



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**MODELO MATEMÁTICO MODFLOW PARA DETERMINAR  
EL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO  
EXPLOTADO EN EL DISTRITO DE SAN JOSÉ DE LOS  
MOLINOS – PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE ICA**

**PRESENTADA POR  
AROM GABRIEL TITO PIZARRO**

**ASESORES  
JUAN MANUEL OBLITAS SANTA MARIA  
ERNESTO ANTONIO VILLAR GALLARDO**

**TESIS  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**LIMA – PERÚ  
2021**



**CC BY-NC-SA**

**Reconocimiento – No comercial – Compartir igual**

El autor permite transformar (traducir, adaptar o compilar) a partir de esta obra con fines no comerciales, siempre y cuando se reconozca la autoría y las nuevas creaciones estén bajo una licencia con los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**USMP**  
UNIVERSIDAD DE  
SAN MARTÍN DE PORRES

FACULTAD DE  
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**MODELO MATEMÁTICO MODFLOW PARA DETERMINAR EL  
ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO EXPLOTADO EN  
EL DISTRITO DE SAN JOSÉ DE LOS MOLINOS - PROVINCIA  
Y DEPARTAMENTO DE ICA**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADA POR**

**TITO PIZARRO, AROM GABRIEL**

**LIMA – PERÚ**

**2021**

Esta tesis está dedicada a Dios por mostrarme el camino para poder llegar a donde estoy. A toda mi familia, en especial a mis padres, María y Elmer, quienes me dieron la vida, educación y amor. A mi hermana, Amelia, que siempre me ayuda a mejorar y me da consejos para poder seguir adelante. A mi sobrino, Thiago, que me ayuda mucho a disfrutar las pequeñas cosas de la vida. A todos ellos, les agradezco desde el fondo de mi corazón y les dedico esta tesis.

Agradezco a Dios por bendecir mi vida, por guiarme en el camino correcto y por ser la fortaleza e inspiración en aquellos instantes de debilidad y confusión.

A mis profesores en la Universidad de San Martín de Porres, por haberme brindado sus conocimientos y experiencias a lo largo de toda mi formación universitaria. Un agradecimiento especial al Ing. Mag. Ernesto Antonio Villar Gallardos y al Ing. Mag. Juan Manuel Oblitas Santa María, por su tiempo, consejos, motivación y confianza.

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1 Descripción de la situación problemática	1
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.4 Justificación de la investigación	6
1.5 Delimitación de la investigación	7
1.6 Limitaciones de la investigación	7
1.7 Viabilidad de la investigación	8
1.8 Impacto de la investigación	9
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes	10
2.2 Bases teóricas	18
2.3 Definiciones de terminos básicos	54

2.4 Hipótesis	55
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA</b>	
3.1 Diseño	56
3.2 Muestra	57
3.3 Instrumentos	60
3.4 Procedimiento	61
3.5 Variables	63
<b>CAPÍTULO IV. DESARROLLO Y APLICACIÓN</b>	
4.1. Generalidades	66
4.2. Diseño con el software MODFLOW	83
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS</b>	
5.1 Resultados de campo	105
5.2 Resultados con el software MODFLOW	119
<b>CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN</b>	
6.1 Discusión de hipótesis	126
6.2 Discusión de antecedentes	127
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>133</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>135</b>
<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	<b>136</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>145</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla N°1 Reserva explotable (2009, 2013-2014)	18
Tabla N°2. Puntos de extracción de aguas subterránea	22
Tabla N°3: IRHS de los pozos por distrito Valle Ica- Villacurí	28
Tabla N°4: Licencias de uso de agua subterránea 2009-2014	28
Tabla N°5: Valores de coeficiente de almacenamiento	29
Tabla N°6: Valores relativos de permeabilidad	31
Tabla N°7: Principales cultivos del valle Ica	43
Tabla N°8: Vida útil de pozos	44
Tabla N°9: Norma OS. 010	45
Tabla N°10: Operacionalización de variable independiente	64
Tabla N°11: Operacionalización de variable dependiente	64
Tabla N°12: Prueba de descenso del pozo IRHS 51	68
Tabla N°13: Prueba de recuperación del pozo IRHS 51	71

Tabla N°14: Prueba de descenso del pozo IRHS 37	74
Tabla N°15: Prueba de recuperación del pozo IRHS 37	77
Tabla N°16 : Prueba de recuperación del pozo IRHS 2	80
Tabla N°17: Creación de condiciones de pozos	84
Tabla N°18: Distribución de pozos, según su tipo	109
Tabla N°19: Distribución de pozos utilizados; según su uso	110
Tabla N°20: Distribución del volumen de explotación según su uso	111
Tabla N°21: Resultado de las pruebas de bombeo	112
Tabla N°22: Contrastación de hipótesis específica 1	127
Tabla N°23: Contrastación de hipótesis específica 2	128
Tabla N°24: Contrastación de hipótesis específica 3	129

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura N°1. Esquemas de ubicación geográfica de Ica	1
Figura N°2. Unidad geográfica de San José de los Molinos	3
Figura N°3. Diagrama de Ishikawa	4
Figura N°4. Mapa hidrogeológico de la cuenca del Río Ica	19
Figura N°5. Distribución vertical del agua subterránea	20
Figura N°6. Río Ica	21
Figura N°7. Puntos de extracción de aguas subterránea	22
Figura N°8. Tipos de acuífero	23
Figura N°9. Esquema del acuífero	23
Figura N°10 Acuífero semiconfinado	24
Figura N°11. Tipos de pozos	24
Figura N°12. Pozo profundo	25
Figura N°13. Pozo tajo abierto	25
Figura N°14. Pozo mixto	26
Figura N°15. Profundidades y diámetros de pozos	27

Figura N°16.Aforo de pozos	30
Figura N°17.Nivel piezométrico	30
Figura N°18.Esquema de un acuífero confiando bombeado.	32
Figura N°19.Nivel piezométrico	33
Figura N°20. Prueba de bombeo	34
Figura N°21.Prueba de bombeo	35
Figura N°22.Nivel estático y dinámico	36
Figura N°23.Esquema de vulnerabilidad y riesgo	36
Figura N°24. Distritos del departamento de Ica	38
Figura N°25. Mapa de ubicación del distrito de los Molinos	38
Figura N°26. Cuencas del río Ica	39
Figura N°27. Mapa de ubicación del distrito de los Molinos	41
Figura N°28. Recarga del acuífero de Ica	42
Figura N°29. Ley de Darcy	46
Figura N°30. Recarga del acuífero	47
Figura N°31 Pozos modelados por MODFLOW	48
Figura N°32. Interfase model muse	49
Figura N°33. Discretización de la zona de trabajo	51
Figura N°34. Sistematización del software MODFLOW	53
Figura N°35: Ubicación de los 61 pozos de San José de los Molinos	58
Figura N°36: Ubicación de los 4 pozos de San José de los Molinos	59
Figura N°37: Ubicación de San José de los Molinos	67
Figura N°38: Prueba de descenso del pozo IRHS 51	70
Figura N°39: Prueba de recuperación del pozo IRHS 51	73

Figura N°40: Prueba de descenso del pozo IRHS 37	76
Figura N°41: Prueba de recuperación del pozo IRHS 37	79
Figura N°42: Prueba de descenso del pozo IRHS 37	82
Figura N°43: Carta N°509-2020-ANA	83
Figura N°44: Ubicación de los 61 pozos	86
Figura N°45: Delimitación del área de trabajo	86
Figura N°46: Polígono en formato Kml	87
Figura N°47: Puntos para las curvas de nivel	87
Figura N°48: Transformar el archivo de Kml a GPX file	88
Figura N°49: Abrir el formato GPX en ArcGIS	88
Figura N°50: Exportación de puntos	89
Figura N°51: Elevación de los puntos	89
Figura N°52: Creación de los niveles	90
Figura N°53: Imagen de elevaciones	90
Figura N°54: Generar curvas de nivel	91
Figura N°55: Curvas de Nivel	91
Figura N°56: Creación del modelo MODFLOW	92
Figura N°57: Configuración del modelo MODFLOW	92
Figura N°58: Configuración del modelo MODFLOW	93
Figura N°59: Paquetes del software MODFLOW	93
Figura N°60: Importación del borde del área de trabajo	94
Figura N°61: Definición de celdas	94
Figura N°62: Borde del acuífero	95
Figura N°63: Generación de celdas	95

Figura N°64: Activación de celdas	96
Figura N°65: Discretización del área de trabajo	96
Figura N°66: Importación de las elevaciones	97
Figura N°67: Acuífero de San José de los Molinos	97
Figura N°68: Introducción de datos de las capas	98
Figura N°69: Creación de la superficie superior	98
Figura N°70: Creación de la superficie superior	99
Figura N°71: Creación de la superficie inferior	99
Figura N°72: Creación de la superficie inferior	100
Figura N°73: Introducción de las propiedades del acuífero	101
Figura N°74: Capas del acuífero	101
Figura N°75: Plaza de armas de San José de los Molinos	102
Figura N°76: Municipalidad de San José de los Molinos	102
Figura N°77: Fachada del pozo IRHS 35	103
Figura N°78: Verificación de datos del pozo IRHS 35	103
Figura N°79: Fachada del pozo IRHS 39	104
Figura N°80: Verificación de datos del pozo IRHS 39	104
Figura N°81: Pozo estacionario IRHS 41	105
Figura N°82: Localización antigua del pozo IRHS 49	105
Figura N°83: Activación de pozos	106
Figura N°84: Creación de condiciones de pozos	106
Figura N°85: Pozos activos	107
Figura N°86: Agregar información de pozos	107
Figura N°87: Datos básicos de los pozos	108

Figura N°88: Distribución de pozos, según su tipo	109
Figura N°89: Distribución porcentual de pozos utilizados	110
Figura N°90: Pozo IRHS 35 con bomba eléctrica	112
Figura N°91: Caudalímetro	113
Figura N°92: Tablero electrónico	113
Figura N°93: Válvulas de salida de agua	114
Figura N°94: Cabezal del pozo estacionario	115
Figura N°95: Pozo petrolero	115
Figura N°96: Distribución por tubos de salida	116
Figura N°97: Tablero electrónico	117
Figura N°98: Localización nueva del pozo IRHS 49	118
Figura N°99: Pozo mixto IRHS 49	118
Figura N°100: Datos básicos de los pozos	119
Figura N°101: Datos básicos de los pozos	119
Figura N°102: Mapa de calor de cotas	120
Figura N°103: Mapa y curvas de nivel con la capa arena	121
Figura N°104: Mapa y curvas de nivel con la capa limo	122
Figura N°105: Mapa y curvas de nivel con la capa grava	122
Figura N°106: Perfil del nivel freático en la parte inferior	123
Figura N°107: Perfil del nivel freático en la parte superior	123
Figura N°109: Resultados de la simulación del software MODFLOW	125

## RESUMEN

La sobreexplotación de agua subterránea mediante pozos profundos informales viene generando un descenso considerable del nivel freático del acuífero en el departamento de Ica. El objetivo de esta investigación es elaborar un modelo matemático MODFLOW para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado en San José de los Molinos, uno de los distritos iqueños donde la prestación de agua se encuentra en alto riesgo, y a pesar de ello, no se tiene información actualizada de sus reservas hídricas.

Esta investigación utiliza una metodología cuantitativa y tiene un diseño transversal debido a que las variables de investigación se miden y cuantifican. Las muestras se obtienen de cuatro pozos, las condiciones iniciales de esos pozos son: pozo 35, profundidad: 22.5 m., caudal: 50 l/s; pozo 39, profundidad: 28.5 m., caudal: 30 l/s; pozo 41, profundidad: 37.80 m., caudal: 12 l/s; pozo 49, profundidad: 38.62 m., caudal: 40l/s.

Esta tesis concluye corroborando la existencia de sobreexplotación del recurso hídrico en San José de los Molinos, evidencia de ello es la descarga constante del acuífero de 17,187,304 litro, la diferencia entre volumen de entrada y volumen de salida que es de - 657,108.00 litros debido al aumento del caudal de bombeo. Adicionalmente, el modelamiento matemático hidrogeológico MODFLOW determina el estado actual del sistema acuífero

explotado, en base a las condiciones iniciales de la piezometría y las pruebas de bombeo analizadas de los pozos estudiados.

Palabras claves: MODFLOW, pozos profundos, piezometría, prueba de bombeo, acuífero

## ABSTRACT

Groundwater overexploitation through informal deep wells has been generating a considerable decrease in water table of the aquifer in Ica department. The objective of this research is to develop a MODFLOW mathematical model to determine the current state of the exploited aquifer system in San José de los Molinos, one of the districts of Ica where water provision is at high risk, and despite this, there is no updated information on its groundwater reserves.

This research uses a quantitative methodology, and it has a cross-sectional design because the research variables are measured and quantified. The samples are obtained from four wells, the initial conditions of these wells are: well 35, depth: 22.5 m., Flow rate: 50 l / s; well 39, depth: 28.5 m., flow: 30 l / s; well 41, depth: 37.80 m., flow: 12 l / s; well 49, depth: 38.62 m., flow: 40l / s.

This thesis concludes by corroborating groundwater overexploitation in San José de los Molinos, evidence of this is the aquifer constant discharge of 17,187,304 liters; the difference between inlet volume and outlet volume, which is -657,108.00 liters due to pumping flow increment. Additionally, the MODFLOW hydrogeological mathematical modeling determines the current state of the

exploited aquifer system, based on the initial conditions of piezometry and pumping tests analyzed from the wells under study.

Keywords: MODFLOW, deep wells, piezometry, pumping test, aquifer

## INTRODUCCIÓN

El distrito de San José de los Molinos pertenece al departamento de Ica, es uno de los distritos que más sufre por la carencia de agua desde su creación el 14 de junio de 1876, evidencias de ello son: las tierras agrícolas áridas e inexistencia de infraestructura y de sistemas de regadíos, el Gobierno Regional de Ica busca desde el año 2015, nuevos métodos y técnicas que beneficien la captación de agua para destinarla a diferentes objetivos: consumo, regadío, etc. y lograr a través de la implementación de estos métodos y técnicas una reducción de los gastos del servicio de prestación de agua potable y no potable, así como una disminución de los daños sociales y ambientales.

En ese sentido, la falta de datos actualizados sobre la prestación de agua en Ica es uno de los problemas más complicados que se debe afrontar, no existe una actualización del inventario de pozos en la Autoridad Nacional del Agua, asimismo no existen estudios hidrológicos de la zona bajo análisis y esto conlleva al aumento considerable de pozos informales y por ende al descenso del nivel freático por sobreexplotación. Por estos motivos, hoy se presenta dificultad de extracción de agua, el nivel freático ha descendido a niveles críticos que ponen en riesgo la prestación de un servicio fundamental para la vida y la salud de las personas. En vista de todo lo mencionado, se decidió

recolectar la información de la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua desde año 2007 hasta el año 2015 para precisar el problema, realizar un nuevo estudio hidrogeológico del acuífero y plantear soluciones posibles.

El análisis del diseño hidrogeológico se pudo realizar mediante los softwares hidrológicos, puesto que hoy el uso de programas ayuda en gran forma a la productividad de la administración de recursos y logra una mayor optimización y rapidez en la realización de los diferentes trabajos que se quieren abordar. El MODFLOW es uno de esos programas, y brinda todas las facilidades para modelar y analizar las aguas subterráneas de un acuífero de una manera muy interactiva y rápida; en ciertos casos usa fórmulas como la Ley de Darcy o la ecuación de Theis-Jacob.

En ese sentido, el objetivo de esta tesis fue elaborar un modelo matemático MODFLOW para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos- Provincia y Departamento de Ica.

Para lograr el objetivo, se definió un proceso, este inició con entrevistas a profesionales de ingeniería hidráulica con más de 20 años de experiencia, recolección de datos (características técnicas de pozos y pruebas de bombeo) ,visita a campo para corroborar la información recolectada para la muestra y la utilización de softwares (MODFLOW, ArcGIS , Global Mapper y Google Earth).

Con la información obtenida a través de los organismos competentes y la visita de los pozos seleccionados para el análisis, se pudo mejorar y corroborar la información de los 61 pozos que se encuentran ubicados en San José de los Molinos, posteriormente se eligió como muestra a cuatro pozos, los cuales se pudieron ingresar como datos en el modelado del acuífero.

La conclusión más relevante de esta tesis es sin duda que se corroboró que el modelo matemático MODFLOW determinó el estado actual del sistema acuífero, en base a la simulación realizada luego de haber cargado los parámetros de permeabilidad, caudal explotado y piezometrías de los pozos, que constituyeron la muestra de las condiciones iniciales, evidencia de ello

son los 657,108.00 litros que dio como resultado la sobreexplotación del acuífero.

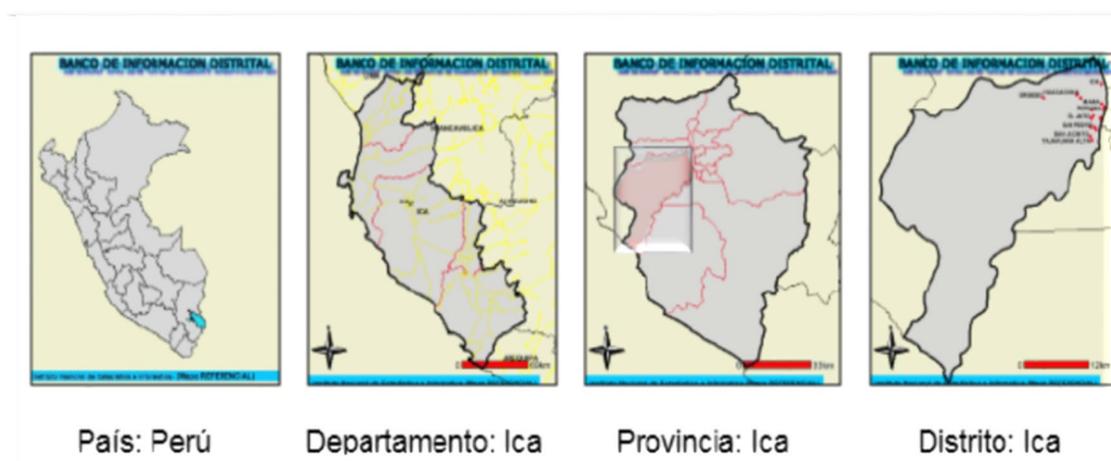
Finalmente, esta tesis tiene la siguiente estructura: en el Capítulo I, se realiza el planteamiento de la investigación; en el Capítulo II, se entregan los antecedentes bibliográficos tanto internacionales como nacionales, las bases teóricas de la ingeniería hidráulica, las definiciones de los términos técnicos y las hipótesis propuestas; en el Capítulo III se desarrolla el diseño de la investigación, se determinó la población de estudio, se escogió la muestra a trabajar y se definieron los instrumentos a utilizar en la recolección y procesamiento de los datos de la investigación; en el Capítulo IV, se explica detalladamente todo el desarrollo de la investigación en donde se utilizó el software MODFLOW para realizar el estudio hidrogeológico; en el Capítulo V, se muestran los resultados obtenidos luego de realizar el diseño hidrogeológico con el software MODFLOW; en el Capítulo VI, se realiza la discusión de los resultados, donde se confrontaron los resultados obtenidos con los resultados de los antecedentes tanto internacionales como nacionales, también se realiza la corroboración de las hipótesis planteados. Por último, se entregan cinco conclusiones, tres recomendaciones, las fuentes de información y cinco anexos.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción de la Situación Problemática

El departamento de Ica cuenta con diferentes actividades económicas, una de las principales es la agricultura, por lo tanto, el recurso escaso es el agua. La localización no es la mejor debido a que se encuentra en la costa central del Perú, que es una zona desértica (figura 1), lo cual dificulta optimizar el sistema de regadío de los terrenos agrícolas.



**Figura N°1:** Esquemas de ubicación geográfica de Ica.  
**Fuente:** Instituto Nacional de estadística e informática, 2009

La agricultura fue la segunda actividad económica generadora de mayores divisas en el Perú. Según el Ministerio de Agricultura y Riego, para el 2021 el sector agricultura presenta una proyección de crecimiento mayor al 4 %; este porcentaje es importante porque permitiría un incremento en el empleo directo generado por el sector.

Sin embargo, se debe considerar que la agricultura nacional ha ido transformándose poco a poco hasta pasar a la agroindustria, lo que originó ventajas y desventajas a ciertos grupos de campesinos. La problemática va creciendo poco a poco cada año debido a los siguientes factores que generan un impacto negativo en los campesinos y en el sector agrícola en su conjunto.

- El agua
- El costo del riego
- La competencia con la agroindustria

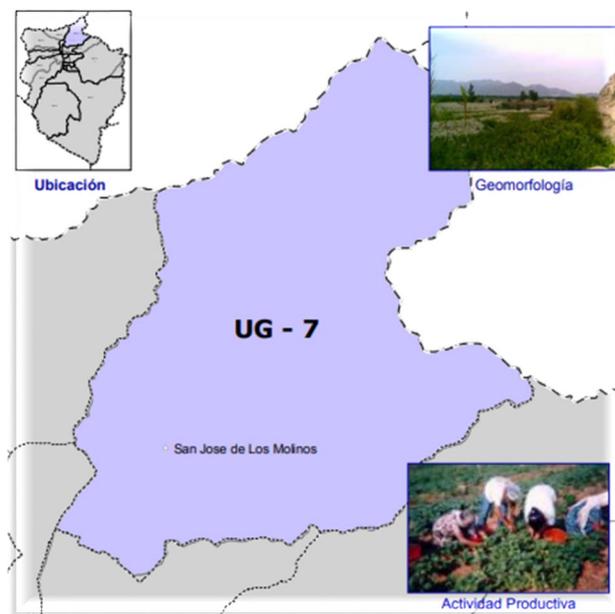
Además, la captación de agua se vuelve más dificultosa debido a que no existe un apoyo del Gobierno Regional de Ica ni del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) afectando directamente a los agricultores que necesitan del agua para poder cosechar sus productos y dejando hectáreas sin ningún cultivo lo cual genera un gran impacto económico en la comunidad.

- El agua

El agua se volvió un negocio rentable en la localidad debido a que existe mucha demanda, pero poca oferta. En la actualidad existe una monopolización del agua para el regadío lo cual genera molestias en los campesinos en la comunidad.

Este proyecto es importante porque busca determinar la capacidad del acuífero, el grado de explotación y solucionar la problemática que existe en el distrito. En esta situación usaremos el programa MODFLOW para realizar el modelamiento de las aguas subterráneas y obtener un estudio hidrogeológico del área de estudio.

La localidad se encuentra en San José de los Molinos (figura 2), al extremo Noreste del departamento de Ica, sobre la intersección del paralelo 13°55'42" de latitud Sur con el meridiano y 75°40'0 0" de longitud Oeste. Su altitud es de 535 m.s.n.m.



**Figura N°2:** Unidad geográfica de San José de los Molinos  
**Fuente:** Gobierno Regional de Ica, 2005

### • El costo de riego

Una de las dificultades es el precio con que se cobra por la hora de agua para el regadío de los terrenos agrícolas.

Antiguamente no se cobraba nada por el uso del agua debido a que había un apoyo del estado en la agricultura.

Actualmente se está cobrando 20 nuevos soles por la hora de agua para el regadío, este costo en algún momento llegó a 120 nuevos soles, por esa razón se hace costosa y ocasiona una reducción de ganancia para el agricultor.

### • Competencia

En la actualidad existen muchas inversiones extranjeras en la agroindustria y esto ocasiona una severa desventaja con los agricultores peruanos debido

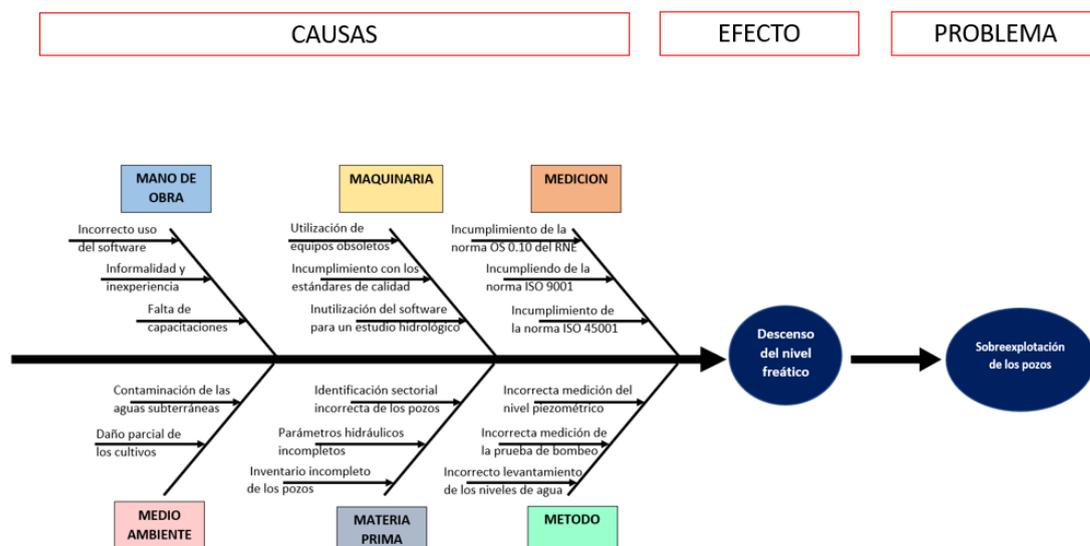
a que las empresas extranjeras tienen más recursos (presupuesto y capacidades) para poder cultivar los productos, industrializarlos y luego venderlos. Principalmente, esta desventaja ocurre por el escaso o nulo apoyo del gobierno en sector agrícola.

Por lo antes expuesto, este proyecto de investigación buscar realizar un estudio hidrológico a través de un modelamiento matemático del nivel freático, para poder aprovechar de una manera óptima el acuífero de San José de los Molinos y beneficiar a los agricultores, pobladores y a la Municipalidad de San José de los Molinos.

## **1.2 Formulación del Problema**

Después de observar y analizar la situación problemática, se puede apreciar que en San José de los Molinos existe una gran cantidad de pozos informales y otros que presentan cierta exclusividad, tramitan el permiso del pozo o compran el lugar donde ya existe un pozo, y sin ningún permiso los trasladan de un lugar a otro y logran cambiar las características técnicas del pozo que se está bombeando.

En vista de lo expuesto, se realizó una encuesta a 7 expertos en modelación de aguas subterráneas en los acuíferos para poder validar la información que se tiene y saber cuáles son sus apreciaciones sobre la problemática y la relación teórico-práctico en el diseño hidrogeológico, expresando los resultados en el diagrama de Ishikawa.



**Figura N°3:** Diagrama de Ishikawa  
Elaborado por: el autor

### 1.2.1 Problema general

¿En qué medida el modelo matemático MODFLOW contribuirá en determinar el estado actual del sistema acuífero explotado, ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?

### 1.2.2 Problemas específicos

¿Cuál es la influencia del levantamiento de la piezometría de los pozos para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?

¿Cuál es la influencia de la prueba de bombeo para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?

¿Cuál es la influencia del levantamiento de los niveles de agua para determinar el estado actual del sistema acuífero

explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Elaborar un modelo matemático MODFLOW para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Analizar los levantamientos de la piezometría de los pozos para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

Analizar las pruebas de bombeo para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

Analizar los levantamientos de los niveles de agua para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

### **1.4 Justificación de la Investigación**

El problema del agua de riego es un gran debate dentro de la economía peruana. Uno de los puntos hace referencia a la oportunidad de introducir mecanismos para su provisión y otro es la privatización del recurso.

Hay un gran debate debido a la creciente demanda por agua de riego en la agricultura y de una situación compleja en el sistema tanto para proveer y distribuir el agua.

En este caso para poder optimizar el sistema de regadío se va a utilizar un sistema muy conocido de captación de agua que es el sistema de pozos profundos.

Este proyecto tiene una gran relevancia en el conocimiento del estado actual del acuífero y las características de los pozos profundos que se encuentran en la zona de estudio y se podría reducir así los problemas que existen con el agua y mejorar el sistema de regadío. Por esa razón se tendrá que determinar a través del programa MODFLOW como el sistema de pozos puede ocasionar un mayor impacto.

Esta investigación es beneficiosa para los 1150 agricultores de la localidad, para los pobladores y para la Municipalidad de San José de los Molinos ya que permitirá captar de manera óptima el agua del subsuelo para los agricultores, así que tendrán la facilidad de poder regar sus terrenos agrícolas sin necesidad de tener problemas por ese recurso y si existe un pago que sea el mínimo posible para poder costear el proyecto y el mantenimiento.

Al terminar con el modelamiento se puede determinar el estado en el que se encuentra el nivel freático del acuífero.

## **1.5 Delimitación de la investigación**

### **a) Delimitación espacial**

La presente investigación se realizó en el distrito de San José de los Molinos, provincia y departamento de Ica debido a que existe una gran problemática del agua para los pequeños y medianos agricultores de la zona.

### **b) Delimitación temporal**

Los datos de procedencia de proyecto vienen de la recolección de datos que se realizó a través de varias cartas a la Autoridad Nacional del Agua en conjunto con la Autoridad Local del Agua sobre la información de los pozos profundos que van desde el año 2012 hasta 2017, por esa razón se realizó un análisis de datos obtenidos con la visita de los pozos que se escogieron como muestra para corroborar los datos recolectados.

### **c) Delimitación conceptual**

Existe una sobreexplotación de los pozos profundos, de los cuales la gran mayoría son pozos informales, esto motivó un mayor control y la verificación

exhaustiva de los datos recogidos. Se tomaron como muestras de esta investigación, los siguientes pozos: el Pozo N° 35, Pozo N° 39, Pozo N° 41 y el Pozo N° 49.

## **1.6 Limitaciones**

Hoy en día se vive en un contexto de pandemia originado por el coronavirus Covid-19, lo cual origina una serie de restricciones en la movilidad y mantiene a las personas en sus domicilios sin poder realizar las actividades que usualmente hacían; no obstante, esta investigación presenta un trabajo importante de campo que ayuda a determinar de una manera más clara la muestra del proyecto.

Por otro lado, una de las limitaciones del proyecto es la distancia de la localidad donde se realizó el proyecto, debido a que esta localidad corresponde a San José de los Molinos, provincia de Ica, a unas 3 horas aproximadamente de Lima Metropolitana. Se esperó a que el estado de emergencia sea un poco más flexible y se permita el transporte provincial.

Otra limitación importante es la escasa información de datos sobre los pozos, o la antigüedad de los datos, se consideró información hasta el año 2017, fue relevante obtener esa data porque los antecedentes resultaron fundamentales para el proyecto.

Por último, el presupuesto para el desarrollo del proyecto fue un gran problema. Se manejó un capital muy limitado para el manejo y desarrollo de esta investigación.

## **1.7 Viabilidad de la investigación**

La viabilidad del proyecto se evaluó a nivel técnico, económico y social.

### **1.7.1 Viabilidad técnica**

Como bases teóricas se utilizó toda la información hidráulica necesaria recogida de la Autoridad Nacional del Agua

en conjunto con la Autoridad Local del Agua. Se realizó una visita a los pozos para poder corroborar y validar la información que fue entregada por estas dos instituciones, también se contó con el manual del software MODFLOW para poder orientarse. Así mismo se utilizó distintos softwares de ingeniería, tales como Google Earth , ArcGIS, Microsoft Office y MODFLOW. Por último, también se obtuvo información de tesis, artículos y trabajos de investigación.

### **1.7.2 Viabilidad económica**

Todos los gastos fueron asumidos por el autor, principalmente los gastos de transporte, comida y hospedaje en el lugar de estudios.

### **1.7.3 Viabilidad Social**

La realización de esta investigación se utilizó en uno de los distritos de Ica que presenta mayores pérdidas de cultivo e infertilidad de tierras debido a la falta de agua por ello, este proyecto busca realizar un estudio hidrogeológico para conocer el comportamiento que presenta el acuífero y así determinar la explotación y crear zonas de recarga.

## **1.8 Impacto de la investigación**

### **1.8.1 Impacto teórico**

Esta investigación permite verificar lo teórico con lo práctico en el modelamiento del acuífero, a su vez permite conocer y tener un inventario completo de los pozos como los tipos, estados y usos que presenta. Además de tomar en cuenta el rendimiento de los pozos, características técnicas y parámetros hidráulicos, también se utilizó el software MODFLOW para conocer la explotación que existe el acuífero.

### **1.8.2 Impacto práctico**

Esta investigación aporta un modelo para los próximos estudios hidrogeológicos en el Perú, tanto para el uso agrícola como poblacional, optimizando el comportamiento hidráulico que presenta el

acuífero. Además, sirve como guía o material de apoyo para los estudiantes de ingeniería civil, porque aporta a la comprensión, manejo y análisis del modelo hidráulico. Esta investigación presenta un gran impacto en los agricultores, en la población y ayuda a la Municipalidad de San José de los Molinos a tener un panorama más amplio del estudio de las aguas subterráneas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

En el desarrollo de esta investigación se utilizaron fuentes nacionales e internacionales, la mayoría de las experiencias revisadas sobre el modelo matemático MODFLOW y sus respectivas aplicaciones, corresponden a tesis de pregrado, postgrado y artículos científicos entre los años 2007 al 2021, estas se mencionan a continuación.

##### 2.1.1 Antecedentes Nacionales

- a) Zúñiga y Gálvez (2019) en su investigación titulada: ***“Modelamiento y Evaluación de la Intrusión Marina en el Acuífero Chilca, Lima”***

El presente trabajo de investigación tiene finalidad de estudio de determinar el grado de intrusión marina en la zona de Chilca, Lima. El aumento demográfico y el crecimiento económico en los últimos años aumento la demanda de agua en la zona de Chilca, lo cual provoco la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo, además estudios actuales mostraron evidencias de la contaminación del agua extraída, ante estos problemas se está realizando el presente trabajo de investigación. La metodología utilizada es la modelación numérica del flujo del agua subterránea con el software MODFLOW, donde los parámetros a considerar son: la

hidrogeología de del acuífero, también se consideran parámetros hidrodinámicos. Para la representación dinámica de la intrusión marina se utilizó el modelamiento numérico Seawater Intrusión, para calibrar el modelo se utilizaron informaciones pasadas sobre cargas hidráulicas en pozos y realizar un análisis de sensibilidad. Su objetivo general es el de desarrollar el modelamiento conceptual y numérico del flujo de agua subterránea e intrusión marina en el acuífero Chilca. Los instrumentos utilizados fueron para la topografía el uso de la estación total, para el cálculo de parámetros hidrológicos. Los datos de las conductividades hidráulicas fueron obtenidos mediante la entidad de la Autoridad Nacional del Agua, la cual realizó pruebas de bombeo en la zona de estudio obteniendo valores que fluctúan de 3.72 metros por día hasta 41.9 metros por día que permitirán conocer la facilidad con el agua puede desplazarse por el medio poroso.

- b) Dante (2019), en su investigación titulada : ***“Modelación hidrogeológica con feflow para extracción de flujo del acuífero del río Lurín- Sector Chontay”***

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad la extracción de las aguas subterráneas de un acuífero, el cual debe mantener un equilibrio hídrico para generar que la entrada de flujo sea similar a la salida y poder mantener una eficacia para obtener un aprovechamiento adecuado del agua. La información adquirida a través de las diferentes entidades hídricas se pudo conocer como es el comportamiento del flujo en el acuífero estudiado.

Toda la información que fue interpretada de los estudios realizados en hidrogeología en campo ayudo en gran medida a poder iniciar el primer modelo número hidrogeológico. Está presente tesis sustenta dos modalidades de modelado , una de forma estacionaria y otra transitoria. Aplicando así dos posibles soluciones para la extracción del recurso hídrico mediante la galería de infiltración y los pozos profundos. El objetivo general de esta investigación es realizar el modelo conceptual del acuífero de río

Lurín sector Chontay y crear el modelo numérico 3D con Feflow 7.1 en estado estacionario y transitorio.

Como resultado se realizó un modelo numérico 3D con FEFLOW del acuífero estudiado, logrando obtener un modelo más interactivo.

- c) Quinde (2018) en su investigación titulada: ***“Investigación Hidrogeológica para Explotación de Agua Subterránea en el Sector 84 bajo – San Isidro, Distrito de Tambogrande, Provincia y Departamento de Piura – Perú”***

El trabajo de investigación trata de encontrar la existencia de aguas subterráneas en el sector 84 bajo-San Isidro, distrito de Tambogrande-Piura-Perú. Desarrolladas en 3 etapas. En la primera etapa se recopiló información de la zona de estudio. En la segunda parte se presentó las pruebas de campo, y la tercera etapa consistió en interpretar de los resultados obtenidos se elabora un informe final de investigación.

De esta manera se obtendrá datos confiables, y se procederá a realizar la interpretación de manera concisa. Los resultados obtenidos en la zona proporcionan mayor confiabilidad para determinar la condición más favorable para el aprovechamiento de los recursos hídricos. El objetivo de este trabajo es evaluar las principales características hidrogeológicas del sector. En la investigación se llegó a la conclusión que la medición de un pozo debe ser por cualquier de estos dos métodos el de pistoneo o por el método de inyección, el mínimo tiempo es de veinticuatro horas, ampliándose 24 horas más si se desea.

- d) Díaz (2015), en su investigación titulada : ***“Modelamiento hidrogeológico para Estimar el Caudal Óptimo de la Parte Baja del acuífero del Valle del Río Lurín”***

El presente trabajo de investigación tiene como propósito abastecer la demanda del uso de agua potable, industria, agricultura y de consumo humano en la parte baja valle del río Lurín (Lurín, Pachacamac y Cieneguilla). El incremento de nuevos pozos y la explotación irresponsable está ocasionando el descenso raudo del nivel freático. Para lo cual se

realiza el modelo matemático Visual MODFLOW, donde se visualizará el comportamiento del acuífero. Como resultado se deberá obtener el caudal adecuado para evitar que exista un descenso del nivel freático. Los elementos que intervienen en el descenso del agua subterránea son: la explotación incontrolada en la zona, características geológicas de la zona y uso de aguas subterráneas. Con los elementos mencionados se podrá calcular el comportamiento del acuífero. Esta investigación tiene como objetivo el modelamiento matemático con el uso del programa Visual MODFLOW del acuífero del Valle del río Lurín.

Para el estudio se consideró una permeabilidad de 25 m/día para el acuífero ya mencionado, debido a que su suelo está compuesto por diferentes elementos (cantos rodados, gravas, arena fina y gruesa).

El coeficiente de almacenamiento para el acuífero del valle es de 8%, significa que es un acuífero libre.

e) Carrasco, A. (2007) en su investigación titulada: ***“Parámetros Hidrogeológicos para Simulación del Acuífero Aluvial”***

Esta tesis tiene como objetivo predecir y controlar el problema del elevado nivel freático que existe en el centro arqueológico debido al alto nivel freático existen en el complejo arqueológico de Chan Chan, por lo que en el trabajo de investigación se hizo uso del simulador matemático MODFLOW 4.2 del acuífero de moche, para controlar y predecir futuros estiajes del río moche y santa, preservando el centro arqueológico de Chan Chan.. Como resultado se obtuvo la instalación de cuatro pozos con extracción de 15l/seg.

El método utilizado es no experimental ; el presente trabajo busca analizar los diferentes cambios que existen en el flujo del nivel freático, en los 13 puntos de observación se tomaron datos como los parámetros hidráulicos como la transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiencia de almacenamiento, todos estos datos se obtuvieron de la prueba de bombeo, también se obtuvo la profundidad del nivel freático, y el pH. Para después

introducirlo al programa Visual MODFLOW 4.2 para el respectivo modelado.

En los resultados de esta investigación se obtuvieron la conductividad hidráulica que fue de 0.22 m/día con la ayuda de los trazadores naturales. También de obtuvo el pH de 7 y además existe una gran concentración de sales 0.75 ms/cm.

### **2.1.2 Antecedentes Internacionales.**

- f) Hatch (2021) en su investigación titulada: ***“Modelado de intrusión de aguas de mar con códigos de densidad única”***.

La finalidad de este trabajo de investigación es el modelado de intrusiones de agua salada debido a que es una herramienta importante para que los administradores e ingenieros de recursos hídricos costeros comprendan la amenaza a su suministro de agua y planificar para diferentes escenarios. La intrusión de agua de mar puede ser un fenómeno complejo que generalmente viene con información de monitoreo limitada o nula con respecto a la ubicación de la columna de agua salada o la interfaz entre el agua salada y el agua dulce.

El modelo incluye pozos existentes y apoya la idea de que las tasas de bombeo en la isla son sostenibles. Se determina que la tasa crítica de bombeo de estos pozos es aproximadamente 75 veces mayor que la tasa de bombeo utilizada en el modelo original.

El primer objetivo de esta tesis es evaluar si el método de Bakker y Schaars (2013) es capaz de aplicar a los acuíferos costeros del mundo real mediante el uso de códigos de aguas subterráneas de densidad única (MODFLOW).

Para este proyecto, se sigue la metodología de Bakker y Schaars (2013) y se aplica a varios Modelos MODFLOW. Solo modelos de flujo que utilizan MODFLOW 2000 o MODFLOW 2005 se utilizan para las aplicaciones de esta tesis.

- g) Scott y Randall (2020) en su investigación titulada: ***“Modelo de flujo hidrológico del agua: Un software de simulación de uso conjunto basado en MODFLOW”***

El objetivo principal de este trabajo de investigación es conocer todas las propiedades y características del programa MODFLOW para solucionar las ecuaciones de flujo.

El marco MODFLOW-2005 utiliza un diseño modular que permite el fácil desarrollo e incorporación de nuevas características llamadas procesos y paquetes. Un proceso resuelve una ecuación de flujo o un conjunto de ecuaciones.

El paquete modifica el proceso de flujo de agua subterránea al incluir efectos de la compactación del acuífero en el flujo. Con el desarrollo de nuevos paquetes y procesos, la base MODFLOW-2005 marco divergió en múltiples versiones independientes diseñado para necesidades específicas de simulación.

El método Picard resuelve iterativamente la ecuación de flujo de agua subterránea aplicando la altura estimada en la iteración anterior a todas las características no lineales para linealizarlas.

El modelo hidrológico de un agua (MF-OWHM2) es un modelo hidrológico integrado (IHM). Es casi versión completa de la familia MODFLOW de hidrológicos simuladores. Incluye funcionalidad integral para el análisis de una amplia gama de cuestiones conjuntivas del uso del agua. MF-OWHM2 simula y puede ayudar a los análisis a mejorar.

- h) Domingo (2019) en su investigación titulada: ***“Modificaciones Hidrodinámicas a Largo Plazo en un Acuífero Multicapa con Explotación Intensiva”***.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo es evaluar los efectos hidrodinámicos ocurridos en los últimos años en los campos de Cartagena. El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar los

efectos hidrodinámicos ocurridos en el último siglo de actividad antropogénica en este sistema acuífero.

La investigación se realizó en la cuenca del mediterráneo, donde existe la sobreexplotación de los acuíferos que en épocas de sequía es muy notoria. Siendo una zona semiárida, los acuíferos en gran parte son destinados para el riego. La metodología por emplear es el software MODFLOW para el modelamiento de aguas subterráneas, los que brindará información sobre los efectos e impacto hidrogeológico. También muestra la evolución del acuífero a lo largo del último siglo, en cada tramo del acuífero muestra un balance hídrico.

En esta investigación se muestra el equilibrio hídrico que existe en los acuíferos estudiados con una extracción de 90 hm<sup>3</sup>/año y unas entradas pluviométricas de 35 mm/año, por lo que ocurre una favorable recuperación de los niveles de agua , debido a que el caudal de explotación es mayor que el caudal explotado. En cambio, en el acuífero Messiniense existe un descenso del nivel de agua debido a la sobreexplotación que existe en esa zona .En todo el sistema hídrico existe una recuperación, pero de una forma un lenta.

En conclusión, los resultados muestran la comunicación hidráulica entre estructuras geológicas y múltiples pozos.

- i) Saavedra (2013) en su investigación titulada: ***“Modelación Hidráulica y de Calidad del agua Acoplada para Humedales, Mediante Processing MODFLOW”***

El trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el potencial del simulador Processing MODFLOW para la modelación acoplada, hidráulica y de calidad del agua para humedales. Los principales contaminantes de los humedales provienen de la actividad de la industria y de la actividad doméstica. Por lo que las autoridades ambientales tomaron acción sobre ello, mediante acciones de restauración de cuerpos de agua. Para lo cual uso de los paquetes computacionales MODFLOW y MT3DMS, para la simulación de humedales se realizó ajustes en los paquetes incluidos en el

software Processing MODFLOW, dando a conocer el funcionamiento y dinámica de un humedal.

La conductividad hidráulica y las cinéticas de degradación son parámetros muy importantes para poder realizar la simulación de humedades utilizando el software MODFLOW .

Según el estudio la precipitación es el parámetro que presenta menor variación de la concentración, quedando almacenado en los árboles del humedal en un tiempo reduciendo su capacidad de remoción.

- j) Galloway y Sneed (2013). en su investigación titulada: ***“Análisis y simulación de hundimientos regionales que acompañan a la extracción y compactación de aguas subterráneas de sistemas acuíferos susceptible en los EE. UU”***.

El trabajo de investigación tiene como objetivo simular la deformación vertical del acuífero (compactación), provocada por la extracción de agua subterránea, como los basados en el modelo de acuífero drenado y los paquetes computacionales de subsidencia como el programa MODFLOW.

Este trabajo de investigación busca detallar los análisis y simulaciones de los acuíferos. Existen diferentes modelos para simular la deformación vertical de un acuífero que es provocada por la sobreexplotación del agua subterránea y para ello se manejara un paquete computacional MODFLOW debido a que es un software muy útil para el modelado y evaluación del nivel del agua subterránea .Esta investigación logra presentar un breve alcance de todos los enfoques que fueron adoptados por el Servicio Geológico de los EE. UU.

Un análisis de la compactación del sistema acuífero regional puede incluir estimaciones de almacenamiento esquelético elástico e inelástico propiedades hechas de tierra vertical coincidente observable. Desplazamientos superficiales o del sistema acuífero, y cambios en cabezales hidráulicos del sistema acuífero.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Hidrología subterránea

Según Aparicio-Mijares (1989). “La Hidrología subterránea es una rama de la Hidrología que estudia el origen y la formación, distribución y evolución de aguas subterráneas. Se almacenan por infiltración ocasionados por precipitaciones o derretimiento de nieve. La hidrogeología permite entender el flujo subterráneo”.

**Tabla 1:**  
Reserva explotable (2009, 2013-2014)

Acuífero	Reserva explotable (hm <sup>3</sup> /año)	Explotación (hm <sup>3</sup> /año) 2009	Explotación (hm <sup>3</sup> /año) 2013-2014	Sobre explotación (hm <sup>3</sup> /año) 2009	Sobre explotación (hm <sup>3</sup> /año) 2013-2014
Ica	189	335	220	-146	-31
Villacurí	63	228	188	-165	-125
Lanchas	17	42	53	-25	-36

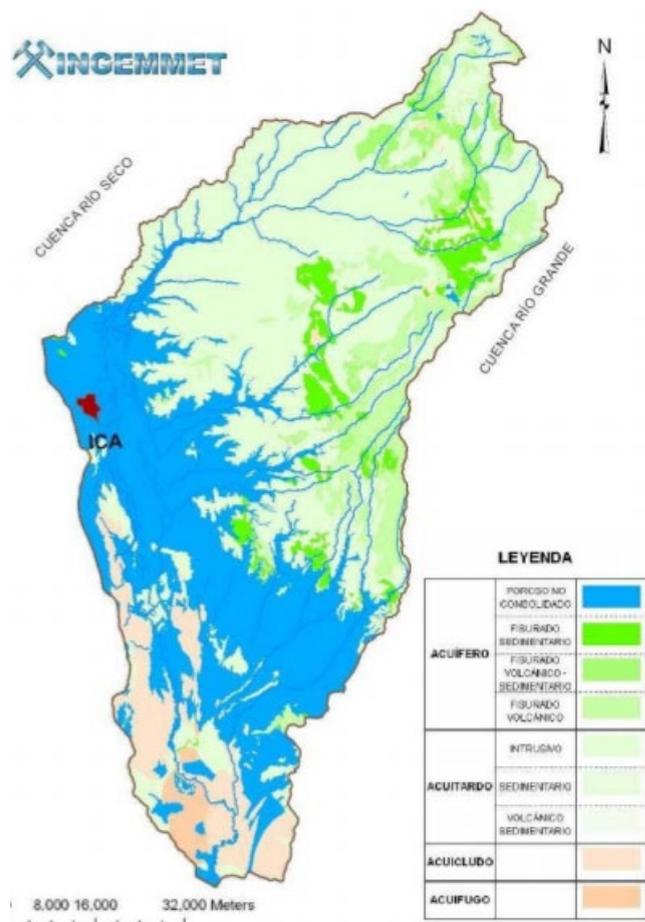
**Fuente:** Muñoz, 2016

Como se puede observar en la tabla 1, la reserva explotable intensiva a lo largo de varios años ocasiono la sobreexplotación del acuífero. La reserva explotable en el acuífero de Ica era de 189 hm<sup>3</sup> /año; pero en el año 2009 se sobreexplotó a un volumen de -146 hm<sup>3</sup> /año, y en los años 2013-2014 se llegó a una cifra menor de -31 hm<sup>3</sup> /año esto se debe a que los pozos llegaron a secarse debido al descenso de la capa freática. La reserva explotable en el acuífero de la zona de Villacurí era de 63 hm<sup>3</sup> /año; pero en el año 2009 se existió una sobreexplotación de -165 hm<sup>3</sup> /año; y en los años 2013-2014 aumentó la sobreexplotación a -215 hm<sup>3</sup> /año. Asimismo, la reserva explotable en el acuífero de Lanchas era de 17 hm<sup>3</sup> /año; y en el año 2009 existió una sobreexplotación de un volumen de -25 hm<sup>3</sup> /año; y en los años 2013-2014 subió a una cifra de -36 hm<sup>3</sup> /año.

### 2.2.2 Aguas Subterráneas

Se encuentran bajo la superficie, penetrando la capa principal, así como rocas. Su temperatura depende de la zona. Existen yacimientos de gran profundidad ocultas por miles y millones de años. Pero

muchas veces el agua subterránea está a poca profundidad desempeñando un papel constante dentro del ciclo hidrológico.



**Figura N°4.** Mapa hidrogeológico de la cuenca del Río Ica  
**Fuente:** Sociedad Geológica del Perú, 2010

En la figura 4 se muestra como el departamento de Ica presenta una gran extracción de agua subterránea en comparación al resto del Perú. Cabe resaltar que en el 2009 en el valle Ica existían 867 pozos y en el 2014 aumentó a 1242, estos datos son imprecisos debido a la gran cantidad de pozos informales que existen.

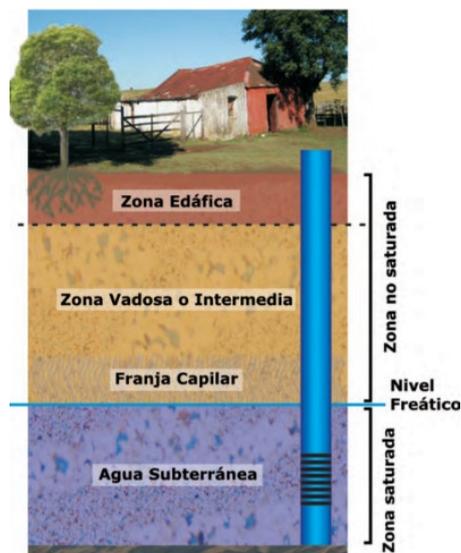
#### a) Distribución vertical del agua subterránea

Dentro del perfil del subsuelo, se caracteriza por presentar dos zonas con características hidráulicas distintas y unidas por diferentes franjas. La primera zona que está próxima a la superficie se llama aireación o zona no saturada y la que se encuentra más distante de la superficie es llamada saturación o zona saturada.

Franja no saturada: Se encuentra entre dos superficies: terreno y la freática (fisuras y/o poros). Esta parte presenta las siguientes divisiones:

- a. Zona edáfica: Se prolonga hasta las raíces de las plantas que existen.
- b. Zona intermedia: Presentan en la parte superior un límite con la capilaridad del agua y en la parte inferior con las raíces de las plantas
- c. Zona capilar: Se localiza cuando empieza la superficie freática y termina en la capilaridad; presenta un espesor que va a depender especialmente de cómo está distribuido el tamaño de los poros y el terreno.

Zona saturada: Se encuentra ubicada en la parte inferior de la superficie freática y por consiguiente los poros se encuentran totalmente llenos de agua.



**Figura N°5:** Distribución vertical del agua subterránea

**Fuente:** Global Water Partnership, 2011

### 2.2.3 Agua Superficial

Stappenbeck, R. (1926). “Son las aguas que recorren la superficie, se producen por las lluvias o por el afloramiento de aguas subterráneas”. Su naturaleza le indica seguir el camino que ofrece menos resistencia, pueden ser ríos, arroyos, lagos, etc.

En la localidad existen lo que son las aguas superficiales loticas que son los ríos, este recurso es muy importante para el consumo y regadío (figura N°6)

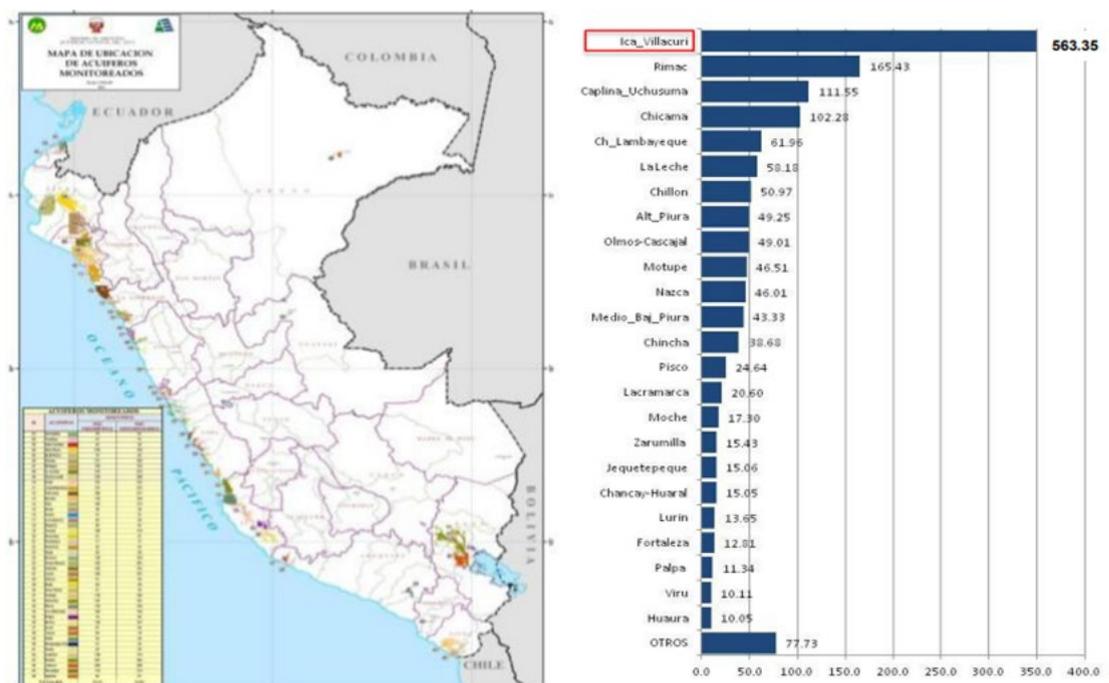


**Figura N°6.** Río Ica.  
**Fuente:** América , 2019

#### **2.2.4 Acuíferos**

Son formaciones geológicas que almacenan y transmiten agua mediante poros y grietas, son similares a depósitos subterráneos que almacenan y desplazan agua. En acuíferos de formaciones granulares hay saturación en poros o huecos que existe entre los espacios libres, a esto se les denomina acuíferos por porosidad (Fiering,1971).

Los acuíferos de fracturación circulan por fisuras diaclasas, grietas o fracturas que existe entre ellas. Los acuíferos permiten almacenar y circular el flujo de agua, mientras que otras formaciones que no permiten la circulación de flujo no se les considera acuífero.



**Figura N°7.** Puntos de extracción de aguas subterránea

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2015

**Tabla 2:**

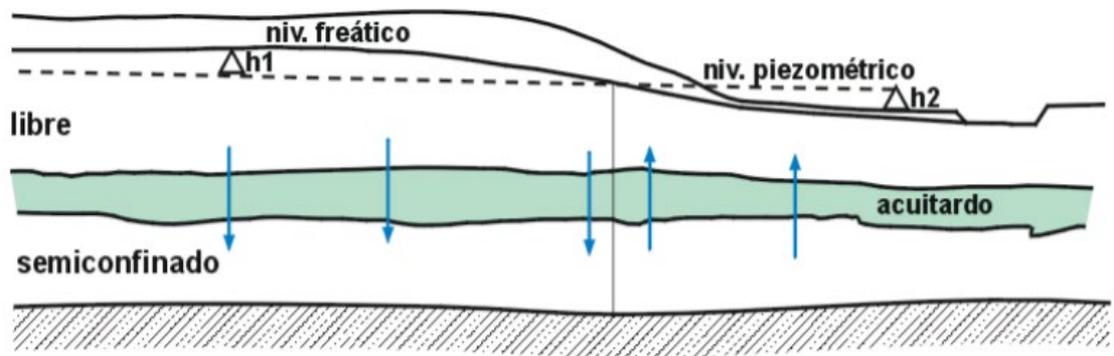
Puntos de extracción de aguas subterráneas

La explotación anual de aguas subterráneas en 49 acuíferos evaluados por la ANA asciende a 1,630.13 Hm <sup>3</sup>
El mayor volumen explotado se presenta en el uso agrícola con 1,152.73 Hm <sup>3</sup>
En el acuífero de Ica se tiene la mayor explotación 563.35 Hm <sup>3</sup> , que representa el 35% de la explotación de aguas subterráneas a nivel nacional.

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2017

#### a) Acuífero no confinado.

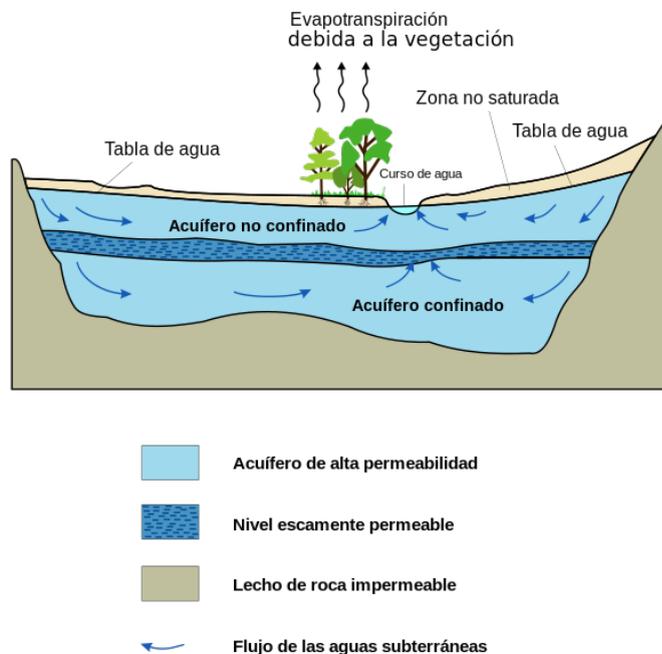
Los acuíferos no confinados se distinguen por la inexistencia de una capa de baja permeabilidad (confinamiento) sobre ellos. Se encuentran a poca profundidad, este tipo de acuífero son una fuente importante de agua subterránea en el Perú debido a la poca profundidad a la que se encuentra, lo que facilita el acceso. (Heras, 1983).



**Figura N°8.** Tipos de Acuífero  
Fuente: Conicet, 2018

### b) Acuífero confinado.

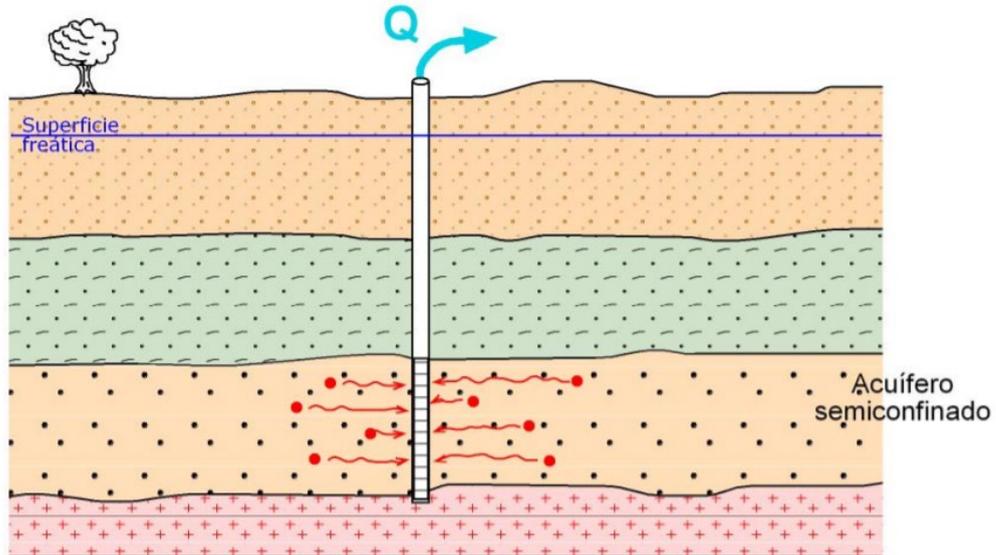
Los acuíferos confinados son unidades de rocas localizadas a profundidades muy bajas y superpuestas por capas de menor permeabilidad. En las zonas de recarga el acuífero no se encuentra confinado y pueden estar alejadas de la porción de confinada del acuífero. En la zona de recarga se crea una alta presión de agua en el acuífero por debajo de la capa de confinamiento. (Arocha, 1980).



**Figura N°9:** Acuífero  
Fuente: Hillewaert, 2009

### c) Acuíferos semiconfinados.

Este tipo de acuífero se encuentra localizados en la parte superior e inferior por capas impermeables, además existe un desplazamiento vertical del agua debido a un área permeable que hay entre esas dos capas.

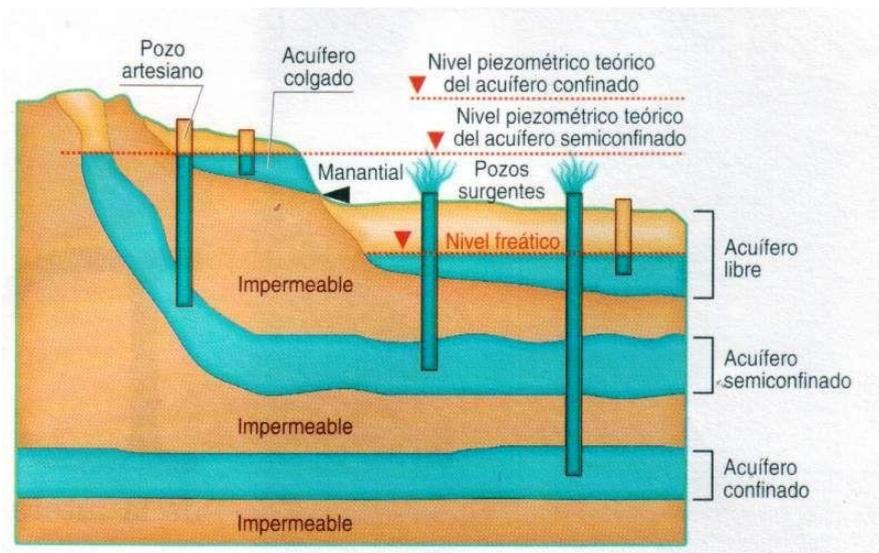


**Figura N°10:** Acuífero semiconfinado

**Fuente:** Sánchez, 2015

### 2.2.5 Pozos Profundos

Son perforaciones hechas manualmente en diferentes formaciones geológicas, que tienen la finalidad de abastecer de agua, para el consumo humano debidamente revestida la tubería (Ahrens, 1956 ).



**Figura N°11.** Tipos de pozos

**Fuente:** Navarrete, 2017

## 2.2.6 Tipos de pozos

### a) Pozo Tubular

Los pozos tubulares son construidos mediante maquinarias de perforación. Son de mayor profundidad que los pozos a tajo abierto, están revestidos con tubos de hierro, acero o plástico. (Walton, 1962).



**Figura N°12.** Pozo tubular  
**Fuente:** Red Agrícola, 2020

### b) Pozo a Tajo Abierto

Los pozos a tajo Abierto son excavaciones que se realizan de forma manual, utilizando herramientas manuales como picos, pala, baldes y barretas. Este tipo de pozos son de poca profundidad y poseen gran diámetro.



**Figura N°13.** Pozo tajo abierto  
**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2019

### c) Pozo Mixto

Son aquellos pozos que cuentan con un anillado y un tubo de fierro u otro material concéntrico. Es un conjunto constructivo de ambos tipos de pozos (tubular y tajo abierto).



**Figura N°14.** Pozo mixto

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2019

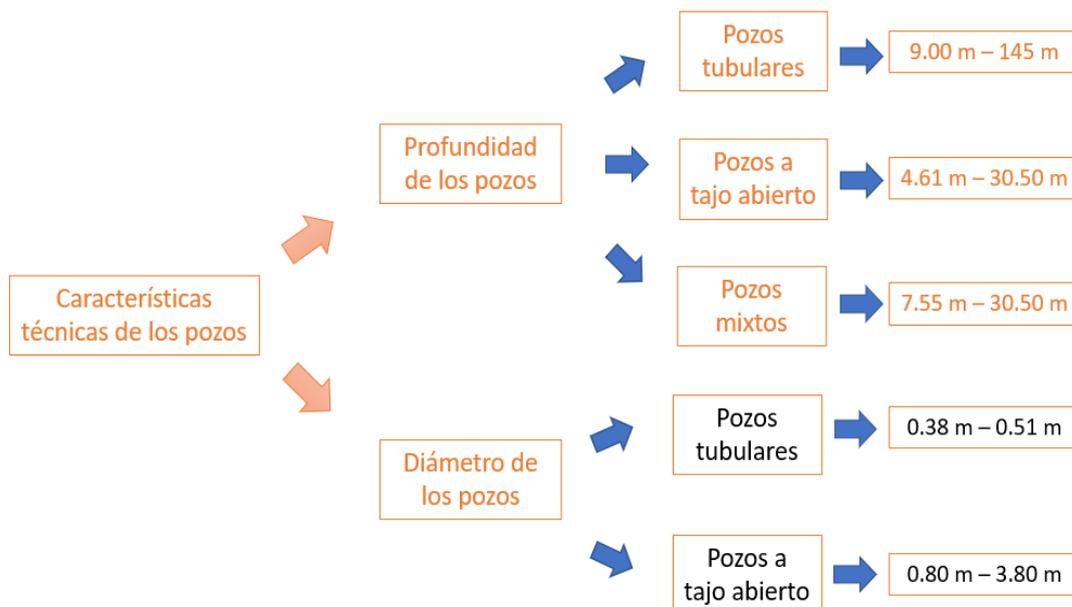
## 2.2.7 Características Técnicas de los Pozos

### a) Profundidad de los Pozos

De acuerdo con el tipo, ubicación geográfica y uso, varía la profundidad del pozo. La profundidad actual en los pozos tubulares varía entre 9.00 y 145.00 m, en los pozos mixtos entre 7.55 y 67.00 m. y en los pozos tajos abiertos varía de 4.61 a 30.50 m.

### b) Diámetro de los Pozos

Según Ordoñez (2011). El diámetro de los pozos es variable, así en los tubulares fluctúa entre 0.38 y 0.51 m, en los pozos a tajo abierto varía de 0.80 a 3.80 m.



**Figura N°15.** Profundidades y diámetro de pozos  
**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2019

### 2.2.8 Situación Actual de los Pozos

No existe un registro oficial de la cantidad de pozos profundos que existe debido a que la mayoría fueron construidos de una manera informal dentro de los terrenos agrícolas.

La empresa que se encarga de la configuración y administración del agua potable, con la ayuda de la dirección de conservación y planeamiento de los recursos hídricos dieron una lista de pozos profundos que presentan licencia (Tabla N°3).

**Tabla N°3:**

Números, porcentaje, IRHS de los pozos por distrito Valle Ica-Villacurí 2008-2009

Distrito	N° de pozos	%	Código IRHS*
Santiago	514	18	11-1-11
Ica	248	9	11-1-1
La Tinguiña	127	4	11-1-2
Los Quijes	126	4	11-1-3
Ocucaje	194	7	11-1-4
Salas-Guadalupe	48	2	11-1-8
San José Los Molinos	64	2	11-1-9
San Juan Bautista	89	3	11-1-10
Pueblo Nuevo	139	5	11-1-7
Pachacutec	67	2	11-1-5
Parcona	53	2	11-1-6
Tate	23	1	11-1-13
Subtanjalla	84	3	11-1-12
Yauca del Rosario	58	2	11-1-14
Salas-Villacurí	1046	36	11-1-8
(Subtotal Valle Ica	1834	64	11-1)
Total	2880	100	11-1

**Fuente:** Muñoz, 2016

La explotación de agua subterránea se da con el fin principal para uso agrícola, que representa el 92% del total utilizado. Luego sigue el uso doméstico con 7% del total. Los otros usos representan solamente el 1% del total utilizado.

**Tabla N°4:**

Licencias de uso de agua subterránea 2009-2014

	Valle de Ica		Villacurí-Lanchas	
	2009	2014	2009	2014
Pozos utilizados	867	1242	896	1487
Pozos con licencia	249	275	202	216
Pozos sin licencia	615	840	694	1271

**Fuente:** Muñoz, 2016

En la tabla N°4 los pozos utilizados en el valle Ica en el año 2009 fueron de 867, pozos con licencia 249 y los pozos sin licencia 615.

En el año 2014 existe un incremento considerable de los pozos utilizados a 1242 , pozos con licencia 275 y los pozos sin licencia 840.

La cantidad de pozos que sin licencia son tres veces más que los pozos con licencia, se puede ver que el efecto que va a tener este incremento va a ser el descenso considerable de la capa freática.

## 2.2.9 Parámetros Hidrogeológicos

### a) Coeficiente de almacenamiento

Es un parámetro adimensional que se define como volumen de agua liberado entre volumen total que bajo a la superficie piezométrico. (Villanueva & Iglesias ,1984).

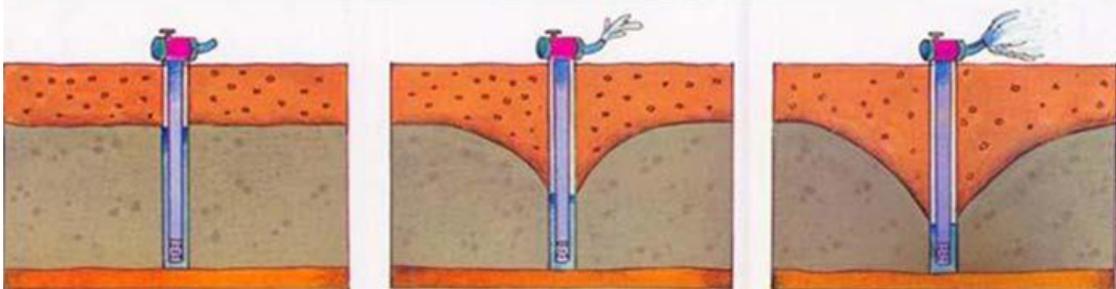
**Tabla 5:**  
Valores de coeficiente de almacenamiento

Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores medio de S
<b>Kárstico:</b> <b>Caliza y dolomías jurásicas</b>	Libre	$2 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$5 \times 10^{-5}$
<b>Caliza y dolomías cretácicas y terciarias</b>	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
<b>Poroso intergranular:</b> <b>Gravas y arenas</b>	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
<b>Kársticos y porosos:</b> <b>Calcarenitas marinas terciarias</b>	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

**Fuente:** Villanueva, M y Iglesias, A. 1984

### b) Aforo de Pozos

Según el Manual de aforos (1992). El aforo es un método de medición del caudal de agua, en el cual se realiza la medición del volumen y la velocidad con la que fluye el agua en una determinada fuente.

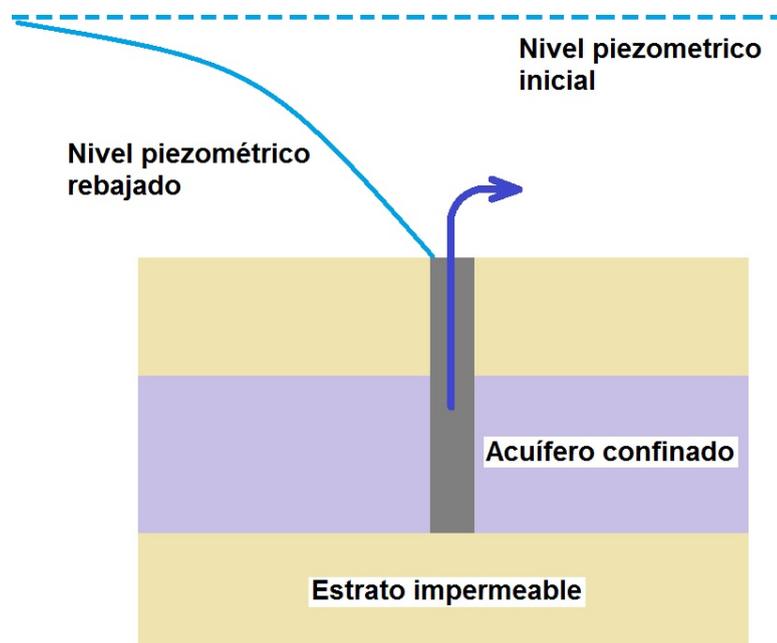


**Figura N°16.** Aforo de pozos

Fuente: Citi SA, 2010

### c) Nivel Piezométrico

Es la carga hidráulica sobre el punto donde fue instalado el piezómetro, eso significa que es la suma de elevación del punto donde está el piezómetro más la columna de presión sobre el punto. (Instituto Nacional de Ampliación de la frontera agrícola, 1984).



**Figura N°17.** Nivel piezométrico

Fuente: Yepes, 2020

#### d) Rendimiento Especifico

Es un porcentaje del volumen total del acuífero, que drena por gravedad del acuífero. Una parte del agua es retenida por acción de la capilaridad y fuerzas moleculares, por tanto, siempre es menor que la porosidad.

#### e) Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de permitir o no el flujo del agua a través de ella, el flujo depende de la viscosidad de agua y la dimensión de la partícula.

$$Q = K * i * S$$

Donde:

Q: Caudal que va circular por el medio poroso

K: Coeficiente de permeabilidad

i: Gradiente hidráulica

S: Sección

**Tabla 6 :**

Valores relativos de permeabilidad

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/s)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 \times 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 \times 10^{-1}$ a $1 \times 10^{-3}$	Arena, arena fina
Poco permeable	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-5}$	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Arcilla

**Fuente:** Villanueva, M y Iglesias, A, 1984.

#### f) Porosidad

Es el espacio libre entre partículas, por donde el agua fluye, la porosidad depende del tamaño y la forma del material que lo contiene.

$$n = (V_p / V_t) * 100$$

Donde:

$n$ = Porosidad

$V_p$ = Volumen de espacios para almacenar fluidos

$V_t$ = Volumen total

### **f.1) Porosidad efectiva**

Son todos los espacios (intersticios y huecos) que van a permitir el paso del fluido.

### **f.2) Porosidad Total**

Es la relación que existe entre el volumen de intersticios en una muestra dada de un medio poroso.

### **g) Transmisividad**

Es parámetro que se obtiene mediante la prueba de bombeo que va a indicar la facilidad que va a tener el agua para poder circular. Además, para poder calcular es necesario conocer tanto el espesor como la conductividad hidráulica

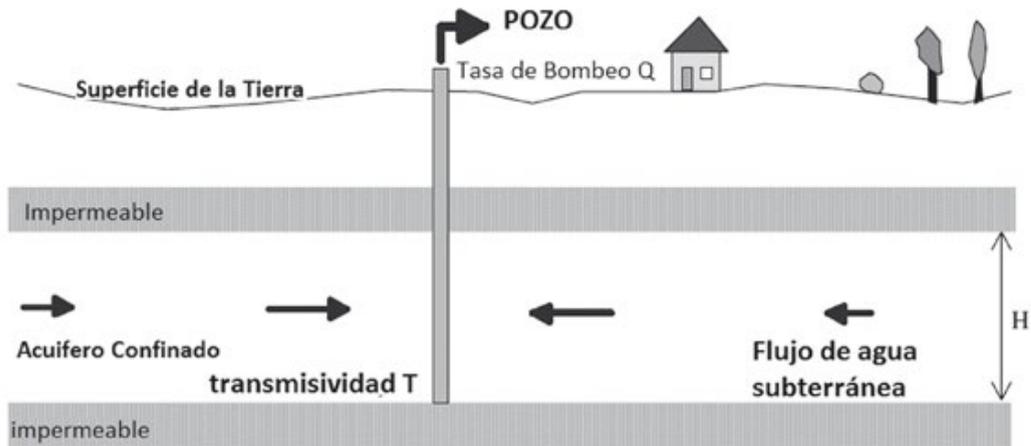
$$T = b * K$$

Donde:

T: Transmisividad

B: Espesor saturado del acuífero

K: Permeabilidad o conductividad hidráulica



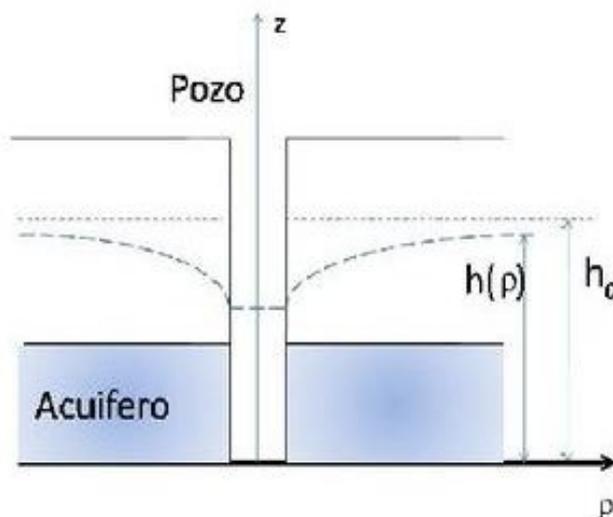
**Figura N°18.** Esquema de un acuífero confinado bombeado  
**Fuente:** Holzbecher, 2007

### 2.2.10 Piezometría de pozos

Al colocar un pozo profundo y poner un piezómetro se podrá determinar la carga hidráulica que existe, efectuando lecturas por cada período tanto de los niveles estáticos como dinámicos.

Es importante la utilización de un plano para poder realizar la interpretación y procesamiento de los datos de la piezometría obtenidos y deben indicar cuales son los límites que existen en el acuífero.

Debe contener la cantidad de pozos que existen en la zona, cada uno con su respectiva ubicación (cotas), el tiempo de observación que se va a realizar en cada pozo y el número y frecuencia con que van a hacer observados.



**Figura N°19.** Nivel piezométrico  
**Fuente:** Mate wiki, 2010

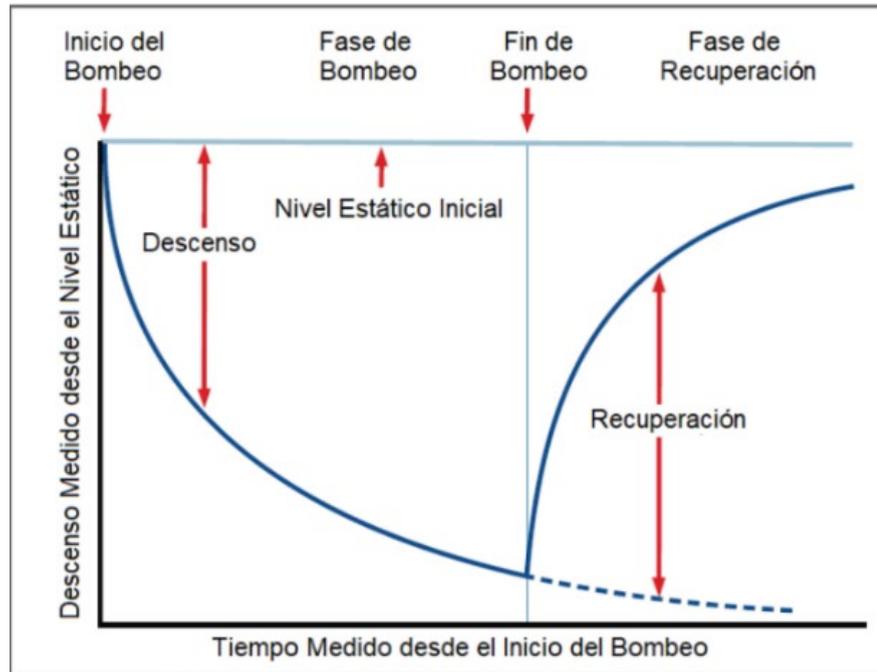
### 2.2.11 Prueba de bombeo

Bear (1979) menciona que una prueba de bombeo es un campo experimental controlado para determinar los parámetros básicos del acuífero. Durante una prueba de bombeo, el pozo es bombeado a caudal constante, donde se observa la variación del abatimiento con respecto al tiempo en el pozo y/o en uno o más puntos de observación. La información observada del abatimiento  $s=s(r,t)$  y el caudal  $Q$  es reemplazada en la fórmula de abatimiento correspondiente al tipo de acuífero, determinando los parámetros que aparecen en cada fórmula.

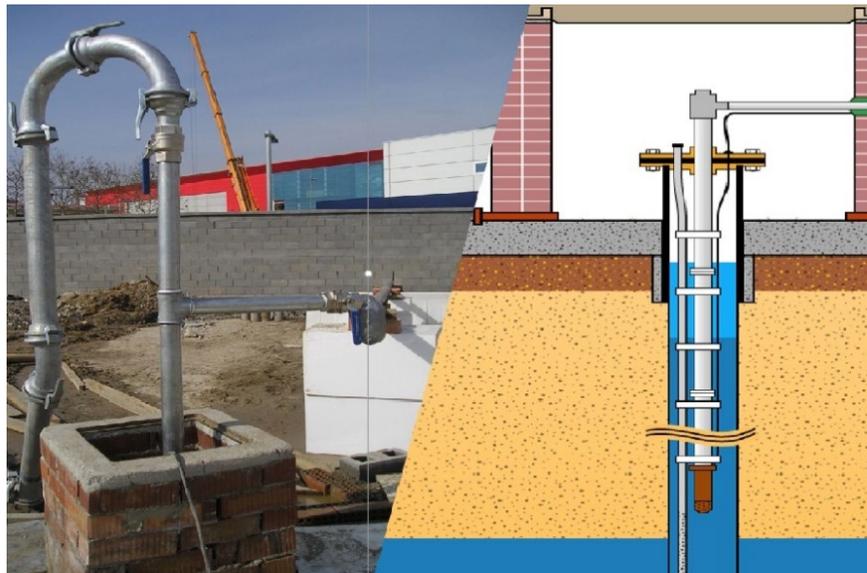
La prueba de bombeo va a dar como resultado los parámetros hidráulicos que son la transmisividad, la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, datos de suma importancia para el modelado de la capa freática.

Para poder hallar los parámetros hidráulicos se utiliza la ecuación de **Theis – Jacob** donde la transmisividad es igual a la multiplicación del caudal por 0.183 y dividido entre la pendiente de la recta-tiempo.

La conductividad hidráulica se va a hallar dividiendo la transmisividad con el espesor del acuífero.



**Figura N°20:** Prueba de bombeo  
Elaborado por: el autor



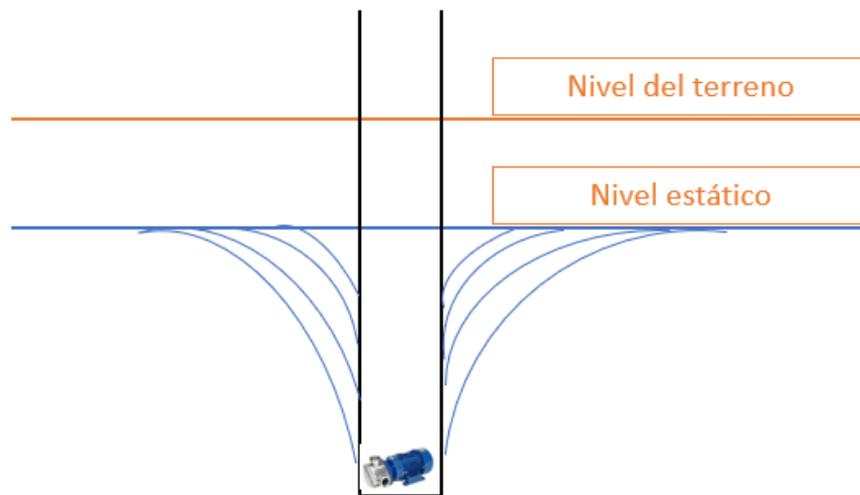
**Figura N°21:** Prueba de bombeo  
Fuente: Montoya, 2019

Como se puede apreciar en la imagen N°20 una gráfica sobre la prueba de bombeo, al inicio se puede visualizar que el nivel estático es constante, es un punto de referencia el cual va descendiendo. En la fase de bombeo existe un descenso hasta el final. Luego en la fase de recuperación se puede ver un ascenso.

### 2.2.12 Niveles de agua

**El nivel dinámico:** Es el nivel freático del acuífero, no varía se mantiene constante por un tiempo determinado, al momento de colocar un pozo va variando

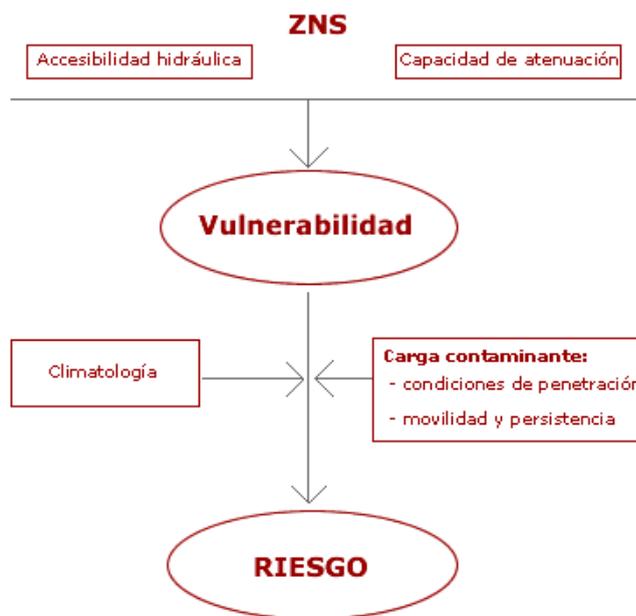
**Nivel estático:** Se produce un cambio del nivel estático por el bombeo de un pozo el cual genera un descenso de la capa freática y una variación del nivel



**Figura N°22:** Nivel estático y dinámico  
Elaborado por: el autor

### 2.2.13 Vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación expresa una alteración de su calidad natural generadas por actividades humanas. Dicha vulnerabilidad, produce características intrínsecas del acuífero referidas a la zona no saturada, es decir a la porción de terreno situada sobre la superficie piezométrica.



**Figura N°23:** Esquema de vulnerabilidad y riesgo.

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2015

#### 2.2.14 Información hidrológica

Según el programa de ciudades sostenibles en la localidad de San José de los Molinos se abastece de aguas superficiales proveniente de río Ica y aguas subterráneas provenientes de pozos y galerías de filtración. Actualmente el abastecimiento urbano proviene de aguas subterráneas, ya sea de pozos y manantiales.

En la localidad de San José de los Molinos, en los meses lluviosos las subcuencas desembocan en el río Ica, los cuales no son aprovechados debido a factores como la pendiente de discurrimento que dificultan el aprovechamiento del recurso. La actividad agrícola del distrito no se realiza de la manera adecuada debido al régimen irregular del río, por la falta de un volumen de agua permanente.

##### a) Distrito de San José de los Molinos

El distrito se encuentra ubicado en el extremo noreste de la provincia de Ica, es uno de los catorce distritos que componen a la ciudad (figura 28). Tiene una extensión de 363.2 km<sup>2</sup>. Son terrenos buenos para usos urbanos y agrícolas.

De acuerdo con la identificación hecha por la ONER, el grupo de suelo que corresponde al distrito de Los Molinos es Fluvisol Eútrico – irrigado.

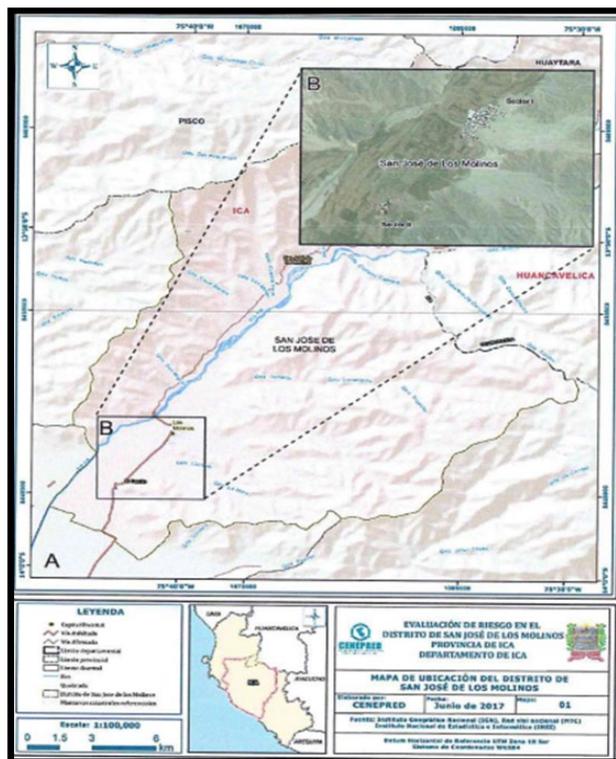
Según su hidrología presenta dos tipos de aguas las que son superficiales que provienen del río Ica, y las aguas subterráneas, proveniente de pozos. El abastecimiento actual de agua para el uso urbano es subterráneo, de pozos y de manantiales. Su principal actividad económica es la agricultura debido a que presenta una superficie agrícola de 2,616 hectáreas, de las cuáles casi la totalidad cuenta con riego proveído por el río de La Achirana.

Antiguamente el agua era un recurso gratis y accesible para todos los pobladores, en los últimos años los mismos agricultores hicieron sus pozos profundos con la finalidad de poder captar el agua subterránea. El área agrícola del distrito de San José de los Molinos estuvo en pésimas condiciones en los meses de enero y marzo porque el régimen del río es irregular, por no tener un volumen de agua permanente. Actualmente el agua del río de la Achirana no es accesible para la comunidad, por ello presenta una tarifa de 20 soles por hora, igualmente existen tarifas para los pozos, que van de 40 a 70 soles la hora dependiendo la distancia.



**Figura N°24:** Distritos del departamento de Ica

**Fuente:** Gobierno Regional de Ica, 2018



**Figura N°25:** Mapa de ubicación del distrito de los Molinos.

**Fuente:** CENEPRED, 2017

## b) Población

Cuenta con 6235 habitantes, tienen como principal actividad económica la agricultura. Donde se cultivan en menor escala el maíz, pallar, papa, etc. Mientras que el algodón Tangüis, plantas frutales como el mango, las higueras, la vid, el pacaie, las ciruelas y las cerezas, estos cultivos se realizan a gran escala.

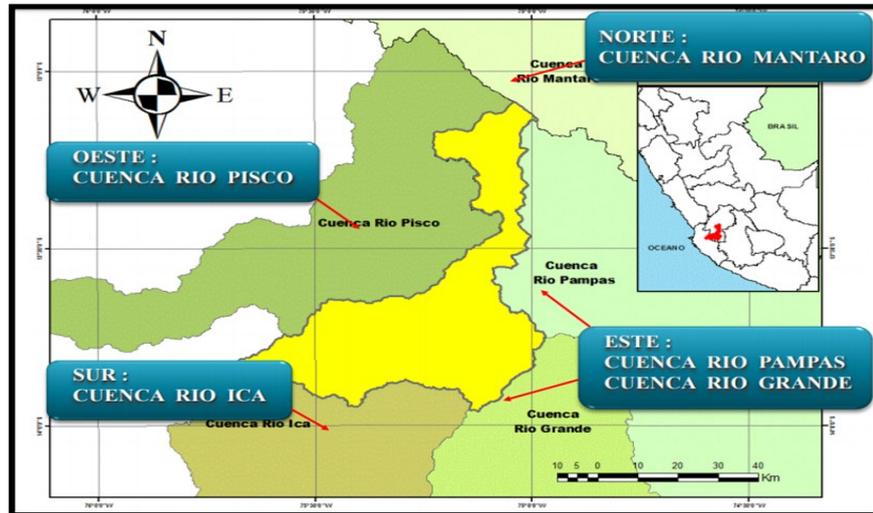
La mayoría de los pobladores de la localidad trabajadora se agrupan en cooperativas para poder lograr una mayor cantidad de producción e inversión a mayor escala aprovechando la cantidad de hectáreas que poseen.

## c) Hidrología de la Cuenca del Río Ica

Es un río del Perú, que conforma la red hídrica de este departamento. Pertenece a la vertiente del Pacífico.

La vertiente del Pacífico, la vertiente del Atlántico y la cuenca alta del río pampas , la suma de todos ellos conforma el sistema Choclococha.

Presenta un área total de 8.103 kilómetros cuadrados los cuales se dividen en el sistema de Choclococha de 392 kilómetros cuadrados y la cuenca del río Ica con 7.711 kilómetros cuadrados.



**Figura N°26.** Cuencas del río Ica.  
**Fuente:** Gobierno Regional de Ica, 2015

#### d) Precipitaciones

Las precipitaciones son toda forma de humedad que se condensa en las nubes y se desprende por gravedad, por concepto se puede decir que las precipitaciones que son hasta 2.5 mm/h se llaman ligeras, de 2.5 a 7.6 mm/h son moderadas y superior a 7.6 mm/h son fuertes.

Las precipitaciones generan escorrentías y transcurren por las capas permeables para generar las aguas subterráneas. También es usado con fuente de recargar de los acuíferos, esta información es muy importante debido a que es de suma importancia en el modelado de la capa freática que se quiere modelar.

Las precipitaciones pueden representarse con la siguiente fórmula:

$$P = ES + ETR + R + \Delta H$$

Donde se desglosa que ES= escorrentía superficial, aquella porción de agua que no se logra infiltrar en el nivel del terreno. ETR= evapotranspiración real, aquella porción de agua que si se evapora en el suelo. R = recarga en tránsito y  $\Delta H$ = variación de humedad.

La precipitación promedio de San José de los Molinos es de **2mm/año**.

#### **e) Acuífero de Ica**

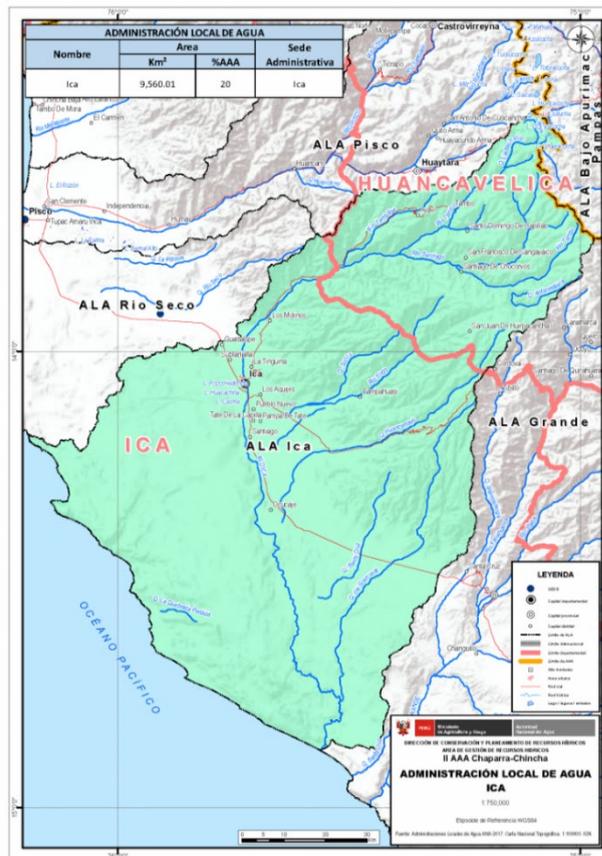
El acuífero de Ica presenta una forma alargada en el cual se inicia en el sector en la provincia de San José de los Molinos y termina en la provincia de Cahuide.

Todos los límites que presenta el acuífero tanto en la parte superior, media e inferior está conformado por rocas de batolito y por algunas formaciones geológicas de edad terciaria.

El acuífero presenta un ancho de 6 a 8 Km y de largo de 38 a 40 Km, posteriormente se va reduciendo el largo hasta unos 8 Km.

Según su litología este compuesto mayormente por depósitos sueltos de edad cuaternaria y presenta un espesor de 400 m.

La capa freática del acuífero es principalmente libre y superficial y se alimenta principalmente de las lluvias y las escorrentías.



**Figura N°27:** Mapa de ubicación del distrito de los Molinos.

**Fuente:** Administración Local del Agua, 2016

#### f) Recarga del acuífero

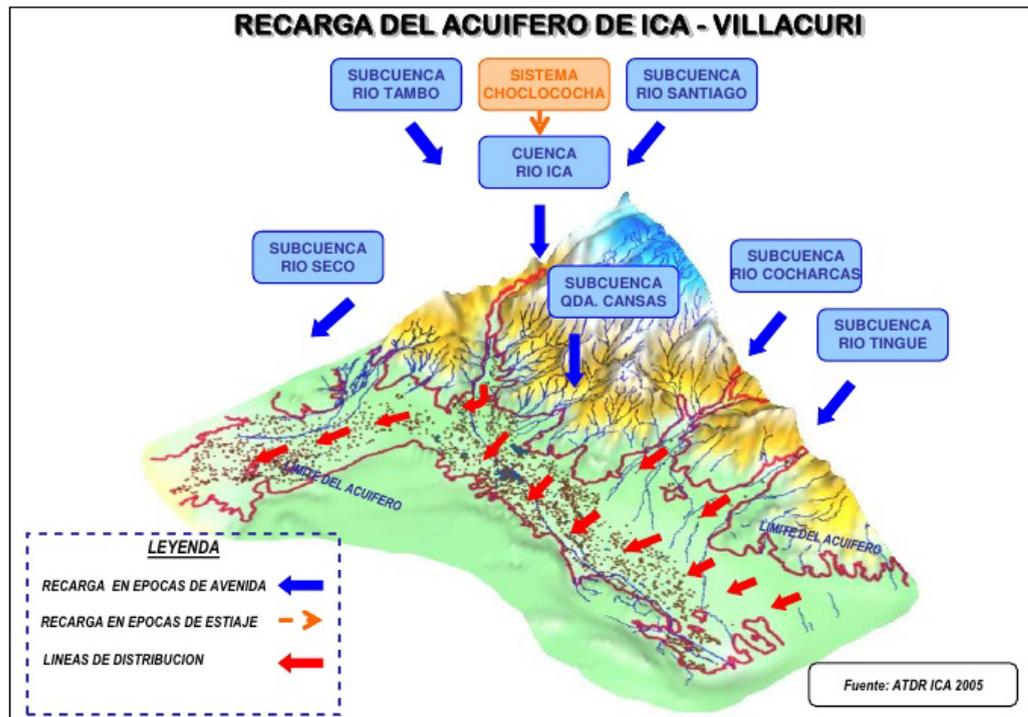
La recarga forma parte de todo el proceso hidrológico, los procesos más importantes para que se realicen la recarga son los siguientes: la evapotranspiración, precipitación, infiltración, percolación.

Mayormente las recargar se dan por las escorrentías o la probable infiltración del agua, aunque es muy difíciles conocer su valor real con mucha precisión, suele ser incierto, pero existen programas de modelación que permiten que sea más preciso.

Existen varias formas de recarga de las cuales se va a considerar la recarga difusa, que se da por la infiltración que produce la precipitación. La

concentrada se da a partir de las aguas superficiales como lagos, ríos y mares. Lateral, por transferencia de agua superficial y por último la recarga Inter acuífero, que se va a dar por los acuitardos.

En el distrito de San José de los Molinos la mayor recarga que presenta en sus aguas subterráneas es la del río Ica, que van a formar unos canales que van a pasar por toda la superficie.



**Figura N°28:**Recarga del acuífero de Ica.

**Fuente:** Autoridad Nacional de Ica, 2015

### g) Sistema de Riego en Ica

Actualmente el sistema de riego en Ica viene a ser un riego por goteo que consiste en pequeñas cantidades de agua que penetran directamente a las raíces, las cuales son aplicadas constantemente. Los pequeños productores de Ica demostraron que la agricultura es una actividad rentable.

**Tabla N°7:**

Principales cultivos del valle de Ica

Años	1990			1995			2000			2011		
	Área	Prod.	Precio	Área	Prod.	Precio	Área	Prod.	Precio	Área	Prod.	Precio
Alcachofa	0	0	0	0	0	0	20	841	0,79	2,648	16,590	1.37
Tomate	22	1,848	0,29	103	8,654	0,50	650	54,600	0,28	942	84,023	0.66
Páprika	0	0	0	5	28	3,33	56	309	3,13	1,339	8,741	5.552
Palta	440	688	2,25	344	538	1,88	363	1,207	1,16	2,124	30,829	2.3
Cebolla	0	0	0	34	297	0,18	142	12,596	0,56	1,901	116,031	0.54
Vid	3,510	17,385	0,87	3,062	18,797	0,57	3,340	17,460	1,01	7,300	133,137	1.9
Algodón	18,047	29,394	1,74	11,333	17,264	1,79	10,698	22,307	1,47	24,353	67,028	4.39
Espárragos	411	3,168	0,81	2,423	18,057	0,37	4,997	49,292	1,87	12,783	144,420	2.64

**Fuente:** Muñoz, 2016**h) Uso del riego**

La actividad indispensable que hace posible su producción a gran escala es el riego tecnificado, siendo el más usado el riego por goteo, este sistema de riego consiste en la aplicación constante de pequeñas cantidades de agua, las cuales penetran directamente a las raíces de los cultivos, lo que lo hace eficiente.

Las grandes explotaciones agrícolas se dan gracias al riego por goteo, es una tecnología subutilizada por la agricultura familiar. La asistencia técnica constante es fundamental para realizar una operación más eficiente.

Este sistema de riego es más eficiente, en el agricultor tiene que adecuarse a este sistema de riego para que sea viable. La asociatividad y el trabajo articulado con presencia del gobierno harán posible obtener los resultados requeridos.

**i) Alternativas de solución**

Se propuso varias soluciones, pero solo se tomaron en cuenta algunas debido a la zona de estudio. Ante la explotación anual de metros cúbicos de agua del acuífero de San José de los Molinos optamos por las siguientes opciones:

- Reducir el caudal de bombeo de los pozos en los cuales existe un descenso de la capa freática

- Aumentar las licencias de pozos en los lugares donde se mantiene o existe un ascenso de la capa freática

Hubo una posible propuesta que consta en el cambio de los cultivos para usar menos agua, pero era imposible cambiar miles de hectáreas para iniciar nuevos negocios. Por el momento las soluciones con mayor fuerza es realizar un modelamiento con mayor profundidad de un pozo profundo.

El problema es que no hay data que señale la cantidad de agua que contiene el acuífero de San José de los Molinos que es un punto fuerte de abastecimiento, o si el agua a mayor profundidad contiene sales y minerales tóxicos que puedan provocar daños en los cultivos. Lo que sí sabemos con seguridad es que mucha agua se va al mar y que es posible capturarla y dirigirla a los pozos. Esta sería la mejor forma para conservar las aguas en beneficio de todos a futuro.

#### j) La vida útil de pozos

Va de la mano con los materiales y un sistema de captación que trabaje en conjunto con una explotación de caudal, complementándolo con un mantenimiento adecuado. En esta zona los pozos se diseñan con una vida útil mínima de 20 años, depende mucho de los métodos de conservación para mejorar su promedio de vida útil y que dure entre 40 y 50 años.

**Tabla N°8:** Vida útil de pozos

Distrito	Pozos utilizados	Explotación (hm <sup>3</sup> /año)	Áreas bajo riego (ha)	Desc. napa freática (m/año)	Vida útil de los pozos (años)
San Juan Bautista	41	11,23	560	0,78	13
San José de los Molinos	30	9,83	490	0,48	21
Salas Guadalupe	23	9,88	495	0,78	13
Rosario de Yauca	13	0,80	40	0,34	29
Ocucaje	88	2,36	115	0,31	32
Acuífero de Pampas de Villacurí					
Salas Villacurí	464	228	12800	1,76	6
Acuífero de Pampas de Lanchas					
Paracas	435	34	3800	0,90	11

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2014

## k) Normatividad de Pozos

### Tabla N°9:

Norma Técnica para la perforación de pozos profundos en la administración nacional de acueductos y alcantarillados

<b>Estudios previos y selección del sitio</b>	
	<b>Características</b>
<b>Criterios para la selección del sitio de perforación.</b>	<p>Que sea una de las alternativas propuestas para el sitio de perforación por el estudio hidrogeológico.</p> <p>Que el inmueble esté inscrito legalmente a favor de ANDA o de la asociación que tendrá a su cargo la administración y operación del sistema de abastecimiento</p> <p>Tener el dimensionamiento adecuado como mínimo de 20x20 m para albergar todas las instalaciones que sean necesarias de acuerdo con los diseños tipos de obras civiles y electromecánicas existentes en la ANDA.</p>
<b>Especificaciones técnicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Movilización de maquinarias y equipos e Instalaciones provisionales</li> <li>○ Ante-pozo o ademe</li> <li>○ Perforación</li> <li>○ Columna litológica y descripción geológica</li> <li>○ Registro eléctrico</li> <li>○ Revestimiento</li> <li>○ Colocación de filtro de grava</li> <li>○ Desarrollo y limpieza del pozo</li> <li>○ Prueba de verticalidad y alineamiento</li> <li>○ Prueba de aforo</li> <li>○ Análisis de calidad del agua</li> </ul>
<b>Prediseño del pozo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Profundidad estimada</li> <li>○ Diámetro de perforación</li> <li>○ Diámetro y tipo de revestimiento</li> <li>○ Diseño del filtro de grava</li> <li>○ Perfil litológico previsto y tipo de acuífero</li> <li>○ Caudal esperado</li> </ul>
<b>Métodos de Perforación y equipo.</b>	<p>Los pozos deberán ser perforados en toda su profundidad y en diámetro nominal no menor al señalado en el pre – diseño.</p>

**Fuente:** Administración nacional de acueductos y alcantarillados

### 2.2.15 Ley Darcy

El flujo de agua en un medio poroso está gobernado por la ley que se va a describir. Esta ley fue descubierta en el año 1856 por el científico Darcy quien investigó las características del flujo de agua.

$$Q = (V/t) = k * i * A$$

Donde:

Q= Caudal

V= Variación del volumen en un determinado tiempo

t= Diferencial del tiempo

k= Coeficiente de permeabilidad

i= Gradiente hidráulico

A= Sección transversal del filtro

Si se considera la ecuación de continuidad la formula seria la siguiente:

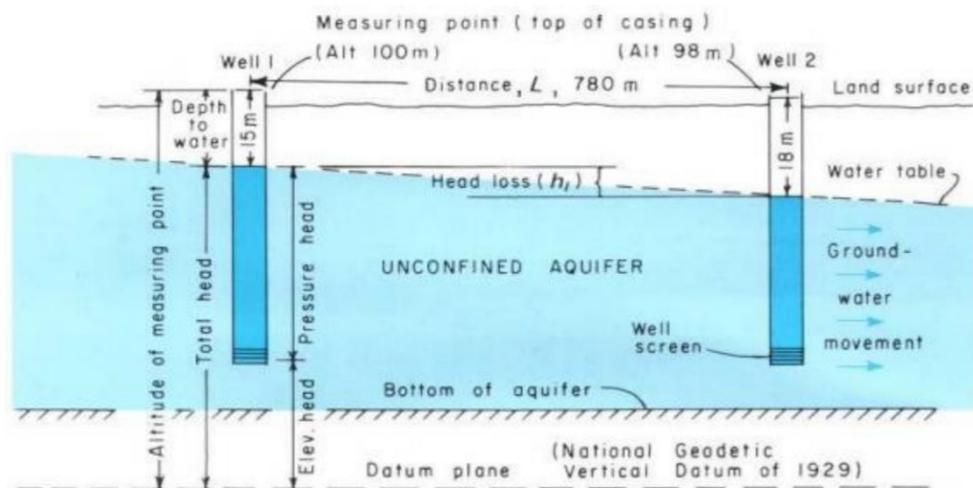
$$Q = v * A$$

Donde:

Q= caudal

v= Velocidad

A= área transversal



**Figura N°29:** Ley de Darcy.

**Fuente:** Gidahatari, 2010

## 2.2.16 Fórmulas matemáticas de la superficie freática y caudal

### a) Cálculo del caudal de bombeo

Para poder hallar el caudal es fundamental usar la ley de Darcy la cual indica lo siguiente:

Que es caudal va a ser igual a la multiplicación de (conductividad hidráulica /  $2 * longitud$ ) y ( altura final al cuadrado – la altura inicial al cuadrado ).

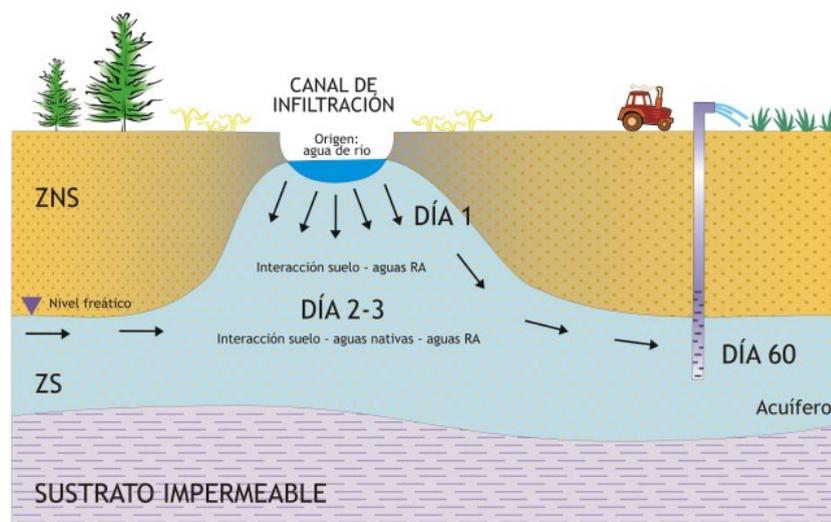
### b) Cálculo de la altura del agua

La altura va a ser igual a la raíz de la altura final al cuadrado menos la multiplicación entre la altura final al cuadrado – la altura inicial al cuadrado y dividido entre la longitud y todo ello multiplicado por la distancia.

### c) Recarga de la superficie freática

Para poder hallar la recarga debemos tener el espesor saturado con ello se puede tener la siguiente formula:

El espesor saturado es igual a la raíz de la multiplicación entre la recarga sobre conductividad hidráulica , la resta entre la longitud al cuadrado y la distancia x más el espesor saturado a una distancia L.



**Figura N°30:** Recarga del acuífero.

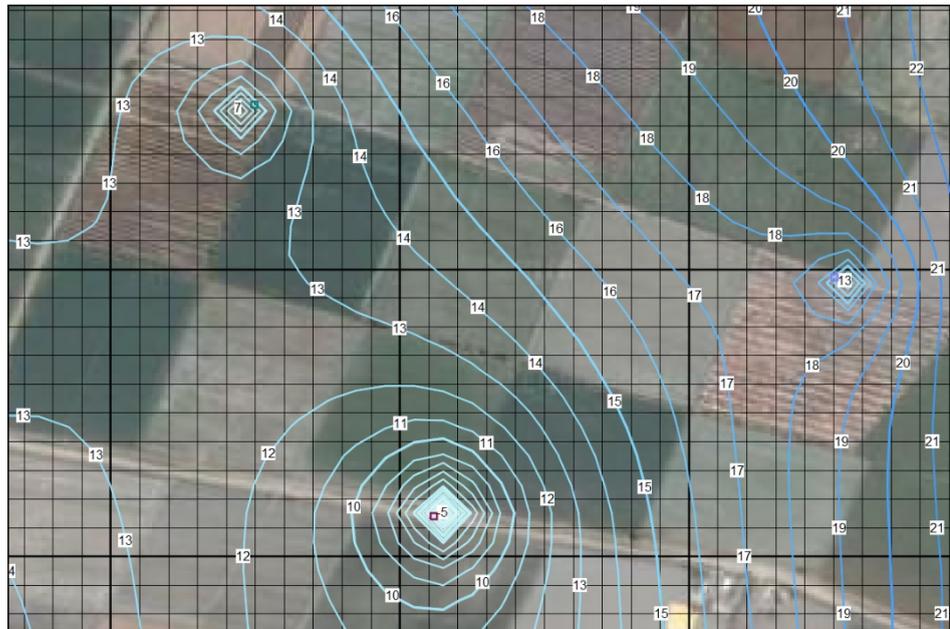
**Fuente:** Escalante, 2006

## 2.2.16 Programa utilizado

### a) MODFLOW

MODFLOW es un software que fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos de una manera gratuita para poder simular el movimiento del agua subterránea y poder añadir pozos de observación, bombeo, ríos, drenes, infiltración de las precipitaciones y cargas constantes.

MODFLOW incluye además otros programas que fueron creados para complementar los resultados que brinda el software: MODPATH describe la trayectoria de las partículas del fluido que se indicaron tanto en su origen como en su final y la ZONE BUDGET, donde se calcula el balance hídrico de las zonas que fueron creadas.



**Figura N°31:** Pozos modelados por MODFLOW

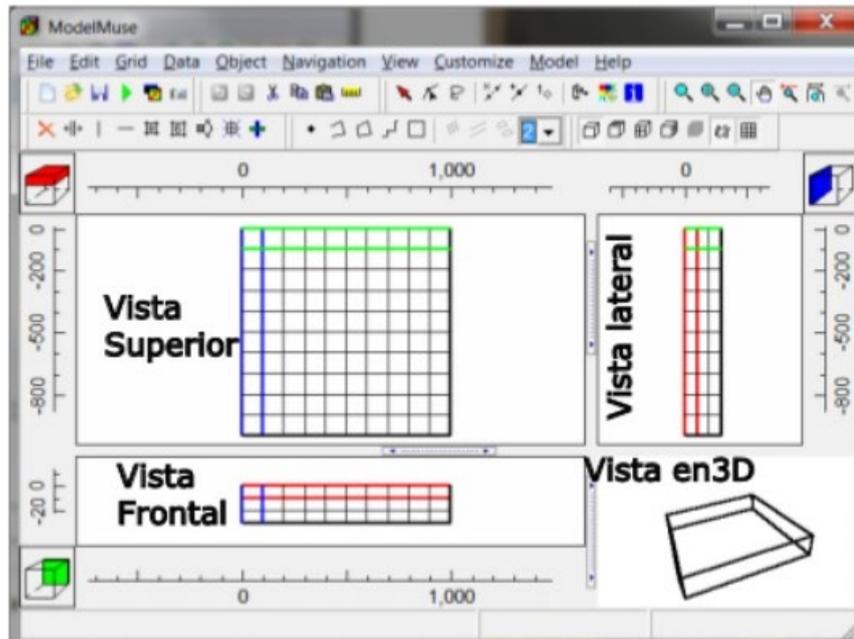
**Fuente:** Gihagatari, 2018

### b) Model Muse

El modelo muse es una interfaz gráfica para que el usuario pueda trabajar los diferentes modelos de aguas subterránea que requiere, es de uso público.

En esta interfaz se puede representar el flujo del agua subterránea como el drenaje, la interacción entre los ríos, la recarga y la evapotranspiración.

Además de buscar que el trabajo se vuelva más interactivo con esta interfaz también presenta ventajas al momento de simular el modelo que se requiere a través de mapas de calor, curvas y gráficas.



**Figura N°32:**Interfaz Model muse  
Elaborado por: el autor

### c) Diseño de MODFLOW

MODFLOW utiliza una estructura que se basa en varios módulos donde existen varios paquetes similares que son agrupados de tal manera que cada opción es independiente de otras opciones. Con este diseño modular es posible añadir nuevas opciones sin modificar las existentes.

MODFLOW está programado con el lenguaje Fortran 90. Este programa presenta portabilidad para que pueda ser leída en las diferentes plataformas.

El software facilita la resolución de las diferentes ecuaciones diferenciales parciales a través del método de diferencias finitas, donde cada celda de Mod-Flow es un volumen unitario.

$$a/ax(k_{xx}ah/ax) + a/ay(k_{yy}ah/ay) + a/az(k_{zz}ah/az) + W = Ss ah/at$$

Flujo de aguas subterráneas entradas/ salidas
Fuentes y sumideros
Cambio de almacenamiento

En general la ecuación de flujo de aguas subterráneas que emplea Mod-Flow es la siguiente:

$$\frac{\delta}{\delta x}[K_{xx} \times \frac{\delta h}{\delta x}] + \frac{\delta}{\delta y}[K_{yy} \times \frac{\delta h}{\delta y}] + \frac{\delta}{\delta z}[K_{zz} \times \frac{\delta h}{\delta z}] + w = Ss \times \frac{\delta h}{\delta t} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

K = conductividad hidráulica en las direcciones horizontal (x,y) y vertical (z).

H = carga hidráulica.

W = flujo volumétrico por unidad de volumen, que representa fuentes o sumideros de agua.

Ss= coeficiente de almacenamiento específico del medio.

t = tiempo.

$\partial x, \partial y, \partial z$ = Discretización en tres dimensiones

La ecuación de flujo anterior debe satisfacer las condiciones iniciales y de frontera dadas por:

$$h(x_i, 0) = h_0(x_i)$$

$$h(x_i, t)_{r1} = h_0(x_i, t)$$

$$V_{ni/r2} = -V_n(x_i, t)$$

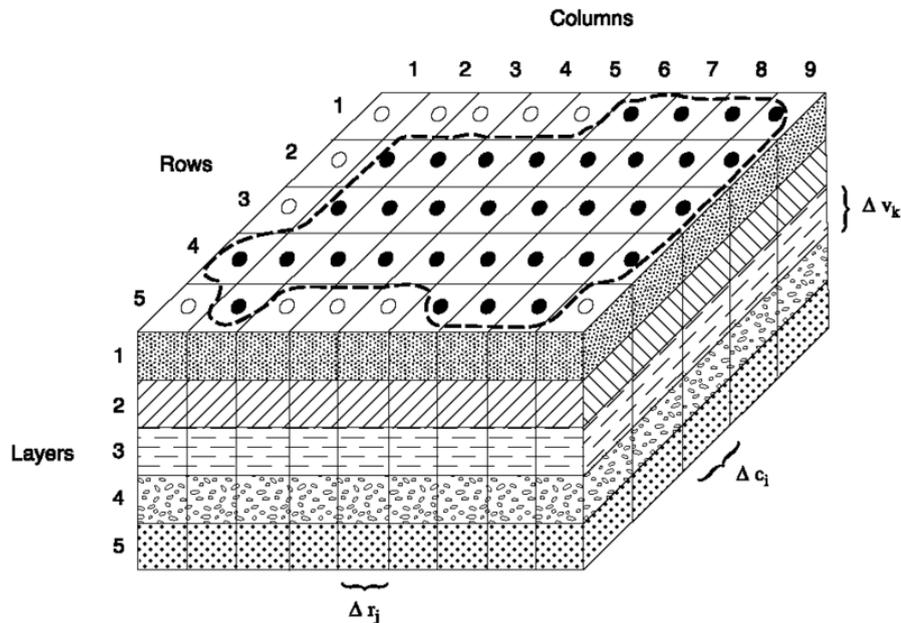
Donde:

h = carga preestablecida en la frontera de tipo Dirichlet r1

n = (n1, n2, n3) vector unitario normal hacia fuera de una frontera tipo Neuman r2.

Vn = flujo lateral preestablecida por unidad de área en una frontera r (Vn es positivo para el flujo que entra al dominio y negativo para el flujo que sale)

del dominio) Cuando  $r_2$  es una frontera impermeable y  $V_n = 0$ , entonces  $V_i n_i/r_2 = 0$ .



**Figura N°33.** Discretización de la zona de trabajo  
**Fuente:** Chang, 2012

#### d) Modelo Matemático

Mod-Flow es un software que presenta 3 dimensiones para el agua que se encuentra en la parte subterránea que a través de su interfaz gráfica uno podrá visualizar los resultados en 2d como en 3d .

Mod-Flow simula un fluido en los dos estados: transitorio y estacionario, tiene la capacidad de poder añadir diferentes tipos de capas y los acuíferos tanto confinados como semiconfinados. Cuando se crea un modelo en el programa requiere varios parámetros como flujos, conductividad hidráulica, fluidos entre otros. Eso depende de cuál sea la aplicación que uno necesita.

La importancia del programa radica también en las siguientes funciones que tiene el software:

- Visualizar los resultados en dos y tres dimensiones e interpretar shapefiles.

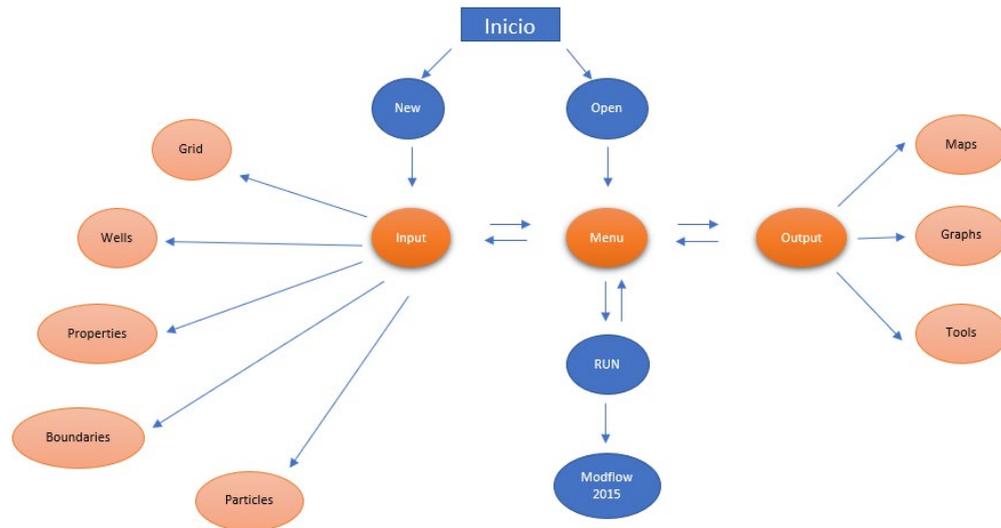
- Diseñar condiciones de frontera independientes de la malla para el modelo MODFLOW.
- Generar mallas numéricas deformadas/uniformes, incluyendo refinación vertical y horizontal.
- Analizar los resultados de MOFLOW en dos y tres dimensiones.

Las limitaciones del Mod-Flow se basan en los datos de entrada debido a que afectan en gran proporción la aplicación y precisión de los modelos, no presenta un rango de valores en el cual pueda determinarse si existe error o no con los datos que se ingresan. Es muy importante poder determinar de una manera óptima los números de capa y el tamaño de malla que va a tener el acuífero.

En la sistematización del programa (Figura 34) se puede ver qué es lo que contiene el software, en los datos de ingreso es factible introducir el total de celdas que va a tener el espacio de trabajo, señalar las celdas que no se usarán en el modelo (celdas inactivas), editar cambios en la interfaz e importar la forma de la superficie del terreno freático.

Se puede añadir uno o varios pozos tanto de bombeo como de observación de niveles, borrar pozos, modificar los pozos existentes y mover un pozo. Otros datos que se pueden introducir son la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, niveles piezométricos iniciales, asignar propiedades distintas a partes del modelo. Se pueden introducir los bordes, asignar el borde elegido a determinadas celdas, como condición de borde se pueden colocar río, lagos, mar y drenes. Añadir partículas, eliminar partículas e invertir del trazado. Se pueden asignar límites a las zonas para realizar un balance hídrico.

En los datos de salidas es factible obtener los volúmenes de entrada y salida de cada zona, dibuja las trayectorias, vectores velocidad e isolíneas de niveles o descensos. Al momento de correr el modelo debemos indicar si las capas del acuífero son libres o confinadas, indicar si existen niveles distintos de los introducido. Después de haber corrido el programa se puede ver el modelo en planta o en corte, además se puede mover de capa en capa o de fila en fila.



**Figura N°34.** Sistematización del software MODFLOW  
Elaborado por: el autor

### 2.3 Definiciones de términos básicos

#### - Aguas superficiales

Es todo el recurso hídrico que se encuentra sobre la superficie del suelo y se producen por las precipitaciones.

#### - Aguas subterráneas

Es todo recurso hídrico que proviene de la infiltración tanto directa (precipitaciones) como indirecta tanto de los ríos y lagos.

#### - Caudal de un pozo

Es la cantidad de agua, el cual puede ser explotado el pozo en un determinado tiempo.

**- Depósitos aluviales**

Son espacios donde existe una gran acumulación de diferentes materiales sueltos, se puede encontrar gravas y arena limosas.

**- MODFLOW**

Es un software, el cual se caracteriza por resolver las ecuaciones de flujo. Presenta dos modelos unos conceptual y matemático para poder resolver de una forma óptima las ecuaciones de flujo y poder modelar el nivel freático.

**- Nivel estático**

Es el nivel freático del acuífero, es constante, deja de ser estático como existe un bombeo, en el cual genera que se vuelva dinámico.

**- Nivel dinámico**

Es el cambio que se produce a través del cono de depresión a lo largo de un tiempo determinado.

**- Nivel piezométrico**

Es la carga hidráulica sobre la elevación del punto más la columna de presión sobre el punto.

**- Pozos profundos**

Es una construcción hidráulica que permite la extracción del agua a través de una perforación vertical.

**- Prueba de bombeo**

Son métodos o pruebas que se realizan en campo donde se va a requerir de una bomba para realizar la extracción del agua . El flujo de agua es constante y debido a esta prueba va a ir variando.

**- Piezometría**

Es la carga hidráulica sobre la elevación del punto donde se colocó el piezómetro más la columna de presión sobre el punto.

## 2.4. Hipótesis

### a) Hipótesis general

El modelo matemático MODFLOW contribuye para determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

### b) Hipótesis específicas

**H1.** El levantamiento de la piezometría de los pozos contribuye en gran medida en determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

**H2.** La prueba de bombeo contribuye en menor medida en determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

**H3.** El levantamiento de los niveles de agua contribuye en determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Diseño metodológico**

El diseño de la metodología es un conjunto de procedimientos que se utilizan para responder preguntas, probar hipótesis y lograr los objetivos establecidos en la investigación.

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

Es una investigación de tipo aplicada porque utiliza la guía metodológica de ArcGIS y MODFLOW como metodología para evaluar la influencia del modelamiento de los niveles de aguas subterránea con la finalidad de determinar la capa freática de San José de los Molinos.

La investigación aplicada puede servir para actuar de manera práctica, transformar, innovar, generar y resolver problemas que están definidos con el fin de resolverlos y producir un cambio en la realidad de una determinada zona. Para esta investigación la finalidad es resolver el problema del déficit hídrico en la ciudad de San José de los Molinos.

En conclusión, se utilizar los conocimientos de aprendidos en los cursos de hidráulica de la carrera de ingeniería civil.

### **3.1.2 Enfoque de la investigación**

Con respecto a la forma como se adquiere la información es cuantitativa, ya que las variables de investigación se miden y cuantifican numéricamente, para posteriormente analizar los resultados que servirán para demostrar las hipótesis planteadas y generar conclusiones y recomendaciones sobre la investigación. Por ello es muy importante el orden secuencial del desarrollo de los objetivos planteados.

### **3.1.3. Nivel de la Investigación**

Con respecto al nivel de la investigación es explicativo, puesto que se explica el comportamiento de una variable con respecto a otras, es decir, relación causa efecto. Además, se describe detalladamente como se obtiene los parámetros de entrada para la realización del modelo hidrológico.

### **3.1.4. Diseño de la investigación**

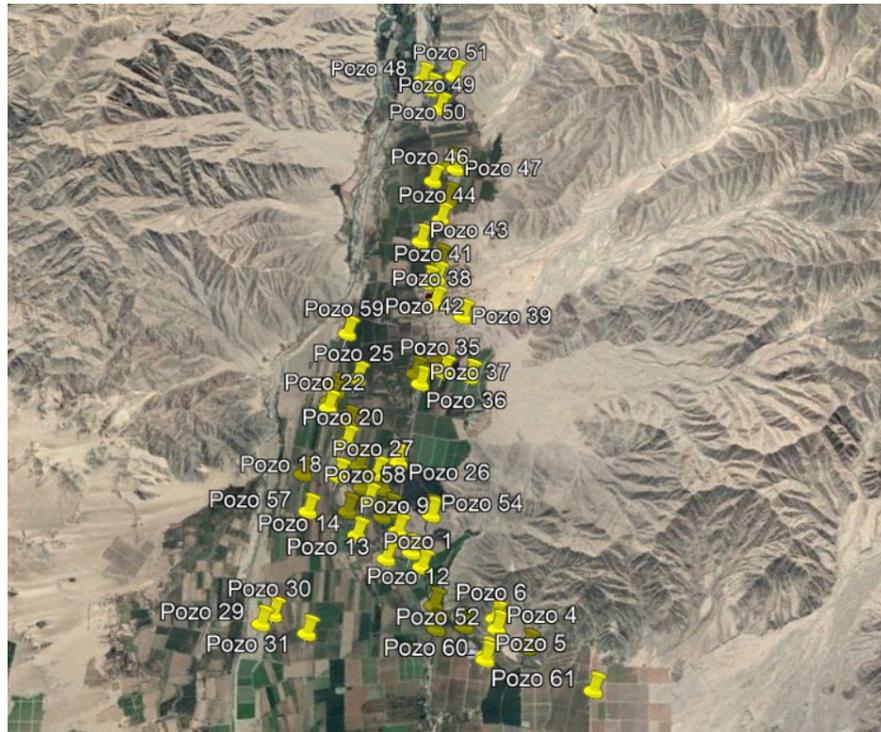
Según el propósito del estudio es no experimental, ya que no existe una variación ni manipulación en forma intencional de las variables que corresponde a la investigación de estudio. Es decir, se observa y analiza el comportamiento hidrológico respecto a los pozos profundos con la finalidad de analizar la variabilidad temporal y espacial de la capa freática que permita tener información previa para la ejecución de nuevos pozos proyectados.

Según el número de mediciones es transversal, puesto que solo se mide una sola vez las variables. Además de analizar las características de uno o más grupos de unidades en un momento dado, teniendo presente que no es necesario evaluar la evolución de esas unidades.

## 3.2. Muestra

### 3.2.1. Población

La población del estudio son todos los 61 pozos de San José los Molinos, que se encuentra delimitado en la figura 35.



**Figura N°35:** Ubicación de los 61 pozos de San José de los Molinos

**Fuente:** Google Earth, 2020

### 3.2.2. Muestra

En el estudio, la muestra fueron 4 pozos donde se visitó y se hizo las verificaciones de las mediciones.

El muestreo será no probabilístico, dado que los 4 pozos fueron seleccionados por el mismo autor (Figura 36).

En la recolección de datos de la Autoridad Nacional del agua, los pozos que fueron analizados son los siguientes:

- Pozo 35: Presenta una altura de 489 m.s.n.m, según el nivel estático la profundidad es de 18.30 m, según su nivel dinámico la profundidad es de

- 22.35, es un pozo tubular , presenta una caudal de 50 l/s y presenta un estado no utilizable con un volumen de 320.86 m<sup>3</sup>.
- Pozo 39: Presenta una altura de 533 m.s.n.m , según el nivel estático la profundidad es de 54.8 m, según su nivel dinámico la profundidad es de 28.50, es un pozo tubular , presenta una caudal de 35 l/s y presenta un estado utilizado con un volumen de 236.45 m<sup>3</sup>.
  - Pozo 41: Presenta una altura de 533 m.s.n.m , según el nivel estático la profundidad es de 33.70 m, según su nivel dinámico la profundidad es de 37.80, es un pozo tubular , presenta una caudal de 12 l/s y presenta un estado utilizable con un volumen de 246.24m<sup>3</sup>.
  - Pozo 49: Presenta una altura de 561 m.s.n.m , según el nivel estático la profundidad es de 27.62 m, según su nivel dinámico la profundidad es de 38.62, es un pozo mixto , presenta una caudal de 50 l/s y presenta un estado no utilizable con un volumen de 315.75 m<sup>3</sup>.



**Figura N°36:** Ubicación de los 4 pozos de San José de los Molinos  
**Fuente:** Google Earth, 2020

### 3.2.3. Descripción del caso de estudio

Esta investigación se inicia con la recolección de datos de la Autoridad Nacional del Agua y la Autoridad Local del Agua , el cual incluye las características de los pozos profundos, precipitaciones, pruebas de bombeo, ubicación de los pozos.

El área de estudio que se encuentra en el distrito de San José de los Molinos presenta un área de 363.2 Km<sup>2</sup> con diferentes elevaciones, en el margen superior izquierdo existe una elevación de 544 m , en el superior derecho 572 m , en el inferior izquierdo 442 m y en el margen inferior derecho con una elevación de 491 m.

San José de los Molinos presenta 61 pozos de los cuales solo 30 están en funcionamiento. Los pozos son de suma importancia en el modelado del nivel freático ya que van a generar un bombeo que provoca el cambio del nivel estático.

## 3.3. Instrumentos

### 3.3.1. Técnica

La base de datos de la Autoridad Nacional del Agua y la autoridad Local del Agua se utilizarán como fuente secundaria, donde se analizó a detalle la piezometría y la prueba de bombeo de los pozos. Además, se usó la guía metodológica del MODFLOW y ArcGIS.

### 3.3.2. Instrumentos para la recolección

Para iniciar la investigación se realizó la recolección de información mediante.

- **Material bibliográfico.** Se realizó la recolección y verificación de la información por medio de trabajos de investigación, artículos de investigación, tesis de pregrado y posgrado, estudios similares o relacionados al tema de investigación como videos o imágenes ilustrativas.
- **Cuestionario para las encuestas.** Se efectuaron encuestas a siete ingenieros que presentan maestría en hidráulica para obtener información

detallada, verificar las problemáticas y definir la importancia sobre el tema de investigación.

- **Observación.** Se realizó las características de los pozos, pruebas de campo recolectadas y así poder introducir estos datos al programa que se quiere trabajar.
- **Diagrama de Ishikawa.** Se realizó el diagrama de Ishikawa para poder conocer primero cuales son las causas de la investigación para posteriormente encontrar cual es el problema y el efecto que produciría en esta investigación.

### 3.3.3 Instrumentos de Procesamiento

Con respecto al procesamiento se precisa la verificación de la estadística de consistencia de los datos, por lo tanto, se requiere el análisis del proyecto a través de sistemas informáticos, como: Microsoft Excel, Microsoft Word, ArcGIS, MODFLOW y Google Earth. Asimismo, se planteó la elaboración de gráficos y tablas para analizar los datos que pudieran obtenerse.

- Microsoft Excel para procesar datos de las variables piezométricas, las pruebas de bombeo y los procedimientos de ingeniería.
- Microsoft Word para elaborar la parte descriptiva e interpretación de los resultados.
- MODFLOW para realizar el modelamiento hidrogeológico del acuífero de San José de los Molinos y visualizar la capa freática.
- ArcGIS para poder definir el área de trabajo y exportarlo al software MODFLOW
- Google Earth para localizar los pozos de San José de los Molinos

## 3.4 Procedimiento

### 3.4.1. Plan de trabajo y aspectos éticos

Se determinó un plan de trabajo para poder organizar, realizar y sintetizar la información de este presente trabajo para llegar a una discusión de resultados. Lo primero que se realizó combinar tanto

las bases teóricas hidráulicas aprendidas y establecidas con el software ArcGIS , MODFLOW y el programa Microsoft Excel.

Para una correcta realización del proyecto en la modelación la capa freática con el software MODFLOW se siguió detenidamente el manual del programa para realizar los pasos correctamente, en la actualidad no existe una norma sobre el modelado del nivel freático. Concluyendo con la investigación se siguió con los lineamientos de las normas APA para poder citar las fuentes bibliográficas que se obtuvo en el material bibliográfico.

#### **3.4.2.Recolección y procesamiento de información**

Se obtuvo las características de los pozos profundos (cotas, coordenadas, nivel estático, nivel dinámico, perforación, nivel de aguas y caudal, estado de pozos, explotación y volumen) para la verificación del proyecto se visitó cuatro pozos (IRHS 35, 39, 41 y 49) para poder verificar la información obtenida. Asimismo, se usó las encuestas que a través de un gráfico de barras se pueden sintetizar y validar la investigación y por último se utilizó la herramienta Ishikawa para poder conocer las causas, el problema principal y el efecto que produce.

#### **3.4.3 Desarrollo de la investigación**

Esta investigación se realizó en dos partes, la primera parte se desarrolló recolectando todos los datos necesarios para la modelación del acuífero de San José de los Molinos apoyado en la Autoridad Nacional del Agua y la Autoridad Local del Agua. A través de una carta se pudo obtener toda la información sobre los pozos, las precipitaciones, las gráficas de descensos y ascensos (prueba de bombeo).

Teniendo toda la información a disposición, se realizó una visita a campo, para verificar todos los datos recolectados, se pudo constatar la información con los operarios de los distintos pozos que se visitó. Para poder hallar los parámetros hidráulicos se analizó las pruebas

de bombeo y a través de la ecuación de Theis – Jacob se pudieron hallar la transmisividad, coeficiente de almacenamiento y la conductividad hidráulica.

Posteriormente se llevó los datos obtenidos y verificados al programa MODFLOW que presenta una interfaz llamada Model muse, introducidos todos los datos para la realización del modelo matemático MODFLOW y obtener así los gráficos para poder interpretarlos posteriormente.

#### **3.4.4 Comparación y discusión de resultados**

Al tener el modelo matemático con el software MODFLOW del nivel freático realizado se prosiguió a analizarlo y observar cómo es la explotación del acuífero sin pozos y como afecta al descenso del nivel freático el bombeo de los pozos y además saber cuál es la influencia que existe la piezometría, la prueba de bombeo y los niveles de agua en modelado de la capa freática.

### **3.5. Variables**

Se procede a especificar la variable independiente y dependiente de la siguiente investigación

#### **3.5.1. Variables Independiente**

La variable independiente será un modelo matemático MODFLOW, ya que el modelamiento debe de seguir un proceso consecutivo el cual se menciona en los objetivos específicos, teniendo presente que estos procesos no pueden ser modificados.

#### **3.5.2. Variables Dependiente**

La variable dependiente es la predicción del estado del acuífero ubicado en el distrito de san José de los Molinos, puesto que ello es el resultado de proponer el modelamiento de los niveles piezométricos de la capa freática. Cabe recalcar que la evaluación de los resultados se realizara corroborando las diferentes hipótesis.

### 3.5.3. Operacionalización de las variables

**Tabla 10:**

Operacionalización de variable independiente

VARIABLE	INDICADORES	ÍNDICES	INSTRUMENTO
Modelo Matemático MODFLOW	Piezometría de pozos	m	Sondas
	Prueba de bombeo	m <sup>3</sup> /s	Aforadores
	Cotas Calculadas	m	Levantamiento topográfico

Elaborado por: el autor

**Tabla 11:**

Operacionalización de variable dependiente

VARIABLE	INDICADORES	ÍNDICES	INSTRUMENTO
Determinar el estado actual del sistema acuífero explotado	Estado de las aguas subterráneas	m	Sistema informático
	Potencial de explotación	m/s	Sistema informático
	Nivel de la capa	m	Sistema

	freática		informático
--	----------	--	-------------

**Elaborado por: el autor**

Las variables independientes y dependiente se formularon como la relación causa- efecto. El modelo de elevación digital es la representación del mapa de la zona de San José de los Molinos grillada.

El levantamiento piezométrico realizado por el personal técnico de la Autoridad Nacional del Agua viene a ser las condiciones iniciales de la modelación hidrogeológica.

La prueba de bombeo disponible en los pozos realizado por el personal técnico de la Autoridad Nacional del Agua permite conocer los parámetros del acuífero a través de la fórmula de Theis – Jacob.

Las cotas calculadas son realizadas mediante el uso de GPS y estación total lo cuales son tomados en un formato y luego estos alimentan la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua.

**CAPÍTULO IV**  
**DESARROLLO Y APLICACIÓN**  
**4.1. Generalidades**

**4.1.1. Ubicación**

**Ubicación Geográfica**

- Latitud Sur : 13° 55' 58 " S
- Longitud Oeste : 75° 40'15 " W
- Latitud : -13.9328
- Longitud : -75.6711

**Ubicación Hidrográfica**

- Cuenca : Río Ica
- Sistema : Choclococha

**Ubicación Política**

- Región : Ica
- Provincia : Ica
- Distrito : San José de los Molinos



**Figura N°37:** Ubicación de San José de los Molinos

**Fuente:** Google Earth, 2020.

#### 4.1.2. Condiciones generales

##### a) Características técnicas de los pozos

Son todas las características que va a presentar los diferentes pozos que se encuentran en el área de estudio.

Principalmente cada pozo está incluido en el inventario de recursos hídricos subterráneos, cada uno de ellos presenta una elevación y las coordenadas X-Y para poder ubicar de manera exacta la ubicación y poder tener un panorama más amplio.

Tanto en el nivel estático y dinámico contamos con la profundidad de los pozos y la elevación que se encuentra.

### a.1) Perforación

En el aspecto de la perforación se cuenta con la identificación de los pozos si es tubular, mixto o a tajo abierto, además se cuenta con el diámetro de cada pozo

En el nivel de agua se cuenta con la fecha que se inició la lectura y el caudal que corresponde a cada pozo profundo.

### a.2) Explotación

En este aspecto se dio a conocer el estado del pozo , el uso y el régimen de caudal por hora por mes y año y el volumen que representa presenta ese pozo

### a.3) Prueba de bombeo

Para poder hallar los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica) es necesario analizar las pruebas de ascenso y descenso.

**Tabla 12**

Prueba de descenso del pozo IRHS 51

PRUEBA DE DESCENSO								
Departamento: Ica			Provincia: Ica		Distrito: Los Molinos			
Nombre del Pozo:					Ejecutores:			
Nº IRHS: 51			Nivel Estático		23.64		Fecha: 11/09/2002	
TIEMPO			CAUDAL		DESCENSOS DEL NIVEL DE AGUA			
Días Horas	Min	T (SEG)		m 3/seg	Nivel		Rebatimiento	m/m 3/seg
	0.00	0.00			23.640			
	0.50	30.00		0.026	24.740		1.100	0.0236
	1.00	60.00		0.026	25.280		1.640	0.01585
	1.50	90.00		0.026	25.670		2.030	0.01281
	2.00	120.00		0.026	25.870		2.230	0.01166
	2.50	150.00		0.026	26.170		2.530	0.01028
	3.00	180.00		0.026	26.360		2.720	0.00956

	3.50	210.00		0.026	26.480		2.840	0.00915
	4.00	240.00		0.026	26.570		2.930	0.00887
	4.50	270.00		0.026	26.740		3.100	0.00839
	5.00	300.00		0.026	27.000		3.360	0.00774
	5.50	330.00		0.026	27.030		3.390	0.00767
	6.00	360.00		0.026	27.090		3.450	0.00754
	6.50	390.00		0.026	27.190		3.550	0.00732
	7.00	420.00		0.026	27.210		3.570	0.00728
	7.50	450.00		0.026	27.165		3.525	0.00738
	8.00	480.00		0.026				
	8.50	510.00		0.026	28.370		4.730	0.00550
	9.00	540.00		0.026	28.330		4.690	0.00554
	9.50	570.00		0.026	28.330		4.690	0.00554
	10.00	600.00		0.026	28.250		4.610	0.00564
	11.00	660.00		0.026	29.720		6.080	0.00428
	12.00	720.00		0.026	29.920		6.280	0.00414
	13.00	780.00		0.026	30.000		6.360	0.00409
	14.00	840.00		0.026	30.085		6.445	0.00403
	15.00	900.00		0.026	30.120		6.480	0.00401
	16.00	960.00		0.026	30.175		6.535	0.00398
	17.00	1020.00		0.026	30.230		6.590	0.00395
	18.00	1080.00		0.026	30.310		6.670	0.00390
	19.00	1140.00		0.026	30.320		6.680	0.00389
	20.00	1200.00		0.026	30.370		6.730	0.00386
	22.00	1320.00		0.026	30.400		6.760	0.00385
	24.00	1440.00		0.026	30.490		6.850	0.00380
	26.00	1560.00		0.026	30.510		6.870	0.00378
	28.00	1680.00		0.026	30.550		6.910	0.00376
	30.00	1800.00		0.026	30.590		6.950	0.00374
	35.00	2100.00		0.026	30.740		7.100	0.00366
	40.00	2400.00		0.026	30.830		7.190	0.00362
	45.00	2700.00		0.026	30.890		7.250	0.00359
	50.00	3000.00		0.026	31.000		7.360	0.00353
	55.00	3300.00		0.026	31.050		7.410	0.00351
1	60.00	3600.00		0.026	31.120		7.480	0.00348
	70.00	4200.00		0.026	31.270		7.630	0.00341
	80.00	4800.00		0.026	31.330		7.690	0.00338
	90.00	5400.00		0.026	31.490		7.850	0.00331
	100.00	6000.00		0.026	31.490		7.850	0.00331
	110.00	6600.00		0.026	31.530		7.890	0.00330
2	120.00	7200.00		0.026	31.620		7.980	0.00326
	140.00	8400.00		0.026	31.740		8.100	0.00321
	160.00	9600.00		0.026	31.780		8.140	0.00319
3	180.00	10800.00		0.026	31.860		8.220	0.00316
	210.00	12600.00		0.026	32.000		8.360	0.00311
4	240.00	14400.00		0.026	32.060		8.420	0.00309

	270.00	16200.00		0.026	32.130		8.490	0.00306
5	300.00	18000.00		0.026	32.230		8.590	0.00303
	330.00	19800.00		0.026	32.290		8.650	0.00301
6	360.00	21600.00		0.026	32.360		8.720	0.00298
	390.00	23400.00		0.026	32.450		8.810	0.00295
7	420.00	25200.00		0.026	32.520		8.880	0.00293
8	480.00	28800.00		0.026	32.680		9.040	0.00288
9	540.00	32400.00		0.026	32.960		9.320	0.00279
10	600.00	36000.00		0.026	33.120		9.480	0.00274
11	660.00	39600.00		0.026	33.300		9.660	0.00269
12	720.00	43200.00		0.026	33.420		9.780	0.00266
		46800.00		0.026				

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021

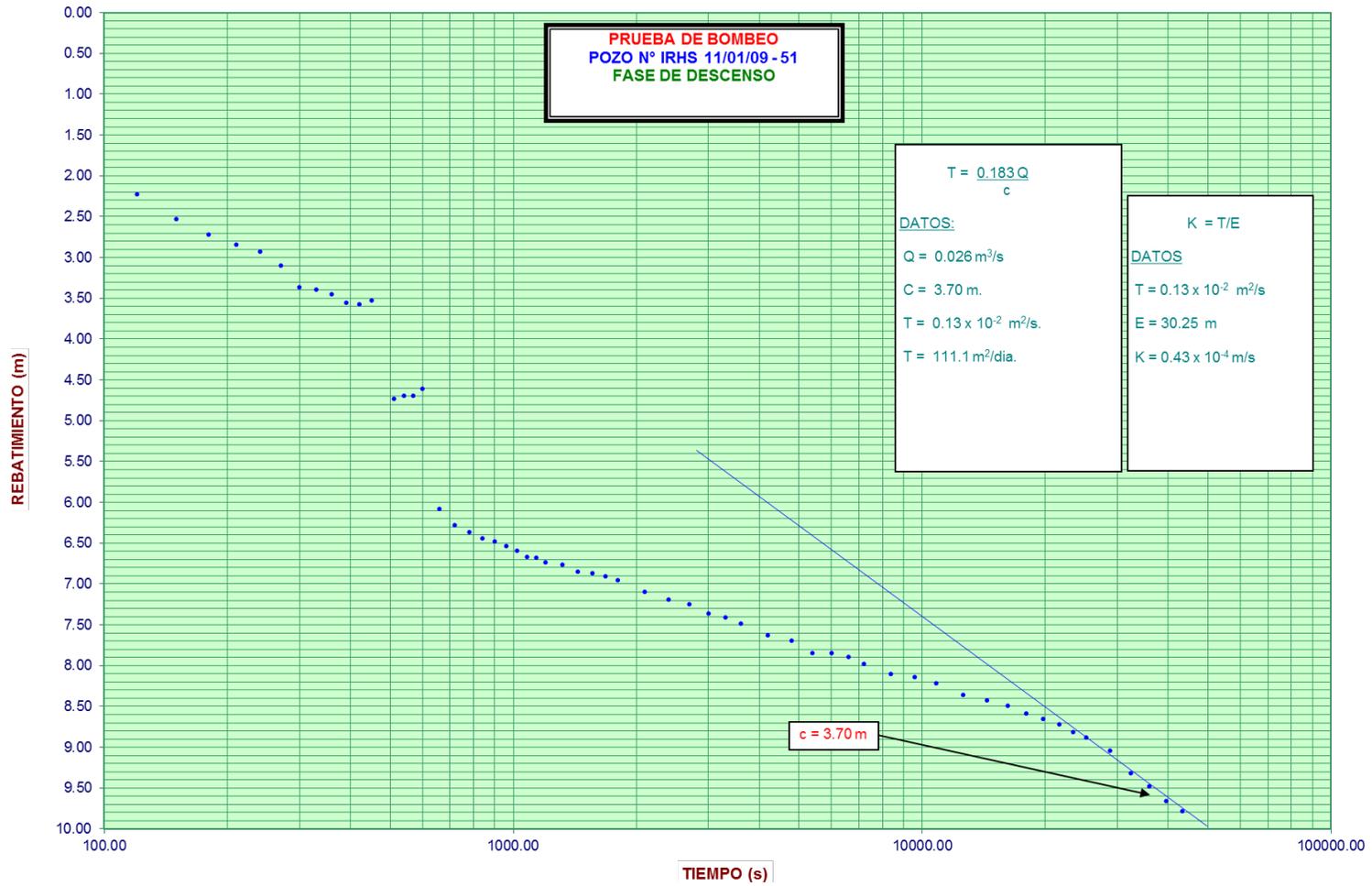


Figura N°38: Prueba de descenso del pozo IRHS 51

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2021

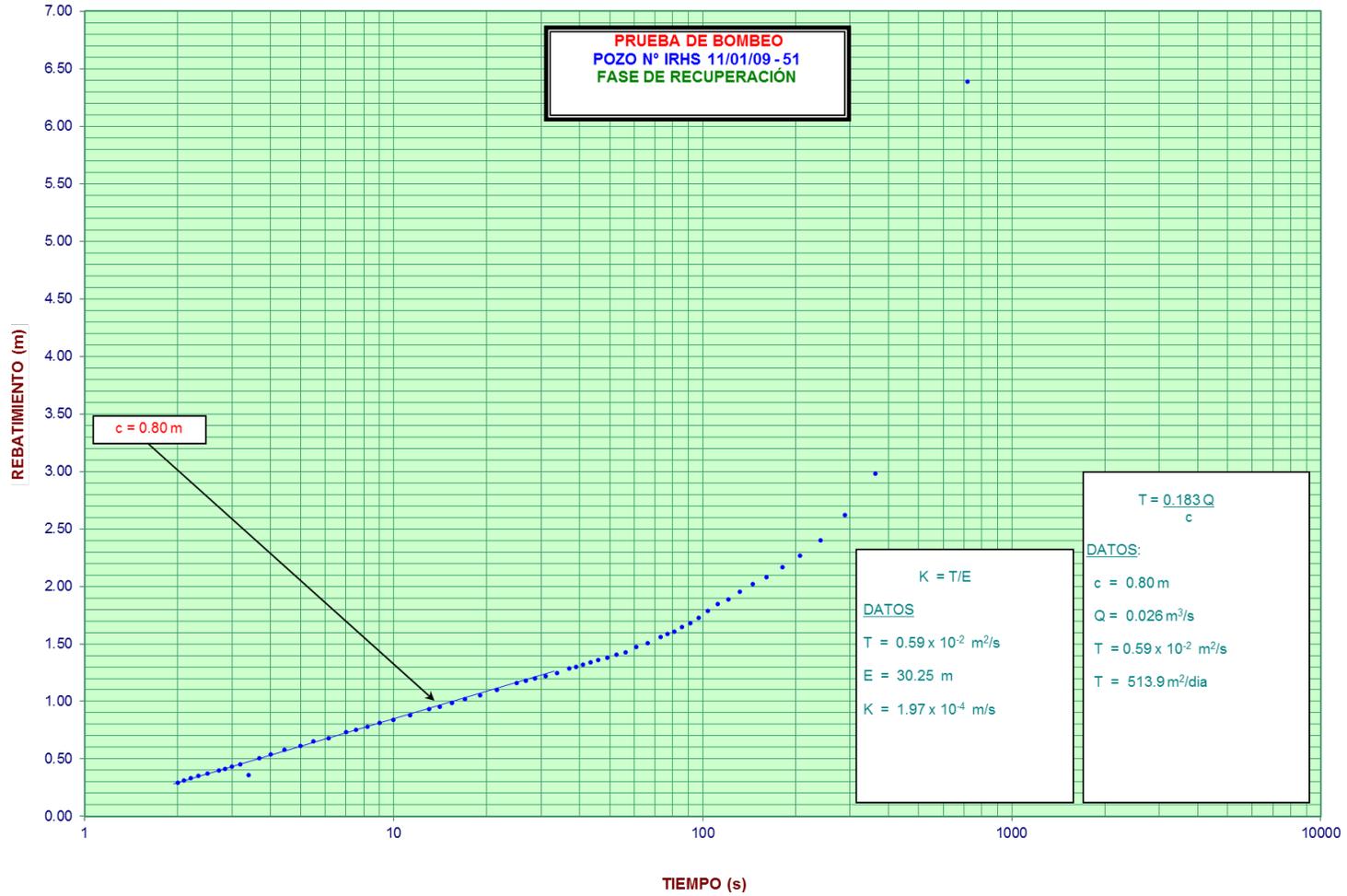
**Tabla 13:**

Prueba de recuperación del pozo IRHS 51

PRUEBA DE RECUPERACION								
Departamento: Ica			Provincia: Ica			Distrito: Los Molinos		
Nombre del pozo :					Ejecutores:			
Nº IRHS:	51		Nivel Estático		23.64		Fecha:	10/09/2002
TIEMPO				RECUPERACION DEL NIVEL DE AGUA				
Días Horas	T Minutos	Min	t <sup>2</sup> /t+1	T (SEG)	Nivel		Rebatimiento	m/m3/seg
			0.00	0	33.420			
	0.50	1441.00	1441.00	30.00	31.200		7.560	
	1.00	721.00	721.00	60.00	30.030		6.390	
	1.50	481.00	481.00	90.00	27.590			
	2.00	361.00	361.00	120.00	26.620		2.980	
	2.50	289.00	289.00	150.00	26.260		2.620	
	3.00	241.00	241.00	180.00	26.040		2.400	
	3.50	206.71	206.71	210.00	25.910		2.270	
	4.00	181.00	181.00	240.00	25.805		2.165	
	4.50	161.00	161.00	270.00	25.720		2.080	
	5.00	145.00	145.00	300.00	25.660		2.020	
	5.50	131.91	131.91	330.00	25.595		1.955	
	6.00	121.00	121.00	360.00	25.530		1.890	
	6.50	111.77	111.77	390.00	25.490		1.850	
	7.00	103.86	103.86	420.00	25.430		1.790	
	7.50	97.00	97.00	450.00	25.365		1.725	
	8.00	91.00	91.00	480.00	25.320		1.680	
	8.50	85.71	85.71	510.00	25.290		1.650	
	9.00	81.00	81.00	540.00	25.250		1.610	
	9.50	76.79	76.79	570.00	25.230		1.590	
	10.00	73.00	73.00	600.00	25.200		1.560	
	11.00	66.45	66.45	660.00	25.150		1.510	
	12.00	61.00	61.00	720.00	25.115		1.475	
	13.00	56.38	56.38	780.00	25.070		1.430	
	14.00	52.43	52.43	840.00	25.050		1.410	
	15.00	49.00	49.00	900.00	25.020		1.380	
	16.00	46.00	46.00	960.00	25.000		1.360	
	17.00	43.35	43.35	1020.00	24.980		1.340	
	18.00	41.00	41.00	1080.00	24.960		1.320	
	19.00	38.89	38.89	1140.00	24.940		1.300	
	20.00	37.00	37.00	1200.00	24.925		1.285	

	22.00	33.73	33.73	1320.00	24.890		1.250	
	24.00	31.00	31.00	1440.00	24.860		1.220	
	26.00	28.69	28.69	1560.00	24.840		1.200	
	28.00	26.71	26.71	1680.00	24.820		1.180	
	30.00	25.00	25.00	1800.00	24.800		1.160	
	35.00	21.57	21.57	2100.00	24.740		1.100	
	40.00	19.00	19.00	2400.00	24.695		1.055	
	45.00	17.00	17.00	2700.00	24.660		1.020	
	50.00	15.40	15.40	3000.00	24.625		0.985	
	55.00	14.09	14.09	3300.00	24.595		0.955	
1	60.00	13.00	13.00	3600.00	24.575		0.935	
1.1	70.00	11.29	11.29	4200.00	24.520		0.880	
1.2	80.00	10.00	10.00	4800.00	24.480		0.840	
1.3	90.00	9.00	9.00	5400.00	24.450		0.810	
1.4	100.00	8.20	8.20	6000.00	24.420		0.780	
1.5	110.00	7.55	7.55	6600.00	24.390		0.750	
2	120.00	7.00	7.00	7200.00	24.370		0.730	
2.2	140.00	6.14	6.14	8400.00	24.320		0.680	
2.4	160.00	5.50	5.50	9600.00	24.290		0.650	
3	180.00	5.00	5.00	10800.00	24.255		0.615	
3.3	210.00	4.43	4.43	12600.00	24.220		0.580	
4	240.00	4.00	4.00	14400.00	24.180		0.540	
4.3	270.00	3.67	3.67	16200.00	24.145		0.505	
5	300.00	3.40	3.40	18000.00	24.000		0.360	
5.3	330.00	3.18	3.18	19800.00	24.090		0.450	
6	360.00	3.00	3.00	21600.00	24.070		0.430	
6.3	390.00	2.85	2.85	23400.00	24.055		0.415	
7	420.00	2.71	2.71	25200.00	24.040		0.400	
8	480.00	2.50	2.50	28800.00	24.010		0.370	
9	540.00	2.33	2.33	32400.00	23.990		0.350	
10	600.00	2.20	2.20	36000.00	23.970		0.330	
11	660.00	2.09	2.09	39600.00	23.950		0.310	
12	720.00	2.00	2.00	43200.00	23.930		0.290	

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2021



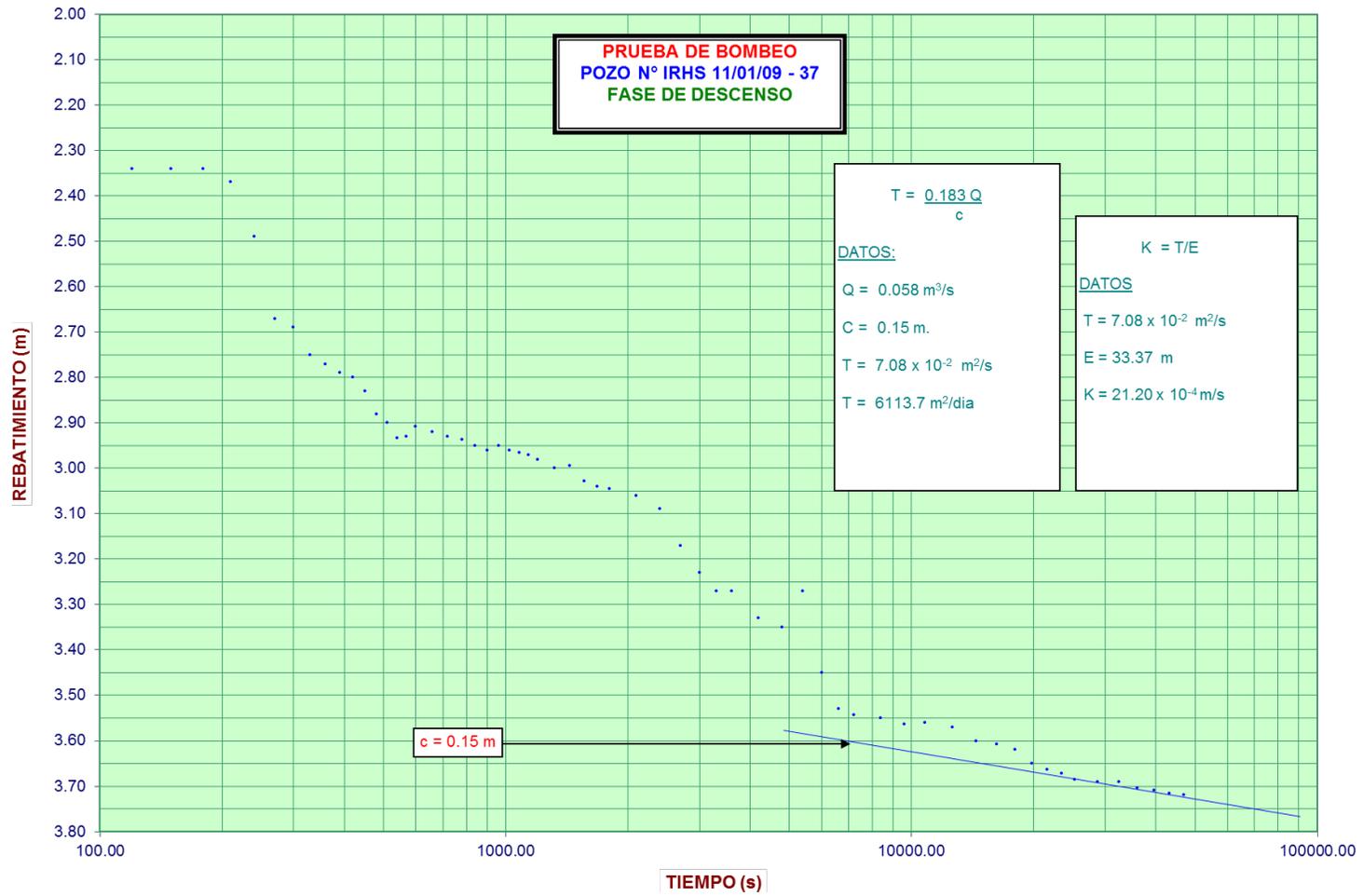
**Figura N°39:** Prueba de recuperación del pozo IRHS 51  
**Fuente:** Autoridad Nacional del agua, 2021

**Tabla 14:**  
Prueba de descenso del pozo IRHS 37

PRUEBA DE DESCENSO									
Departamento: Ica			Provincia: Ica			Distrito: Los Molinos			
Nombre del Pozo:					Ejecutores:				
N° IRHS: 37			Nivel Estático			21.63		Fecha: 13/09/2002	
TIEMPO			CAUDAL		DESCENSOS DEL NIVEL DE AGUA				
Días Horas	Min	T (SG)		m 3/seg	Nivel		Rebatimiento	m/m 3/seg	
	0.00	0.00			21.360				
	0.50	30.00		0.058	24.000		2.370	0.0245	
	1.00	60.00		0.058	24.050		2.420	0.02397	
	1.50	90.00		0.058	23.690		2.060	0.02816	
	2.00	120.00		0.058	23.970		2.340	0.02479	
	2.50	150.00		0.058	23.970		2.340	0.02479	
	3.00	180.00		0.058	23.970		2.340	0.02479	
	3.50	210.00		0.058	24.000		2.370	0.02447	
	4.00	240.00		0.058	24.120		2.490	0.02329	
	4.50	270.00		0.058	24.300		2.670	0.02172	
	5.00	300.00		0.058	24.320		2.690	0.02156	
	5.50	330.00		0.058	24.380		2.750	0.02109	
	6.00	360.00		0.058	24.400		2.770	0.02094	
	6.50	390.00		0.058	24.420		2.790	0.02079	
	7.00	420.00		0.058	24.430		2.800	0.02071	
	7.50	450.00		0.058	24.460		2.830	0.02049	
	8.00	480.00		0.058	24.510		2.880	0.02014	
	8.50	510.00		0.058	24.530		2.900	0.02000	
	9.00	540.00		0.058	24.563		2.933	0.01977	
	9.50	570.00		0.058	24.560		2.930	0.01980	
	10.00	600.00		0.058	24.538		2.908	0.01994	
	11.00	660.00		0.058	24.550		2.920	0.01986	
	12.00	720.00		0.058	24.560		2.930	0.01980	
	13.00	780.00		0.058	24.567		2.937	0.01975	
	14.00	840.00		0.058	24.580		2.950	0.01966	
	15.00	900.00		0.058	24.590		2.960	0.01959	
	16.00	960.00		0.058	24.580		2.950	0.01966	
	17.00	1020.00		0.058	24.590		2.960	0.01959	
	18.00	1080.00		0.058	24.596		2.966	0.01955	
	19.00	1140.00		0.058	24.600		2.970	0.01953	
	20.00	1200.00		0.058	24.610		2.980	0.01946	
	22.00	1320.00		0.058	24.630		3.000	0.01933	

	24.00	1440.00		0.058	24.625		2.995	0.01937
	26.00	1560.00		0.058	24.658		3.028	0.01915
	28.00	1680.00		0.058	24.670		3.040	0.01908
	30.00	1800.00		0.058	24.675		3.045	0.01905
	35.00	2100.00		0.058	24.690		3.060	0.01895
	40.00	2400.00		0.058	24.720		3.090	0.01877
	45.00	2700.00		0.058	24.800		3.170	0.01830
	50.00	3000.00		0.058	24.860		3.230	0.01796
	55.00	3300.00		0.058	24.900		3.270	0.01774
1	60.00	3600.00		0.058	24.900		3.270	0.01774
	70.00	4200.00		0.058	24.960		3.330	0.01742
	80.00	4800.00		0.058	24.980		3.350	0.01731
	90.00	5400.00		0.058	24.900		3.270	0.01774
	100.00	6000.00		0.058	25.080		3.450	0.01681
	110.00	6600.00		0.058	25.160		3.530	0.01643
2	120.00	7200.00		0.058	25.173		3.543	0.01637
	140.00	8400.00		0.058	25.180		3.550	0.01634
	160.00	9600.00		0.058	25.193		3.563	0.01628
3	180.00	10800.00		0.058	25.190		3.560	0.01629
	210.00	12600.00		0.058	25.200		3.570	0.01625
4	240.00	14400.00		0.058	25.230		3.600	0.01611
	270.00	16200.00		0.058	25.238		3.608	0.01608
5	300.00	18000.00		0.058	25.249		3.619	0.01603
	330.00	19800.00		0.058	25.280		3.650	0.01589
6	360.00	21600.00		0.058	25.294		3.664	0.01583
	390.00	23400.00		0.058	25.302		3.672	0.01580
7	420.00	25200.00		0.058	25.316		3.686	0.01574
8	480.00	28800.00		0.058	25.320		3.690	0.01572
9	540.00	32400.00		0.058	25.320		3.690	0.01572
10	600.00	36000.00		0.058	25.334		3.704	0.01566
11	660.00	39600.00		0.058	25.340		3.710	0.01563
12	720.00	43200.00		0.058	25.346		3.716	0.01561
		46800.00		0.058	25.350		3.720	0.01559

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021



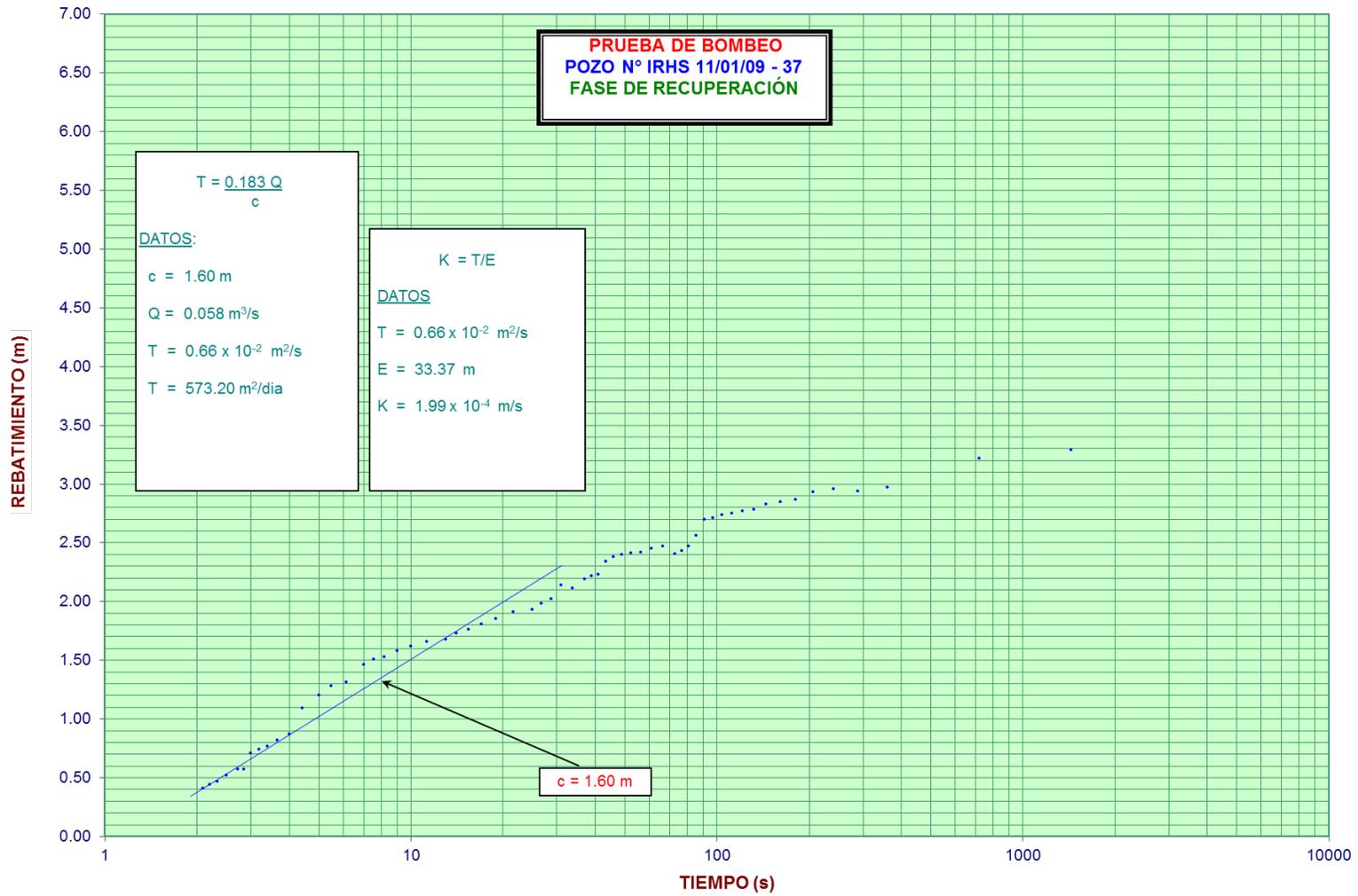
**Figura N°40:** Prueba de descenso del pozo IRHS 37  
**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021

**Tabla 15**  
Prueba de recuperación del pozo IRHS 37

PRUEBA DE RECUPERACION								
Departamento: Ica			Provincia: Ica			Distrito: Los Molinos		
Nombre del pozo :					Ejecutores:			
N° IRHS:		37		Nivel Estático		21.63		Fecha: 13/09/2002
TIEMPO				RECUPERACION DEL NIVEL DE AGUA				
Días	T Horas	Min	t°/t+1	T (SEG)	Nivel		Rebatimiento	m/m3/seg
			0.00	0.00	25.350			
	0.50	1441.00	1441.00	30.00	24.920		3.290	
	1.00	721.00	721.00	60.00	24.850		3.220	
	1.50	481.00	481.00	90.00	24.620			
	2.00	361.00	361.00	120.00	24.600		2.970	
	2.50	289.00	289.00	150.00	24.570		2.940	
	3.00	241.00	241.00	180.00	24.590		2.960	
	3.50	206.71	206.71	210.00	24.560		2.930	
	4.00	181.00	181.00	240.00	24.500		2.870	
	4.50	161.00	161.00	270.00	24.480		2.850	
	5.00	145.00	145.00	300.00	24.460		2.830	
	5.50	131.91	131.91	330.00	24.410		2.780	
	6.00	121.00	121.00	360.00	24.400		2.770	
	6.50	111.77	111.77	390.00	24.380		2.750	
	7.00	103.86	103.86	420.00	24.370		2.740	
	7.50	97.00	97.00	450.00	24.340		2.710	
	8.00	91.00	91.00	480.00	24.330		2.700	
	8.50	85.71	85.71	510.00	24.190		2.560	
	9.00	81.00	81.00	540.00	24.100		2.470	
	9.50	76.79	76.79	570.00	24.060		2.430	
	10.00	73.00	73.00	600.00	24.035		2.405	
	11.00	66.45	66.45	660.00	24.100		2.470	
	12.00	61.00	61.00	720.00	24.080		2.450	
	13.00	56.38	56.38	780.00	24.050		2.420	
	14.00	52.43	52.43	840.00	24.040		2.410	
	15.00	49.00	49.00	900.00	24.030		2.400	
	16.00	46.00	46.00	960.00	24.010		2.380	
	17.00	43.35	43.35	1020.00	23.970		2.340	
	18.00	41.00	41.00	1080.00	23.860		2.230	
	19.00	38.89	38.89	1140.00	23.850		2.220	
	20.00	37.00	37.00	1200.00	23.820		2.190	

	22.00	33.73	33.73	1320.00	23.740		2.110	
	24.00	31.00	31.00	1440.00	23.768		2.138	
	26.00	28.69	28.69	1560.00	23.650		2.020	
	28.00	26.71	26.71	1680.00	23.610		1.980	
	30.00	25.00	25.00	1800.00	23.560		1.930	
	35.00	21.57	21.57	2100.00	23.542		1.912	
	40.00	19.00	19.00	2400.00	23.480		1.850	
	45.00	17.00	17.00	2700.00	23.434		1.804	
	50.00	15.40	15.40	3000.00	23.390		1.760	
	55.00	14.09	14.09	3300.00	23.360		1.730	
1	60.00	13.00	13.00	3600.00	23.310		1.680	
1.1	70.00	11.29	11.29	4200.00	23.290		1.660	
1.2	80.00	10.00	10.00	4800.00	23.250		1.620	
1.3	90.00	9.00	9.00	5400.00	23.210		1.580	
1.4	100.00	8.20	8.20	6000.00	23.160		1.530	
1.5	110.00	7.55	7.55	6600.00	23.140		1.510	
2	120.00	7.00	7.00	7200.00	23.090		1.460	
2.2	140.00	6.14	6.14	8400.00	22.940		1.310	
2.4	160.00	5.50	5.50	9600.00	22.910		1.280	
3	180.00	5.00	5.00	10800.00	22.830		1.200	
3.3	210.00	4.43	4.43	12600.00	22.720		1.090	
4	240.00	4.00	4.00	14400.00	22.500		0.870	
4.3	270.00	3.67	3.67	16200.00	22.450		0.820	
5	300.00	3.40	3.40	18000.00	22.400		0.770	
5.3	330.00	3.18	3.18	19800.00	22.370		0.740	
6	360.00	3.00	3.00	21600.00	22.340		0.710	
6.3	390.00	2.85	2.85	23400.00	22.200		0.570	
7	420.00	2.71	2.71	25200.00	22.200		0.570	
8	480.00	2.50	2.50	28800.00	22.150		0.520	
9	540.00	2.33	2.33	32400.00	22.100		0.470	
10	600.00	2.20	2.20	36000.00	22.070		0.440	
11	660.00	2.09	2.09	39600.00	22.040		0.410	
12	720.00	2.00	2.00	43200.00			-21.630	

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021



**Figura N°41:** Prueba de recuperación del pozo IRHS 37  
**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021 .

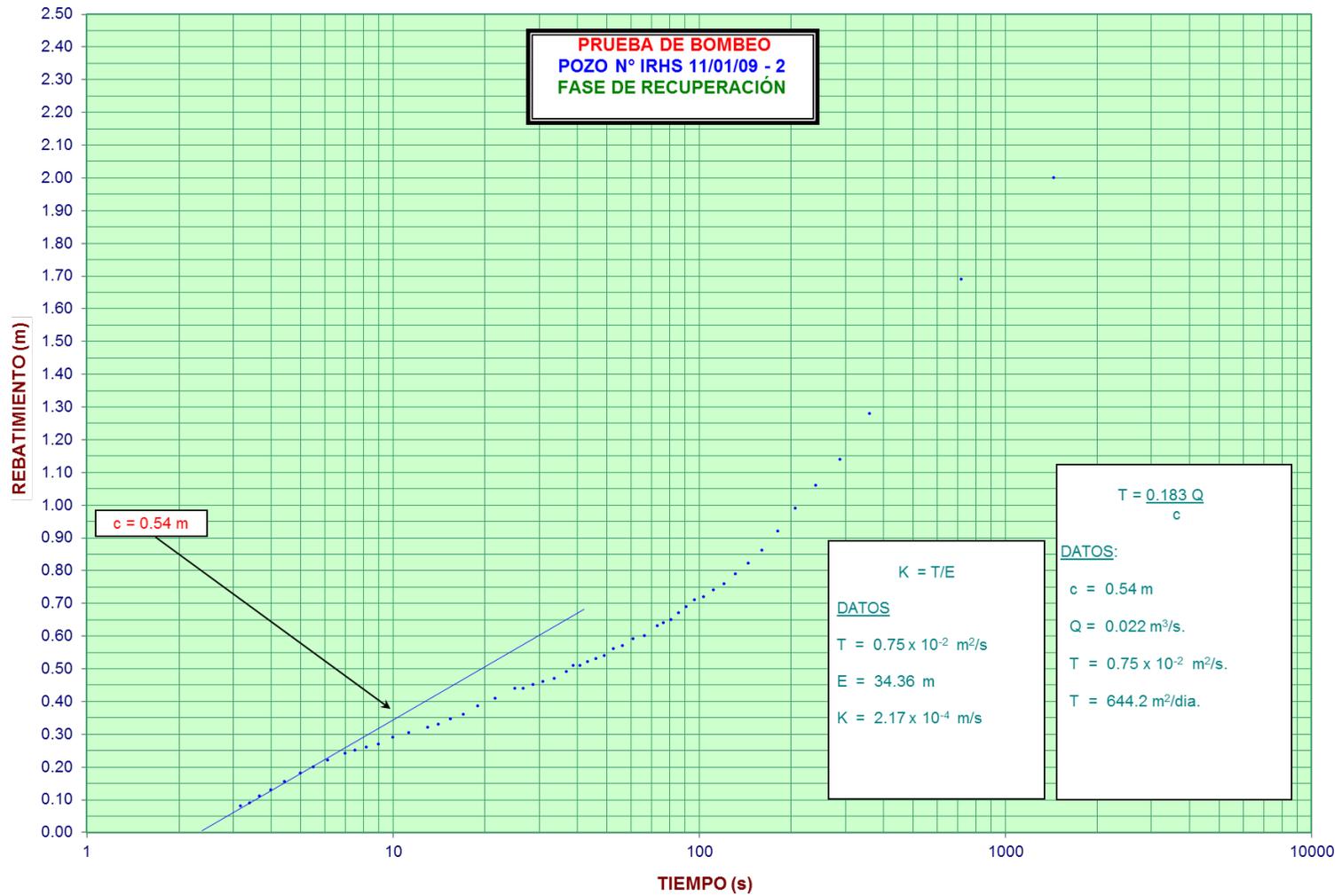
Tabla 16

Prueba de recuperación del pozo IRHS 2

PRUEBA DE RECUPERACION							
Departamento: Ica			Provincia: Ica			Distrito: Los Molinos	
Nombre del pozo : Fundo Don Ricardo				Ejecutores:			
N° IRHS:		2		Nivel Estático		23.26	
				Fecha:		10/09/2002	
TIEMPO			CAUDAL		RECUPERACION DEL NIVEL DE AGUA		
Días Horas	Min	t°/t+1	T (SEG)	Nivel		Rebatimiento	m/m3/seg
		0.00	0.00	27.470			
	1441.00	1441.00	30.00	25.260		2.000	
	721.00	721.00	60.00	24.950		1.690	
	481.00	481.00	90.00	24.700			
	361.00	361.00	120.00	24.540		1.280	
	289.00	289.00	150.00	24.400		1.140	
	241.00	241.00	180.00	24.320		1.060	
	206.71	206.71	210.00	24.250		0.990	
	181.00	181.00	240.00	24.180		0.920	
	161.00	161.00	270.00	24.121		0.861	
	145.00	145.00	300.00	24.083		0.823	
	131.91	131.91	330.00	24.050		0.790	
	121.00	121.00	360.00	24.020		0.760	
	111.77	111.77	390.00	24.000		0.740	
	103.86	103.86	420.00	23.980		0.720	
	97.00	97.00	450.00	23.970		0.710	
	91.00	91.00	480.00	23.950		0.690	
	85.71	85.71	510.00	23.930		0.670	
	81.00	81.00	540.00	23.910		0.650	
	76.79	76.79	570.00	23.900		0.640	
	73.00	73.00	600.00	23.890		0.630	
	66.45	66.45	660.00	23.860		0.600	
	61.00	61.00	720.00	23.850		0.590	
	56.38	56.38	780.00	23.830		0.570	
	52.43	52.43	840.00	23.820		0.560	
	49.00	49.00	900.00	23.800		0.540	
	46.00	46.00	960.00	23.790		0.530	
	43.35	43.35	1020.00	23.780		0.520	
	41.00	41.00	1080.00	23.770		0.510	
	38.89	38.89	1140.00	23.770		0.510	
	37.00	37.00	1200.00	23.750		0.490	
	33.73	33.73	1320.00	23.730		0.470	
	31.00	31.00	1440.00	23.720		0.460	

	28.69	28.69	1560.00	23.710		0.450	
	26.71	26.71	1680.00	23.700		0.440	
	25.00	25.00	1800.00	23.700		0.440	
	21.57	21.57	2100.00	23.670		0.410	
	19.00	19.00	2400.00	23.645		0.385	
	17.00	17.00	2700.00	23.620		0.360	
	15.40	15.40	3000.00	23.605		0.345	
	14.09	14.09	3300.00	23.590		0.330	
1	13.00	13.00	3600.00	23.580		0.320	
1.1	11.29	11.29	4200.00	23.565		0.305	
1.2	10.00	10.00	4800.00	23.550		0.290	
1.3	9.00	9.00	5400.00	23.530		0.270	
1.4	8.20	8.20	6000.00	23.520		0.260	
1.5	7.55	7.55	6600.00	23.510		0.250	
2	7.00	7.00	7200.00	23.500		0.240	
2.2	6.14	6.14	8400.00	23.480		0.220	
2.4	5.50	5.50	9600.00	23.460		0.200	
3	5.00	5.00	10800.00	23.440		0.180	
3.3	4.43	4.43	12600.00	23.415		0.155	
4	4.00	4.00	14400.00	23.390		0.130	
4.3	3.67	3.67	16200.00	23.370		0.110	
5	3.40	3.40	18000.00	23.350		0.090	
5.3	3.18	3.18	19800.00	23.340		0.080	
6	3.00	3.00	21600.00	23.320			
6.3	2.85	2.85	23400.00				
7	2.71	2.71	25200.00				
8	2.50	2.50	28800.00				
9	2.33	2.33	32400.00				
10	2.20	2.20	36000.00				
11	2.09	2.09	39600.00				
12	2.00	2.00	43200.00				

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021



**Figura N°42:** Prueba de descenso del pozo IRHS 37  
**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2021

### 4.1.3 Materiales

Para tener un mejor análisis del modelamiento del nivel freático es importante que la información tenga validez para generar un modelo real de las aguas subterráneas, para este análisis se recurrió a la data de los pozos, pruebas de bombeo, topografía del terreno y precipitaciones.

## 4.2. Diseño con el software MODFLOW

### 4.2.1 Creación del área de trabajo

El procedimiento del presente proyecto de investigación se compone de los siguientes pasos:

- a) Se realizó la recopilación de información de las instituciones públicas ya mencionadas a través de una carta para poder obtener el permiso correspondiente para la obtención de información sobre las características técnicas, mediciones y volúmenes de explotación de los pozos.



**Figura N°43:** Carta N°509-2020-ANA  
**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2020

b) Con la información de las coordenadas ( x e y) y con el programa Google Earth se añadió la ubicación de cada pozo para obtener el área de trabajo debido a la importancia de la definición de los márgenes (superior izquierdo y derecho e inferior izquierdo y derecho). Además de su elevación , área y el perímetro.

**Tabla 17:**  
Creación de condiciones de pozos

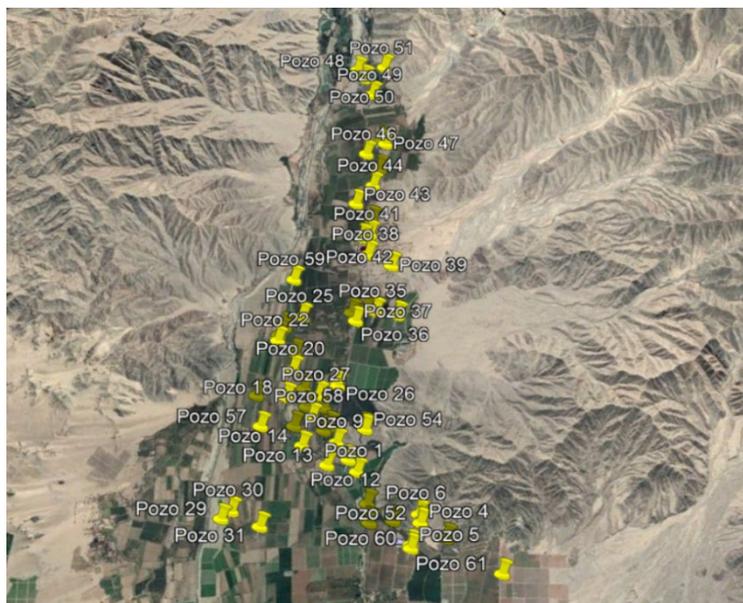
Pozos	X	Y	Cotas
1	8455828	425215	471.00
2	8454960	424948	448.00
3	8454753	425333	468.00
4	8454502	425738	469.00
5	8454231	425390	461.00
6	8454624	425774	490.00
7	8454021	425973	469.00
8	8456468	425721	467.00
9	8456468	425165	466.00
10	8456779	425072	482.00
11	8456803	425195	472.00
12	8456096	425192	434.00
13	8456201	424817	640.00
14	8456728	424611	450.00
15	8457115	424660	453.00
16	8457323	425022	467.00
17	8457644	425141	481.00
18	8457659	424794	438.00
19	8457951	424350	480.00
20	8458055	425144	483.00
21	8458304	425310	484.00
22	8458677	425166	486.00
23	8458762	425229	485.00
24	8458840	425395	485.00
25	8458860	425764	485.00
26	8457390	425686	473.00

27	8457398	425310	480.00
28	8457112	425016	450.00
29	8456274	422767	455.00
30	8456305	422981	456.00
31	8455815	423285	438.00
32	8461220	428726	530.00
33	8457150	425279	477.00
34	8458399	426818	502.00
35	8458280	426954	489.00
36	8458016	427265	525.00
37	8458300	426561	490.00
38	8459316	427385	538.00
39	8458909	427643	533.00
40	8459880	427771	538.00
41	8459654	427604	533.00
42	8459660	727447	542.00
43	8460318	427687	542.00
44	8460480	428138	549.00
45	8460715	428404	540.00
46	8461112	428348	549.00
47	8461112	428755	558.00
48	8462742	429059	563.00
49	8462142	429048	561.00
50	8462512	429083	561.00
51	8462530	429525	576.00
52	8454478	425724	468.00
53	8455238	425090	472.00
54	8456428	425716	463.00
55	8454923	424960	458.00
56	8458478	426573	499.00
57	8457410	424146	480.00
58	8457106	425009	463.00
59	8459570	425978	479.00

60	8454175	425357	461.00
61	8453008	426491	461.00

Elaborado por: el autor

Después de obtener las cotas y las elevaciones se dirigió al programa Google Earth para verificar si los pozos se encuentran en San José de los Molinos.



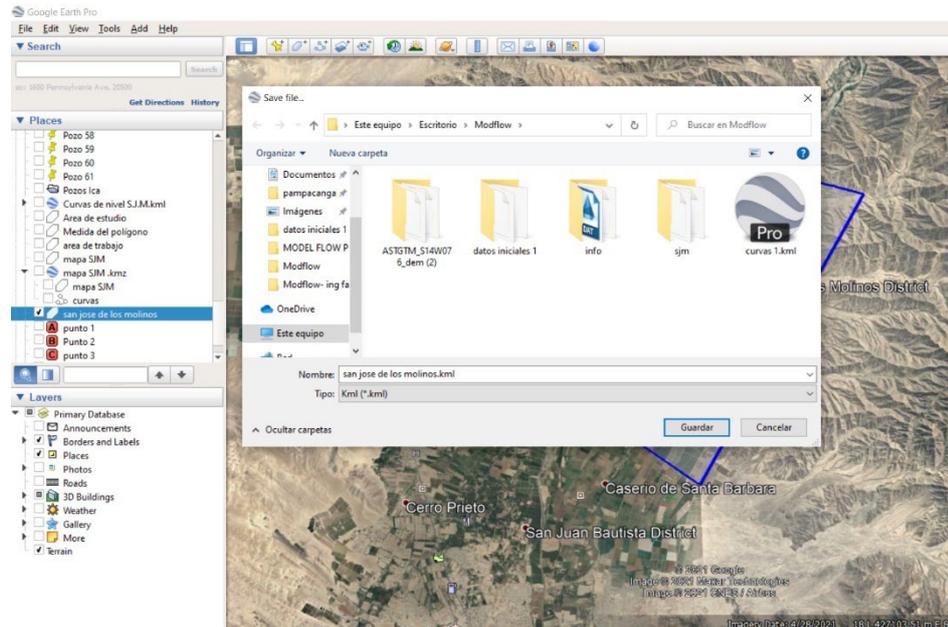
**Figura N°44:** Ubicación de los 61 pozos  
Fuente: Google Earth, 2020

c) Para definir el área de trabajo se creó un polígono usando cuatro puntos para poder encerrar el área (Figura 45), después se guardó un archivo kml con toda la información de la ubicación de los pozos usado en el programa Google Earth (Figura 46).



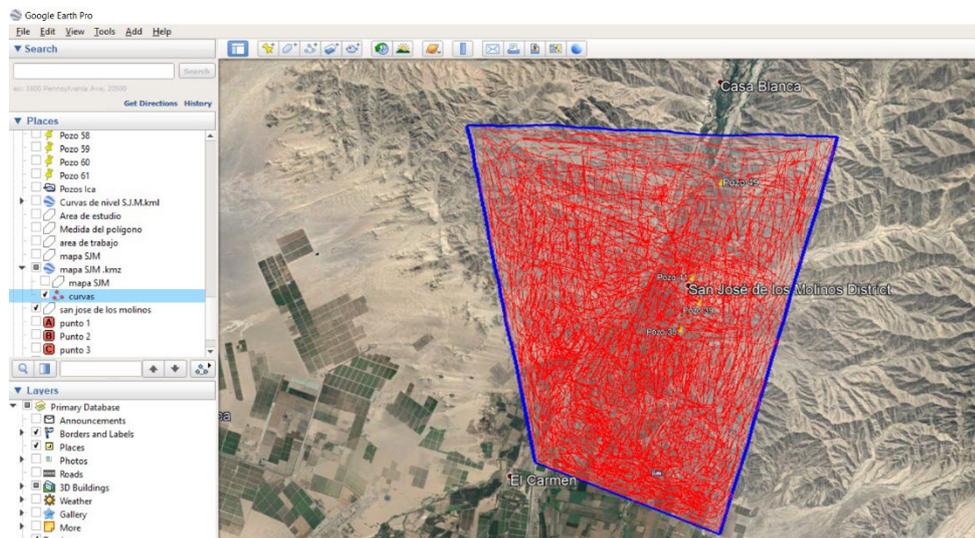
**Figura N°45:** Delimitación del área de trabajo

Fuente: Google Earth, 2020



**Figura N°46:** Polígono en formato Kml  
Fuente: Google Earth, 2020

En el programa Google Earth se creó una ruta a través de puntos que van a estar en todo el polígono, a mayor cantidad de puntos se va a obtener con mayor exactitud las curvas de nivel.



**Figura N°47:** Puntos para las curvas de nivel  
Fuente: Google Earth, 2020

d) Se guardó la ruta que se creó para poder convertirlo en una página que lleva como nombre GPS visualizar debido a que, si se lleva los puntos directamente al programa ArcGIS, no se puede obtener las elevaciones. El GPS visualizar permite transformar el archivo de Kml a GPX file para tener la ubicación y las elevaciones dentro del área de trabajo.

GPS Visualizer's [map](#), [profile](#), and [conversion](#) programs have the ability to instantly add elevation data — from a DEM (digital elevation model) database — to any type of GPS file. If you just want to draw a profile, or convert a single data file to plain text or GPX while adding elevation, you can use the simple form right here:

Upload a file:  Ningún arch... seleccionado  -or-   
 Or provide a URL:  Output:  -or- Units:

Or, look in GPS Visualizer's various input forms for the menu "Add DEM elevation data," and choose one of the elevation databases (described in the table below). Complete copies of the SRTM3 and USGS NED databases, as well as a large number of SRTM1 and ASTER tiles, are stored on GPS Visualizer's server — that's more than 250GB of raw data.

Note that the elevation-adding feature will *erase* any existing altitude data (for example, from a GPS) that might already be in your file. Often, this is desirable; profiles made with DEM data are usually "smoother" looking than GPS, and typically contain fewer gaps or suspicious readings. (Speaking of gaps, there are a few in NASA's SRTM data, and that's unavoidable. If GPS Visualizer runs into one of these, it will not overwrite those elevations in your input data.)



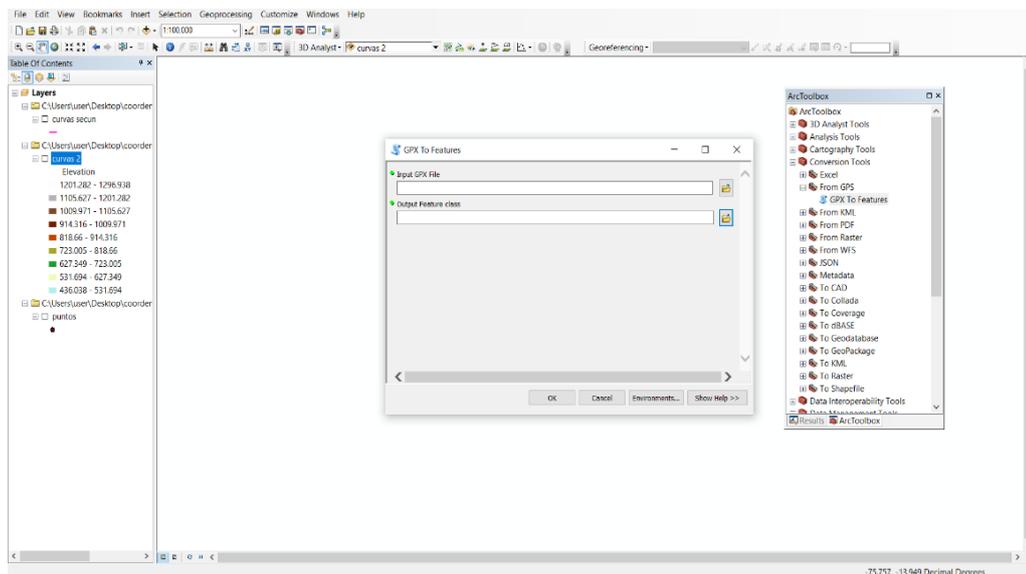
[\(Click for more DEM coverage maps\)](#)

**DEM data sources**

<b>NED (USGS)</b>	The U.S. Geological Survey's excellent <a href="#">National Elevation Dataset</a> covers the <b>United States, Canada, and Mexico</b> . 1 arc-second (~30-meter) horizontal resolution is available in most areas (NED1). For Alaska, 60-meter data is also available (NED2).
<b>SRTM1 (NASA)</b>	NASA's SRTM1 database (from the <a href="#">Space Shuttle Radar Topography Mission</a> ) has a resolution of about 30 meters. Previously, SRTM1 data was only available for the United States (and was not very useful because NED1 is generally better), but recently NASA has released SRTM1 tiles for the <i>entire world</i> . GPS Visualizer's server does not contain the <i>full</i> global dataset, but it does contain <b>all of Europe, Central America, Japan, South Korea, Taiwan, and New Zealand</b> , as well as most of <b>Australia</b> and parts of <b>South Africa</b> . Additional locations may be installed upon request.
<b>ODP1</b>	Digital 1-arcsecond LIDAR terrain models of European countries, compiled and resampled by Sonny ( <a href="mailto:sonny7@gmail.com">sonny7@gmail.com</a> ); hosted by Austria's <a href="#">OpenDataPortal</a> . These are high-quality digital elevation files from <b>Western, Northern, and Central Europe</b> and <b>Iceland</b> which have been copied to GPS Visualizer's server. Most of the files are a combination of SRTM1 and local LIDAR and/or survey data, and they have a horizontal resolution of 1 arc-second (about 30 meters north-south and 20 meters east-west). In most locations, they are <a href="#">more accurate</a> than SRTM1 files.
<b>ASTER</b>	The <a href="#">ASTER GDEM</a> is a joint product of NASA and the Japanese Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI). ASTER has very good 30-meter coverage of the entire world, but the awkward download process and the massive size of the database make it impractical to store all of it on GPSVisualizer.com. (As with SRTM1 data, additional files can be added upon request.)
<b>SRTM3 (NASA)</b>	NASA's <a href="#">SRTM3 v3 dataset</a> includes 90-meter resolution for <b>the entire world</b> . SRTM3 data normally only goes up to about 60° latitude, but thanks to the efforts of the volunteers at <a href="#">Viewfinder Panoramas</a> , GPS Visualizer has the polar regions covered as well.

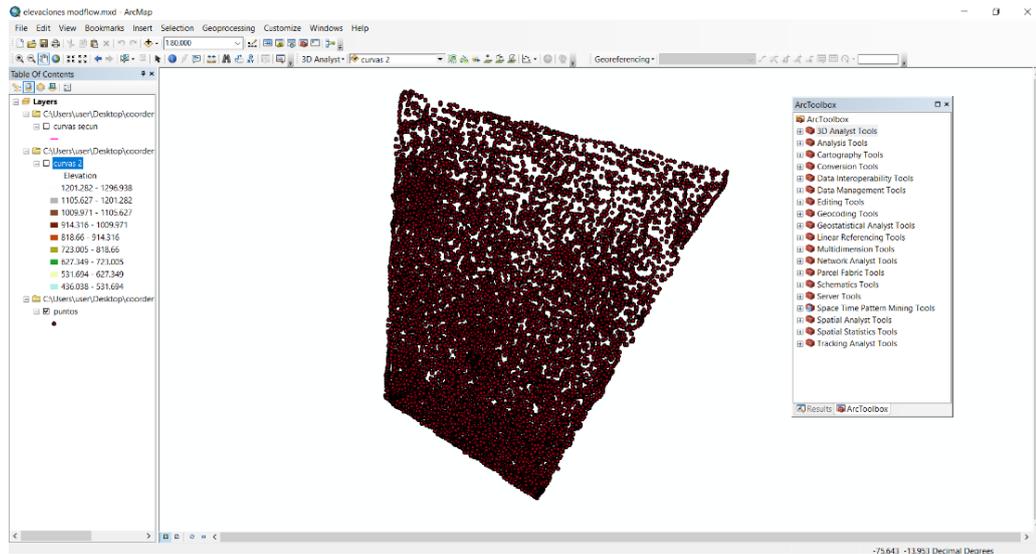
**Figura N°48: Transformar el archivo de Kml a GPX file**  
**Fuente: Google Earth, 2020**

El programa ArcGIS se posicionó en la opción ArcToolbox- Conversion tools para que el formato GPX file pueda ser abierto.

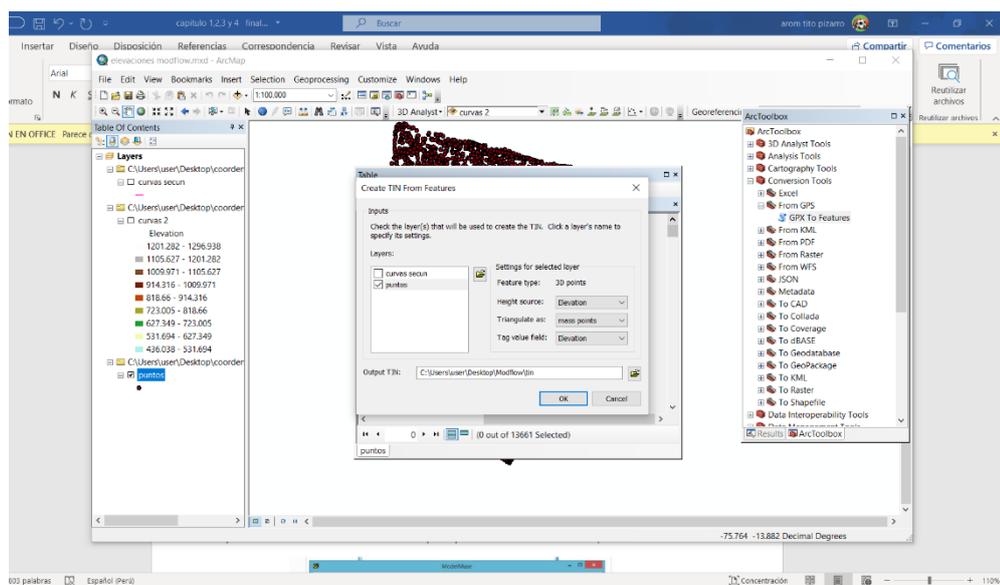


**Figura N°49: Formato GPX em ArcGIS**  
**Fuente: Google Earth, 2020**

Se cargó el formato GPX file, se guardó en la misma carpeta y se abrió con las elevaciones correspondientes.

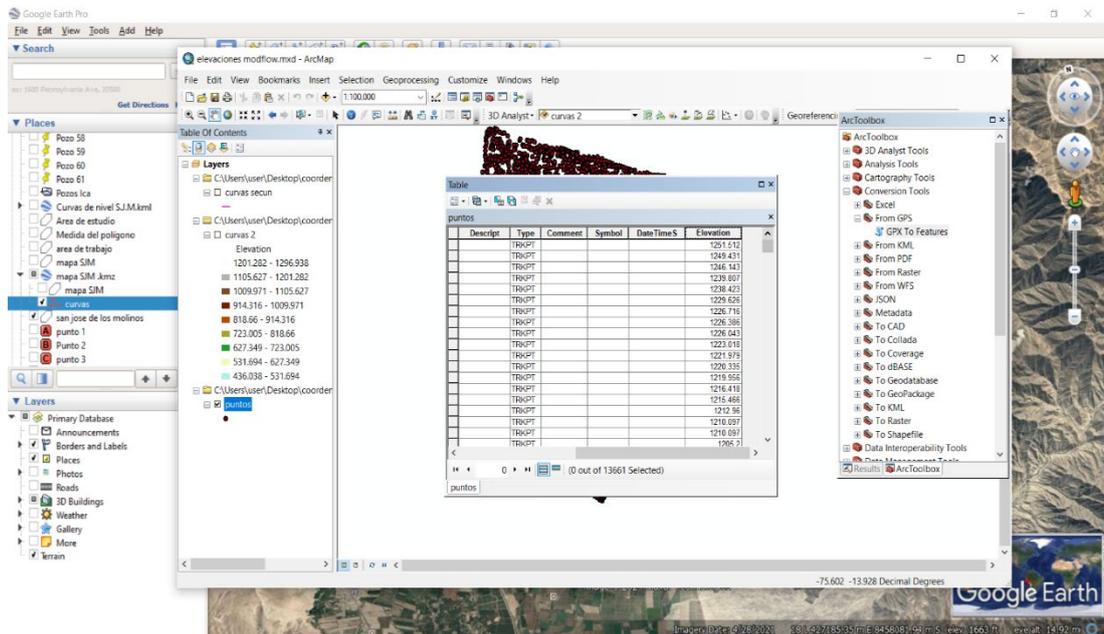


**Figura N°50: Exportación de puntos**  
Fuente: ArcGIS, 2020



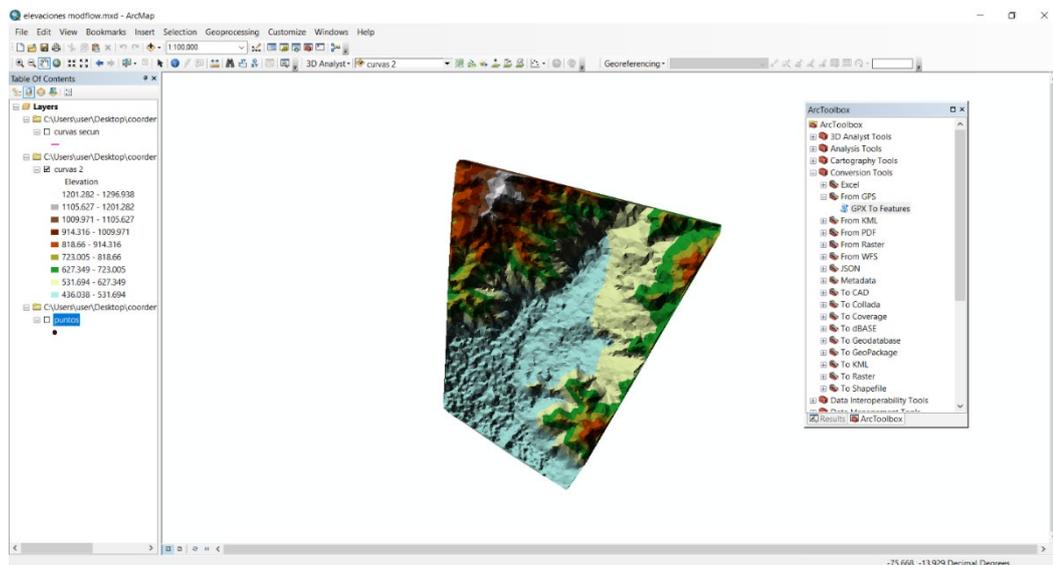
**Figura N°51: Elevación de los puntos**  
Fuente: ArcGIS, 2020

Para generar las curvas de nivel se creó un TIN y se eligieron las cotas que fueron creadas, para generar las elevaciones correspondientes por cada cota (Figura 52).



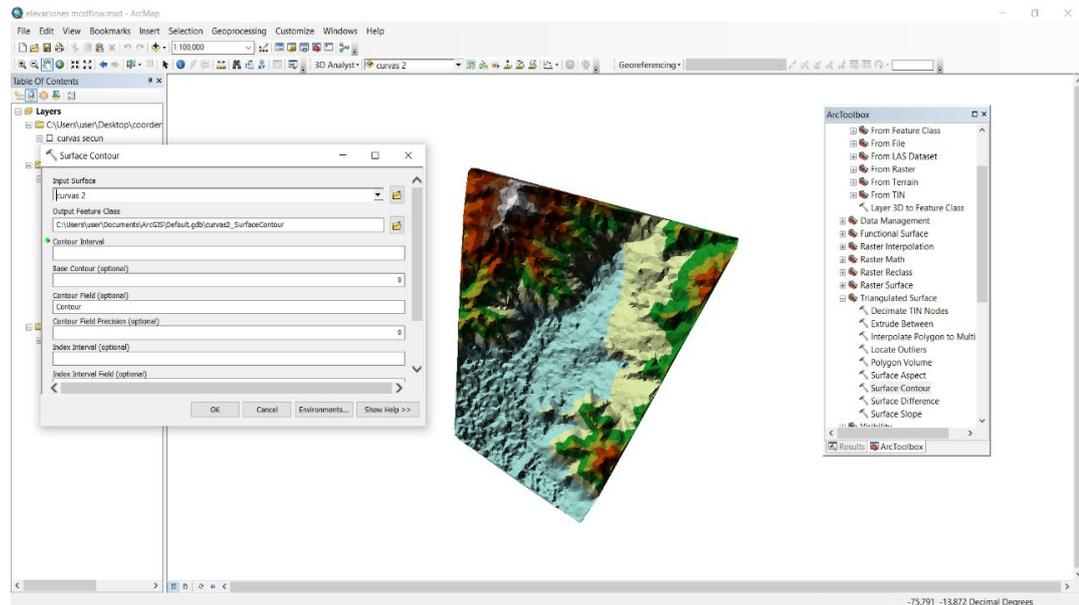
**Figura N°52:** Creación de los niveles  
Fuente: ArcGIS, 2020

Se genera el TIN que se creó para después de obtener las curvas de nivel que requiere en el programa MODFLOW. (Figura 53).

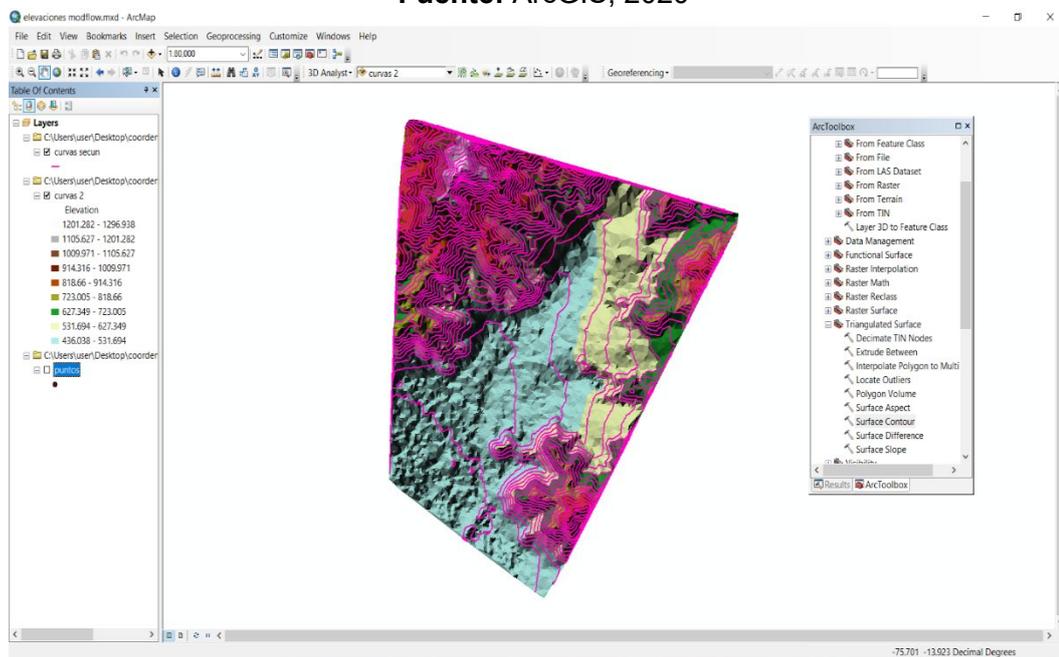


**Figura N°53:** Imagen de elevaciones  
Fuente: ArcGIS, 2020

Para generar las curvas de nivel se seleccionó la opción 3D Analyst Tools – Triangulated Surface- Surface contour, luego se seleccionó el TIN fue creado (Figura 54 y 55) y posteriormente se guardó en la misma carpeta con un intervalo de 30 metros.

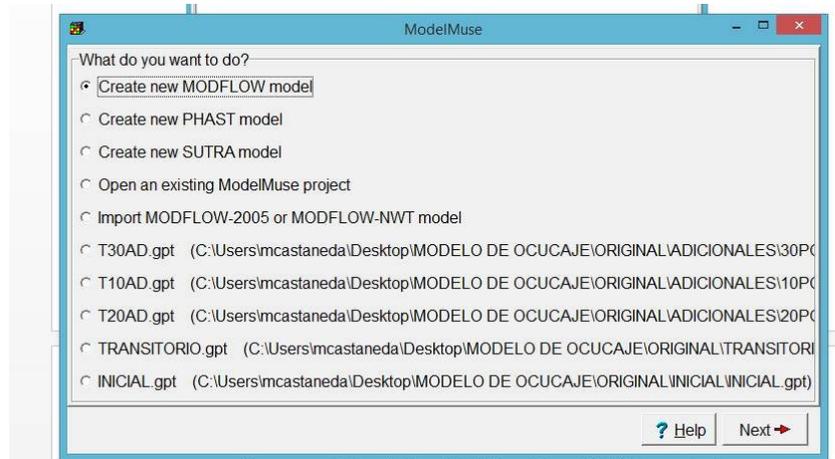


**Figura N°54: Generar curvas de nivel**  
Fuente: ArcGIS, 2020



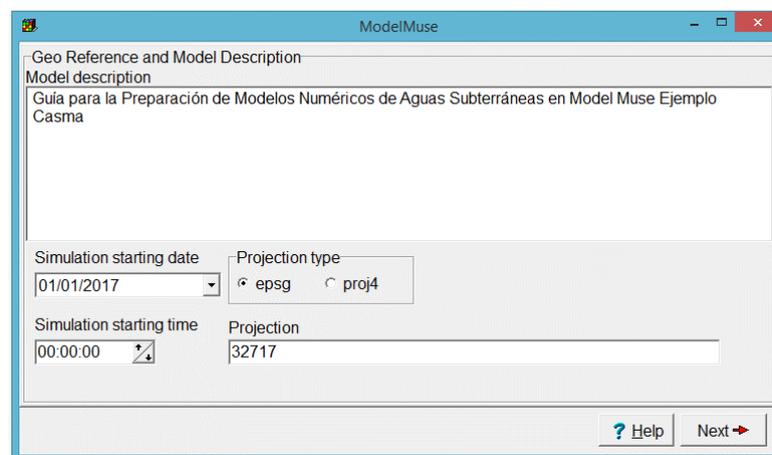
**Figura N°55: Curvas de Nivel**  
Fuente: ArcGIS, 2020

- e) Al momento de abrir el programa MODFLOW, se abrió la interfaz del model muse para que exista una interacción al momento de realizar el modelado hidrogeológico que se pretende. Se creo un nuevo modelo para poder introducir los datos posteriormente.



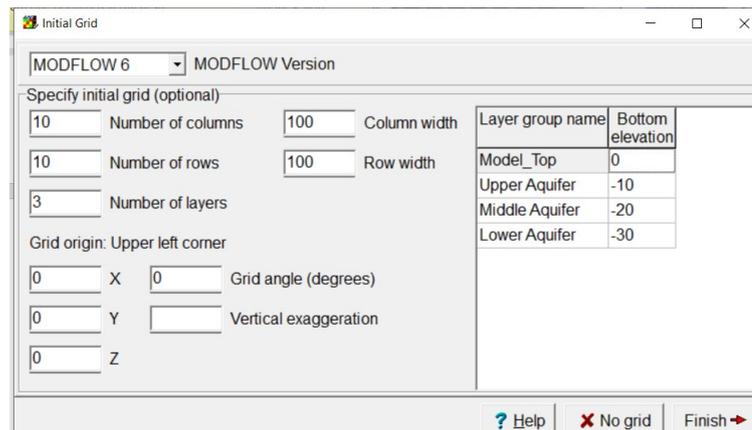
**Figura N°56: Creación del modelo MODFLOW**  
Elaborado por: el autor

- f) Se configuró inicialmente el Modelo, describiéndolo, estableciendo fechas de inicio de la simulación, la hora, el tipo de proyección (seleccionar epsg por defecto) y la zona.



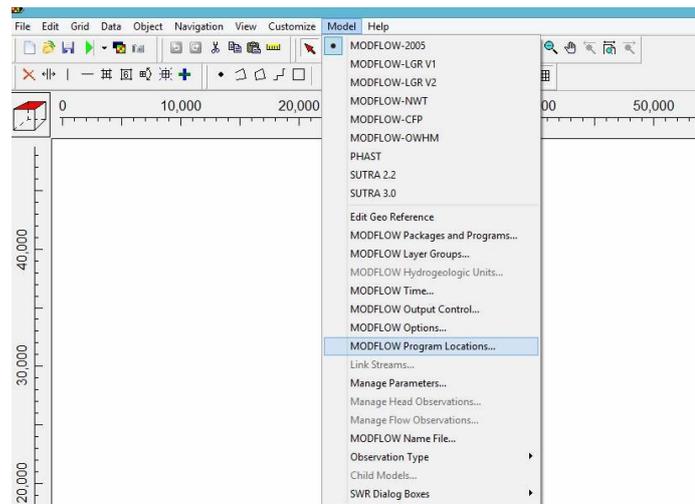
**Figura N°57: Configuración del Modelo MODFLOW**  
Elaborado por: el autor

Se entró a la configuración de las mallas y se seleccionó la opción No Grid (sin grilla preestablecida), incluyendo las coordenadas, el número de capas ,de columnas, filas, los anchos y las elevaciones.



**Figura N°58:** Configuración del Modelo MODFLOW  
Elaborado por: el autor

- g) Una vez abierto el programa se realizó la activación de los Paquetes de MODFLOW, para ello se seleccionó la opción Model/MODFLOW program location (localización de programas) y se descargaron las opciones que se van a usar: MODFLOW-2005, MODFLOW- LGR, MODFLOW-NWT, Zone budget y MT3DMS.

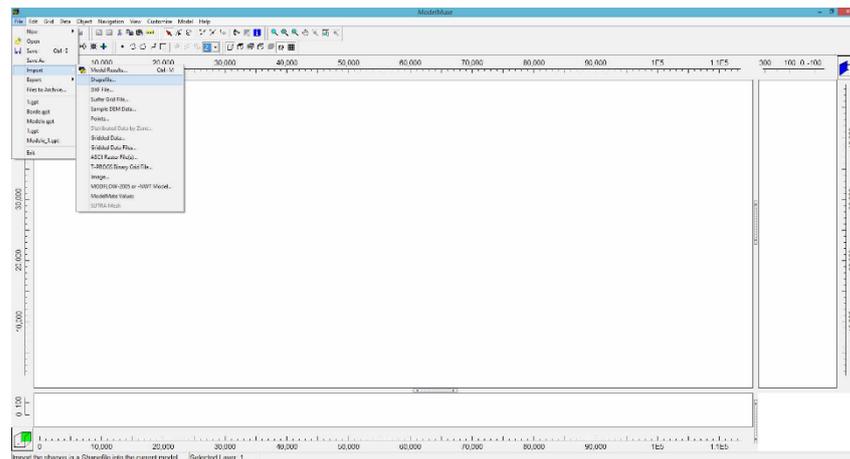


**Figura N°59:** Paquetes del MODFLOW  
Elaborado por: el autor

- h) Luego que se instaló estos programas se procede a llamar a la base datos que fue preparada en distintos formatos que son reconocidos por el programa y se generó primero el modelo.

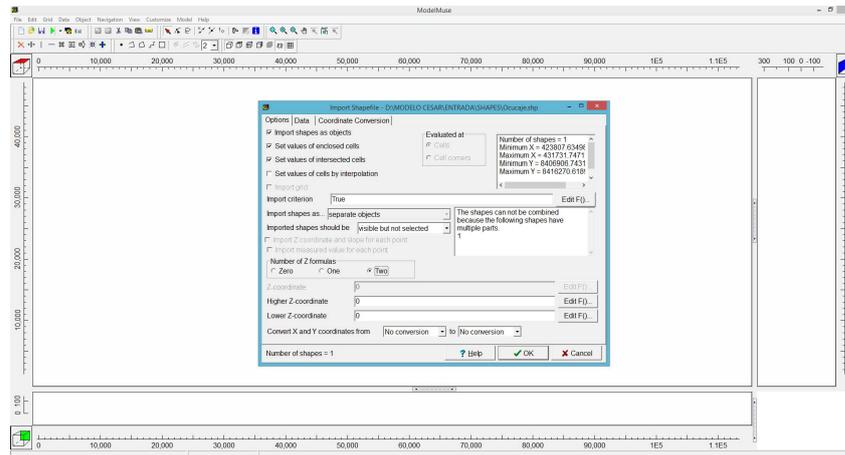
#### 4.2.2 Asignación de datos

- a) Se importó la capa que limita el modelo que se quiere ejecutar (borde.shp).



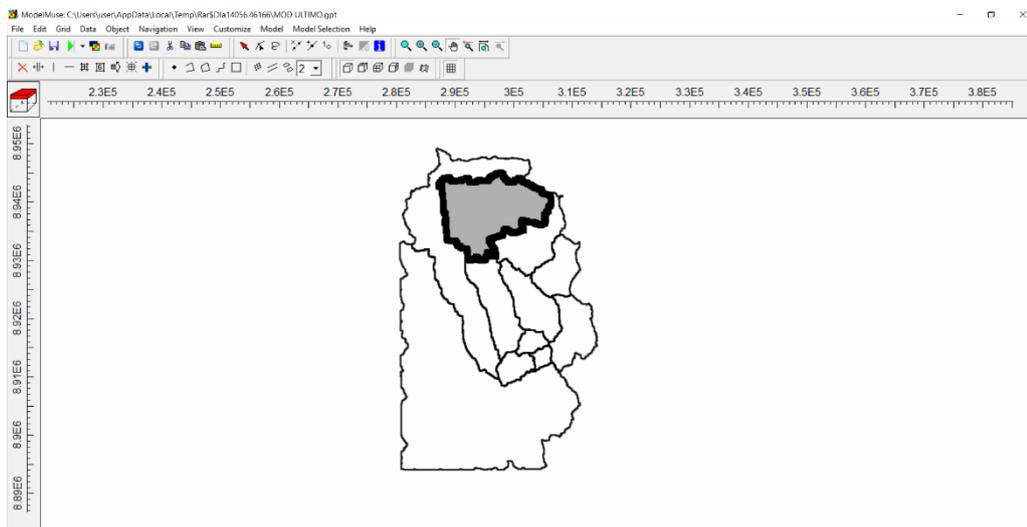
**Figura N°60: Importación del borde del área de trabajo**  
Elaborado por: el autor

- b) Se seleccionó los dominios y alcances de la capa de entrada del borde y se definió que celdas van a estar activas y cuáles no.



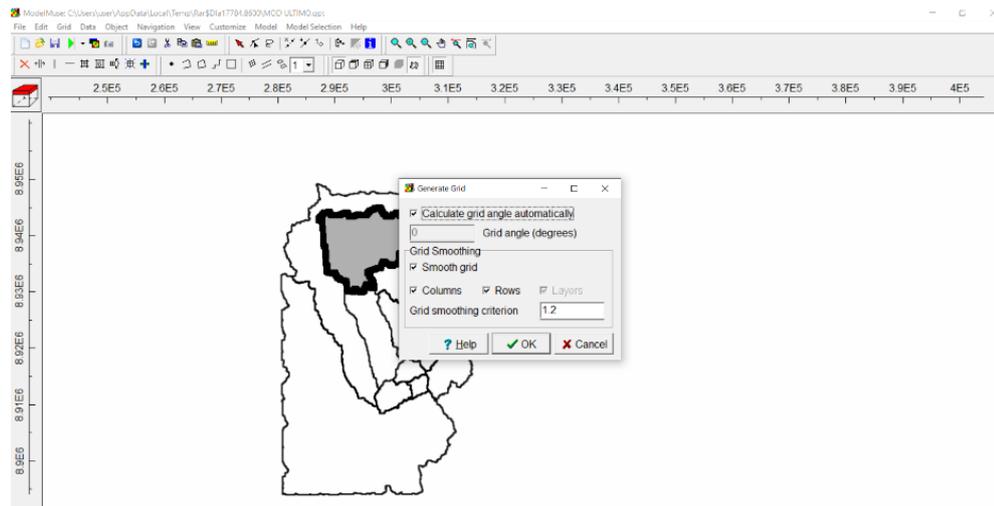
**Figura N°61: Definición de celdas**  
Elaborado por: el autor

- c) Se seleccionó la opción mostrar objetos para que aparezca el borde del área de trabajo

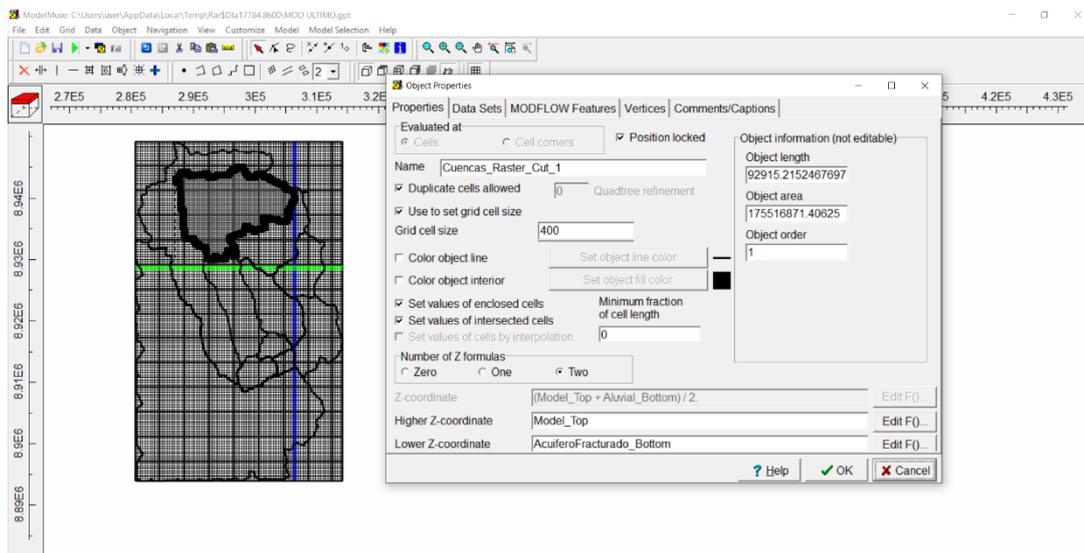


**Figura N°62: Borde del acuífero  
Elaborado por: el autor**

- d) Se seleccionó el borde, luego el tamaño conveniente a las celdas (son rectangulares) posteriormente se determinó la parte superior e inferior del borde que se está trabajando y se generó la grilla con un grado de inclinación de 0.

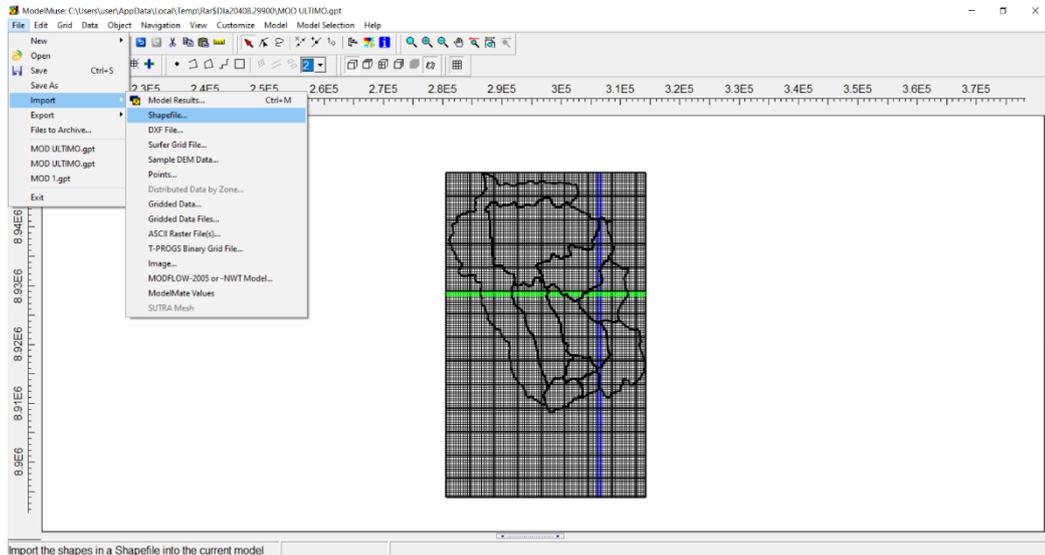


**Figura N°63: Generación de celdas  
Elaborado por: el autor**

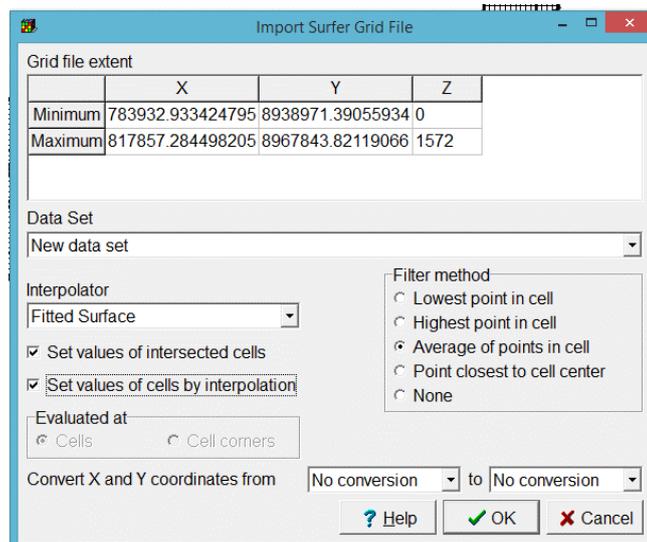


**Figura N°64: Activación de celdas  
Elaborado por: el autor**

e) Se realizó la discretización espacialmente, las elevaciones y la conductividad hidráulica, (Shp, Excel o GRD), para el caso del modelo y se importó los archivos GRD para las elevaciones.

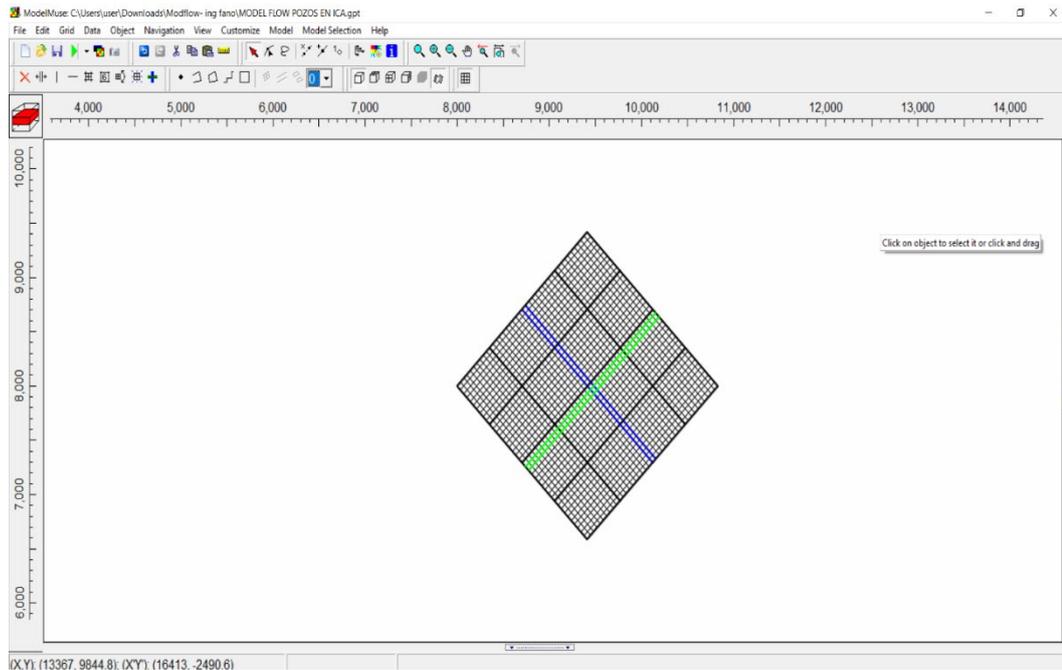


**Figura N°65: Discretización del área de trabajo**  
Elaborado por: el autor



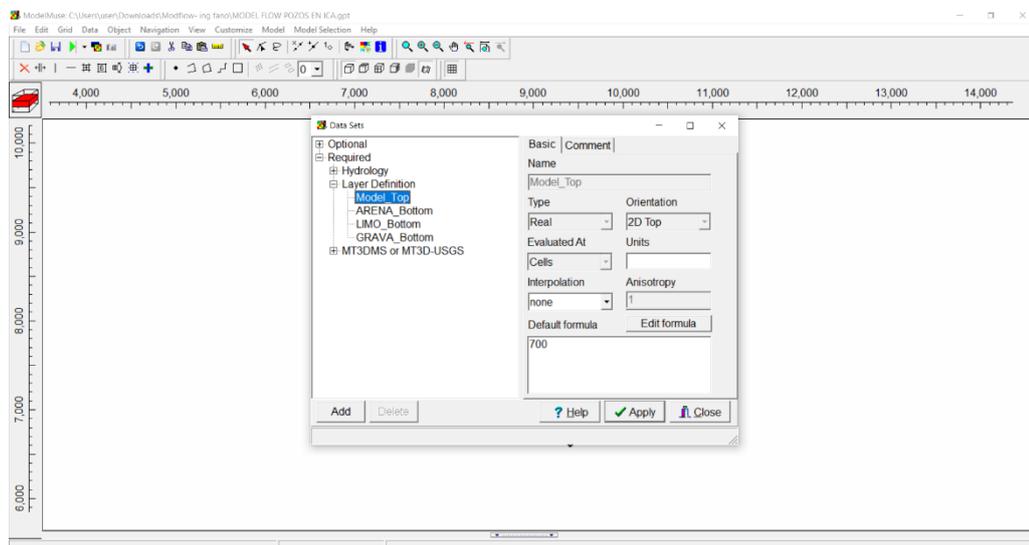
**Figura N°66: Importación de las elevaciones**  
Elaborado por: el autor

Se cortó la parte que se quiere trabajar a través de la opción `cut_raster` y se obtuvo el acuífero estudiado (Figura 67).



**Figura N°67: Acuífero de San José de los Molinos**  
**Elaborado por: el autor**

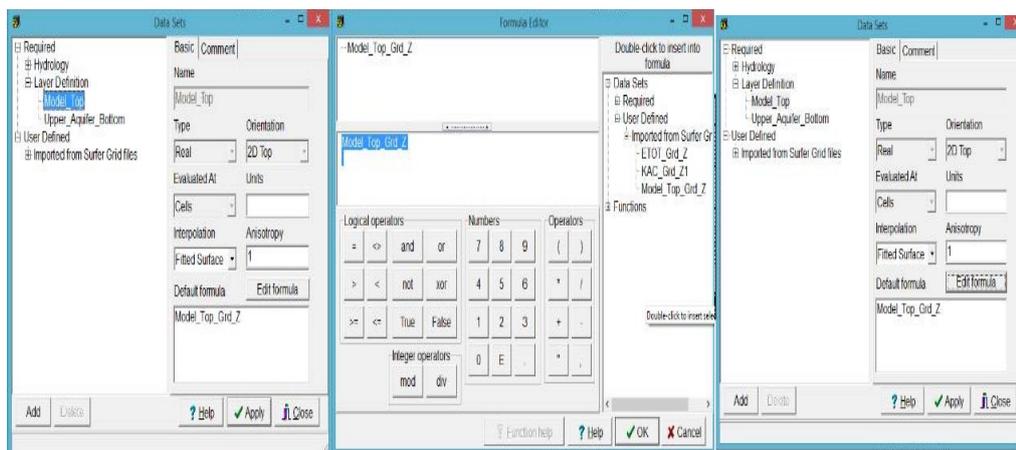
f) Se ingresó a la opción Data sets para poder definir las celdas y la altura. Como referencia se tiene la capa Model\_top que indica la cota más alta del modelo, luego las capas como la arena, limo y grava van a estar a menores profundidades.



**Figura N°68: Introducción de datos de las capas**  
**Elaborado por: el autor**

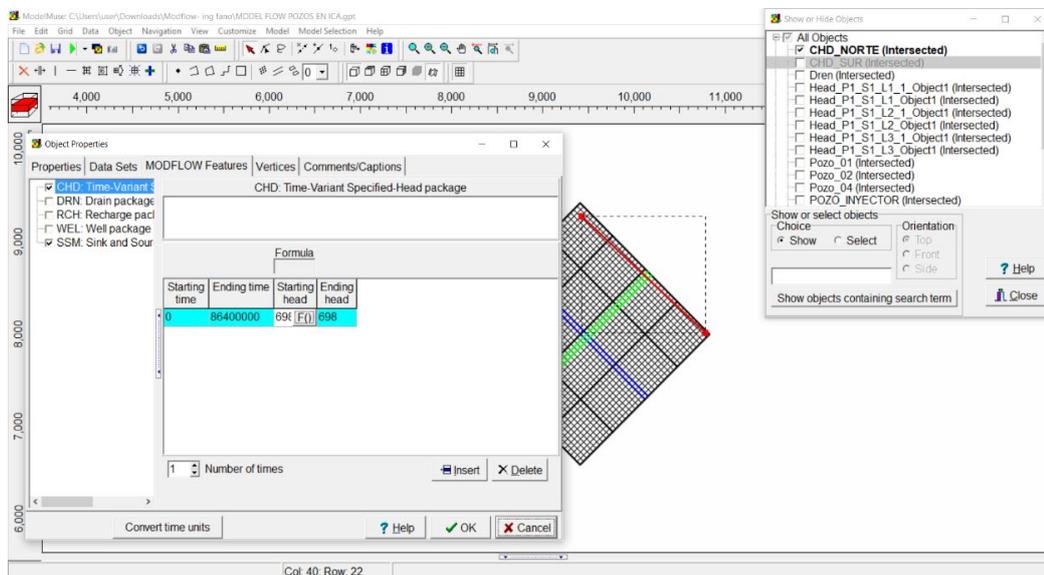
g) Para la Superficie, en el Menú Required lo concerniente al Model\_Top, se buscó la opción Edit Formula, luego se seleccionó los archivos importados

(Model\_Top para Superficie) y posteriormente ok, por último, se seleccionó Fitted Surface y se aplicó.



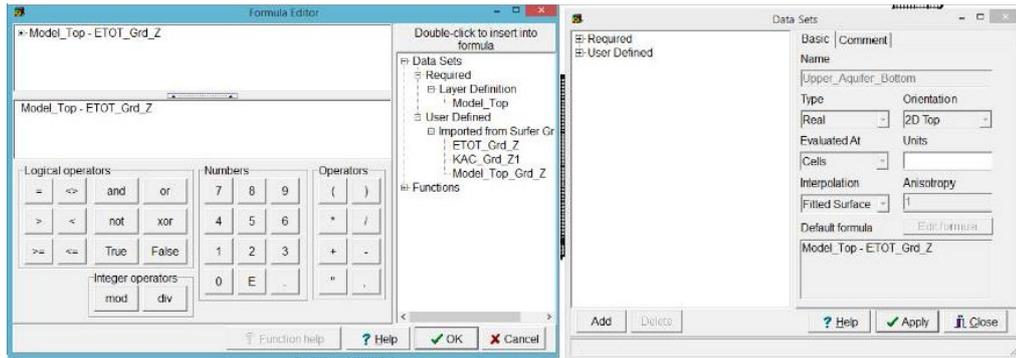
**Figura N°69: Creación de la superficie superior**  
Elaborado por: el autor

Al crear el borde superior se obtuvo una línea que indica el límite en esa parte, luego se seleccionó las propiedades de ese límite creado y se simuló en 86400000 segundos que equivalen a 1000 días o 2.73 años.



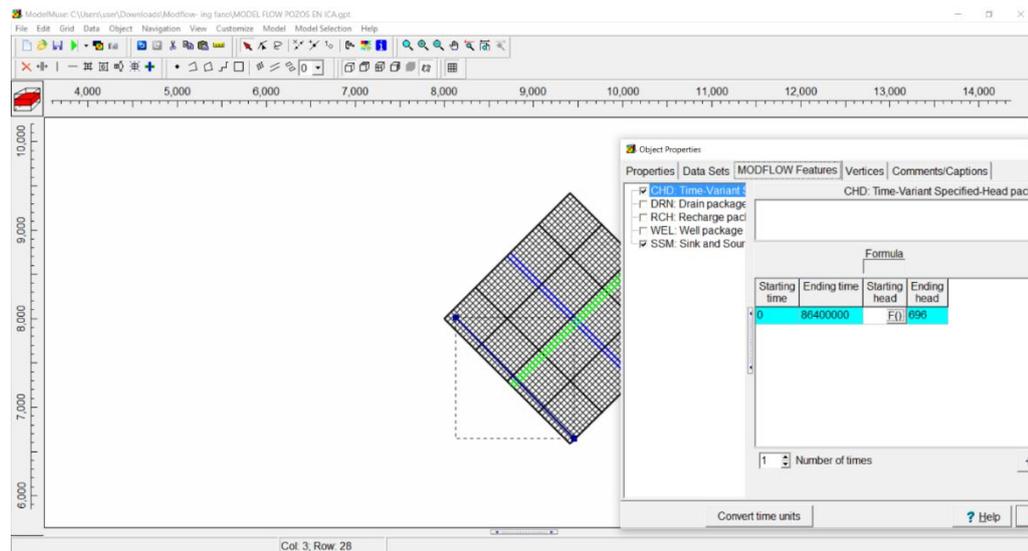
**Figura N°70: Creación de la superficie superior**  
Elaborado por: el autor

h) Se creó la superficie inferior o basamento, ésta fue creada en base a los espesores inferidos de la geofísica.



**Figura N°71: Creación de la superficie inferior**  
**Elaborado por: el autor**

Al crear el borde inferior se obtuvo una línea la cual indica el límite en esa parte, luego seleccionó las propiedades de ese límite creado y la simulación fue en 86400000 segundos que equivalen a 1000 días.

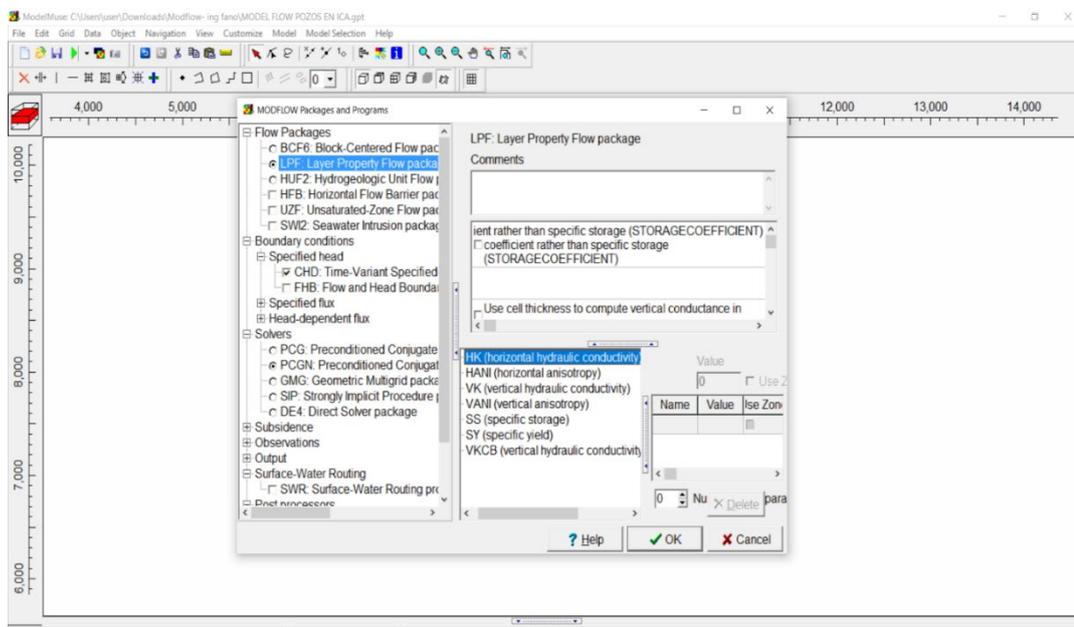


**Figura N°72: Creación de la superficie inferior**  
**Elaborado por: el autor**

Se importaron las condiciones de borde y se activaron los paquetes de acuerdo con la conceptualización.

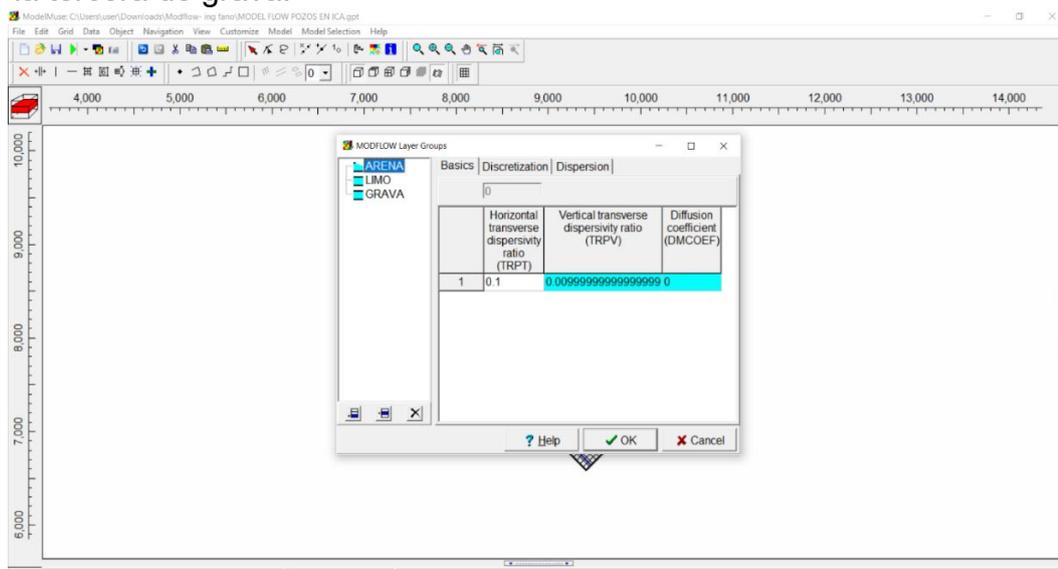
Se seleccionó la opción Model, luego MODFLOW Packages and Programs, donde se cargaron las condiciones de borde iniciales, así como los paquetes.

En este paso se colocó la conductividad hidráulica horizontal y vertical, el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad y se seleccionó el método de resolución de gradiente conjugado preconditionado con control no lineal mejorado para obtener la explotación que existe en el acuífero.



**Figura N°73:** Introducción de las propiedades del acuífero  
Elaborado por: el autor

El acuífero que se trabajó presenta tres capas, las cuales se creó en los grupos de capas, estas son: la primera capa Arena, la segunda de limo y la tercera de grava.



**Figura N°74:** Capas del acuífero  
Elaborado por: el autor

i) Se ingresó la introducción de pozos al programa MODFLOW previa validación en la recolección de datos que brindó la Autoridad Nacional del Agua.

Se realizó una visita a los pozos que se tomaron como muestra para poder corroborar los datos obtenidos.



**Figura N°75:** Plaza de armas de San José de los Molinos .  
**Elaborado por: el autor**



**Figura N°76:** Municipalidad de San José de los molinos  
**Elaborado por: el autor**

- Pozo 35



**Figura N°77: Fachada del pozo IRHS 35**  
**Elaborado por: el autor**



**Figura N°78: Verificación de datos del pozo IRHS 35**  
**Elaborado por: el autor**

- Pozo 39



**Figura N°79:** Fachada del pozo IRHS 39  
**Elaborado por:** el autor



**Figura N°80:** Verificación de datos del pozo IRHS 39  
**Elaborado por:** el autor

- Pozo 41



**Figura N°81: Pozo estacionario IRHS 41**  
**Elaborado por: el autor**

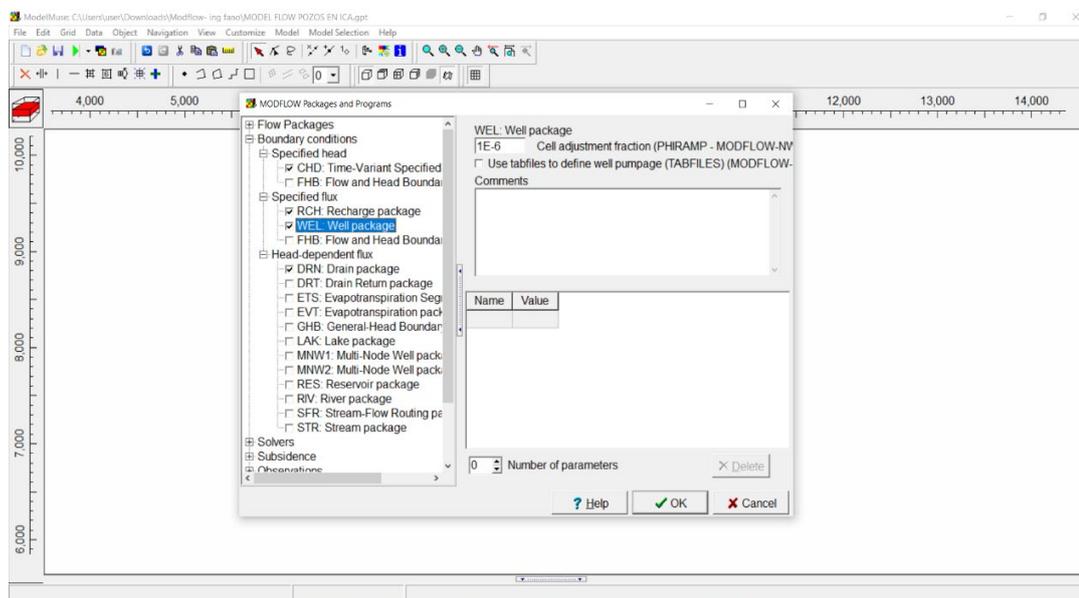
- Pozo 49



**Figura N°82: Localización antigua del Pozo IRHS 49**  
**Elaborado por: el autor**

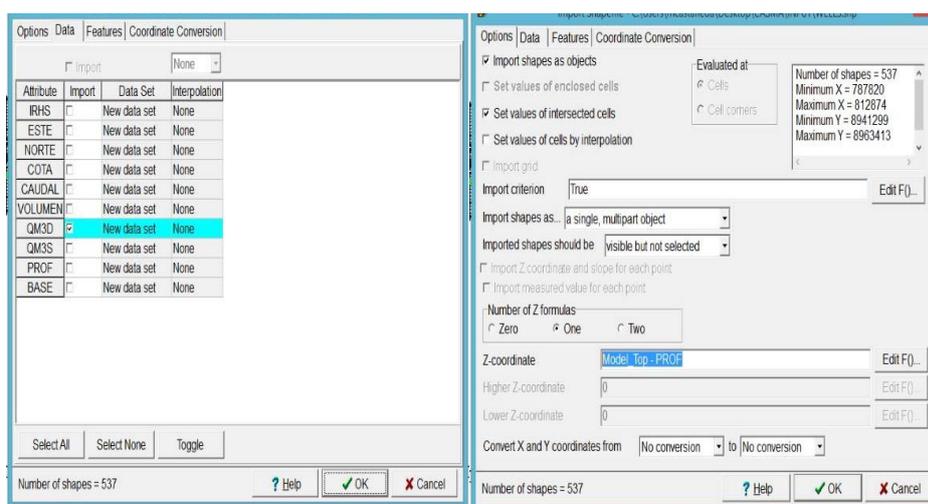
### 4.2.3 Introducción de pozos profundos

Se activo los pozos y se exporto mediante la opción Packages and programas y marco la opción WELL: Wells package.



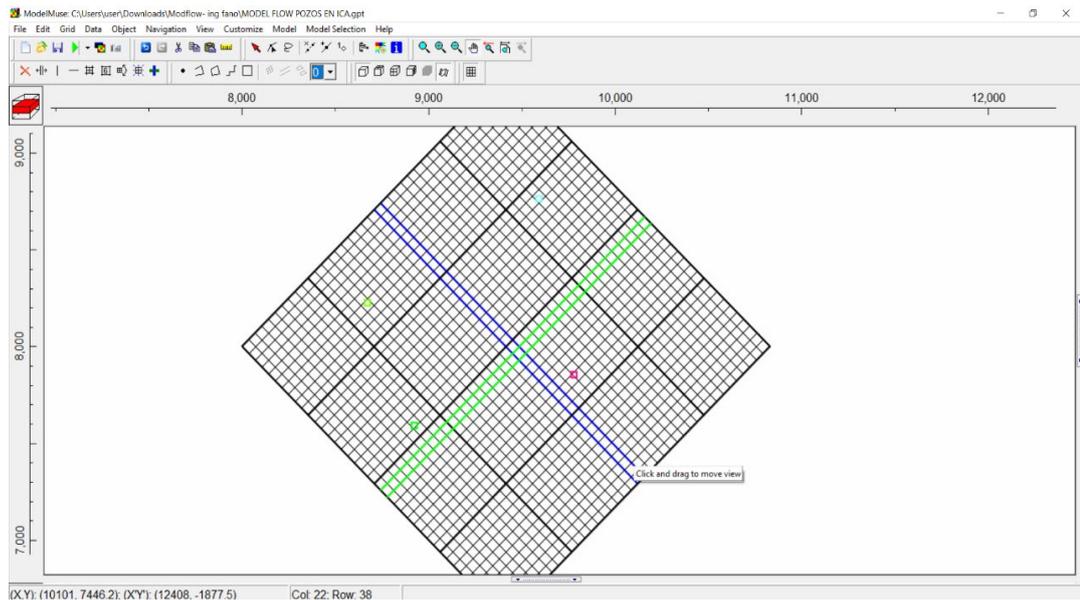
**Figura N°83: Activación de pozos**  
Elaborado por: el autor

a) Luego se importó la condición de borde de los pozos, siempre es necesario contar con datos en la base de datos (pozos), relacionados a la extracción para representar en el modelo, posteriormente se importó la capa Shape denominada WELL.



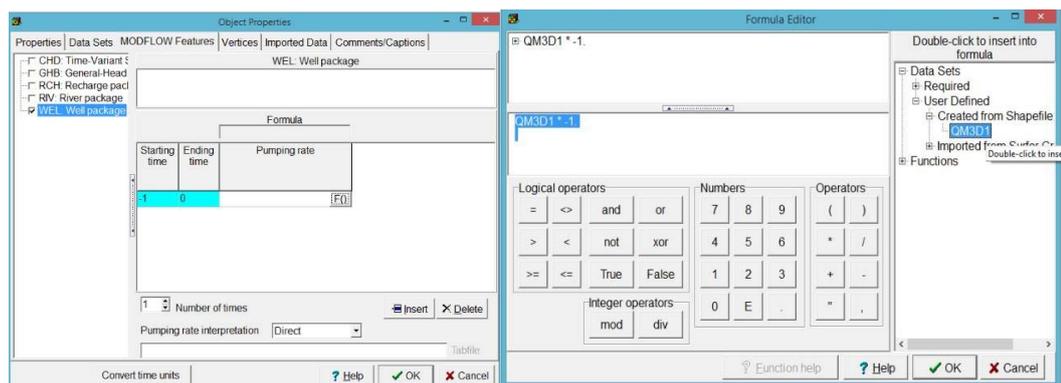
**Figura N°84: Creación de condiciones de pozos**  
Elaborado por: el autor

Se activó los cuatro pozos que se colocaron, previa observación y verificación en campo.



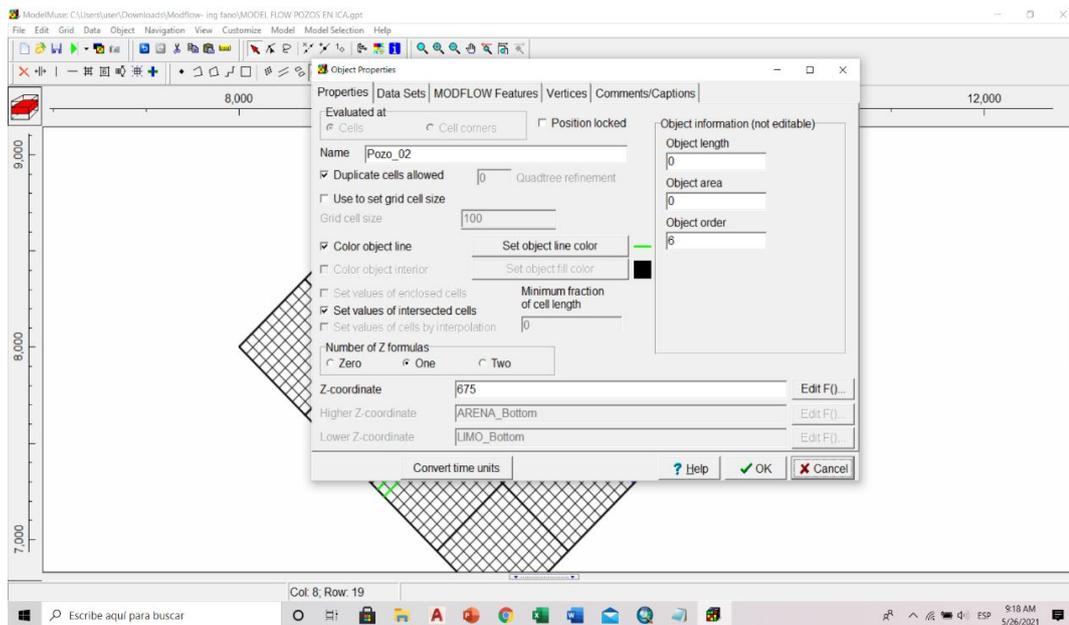
**Figura N°85: Pozos activos**  
Elaborado por: el autor

b) Se asignó la condición de borde haciendo doble clic en los pozos y luego en MODFLOW features con las características del bombeo de los pozos, primero se seleccionó F() y se escribió la fórmula, la cual debe tener un valor negativo para el bombeo, por esa razón se multiplicó  $M3D^*-1$ .



**Figura N°86: Agregar información de pozos**  
Elaborado por: el autor

Con la opción Object properties se modificó el nombre del pozo, la cota y el color que se quiere colocar.



**Figura N°87: Datos básicos de los pozos**  
**Elaborado por: el autor**

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

#### 5.1 Resultado de recolección de datos y campo

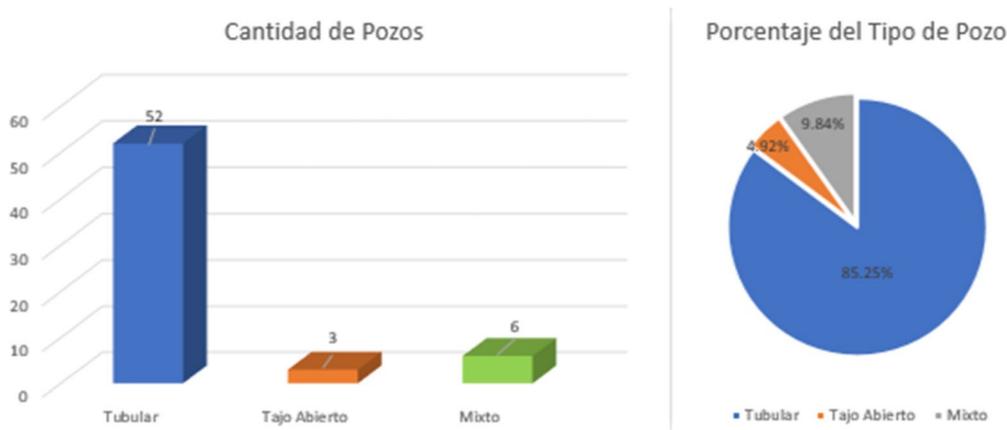
Se solicitaron datos a la Autoridad Nacional del Agua – Sede Ica, quienes atendieron la solicitud de información para la elaboración de esta tesis. Con los datos solicitados se procedió a la modelación en el software MODFLOW y se obtuvieron los siguientes resultados de un total de 61 pozos, de los cuales, 52 son pozos son de tipo tubular (85.25%), 3 pozos de tipo tajo abierto (4.92%) y 6 pozos tipo mixto (9.84%). Ver Tabla N°18 y Figura N°88.

**Tabla 18:**

Distribución de pozos, según su tipo

Distrito	Tubular		Tajo abierto		Mixto		Total	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
San José de los Molinos	52	85.25	3	4.92	6	9.84	61	100

**Elaborado por: el autor**



**Figura N°88:** Distribución de pozos, según su tipo  
**Elaborado por: el autor**

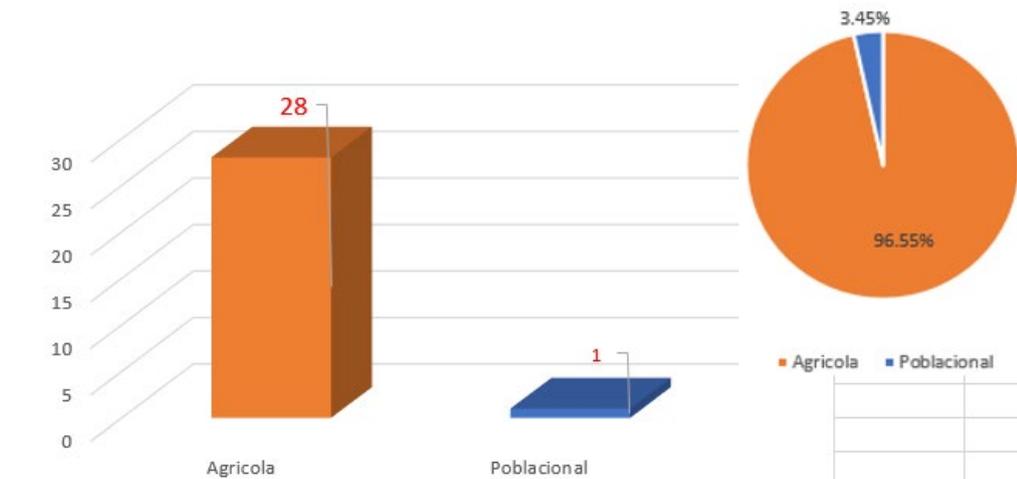
**a) Uso de los pozos**

En la localidad de San José de los Molinos se registraron 29 pozos en estado utilizado. En cuanto a su utilización, predomina el uso agrícola con 28 (96.55%), seguido por el uso poblacional con 1 (3.45%). Como se muestra en la Tabla N°19 y la Figura N°89.

**Tabla 19:**  
 Distribución de pozos utilizados; según su uso

Distribución de pozos según uso			
Uso	Agrícola	Poblacional	Total
	28	1	29
%	96.55	3.45	100

**Elaborado por: el autor**



**Figura N°89:** Distribución porcentual de pozos utilizados.  
**Elaborado por: el autor**

### b) Explotación actual de aguas subterráneas

Los aforos obtenidos permitieron cuantificar el volumen de agua que se extrae del acuífero de la localidad de San José de los Molinos.

Se determinó que se extrae del acuífero de San José de los Molinos, un volumen de agua anual de 9.68 hm<sup>3</sup> al año.

### c) Distribución del volumen de explotación según su uso

De los resultados obtenidos, se concluye que la actividad agrícola es la que más uso las aguas subterráneas del acuífero de la localidad de San José de los Molinos, con un volumen de 9.68 hm<sup>3</sup>/año. Ver tabla N°19

**Tabla 20:**

Distribución del Volumen de Explotación Según su Uso

Distribución del volumen de explotación según su uso (Hm <sup>3</sup> )	
Agrícola	Poblacional
9.41	0.27

**Elaborado por: el autor**

### d) Prueba de bombeo

Consiste en observar los efectos provocados en la superficie freática o piezométrica del acuífero por la extracción de un caudal conocido. Los efectos (abatimientos) se observaron y se registraron en los pozos de bombeo y en el pozo de control (piezómetro).

Se recolectaron 6 pruebas de bombeo, cuyo resultado se muestra en la Tabla N°20. La interpretación de las pruebas de bombeo determinó los parámetros hidráulicos siguientes:

- Transmisividad (T):  $0.59 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  –  $4.03 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Conductividad hidráulica (K):  $2.14 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  –  $11.15 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- Coeficiente de almacenamiento (s): 3.9 % - 8.21 %

El análisis de los valores antes nombrados permitió deducir que las condiciones hidráulicas del acuífero en esta zona son aceptables, observándose que los parámetros corresponden básicamente a acuíferos libres.

**Tabla 21:**  
Resultado de las Pruebas de Bombeo

Resultados de las pruebas de bombeo			
IRHS	Transmisividad( $m^2/d$ )	Conductividad hidráulica (m/s)	Coefficiente de almacenamiento (%)
11	1050	27.9	5
51	507	18.55	5
54	1980	64.45	8.2
37	2049	33.15	5
8	752	24.4	8.21
2	784	22.6	5

**Elaborado por: el autor**

### e) Visita a campo

Para la visita de campo al distrito de San José de los Molinos (Figura N°90 y N°91) se visitaron 4 pozos profundos que presentan la siguiente denominación por el inventario de recursos hídrico-subterráneos: IRHS 35, 39, 41 Y 49.

#### e.1) Pozo 35

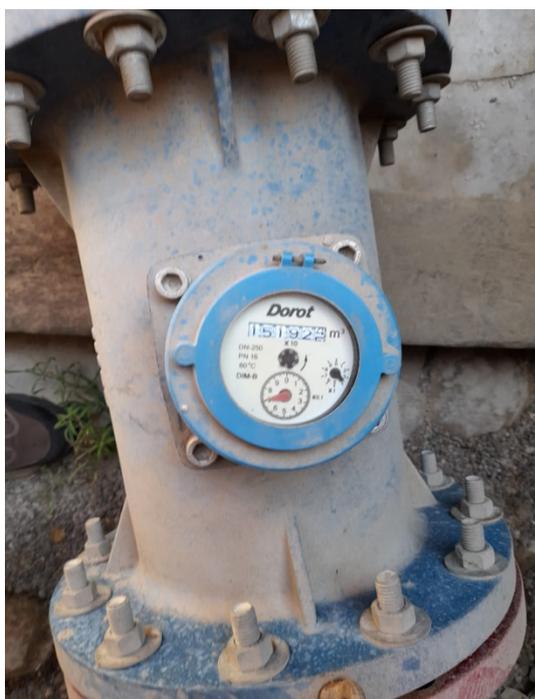
Según los datos obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua en el año 2007 el pozo estaba en una condición no utilizable, las cotas que indican la ubicación del pozo no corresponden a lo que indican en los datos obtenidos.

Se realizó la recolección de datos en campo donde se obtuvieron las siguientes variaciones con relación a los datos obtenidos.

El nivel estático presenta una profundidad de 18.30 m, el nivel dinámico presenta una profundidad de 22.35 m y un caudal de bombeo de 50 l/s.



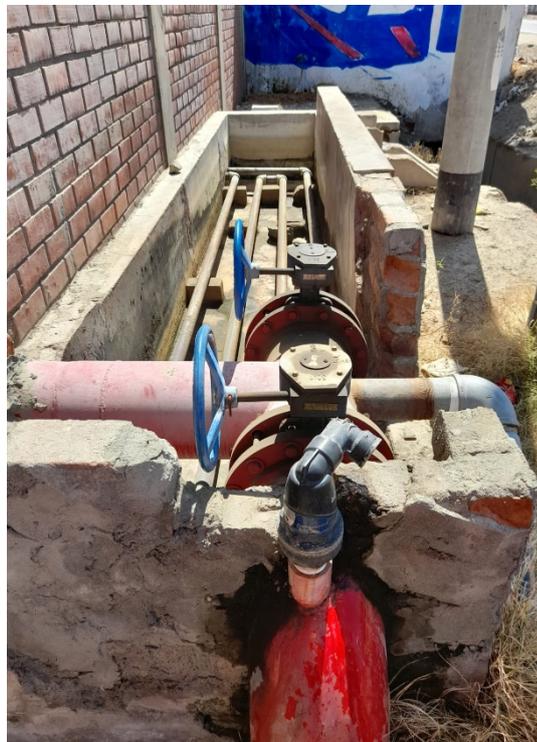
**Figura N°90:** Pozo IRHS 35 con bomba eléctrica  
Elaborado por: el autor



**Figura N°91:** Caudalímetro  
Elaborado por: el autor



**Figura N°92: Tablero electrónico**  
**Elaborado por: el autor**



**Figura N°93: Válvulas de salida de agua**  
**Elaborado por: el autor**

**e.2) Pozo 39**

Según los datos obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua en el año 2007 el pozo presenta una condición utilizable, las cotas que indicaban la ubicación del pozo no corresponden a lo que indican en los datos obtenidos.

Se realizó la recolección de datos en campo donde se obtuvieron las siguientes variaciones con relación a los datos obtenidos.

El nivel estático presenta una profundidad de 54.8 m, el nivel dinámico presenta una profundidad de 28.50 m y un caudal de bombeo de 30 l/s.



**Figura N°94:** Cabezal del pozo estacionario  
**Elaborado por:** el autor



**Figura N°95: Pozo petrolero**  
**Elaborado por: el autor**



**Figura N°96: Distribución por tubos de salida**  
**Elaborado por: el autor**

### e.3) Pozo 41

Según los datos obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua en el año 2007 el pozo estaba en una condición no utilizable, las cotas que indicaban la ubicación del pozo no corresponden a lo que indican en los datos obtenidos. Según la localización brindada por el ANA es el primer pozo de San José de los molinos de uso agrícola.

Se realizó la recolección de datos en campo donde se obtuvieron las siguientes variaciones con relación a los datos obtenidos.

El nivel estático presenta una profundidad de 33.70 m , el nivel dinámico presenta una profundidad de 37.80 m y un caudal de bombeo de 12 l/s.



**Figura N°97: Tablero electrónico**  
**Elaborado por: el autor**

#### e.4) Pozo 49

Según los datos obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua en el 2007, el pozo presentó una condición utilizable, las cotas que indicaban la ubicación del pozo no correspondían a lo que se indicaba en los datos obtenidos. Se pudo acceder al pozo y a la reubicación nueva del mismo.

Se realizó la recolección de datos en campo, donde se obtuvieron las siguientes variaciones con relación a los datos obtenidos.

El nivel estático presentó una profundidad de 27.62 m, el nivel dinámico presentó una profundidad de 38.62 m y un caudal de bombeo de 40 l/s.



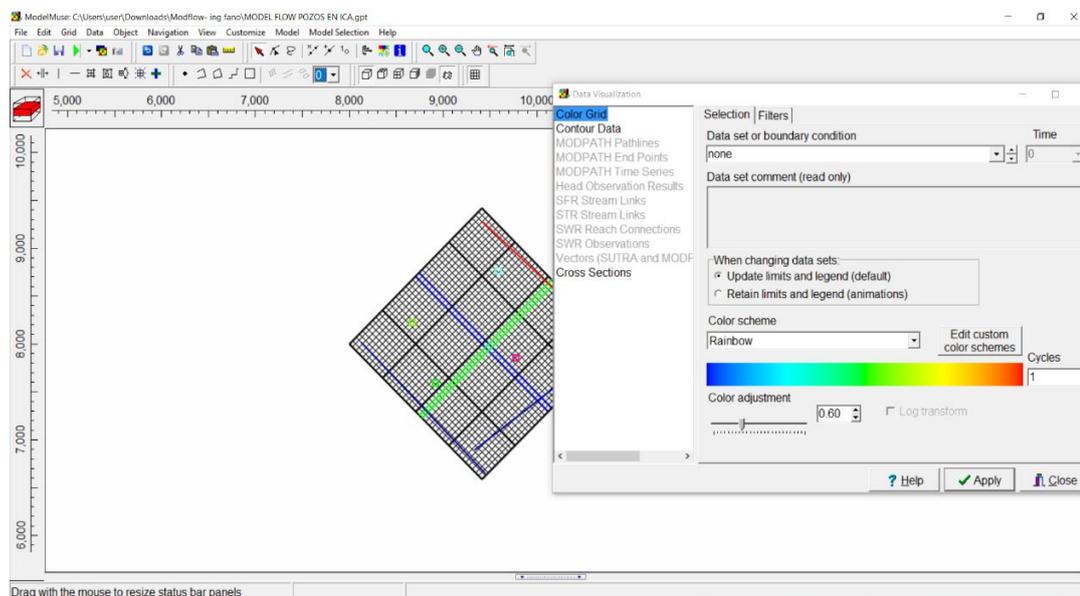
**Figura N°98:** Localización nueva del Pozo IRHS 49  
**Elaborado por:** el autor



**Figura N°99: Pozo mixto IRHS 49**  
Elaborado por: el autor

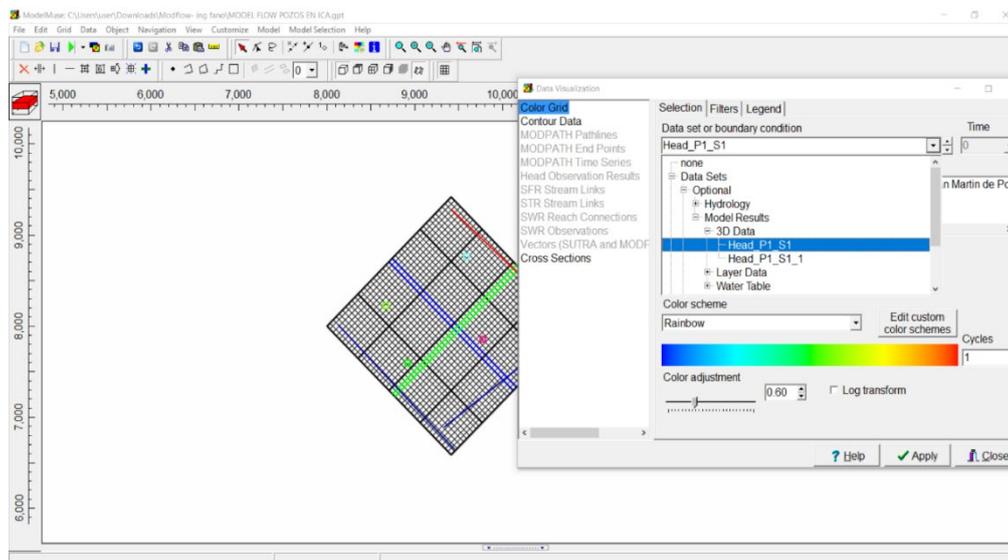
## 5.2. Resultados con el software MODFLOW

Para poder visualizar el mapa de calor de las elevaciones, se seleccionó la opción **Data Visualization** y un color **rainbow** para poder diferenciar las elevaciones.



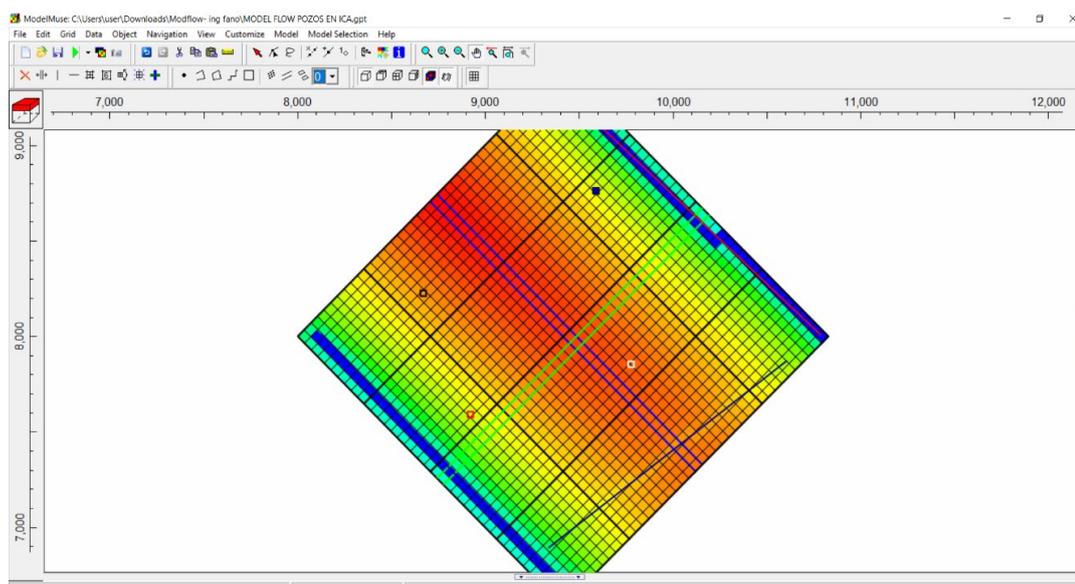
**Figura N° 100: Datos básicos de los pozos**  
Elaborado por: el autor

Se seleccionó la opción data sets- Optional - Model results- 3D data. Posteriormente se eligió la opción Head\_P1\_S1.



**Figura N°101: Datos básicos de los pozos**  
Elaborado por: el autor

Uno de los resultados de este proyecto es el mapa de calor de las cotas para poder visualizar como es la geografía del área de estudio. Se pudo notar las condiciones de borde, se visualizaron con el color azul las celdas que están activas o no, estas celdas representan las precipitaciones que alcanzan 2 mm/año.

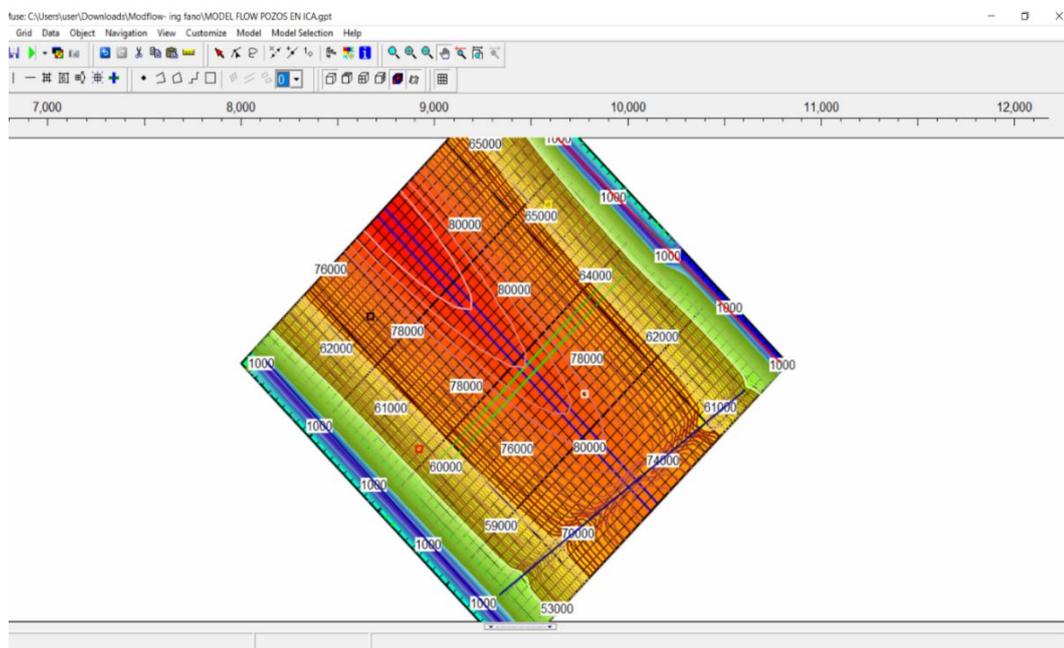


**Figura N°102: Mapa de calor de cotas**  
Elaborado por: el autor

El segundo resultado que se obtiene son las curvas de nivel que hay en el área de trabajo. Se pudo obtener a través del contour data y realizar los mismos pasos que el mapa de calor.

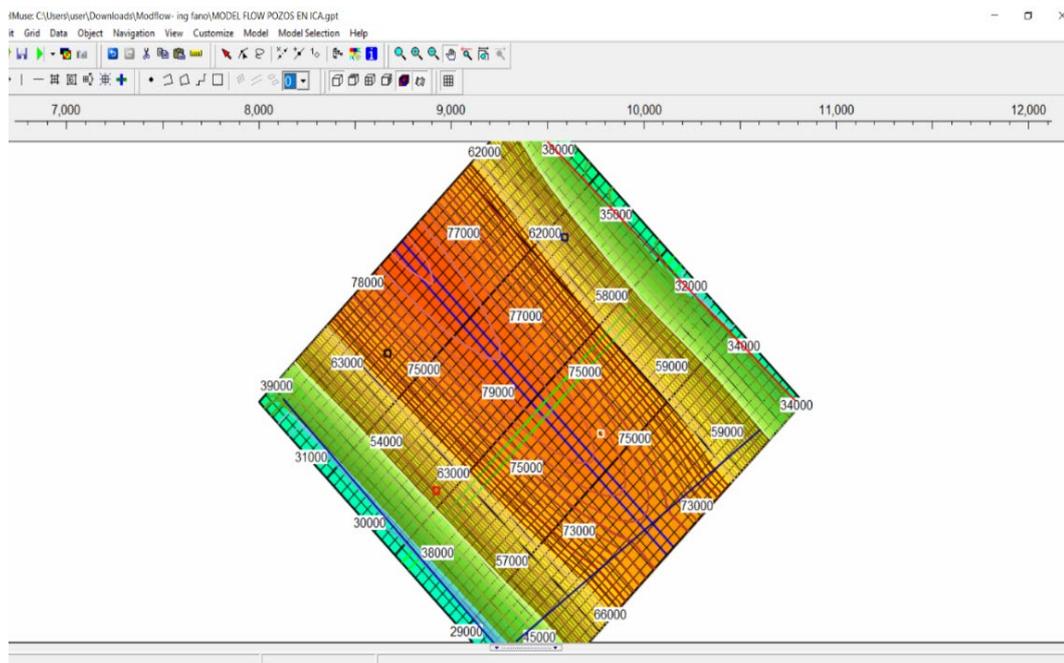
En esta gráfica se pudo observar las cotas, como van cambiando de acuerdo con las capas que presenta el acuífero. Las gráficas van a ser diferentes de acuerdo con la capa que se coloca.

### 1° Capa de arena



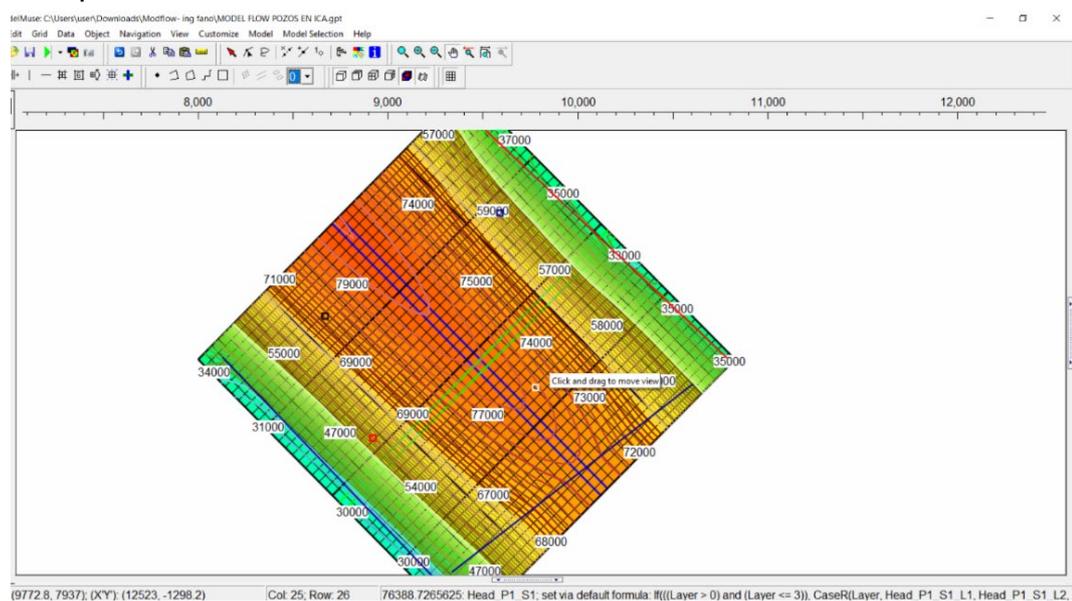
**Figura N°103:** Mapa y curvas de nivel con la capa arena  
**Elaborado por: el autor**

## 2° Capa de Limo



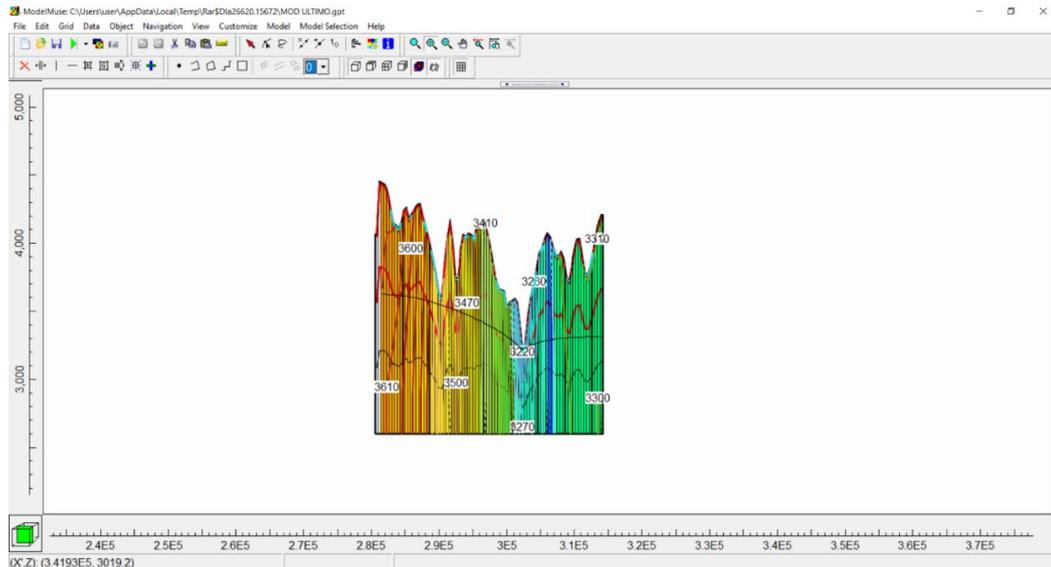
**Figura N°104:** Mapa y curvas de nivel con la capa limo  
Elaborado por: el autor

## 3° Capa de Grava

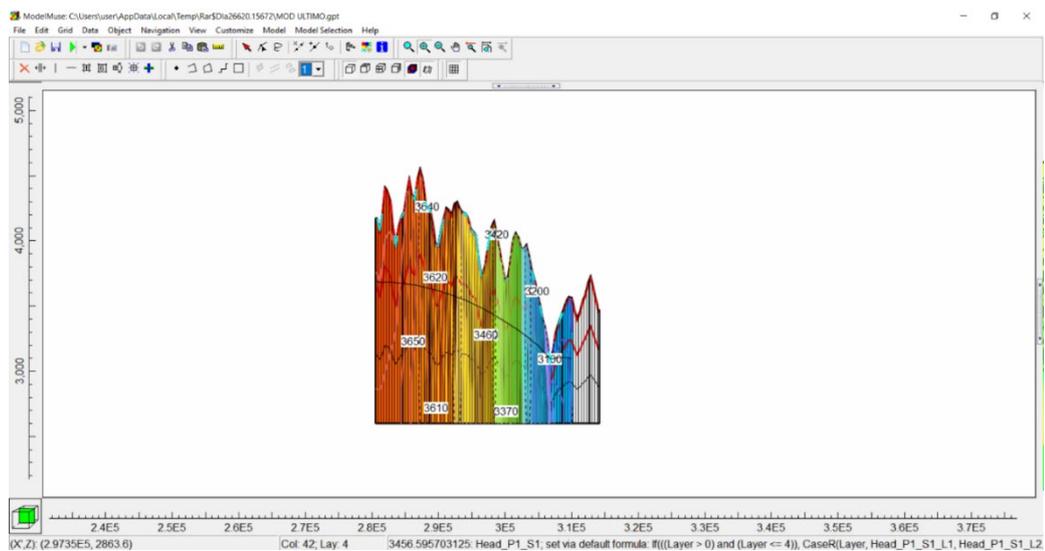


**Figura N°105:** Mapa y curvas de nivel con la capa grava  
Elaborado por: el autor

Como resultado, este programa también brindó el perfil del nivel freático, el cual presentó tres capas descritas anteriormente. Se pudo observar el nivel estratigráfico del terreno con las elevaciones, este va cambiando de acuerdo con las grillas que se seleccionan.



**Figura N°106:** Perfil del nivel freático en la parte inferior del modelo  
**Elaborado por: el autor**



**Figura N°107:** Perfil del nivel freático en la parte superior del modelo  
**Elaborado por: el autor**

Se simuló con el modelo MODFLOW 2005 después de ingresar todos los datos de los parámetros correspondientes y arrojó el siguiente resultado.

Es importante resaltar que el flujo del agua va en dirección de Norte a Sur como se puede apreciar en la figura 85,86 y 87 se colocó dos límites en la discretización del modelo, en la parte superior (mayor elevación) de igual forma se colocó la precipitación en el cual se pudo apreciar el mapa de calor y las cotas del sentido del flujo.

En los volúmenes acumulativos de **entradas**, la carga constante es de 17,187,304 litros, los cuatro pozos que fueron colocados en el área de trabajo presentan un volumen de 17,280,000 litros con una recarga de 2,084,931.5 litros debido a la precipitación y a los canales del Río Ica que discurren por el acuífero.

La suma de todas las **entradas** que existen en el acuífero fue de 36,552,236 litros, es el volumen total que existe en el acuífero.

En los volúmenes acumulativos de **salida**, la carga constante del acuífero fue de 19,610,818 litros, la carga de los 4 pozos fue de 17,279,998 litros, en la salida se consideró un dren que va a tener una salida de 318,528.78 litros.

La suma de todas las **salidas** que existen en el acuífero fue de 37,209,344 litros, para este estudio se consideró 4 pozos con caudales de bombeo altos que fueron de 50 l/s , 40 l/s, 35 l/s y 12 l/s.

La diferencia entre el volumen de entrada y salida en el acuífero fue de -657,108.00 litros, significa que existe una sobreexplotación en esa parte del acuífero.

Es importante señalar que la discrepancia que existe en este modelo fue de - 1.78 y el período de simulación que se realizó fue en 1000 días.

HEAD WILL BE SAVED ON UNIT 37 AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 1  
 DRAWDOWN WILL BE SAVED ON UNIT 38 AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 1  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 1

```

-----
CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
STORAGE =          0.0000          STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD = 17187304.0000      CONSTANT HEAD =          0.1989
WELLS =          17280000.0000      WELLS =          0.2000
DRAINS =           0.0000          DRAINS =          0.0000
RECHARGE =         2084931.5000      RECHARGE =         2.4131E-02

TOTAL IN = 36552236.0000          TOTAL IN =          0.4231

OUT:
----
STORAGE =          0.0000          STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD = 19610818.0000      CONSTANT HEAD =          0.2270
WELLS =          17279998.0000      WELLS =          0.2000
DRAINS =          318528.7812        DRAINS =         3.6867E-03
RECHARGE =           0.0000          RECHARGE =          0.0000

TOTAL OUT = 37209344.0000          TOTAL OUT =          0.4307

IN - OUT = -657108.0000          IN - OUT = -7.6054E-03

PERCENT DISCREPANCY = -1.78      PERCENT DISCREPANCY = -1.78

```

```

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1
          SECONDS      MINUTES      HOURS      DAYS      YEARS
-----
TIME STEP LENGTH 8.64000E+07 1.44000E+06 24000.    1000.0    2.7379
STRESS PERIOD TIME 8.64000E+07 1.44000E+06 24000.    1000.0    2.7379
TOTAL TIME 8.64000E+07 1.44000E+06 24000.    1000.0    2.7379

```

**Figura N°108:** Resultados de la simulación del software MODFLOW  
 Elaborado por: el autor

## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1. Discusión de hipótesis

Luego de haber realizado el modelamiento matemático de aguas subterráneas del acuífero ubicado en el distrito de San José de los Molinos en Ica, y analizado las pruebas de bombeo de los pozos localizados en la zona de estudio, las lecturas de los niveles de agua y las características técnicas de los pozos. Para obtener una mejor visualización del modelo se realizaron dos modelaciones, la primera modeló toda la cuenca y visualizó el perfil del acuífero; y en la segunda, se anexaron 4 pozos de donde se obtuvieron las muestras, y con el análisis de las muestras se determinaron las entradas y salidas de agua que existe en el acuífero.

A continuación, se explican los resultados de las hipótesis.

**a) H1:** El levantamiento de la piezometría contribuyó en el modelamiento de las aguas subterráneas con la aplicación del software MODFLOW. Permite conocer la profundidad del agua a través de puntos de observación que en este caso son los 61 pozos que se tiene como población. En cada pozo se analizó la piezometría y se obtuvo a través de la recolección de datos la información que fue brindada por la Autoridad Nacional del Agua en conjunto con la Autoridad Local del Agua. Así mismo cuando introdujo los pozos en el software MODFLOW es importante ingresar la profundidad, ello ayuda a determinar las salidas de agua que va a tener el acuífero.

**Tabla 22**

Contrastación de hipótesis específica 1

Hipótesis planteada	Experiencias obtenidas	Observaciones
El levantamiento de la piezometría de los pozos contribuyó en gran medida en determinar el modelo matemático para el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	El levantamiento de la piezometría de los pozos es importante para que el modelamiento hidrogeológico del acuífero presente mayor exactitud, sin la introducción de pozos se desestima un volumen de entrada de 17,280,000 litros.	Se confirma que la hipótesis 1 es verdadera, gracias al levantamiento de la piezometría de los pozos.

**Elaborado por: el autor**

**b) H2:** Existen cambios mínimos si se coloca la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y la transmisividad de cada pozo, debido a que en cada capa del acuífero de San José de los Molinos se introducen esos valores para tener un valor más exacto en las diferencias de aguas que se simule.

**Tabla 23**

Contrastación de hipótesis específica 2

Hipótesis planteada	Experiencias obtenidas	Observaciones
La prueba de bombeo contribuyó en menor medida en determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	Al determinar las pruebas de bombeo de cada pozo se halló los parámetros de coeficiente de almacenamiento, transmisividad y conductividad hidráulica.	Se confirma que la hipótesis 2 es verdadera puesto que gracias a la prueba de bombeo se puede determinar los parámetros hidráulicos y obtener un modelo más exacto.

**Elaborado por: el autor**

**c) H3:** Cuando se realiza el modelado de las aguas subterráneas utilizando el software MODFLOW se visualizó el perfil del nivel freático y analizo el perfil estratigráfico , las tres capas que presenta el acuífero y nivel freático que presenta la celda que se seleccionó. Conocer los niveles de agua tanto el nivel estático como dinámico de los pozos ayudan a determinar el comportamiento y la dirección que va a presentar el acuífero.

**Tabla 24**

Contrastación de hipótesis específica 3

Hipótesis planteada	Experiencias obtenidas	Observaciones
El levantamiento de los niveles de agua contribuyó en gran medida en determinar el estado actual del sistema acuífero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	Al conocer los niveles de agua se pudo visualizar el descenso de la capa freática y modelar el nivel freático del acuífero para poder conocer los niveles de agua de pozos futuros.	Se confirma que la hipótesis 3 es verdadera puesto que gracias los niveles de agua se puede conocer y modelar el nivel freático.

Elaborado por: el autor

## 6.2 Discusión de Antecedentes

Una vez obtenidos los resultados de la investigación, se contrastaron con los antecedentes nacionales e internacionales.

### 6.2.1 Contrastación con

#### Antecedentes Internacionales

Hatch, H. (2021) concluyó que, para cualquier modelado de aguas subterráneas, es necesario la inclusión de pozos y ver el impacto que presenta en los acuíferos costeros con el uso de códigos de aguas subterráneas de densidad única.

Adicionalmente, la investigación de Hatch permitió establecer que para realizar el modelo de aguas subterráneas es necesario el ingreso de pozos como se indica en la tesis, debido a que genera un gran impacto en el volumen de salida del acuífero.

Scott & Randall (2020) concluyeron que dentro de todos los paquetes del software MODFLOW, el más adecuado es el MF-OWHM2 debido a que presenta una gran funcionalidad y ayuda a mejorar el análisis de las aguas subterráneas. Es importante destacar que, en esta investigación, los autores escogieron el paquete MODFLOW-2005 debido a que presenta un mejor análisis y mayor exactitud de la información que se ingresa al software.

Domingo, L.(2019) concluyó que la utilización del software MODFLOW brinda la información sobre los efectos e impactos hidrogeológicos que presenta el acuífero. Otro resultado que puede generar la evolución del acuífero a lo largo de un tiempo determinado. Es importante destacar el equilibrio hídrico que hay en la zona de estudio las entradas de agua son mayores que las salidas, en cambio en la zona de estudio del proyecto existe un desequilibrio hídrico.

Adicionalmente los resultados de la investigación de Domingo, halla la capacidad del acuífero, los volúmenes de entrada y los volúmenes de salida, el equilibrio hídrico y conocer el efecto hidrogeológico que presenta el acuífero.

Saavedra, E.(2013) concluyó que la precipitación es el parámetro que presenta menor variación de la concentración, quedando almacenado en los árboles del humedal en un tiempo reduciendo su capacidad de remoción y que la conductividad hidráulica es un parámetro importante para la simulación de humedales.

Adicionalmente, en la dirección norte se colocó como condición de borde la precipitación, esto permitió que exista un mayor volumen de entrada en el acuífero y que el resultado final tenga una mejor exactitud.

### **6.2.2 Contrastación con Antecedentes Nacionales**

Zúñiga & Gálvez. (2019) concluyeron que el aumento demográfico y el crecimiento económico aumentó la demanda de agua, similar a lo ocurrido en la zona de estudiada del proyecto, en esta tesis se aplicó una modelación numérica del flujo de agua subterránea donde consideraron los parámetros hidrodinámicos para su simulación.

En el distrito de San José de los Molinos existe un incremento en las empresas agroexportadoras y poblacional lo que genera una mayor cantidad de pozos para poder captar el agua y poder cubrir las tierras agrícolas. Además, los caudales de los pozos deben ser mucho mayor debido a que existe mucha demanda.

Quinde, K. (2018) concluyó que para realizar un estudio hidrogeológico se tiene que realizar tres etapas. La primera es la recopilación de información de la zona de estudio, la segunda son las pruebas de campo y la última es interpretar esos resultados para ingresarlo al software que se quiere modelar.

El desarrollo de la investigación cumple con lo que se mencionó en esta tesis. Lo primero que se realizó fue la recopilación de datos a través de la Autoridad Nacional del Agua en conjunto con la Autoridad Local del agua, los segundo fue analizar los datos e ir a los pozos que se tomaron como muestra para validar los datos recolectados y por último se ingresó esos datos al software MODFLOW para simular el acuífero.

Diaz, R.(2015) concluyó que al haber un incremento de nuevos pozos tanto formales como informales se generó una explotación irresponsable que a lo largo de un tiempo genera una sobreexplotación y un descenso rápido del nivel freático. Para ello se usó un modelo matemático Visual MODFLOW donde se podrá visualizar el comportamiento del acuífero.

Al realizar un análisis en la muestra que se escogió dio como resultado una sobreexplotación del acuífero generada

principalmente por la variación del caudal que se realizar sin previa autorización y por la cantidad de pozos informales que existen en la zona , esto genera un descenso rápido del nivel freático.

## CONCLUSIONES

1. Se elaboró el modelo matemático con el que se determinó el estado actual del sistema acuífero con una sobreexplotación de 657,108.00 litros, en base a la simulación realizada luego de haber cargado los parámetros de permeabilidad, caudal explotado y piezometrías de los pozos, que constituyeron la muestra de las condiciones iniciales.
2. Se analizó la información levantada de la piezometría para cada uno de los pozos de la muestra con la cual se determinaron las siguientes condiciones iniciales: el pozo 35 presenta una profundidad de 22.5 m. y un caudal de 50 l/s; el pozo 39 presenta una profundidad de 28.5 m. y un caudal de 30 l/s; el pozo 41 presenta una profundidad de 37.80 m. y un caudal de 12 l/s; el pozo 49 presenta una profundidad de 38.62 m. y un caudal de 40 l/s.
3. Se realizó el análisis de las pruebas de bombeo tomada de la información de la Autoridad Nacional del Agua y de los datos obtenidos en campo, a partir de las cuales se obtuvieron las condiciones iniciales en la conductividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento. La ausencia de estos parámetros genera 255,000.00 litros faltantes en el modelado hidrogeológico.
4. En base al modelo matemático MODFLOW se simularon los niveles de agua en el área de estudio del acuífero de San José de los Molinos, esto

permitió tener un dato inicial que sirve para cualquier perforación futura del pozo y para cualquier lugar del área de estudio.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar el software MODFLOW facilita el modelado hidrogeológico de un acuífero, es por ello, que a medida que los estudiantes de pregrado lleven cursos referentes a mecánica de fluidos, hidrológica e hidráulica, se recomienda conocer y utilizar este software para verificar lo aprendido teóricamente en clase.
2. Actualizar la base de datos de los pozos, debido a que la ubicación y el caudal de explotación no corresponde a la información recolectada, y para que se pueda realizar el modelo hidrogeológico de una manera más exacta y confiable se requiere contar con datos precisos y actuales de los pozos.
3. Establecer un mayor control de los pozos explotados, realizar nuevas pruebas de bombeo a los pozos que no presentan mantenimiento y actualizar los parámetros hidráulicos de los pozos existentes.
4. Pedir un permiso a las empresas o agricultores que tengan el manejo de determinado pozo, debido a que el ingreso para visualizar y analizar

un pozo suele ser restringido, por ello no es sencillo corroborar los datos del nivel estático y dinámico que presenta.

### FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Aguilar, P. (2007). Apuntes sobre el curso de Ingeniería Sanitaria (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 170 p. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_2766\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2766_C.pdf)
2. AHRENS, T. (1956). Water well design criteria. Water Well Journ. Set - nov/57 y dic/58. Traducido por AUGE M.P. 1976 como: Criterios para el diseño de perforaciones de agua. CFI. Buenos Aires. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/PerfHidrogeol.pdf>
3. Aparicio, F. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. [https://www.academia.edu/8254237/Fundamentos\\_de\\_hidrologia\\_de\\_superficie\\_Aparicio](https://www.academia.edu/8254237/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_Aparicio)
4. Autoridad Nacional del Agua (2012). Plan de gestión del acuífero del valle de Ica y pampas de Villacurí y Lanchas. Documento: ANA-MINAG. Perú.
5. Autoridad Nacional del Agua (2012). Diagnóstico situacional de recarga de acuíferos. Documento de la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. ANA-Perú.
6. Autoridad Nacional del Agua (2014). Plan de Gestión de los Acuíferos del Valle de Ica, Pampas de Villacurí y Lanchas. Presentación.
7. Autoridad nacional del agua. ( 2017). Evaluación Hidrogeológica de la zona de Ocucaje-Ica. Ministerio de agricultura y riego. [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/memoria\\_final\\_ocucaje\\_2017\\_anexos\\_planos.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/memoria_final_ocucaje_2017_anexos_planos.pdf)

8. Arteaga ,T.(1993). Hidráulica Elemental. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. México. [http://irrigacion.chapingo.mx/sites/default/files/2019-06/Asig\\_52\\_Hidraulica\\_Aplicada.pdf](http://irrigacion.chapingo.mx/sites/default/files/2019-06/Asig_52_Hidraulica_Aplicada.pdf)
9. Arocha, R (1980) Abastecimiento de agua (Teoría y Diseño). Editorial Vegas. Caracas, Venezuela. 284 p.
10. Ball, P. (2001). Drilled Wells. St. Gallen (Switzerland): Series of Manuals on Drinking Water Supply, Vol. 6, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT). <https://skat.ch/wp-content/uploads/2017/01/HandbookVolume6.pdf>
11. Bear, C. (1979). Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, Inc. New York. 152, 301 pp. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferenceSPapers.aspx?ReferenceID=750711](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferenceSPapers.aspx?ReferenceID=750711)
12. Bellido, A. (2004). Manual de pozos y equipamiento con bombas manuales. Lima Perú. <https://silo.tips/download/manual-de-perforacion-manual-de-pozos-y-equipamiento-con-bombas-manuales>
13. Chang, O. (2012). Integración de un modelo de flujo a un Sistema de Información Geográfica (SIG). DOI:10.13140/RG.2.1.2290.1526
14. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2017). Información de Evaluación del Riesgo por Flujos de Distritos en el Área de Influencia de la Quebrada la Yesera del Centro Poblado de San José de los Molinos, Distrito de San José de los Molinos, Provincia y Departamento de Ica. [http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4110\\_informe-de-evaluacion-del-riesgo-por-flujos-de-detritos-en-el-area-de-influencia-de-la-quebrada-la-yesera-del-centro-poblado-de-san-jose-de-los-molino.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4110_informe-de-evaluacion-del-riesgo-por-flujos-de-detritos-en-el-area-de-influencia-de-la-quebrada-la-yesera-del-centro-poblado-de-san-jose-de-los-molino.pdf).
15. Carrasco, A. (2007). Parámetros Hidrogeológicos para Simulación del acuífero Aluvial (Tesis de post grado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

<https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/8167/Tesis%20DoctoradoX%20-%20Luis%20A.%20Lara%20Romero.pdf?sequence=1>

- 16.** Castañeda, M (2019). Propuesta de metodología para la elaboración y evaluación de modelos conceptuales y numéricos de aguas subterráneas. DOI:10.13140/RG.2.2.30613.37607
- 17.** Castillo, C. (2003). Tiempo de llegada de solutos sorbentes bajo condiciones de flujo convergente. Momentos estadísticos condicionados (tesis pregrado). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3407>
- 18.** CENEPRED. (2017). Información de Evaluación del Riesgo por Flujos de Distritos en el Área de Influencia de la Quebrada la Yesera del Centro Poblado de San José de los Molinos, Distrito de San José de los Molinos, Provincia y Departamento de Ica. [http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4110\\_informe-de-evaluacion-del-riesgo-por-flujos-de-detritos-en-el-area-de-influencia-de-la-quebrada-la-yesera-del-centro-poblado-de-san-jose-de-los-molino.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4110_informe-de-evaluacion-del-riesgo-por-flujos-de-detritos-en-el-area-de-influencia-de-la-quebrada-la-yesera-del-centro-poblado-de-san-jose-de-los-molino.pdf).
- 19.** Collins, S. (2000). Hand-dug Shallow Wells. Series of Manuals on Drinking Water Supply, Vol. 5. St. Gallen (Switzerland): Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT). <https://sswm.info/node/11407>
- 20.** Dante, F. (2019). Modelación hidrogeológica con feflow para extracción de flujo del acuífero del río Lurín-sector Chontay.(tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2324>
- 21.** Díaz, P. (2015). Modelamiento hidrogeológico para estimar el caudal óptimo de la parte baja del acuífero del valle del río Lurín (tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2400>
- 22.** Domingo, J. (2019). Modificaciones hidrodinámicas a largo plazo en un acuífero multicapa con explotación intensiva. (Tesis de post grado).

Universidad católica de Murcia, Murcia, España.  
<http://repositorio.ucam.edu/handle/10952/4253?locale-attribute=en>

23. Duray, A. (2018). Con riego tecnificado algodoneeros de Ica duplican rendimiento promedio de la zona FAO. Ica Perú.  
<http://www.fao.org/americas/noticias/ver/pt/c/1115296/>
24. Dumont, A. (2015). Flujos, huellas y valores: visiones y decisiones sobre el agua subterránea en España (Tesis del doctorado). Universidad Complutense de Madrid.  
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/31040/1/T36214.pdf>
25. Emapisco. (2004). Galería de Filtración “Alberto Toguchi Arakawa”. Lina de Conducción Cabeza de Toro-Pisco. Manual de Operación y Mantenimiento. Pisco-Perú.  
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/620958/TESIS+DE+TITULACION+-+MANUEL+ESPINOZA+Y+KENJI+SANTARIA.pdf;jsessionid=19624F605069CB37E25C896A1C85EECB?sequence=1>
26. Escalante, D. (2006). Recarga artificial en un dispositivo tipo canal [Figura].  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arcanal.jpg>
27. Fonseca, D. (2019). Modelación hidrogeológica con feflow para extracción de flujo del acuífero del río Lurín- Sector Chontay ( tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima , Perú.  
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2324>
28. Fiering, M. (1971). Simulation Models for Conjunctive Use of Surface and Ground Water. Seminar of Ground Water, Granada, España, FAO Gobierno Español, 1-25 pp.  
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/31040/1/T36214.pdf>
29. Galloway, Devin L., & Sneed, Michelle (2013). Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 65(1),123-136.[fecha de Consulta 9 de

Marzo de 2021]. ISSN: 1405-3322.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=943/94348265011>

- 30.** García, R. (2018). Apuntes sobre captación de agua subterráneas. Universidad Nacional del centro de la provincia de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.  
[https://www.cohife.org/Captacion\\_de\\_Aguas\\_Subteraneas.pdf](https://www.cohife.org/Captacion_de_Aguas_Subteraneas.pdf)
- 31.** Global Water Partnership, Sociedad Geografía de Lima & Ordoñez, J. (2011). Cartilla técnica: Aguas Subterráneas- Acuífero  
[https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/aguas\\_subteraneas.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subteraneas.pdf)
- 32.** Gobierno Regional de Ica. (2005). Estudio diagnóstico y zonificación para el tratamiento de la demarcación territorial de la provincia de Ica: Parte descriptiva <http://sdot.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2016/06/ica.pdf>
- 33.** Gómez, A.(2007). Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones Tacuarembó – Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. (Tesis de post grado). Universidad Nacional del Litoral, Uruguay. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/72>
- 34.** Hatch, N. (2021). Seawater Intrusion Modeling with Single-Density Codes. (Master of Science). Delft University of Technology, Delft, Netherlands.  
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Af755b538-ce55-440e-947e-d08e224ac9b6>
- 35.** Heras, R. (1983). Recursos Hídricos Síntesis Metodología y Normas. Edita Cooperativa de Publicaciones del colegio de Ingenieros de Caminos, canales y Puertos. Almagro, 42 –Madrid. 4361 p.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=229630>
- 36.** Hillewaert, H. (2009). Acuífero [Figura].  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Aquifer\\_es.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Aquifer_es.svg)
- 37.** Holzbecher, L. (2007). Environmental modeling using Matlab. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 393p.

- 38.** Iaguas. (2018) España: Porque MODFLOW es Mejor para que el Modelamiento de Aguas Subterránea. <https://www.iagua.es/blogs/gidahatari/que-MODFLOW-es-mejor-modelamiento-agua-subterranea>.
- 39.** Ica: abren compuertas para evitar daños por incremento del caudal del río Ica. (2019). América noticias. <https://www.americatv.com.pe/noticias/actualidad/ica-abren-compuertas-evitar-danos-incremento-caudal-río-ica-n358893>
- 40.** Ica a la espera de un proyecto de trasvase de agua.(2020).Red Agrícola. <https://www.redagricola.com/pe/ica-a-la-espera-de-un-proyecto-de-trasvase-de-agua/>
- 41.** Instituto Geológico y Minero de España. (1987). Vulnerabilidad. [https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros1\\_HR/libro74/pdf/lib74/in\\_064.pdf](https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros1_HR/libro74/pdf/lib74/in_064.pdf)
- 42.** Instituto Nacional de Ampliación de la frontera agrícola. (1984). Estudio hidrológico para la perforación de pozos tubulares en la zona de Mañazo. Autoridad Nacional del Agua. Puno, Perú. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2705>
- 43.** Instituto Nacional de Estadística e informática. (2009). Ica: Compendio Estadístico de departamental 2008-2009. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib0839/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0839/libro.pdf)
- 44.** Kennedy, A & Fragoza, F. (1992). Manual de aforos. Instituto mexicano de tecnología del agua, Distrito Federal, México. [http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/971/IMTA\\_028.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/971/IMTA_028.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- 45.** Manuel de diseño de galería filtrantes – Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural. lima-2012. [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/CEPIS%202002.%20Manual%20de%20dise%C3%B1o%20de%20galerias%20filtrantes.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CEPIS%202002.%20Manual%20de%20dise%C3%B1o%20de%20galerias%20filtrantes.pdf)

- 46.** Montoya, Saul. (2019). Hidráulica aplicada a la Productividad de Pozos. Gidahatari. <https://gidahatari.com/cu-es/curso-virtual-de-hidraulica-aplicada-a-la-productividad-de-pozos>
- 47.** Muñoz, Ismael. (2016). Agroexportación y sobreexplotación del acuífero de Ica en Perú. *Anthropologia*, 34(37), 115-138 pp. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/anthropologica/article/view/14834>
- 48.** Navarrete, E. (2017). Apuntes de geología física. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. [https://www.researchgate.net/publication/320410516\\_APUNTES\\_DE\\_GEOLOGIA\\_FISICA](https://www.researchgate.net/publication/320410516_APUNTES_DE_GEOLOGIA_FISICA)
- 49.** Norma OS.010 – Captación y conducción del agua para consumo humano – Ministerio de vivienda, construcción y Saneamiento. [https://www3.vivienda.gob.pe/Direcciones/Documentos/RNE\\_Actualizado\\_Solo\\_Saneamiento.pdf](https://www3.vivienda.gob.pe/Direcciones/Documentos/RNE_Actualizado_Solo_Saneamiento.pdf)
- 50.** Norma técnica para La Perforación de Pozos Profundos en la Administración Nacional de acueductos y Alcantarillado, El Salvador, 2009. <https://www.anda.gob.sv/wp-content/uploads/2015/03/perf-pozos.pdf>
- 51.** Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas subterráneas- Acuíferos, Sociedad Geográfica de Lima. SENAMHI. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/aguas\\_subterraneeas.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneeas.pdf)
- 52.** Peña, F; Sánchez, M & Parí, W. (2010). Hidrología de la cuenca del río Ica. Regiones Ica y Huancavelica. Instituto Geológico, minero y metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/370>
- 53.** Quinde, K. (2018). Investigación Hidrogeológica para explotación de agua subterránea en el sector 84 bajo – San Isidro, distrito de Tambo grande, provincia y departamento de Piura – Perú (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1595>
- 54.** Regal, A. (2012). Abastecimiento de Agua y Alcantarillado. Primera Edición. Lima, Perú.

- 55.** Rosario, B. (2000). Elaboración de Mapas de Peligros y Estudio de Suelos. Universidad Nacional de Ica, Ica Perú. [http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios\\_CS/Region\\_Ica/ica/latinguina.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Ica/ica/latinguina.pdf)
- 56.** Saavedra, L. (2013). Modelación hidráulica y de calidad del agua acoplada para humedales, mediante processing MODFLOW. (Tesis postgrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/3810>
- 57.** Sánchez, J. (2015). Conceptos fundamentales de hidrología: Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico. Universidad de Salamanca, Salamanca, España. [https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos\\_Hidrogeol.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf)
- 58.** Sánchez, J (2010). Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico. Universidad de Salamanca, Salamanca, España. [https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos\\_Hidrogeol.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf)
- 59.** Schwartz, F. W. & H. Zhang (2003). Fundamentals of Groundwater. Wiley, 592 pp. <https://www.wiley.com/en-gb/Fundamentals+of+Ground+Water-p-9780471137856>
- 60.** Scott, B & Randall, H. (2020). One-Water Hydrologic Flow Model: A MODFLOW based conjunctive-Use simulation software. Servicio Geológico de los Estados Unidos, Virginia, Estados Unidos. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A60>
- 61.** Stappenbeck, R. (1926): Geología y aguas subterráneas de la pampa. Ed. Pangea, Córdoba, 490 p. [https://www.researchgate.net/publication/293175273\\_Aguas\\_Superficiales\\_y\\_Subterranas\\_de\\_la\\_Provincia\\_de\\_Santa\\_Fe\\_Segunda\\_Edicion](https://www.researchgate.net/publication/293175273_Aguas_Superficiales_y_Subterranas_de_la_Provincia_de_Santa_Fe_Segunda_Edicion)
- 62.** UNESCO/WMO Glosario Internacional de Hidrología (2nd revised ed., 1992). <http://unesco Guatemala.org/wp-content/uploads/2014/11/glosario.pdf>
- 63.** Villanueva, M & Iglesias, L. (1984). Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. IGME. Madrid, España. [https://www.igme.es/biblioteca/Libros\\_agotados/pozos\\_acuiferos\\_2.pdf](https://www.igme.es/biblioteca/Libros_agotados/pozos_acuiferos_2.pdf)

- 64.** Villarroya, F.(2009). Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. Universidad Complutense, Madrid, España.  
<http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>
- 65.** Walton, W. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Surv. Bull. 49. 1: 81. Urbana, Illinois.  
<https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/B/ISWSB-49.pdf>
- 66.** Yepes, V. (6 de abril del 2020). Drenaje en excavaciones sobre acuíferos confinados: pozos de alivio. Poli blogs.  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/04/06/drenaje-en-excavaciones-sobre-acuiferos-confinados-pozos-de-alivio/>
- 67.** Zúñiga, M & Gálvez, A. (2019). Modelamiento y evaluación de la intrusión marina en el acuífero Chilca, Lima. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.  
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/628080>

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 – Matriz de Consistencia	147
Anexo 2 – Encuesta a ingenieros	148
Anexo 3 – Respuesta del cuestionario a los ingenieros civiles	149
Anexo 4 – Licencia de uso de agua subterránea	152
Anexo 5 – Características técnicas de los pozos	156

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título de la investigación						
MODELO MATEMÁTICO MODFLOW PARA DETERMINAR EL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO EXPLOTADO UBICADO EN EL DISTRITO DE SAN JOSÉ DE LOS MOLINOS - PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE ICA						
Elaborado por:						
Arom Gabriel Tito Pizarro						
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES			METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	Variable Independiente	DIMENSIÓN	INDICADORES	DISEÑO
¿En qué medida el modelo matemático modflow contribuirá en <b>determinar el estado actual del sistema acuifero explotado</b> , ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?	Elaborar un modelo matemático Modflow para <b>determinar el estado actual del sistema acuifero explotado</b> ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	El modelo matemático Modflow <b>contribuye para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado</b> ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	Modelo matemático MODFLOW	Piezometría de pozos	Condiciones iniciales	Tipo de Investigación: Aplicada
				Prueba de bombeo de pozos	Caudal	Nivel de Investigación: Explicativa
					Transmisividad	
					Conductividad hidráulica	Diseño de Investigación: No experimental, transversal y cuantitativa
				Coefficiente de almacenamiento	Se observa y analiza el comportamiento hidrológico respecto a los pozos profundos con la finalidad de analizar la variabilidad temporal y espacial de las aguas subterráneas	
Niveles de agua de pozos	Nivel estático	<b>MUESTRA</b>				
	Nivel dinámico	<b>Población:</b> Los 61 pozos profundos ubicados en San José de los Molinos				
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	Variable dependiente	Estados de las aguas subterráneas	Reserva explotable	<b>Muestra:</b> Los 4 pozos profundos ubicados en San José de los Molinos Pozo 35 Profundidad: 22.5m Caudal: 50 l/s Pozo 39 Profundidad: 28.5 m Caudal: 30 l/s Pozo 41 Profundidad: 37.80 m Caudal: 12 l/s Pozo 49 Profundidad: 38.62 m Caudal: 40l/s
¿Cuál es la influencia del <b>levantamiento de la piezometría de los pozos</b> para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?	Analizar los <b>levantamientos de la piezometría de los pozos</b> para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	El levantamiento de la piezometría de los pozos <b>contribuyó en gran medida</b> en determinar el modelo matemático para el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	Estado actual del sistema acuifero explotado		Explotación	
					Sobreexplotación	
					Estados de las aguas subterráneas	
¿Cuál es la influencia de <b>la prueba de bombeo</b> para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?	Analizar <b>las pruebas de bombeo</b> para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	La prueba de bombeo <b>contribuyó en menor medida</b> en determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	Estado actual del sistema acuifero explotado		Constante	
¿Cuál es la influencia del <b>levantamiento de los niveles de agua</b> para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica?	Analizar los <b>levantamientos de los niveles de agua</b> para determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica	El levantamiento de los niveles de agua <b>contribuyó en gran medida</b> en determinar el estado actual del sistema acuifero explotado ubicado en el distrito de San José de los Molinos-Provincia y departamento de Ica		Estado actual del sistema acuifero explotado		Nivel de la napa freática
			Descenso		Plan de trabajo y aspectos éticos	
			Recolección y procesamiento de información			
Desarrollo de la investigación: modelo matemático y software Modflow						

## **Anexo 2**

### **Encuesta a Ingenieros Civiles**

#### **A. Datos Generales**

Sexo: Femenino ( ) Masculino ( )

Nombre y Apellidos:

Especialización:

Años de experiencia:

CIP:

#### **B. Preguntas**

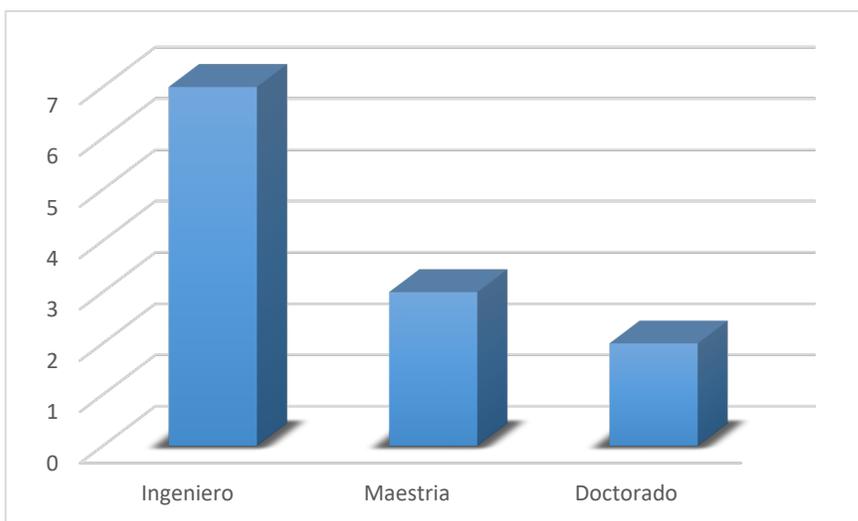
1. **¿Qué propuesta sugiere para mejorar el título de la investigación?**
2. **¿Cuál es la importancia de determinar el estado actual de explotación del acuífero, aplicado en el distrito de San José de los Molinos-Ica ?**
3. **¿Qué objetivos se podrían plantear en esta investigación?**
4. **¿Qué aspectos se deben de tener en cuenta en el estudio para determinar el estado actual de explotación del acuífero?**
5. **¿Cuáles serían los beneficios o aportes que se espera de esta investigación?**
6. **¿Cuál es el problema principal que genera la explotación del acuífero**

## ANEXO 3

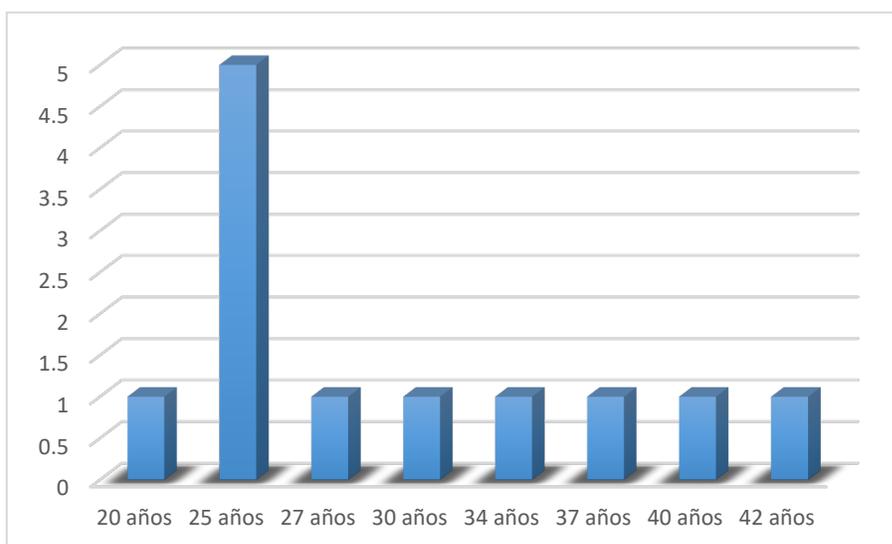
### Respuestas del cuestionario a los Ingenieros Civiles

#### A. Datos Generales

Se encuestaron a diez ingenieros civiles; 7 varones y tres mujeres; de los cuales el mínimo de años de experiencia es 20 años, además dos de ellos tiene una maestría en hidráulica y enseñan en la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y uno de ellos tiene un doctorado en hidráulica en Rusia.



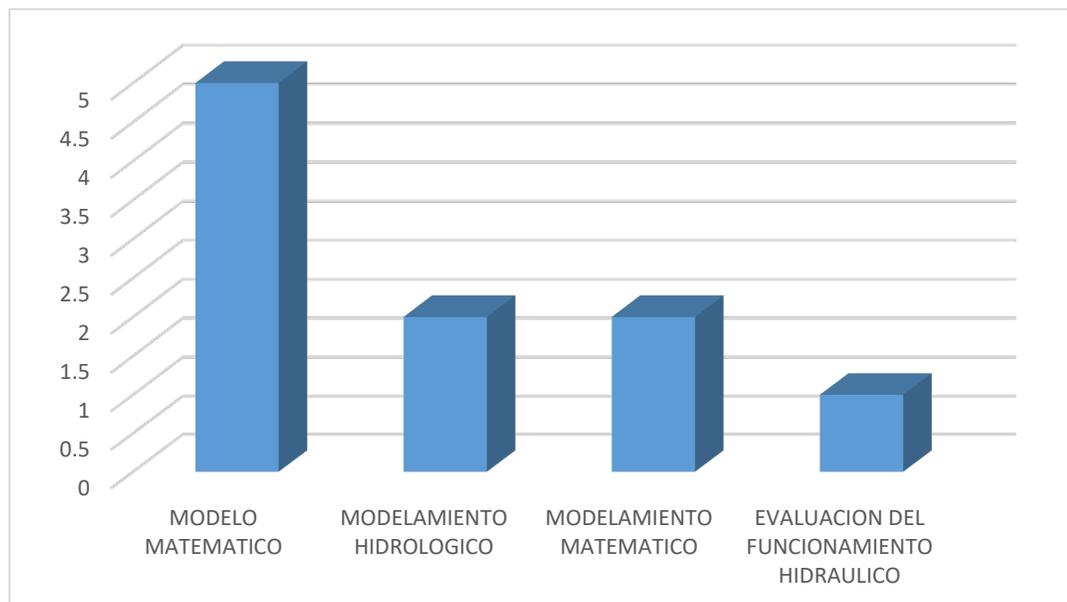
Histograma de grados académicos



Histograma de años de experiencia

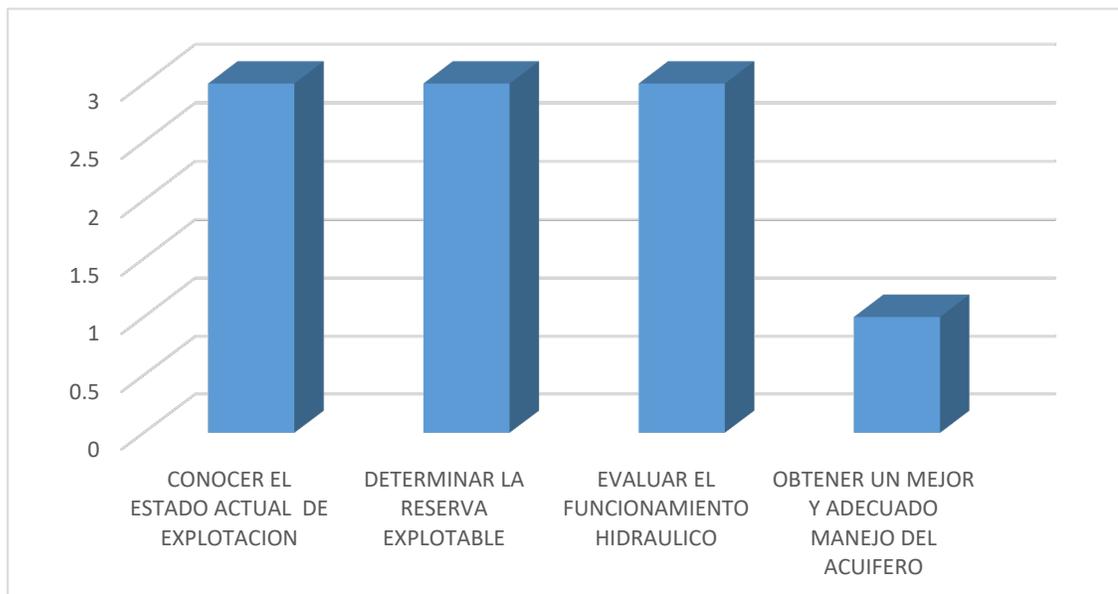
## B. Preguntas

### 1. ¿Qué propuesta sugiere para mejorar el título de la investigación?



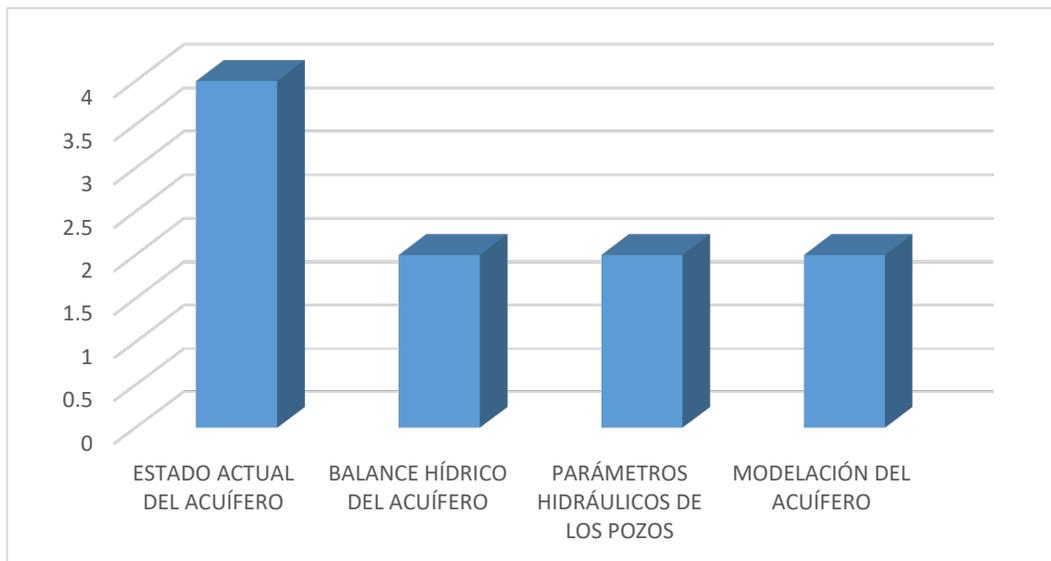
Histograma de la mejora del título de investigación

### 2. ¿Cuál es la importancia de determinar el estado actual de explotación del acuífero, aplicado en el distrito de San José de los Molinos-Ica ?



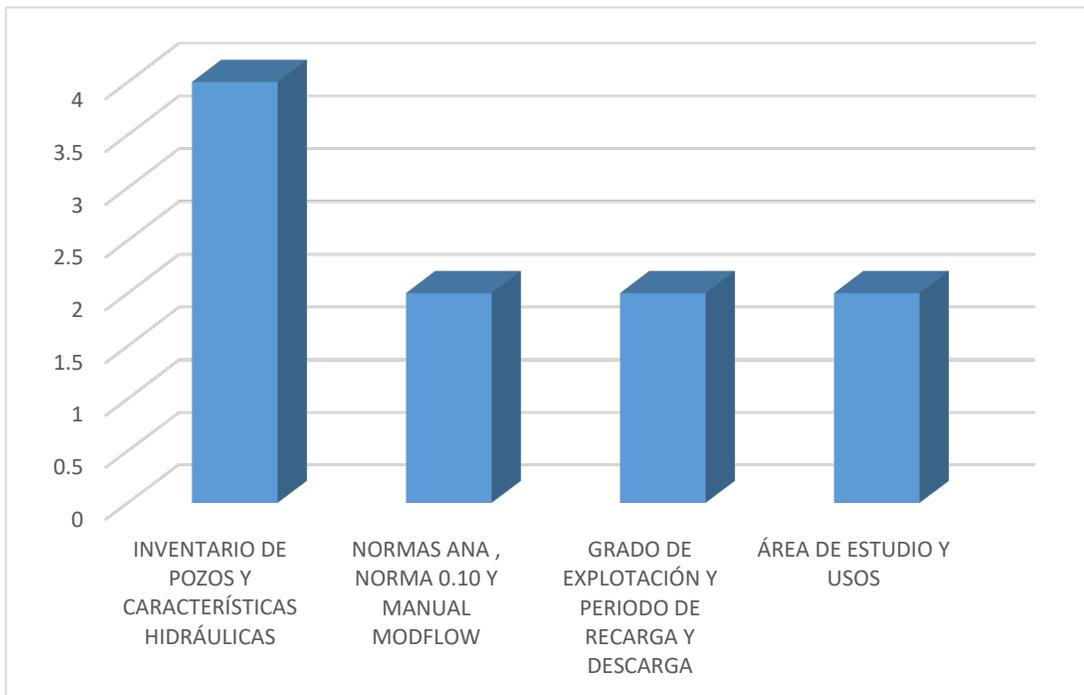
Histograma de la Importancia de la investigación

**3. ¿Qué objetivos se podrían plantear en esta investigación?**



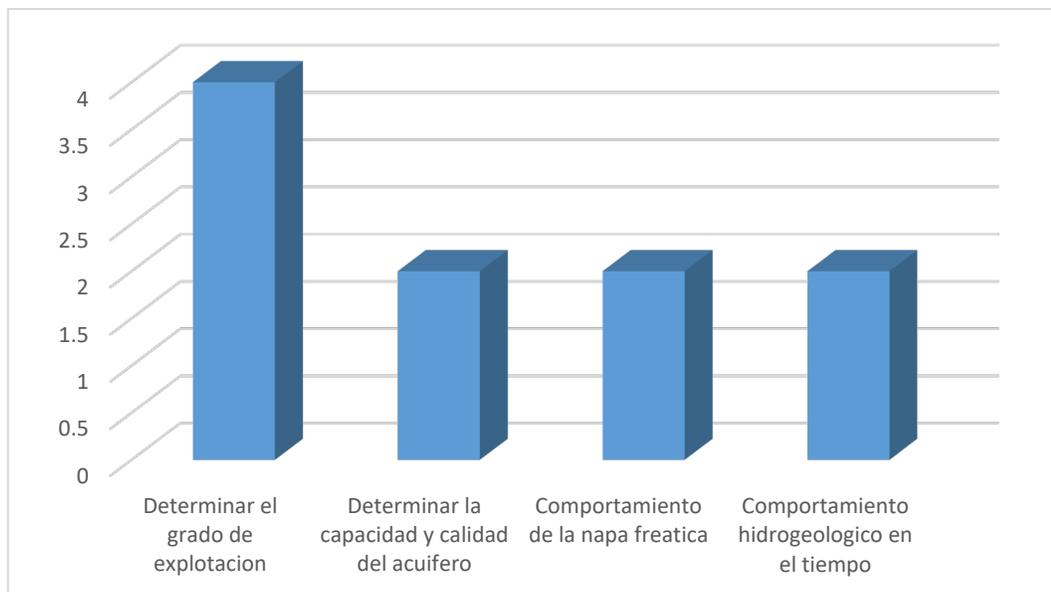
Histograma de objetivos

**4. ¿Qué aspectos se deben de tener en cuenta en el estudio para determinar el estado actual de explotación del acuífero?**



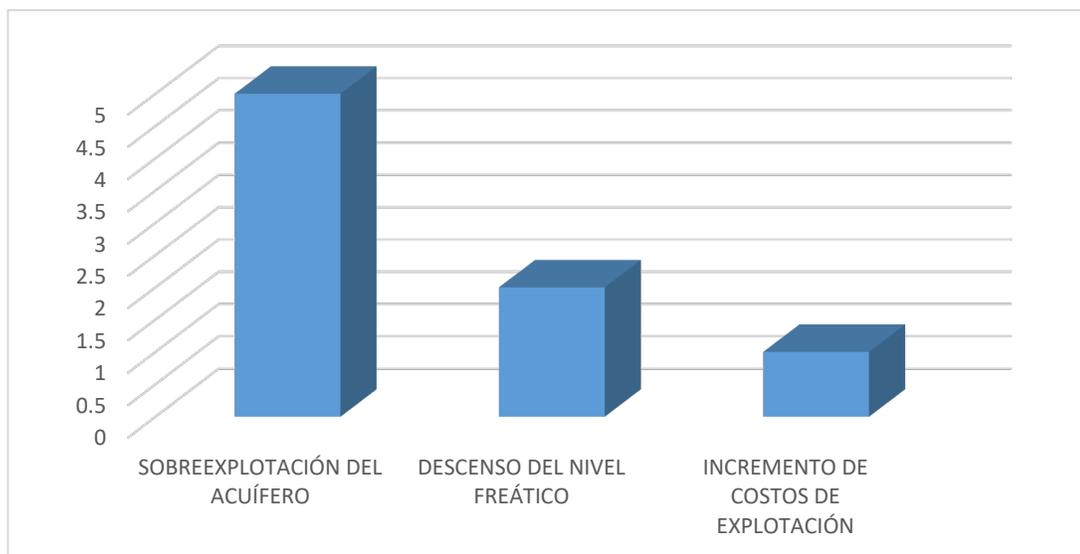
Histograma para determinar el estado actual de explotación

**5. ¿Cuáles serían los beneficios o aportes que se espera de esta investigación?**



Histograma de beneficios de la investigación

**6. ¿Cuál es el problema principal que genera la explotación del acuífero?**



Histograma de problemas de investigación

**ANEXO 4**

**LICENCIA DE USO DE AGUA SUBTERRÁNEA**

**FORMULARIO N° 001****SOLICITUD**

Señor

*Autoridad que aprueba el trámite que se solicita (ver el TUPA-ANA)*Presente.-

Solicita:

<i>Colocar el Procedimiento Administrativo de acuerdo al TUPA de la Autoridad Nacional del Agua</i>
---

**Datos del Solicitante:**

➤ Nombre o Razón Social:	
➤ DNI / RUC:	
➤ Domicilio Legal:	
➤ Representante Legal:	
➤ Documento de Identidad del representante legal:	
➤ Correo Electrónico de Contacto	
➤ Teléfono de contacto	

**Detalle de lo solicitado:**

--

**Requisitos que se adjuntan a la solicitud:**

1.	
2.	
3.	
4.	
5.	

Declaro que los datos consignados en la documentación presentada se encuentran sujetos a lo regulado por la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General.

**POR LO TANTO:**

Solicito a usted acceder a lo solicitado.

\_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_

---

 Firma del solicitante o representante legal

**FORMULARIO N° 002**

**COMPROMISO DE PAGO POR DERECHO DE INSPECCIÓN OCULAR**

Yo....., identificado con DNI N°....., con domicilio legal en (Calle, N°, distrito, provincia, departamento) y correo electrónico, me comprometo a efectuar el pago por derecho de inspección ocular referente al procedimiento administrativo:

.....  
.....  
....., el mismo que estoy tramitando ante la .....  
....., conforme a lo dispuesto por el TUPA de la ANA vigente.

Lugar y fecha: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_

\_\_\_\_\_  
Firma del solicitante o representante legal

## **ANEXO 5**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS POZOS**

