo)

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero se localiza parte de los distritos de riego DR 010 “Culiacán–Humaya” y 109 “Río San Lorenzo”; a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

La zona de interés tiene la influencia de los ríos Tamazula y Humaya, que se unen para formar el río Culiacán. Según un estudio de la CONAGUA “Determinación de la Disponibilidad de agua en el acuífero Río Culiacán” publicado en el Diario Oficial de la Federación informa que las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como conglomerados y sedimentos lacustres, todas ellas alojadas bajo rocas volcánicas (De la Federación, 2018).

En el mismo estudio, se obtuvo un rango de valores para la transmisividad del acuífero en general, resultados obtenidos a partir de tres pruebas de bombeo. Para su análisis e interpretación se usaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob, dando como resultado los siguientes parámetros hidráulicos del acuífero:

Transmisividad: $3.24 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (280.1 $\text{m}^2/\text{día}$) a $9.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (843.3 $\text{m}^2/\text{día}$).

La transmisividad es un parámetro muy importante que se obtiene de las pruebas de bombeo, se define como la capacidad de un manto o suelo para dejar fluir agua a través de

él en un espesor dado y saturado. A partir de él, se puede determinar la conductividad hidráulica del material en donde se encuentre.

En la zona de estudio de la Torre Tres Ríos, con una prueba de bombeo ver Anexo “Gráfica del Registro de Aforo”, se procede el análisis e interpretación de la transmisividad con el método de Cooper-Jacob, la razón por la que se escogió el método de Cooper-Jacob, que también es conocido como la aproximación logarítmica de Jacob, debido a que el método es aplicable en acuíferos de este tipo (libre, de régimen variable, con una prueba de descenso del nivel freático y cuyos descensos son menores en comparación con el espesor saturado del acuífero), para conocer a detalle los métodos de ensayo aplicables para cada tipo de acuífero ver Anexo “Métodos de análisis de ensayos de bombeo”.

El cálculo se hizo mediante una hoja de cálculo en Excel programada con los criterios del método Cooper-Jacob (aproximación logarítmica de Jacob) y su ajuste para determinar los valores de transmisividad (T) y de conductividad hidráulica (K), ver en el Anexo “Cálculo de parámetros hidráulicos para la zona de estudio”, los valores fueron de 470 m²/día y 28 m/día respectivamente. El valor de “T” obtenido se encuentra dentro del rango del acuífero del Río Culiacán y el valor de “K” hace alusión al coeficiente de arenas, ambos valores son consistentes y por lo tanto son considerados buenos parámetros hidráulicos para la zona de estudio.

Una última característica, con respecto al comportamiento hidráulico del acuífero, es la elevación del nivel estático, para ello a continuación se muestra la configuración del nivel estático del acuífero del Río Culiacán en el año 2010.

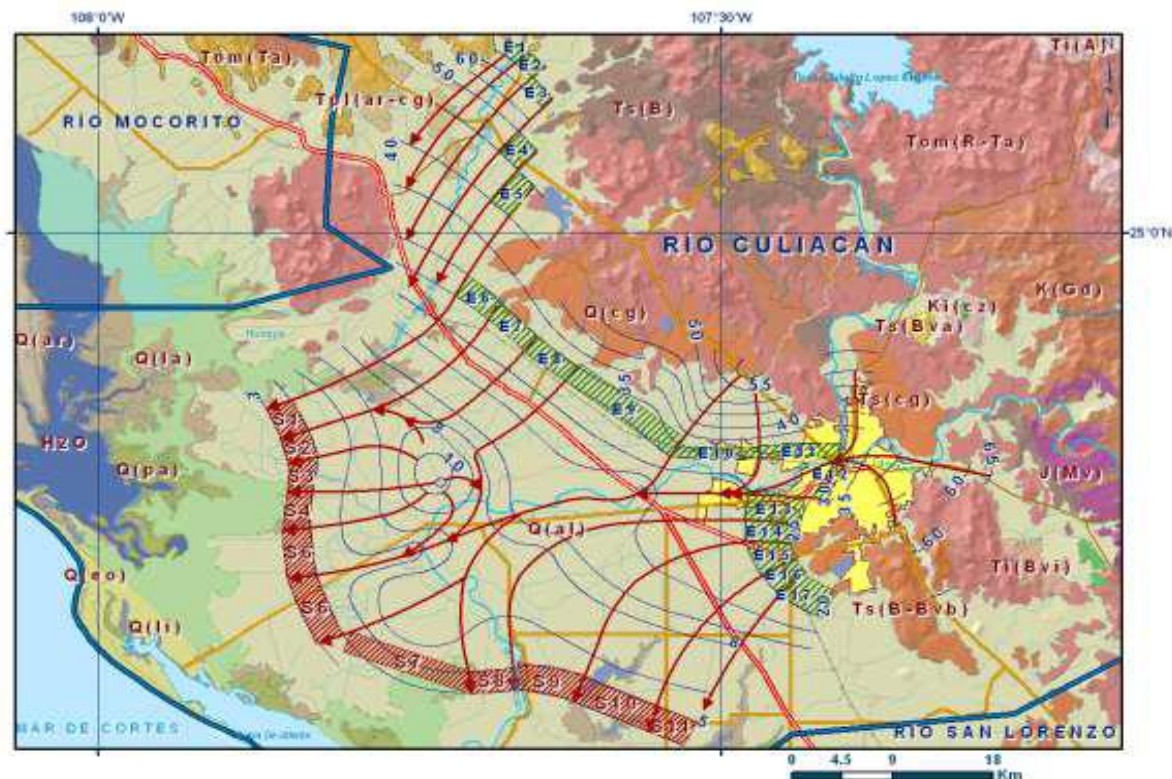


Ilustración 19. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

Para la zona de estudio específico no existe dicha configuración, sin embargo a partir de la general, se puede observar que la zona se encuentra entre la elevación aproximada de 35 a 30 msnm, por lo que con la elevación promedio de la zona de 40 msnm como se mencionó en el punto anterior, se tiene una profundidad del nivel freático de 5 a 10 metros. Durante la prueba de bombeo, el nivel estático se encontraba a 6.05 metros de profundidad.

III.6.2.2. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

El acuífero Río de Culiacán en general de acuerdo con la información geológica y geofísica se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y llanura de inundación del Río Culiacán, así como en los conglomerados y sedimentos lacustres. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

Las características geológicas de la zona de estudio se pueden clasificar en la Era Cuaternaria y Terciaria, el punto de interés donde se localiza el proyecto de la Torre Tres Ríos se encuentra en una formación cuaternaria actual llanura de inundación, compuesta por gravas, arenas, limos y arcillas depositados por procesos fluviales. El plano geológico con su simbología y composición se puede ver en la sección de Anexos “Plano Geológico de la Zona de Estudio”. La información obtenida del plano geológico es consistente con la información recabada del estudio de disponibilidad de agua del acuífero del Río Culiacán de la CONAGUA.

La estratigrafía de la zona de estudio, se considera a partir de un estudio de Mecánica de Suelos, del sondeo realizado se observa que el corte de materiales corresponde los primeros 4 metros de rellenos que se encuentran por encima de un limo arenoso y gravas de diferente granulometría hasta los 18 metros descansando todo este paquete de materiales sobre un estrato rocoso.

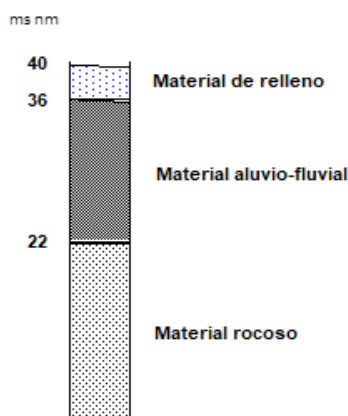


Ilustración 20. Estratigrafía representativa de la zona de estudio.

ESTRATO	PROFUNDIDAD	MATERIAL
I	0 – 4 METROS	RELLENO
II	4 - 18 METROS	ALUVIO-FLUVIALES
III	18 METROS	ROCOSO

III.6.2.3. CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA

El clima de la región del acuífero del Río Culiacán conforme a la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima en el área que cubre el acuífero es muy variable. En la parte alta, prevalece un clima semi-seco con primavera seca y semi-frío extremo, con régimen de lluvias de verano fresco. En la parte baja, se presenta un clima muy seco con humedad deficiente en todas las estaciones y cálido sin estación invernal, con lluvias en verano. En la zona intermedia entre las dos anteriores, se registra un clima seco, con primavera seca y cálida con invierno benigno.

A partir del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), que es una red hidrográfica generada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y es útil como herramienta para el proyecto pues muestra el drenaje superficial e información importante de base de datos en donde se puede tener acceso, consultar y analizar la información representativa de la zona de estudio.

Una vez ubicada la zona de interés por medio de sus coordenadas geográficas, se selecciona la subcuenca de la cual forma parte como se muestra a continuación:

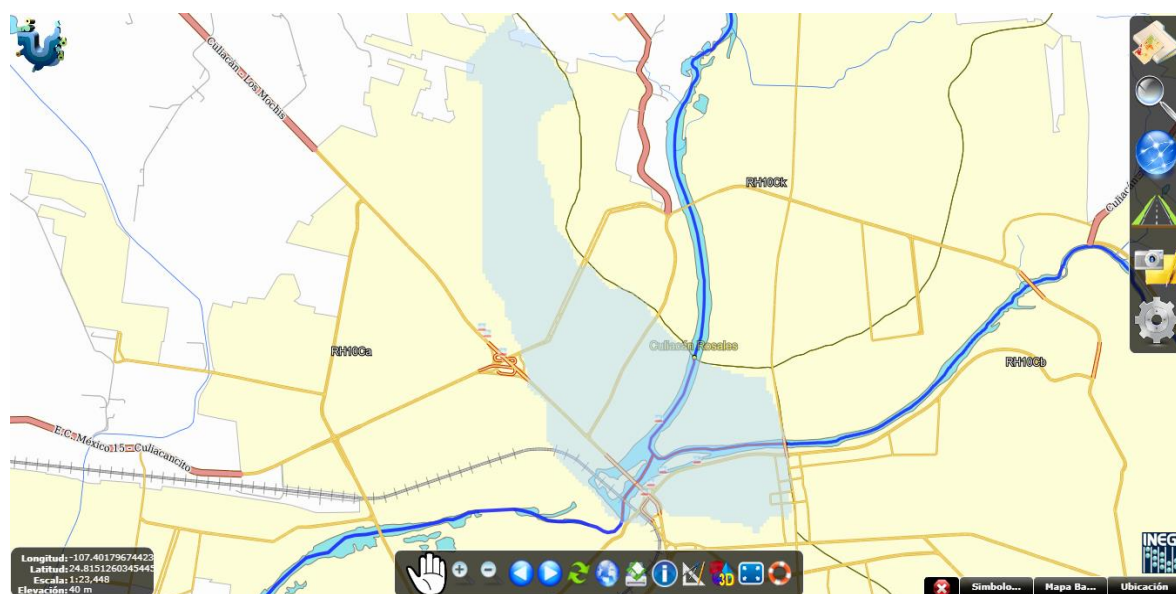


Ilustración 21. Zona de estudio ubicada en SIATL.

A partir de las funciones de red con la que cuenta la herramienta del SIATL, se obtiene los datos climáticos representativos de la zona de estudio que se muestran a continuación:

Tabla 4. Tabla de datos climáticos representativos de la zona de estudio. (SIATL)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MEDIA (°C)	19.62	20.53	21.74	24.36	26.87	29.86	30.15	29.55	29.22	27.71	23.76	20.7
PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)	1.952	1.222	0.583	0.2	1.952	2.548	15.36	21	13.08	5.074	1.787	3.013

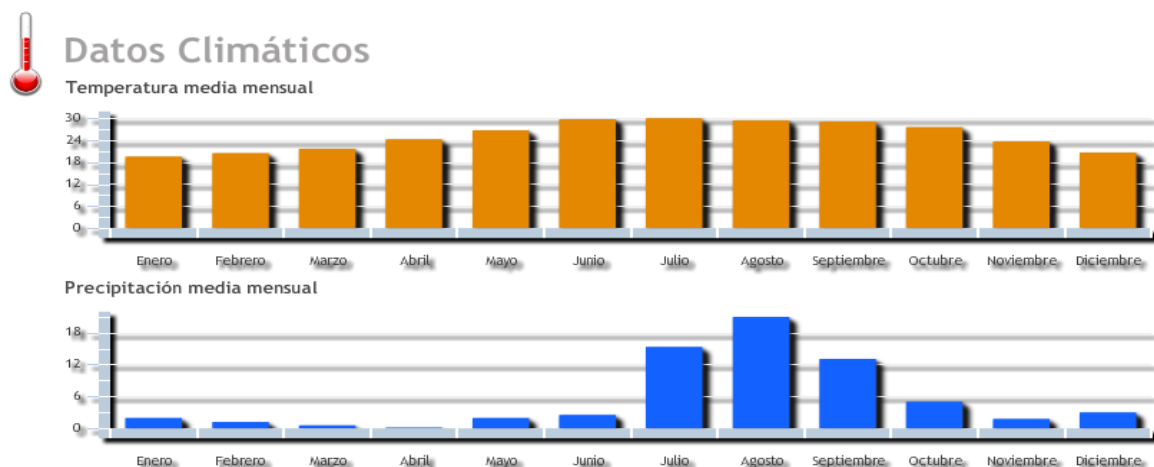


Ilustración 22. Gráfica de datos climatológicos de la zona.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno de junio a octubre, cuando se registran los valores más altos y otro que abarca de noviembre a enero, con precipitaciones menos significativas. La época de estiaje se registra de febrero a mayo.

Según el informe hidrogeológico realizado para el proyecto “Torre Tres Ríos” indica que la evapotranspiración promedio anual es de 2,069.4 mm, siendo los meses con mayor evapotranspiración mayo, junio y julio en el orden de 270 mm y los de menor en diciembre y enero con valores inferiores a 100 mm.

III.6.2.3. CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA

La caracterización topográfica de la zona de estudio, mediante el uso de imágenes satelitales de la zona y con el apoyo de programas como GeoCAD compatible con AutoCAD, se determina la topografía de la zona con una precisión de 5x5 metros. La imagen que se muestra a continuación es la topografía representativa de la zona de estudio:

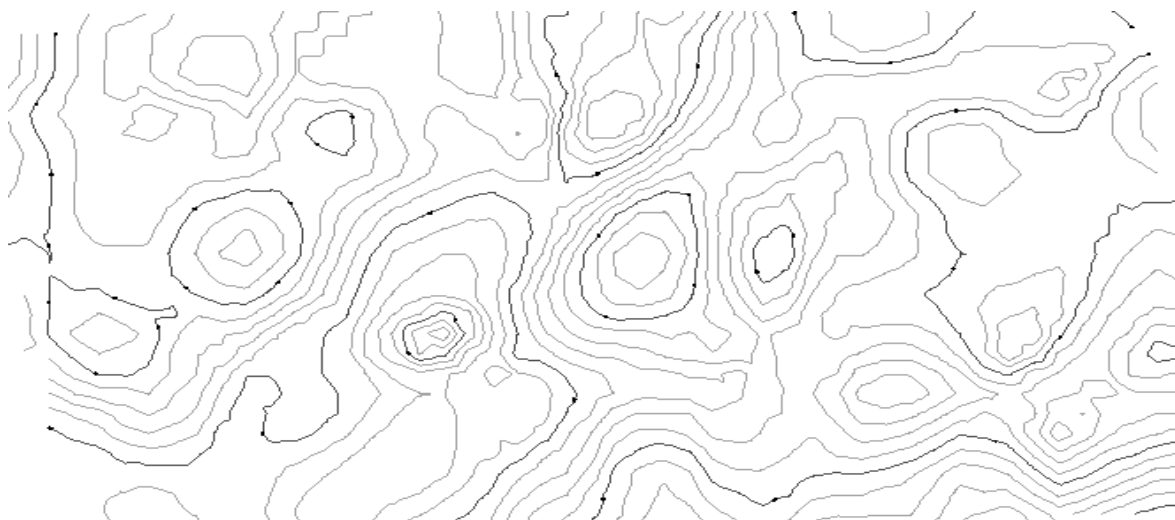


Ilustración 23. Curvas de nivel – Topografía de la zona de estudio.

A partir de las curvas de nivel obtenidas, con una rejilla de precisión de 5x5 metros, se crea una superficie a partir del programa Surfer, donde se puede observar con mayor claridad la topografía de la zona de estudio.

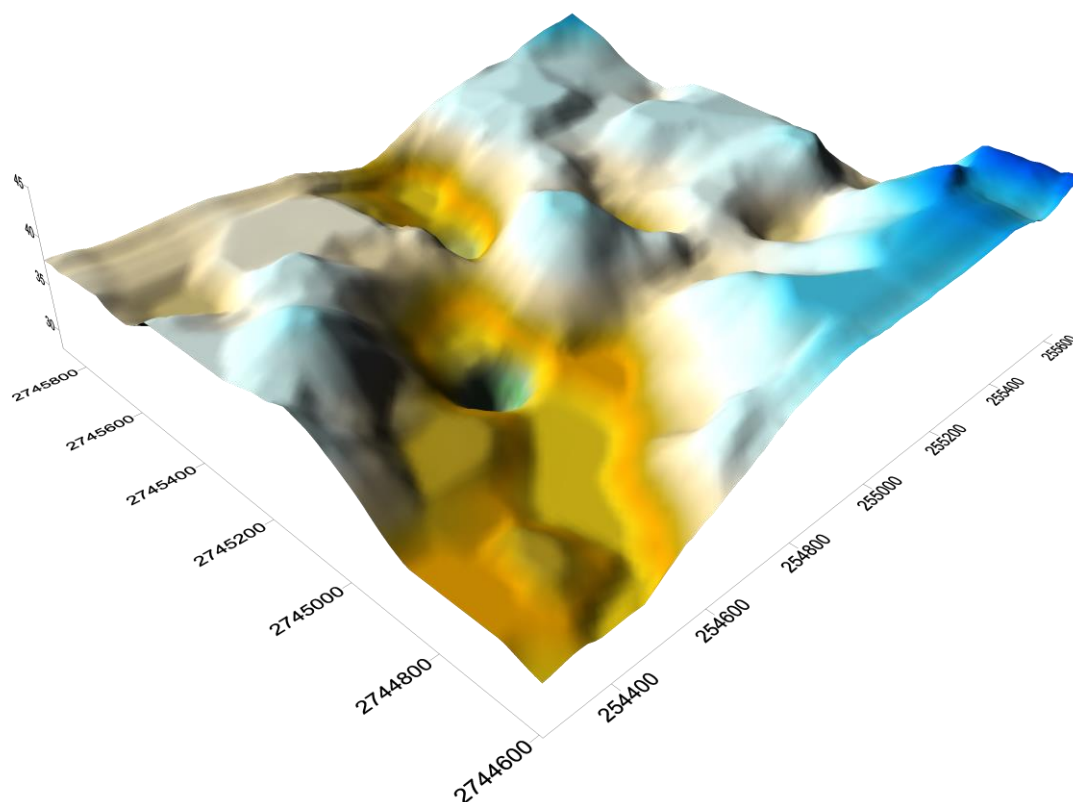


Ilustración 24. Superficie generada a partir de las curvas de nivel de la zona de estudio.

Las imágenes satelitales vienen georeferenciadas, la compatibilidad con los programas utilizados resulta favorable para conocer la ubicación de los puntos y zonas de interés en el desarrollo del proyecto.

III.6.3. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El proyecto en la zona de estudio consiste en el abatimiento controlado del nivel freático por debajo de la cota máxima de excavación cuya profundidad es del orden de 6.5 metros. Analizada la caracterización del modelo conceptual, se procede a realizar el modelo hidrogeológico con la información recopilada del sitio.

En la fase de estudio del proyecto, de acuerdo con la información disponible del estudio de Mecánica de Suelos, la prueba de bombeo y el análisis hidrogeológico, se observa el siguiente comportamiento del nivel freático:

En el mes de julio el nivel freático se encontraba a una profundidad de 7 metros, motivo por el cual se consideró que no existiría problema para los procesos constructivos, sin embargo, para el mes de octubre ascendió a los 4.26 metros, lo que indica una respuesta del acuífero ante efectos de recarga producidos por la temporada de lluvias y la influencia de los ríos,

para el mes de noviembre el nivel se encontraba por debajo de los 4.80 metros, el acuífero ya se encontraba en un periodo de descarga.

La zona de estudio se encuentra influenciada por formar parte del Distrito de Riego 010 Río Culiacán, el periodo de riego agrícola abarca desde octubre a mayo, con el término de la temporada de riego, disminuye la recarga, por lo que hace que descienda el nivel estático, sin embargo en cuestión unos meses empieza la temporada de lluvias que recargan al acuífero, por lo que se observa el comportamiento mencionado anteriormente y cuando termina la temporada de lluvia, vuelve a iniciar el ciclo de riego para la temporada primavera-verano en los meses mencionados.

Este comportamiento viene a confirmar el proceso de recarga del acuífero, con actores importantes como la precipitación pluvial, el flujo subterráneo y la influencia de los ríos en las temporadas de riego agrícola; en el proceso de descarga las salidas por flujo horizontal dentro del mismo sistema y una parte de la evapotranspiración. Con esta información se procederá a conceptualizar el modelo matemático de flujo del modelo.

III.6.3.1. DIMENSIONES Y ESTRATIGRAFÍA DEL MODELO

Al dimensionar el modelo, se debe procurar considerar los sistemas que se involucran en el modelo hidrogeológico del sistema y que sea una parte representativa de la zona, de tal forma que el modelo matemático empleado pueda comprobar de manera más exacta el comportamiento del nivel freático en el modelo.

La estratigrafía del modelo hidrogeológico es la misma que se muestra en la Ilustración 20, puesto que además de ser dimensiones “reducidas” para un modelo, no se dispone de información más específica de la zona a modelar. Con respecto a las cotas del terreno natural, se usará la topografía obtenida en el apartado de “Caracterización topográfica” como se muestra en la Ilustración 23 y 24.

III.6.3.2. RESUMEN DEL MODELO

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las características más relevantes para realizar el modelo matemático, procurando considerarlas para que éste represente de manera fiable la realidad del proyecto.

Tabla 5. Resumen del modelo hidrogeológico

MODELO CONCEPTUAL	
Acuífero	Libre, heterogéneo, anisotrópico
Profundidad del Acuífero	40 metros
Salidas del sistema	Ríos, evapotranspiración y bombeo
Entradas del sistema	Ríos y precipitación
Profundidad del nivel freático	Variable (4.26 m - 7m)
Profundidad de excavación	6.5 m
Estratigrafía	3 estratos (relleno, aluviofluvial, roca)

En el proceso para implementarlo en la modelación numérica, puede existir variaciones o singularidades en los datos de tal forma que “simplifique” el proceso de modelación, así como su análisis e interpretación.

III.6.4. IMPLEMENTACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

Uno de los métodos disponibles más importantes que existen actualmente para comprender el comportamiento cuantitativo del flujo subterráneo, es por medio de los modelos matemáticos, los que nos permiten evaluar variables y parámetros que interactúan en el sistema acuífero.

Al tener caracterizado y descrito el proyecto, así como haber identificado las relaciones y parámetros más importantes del modelo conceptual, es el momento de trasladar esa información al modelo matemático, donde será resuelta la ecuación que gobierna al flujo de dicho sistema. El proceso se realiza mediante la aplicación del método numérico a través de un código de computadora.

En los siguientes apartados se presenta cómo pasar dicha información recabada y conceptualizarlo en el modelo numérico para que pueda ser evaluado mediante el código MODFLOW mediante la interfaz MODELMOUSE.

III.6.5. DISEÑO

En la especificación del problema particular de simular el flujo subterráneo de la zona de estudio para el abatimiento del nivel freático en el proyecto de la Torre Tres Ríos en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, y para estar en condiciones de resolver la ecuación diferencial que describe el flujo de agua en el acuífero, se requiere generar un modelo de sitio específico. Para lograr este fin es necesario:

1. Definir la geometría tridimensional del medio geológico que contiene el agua subterránea.
2. Identificar las propiedades hidráulicas de los materiales en donde se desarrolla el flujo subterráneo.
3. Especificar condiciones de frontera congruentes con el modelo conceptual de funcionamiento.
4. Establecer condiciones iniciales de flujo de agua subterránea y de cargas hidráulicas.
5. Realizar evaluaciones del término flujo volumétrico de agua que en este caso particular se representa con extracciones por bombeo principalmente.

III.6.5.1. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

En la discretización espacial se debe considerar dos aspectos importantes, las dimensiones del modelo y el tamaño de las celdas para su evaluación. Definido ambos aspectos, es posible realizar la discretización horizontal (ejes X y Y) y vertical (eje Z).

III.6.5.1.1. DISCRETIZACIÓN HORIZONTAL

La aplicación del código numérico empleado para resolver el modelo matemático, con base a la información hidrogeológica de la zona de estudio, requiere realizar su implementación a las condiciones locales. Por lo tanto, el medio por donde se desplaza el agua subterránea se dividió en bloques, sobreponiendo una malla de diferencias finitas sobre un mapa geológico del área de estudio y georeferenciado con la finalidad de que los bloques coincidieran con la zona en donde se tiene dicha información.

La malla propuesta para el modelo regional comprende de 1.8 kilómetros de largo por 1.4 kilómetros de ancho y se encuentra alineada con la dirección principal del flujo subterráneo que tiene dirección Norte a Sur conforme a la interpretación de la Ilustración 19.

Una vez conocidas las dimensiones del modelo se define un tamaño de celdas adecuado. Considerando dimensiones horizontales generales de 10 metros, lo que generaría una malla de 180 columnas y 140 filas. Además, se ha refinado la malla en la zona de interés del proyecto de la Torre Tres Ríos a un tamaño local de las celdas de 5 metros, obteniendo el siguiente resultado.

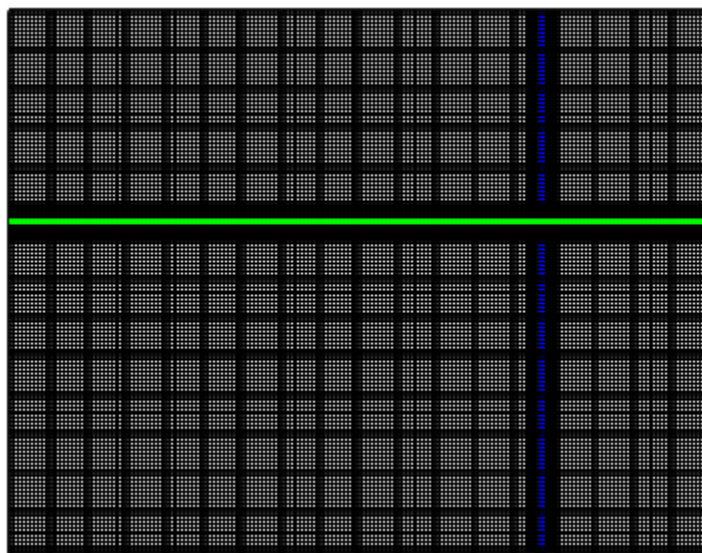


Ilustración 25. Malla definitiva utilizada para la modelación eje XY. (Discretización horizontal)

Las dimensiones para el modelo fueron consideradas a partir de la interpretación del acuífero de la zona de estudio, de tal forma que comprendiera los sistemas que intervienen en ella y se ajustó a la imagen satelital con sus respectivas coordenadas.

III.6.5.1. DISCRETIZACIÓN VERTICAL

Durante la etapa de implementación del modelo se realizaron revisiones de la información relativa a la geometría de los materiales geológicos del subsuelo, específicamente del estudio de Mecánica de Suelos, se obtuvo la estratigrafía de la zona de interés, sin embargo no se determina de la generalidad del acuífero por modelar, por lo que el apoyo del plano geológico de la zona nos da una perspectiva de los materiales geológicos que puedan

presentarse en el subsuelo. De acuerdo con las condiciones hidrogeológicas y para los fines de simulación del flujo de agua subterránea del acuífero, el modelo conceptual considerada en principio la estratigrafía de la zona de interés compuesta por 3 estratos, como se muestra en la Ilustración 20; para fines prácticos y evitar que exista errores de convergencia para el cálculo del comportamiento del flujo subterráneo se considerarán solamente 2 capas, también debido a que en ningún momento el flujo subterráneo sobrepasó la profundidad de 4 metros, por lo que la capa de material de relleno nunca fue influenciada por el flujo subterráneo, de tal forma que la profundidad de la primer capa correspondiente a “material de relleno” pasa a formar parte de la segunda capa que contiene material aluviofluvial, teniendo como resultado final la primer capa de material aluviofluvial y la segunda capa de material rocoso como se muestra a continuación:

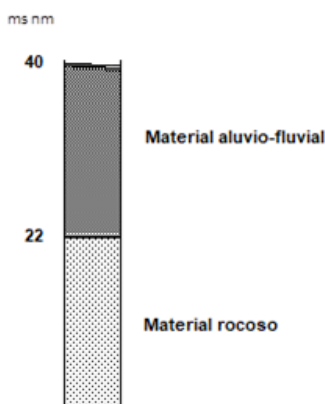


Ilustración 26. Estratigrafía considerada para el modelo matemático. (Discretización vertical)

Realizando así una discretización de 2 capas, compuestas por 3 líneas divisorias, una de ellas llamada “Model Top” corresponde a la topografía de la zona, donde la superficie creada en el programa Surfer, es compatible para cargar la topografía, además nos ayuda a representar con precisión las alturas de las celdas locales del modelo y las otras dos líneas divisorias, marcan la separación entre estratos ubicadas en 0 y 22 msnm. De tal forma que al alimentar la interfaz MODELMOUSE con los datos para la discretización espacial, se obtiene un modelo tridimensional como el siguiente:

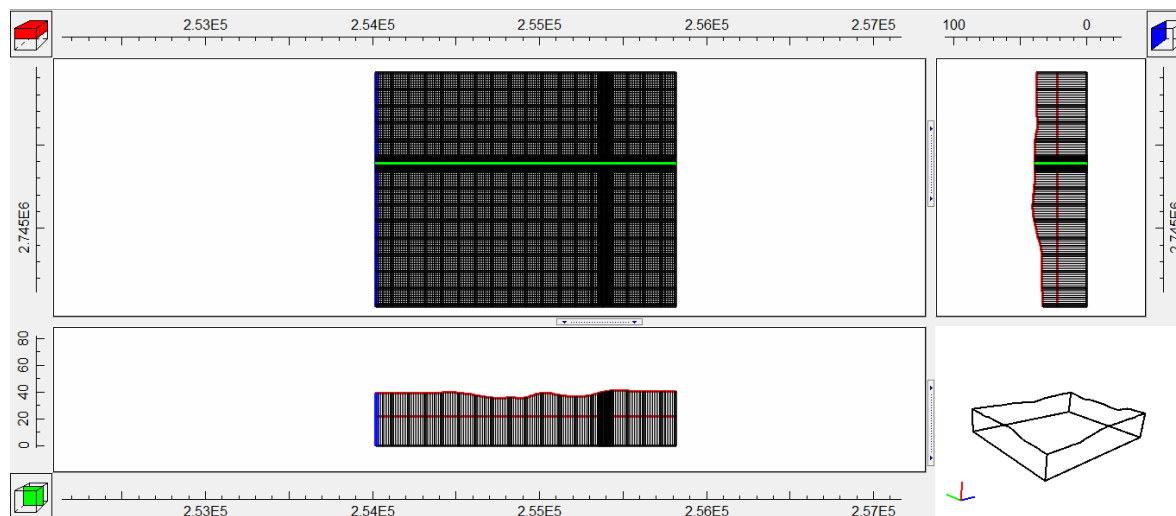


Ilustración 27. Modelo en sus diferentes planos y vista tridimensional (MODELMOUSE)

III.6.5.2. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

El modelo se desarrollará con una discretización temporal en segundos. Dicha consideración es importante debido a que se trata de un acuífero con buena permeabilidad, y por lo tanto al momento de evaluar las cargas y cuando se someta al bombeo para alcanzar el abatimiento deseado es consistente con los intervalos cortos de tiempo.

Con el análisis de datos disponibles y a partir de la facultad de discretización del tiempo de simulación que tiene el código numérico utilizado, se propusieron los siguientes períodos de esfuerzo:

1. Condiciones iniciales que representan las condiciones naturales del acuífero y que por requerimientos del código numérico, se simula en primera estancia como estado estacionario, sin bombeos ni recargas.
2. A partir de las condiciones piezométricas y de recarga y descarga establecidas previamente, comienza la simulación en estado transitorio, aún sin bombeo, de tal forma que las condiciones del modelo simulado sean lo más aproximado a la realidad, teniendo resultados consistentes entre lo observado y modelado.
3. La modelación de la respuesta eventual del sistema de flujo subterráneo ante la acción del bombeo y sus diferentes escenarios de explotación, que también se evalúan en estado transitorio.

De acuerdo con los requerimientos operativos del programa MODFLOW, una vez simulado el estado estacionario, se incorporan los coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico que corresponden de acuerdo con la composición de los materiales geológicos que componen al acuífero, con el objetivo de reproducir las condiciones previstas en el estado estacionario, pero ahora en estado transitorio.

El modelo se simulará en un espacio de un año, a partir de enero de 2010 a diciembre de 2010, considerando que el sistema de abatimiento de nivel freático es una obra temporal para facilitar los procesos de excavación y cimentación del proyecto. Las corridas se efectuaron con periodos de esfuerzos mensuales que nos permiten conocer el comportamiento del acuífero en ese tiempo.

III.6.5.3. CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera son expresiones matemáticas que incluyen la geometría del dominio y especifican la variable dependiente (carga hidráulica) o la derivada del flujo en las fronteras del modelo (Bear, 2013). En términos físicos, en aplicaciones de aguas subterráneas, los límites hidrogeológicos están representados por tres tipos de condiciones:

1. Carga constante (Tipo I o de Dirichlet): En ella se imponen la existencia de alturas piezométricas o potenciales hidráulicos preescritos.
2. Flujo constante (Tipo II o de Neumann): Esta condición simula un flujo constante en el modelo, y sirve para simular entradas y salidas principales del sistema.

3. Carga dependiente (Tipo III, de Cauchy o Mixto): Presenta características de las dos anteriores, sirve para simular la interacción con otras masas de agua, como lagos o ríos.

Las condiciones de frontera son determinadas de lo observado e interpretado tanto en el modelo conceptual de flujo del agua subterránea y de las consideraciones en la implementación del modelo conceptual al modelo numérico.

Conforme a las condiciones de frontera que se aplicaron para la simulación en estado estacionario, fueron de carga constante para poder simular el nivel estático de la zona de estudio. En cuanto a las condiciones aplicadas en la simulación del estado transitorio, fueron de flujo constante para las recargas por precipitación, de descarga la evapotranspiración y en el caso del abatimiento también, así como también de tipo de carga dependiente por la influencia de los ríos que se presentan en la zona; de tal manera que sean consistentes para poder definir el comportamiento del flujo subterráneo en el acuífero.

III.6.5.4. CONDICIONES INICIALES

La correcta definición de las condiciones iniciales y de frontera del modelo numérico permite obtener una solución congruente con el modelo conceptual propuesto para la dinámica de las aguas subterráneas.

En el modelo se estimó una distribución de las cargas hidráulicas que correspondían a las condiciones del nivel estático para la zona, para las condiciones naturales. Por lo que en el estado estacionario se evaluará con respecto a dichas cargas hidráulicas del flujo subterráneo de 35 a 30 cuya dirección es de Norte a Sur. Este periodo se simulará el estado natural previo, una fase de “precalentamiento” sin bombeo ni recarga, de tal forma que el resultado de cargas hidráulicas sirva como condición inicial en el periodo transitorio.



Ilustración 28. Modelo con condiciones de frontera Norte – Sur (Estado Estacionario)

III.6.5.5. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Aunque los parámetros asignados en este estado de la modelación, posteriormente sean modificados en el proceso de calibración, es necesario y conveniente introducir valores iniciales razonables que sean consistentes con el acuífero para que el resultado del modelo, sea aproximado al real. Dichas estimaciones iniciales ya se han tratado en apartados anteriores.

III.6.5.5.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA HORIZONTAL

En el subapartado de “Caracterización hidrogeológica” se habla sobre el rango de valores que se tienen para la transmisividad “T” con el que se puede determinar el valor de la conductividad hidráulica, mediante los métodos de Neuman, Theis y Jacob se obtuvo el siguiente rango de valores:

$3.24 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (280.1 $\text{m}^2/\text{día}$) a $9.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (843.3 $\text{m}^2/\text{día}$).

En la zona de estudio de la Torre Tres Ríos, con una prueba de bombeo ver Anexo “Gráfica del Registro de Aforo”, se procede el análisis e interpretación de la transmisividad con el método de Cooper-Jacob, el cálculo se hizo mediante una hoja de cálculo en Excel programada con los criterios del método y su ajuste para determinar los valores de transmisividad (T) y de conductividad hidráulica (K), ver en el Anexo “Cálculo de parámetros hidráulicos para la zona de estudio”, los valores fueron de 470 $\text{m}^2/\text{día}$ y 28 $\text{m}^2/\text{día}$ respectivamente. El valor de “T” obtenido se encuentra dentro del rango del acuífero del Río Culiacán y el valor de “K” hace alusión al coeficiente de arenas, ambos valores son consistentes y por lo tanto son considerados buenos parámetros hidráulicos para la zona de estudio.

De tal manera que el valor de 28 $\text{m}^2/\text{día}$ de conductividad hidráulica horizontal, correspondiente a la primera capa, se debe trasladar a m^2/s recordando que la discretización temporal es en segundos, por lo tanto las medidas deben ser compatibles al ingresarlas teniendo así un valor de $3.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y para la segunda capa al no tener registro de pruebas de bombeo y ser menos permeable se considerará un valor de $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

III.6.5.5.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA VERTICAL

De acuerdo con las características del código numérico MODFLOW, el flujo entre las capas del modelo fue simulado como flujo vertical a través de un suelo estratificado, se asume que la conductividad hidráulica en X e Y (K_x y K_y) sus componentes horizontales del flujo son iguales, sin embargo la componente en Z (K_z) es mucho menor, por lo que se ha considerado anisotropía vertical en el modelo. De manera automática, el programa MODFLOW considera el 10% de las componentes horizontales para la componente vertical, siendo un “factor de goteo” en donde dicha capacidad de transmitir el flujo de forma vertical es mucho menor. El valor utilizado para K_z es de $3.24 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para la primera capa que corresponde a materiales aluvio-fluviales y de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para la segunda capa correspondiente a materiales rocosos.

III.6.5.5.1. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

Las pruebas de la zona no permitieron determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero, sin embargo según el estudio de CONAGUA de disponibilidad media anual en el acuífero del Río Culiacán, por correlación con acuíferos vecinos que tienen la misma constitución geológica, para fines del balance se considera un valor de 0.11 (De la Federación, 2018).

III.6.5.5.1. FUENTES Y/O SUMIDEROS

Las fuentes y/o sumideros corresponden a componentes hidrológicos tales como los pozos de extracción, recarga, evapotranspiración, ríos que se incorporan al acuífero añadiendo o extrayendo un cierto volumen.

Pozos (sistema wellpoint).

El volumen extraído por el sistema wellpoint es simulado como una fuente o sumidero en la ecuación del movimiento del agua subterránea, que determina las curvas de abatimiento en la zona de interés del acuífero modelado.

Recarga (infiltraciones por lluvia, temporada de riego, ríos).

El periodo de riego juega un papel muy importante en la solución del sistema, por lo que para sus valores, se considera a partir del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA con clave 10081 de la estación “El Varejonal” y 10134 de la estación “Sanalona” que influyen dentro del proyecto, cuyo histórico nos permite determinar un promedio mensual del gasto en cada uno de los ríos presentes en el acuífero y es muy importante, debido a que la influencia de ambos ríos, con su periodo de riego, con respecto a la precipitación es un componente importante para el acuífero superior. Para los fines de la modelación, las principales recargas provienen de la infiltración por la lluvia y los ríos en temporada de riego.

III.6.5.6. SISTEMA DE ABATIMIENTO

Se implementará en el modelo un sistema wellpoint para abatir el nivel freático del punto de interés del proyecto “Torre Tres Ríos”, según las especificaciones y características del manual CIRIA C750 que coincide con otras bibliografías consultadas, es consistente la conexión de pozos de extracción, los cuales se posicionarán a 32.5 msnm, a una separación de 3 metros entre pozos. Si se considera que el sistema wellpoint funciona para un descenso de hasta 6 metros, en este ejercicio el abatimiento se plantea de 7.5 metros si consideramos la elevación media de la zona que es 40 msnm, sin embargo el proceso de abatimiento se realizará desplantado desde los 37 msnm por lo que el sistema solo estará descendiendo 4.5 metros, cumpliendo así con esa condición y se procurará utilizar otra bomba que conduzca lo que el sistema wellpoint extrae y lo deposite en la zona de descarga de alcantarillado que se encuentra próxima en la zona, habiendo previamente obtenido el permiso requerido para realizar dicha descarga.

Se procederá a modelar una vez el modelo se encuentre calibrado en estado transitorio para determinar la posición y el gasto que se extraerá de la zona para que cumpla con la condición de que el abatimiento solo tenga influencia en el predio designado al proyecto. Una vez se obtenga esa condición, el resultado del diseño final del sistema wellpoint se desarrollará en el apartado “Diseño del sistema wellpoint”.

III.6.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso de calibración consiste en ajustar los valores de cargas hidráulicas calculadas por el modelo con aquellas observadas en campo para diferentes períodos de esfuerzo, de tal manera que la dinámica del agua subterránea cumpla lo definido en el modelo conceptual (Anderson et al., 2015).

La comparación de cargas calibradas y modificadas se realizó mediante dos métodos:

- El Error Absoluto Medio (EAM) y
- la Desviación Estándar

Los algoritmos empleados se señalan a continuación:

Error Absoluto Medio

La ecuación que define el EAM está dada por:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_{oi} - h_i|$$

(Ecuación 10)

Donde:

EAM	error absoluto medio
<i>n</i>	número de observaciones
<i>h_{oi}</i>	carga hidráulica calculada por el modelo
<i>h_i</i>	carga hidráulica calculada con el parámetro modificado

Desviación Estándar

El análisis se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_{oi} - h_i)]^2}$$

(Ecuación 11)

Donde:

δ	Desviación estándar
<i>n</i>	número de observaciones
<i>h_{oi}</i>	carga hidráulica calculada con el modelo
<i>h_i</i>	carga hidráulica calculada con el parámetro modificado

El proceso de calibración se realizará con los datos observados de campo y los resultados que arroje el modelo, considerando solamente el escenario del acuífero en estado transitorio sin bombeo.

III.6.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO

En los siguientes subtemas se realizarán ejercicios de modelación de gran interés para evaluar el efecto de incluir los parámetros hidrogeológicos en sus respectivos estados y escenarios, bajo la influencia de los sistemas en los que se representan condiciones probables de las propiedades del acuífero y que facilitan el comprender cuál es el comportamiento del nivel freático permitiendo evaluar la respuesta del acuífero.

III.6.7.1. ESTADO ESTACIONARIO

El escenario de condiciones iniciales consistió en simular las condiciones originales previo a someterse a fuentes y sumideros, considerando solamente el nivel estático, las cargas hidráulicas iniciales, que se muestran según la Ilustración 19, con valores de 35 a 30 msnm en dirección Norte a Sur.

La discretización temporal es independiente en el estado estacionario, así dure 1 segundo o 1000 segundos, el resultado no varía, por la condición del estado estacionario que no involucra ningún cambio a través del tiempo.

Los resultados obtenidos a partir de la modelación fueron los siguientes:

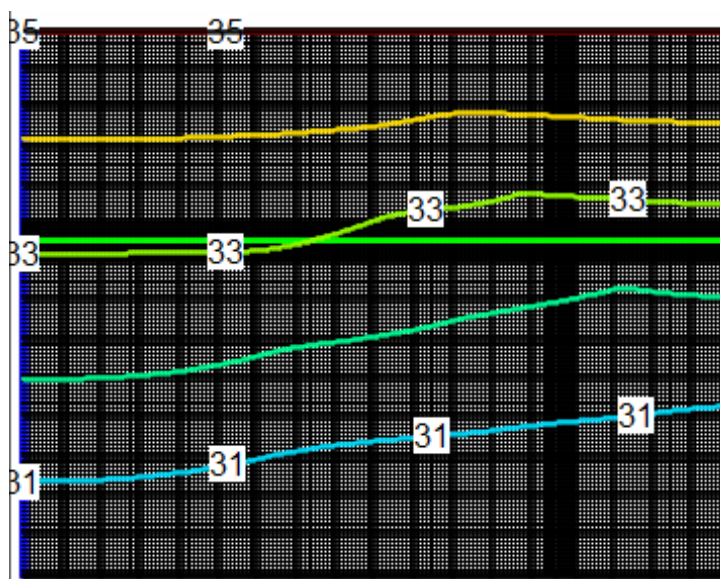


Ilustración 29. Elevación del nivel estático (msnm) en condiciones iniciales, estado estacionario.

De la primera corrida en el modelo de flujo subterráneo se puede observar el comportamiento del nivel estático y además es posible identificar que el punto de interés donde se encuentra la malla refinada, se encuentra entre las curvas 33 y 32, considerando que en este resultado no existe ninguna recarga de ningún tipo.

Los resultados obtenidos de las cargas hidráulicas, servirán de referencia como condiciones iniciales para la siguiente corrida de la modelación en estado transitorio con recargas de precipitación y la influencia de los ríos.

Otra forma de visualización del modelo con las cargas iniciales en todos sus planos, es por medio de celdas coloreadas como se muestra a continuación.

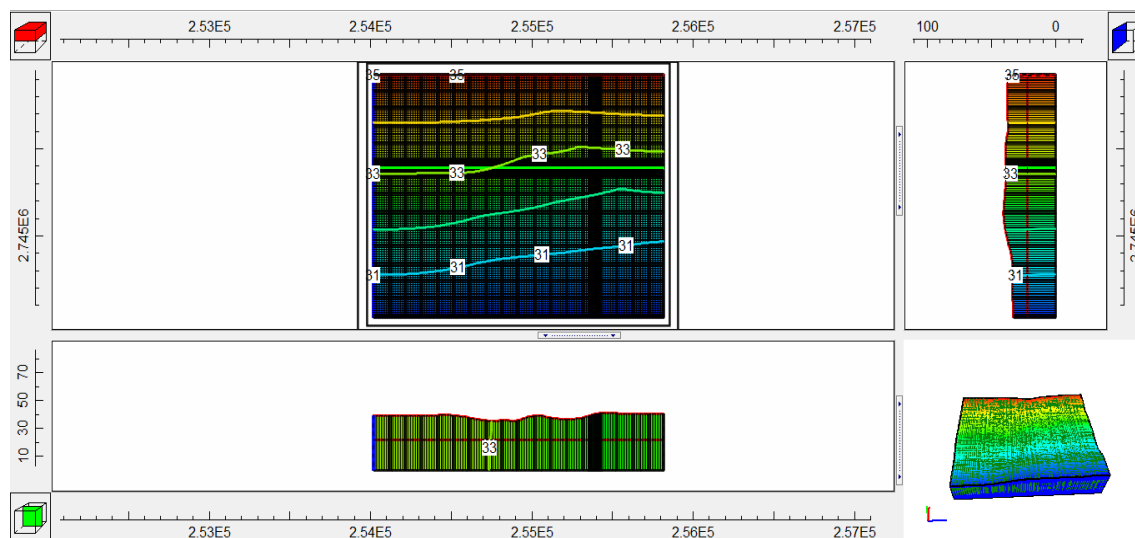


Ilustración 30. Resultados gráficos del modelo en estado estacionario.

III.6.7.2. ESTADO TRANSITORIO SIN SISTEMA DE ABATIMIENTO

El modelo en estado transitorio considerará las cargas hidráulicas obtenidas del ejercicio anterior en estado estacionario como condiciones iniciales, y se agregarán recargas por precipitación, evapotranspiración y ríos.

Al analizar los resultados de esta corrida se procede a evaluar el comportamiento del nivel freático, los cuales se utilizarán para el apartado siguiente en la calibración del modelo. El tiempo de discretización para los resultados fue de cada mes con sus respectivas características hidrogeológicas planteadas. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

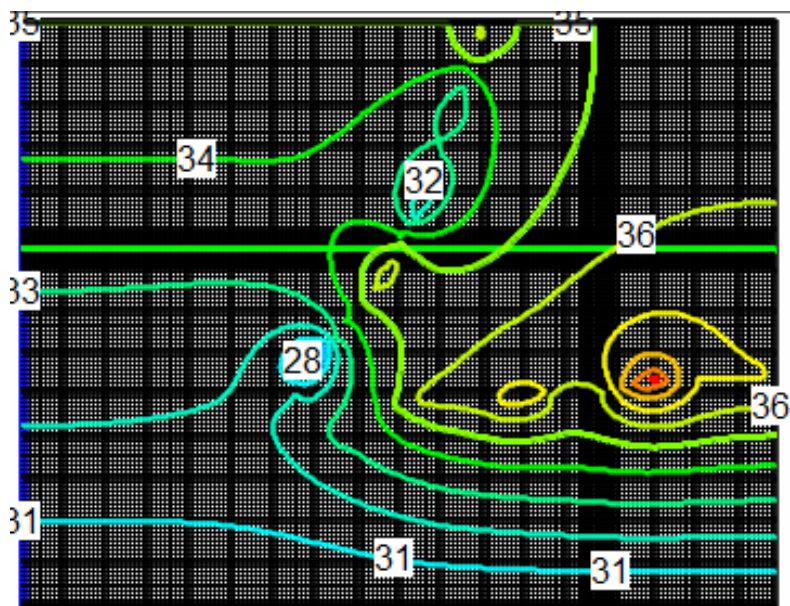


Ilustración 31. Elevación nivel estático estado transitorio (Enero).

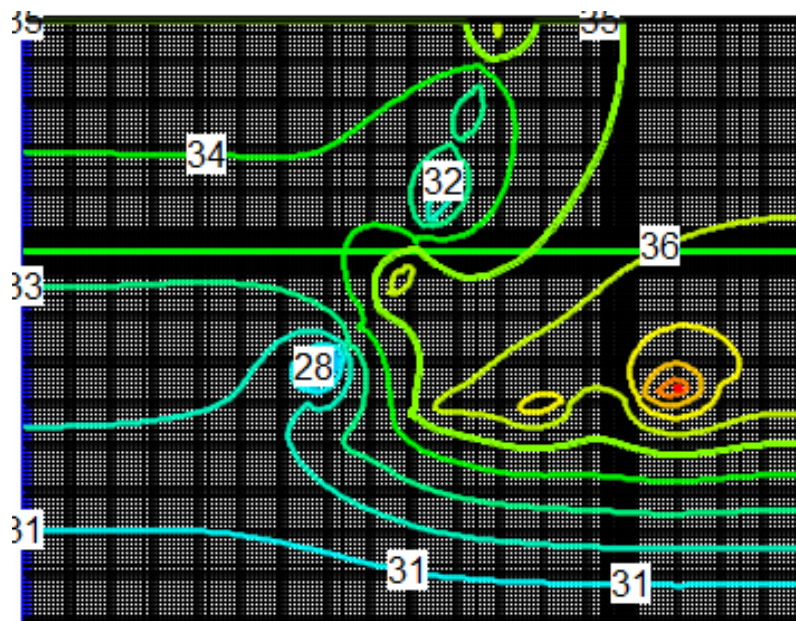


Ilustración 32. Elevación nivel estático estado transitorio (Febrero).

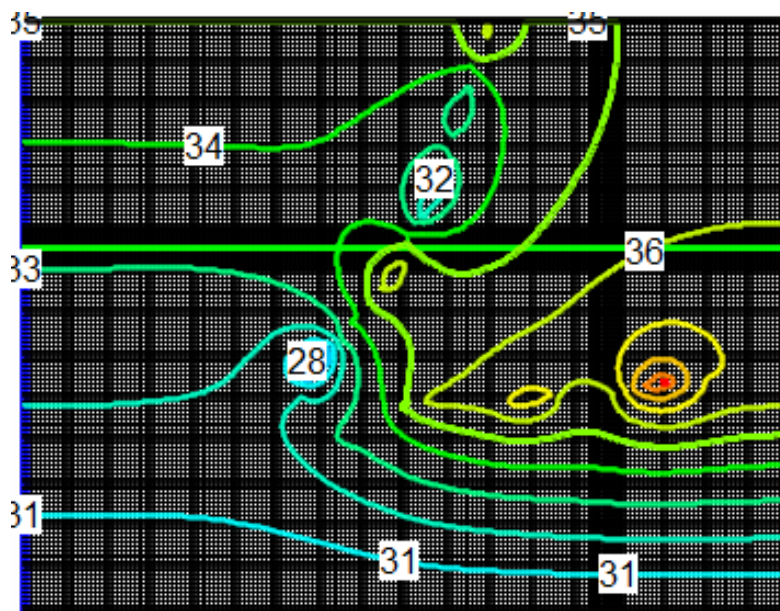


Ilustración 33. Elevación nivel estático estado transitorio (Marzo).

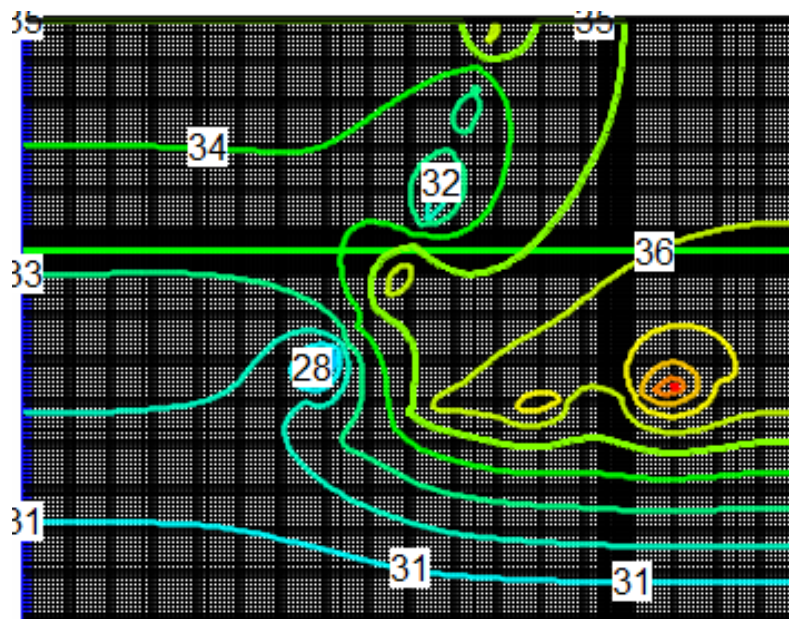


Ilustración 34. Elevación nivel estático estado transitorio (Abril).

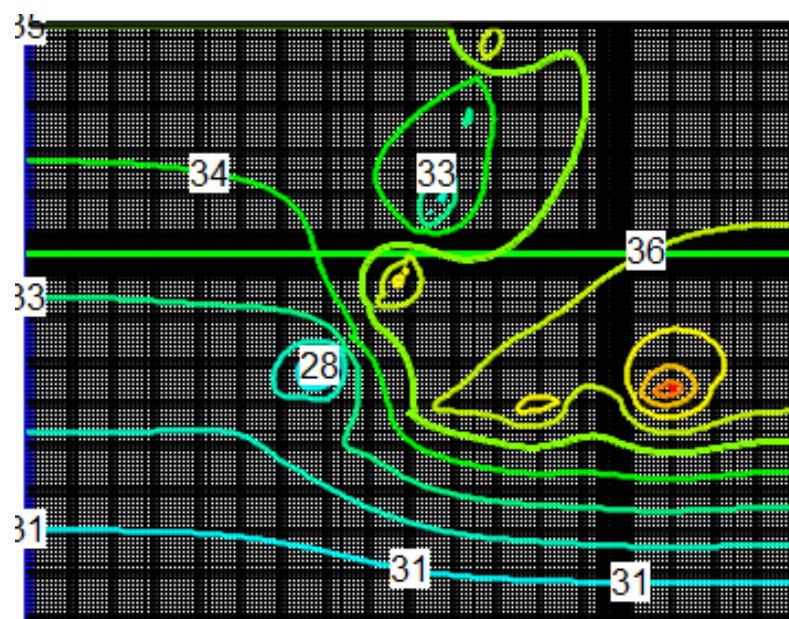


Ilustración 35. Elevación nivel estático estado transitorio (Mayo).

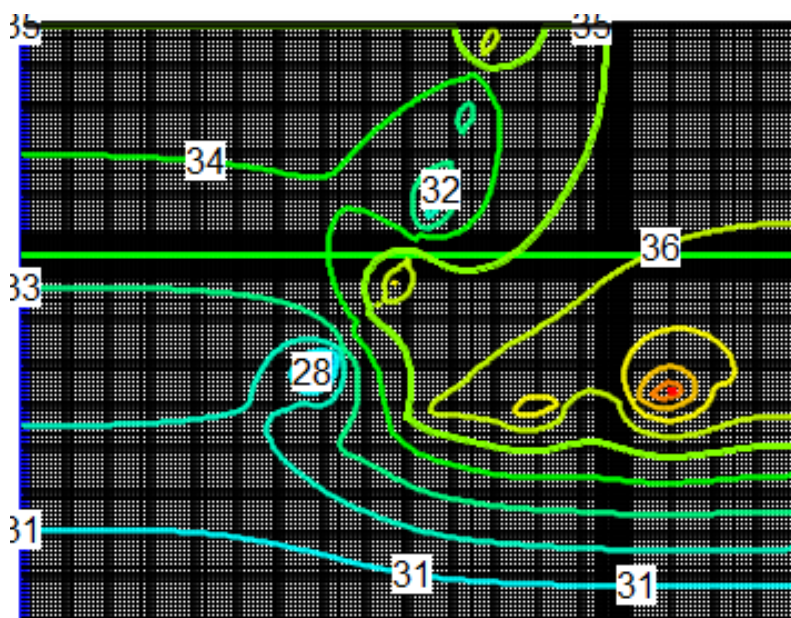


Ilustración 36. Elevación nivel estático estado transitorio (Junio).

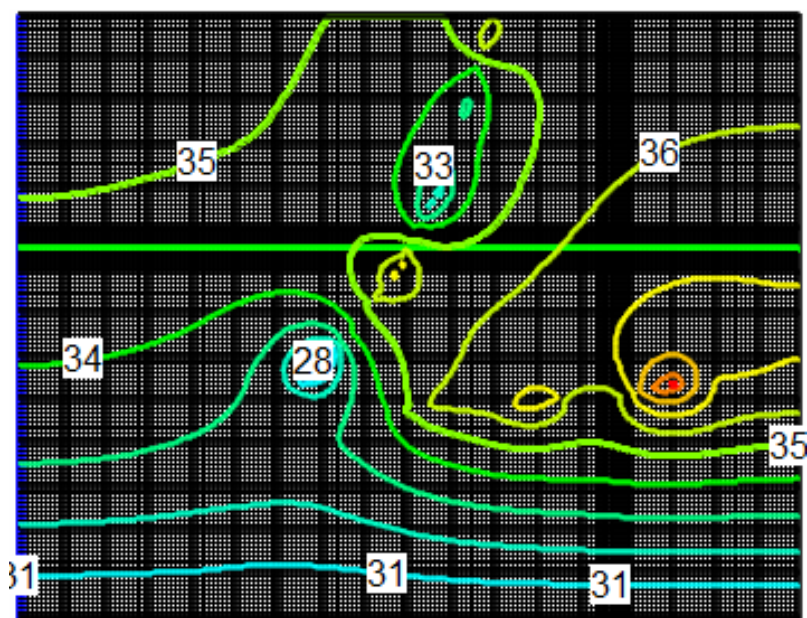


Ilustración 37. Elevación nivel estático estado transitorio (Julio).

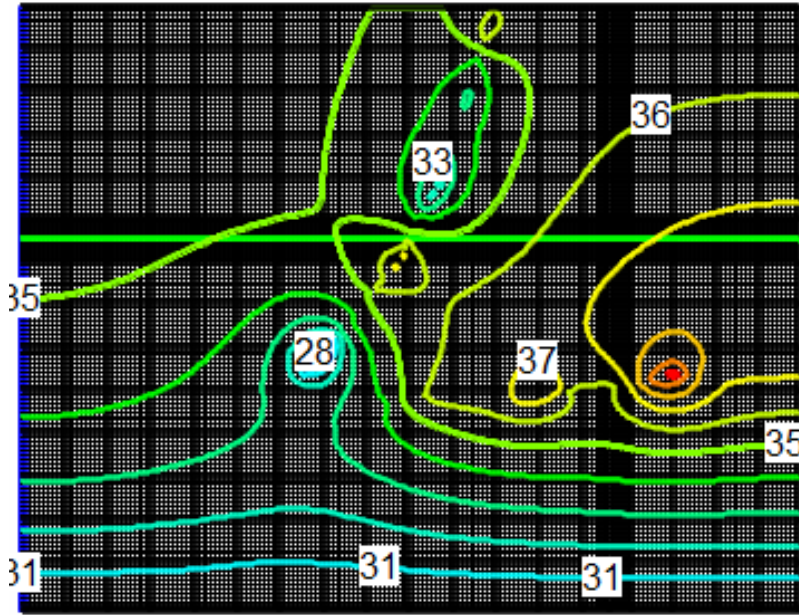


Ilustración 38. Elevación nivel estático estado transitorio (Agosto).

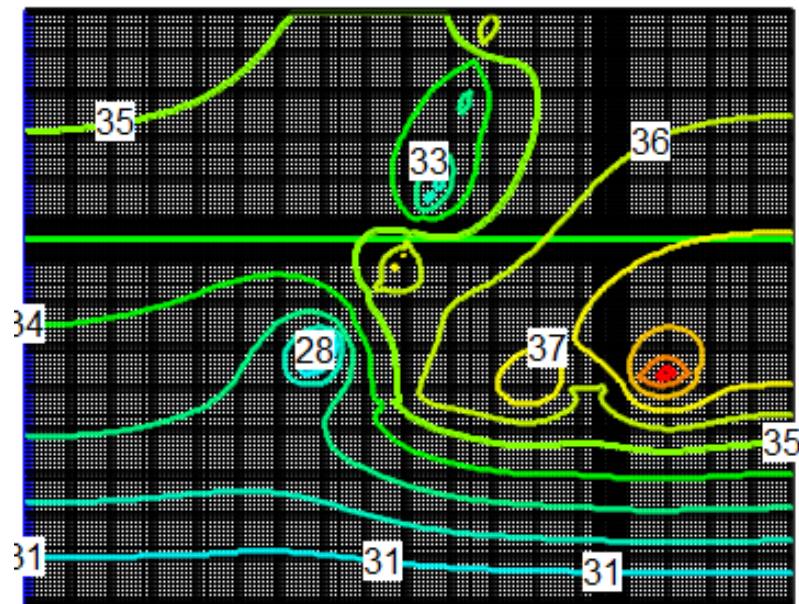


Ilustración 39. Elevación nivel estático estado transitorio (Septiembre).

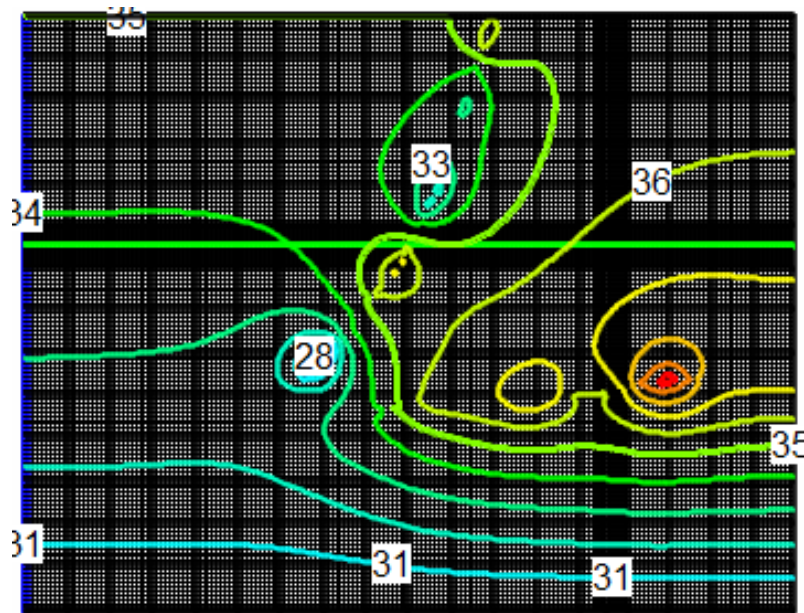


Ilustración 40. Elevación nivel estático estado transitorio (Octubre).

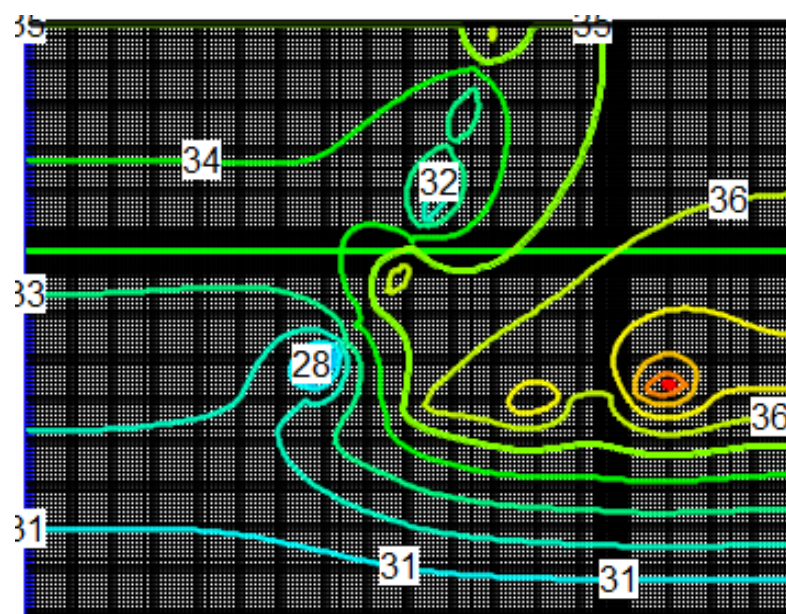


Ilustración 41. Elevación nivel estático estado transitorio (Noviembre).

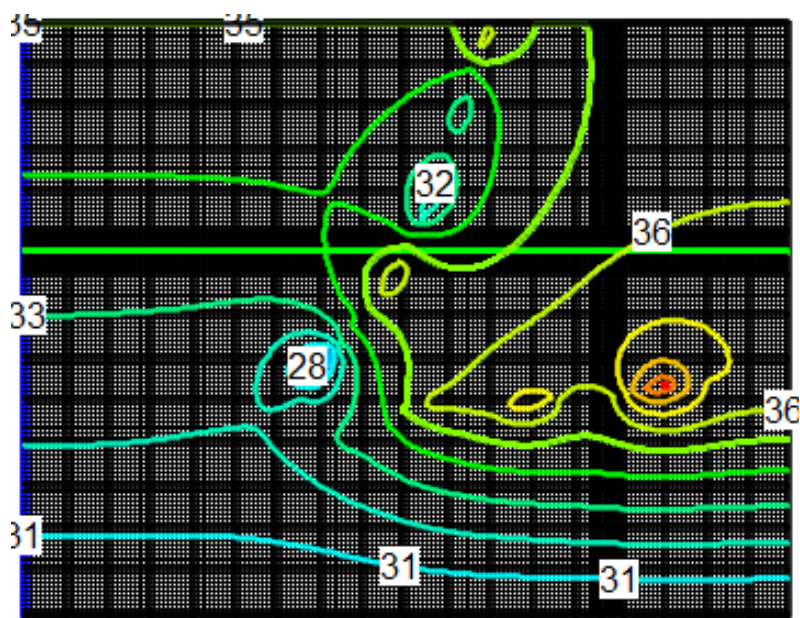


Ilustración 42. Elevación nivel estático estado transitorio (Diciembre).

III.6.7.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Este apartado presenta el proceso llevado a cabo para calibrar el modelo, es decir, el ajuste de los parámetros para que represente la realidad de la forma más cercana posible. Para poder realizar este ajuste se debe de disponer de al menos un conjunto de datos observados para poder compararlos con los resultados del modelo. En este proceso debido a las características del modelo únicamente se modificará la conductividad hidráulica de las zonas del acuífero, asumiendo que la recarga y las condiciones de frontera del mismo son válidas.

Como se mencionó anteriormente, se usará el método de EAM y la desviación estándar para la calibración del modelo, considerando el nivel piezométrico observado en la zona de interés del proyecto “Torre Tres Ríos” como se presenta a continuación:

Tabla 6. Niveles piezométricos observados en campo.

MES	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL ESTÁTICO (msnm)
JULIO	7.00	33.00
OCTUBRE	4.26	35.74
NOVIEMBRE	4.80	35.20

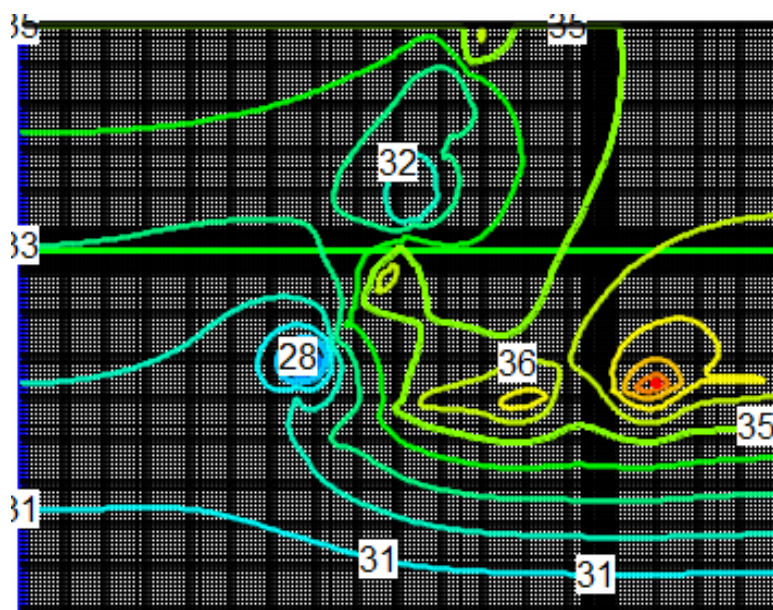


Ilustración 43. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Enero).

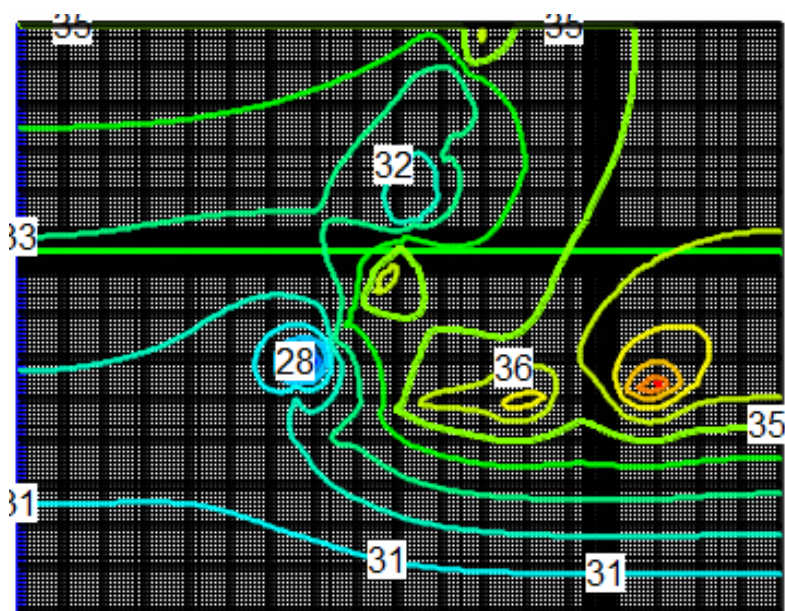


Ilustración 44. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Febrero).

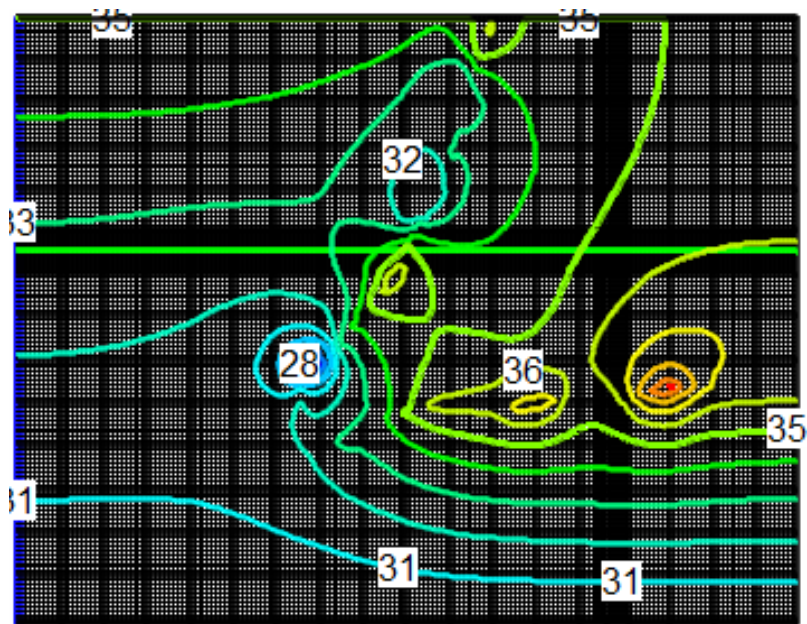


Ilustración 45. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Marzo).

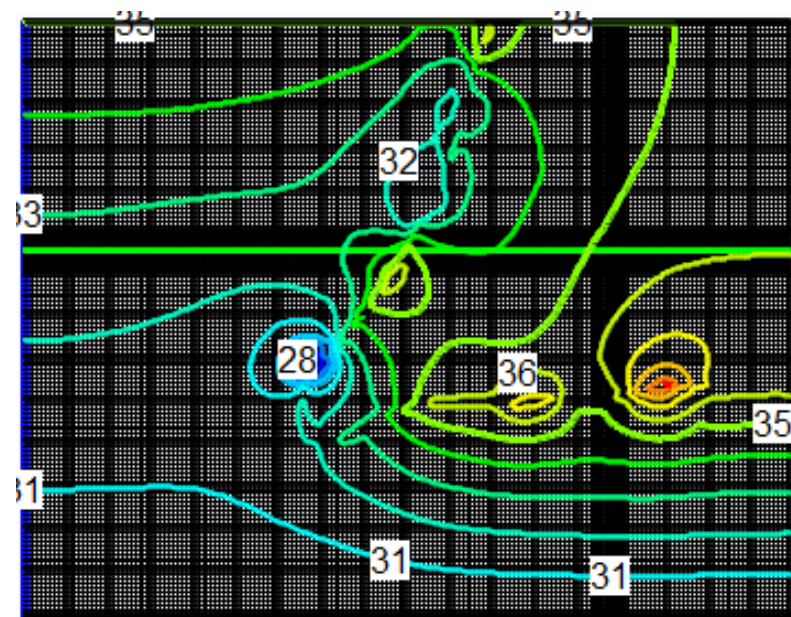


Ilustración 46. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Abril).

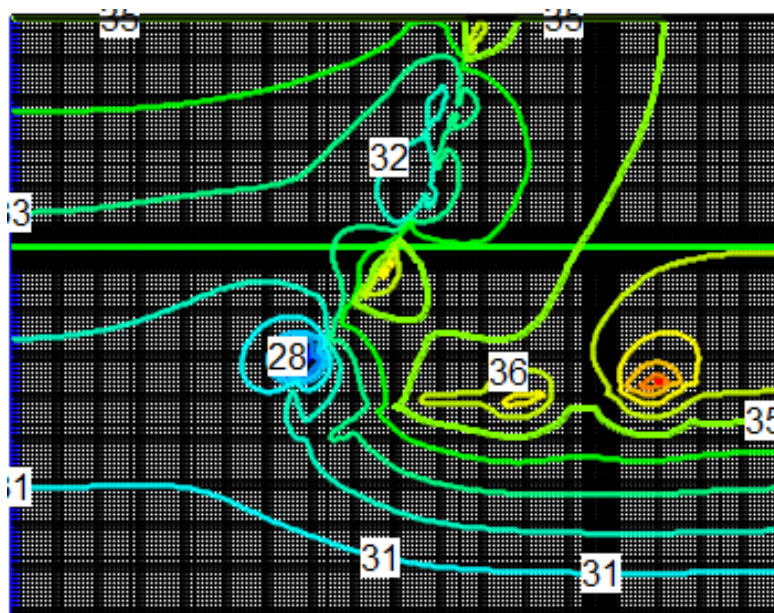


Ilustración 47. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Mayo).

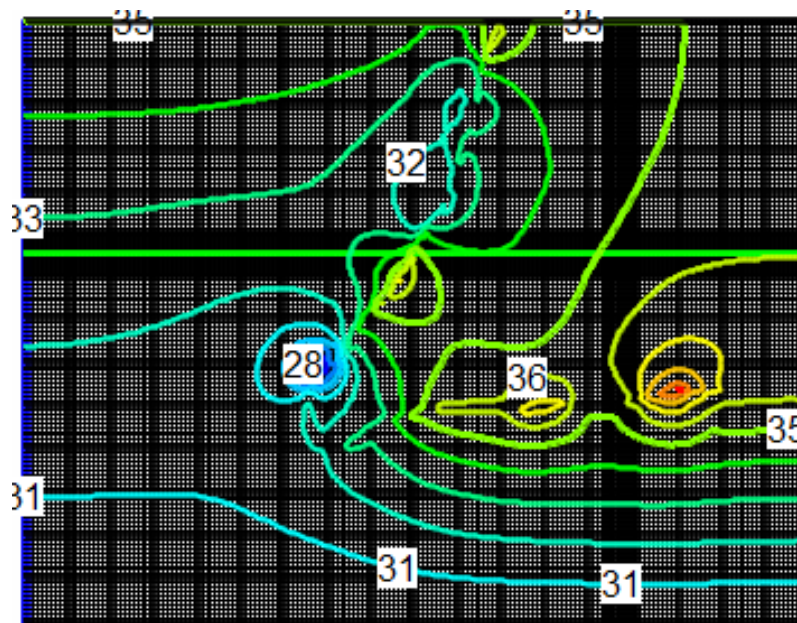


Ilustración 48. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Junio).

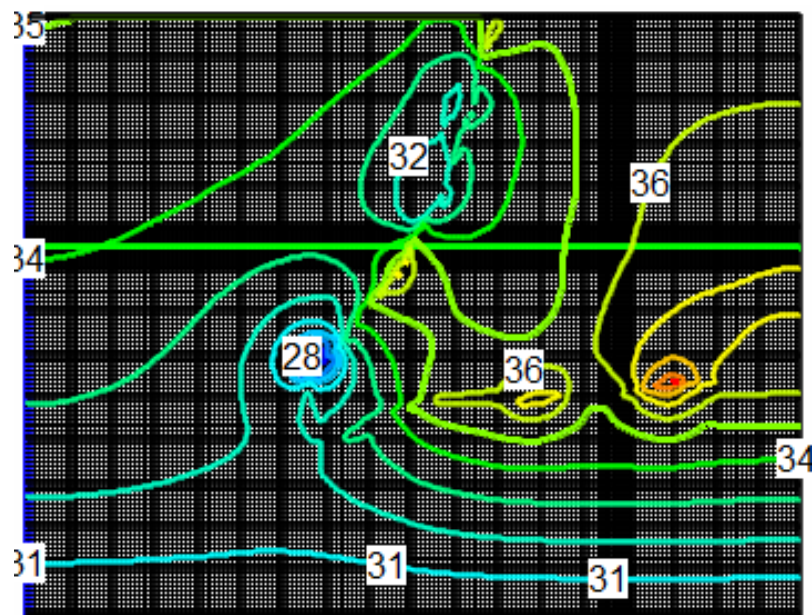


Ilustración 49. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Julio).

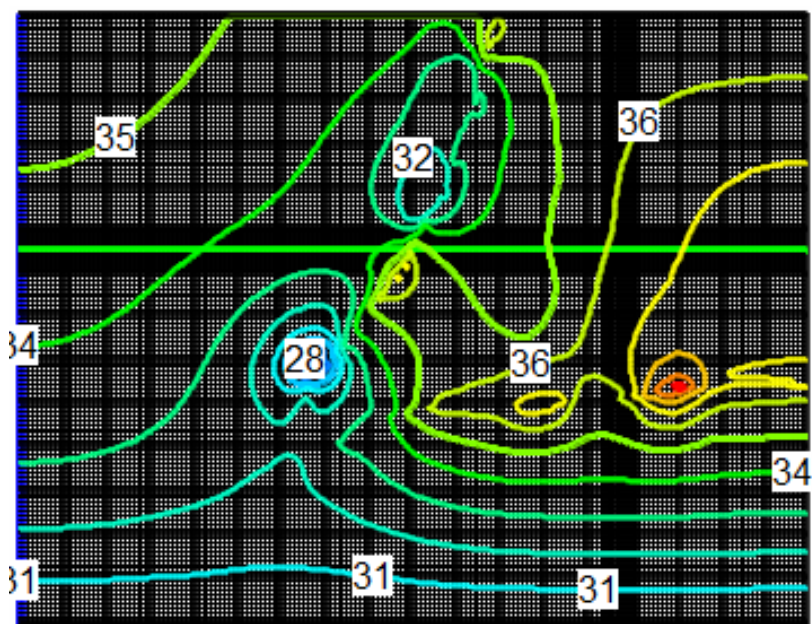


Ilustración 50. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Agosto).

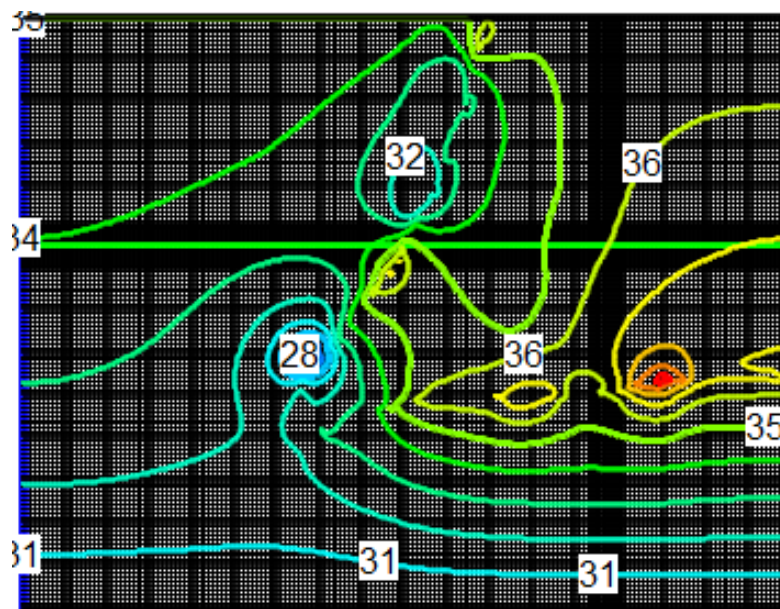


Ilustración 51. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Septiembre).

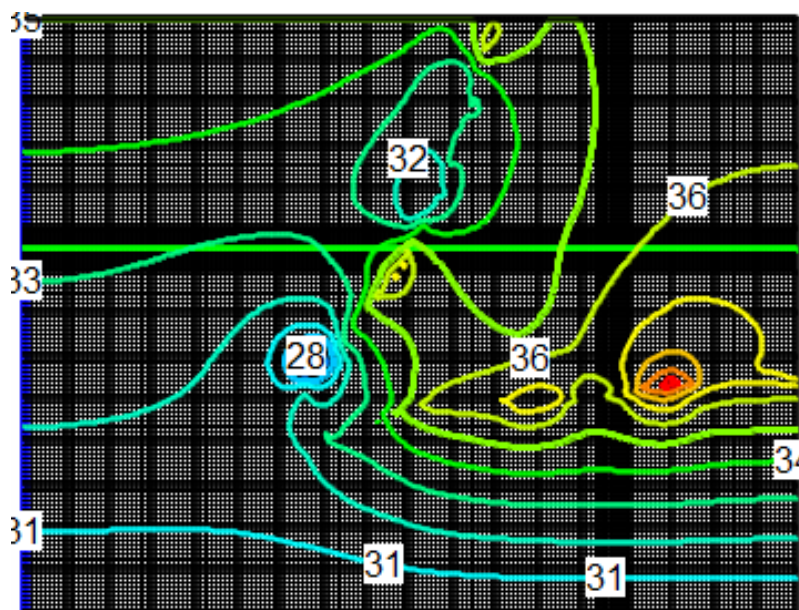


Ilustración 52. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Octubre).

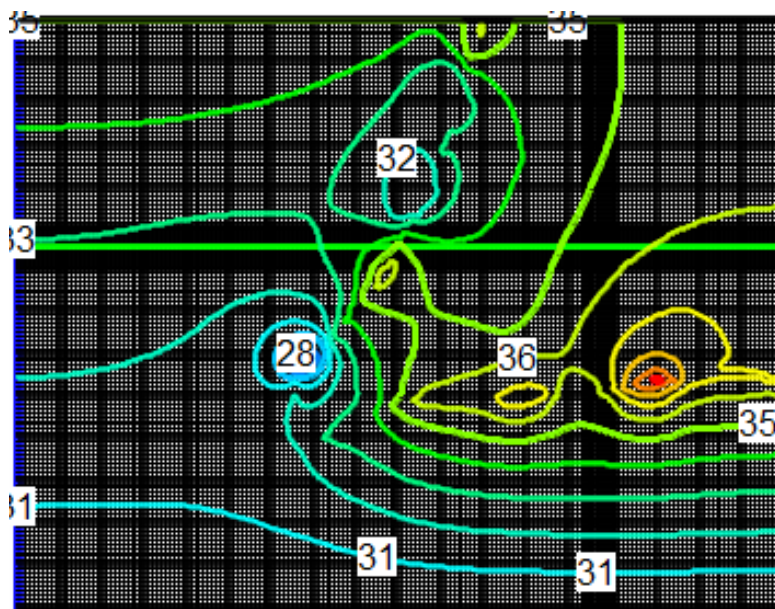


Ilustración 53. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Noviembre).

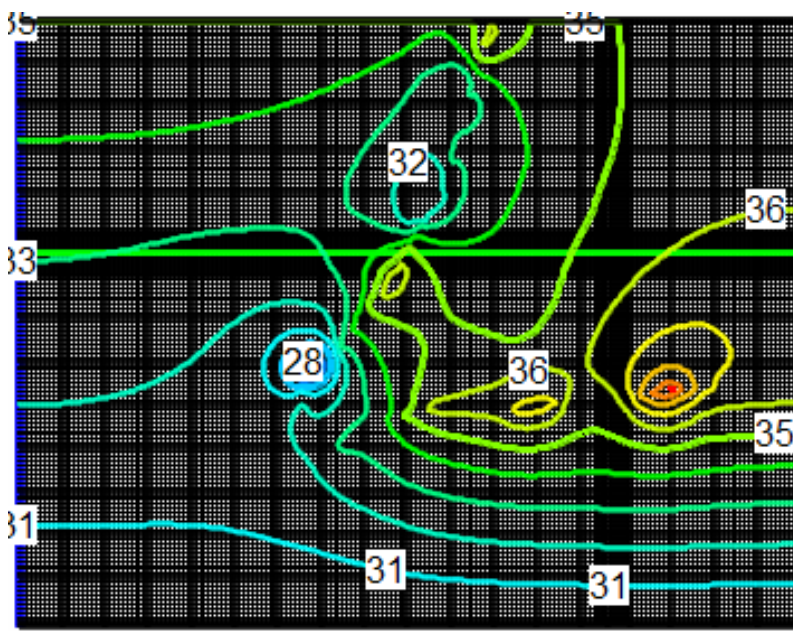


Ilustración 54. Elevación nivel estático estado transitorio, calibrado (Diciembre).

Para determinar el nivel freático en la zona de interés se ubicó un pozo de observación para observar y comparar los resultados del modelo contra lo observado en campo. Desafortunadamente solamente se obtuvieron 4 datos de campo, sin embargo uno de ellos no cuenta con fecha de observación y el valor de 33 msnm del mes de julio es inconsistente con los parámetros hidrogeológicos de la zona, existe la probabilidad de que hubiera algún error al tomar el dato, o bien que exista una formación geológica en el punto donde se realizó el estudio de Mecánica de Suelos, donde se determinó la profundidad del nivel freático que impidiera la conductividad hidráulica y afectara el comportamiento del nivel freático en el punto, por lo que se tienen dos datos que pueden analizarse y compararse, una vez habiendo realizado el proceso de calibración a través de cambios en valores de la conductividad hidráulica, se llegaron a valores aproximados para ambas fechas, teniendo en consideración lo observado en el pozo como se muestra a continuación:

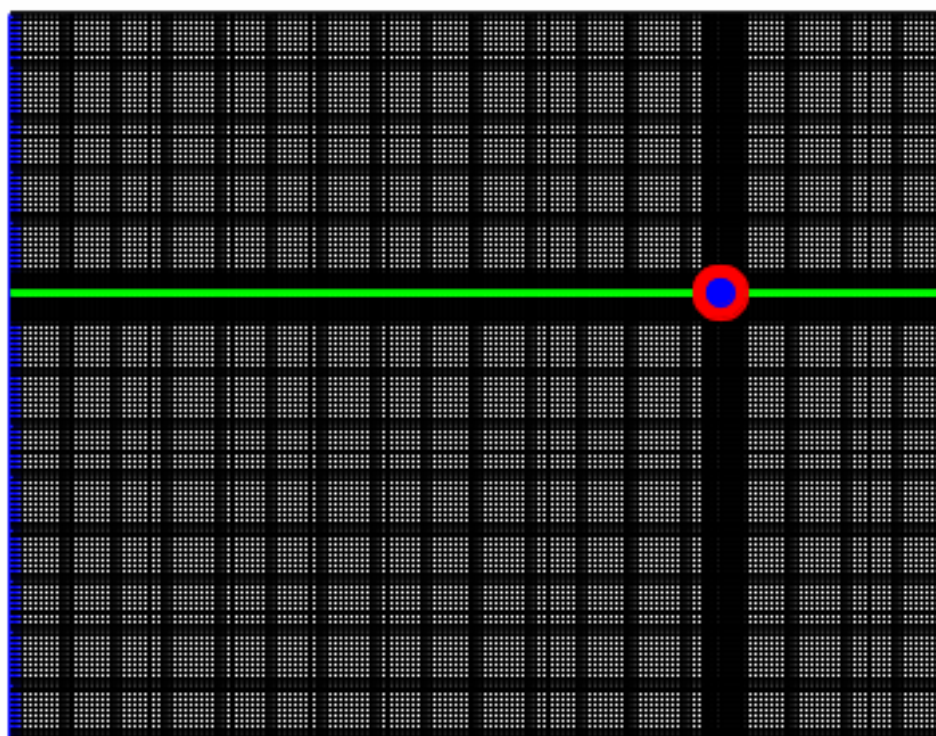


Ilustración 55. Ubicación del pozo de observación.

Los resultados obtenidos del pozo de observación se presentan a continuación para los meses de octubre y noviembre, haciendo una comparación entre el nivel simulado y el nivel observado.

Tabla 7. Nivel simulado – nivel observado.

MES	NIVEL SIMULADO (m)	NIVEL OBSERVADO (m)	RESIDUAL (m)
OCTUBRE	35.676	35.74	0.064
NOVIEMBRE	35.438	35.20	-0.238

La gráfica de calibración para el modelo presenta un error absoluto medio de 0.15 m y una desviación estándar de 0.174 cuyos resultados muestran que el modelo reproduce de manera congruente y consistente el comportamiento del flujo subterráneo, aunque de haber sido posible con un mayor número de observaciones la calibración podría afinarse mucho más. A continuación se presenta una gráfica con los dos datos observados y los simulados que el mismo programa MODELMOUSE con el código MODFLOW genera.

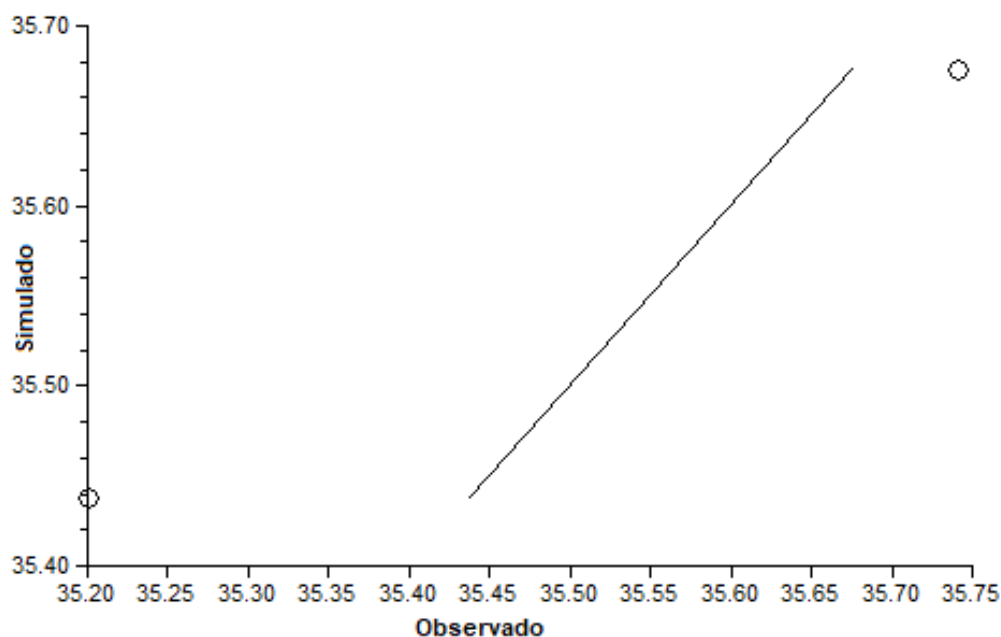


Ilustración 56. Gráfica de calibración datos observados – datos simulados.

III.6.7.4. ESTADO TRANSITORIO CON SISTEMA WELLPOINT

El sistema de bombeo propuesto para el proyecto consiste en un sistema wellpoint de un total de 28 pozos ubicados en el interior del predio; dicho sistema se somete a la modelación numérica correspondiente al modelo previamente calibrado para poder determinar la influencia que los pozos tendrán en el comportamiento del nivel freático.

La modelación se realiza en estado transitorio con el paquete de pozos para su evaluación con el código MODFLOW en la interfaz MODELMOUSE de tal forma que permite conocer el abatimiento del nivel freático en cada uno de los periodos modelados y así poder tener una aproximación del gasto que el sistema debe tener para poder abatir el nivel freático al deseado para realizar los procedimientos constructivos en las condiciones óptimas.

La ubicación de los pozos se muestra en la siguiente imagen, así como su posición dentro del sistema de coordenadas dentro del acuífero modelado:

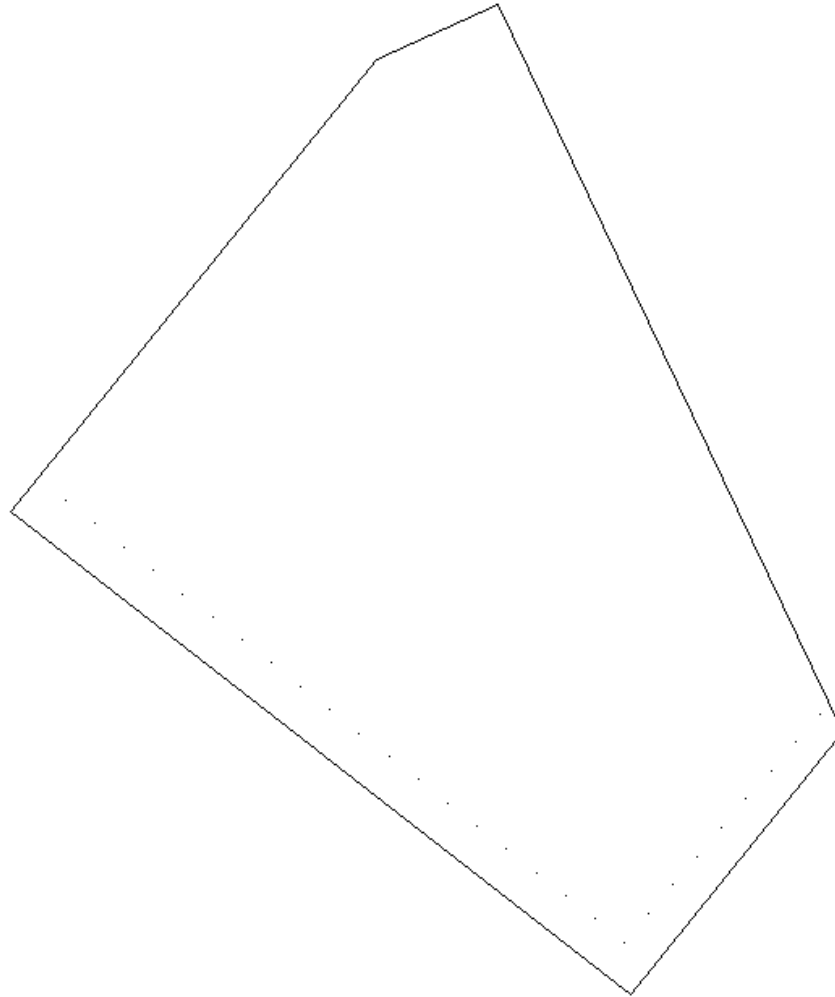


Ilustración 57. Ubicación de los pozos – Propuesta sistema wellpoint “Torre Tres Ríos”.

Los pozos se encuentran ubicados en los siguientes puntos referenciados, procurando tener una separación de 3 metros entre ellos tomando el máximo valor en las bibliografías consultadas tanto el manual CIRIA C750 y otras fuentes mencionadas en capítulos previos, desplantados a una profundidad de aproximadamente 6.5 m sobre el terreno natural considerando una elevación de 40 msnm y a 3 metros de distancia al límite del predio.

Pozo 1 (255362.7718, 2745391.1636)	Pozo 2 (255365.1252, 2745389.3030)
Pozo 3 (255367.4786, 2745387.4425)	Pozo 4 (255369.8319, 2745385.5819)
Pozo 5 (255372.1853, 2745383.7214)	Pozo 6 (255374.5387, 2745381.8608)
Pozo 7 (255376.8920, 2745380.0003)	Pozo 8 (255379.2454, 2745378.1397)
Pozo 9 (255381.5988, 2745376.2792)	Pozo 10 (255383.9521, 2745374.4186)
Pozo 11 (255386.3055, 2745372.5580)	Pozo 12 (255388.6589, 2745370.6975)

Pozo 13 (255391.0122, 2745368.8369)	Pozo 14 (255393.3656, 2745366.9764)
Pozo 15 (255395.7190, 2745365.1158)	Pozo 16 (255398.0723, 2745363.2553)
Pozo 17 (255400.4257, 2745361.3947)	Pozo 18 (255402.7791, 2745359.5342)
Pozo 19 (255405.1324, 2745357.6736)	Pozo 20 (255407.4965, 2745355.8266)
Pozo 21 (255409.3844, 2745358.1581)	Pozo 22 (255411.3415, 2745360.4318)
Pozo 23 (255413.2986, 2745362.7055)	Pozo 24 (255415.2557, 2745364.9792)
Pozo 25 (255417.2128, 2745367.2529)	Pozo 26 (255419.1699, 2745369.5266)
Pozo 27 (255421.1270, 2745371.8003)	Pozo 28 (255423.0841, 2745374.0740)

Para llegar a este diseño mencionado se realizaron diversos escenarios para modelar el comportamiento del flujo subterráneo que mejor se adaptara a las características y condiciones que requiere el proyecto para que pueda desarrollarse en las condiciones óptimas, de tal manera que al realizar la evaluación del modelo en estado transitorio se obtuvieron los siguientes resultados:

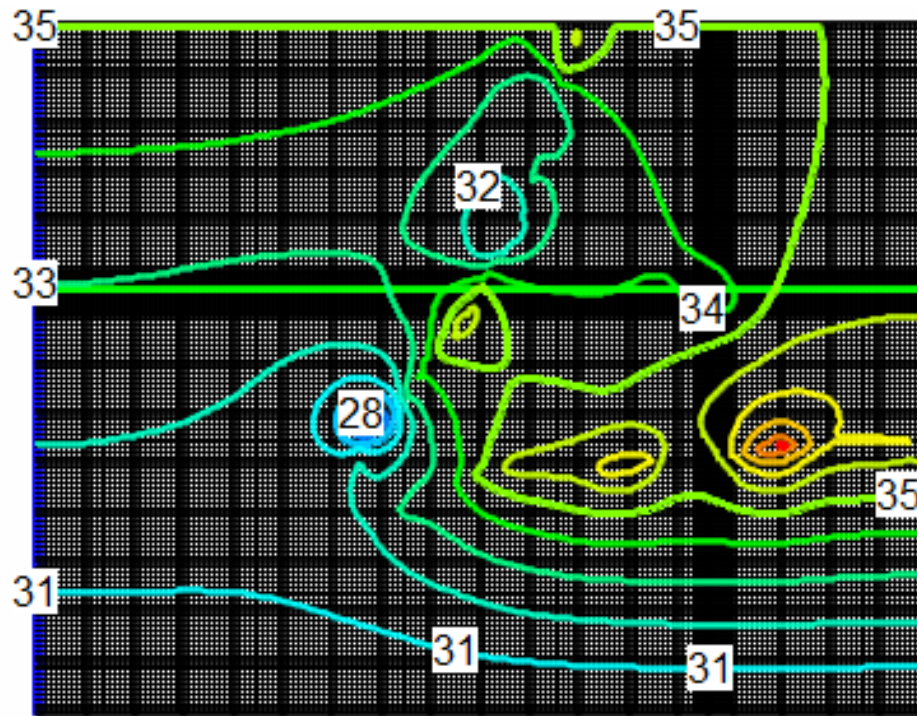


Ilustración 58. Nivel freático con sistema wellpoint (Enero).

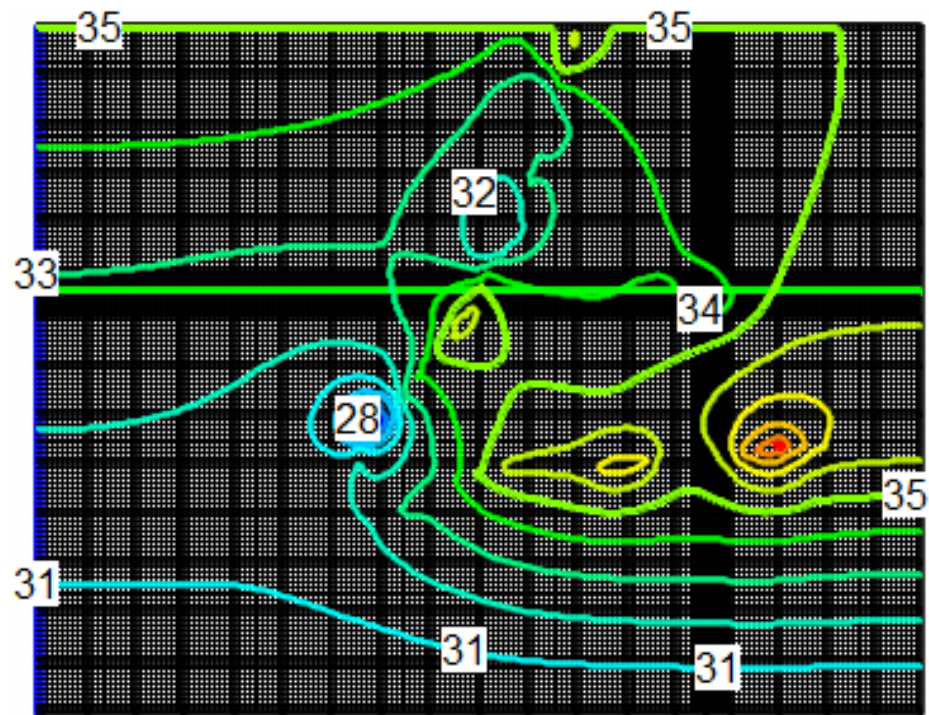


Ilustración 59. Nivel freático con sistema wellpoint (Febrero).

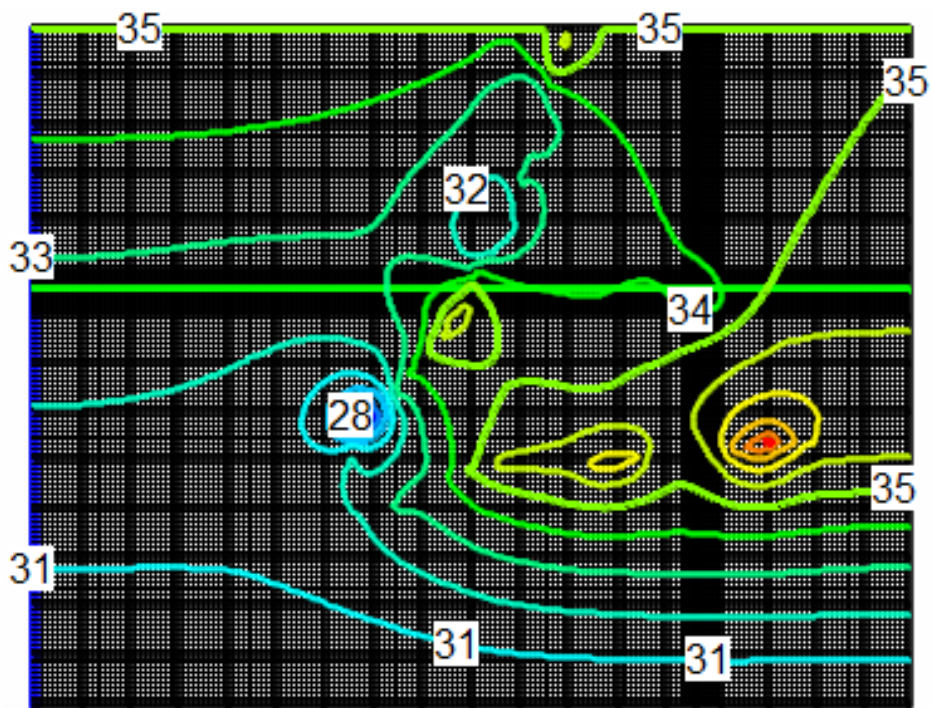


Ilustración 60. Nivel freático con sistema wellpoint (Marzo).

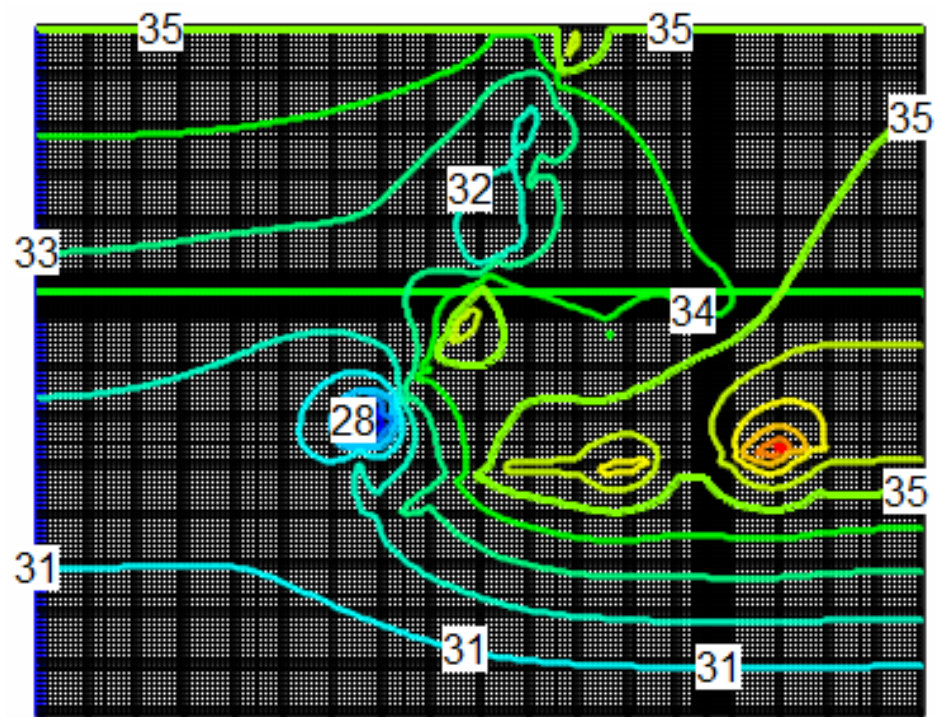


Ilustración 61. Nivel freático con sistema wellpoint (Abril).

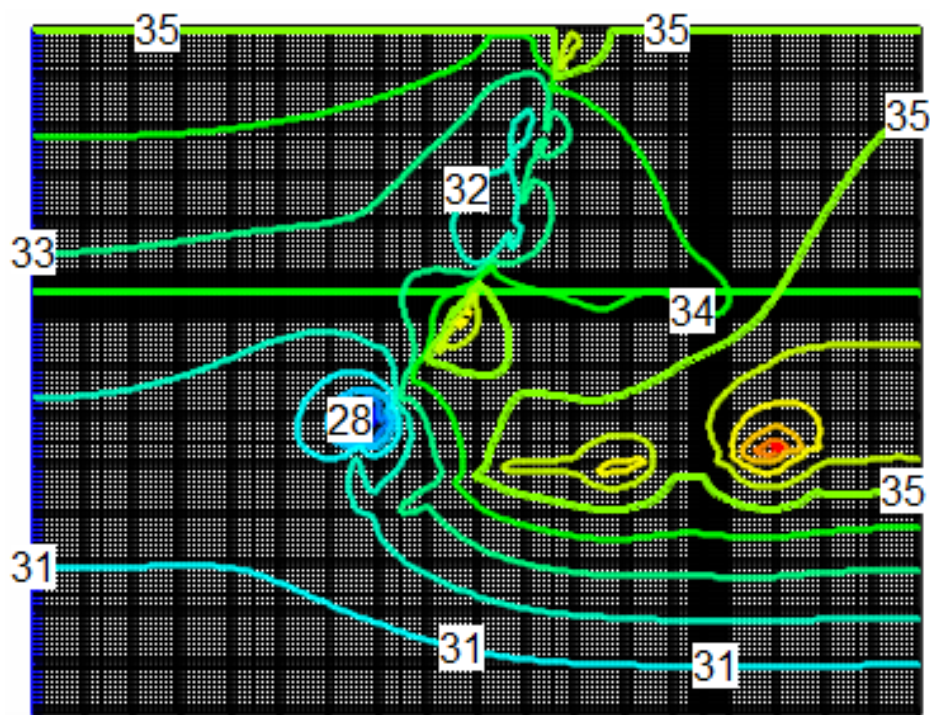


Ilustración 62. Nivel freático con sistema wellpoint (Mayo).

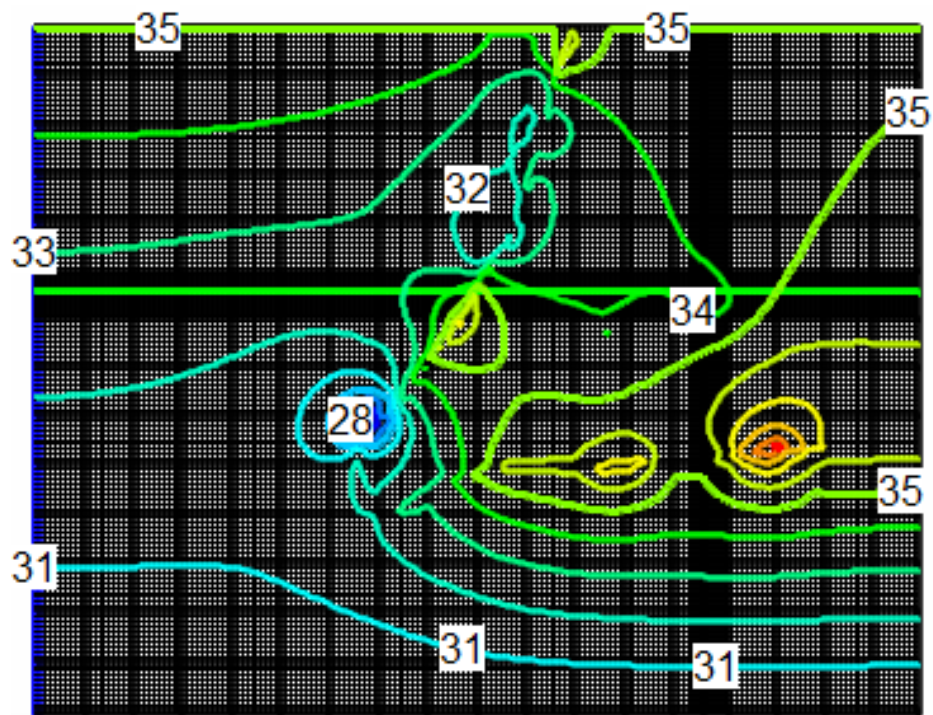


Ilustración 63. Nivel freático con sistema wellpoint (Junio).

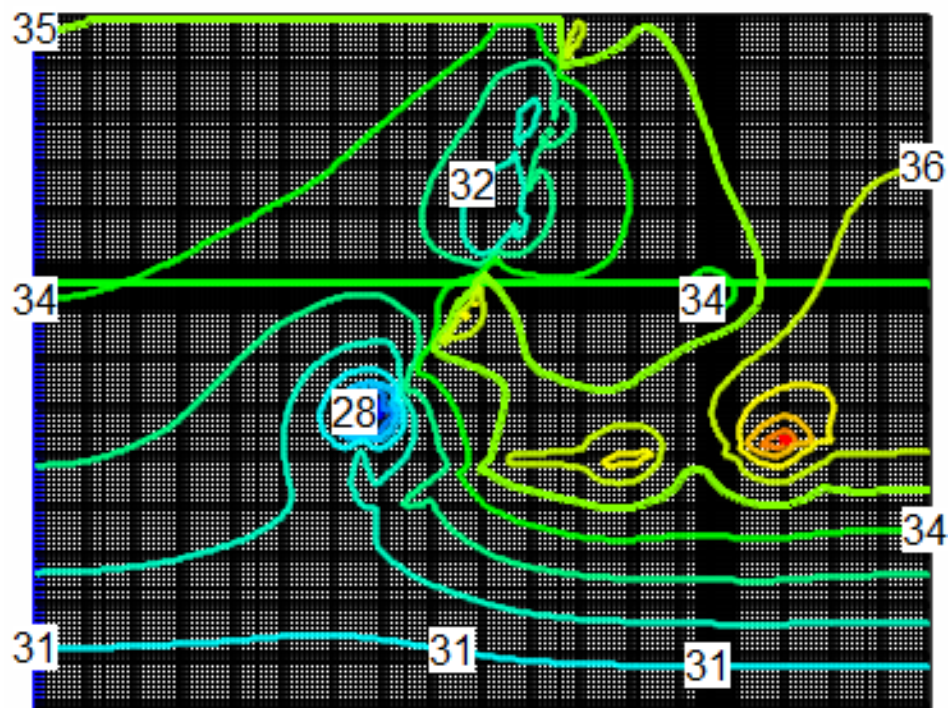


Ilustración 64. Nivel freático con sistema wellpoint (Julio).

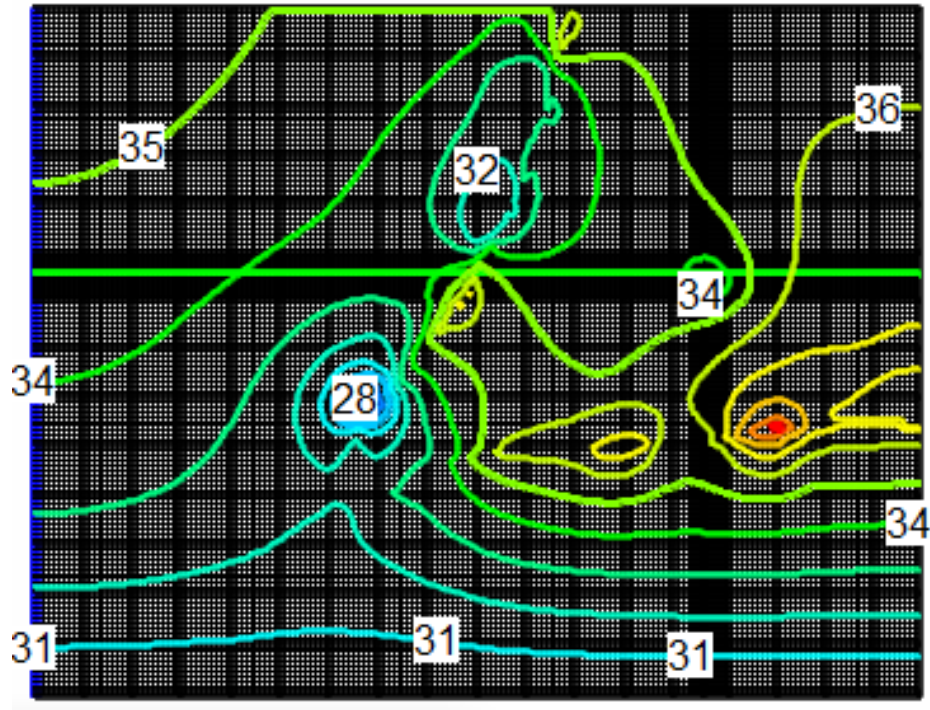


Ilustración 65. Nivel freático con sistema wellpoint (Agosto).

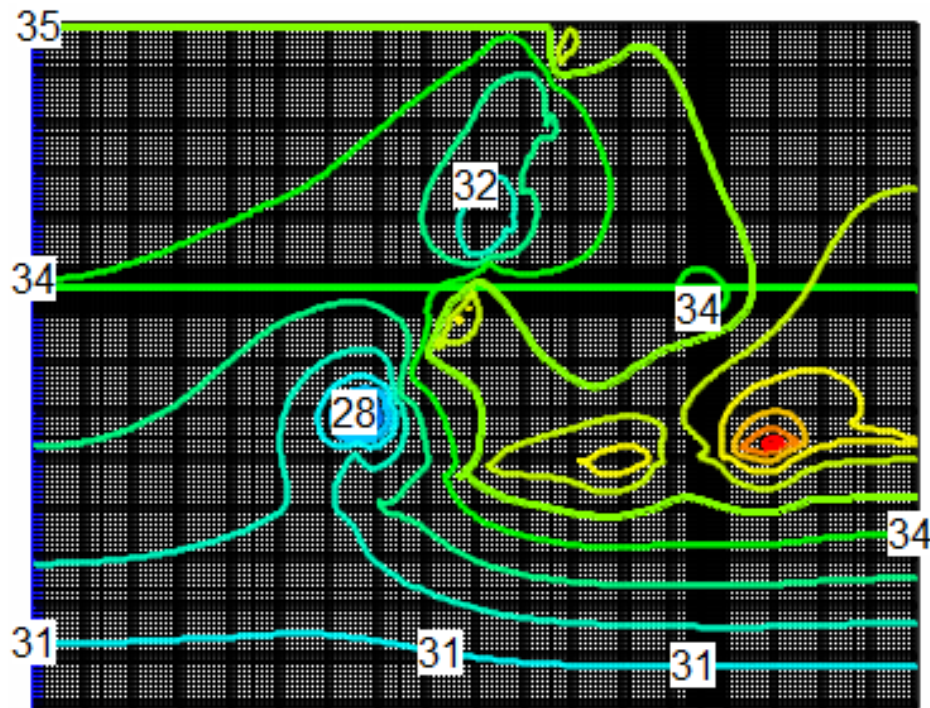


Ilustración 66. Nivel freático con sistema wellpoint (Septiembre).

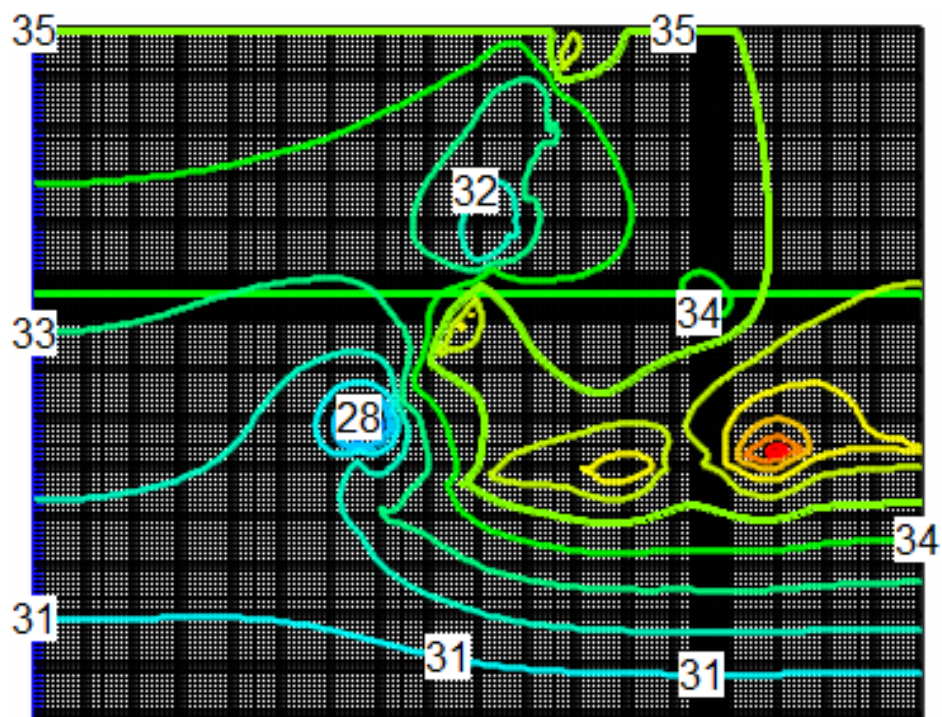


Ilustración 67. Nivel freático con sistema wellpoint (Octubre).

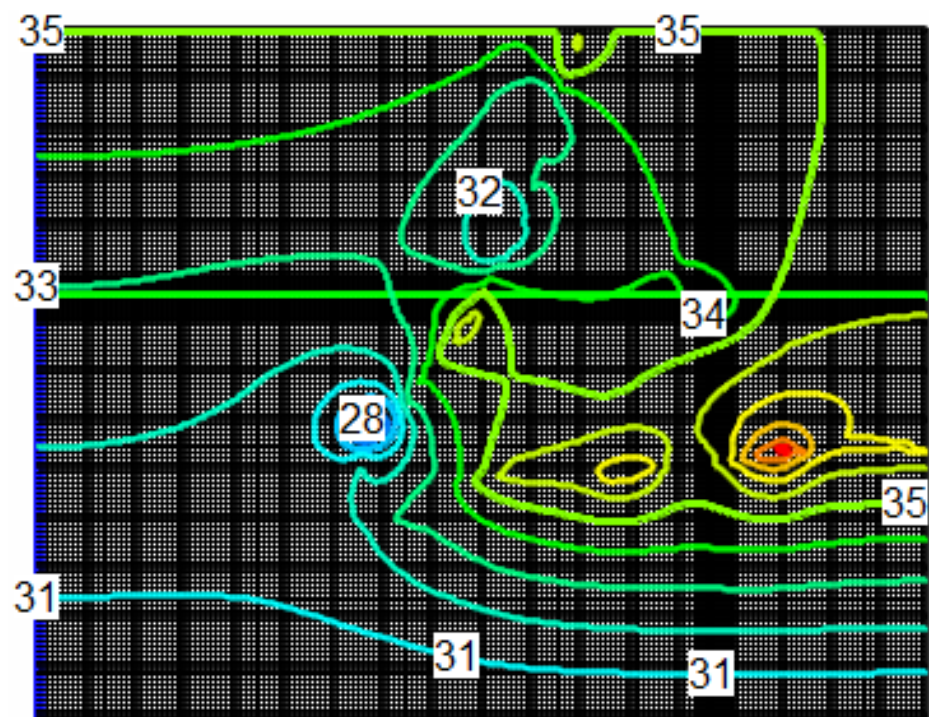


Ilustración 68. Nivel freático con sistema wellpoint (Noviembre).

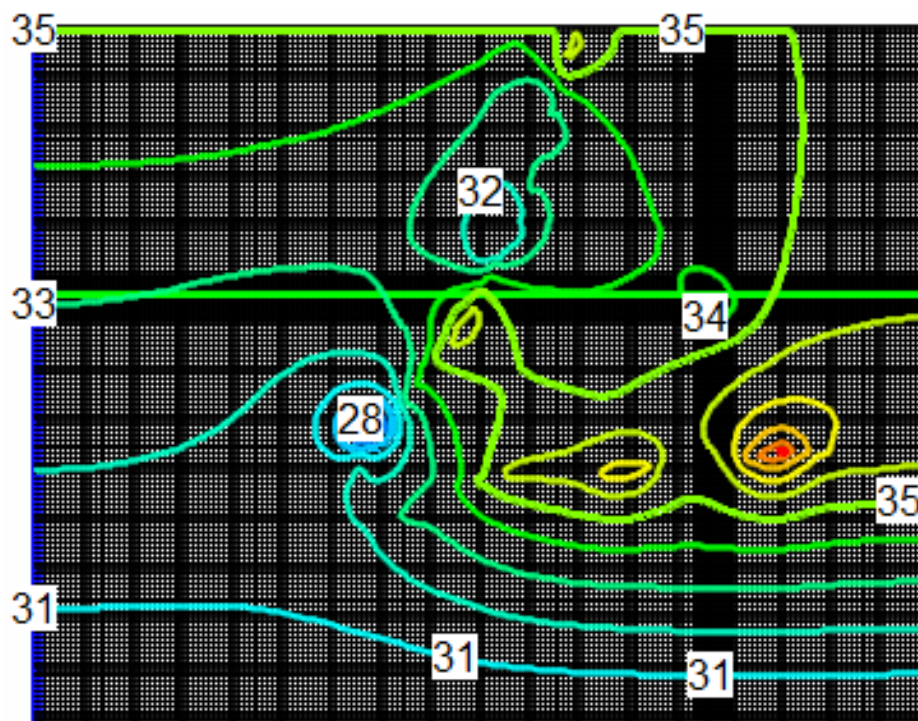


Ilustración 69. Nivel freático con sistema wellpoint (Diciembre).

Los resultados obtenidos son con el diseño y ubicación mencionados al principio del subapartado; los gastos extraídos del sistema en los diferentes periodos son los siguientes:

Enero: $0.0007 \text{ m}^3/\text{s} = 0.7 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 19.6 \text{ lps}$

Febrero: $0.00065 \text{ m}^3/\text{s} = 0.65 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 18.2 \text{ lps}$

Marzo: $0.00065 \text{ m}^3/\text{s} = 0.65 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 18.2 \text{ lps}$

Abril: $0.0006 \text{ m}^3/\text{s} = 0.65 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 16.8 \text{ lps}$

Mayo: $0.0006 \text{ m}^3/\text{s} = 0.65 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 16.8 \text{ lps}$

Junio: $0.0006 \text{ m}^3/\text{s} = 0.65 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 16.8 \text{ lps}$

Julio: $0.0008 \text{ m}^3/\text{s} = 0.8 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 22.4 \text{ lps}$

Agosto: $0.001 \text{ m}^3/\text{s} = 1.0 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 28 \text{ lps}$

Septiembre: $0.00092 \text{ m}^3/\text{s} = 0.92 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 25.76 \text{ lps}$

Octubre: $0.0008 \text{ m}^3/\text{s} = 0.8 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 22.4 \text{ lps}$

Noviembre: $0.0007 \text{ m}^3/\text{s} = 0.7 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 19.6 \text{ lps}$

Diciembre: $0.0007 \text{ m}^3/\text{s} = 0.7 \text{ lps} \times 28 \text{ pozos} = 19.6 \text{ lps}$

De tal manera que el nivel freático en la zona se encuentra en el orden de los 34 msnm en cada uno de los periodos, bordeando la zona de interés del proyecto, siendo menor la influencia del cono de abatimiento que pueda afectar a las construcciones vecinas y procurando tener un mejor control del nivel freático.

III.6.7.5. BALANCE EN LA ZONA

Gracias al código MODFLOW se puede extraer el balance hídrico del modelo para cada tiempo por periodo; en dichos resultados se presentan cuantitativamente las entradas y salidas al sistema y permite idealizar cómo es el comportamiento del flujo subterráneo. (Ver Anexo Balance en la zona)

III.6.8. EVALUACIÓN

Los resultados obtenidos en la zona para el abatimiento del nivel freático controlado del modelo en estado transitorio son satisfactorios, de tal forma que:

Con el modelo calibrado, se ha conseguido que el modelo sea una representación adecuada al sistema real; por lo que los resultados obtenidos para el sistema de bombeo también representan adecuadamente los descensos producidos.

La piezometría generada por el modelo indica que en la zona de interés del proyecto se ha alcanzado el descenso requerido y de una forma controlada, procurando que se pueda continuar con el desarrollo del proyecto en óptimas condiciones.

III.7. DISEÑO DEL SISTEMA WELLPOINT

El sistema de bombeo elegido para la modelación conocido como wellpoint o pozos punta proporciona un método versátil para controlar el flujo subterráneo en una amplia gama de suelos, condiciones y características del proyecto, para el caso particular como se mencionó en apartados anteriores, el sistema consiste en una instalación de 28 pozos punta cuyas características generales que se presentan a continuación están determinadas según las especificaciones del manual CIRIA C750.

Los tubos de los pozos serán de aproximadamente 6.5 m de largo, diámetro es de 50 mm (2”) separados uno a otro en una distancia de 3 m ubicados en la georeferencia mostrado en el plano de la Ilustración 57 y sus respectivas coordenadas en el mismo apartado.

Existe la posibilidad de colocar pantallas en el extremo del tubo ascendente, que nos permite un mayor control en la estabilidad de los taludes, sin embargo para el proyecto se hizo un muro perimetral a base de micropilotes, que beneficia al proyecto en cuestión de seguridad y estabilidad para los procesos constructivos.

En la superficie el tubo ascendente del pozo punta está conectado al “cabezal” o colector principal por medio de una manguera o tubo flexible, adicionado a ella una válvula que permite tratar cada pozo de manera individual de forma que pueda apagarse o recortarse si está aspirando aire o en caso de no ser necesario el uso de todos los pozos.

Los colectores principales suelen tener un diámetro de 150 mm (6”) para los proyectos con estas características, sin embargo, puede llegar a utilizarse uno de 200 mm (8”) a criterio del especialista y las condiciones extraordinarias que puedan presentarse en el sistema.

El colector principal se conecta a una bomba de vacío capaz de manejar los volúmenes de agua y aire, para las características y condiciones del proyecto particular se recomienda una bomba de succión rotatoria con un extractor para aire con una potencia de 15 kW o 20HP, pudiendo agregarse adaptaciones como reguladores para controlar el gasto de extracción.

Para el caso particular, la deposición del agua extraída en el proceso de abatimiento del nivel freático controlado se hizo la descarga en una red de alcantarillado, siendo una de las opciones más viables en el momento, debido a que las otras dos opciones podían influir nuevamente en el proceso de recarga para el sistema como pudo ser un pozo de recarga o la descarga a un cuerpo de agua superficial (río Tamazula o Humaya). Las características y opciones nuevamente deben ser valoradas en distintos proyectos, pudiendo resultar otras condiciones y características para el mismo procedimiento.

IV. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN

IV.1. PLAN DE ACCIÓN

El objetivo del proyecto pretende garantizar que a través de un sistema wellpoint bien diseñado y calculado resolverá los problemas que pudieran presentarse por la filtración del agua subterránea en las excavaciones, dando mayor seguridad y control en los procesos constructivos. En el proyecto se busca que a través de una serie de actividades, se logre la estabilización del nivel freático en el punto de interés, para así asegurar el bienestar del proyecto y pueda desarrollarse de manera segura y controlada.

Para la implementación de modelos numéricos que nos permitan conocer el comportamiento del flujo subterráneo en una zona en donde se requiera abatir el nivel freático para la construcción o excavación del terreno, son imprescindibles dos trabajos especializados:

1. Realizar una caracterización hidrogeológica adecuada y que sea adaptable a la modelación numérica.
2. Valorar el método seleccionado para el control de aguas subterráneas.

Bajo los esquemas, conceptos y el caso de estudio expuesto en capítulos anteriores, sin perder de vista los objetivos y el alcance del proyecto, existen otros objetivos estratégicos que no se encuentran desarrollados dentro del presente documento, sin embargo son de utilidad para las personas con facultades operativas, directivas o financieras. A continuación se integran algunos de los objetivos estratégicos:

- Aumentar la oferta de agua.
- Disminuir la demanda de agua.
- Mejoramiento y conservación de la calidad del agua del acuífero.
- Mejoramiento de la administración del agua.
- Mejoramiento del marco legal y normativo.

IV.2. ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO

La búsqueda de la rentabilidad de un proyecto, en muchas ocasiones obliga su explotación tanto en altura como en profundidad, el aprovechamiento para desarrollos comerciales en zonas costeras, ríos, malecones, donde el atractivo turístico cada vez es mayor, hace cada vez más frecuente encontrarse con flujo subterráneo, en donde se debe analizar su interacción con la obra, tanto durante el proceso de construcción, como una vez finalizada.

Obtener las mejores condiciones de trabajo en una obra bajo el nivel freático, desde el punto de vista de la seguridad, dependerá en gran medida de la adecuada elección del sistema de bombeo para controlar el flujo subterráneo. La interpretación del acuífero así

como el comportamiento del flujo hidrodinámico es vital, por ello la modelación matemática se ha ido posicionando con buenos resultados que ayudan a la evaluación y toma de decisiones. La eficiencia de implementar los procesos y técnicas para un control de flujo subterráneo condiciona la sostenibilidad económica, social y ambiental.

A continuación se presentarán algunas acciones que vienen inmersas en los objetivos estratégicos mostrados en el apartado anterior:

- Aumentar la oferta de agua.

Es necesario elaborar e implementar un plan para el manejo integral, no sólo de la zona de estudio, sino del acuífero en general que nos permita poder aprovechar la disponibilidad que tenemos del agua subterránea.

Utilizando un ordenamiento territorial para el uso del suelo con enfoque ambiental, bajo este contexto, se puede llevar a cabo un programa de desarrollo territorial, que permita definir los usos más adecuados del suelo, así como el crecimiento armónico entre la naturaleza y la población asegurando el abastecimiento del agua, en donde debe realizarse el estudio de disponibilidad, conocer la participación de organismos privados y gubernamentales que estén involucrados en el aprovechamiento del agua subterránea, de tal forma que se pueda delimitar áreas para uso del agua subterránea según las actividades o características (agrícola, industriales, zonas urbanas, rurales). Los resultados de las delimitaciones son convenientes publicarse en los planes sectoriales y regionales, para que sean contemplados en futuros proyectos que se lleven a cabo en la región.

También es posible que en algunas secciones pueda existir una sobreexplotación del recurso o bien algún área de protección, donde es necesario implementar trabajos de conservación de suelos, construcción de gaviones, reforestación, pequeñas presas, entre otras que procuren la recarga artificial en dichas zonas, de tal forma que se disminuya los efectos adversos que éste podría ocasionar.

- Disminuir la demanda de agua.

Al igual que en el anterior, van en conjunto, sin embargo la metodología es aplicable para implementar sistemas de riego más eficientes, en general Sinaloa, productor agrícola, considerando un aprovechamiento sostenible se puede y considero es necesario ver la agricultura desde otra perspectiva, contextualizarla como un negocio productivo, es decir con menor agua y superficie producir más (altos rendimientos por unidad de superficie).

De la mano, Sinaloa puede eficientar la distribución y el uso tanto urbano como rural del agua, estimando el crecimiento poblacional, la dotación, evitando pérdidas y aprovechando el uso del flujo subterráneo para el abastecimiento de la población de una manera controlada sin recurrir a la sobreexplotación del acuífero y logrando mantener un equilibrio con las actividades económicas que se tiene en la zona.

- Mejoramiento y conservación de la calidad del agua del acuífero.

En la actualidad la contaminación del medio ambiente es un problema que pone en riesgo la vida de los seres humanos, y si se considera el abastecimiento del agua potable, con la recolección constante de desechos sólidos urbanos, industriales, residuales y biológicos infecciosos la problemática inmediata que se genera es la contaminación en los cauces de los ríos y por lo tanto su infiltración en el agua subterránea. Dicho esto es necesario proponer acciones que permitan elaborar un diagnóstico de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, sobre todo las que se utilizan para consumo humano, que sean monitoreadas permanentemente para que de esa forma se tomen las medidas correctivas y preventivas a tiempo.

- Mejoramiento de la administración del agua subterránea.

Fortalecer económica, técnica y administrativamente el desarrollo del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) en la región, asegurando la representatividad del acuífero, con acciones que requieren de mano de obra calificada, para iniciar y dar seguimiento a las acciones que permitan el aprovechamiento del agua subterránea, estableciendo disponibilidad de agua en el acuífero de manera periódica, estableciendo pozos de observación para el monitoreo del nivel estático y administrando el recurso hídrico del sector público, urbano, industrial y agrícola, con el objetivo también de crear conciencia de la cultura del agua y la problemática futura del uso del agua así como de su disponibilidad.

- Mejoramiento del marco legal.

Parte fundamental del manejo de acuíferos para aprovechamiento de aguas subterráneas, es importante conocer y divulgar la Ley de Aguas Nacionales y su reglamentación, complementado con disposiciones estatales y dependencias, así como también la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en donde se procure la vigilancia de la aplicación de la normatividad para poder realizar proyectos que involucren la disposición del recurso hídrico.

V. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

V.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



PROGRAMACIÓN Y CONTROL DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN

ACTIVIDADES	2020				
	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
REVISIÓN Y DETALLE DE PROYECTO DE INTERVENCIÓN CON DIRECTOR Y CODIRECTOR.					
PRESENTACIÓN DE PROYECTO DE INTERVENCIÓN AL COMITÉ EVALUADOR.					
DIFUSIÓN DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA					
PRESENTACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PROYECTO ANTE CONAGUA, COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES, PROTECCIÓN CIVIL, DIVERSAS DEPENDENCIAS Y EMPRESAS PRIVADAS					
PRESENTACIÓN DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN PARA OBTENCIÓN DE GRADO					
ELABORACIÓN DE ARTÍCULO PARA LA REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA SOBRE EL PROYECTO DE INTERVENCIÓN					

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general, los trabajos de Ingeniería Civil pueden generar impactos temporales o permanentes sobre las aguas subterráneas, desde impactos potenciales sobre manantiales o acuíferos para el abastecimiento de agua, problemas ambientales por los riesgos de contaminación, perturbación del flujo subterráneo, erosión del suelo, hasta problemas como de seguridad, demora en el programa de obra del proyecto en el que se trabaja, mismo que se traduce en tiempo y costo.

El impacto del agua subterránea en las obras a ejecutar es de tal relevancia que viene a condicionar el diseño de su estructura y el procedimiento constructivo, consecuentemente en su coste. Se debe conocer cómo interacciona el agua con la infraestructura y los impactos que éste provocará. Inclusive, en casos donde la presión del flujo subterráneo pueda afectar la cimentación del proyecto, se debe considerar la subpresión en el cálculo de Ingeniería de Cimentaciones para evitar futuros problemas.

El especialista que se enfrente a los procesos de abatimiento de nivel freático o control de flujo subterráneo debe conocer las pautas que condicionan el comportamiento del movimiento del agua, así como los impactos que pueda ocasionar con la infraestructura. Los riesgos inmediatos pueden ir desde infiltración en la excavación que conlleva un lugar no óptimo para realizar procesos constructivos, deslizamiento de taludes en excavación, levantamiento de fondo, y demás posibles afectaciones que el flujo subterráneo puede ocasionar que comprometen la estabilidad de la obra y del entorno, así como la seguridad de los trabajadores y del proyecto mismo.

El control de aguas subterráneas puede realizarse por diferentes técnicas, siempre es importante conocer las características del proyecto para evaluar la técnica a utilizar. Sin embargo, existe una gran variabilidad de suelos, condiciones hidrogeológicas y características propias del proyecto, que lo convierten en único e irrepetible. Las decisiones se deben realizar con el juicio de expertos en donde se respeta la teoría y la experiencia en la práctica; siempre los proyectos de este tipo debido a su complejidad e incertidumbre, se debe tener un planteamiento flexible y es ahí donde reside el éxito del sistema, en la parte de operación y mantenimiento, conociendo las condiciones y características en las que se encuentra el proyecto para poder evaluar y tomar decisiones. Para ello es importante que el especialista se encuentre monitoreando y observando mientras el proceso de abatimiento se realice, y que se permita hacer adaptaciones al sistema conforme la realidad que se vaya encontrando. El método observacional propuesto por el ingeniero geotécnico Peck en 1969 es adaptable a las técnicas de control de flujo subterráneo, de tal forma que proporciona una forma de controlar la seguridad y al mismo tiempo minimiza los costos de construcción conforme la situación requiera los cambios, desde la concepción del proyecto y durante la operación y mantenimiento del mismo. Es por ello que es recomendable en los proyectos de abatimiento de nivel freático contar con al menos un pozo de observación bien ubicado que nos permita conocer el comportamiento del flujo subterráneo en la zona de interés, tomar varios datos del nivel piezométrico en diferentes tiempos para así al momento de la calibración del modelo numérico pueda ajustarse más a la realidad.

Siempre que sea posible se deben realizar ensayos de bombeo cuidadosos, para mejorar el conocimiento de las propiedades hidrodinámicas del acuífero y reducir las incertidumbres que se puedan producir durante la construcción. Se deben incorporar al proyecto en su fase de estudio un análisis del control del agua subterránea con lo que se evitaren sorpresas y costes adicionales imprevistos.

La operación y mantenimiento del sistema no es simplemente cambiar bombas, abrir o cerrar válvulas y empezar a extraer el flujo subterráneo. La estabilidad de la excavación es dependiente del flujo subterráneo, por lo tanto la operación del sistema debe ser regulada y realizada por personal capacitado así como realizar el mantenimiento al sistema verificando que sus componentes estén funcionando de manera adecuada, esta etapa debe ser monitoreada y se debe llevar un registro para conocer las condiciones, el comportamiento y las medidas tomadas para la situación que se presente.

Lo más importante en los proyectos de abatimiento de nivel freático es la seguridad y bienestar del proyecto en general y su entorno, evitar retrasos y costos innecesarios, es por ello que el control de flujo subterráneo debe ser planeado desde el inicio hasta el fin del proyecto.

La conceptualización del modelo debe procurar tener datos reales de la zona, así como los estudios correspondientes que éste necesite para poder determinar la caracterización del mismo modelo y pueda trasladarse al modelo numérico, siempre se debe respetar la fuente de información y que las prácticas sean sometidas a escrutinio científico para que la teoría sustente la praxis que condicione la efectividad del diseño del sistema para el modelo conceptual.

El uso de modelos numéricos ha ido tomando importancia dentro del análisis del flujo subterráneo, pues se renuncia a conocer la solución exacta a cambio de poder tener una aproximación a ésta. La aplicación de esta metodología permite el análisis de cualquier escenario y condiciones variables posibles, siempre y cuando se respete la teoría del flujo subterráneo y se alimente de valores reales, permite que sean valores aceptables para conocer el comportamiento del flujo subterráneo, pues con ello permite integrar todos los aspectos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos del acuífero, se consideran factores importantes que influyen en el sistema, se comprende el proceso a detalle, nos ayuda a comprender y tomar decisiones, así como también evalúa impactos futuros en el sistema y es posible experimentar con diseños de remediación. Sin embargo es importante tener algunas consideraciones al utilizar un modelo matemático en el flujo subterráneo:

- Cuando el objetivo por alcanzar es más costoso que el presupuesto disponible, un modelo matemático no pudiera ser aplicable.
- Si el modelo conceptual no tiene información consistente y representativa de la zona, el modelo no será fiable.
- Aceptar la regla de no unicidad, tratar el mayor número de escenarios posibles con la información disponible y que de resultados aproximados en el campo.
- No se debe tratar de representar toda la información a la vez, evaluar cada condición, escenario y característica del modelo.

- Se debe analizar y revisar nuevamente el modelo cuando se tenga nueva información o algún suceso importante que comprometa al acuífero.

El análisis del modelo numérico en el proyecto “Torre Tres Ríos” de la ciudad de Culiacán, Sinaloa indica según el análisis del balance hídrico que las principales recargas son inducidas por la carga constante del nivel freático de la zona, así como la influencia del río Tamazula y la precipitación; así como sus principales descargas también son el río, la misma carga constante del nivel freático y la evapotranspiración de la zona. La configuración del nivel freático sugiere que la aportación del río Tamazula descarga en el Río Humaya y es influenciada en la zona donde se realizó el proyecto aunque los datos observados en campo comparados con los simulados, al contar con pocos datos para su calibración, se consideran valores buenos y permite conocer el comportamiento del nivel freático en la zona, así como también la posibilidad de realizar variaciones y evaluar diferentes posibles escenarios. Es recomendable contar con pozos de observación y datos para que el proceso de calibración sea lo más fiel y representativo de la zona de estudio. Así como la importancia de realizar estudios geofísicos que permitan conocer a más detalle las características del subsuelo en la región, siendo una de las más utilizadas los estudios de resistividad eléctrica vertical. Así también es recomendable realizar pruebas de bombeo para conocer características de la zona como la transmisividad y la conductividad hidráulica. Siempre es importante valorar el costo de los estudios y la información con la que se cuenta, para el tipo de proyecto que se quiere realizar, y es ahí donde la modelación numérica va adquiriendo posicionamiento de tal forma que se modela con la información de campo y otros supuestos hasta lograr que el comportamiento sea parecido al observado.

La modelación numérica del sitio, aunque basada en algunos supuestos, provee información útil para determinar factores de control, condiciones de frontera, y parámetros hidrogeológicos. Los resultados ayudan a comprender el comportamiento y su importancia dentro del acuífero para su respuesta ante ciertos acontecimientos que puedan ocurrir, es por ello la importancia de la modelación numérica dentro del diseño de sistema de abatimiento de nivel freático.

Existen muchas aplicaciones donde la metodología puede ser útil para determinar procesos de infiltración por recarga natural o inducida, de tal forma que se logren no solo los objetivos del presente proyecto de intervención, sino también se logren los objetivos estratégicos planteados en el capítulo anterior. Los estudios detallados y especializados son importantes para conocer el comportamiento del acuífero, así como las pruebas de calidad de agua para su posible consumo humano o bien en su caso, para dar solución al proceso de contaminación que tiene dicho acuífero y diseñar sistemas de mitigación en donde se puede improvisar los paquetes de modelo de transporte de contaminantes o sedimentos en tiempo y espacio.

Se ha conseguido un modelo que cumple el objetivo principal del proyecto de intervención: diseñar un sistema de abatimiento de nivel freático en suelos arenosos que permitan la construcción del proyecto en condiciones secas y óptimas, así como también representar el comportamiento del acuífero cuyo régimen natural de flujo subterráneo es alterado por la acción temporal de una obra, calibrando el modelo con datos de campo para intentar caracterizarlo de la mejor manera posible y de esa forma poder evaluar el sistema a

escenarios futuros o posibles condiciones o sucesos que podrían llegar a ocurrir, ver cómo el acuífero se vería afectado y poder ser una herramienta útil para la toma de decisiones y también plantear o diseñar sistemas que den solución o minimicen las afectaciones que puedan presentarse. Es importante mencionar nuevamente que los resultados obtenidos son datos mensuales, que deben estar en constante monitoreo para poder adecuar el sistema de bombeo y que el método observacional sea aplicado en el proyecto.

Si bien los resultados han sido satisfactorios, como se ha mencionado anteriormente el modelo es una interpretación del funcionamiento del acuífero real, y por tanto los resultados no deben aceptarse como únicos y verdaderos. El modelo debe usarse como una herramienta de soporte para la gestión y toma de decisiones, pero siempre desde el conocimiento del técnico que lo emplea. El sistema de control debe ser flexible capaz de incorporar medidas correctoras a las posibles singularidades.

Una buena práctica para el abatimiento del nivel freático condiciona la efectividad y sostenibilidad del diseño, instalación y operación de la red de control, en donde existe una armonía entre los conocimientos teóricos y son llevados al campo.

BIBLIOGRAFÍA

ANGELONE, S.; GARIBAY, María Teresa; CASAUX, Marina Cauhapé. Permeabilidad de suelos. *Recuperado de [http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad% 20en% 20Suelos. pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf)*.(Enero, 2016), 2006.

ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.; HUNT, Randall J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press, 2015.

BEAR, Jacob. Dynamics of fluids in porous media. Courier Corporation, 2013.

CASHMAN, Pat M.; PREENE, Martin. *Groundwater lowering in construction: A practical guide*. CRC Press, 2001.

CUETO DÍAZ, J. de Dios. *Informe Geohidrológico del Proyecto Torre Tres Ríos*. GeoCueto, 2010.

DE LA FEDERACIÓN, Diario Oficial. Código Civil Federal. 2019.

DE LA FEDERACIÓN, Diario Oficial. Ley de aguas nacionales. *Publicada el*, 1992, vol. 1. *Reforma actual*. México, 2016.

DE LA FEDERACIÓN, Diario Oficial. Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las mismas. 2016.

DE LA FEDERACIÓN, Diario Oficial. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). *Reforma actual*. México, 2012, vol. 4.

DEL DISTRITO FEDERAL, Gobierno. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones. *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal*. México DF, 2004.

FERRER GRANELL, Alejandro José, et al. CONTROL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA INGENIERÍA CIVIL. INTERACCIÓN ENTRE LA OBRA Y EL MEDIO HIDROGEOLÓGICO, SÍNTESIS DE MÉTODOS DE CONTROL Y APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS. 2011.

HIDALGO PÉREZ, Jesús, et al. Optimización del abatimiento del nivel freático para una excavación mediante el programa Modflow. 2015.

JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de suelos Tomo II. *Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. 3a edición, Editorial Limusa, 1976.

MUÑOZ DEL PRADO, FRANCISCO JAVIER. Aplicación de la modelación matemática del flujo de agua subterránea a la Ingeniería Civil. Estudio del rebajamiento de niveles piezométricos en el Delta del Llobregat. 2018.

NICHOLSON, D, et al. *The Observational Method in ground engineering – principles and applications*. CIRIA Report 185,1999

POWERS, J. Patrick, et al. *Construction dewatering and groundwater control: new methods and applications*. John Wiley & Sons, 2007.

PREENE, M. Roberts. TOL and Powrie, W.(2016). *Groudwater Control–Design and Practice, 2nd Edition*. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Report C750, 2016, vol. 750.

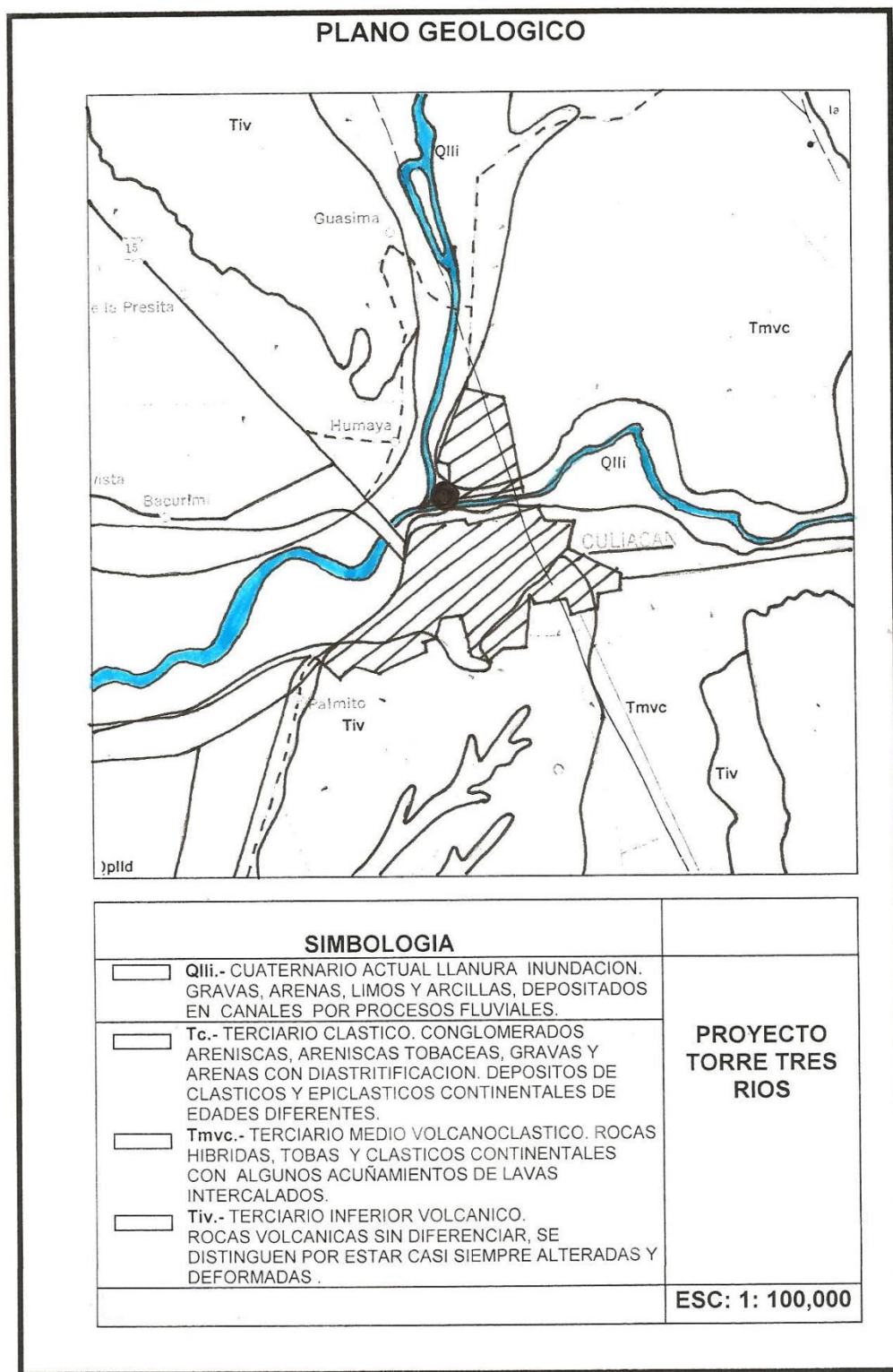
SHAQOUR, Fathi M.; HASAN, Syed E. Groundwater control for construction purposes: a case study from Kuwait. *Environmental geology*, 2008, vol. 53, no 8, p. 1603-1612.

VERMEULEN, N. J.; DAY, P. W. Dewatering at the Port of Ngqura: A case study. En *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING*. AA BALKEMA PUBLISHERS, 2005. p. 2457.

ZHILENKOV, V. N., et al. Métodos para determinar la permeabilidad de suelos no saturados. *Ingeniería hidráulica en México: publicación técnica de la Secretaría de Recursos Hidráulicos*, 1987, vol. 2, no 2, p. 59-65.

ANEXOS

PLANO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

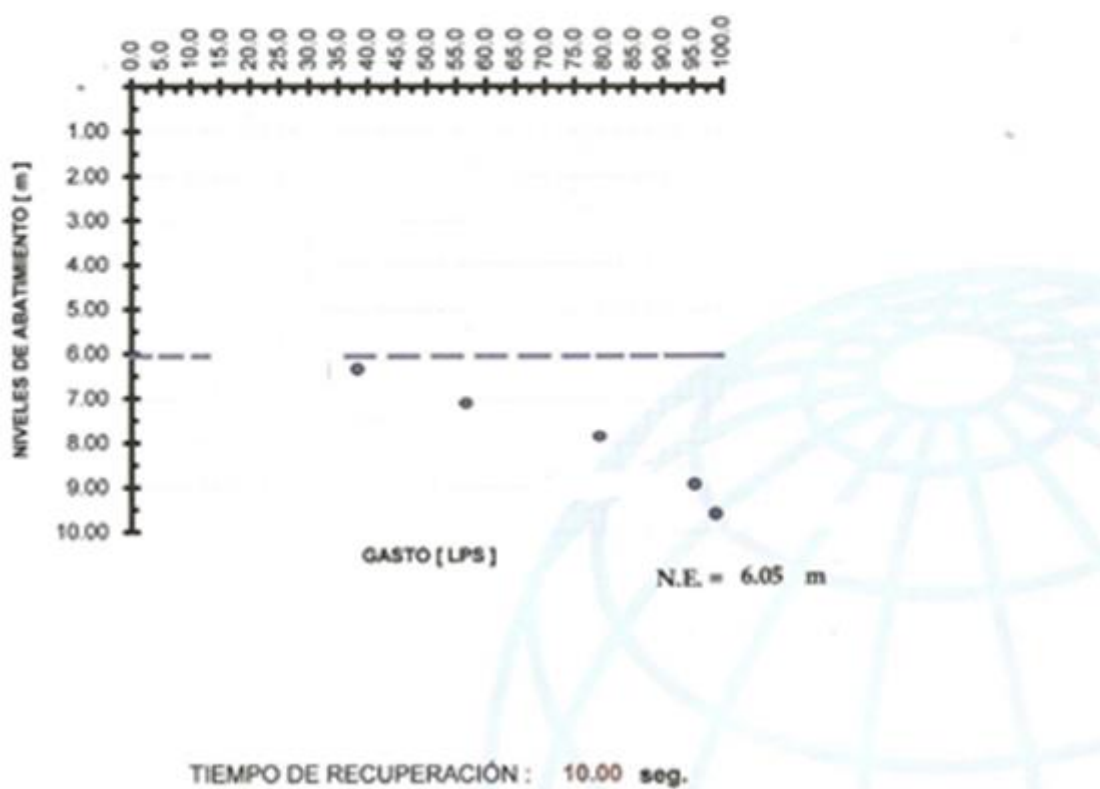


GRÁFICA DEL REGISTRO DE AFORO

PTD-103/2009

OBRA: POZO TORRE TRES RÍOS
LUGAR: TRES RÍOS, CULIACÁN, SINALOA.

GRÁFICA DEL REGISTRO DE AFORO GASTO VS. PROFUNDIDAD



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ENSAYOS DE BOMBEO

Tipo de acuífero	Tipo de ensayo		Método de análisis
Confinado	Régimen permanente		Fórmula de Thiem
	Régimen variable	Prueba en descensos	Fórmula de Theis
			Aproximación logarítmica de Jacob
		Recuperación	Fórmula de recuperación de Theis
Semiconfinado	Régimen permanente		Fórmula de De Glee o de Jacob-Hantush
	Régimen variable	Descensos	Fórmula de Hantush
		Recuperación	Estudio de ascensos teóricos (1)
Libre	Régimen permanente		Fórmula de Thiem (2) y corrección de Jacob
			Fórmula de Dupuit (3)
	Régimen variable	Prueba en descensos	Fórmula de Theis (4)
			Aproximación logarítmica de Jacob (4)
			Corrección de Dupuit
			Fórmula de Boulton
			Fórmula de Neuman
		Recuperación	Fórmula de recuperación de Theis (2)

(1) Si el bombeo es lo suficientemente largo como para que los niveles se estabilicen, los ascensos teóricos coinciden con los medidos

(2) Si los descensos son pequeños en comparación con el espesor saturado del acuífero

(3) Admitiendo la aproximación de Dupuit-Forchheimer

(4) Si los descensos son pequeños en comparación con el espesor saturado del acuífero y si el drenaje es instantáneo y proporcional al descenso producido (no existe drenaje diferido)

CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO

WELL ID: Torre Tres Ríos		Reduced Data	
INPUT		Time,	Water Level
Construction:		Entry	Meter
Casing dia. (d_c)	22 Inch	1	6:00:00
Annulus dia. (d_w)	22 Inch	2	8:00:00
Screen Length (L)	16.5 Meter	3	12:00:00
Depths to:		4	16:00:00
water level (DTW)	6.05 Meter	5	20:00:00
Top of Aquifer	6 Meter	6	0:00:00
Base of Aquifer	22.5 Meter		
Annular Fill:			
across screen --	Gravel		
above screen --	Open Hole		
Aquifer Material -- Sand and Gravel Mix			
FLOW RATE			
99.52 liters/s			

Date: 19/12/2009

Time: 06:00

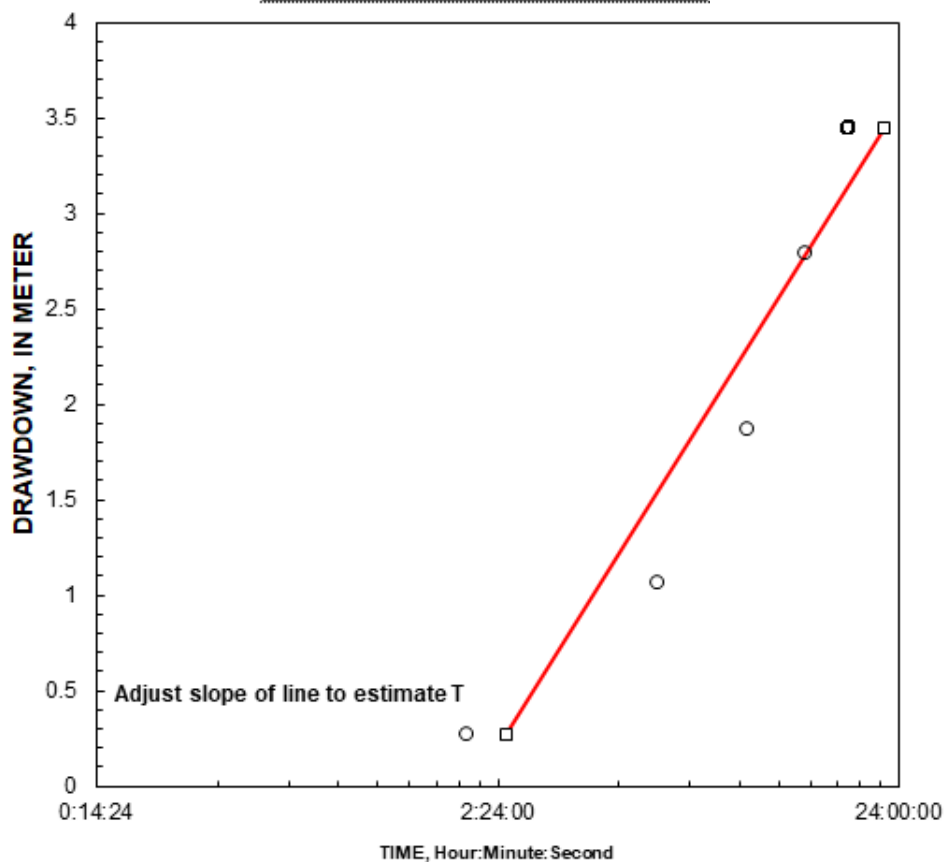
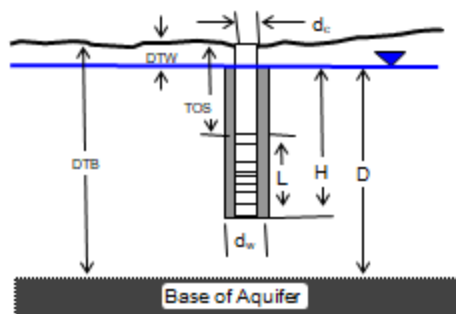
COMPUTED

Aquifer thickness = 16 Meter

Slope = 1.02623799 Meter/log10

Input is consistent.

K = 28 Meter/Day
T = 470 Meter²/Day



BALANCE EN LA ZONA

Periodo 1 (Enero)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)

ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	1.7787E-07
CARGA CONSTANTE:	5.4741E-02
POZOS:	0
RÍOS:	0.7508
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.503E-02

TOTAL:	0.8205
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	8.9975E-07
CARGA CONSTANTE:	0.105
POZOS:	1.96E-02
RÍOS:	0.2034
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0.4919
RECARGAS:	0

TOTAL:	0.8199
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	5.8848E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.07
--------------------------------	------

Periodo 2 (Febrero)

BALANCE HÍDRICO (m³/s) ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	2.1738E-08
CARGA CONSTANTE:	5.8952E-02
POZOS:	0
RÍOS:	0.7021
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	9.414E-03

TOTAL: 0.7705

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	2.0260E-09
CARGA CONSTANTE:	0.1025
POZOS:	1.82E-02
RÍOS:	0.138
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0.5121
RECARGAS:	0

TOTAL: 0.7708

ENTRADA - SALIDA = -3.2848E-04

PORCENTAJE DE
DISCREPANCIA: -0.04

Periodo 3 (Marzo)

BALANCE HÍDRICO (m³/s) ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	2.1500E-08
CARGA CONSTANTE:	6.0773E-02
POZOS:	0
RÍOS:	0.6958
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	3.410E-05

TOTAL: 0.7566

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	6.4975E-10
CARGA CONSTANTE:	0.1006
POZOS:	1.82E-02
RÍOS:	0.1155
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0.5226
RECARGAS:	0

TOTAL: 0.757

ENTRADA - SALIDA = -4.1777E-04

PORCENTAJE DE
DISCREPANCIA: -0.06

Periodo 4 (Abril)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	1.8474E-08
CARGA CONSTANTE:	9.4161E-02
POZOS:	0
RÍOS:	3.9355
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.503E-05

TOTAL:	4.0296
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	1.8838E-10
CARGA CONSTANTE:	9.75E-02
POZOS:	1.68E-02
RÍOS:	1.9801
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	1.9347
RECARGAS:	0

TOTAL:	4.0291
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	5.7173E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.01
--------------------------------	------

Periodo 5 (Mayo)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	1.8160E-09
CARGA CONSTANTE:	9.3797E-02
POZOS:	0
RÍOS:	5.872
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.5028E-02

TOTAL:	5.9808
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	1.5948E-08
CARGA CONSTANTE:	0.1005
POZOS:	1.68E-02
RÍOS:	1.4593E-01
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	5.7166
RECARGAS:	0

TOTAL:	5.9798
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	9.7198E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.02
--------------------------------	------

Periodo 6 (Junio)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	1.5986E-08
CARGA CONSTANTE:	9.3928E-02
POZOS:	0
RÍOS:	4.9039
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.907E-02

TOTAL:	5.0169
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	2.6002E-08
CARGA CONSTANTE:	9.8883E-02
POZOS:	1.68E-02
RÍOS:	5.8116E-02
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	4.8423
RECARGAS:	0

TOTAL:	5.0161
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	7.9999E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.01
--------------------------------	------

Periodo 7 (Julio)

BALANCE HÍDRICO (m³/s) ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	1.6299E-10
CARGA CONSTANTE:	7.4276E-02
POZOS:	0
RÍOS:	5.7403
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.185E-01

TOTAL:	5.933
--------	-------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	1.1911E-06
CARGA CONSTANTE:	0.1322
POZOS:	2.24E-02
RÍOS:	7.62E-02
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	5.702
RECARGAS:	0

TOTAL:	5.9328
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	2.3890E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.00
--------------------------------	------

Periodo 8 (Agosto)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	1.0505E-09
CARGA CONSTANTE:	4.4507E-02
POZOS:	0
RÍOS:	1.4103
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.620E-01

TOTAL:	1.6167
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	3.9189E-07
CARGA CONSTANTE:	0.1527
POZOS:	2.80E-02
RÍOS:	0.1259
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	1.309
RECARGAS:	0

TOTAL:	1.6155
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	1.2378E-03
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.08
--------------------------------	------

Periodo 9 (Septiembre)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	5.1040E-07
CARGA CONSTANTE:	4.6887E-02
POZOS:	0
RÍOS:	1.4413
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.009E-01

TOTAL:	1.589
--------	-------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	1.5927E-10
CARGA CONSTANTE:	0.1338
POZOS:	2.576E-02
RÍOS:	0.1356
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	1.2931
RECARGAS:	0

TOTAL:	1.5883
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	6.8724E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.04
--------------------------------	------

Periodo 10 (Octubre)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	5.7060E-07
CARGA CONSTANTE:	5.2475E-02
POZOS:	0
RÍOS:	1.2543
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	3.900E-02

TOTAL:	1.3458
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	3.5958E-10
CARGA CONSTANTE:	0.1179
POZOS:	2.24E-02
RÍOS:	0.1199
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	1.0854
RECARGAS:	0

TOTAL:	1.3456
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	2.1255E-04
--------------------	------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	0.02
--------------------------------	------

Periodo 11 (Noviembre)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	9.0711E-08
CARGA CONSTANTE:	5.6264E-02
POZOS:	0
RÍOS:	0.968
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	1.381E-02

TOTAL:	1.0381
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	1.3766E-10
CARGA CONSTANTE:	0.1057
POZOS:	1.96E-02
RÍOS:	0.2876
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0.6266
RECARGAS:	0

TOTAL:	1.0396
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	-1.4479E-03
--------------------	-------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	-0.14
--------------------------------	-------

Periodo 12 (Diciembre)

BALANCE HÍDRICO (m³/s)
ENTRADAS

ALMACENAMIENTO:	8.3780E-10
CARGA CONSTANTE:	5.2783E-02
POZOS:	0
RÍOS:	0.6957
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0
RECARGAS:	2.320E-02

TOTAL:	0.7717
--------	--------

SALIDAS:

ALMACENAMIENTO:	2.2671E-08
CARGA CONSTANTE:	0.108
POZOS:	1.96E-02
RÍOS:	0.1405
EVAPOTRANSPIRACIÓN:	0.5037
RECARGAS:	0

TOTAL:	0.7718
--------	--------

ENTRADA - SALIDA =	-1.0252E-04
--------------------	-------------

PORCENTAJE DE DISCREPANCIA:	-0.01
--------------------------------	-------