



# ESTUDIO BÁSICO DIAGNÓSTICO PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFERO, CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL



## RESUMEN EJECUTIVO



Septiembre 2021

## EQUIPO PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

*Jefe de estudio: Alejandro Arenas*

*Especialista hidráulico: Juan Torres*

*Especialista hidrogeológico: Juan Torres*

*Especialista en geología: Igor Aguirre*

*Especialista geotécnico: Rodrigo Zapata*

*Ingeniero de proyectos: Marco Matamala*

*Ingeniero de proyectos: Gustavo Romero*

*Ingeniero de proyectos: Jonás Valdivieso*

*Ingeniero de proyectos: Patricio Muñoz*

*Especialista en Geomensura: Marcos Díaz*

*Apoyo Topografía: Rodrigo Arenas*

*Operario de control de campo: Roberto Sánchez*

## EQUIPO PARTICIPANTE CNR

*Coordinadora: Tania Fernández*

*Revisores: Leonardo Pizarro y Patricio Espinoza*

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
<b>2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>3</b>
2.1	ENSAYOS GEOFÍSICOS.....	3
2.2	SONDAJES DE EXPLORACIÓN.....	6
2.3	MECÁNICA DE SUELO, ENSAYOS DE INFILTRACIÓN .....	9
2.4	PRUEBAS DE BOMBEO.....	11
2.5	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO .....	12
<b>3</b>	<b>SELECCIÓN DEL SITIO PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFERO .....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>CONSTRUCCIÓN Y HABILITACIÓN DEL SISTEMA DE RECARGA .....</b>	<b>17</b>
4.1	DIMENSIONAMIENTO DE LAS OBRAS DE RECARGA .....	17
4.2	CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL .....	18
<b>5</b>	<b>RESULTADOS SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL.....</b>	<b>24</b>
5.1	MONITOREO DE NIVELES FREÁTICOS.....	25
5.2	RESULTADOS DEL SISTEMA DE RECARGA .....	38
5.3	ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUA.....	40
5.4	MODELO DE INFILTRACIÓN HYDRUS 1D.....	42
5.5	PLANES DE ACCIÓN ANTE EVENTUALES CONTAMINACIONES .....	44
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>
7.1	GENERALES.....	48
7.2	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	49
7.3	OPERACIÓN Y MONITOREO .....	50

**NDICE DE FIGURAS**

Figura 1-1: Área del estudio. ....	2
Figura 2-1: Perfil de resistividades (estaciones TEM-1 a TEM-4, Perfil TEM).....	6
Figura 2-2: Ubicación sondajes.....	8
Figura 2-3: Macro ensayos de Macro infiltración.....	11
Figura 2-4: Detalle Levantamiento canales mediante RTK.....	13
Figura 3-1: Exploraciones para definir el nuevo sitio del piloto de recarga. ....	16
Figura 4-1: Excavación de la obra de recarga artificial (marzo 2020).....	19
Figura 4-2: Esquema en Planta de Balsas, Canales y Vertederos. ....	20
Figura 4-3: Piloto de recarga en operación .....	21
Figura 4-4: Registros fotográficos de vertedero y compuertas.....	22
Figura 5-1: Ubicación de puntos de monitoreo niveles de freáticos.....	26
Figura 5-2: Evolución Nivel estático pozos y sondajes. ....	27
Figura 5-3: Extracción de datos de sensor de presión ubicado en vertedero de salida.....	28
Figura 5-4: Nivel de agua registrada en Balsas, en sondajes P05, P06 y P07 y registro niveles pozos .....	29
Figura 5-5: Niveles freáticos en pozos de monitoreo en relación con la distancia a las balsas. ....	32
Figura 5-6: Caudales registrados en los sensores de los vertederos 1 y 2 .....	35
Figura 5-7: Relación Carga hidráulica en balsa y caudal infiltrado .....	37
Figura 5-8: Resultados de parámetros hidráulicos.....	43
Figura 5-9: Aumento de niveles freático dada una carga hidráulica de 2,5m en las balsas.....	44

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1: Cuadro de resultados del levantamiento geofísico ERT y TEM .....	6
Tabla 2-2: Resumen de sondajes construidos .....	7
Tabla 2-3: Comparación de los distintos métodos de ensayos de infiltración utilizados.....	10
Tabla 2-4: Resultados macro ensayos de infiltración en el sitio 2.....	11
Tabla 4-1: Análisis para determinar las dimensiones de la balsa.....	17
Tabla 4-2: Análisis de costos de las obras y litro de agua infiltrada .....	23
Tabla 5-1: Aumento de niveles freáticos debidos a la recarga artificial.....	31
Tabla 5-2: Resultados de volúmenes infiltrados en el proyecto de recarga artificial de acuífero .....	39
Tabla 5-3: Puntos de monitoreo de calidad físico-químico de aguas.....	40

## **1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

### **1.1 Introducción**

El presente informe corresponde al resumen ejecutivo del Estudio “Diagnóstico Piloto de Recarga Artificial de Acuífero, cuenca del Río Cachapoal” que Con Potencial está desarrollando para la Comisión Nacional de Riego (CNR) desde agosto del año 2019.

El estudio, se enfoca en las aguas subterráneas, y su recarga artificial de acuíferos, de manera de aprovechar los excedentes de aguas superficiales en épocas donde no se utiliza dicha fuente para el riego, y aprovechar de recargar los acuíferos.

Existen diversas técnicas o modalidades de recarga de acuíferos, en este estudio se ha desarrollado un sistema de recarga por balsas de infiltración, para lo cual se ha debido realizar un levantamiento de información de múltiples variables que permitan una detallada caracterización de la zona, y con ello escoger un sitio apropiado para la experiencia piloto.

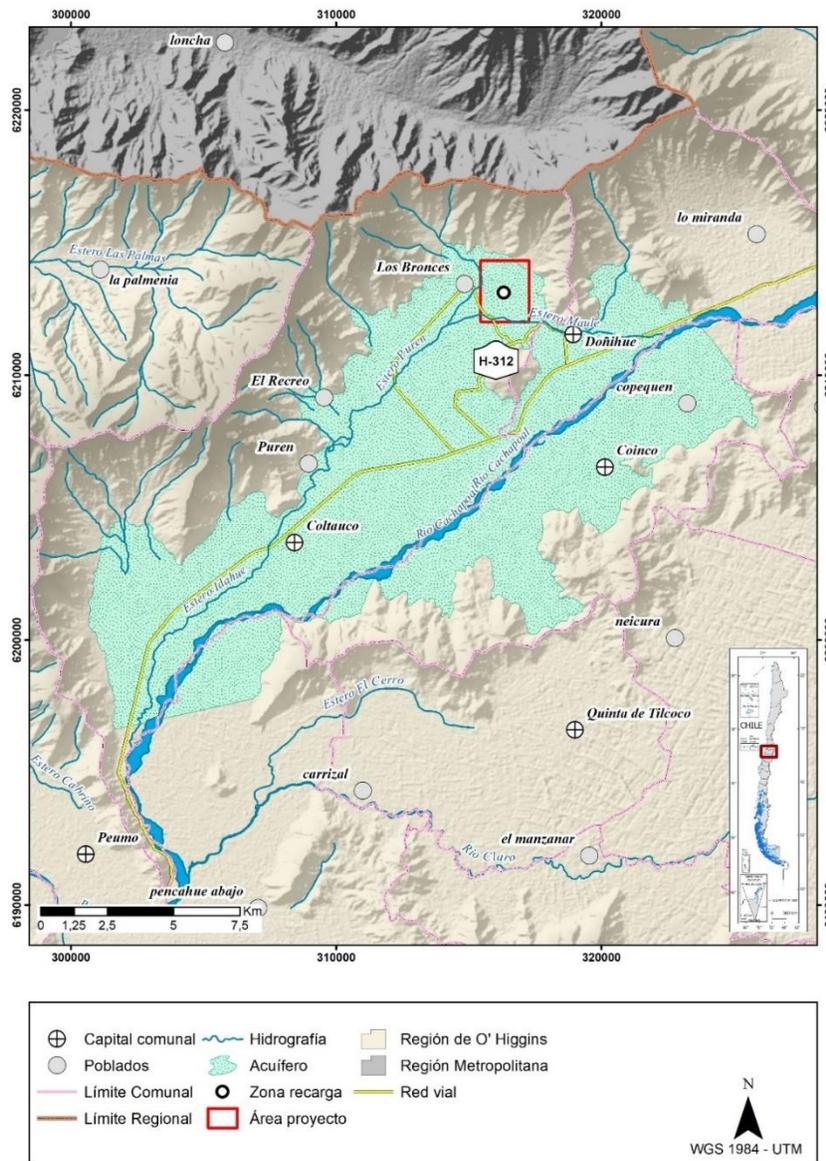
A su vez se ha debido realizar una revisión de antecedentes que contribuya con el conocimiento de la zona, desde el punto de vista hidráulico, hidrogeológico y meteorológico, y comprender las contribuciones al sistema hídrico subterráneo en estudio.

La existencia de usuarios agrícolas en la zona ha sido una oportunidad, para en conjunto con este grupo de interés haber realizado la experiencia piloto, tanto por la utilización del sitio respectivo, como por la información local que los agricultores de la zona tienen y que por experiencia propia han adquirido.

### **1.2 Objetivos**

El objetivo central de este estudio es dimensionar, implementar, evaluar y monitorear una experiencia piloto de recarga artificial de acuíferos, en un área de la segunda sección del Río Cachapoal, para generar conocimientos específicos en el diseño y operación de este tipo de obras, en apoyo al desarrollo de proyectos de infiltración futuros, que mejoren la disponibilidad del recurso hídrico para el riego.

El sitio en el que se implementó esta iniciativa fue definido en las bases técnicas del estudio, sin embargo, dadas las razones mencionadas en los informes de etapas anteriores, la ubicación fue levemente modificada para obtener los resultados esperados. La nueva ubicación del sitio se encuentra en el fundo “Quimávida”, administrado por la Fundación Escuela Agrícola San Vicente de Paul y se muestra en la Figura 1-1. El presente estudio entrega, como producto final, un informe técnico con todos los resultados de las experiencias del piloto de recarga artificial realizado con aguas del río Cachapoal portadas por el canal Doñihue-Parral.



Fuente: Elaboración propia  
**Figura 1-1: Área del estudio.**

## 2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés para el estudio es una extensión que permita tener una mirada integral de la zona, de manera de conformar una caracterización adecuada para posteriormente escoger un sitio apropiado para la experiencia del piloto de recarga.

Para esto se realizaron 2 tareas, la primera consistente en una revisión de antecedentes existentes de relevancia para los fines del estudio, y la segunda un levantamiento de información realizado en campañas de terreno en el área de interés.

Los antecedentes existentes fueron principalmente datos de niveles piezométricos de estaciones de monitoreo de DGA, y resultados de pruebas de bombeo disponibles de habilitaciones de pozos existentes.

En cuanto al levantamiento de información en terreno se realizaron campañas de las siguientes componentes:

- 1) 8 calicatas con ensayos de infiltración y permeabilidad
- 2) Ensayos Geofísicos en 2 campañas
- 3) Sondajes de Exploración en 2 campañas
- 4) Pruebas de Bombeo
- 5) Levantamiento topográfico del sitio de aproximadamente 4 ha, y canales de riego en el entorno

### 2.1 Ensayos geofísicos

Los ensayos geofísicos en la zona de estudio se realizaron en 2 campañas con métodos de prospección geofísica denominados Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y Transiente electromagnético (TEM).

En la Campaña 1 se realizó un perfil ERT-1 y 5 estaciones TEM. En la Campaña 2 se realizaron 4 perfiles ERT y 5 estaciones TEM.

### **2.1.1 Campaña 1**

A partir de este levantamiento geofísico se generaron modelos de distribución espacial de zonas de resistividad relativamente homogéneas las que se relacionan con la geometría acuífera y características hidrogeológicas del sector estudiado considerando en su interpretación los antecedentes.

La estrategia consideró realizar un perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) considerando obtener una buena resolución lateral de las resistividades del sub-suelo a lo largo de la línea conformada por los tres (3) Sondajes geotécnicos, P01, P02 y P03 perforados. Las estaciones TEM fueron medidas mediante la configuración one-loop, utilizando una sola antena en forma transmisora y receptora considerando un loop cuadrado de 50 m x 50 m.

De acuerdo con la distribución de resistividades y a los antecedentes de la perforación de los Sondajes geotécnicos y pruebas de permeabilidad realizadas en determinados niveles de estos sondajes, se concluyó que, las unidades: somera, intermedia y basal corresponden a las zonas no saturada, acuífero y basamento respectivamente. De acuerdo a la información de los sondajes geotécnicos, las resistividades menores detectadas para la unidad intermedia se pueden interpretar con una mayor proporción de finos (limo-arcilla), posiblemente con una fuerte componente de origen aluvial. Por otro lado, las resistividades mayores se pueden interpretar como depósitos no consolidados con un mayor contenido de material clástico de gravas y arenas y con menores porcentajes de finos, posiblemente con una fuerte componente de origen fluvial. En este sentido, para el ensayo de recarga artificial, se recomendó evitar infiltrar agua sobre el cuerpo de 25-30 Ohm-m ubicado entre los 100-160 m desde el origen del perfil ERT-1 y a profundidades en el rango de 10-30m de profundidad, el cual se interpreta como un nivel de permeabilidad relativa menor respecto del resto del acuífero del sitio de estudio.

### **2.1.2 Campaña 2**

Los trabajos de terreno se ejecutaron durante el mes de enero del año 2020. En terreno, se realizaron cuatro (4) perfiles de ERT y se levantaron cinco (5) estaciones TEM.

A los perfiles ERT fueron realizados mediante el arreglo electródicos Dipolo-Dipolo y con una separación dipolar de 10 m.

Las estaciones TEM se realizaron mediante la configuración one-loop, utilizando una sola antena en forma de antena transmisora y receptora considerando un loop cuadrado de 50mx50m y de 75mx75m. Con las primeras cuatro estaciones TEM se construyó un perfil geoelectrico denominado Perfil TEM.

La Figura 3-1 muestra la ubicación de los perfiles ERT y de las estaciones TEM. En esta figura, se incluye la localización de los Sondajes geotécnicos P04, P05 y P06, mencionados anteriormente.

- **Perfil geoelectrico mediante ERT**

Los detalles y resultados de la inversión desarrollada para estos perfiles se muestran en el **ANEXO B**, donde las figuras B1 a B4 presentan los datos adquiridos, el modelo sintético y los resultados de la inversión realizado para estos perfiles ERT.

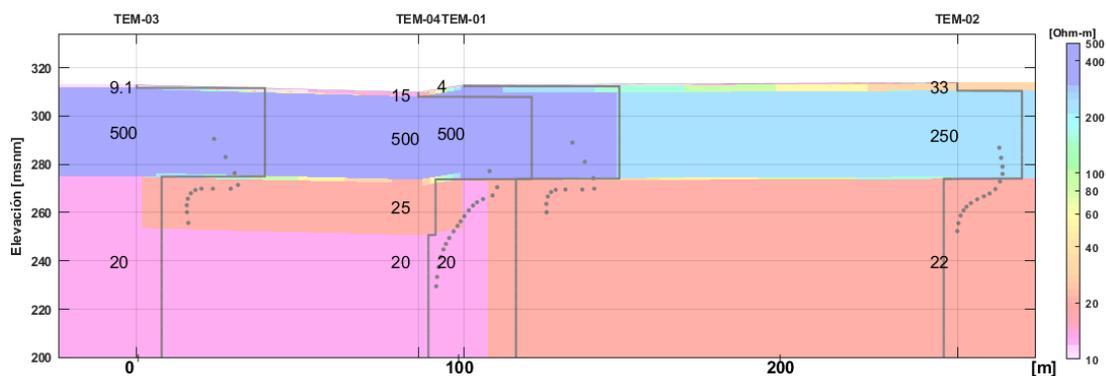
De la integración de datos de resistividad de los perfiles de ERT se pueden reconocer tres niveles con resistividades y profundidades características, las que se describen más adelante

- **Perfil geoelectrico mediante TEM (Perfil TEM) y estación TEM-5**

Los resultados de las prospecciones TEM permitieron modelar las resistividades del subsuelo en el sector de las estaciones TEM-1 a TEM-4, ubicado en el extremo norte del área estudiada y en el sitio de la estación TEM-5 ubicado en el extremo sur del área estudiada. Las primeras cuatro estaciones TEM, al estar alineadas en una dirección definida, permitieron construir una sección geoelectrica o Perfil TEM que muestra las variaciones de resistividad del subsuelo a una profundidad de investigación mayor que los perfiles de ERT. De esta forma fue posible complementar la geometría acuífera.

El perfil de resistividad TEM que se presenta en la Figura 2-1, muestra gráficamente los resultados de la modelación (Tabla B1) agrupa las estaciones TEM cercanas entre sí (TEM-1, TEM-2, TEM-3 y TEM-4).

De acuerdo con la distribución de resistividades y a los antecedentes de la perforación de los Sondajes geotécnicos y pruebas de permeabilidad realizadas por la empresa Con Potencial en determinados niveles de estos sondajes, se proponen las siguientes unidades geoelectricas.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2-1: Perfil de resistividades (estaciones TEM-1 a TEM-4, Perfil TEM).**

**Tabla 2-1: Cuadro de resultados del levantamiento geofísico ERT y TEM**

UNIDAD	RESISTIVIDAD	PROF.	INTERPRETACIÓN
Superior	4-200 Ohm-m	variable hasta 10 m	suelo o tierra vegetal (hasta 1-2 m), subyacido por grava y arena con finos en menor cantidad. Contenido de humedad variable, mayor en torno a los canales. Se correlaciona con la zona no saturada.
Intermedia	180-800 Ohm-m	variable entre 30-41 m	grava, bolones con arena y proporciones menores de finos intersticiales. Se correlaciona con una zona saturada.
Inferior	20-25 Ohm-m	variable entre 65-75 m	similar a la unidad intermedia, pero se interpreta con un contenido mayor de finos y menor de granulometrías gruesas. Se correlaciona con la zona saturada.

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Sondajes de exploración

Se realizaron 6 sondajes en 2 campañas en la zona del estudio, que alcanzaron profundidades de hasta 55 m. Las columnas estratigráficas de cada sondaje permiten caracterizar la composición de los rellenos, que se realiza luego de la extracción inalterada de testigos a distintas profundidades.

En la Tabla 2-2 se presentan de manera resumida las principales características de los 6 sondajes.

**Tabla 2-2: Resumen de sondajes construidos**

ID Sondaje	Coordenadas UTM WGS84 H19S		Profundidad total (m)
	Este (m)	Norte (m)	
P01	316437	6213903	55
P02	316453	6213996	25
P03	316419	6213805	25
P04	316368	6213117	30
P05	316255	6213054	25
P06	316152	6213054	25

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.1 Campaña 1

Los trabajos fueron realizados entre los días 25 de septiembre y 04 de octubre del 2019 y consideraron la perforación mediante método diamantina de diámetro HQ. Los testigos recuperados se extrajeron mediante el ensaye SPT cada uno y dos metros. En esta primera campaña se realizaron 3 sondajes (denominados P01, P02 y P03) que permitieron conocer la composición del subsuelo a partir de una detallada descripción estratigráfica.

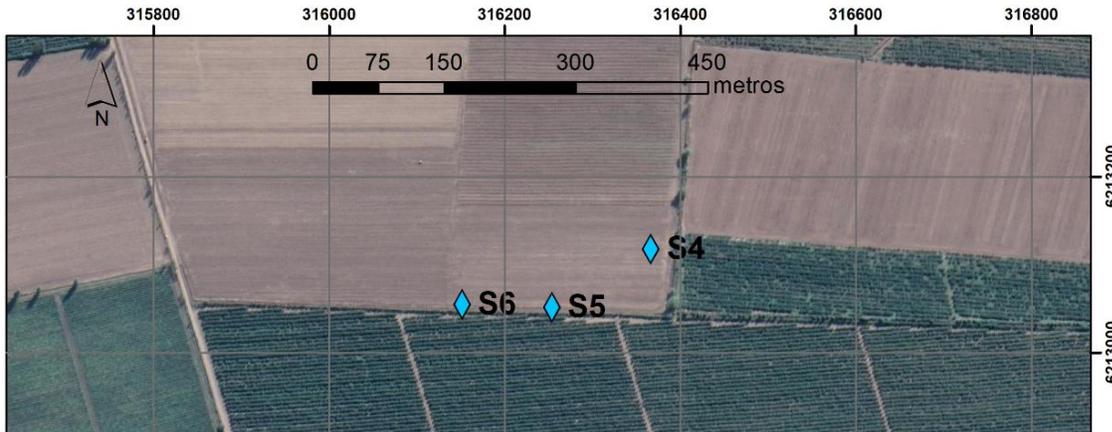
Las columnas estratigráficas de cada sondaje permitieron caracterizar la composición litológica de los rellenos sedimentarios que conforman el acuífero donde se pretendía implementar el proyecto de recarga artificial. En general, los resultados muestran que existe presencia de limo arcilloso hasta una profundidad de al menos 10 m. El sondaje P02, muestra una primera capa de limo arenoso hasta aproximadamente 2,5 m de profundidad, seguida de una capa compuesta de gravas angulares en matriz limo arcillosa.

### 2.2.2 Campaña 2

Durante el mes de enero del 2020, se realizó la segunda campaña de perforación, esta vez al interior del sitio definitivo para el sistema de recarga, mediante el método de perforación en diamantina con recuperación inalterada de las muestras de suelo, los que fueron denominados P04, P05 y P06. La ubicación de los sondajes se muestra en la Figura 2-2.

En los sondajes fueron realizadas mediciones de niveles freáticos. Además, se ejecutaron ensayos LeFranc de carga variable, sin embargo, debido al rápido descenso de los niveles de carga de agua dentro del pozo

durante los ensayos, producto de la granulometría gruesa de los sedimentos atravesados (superiores a 3"), no fue posible obtener un registro confiable de las permeabilidades que presentaban los sitios explorados.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2-2: Ubicación sondajes**

La información estratigráfica de estos sondajes se obtuvo de la descripción de las muestras obtenidas visualmente por el operador, complementadas por el autor de este informe a partir de una revisión de los testigos de perforación durante enero y febrero de 2020.

### 2.2.3 Ensayos de permeabilidad de suelo no saturado

Durante los trabajos de perforación de los Sondajes geotécnicos la empresa Ingexa Ltda en coordinación con la empresa Con Potencial realizaron determinaciones de permeabilidad vertical en rangos de profundidad específicos: 9-10 m, 10-11 m, 21-22 m, 24-25 m, 49-50 m). Adicionalmente, el día 29-10-2019, se realizó un levantamiento de los niveles estáticos y mediciones de conductividad eléctrica y pH de las aguas subterráneas de estos sondajes.

La permeabilidad fue determinada mediante un ensayo de carga variable, por lo cual se considera representa una estimación de la permeabilidad vertical. Se realiza una estimación de la permeabilidad horizontal, considerando un factor diez (10) veces mayor que la permeabilidad vertical. Para el caso del Sondaje P2, para el tramo entre 24-25 m no fue posible establecer un valor de permeabilidad dado que el nivel no descendió durante el tiempo de prueba, por lo que se estima un valor de permeabilidad muy bajo para este nivel. Mayor detalle se presenta en el **ANEXO A**.

Los resultados indican valores de permeabilidad muy bajos para las profundidades evaluadas: 9-10 m en el sondaje P02; 21-22 m y 49-50 m en el sondaje P01 y 10-11 m en el sondaje P03. Por el contrario, se observó una permeabilidad media en el sondaje P03 en 24-25 m de profundidad. Similar estimación resultó para la permeabilidad horizontal (valores muy bajos) en estos sondajes, excepto para el tramo de 10-11 m del sondaje P03 en donde si bien este valor de permeabilidad resultó ser el mayor de todas las determinaciones realizadas, su valor estimado corresponde a un valor de permeabilidad baja. Por otro lado, este valor podría corresponder a un nivel no saturado, dado que el nivel estático en este sondaje fue de 11,3 m el 29/10/2019.

Respecto a los valores de la profundidad del nivel estático y de los parámetros hidroquímicos medidos en los sondajes, si bien estos se midieron aproximadamente un mes luego de finalizados los trabajos de perforación, no se puede descartar que, al momento de estas determinaciones, en estos sondajes, persista cierta influencia del agua de perforación. Lo anterior podría ser el reflejo de los valores de conductividad eléctrica sin un patrón de aumento desde aguas arriba hacia aguas abajo, dados que desde el sondaje P02 hacia el P01 y P03 se registraron valores de conductividad eléctrica de 495, 363 y 577  $\mu S/cm$  y de pH de 6,54, 6,82 y 6,38, respectivamente. Otra posibilidad es que parte de estos resultados estén influenciados por la influencia de otros aportes, como las de los canales que bordean el área de estudio. La profundidad del agua subterránea presentó valores coherentes con un vector flujo desde el sondaje P02 hacia el P01 y P03 con profundidades de 2,1 m, 7,62 m y 11,30 m, respectivamente.

## **2.3 Mecánica de suelo, ensayos de infiltración**

### **2.3.1 Ensayos de infiltración**

Para la adecuada caracterización de los primeros metros atravesados se realizaron 8 calicatas con ensayos de infiltración para comparar y así elegir el sitio con las mejores características para la construcción de las balsas de infiltración. La Figura 3-1 presenta la ubicación de las tres primeras calicatas (C1, C2 y C3) construidas cada una en los posibles sitios de construcción del piloto de recarga artificial. A partir de los resultados obtenidos de estas 3 calicatas, el sitio elegido correspondió al asociado a la calicata C2, sitio en el cual se excavaron 5 calicatas adicionales (C4, C5, C6, C7 y C8).

Se presenta en la Tabla 2-3 la comparación de los resultados entre los distintos métodos de ensayos de infiltración utilizados.

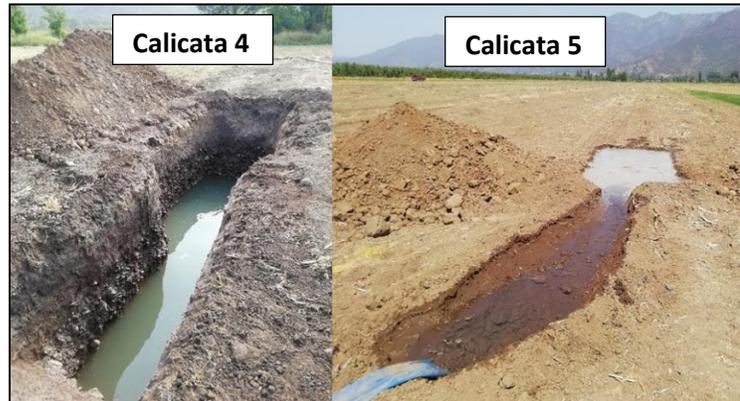
**Tabla 2-3: Comparación de los distintos métodos de ensayos de infiltración utilizados**

<b>Ensayos de infiltración</b>			
<b>ID</b>	<b>Porchet (cm/s)</b>	<b>Anillo único (cm/s)</b>	<b>Macro ensayo de infiltración (cm/s)</b>
C1	4,10E-03	1,20E-02	
C2	3,20E-01	7,50E-03	4,20E-03
C3	2,80E-03		
C4		2,00E-03	3,90E-04
C5			3,60E-03
C6		2,50E-02	1,10E-03
C7			7,10E-04

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2 Macro ensayo de infiltración

Aprovechando la proximidad del Pozo P07 y su capacidad para entregar un caudal de 80 l/s se decidió realizar ensayos de infiltración usando la calicata entera (ver Figura 2-3). Este tipo de ensayo tiene la ventaja de que se asemeja mucho más a las condiciones en las que funcionará el piloto de recarga. Se evitan los problemas de escala que tienen los ensayos hechos anteriormente causados por el tipo de suelo predominante en el sitio de estudio. La presencia de bolones de gran tamaño (diámetro > 10 cm) en el fondo o cercanías del agujero excavado para realizar los ensayos de infiltración podría afectar los resultados del ensayo, ya que reduciría el área de infiltración, obteniéndose infiltraciones menores a las reales. También, al disponer de 80 l/s y poder llenar una calicata con 20 m<sup>3</sup> de agua asegura que el suelo se sature, lo que permite obtener capacidades de infiltración en condición saturada. No se realizaron ensayos en la calicata 8 porque fue descartada por presentar un estrato de suelo fino de un espesor de 2,5 m.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2-3: Macro ensayos de Macro infiltración**

La capacidad de infiltración promedio entre las cinco calicatas es de  $2,0 \times 10^{-3}$  cm/s, lo que corresponde a una capacidad de infiltración media. La Tabla 2-4 muestra la variación espacial de la capacidad de infiltración en condición saturada.

**Tabla 2-4: Resultados macro ensayos de infiltración en el sitio 2**

Calicata	Infiltración (cm/s)
C2	4,2E-03
C4	3,9E-04
C5	3,6E-03
C6	1,1E-03
C7	7,1E-04
Promedio	2,0E-03

Fuente: Elaboración propia

Por último, cabe destacar que los macro ensayos de infiltración en calicatas pueden ser utilizados para todos los suelos que posean cierto grado de permeabilidad (exceptuando suelo impermeable), y teniendo en cuenta que se requerirá un respaldo hídrico de al menos de dos camiones aljibes, considerando una calicata con una profundidad de 3 m de ancho 1 m y de largo 2 m.

## 2.4 Pruebas de bombeo

Previo al inicio de los trabajos para la implementación del piloto de recarga del acuífero, se realizó una prueba de bombeo utilizando como punto de bombeo el pozo P07 y como punto de observación el "P04" ya que es el más próximo a la zona de bombeo, ubicado a 53 m.

En primer lugar, se registró el nivel estático en ambos pozos. De esta forma, el nivel estático del pozo Nuevo Fundo (P07) registró una profundidad de 15,7 m desde el nivel de terreno. Respecto al sondaje P04, este registró un nivel estático de 15,1 m desde el nivel de terreno. Estas mediciones permitieron inferir que ambos pozos se encuentran conectados al mismo acuífero ya que registran un nivel piezométrico bastante similar.

Posteriormente, se bombeó desde el pozo Nuevo Fundo (P07) un caudal de 80 l/s (máxima capacidad) durante 30 minutos. Mientras se realizaba esta operación se mantuvo una medición constante del nivel en el pozo de observación P04, esperando observar el efecto del cono de depresión generado por el bombeo de agua desde el acuífero. Estas mediciones evidenciaron que el nivel piezométrico en P04 descendió 20 cm. Respecto al pozo P07, este registró un nivel dinámico de 17,5 m de profundidad.

Finalmente, se detuvo el bombeo del pozo, y se procedió a medir la recuperación del nivel de agua en el pozo P04. La recuperación medida fue de 10 cm en un período de 10 minutos.

Se procedió a repetir la experiencia con el fin de obtener resultados concluyentes al respecto. En esta nueva oportunidad, se bombeo agua a máxima capacidad desde el acuífero durante 10 minutos. El nivel del P04 al detener el bombeo en el pozo registró un nivel de 15,29 m. Esta vez a los 10 minutos desde que se detuvo la prueba, el pozo P04 registró una recuperación de 7 cm alcanzando los 15,22 m de nivel piezométrico.

Los resultados obtenidos de estas pruebas de bombeo realizadas permitieron concluir que el P04 y el P07 se encuentran conectados al mismo acuífero.

## **2.5 Levantamiento topográfico**

En el sitio seleccionado se efectuó una campaña Topográfica, la cual fue desarrollada durante el mes de marzo de 2020. Las actividades desarrolladas contemplaron levantamientos topográficos mediante GPS en tiempo real (RTK) complementado mediante aerofotogrametría con UAV (Dron), utilizando nuevos puntos de referencias (CP-3 y CP-4), los cuales se encuentran referidos geográficamente al Datum WGS-1984, huso 19 de la proyección UTM, alturas ortométricas referidas al modelo Geoidal EGM08.

Con la finalidad de obtener la representación del terreno en estudio, se realizó un levantamiento de perfiles y detalles mediante GPS en tiempo real.

Adicionalmente, se levantaron todos los canales de riego existentes tomando 2 puntos en borde superior y 3 puntos en fondo canal, cada 5m. Levantamiento Aerofotogramétrico DRON UAV – Situación Con Proyecto. Esto con el objetivo de obtener una imagen aérea referencial, y detalle de las Obras ya finalizadas.

Los errores en posición y cota de los puntos de control en terreno (GCP) medidos mediante RTK v/s calculados se obtienen mediante Restitución Aerofotogramétrica. Se concluye que las desviaciones son menores a 2 cm en posición y a 3 cm en cota, lo que permite un alto grado de precisión y densidad de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) obtenidos.

Como resultado se obtiene una nube de puntos de una densidad de 13.892 puntos por m<sup>2</sup>, con un total de 114 millones de puntos con valor topográficos en un área de 4 hectáreas, con un distanciamiento de 1cm entre puntos capturados mediante esta tecnología. De esta forma es posible reconstruir un modelo digital 3D de alta resolución. En el **ANEXO C** se entregan los archivos de nubes de puntos y modelos digitales de elevación, además de una Imagen Ortorestituida de alta definición.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2-4: Detalle Levantamiento canales mediante RTK.**

### 3 SELECCIÓN DEL SITIO PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFERO

De la Guía Metodológica Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos de CNR (Julio 2020), se tiene que el método elegido para la recarga depende de las condiciones específicas del sitio y no hay reglas definidas o soluciones únicas para cualquier escenario dado. En definitiva, la decisión sobre qué método aplicar dependerá de una serie de factores que incluyen el costo, el suelo y las condiciones hidrogeológicas locales, la calidad de la fuente de agua y el área de terreno disponible, entre otros factores potenciales. **El tipo de acuífero es normalmente la primera consideración en la selección del método de recarga.**

Las piscinas, o balsas, de infiltración son generalmente depresiones poco profundas con una gran área de superficie diseñadas para infiltrar agua a través del suelo hacia un acuífero no confinado. Generalmente, se construyen fuera del cauce desde donde el agua superficial se desvía, ya sea por gravedad o por bombeo. El área de superficie debe ser suficiente para ubicar la estructura, ocupando entre unas pocas hectáreas hasta cientos de hectáreas.

Este método requiere una superficie suficiente para ubicar las estructuras de la piscina que generalmente ocupan áreas de unas pocas hectáreas para esquemas que recargan alrededor de 1 hm<sup>3</sup> de agua por año, hasta decenas o cientos de hectáreas para esquemas más grandes que recargan alrededor de 100 hm<sup>3</sup> o 1000 hm<sup>3</sup> de agua por año. La permeabilidad debe permitir tasas de infiltración suficientes para recargar el volumen de agua requerido durante el tiempo que esté disponible, normalmente se requiere  $\geq 0.5$  m/día.

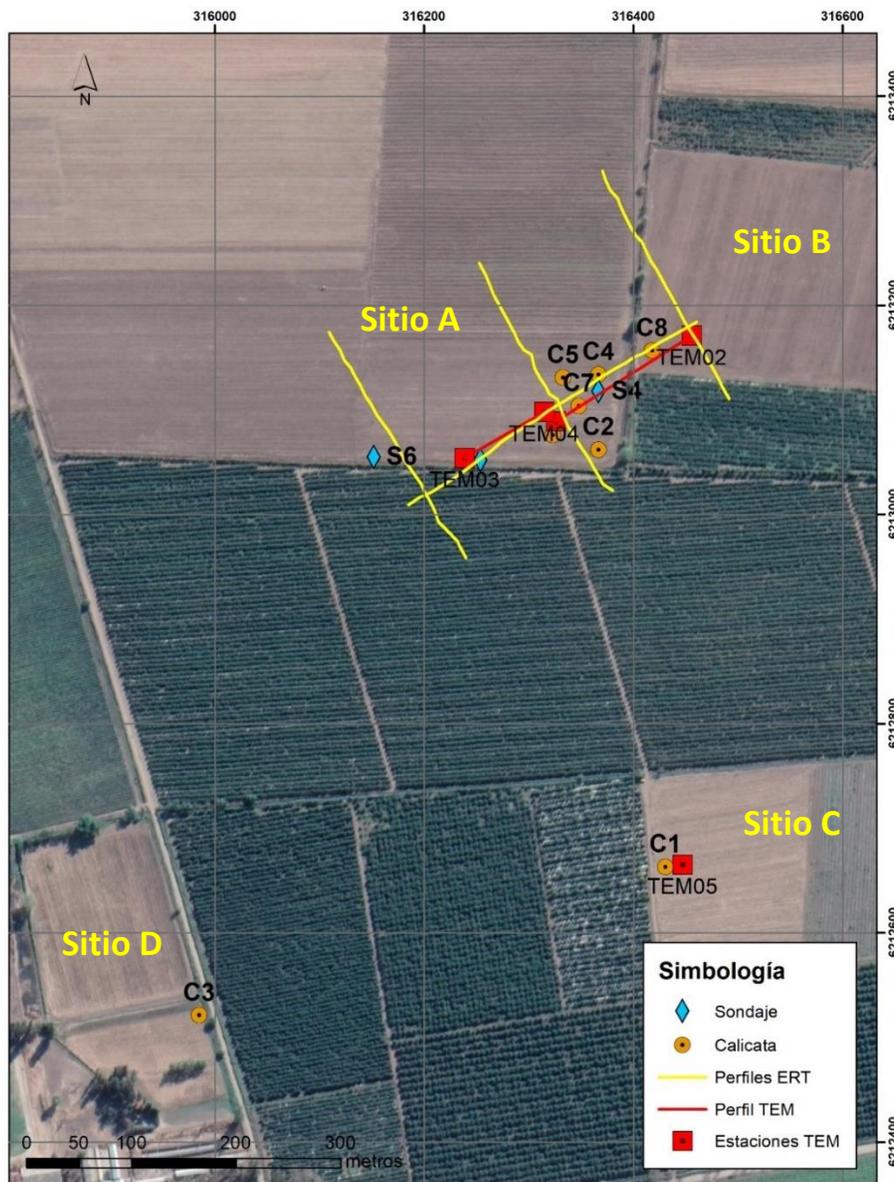
Con los antecedentes recopilados, se concluye que el sitio propuesto en primera instancia por la CNR no reunía las condiciones hidrogeológicas necesarias para un proyecto de recarga, lo que respaldado bajo una argumentación técnica y corroborado por los resultados obtenidos de los ensayos geofísicos, que presentaban resistencias asociadas a materiales arcillosos de baja a nula permeabilidad en los primeros 10 m de profundidad, y geotécnicos realizados en dicho sitio (calicatas, y sondajes y ensayos de infiltración), por lo que se decidió en común acuerdo con CNR, analizar otras opciones que garantizaran el correcto desarrollo del proyecto de recarga artificial de acuífero.

Posteriormente se continuó buscando nuevas alternativas, y se generaron 4 nuevos posibles sitios ubicados en las proximidades del primer sitio (aproximadamente a 1.500 m de distancia hacia el sur). Estos sitios resultaron tener mejores características, según el análisis de la información de 4 pozos profundos en el sector, con capacidad de producción de caudales entre 70 y 80 l/s.

Para seleccionar la nueva ubicación del piloto de recarga se efectuaron una serie de pruebas y exploraciones que permitieron determinar la mejor ubicación del sistema de recarga de entre las 4 opciones disponibles, las que fueron descritas en el acápite 2.

En la Figura 3-1 se presenta la ubicación de las cuatro alternativas propuestas; Sitio A, B, C y D, las distintas calicatas realizadas (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 y C8), sondajes (P04, P05 y P06) y 3 perfiles geofísicos de exploración y 5 TEM (TEM01, TEM02, TEM03, TEM04 y TEM05) ejecutados en los sitios mencionados.

Las columnas estratigráficas obtenidas en los sondajes (P04, P05 y P06) permitieron caracterizar la composición litológica de los rellenos sedimentarios que conforman el acuífero en el Sitio A, entregando características dominadas por gravas con una matriz arenosa, lo cual hace favorable para los sistemas de recarga artificial tipo balsas. Adicionalmente las interpretaciones de los ensayos geofísicos en el Sitio A corroboran las buenas características de los rellenos de este sector, así como la prueba de bombeo realizada en el P07, con observación en el P04.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Exploraciones para definir el nuevo sitio del piloto de recarga.

## 4 CONSTRUCCIÓN Y HABILITACIÓN DEL SISTEMA DE RECARGA

### 4.1 Dimensionamiento de las obras de recarga

Las obras de recarga incluyen además de la balsa de infiltración, un sistema de canales que desvíe las aguas del canal hasta la balsa y un sistema de monitoreo que permita medir continuamente el flujo de entrada y la infiltración en el fondo de la balsa.

La principal obra a dimensionar correspondió a la balsa de infiltración utilizada para la recarga artificial del acuífero. Las dimensiones de esta balsa fueron determinadas mediante un análisis que incorporó los resultados de los ensayos de infiltración realizados para diferentes configuraciones. Se escogió finalmente la alternativa que lograra infiltrar aproximadamente el volumen completo de la balsa en 1 día y a la vez que redujera los m<sup>3</sup> de excavación necesarios.

La Tabla 4-1 presenta las alternativas analizadas para determinar las dimensiones de la balsa de recarga.

**Tabla 4-1: Análisis para determinar las dimensiones de la balsa.**

Dimensiones Balsa	Profundidad Balsa (m)	Área (m <sup>2</sup> )	material a remover (m <sup>3</sup> )	Descenso diario (m)					
				5,2	4,3	1,7	0,9	0,8	0,4
				K (cm/s)					
				6E-03	5E-03	2E-03	1E-03	9E-04	5E-04
Caudal (l/s) infiltrado									
25*50	3	1.250	3.750	75	63	25	13	11	6
50x50	3	2.500	7.500	150	125	50	25	23	13
30*80	3	2.400	7.200	144	120	48	24	22	12
40*100	3	4.000	12.000	240	200	80	40	36	20
100*50	3	5.000	15.000	300	250	100	50	45	25

Fuente: Elaboración propia

El análisis indica que considerando un descenso diario de 1,7 [m], lo que equivale a infiltrar 4,32 millones de litros al día, y una permeabilidad de  $2 \times 10^{-3}$  cm/s (valor de permeabilidad conservador, obtenido de pruebas de infiltración directa en la zona las alternativas más atractivas corresponden a las 2 primeras configuraciones. Esto es, una balsa rectangular de 25x50 m<sup>2</sup> o bien, una balsa cuadrada de 50x50 m<sup>2</sup>.

Se adopta un esquema de dos Balsas de dimensiones 25x50m, para dar más flexibilidad operacional al sistema, permitiendo manejar de mejor forma la variabilidad de caudales de alimentación que pudiesen

estar disponibles (entre 50 y 200 l/s podrían estar disponibles desde Canal Doñihue - Parral, durante los meses de abril a agosto).

Se concluye que, el área total transversal de infiltración (considerando las dos balsas) será de aproximadamente 2.500 m<sup>2</sup> respecto a la profundidad de estas balsas, se define un óptimo de 3 m que asegurarán sobrepasar la barrera de material fino que se encuentra en los primeros 2 m en esta zona.

En cuanto al sedimentador propuesto en las fases iniciales del estudio, fue descartado dada las calidades químicas obtenidas en el primer muestreo en el canal de acceso al predio, por otra parte, se estimó que la red de canales que toma sus aguas desde el Río Cachapoal, sirve naturalmente como decantador natural de las partículas sedimentables.

#### **4.2 Construcción de sistema de recarga artificial**

La construcción de las piscinas o balsas de infiltración duró 3 meses, entre marzo y junio del año 2020.

Las balsas fueron diseñadas para que operen en forma continua y autónoma, y si se produce un exceso de entrada, este sería devuelto por el canal de salida. Con un caudal que puede variar según la oferta hídrica, pero que debe ser al menos de 50 l/s, si el caudal es superado las Balsas se llenan más rápido y después devuelven el excedente, si es menor, las Balsas se comienzan a vaciar. Siendo la balsa 2 la primera en vaciarse porque deja de pasar el exceso desde la balsa 1.

Las etapas de construcción fueron:

- 1) Escarpe y limpieza del terreno
- 2) Excavación de 9300 m<sup>3</sup> aproximadamente de terreno
- 3) Disposición del material de excavación
- 4) Construcción Obras de Arte principales; canaletas
- 5) Construcción de Obras de Arte secundarias; vertederos y compuertas
- 6) Instalación de dispositivos mecánicos; compuertas y otros
- 7) Instalación de dispositivos de medición: sensores de presión

El ANEXO E presenta los planos de las obras construidas.

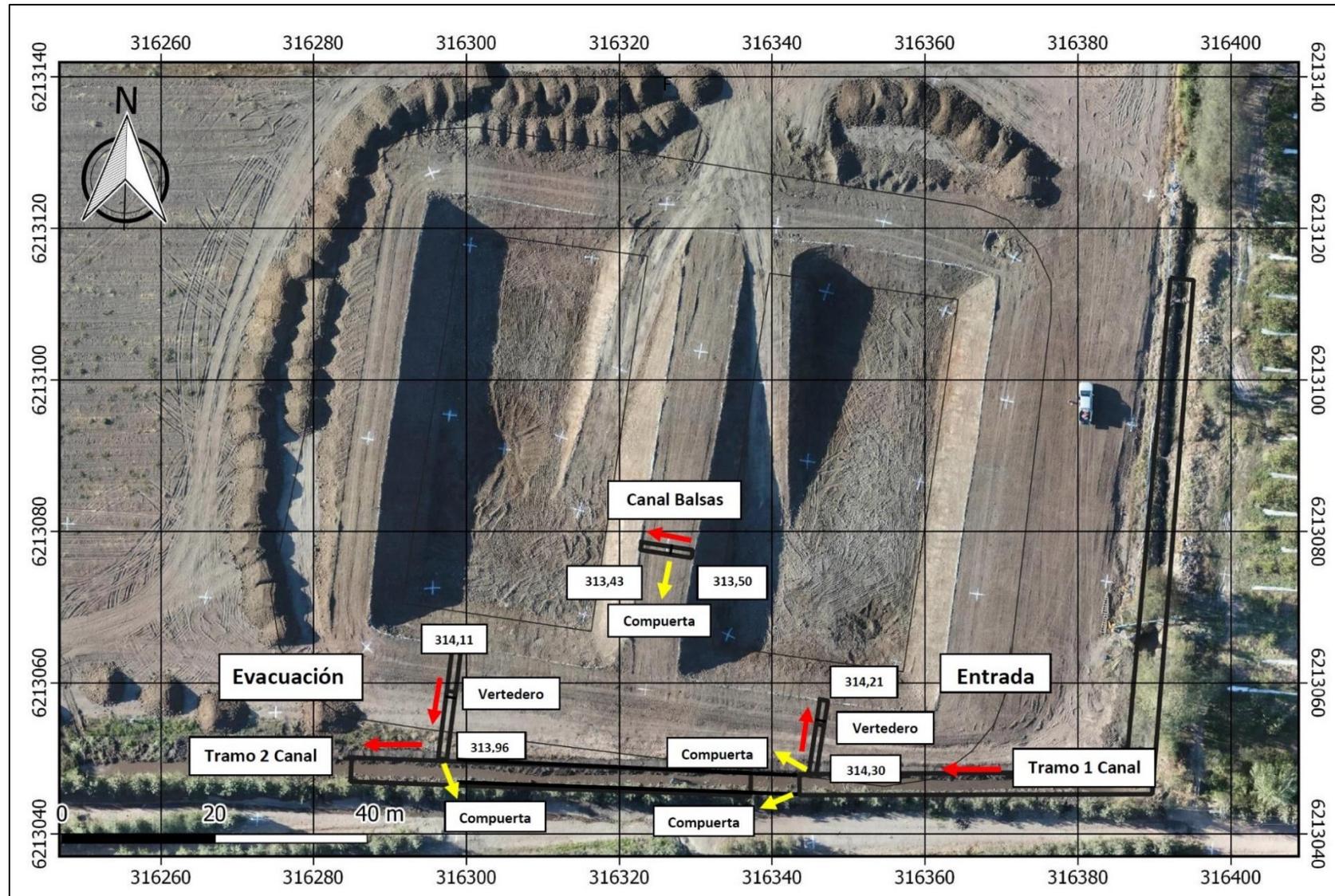
En la Figura 4-1 se presenta un registro fotográfico del piloto de recarga en la fase de construcción de las obras.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-1: Excavación de la obra de recarga artificial (marzo 2020).**

En la Figura 4-2 se presentan las obras materializadas para el sistema de recarga artificial de acuífero.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-2: Esquema en Planta de Balsas, Canales y Vertederos.

#### 4.2.1 Excavación piloto de recarga

Se construyen 2 balsas de recarga artificial de acuífero, de 3 m de profundidad, y dimensiones de 25x50 m cada una. Las balsas tienen las dimensiones que se detallan a continuación:

- Longitud (nivel de terreno): 60 m
- Ancho (nivel de terreno): 35 m
- Profundidad: 3 m
- Cota media nivel de terreno: 315 m.s.n.m.
- Ancho berma central: 7 m
- Longitud (fondo): 50 m
- Ancho (fondo): 25 m
- Cota de fondo Balsa 1: 312,0 m.s.n.m.
- Cota de fondo Balsa 2: 311,5 m.s.n.m.
- Talud de excavación: H:V = 1,5:1 (estable para los materiales muestreados)
- Área superficie de fondo: 1.130 m<sup>2</sup>



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-3: Piloto de recarga en operación**

#### 4.2.2 Construcción del Sistema de Recarga (canales de entrada y salida)

Se concluyen las obras y se instalan los vertederos de pared delgada en los cuales se instalaron los sensores de presión con registro continuo.

Los canales de entrega y de evacuación corresponden a canales recubiertos de hormigón, rectangulares, de 0,5 m de ancho por 1 m de alto y de un 1% de pendiente. De mismas características se diseñó una conexión entre ambas balsas para que el agua circule desde la balsa 1 a la balsa 2.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-4: Registros fotográficos de vertedero y compuertas**

### 4.2.3 Análisis de Costos

En la Tabla 4-2 se presentan los costos estimados por litro infiltrado, considerando un caudal infiltrado de 50 l/s a un horizonte proyectado de funcionamiento del sistema de recarga de 15 años. Como resultado se obtiene un valor por l/s infiltrado de \$25,4.

**Tabla 4-2: Análisis de costos de las obras y litro de agua infiltrada**

<b>Análisis de Costos</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor (\$)</b>	<b>Total (\$)</b>
Sondajes de monitoreo diamantina más habilitación (30 m)	4	\$ 10.000.000	\$ 40.000.000
Instrumental de medición de niveles	8	\$ 2.000.000	\$ 16.000.000
Calicatas	5	\$ 300.000	\$ 1.500.000
Ensayos de infiltración	10	\$ 250.000	\$ 2.500.000
Ensayos geofísicos	gl	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
Topografía	gl	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000
Excavación de material de las balsas (m <sup>3</sup> )*	11.750	\$ 6.000	\$ 70.500.000
Construcción de sistema de canalización	gl	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
Costos de mantención y operación anual	15	\$ 6.000.000	\$ 90.000.000
Costos de mantención anual	15	\$ 4.000.000	\$ 60.000.000
<b>Total</b>			<b>\$ 300.500.000</b>
<b>Uso proyectado (15 años)**</b>	<b>\$ 25,4 por l/s</b>		

\* a no más 1 km el botadero y con un factor de esponjamiento de 25%

\*\* Con un caudal infiltrado de 50 l/s por 6 meses en el año

Fuente: Elaboración propia

## 5 RESULTADOS SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL

A continuación, se presentan los principales resultados de la operación de sistema de recarga artificial de acuífero, la cual tuvo una duración total de 4 meses. El llenado de la Balsa 1 y 2 se realizó a partir de junio del 2020 desde el canal tradicional del fundo que capta sus aguas del río Cachapoal.

El sistema de recarga compuesto por 2 Balsas de Infiltración; Balsa 1 y Balsa 2, de superficies ambas de 1.250 m<sup>2</sup> en la base, profundidad 3 m, están interconectadas por un canal, y disponen de un vertedero en el canal de ingreso y en canal de salida, para medir caudales.

La cota de fondo de la Balsa 1 es 312 m.s.n.m., mientras que la cota de fondo de la Balsa 2 es de 311,5 m.s.n.m. y la cota del terreno de 315 m.s.n.m., y están conectadas al nivel 313,62 m.s.n.m. por una canaleta.

Las balsas están diseñadas para que operen en forma continua y autónoma, y si se produce un exceso de agua en la entrada, este sería devuelto por el canal de salida. Con un caudal que puede variar según la oferta hídrica, con un máximo caudal de porteo de 50 l/s, si el caudal es superado las Balsas se llenan más rápido y después devuelven el excedente, si es menos, la balsa 2 la primera en vaciarse porque deja de pasar el exceso desde balsa 1. Cabe destacar que los canales y obras construidas fueron diseñadas para operar con la capacidad máxima de porteo de los canales existentes, de tal manera que las nuevas obras no significaran un problema o preocupación para la administración del Fundo. Las obras deben adaptarse a las realidades de cada predio donde se construyen de forma de que no sean un problema o restricción para la normal operación agrícola.

Con objeto de medir la efectividad de las balsas de infiltración, en cuanto a la capacidad de recargar la napa bajo las mismas, se midieron diversas variables a lo largo de toda la experiencia piloto de las balsas de infiltración, las que fueron:

- Niveles de Agua en Balsa 1 y Balsa 2 con sensores de transductor de presión
- Niveles freáticos en P05, P06 y P08 con sensores de transductor de presión (a 38 m, 140 m y 163 m de distancia a las balsas respectivamente)
- Nivel de Vertederos entrada y salida con sensores de transductor de presión para medición indirecta de caudal.

- Niveles de Agua en pozos, P04 a P13. mediante pozómetro (con frecuencia mensual)
- Precipitación de Estación Quimávida
- Parámetros de Calidad de Agua en Pozo P07 y Canal Cachapoal que llena las balsas.

Con estas mediciones se pudo monitorear el nivel de agua en los pozos antes del llenado de las balsas y durante la operación de las mismas, y con ello analizar si el nivel de agua en los pozos aumentaba, por efecto de la recarga desde las balsas, y por cuanto tiempo duraba dicho efecto. Cabe mencionar que la instrumentación destinada para estos fines registra de manera continua mediante un Datalogger incorporado. (Para más información respecto a los sensores instalado consultar **ANEXO F**)

Para el monitoreo de niveles en los pozos que no contaban con sensores de presión se realizaron mediciones puntuales periódicas (con frecuencia mensual) mediante pozómetro.

El monitoreo de calidad química de aguas permite conocer la calidad de las aguas infiltradas al acuífero, y la calidad del agua en el acuífero para comprobar regularmente que esta no esté siendo alterada por el sistema de recarga. Por este motivo, se realizó una primera campaña de monitoreo de calidad de agua en el acuífero y en el canal de regadío.

## 5.1 Monitoreo de niveles freáticos

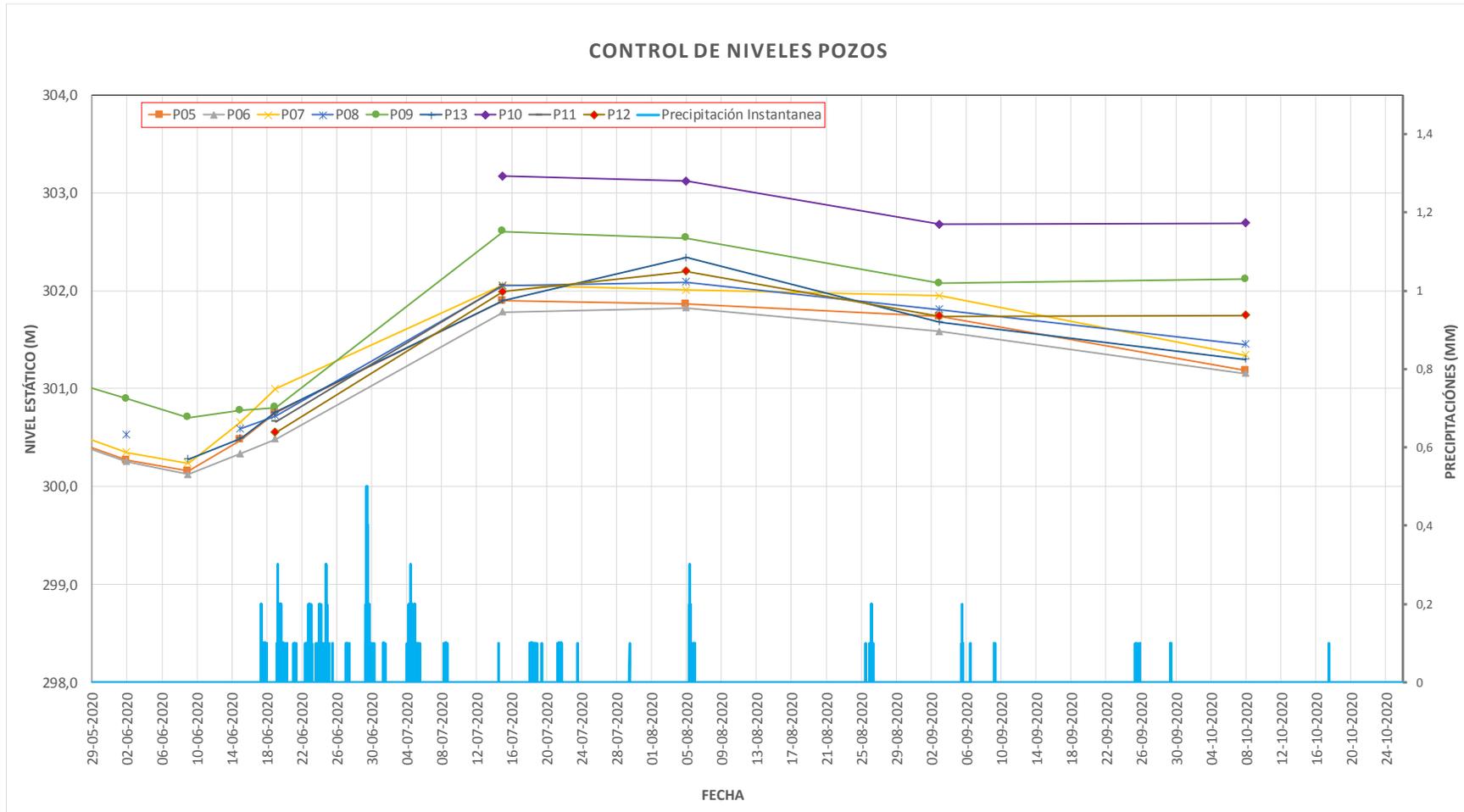
Se presentan los puntos de monitoreo de niveles freático en la Figura 5-1. Cabe destacar que los niveles freáticos observados en el P04 se encuentran fuertemente influenciados por los niveles de la balsa debido a su cercanía con estas (a menos de 5 m). Por lo que para efecto del análisis no se considerarán sus resultados en las siguientes gráficas.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5- 1: Ubicación de puntos de monitoreo niveles de freáticos**

En la Figura 5-2 se presentan las alturas de agua por sobre el nivel de los sensores de los sondajes P05, P06 y P07.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Evolución Nivel estático pozos y sondajes.

Se puede observar un descenso sostenido de los niveles estáticos desde el 2 de marzo y hasta el 9 de junio, fecha de inicio de la infiltración en las balsas, evidenciándose en una semana de recarga un ascenso de 21 cm en los sondajes P06 y P07, y de 7 cm en P09.

A continuación, se presentan los datos registrados por los sensores de presión en las balsas, aguas arriba de los vertederos y en el sondaje número cinco. Los datos son registrados cada cinco minutos. Las planillas de datos con la información completa se adjuntan en el **ANEXO G**.

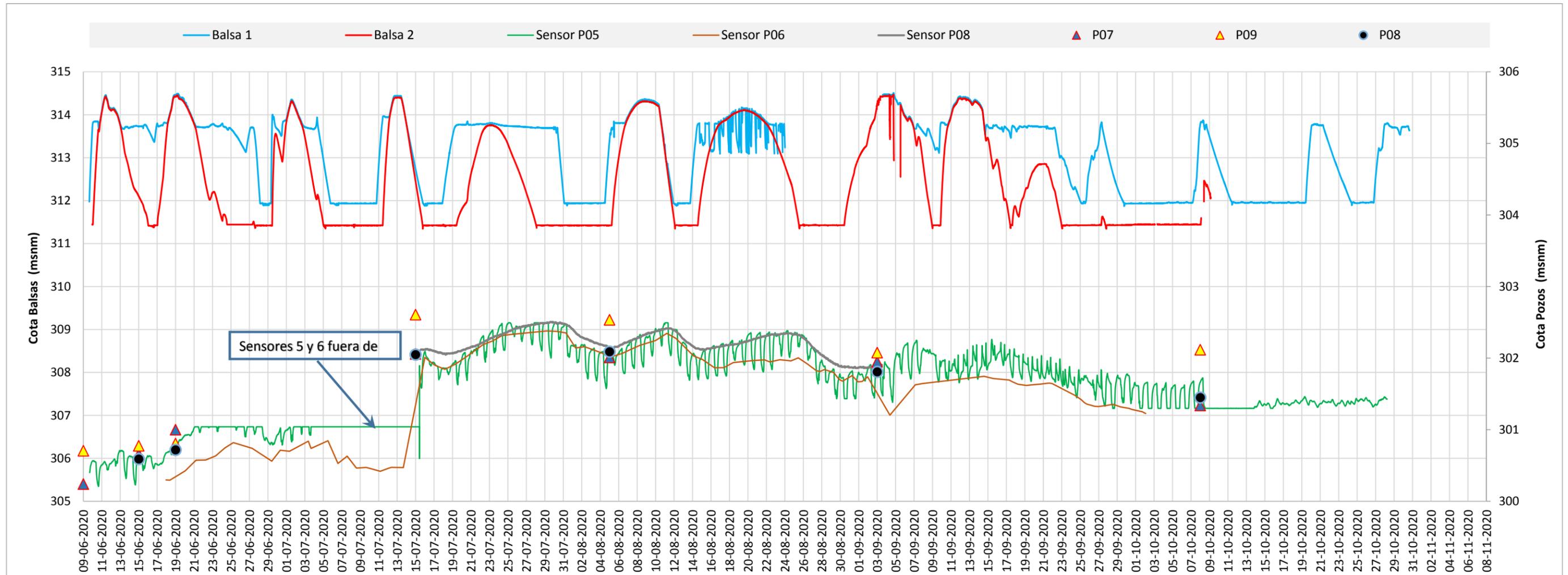


Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-3: Extracción de datos de sensor de presión ubicado en vertedero de salida**

En el siguiente gráfico, se presentan los datos de profundidad registrados por los sensores de presión en las balsas. Cabe destacar que, a pesar de que las cotas del agua en las balsas sean similares, existe una diferencia en los fondos de ambas balsas (en donde están ubicados los sensores de presión), razón por la cual se observa un desplazamiento en las curvas.

La intermitencia en el registro de los niveles de las balsas se debe al cierre y apertura de la compuerta en el vertedero 1 en distintos periodos, por parte de la administración del fundo. La interferencia del último periodo de medición se debe a la carga y descarga de la batería del sensor, de todas maneras, la medición válida se encuentra en los peaks en ese periodo de la curva.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4: Nivel de agua registrada en Balsas, en sondajes P05, P06 y P07 y registro niveles pozos

Se presenta en la Tabla 5-1 los resultados de los aumentos en los niveles freáticos de los principales pozos de monitoreo en el desarrollo de la experiencia de recarga.

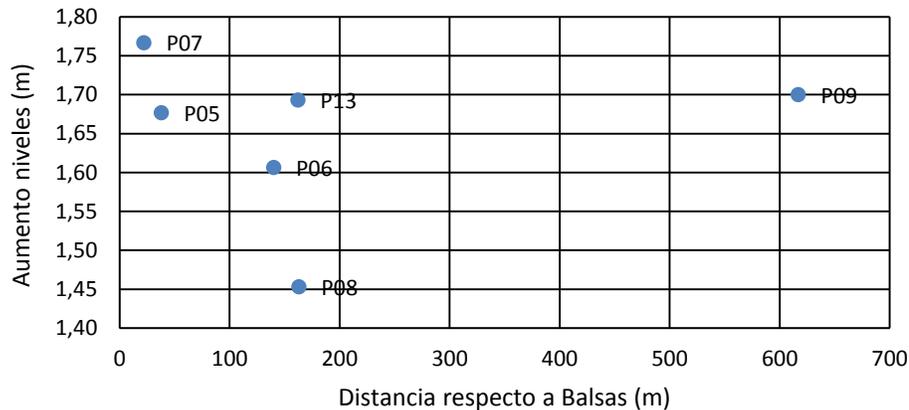
**Tabla 5-1: Aumento de niveles freáticos debidos a la recarga artificial**

ID Pozo	Distancia a las balsas (m)	Niveles antes de recarga		Aumento de niveles respecto a cota nivel freático antes de recarga						Promedio periodo en régimen (m)
		02-06-2020	09-06-2020	15-06-2020	19-06-2020	15-07-2020	05-08-2020	03-09-2020	08-10-2020	
			Comienzo	Inicial recarga	Periodo en régimen			Término		
P07	22	300,3	300,2	0,4	0,8	1,8	1,8	1,7	1,1	1,8
P05	38	300,3	300,2	0,3	0,6	1,7	1,7	1,6	1,0	1,7
P06	140	300,3	300,1	0,2	0,4	1,7	1,7	1,5	1,0	1,6
P13	162		300,3	0,2	0,5	1,6	2,1	1,4	1,0	1,7
P08	163	300,5		0,1	0,2	1,5	1,6	1,3	0,9	1,5
P09	617	300,9	300,7	0,1	0,1	1,9	1,8	1,4	1,4	1,7

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-5 se puede observar de manera gráfica la relación entre el aumento de los niveles freáticos en relación con la distancia del punto de monitoreo y las balsas de infiltración, en la cual se observa una cierta relación entre la distancia y el aumento en niveles promedio en el régimen de recarga, excepto para los pozos P13 y P09. En el caso del P09 podría estar influenciado por dada su cercanía a canales cercanos que podrían alterar sus niveles si bien en capítulos anterior se mencionó la desconexión del acuífero debido a un lente sellante en los primeros tres metros de suelo, no se descarta la posibilidad que dicho sello no sea continuo en ese sector.

### Aumento de niveles respecto respecto de la distancia a las Balsas



Fuente: Elaboración propia

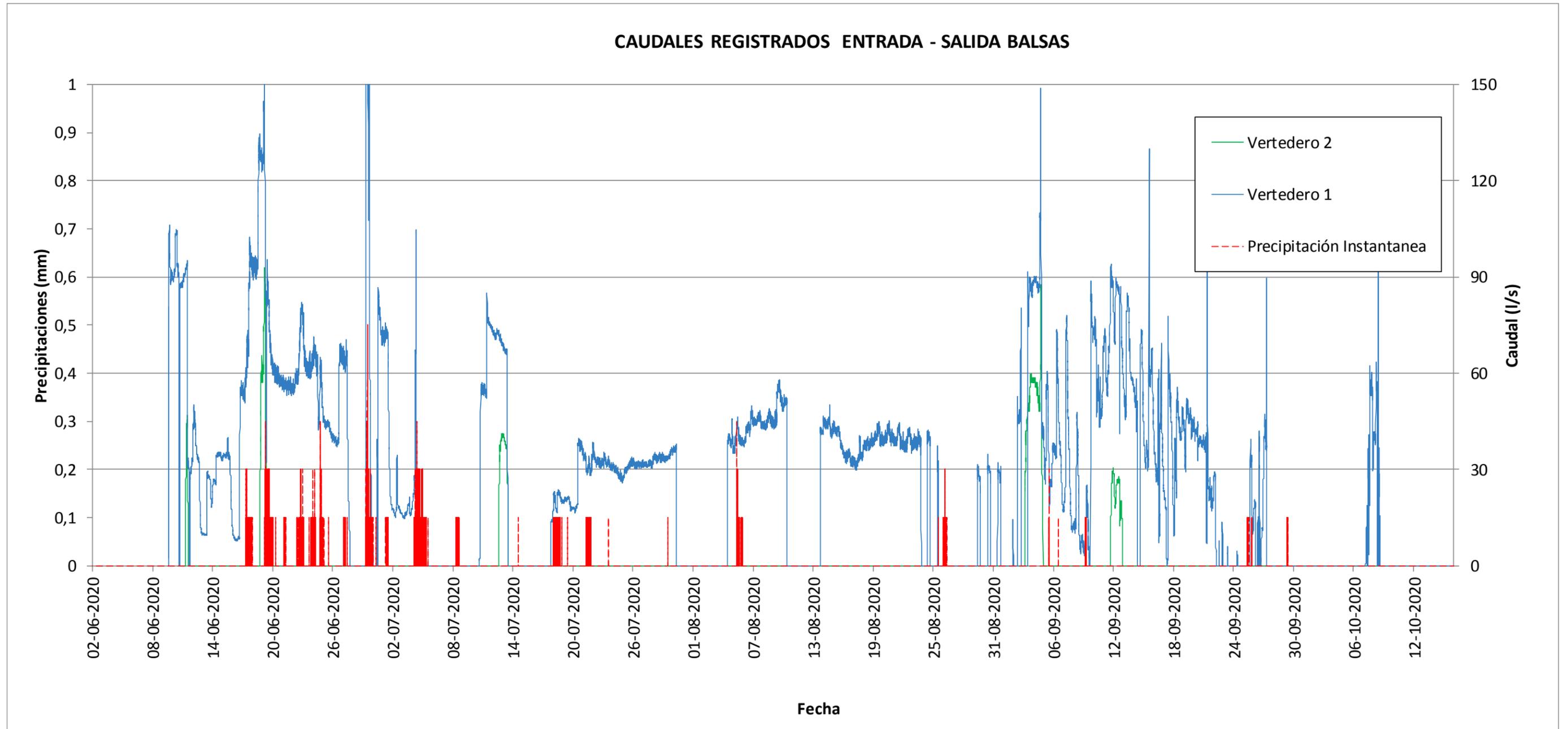
**Figura 5-5: Niveles freáticos en pozos de monitoreo en relación con la distancia a las balsas.**

En base a las **Figura 5-2**, **Figura 5-4** y los resultados presentados en la Tabla 5-1 se desprenden el siguiente análisis:

- El aumento de los niveles freáticos se presentó aproximadamente un mes después del comienzo de la experiencia de recarga (9 de junio de 2020), incrementando en promedio 1,5 m.
- Si bien existe una oscilación en los niveles una vez comenzada la recarga, principalmente debido a la intermitencia del caudal entrante al sistema, se logra ver una estabilización de los niveles en promedio sobre 1 m respecto a los observados previos a la recarga.
- El pozo P13, a una distancia de 162 m a las balsas de recarga, presenta el mayor incremento puntual en los niveles freático (2,1 m en agosto 2020).
- Los Pozo P07 y P05 presentaron los mayores incrementos en promedio y tiene relación a su cercanía con las balsas de infiltración a una distancia de 22 m y 38 m respectivamente.
- El Pozo P08 fue el que presentó los menores aumento en los niveles en promedio (1,5m)

La Figura 5-6 presenta los caudales que son obtenidos a partir de las profundidades de escurrimiento en los sensores de presión aguas arriba de los vertederos. Estas profundidades están correlacionadas directamente con el caudal que pasa por los canales de aducción y de entrega según las curvas de descarga

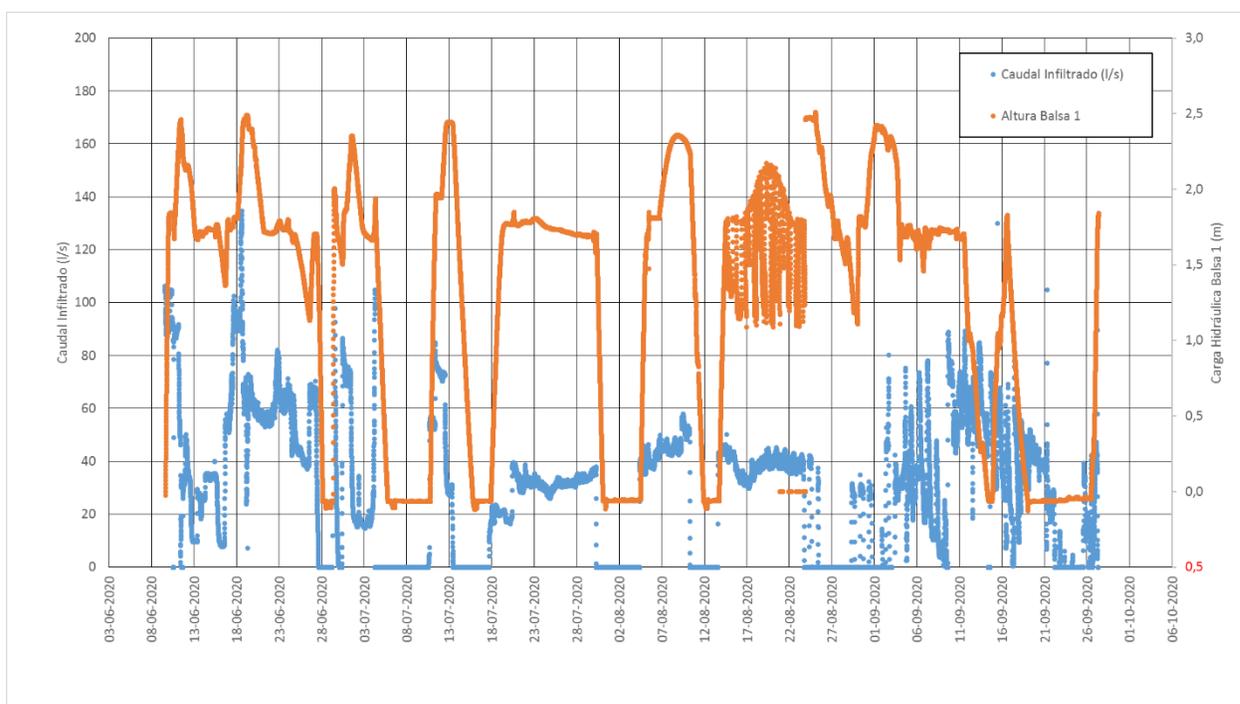
de ambos vertederos. Cabe comentar que los valores cercanos a cero en el Vertedero 1 Balsa 1, que es por donde ingresa agua al sistema de recarga, se debe a que la compuerta es cerrada provocando la intermitencia en la lectura de los caudales. Por otra parte, los datos en cero del sensor del vertedero 2 hace referencia a que no hubo sobrepaso de los niveles en la balsa 2 puesto que se infiltró el agua antes de ser evacuada por el vertedero 2. Por otra parte, se observa de la gráfica que los sobrepasos obtenidos en el vertedero 2 no están directamente relacionados con las precipitaciones registradas en el periodo de recarga.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6: Caudales registrados en los sensores de los vertederos 1 y 2

La Figura 5-7 presenta la relación de carga hidráulica en la balsa 1 y el caudal infiltrado, se puede apreciar que a mayor carga (altura del nivel en la balsa) mayor el caudal infiltrado. Por ejemplo, en los primeros meses de recarga hubo varios peak en torno a los 2,5 m de carga en la balsa lo que fue reflejado en peak de caudal infiltrado, luego en el mes de agosto se logró un lapso de estabilización de los niveles de la balsa sobre el 1,5 m lo que presentó una disminución en el caudal infiltrado (tasa de infiltración).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-7: Relación Carga hidráulica en balsa y caudal infiltrado**

La literatura recomienda no superar 1 m de carga de agua para evitar procesos de colmatación de colmatación, (estas recomendaciones provienen de experiencias con recarga directa en cursos de agua). Sin embargo, la experiencia piloto de Cachapoal fue ejecutada mediante la alimentación por canales, con tomas distantes a 15 km desde las fuentes de captación, y, por tanto, con un gran trayecto que permite la sedimentación natural de los elementos más gruesos de sólidos que son captados desde la bocatoma en los cauces. Lo anterior sumado a la experiencia de Con Potencial en este tipo de iniciativas de recarga, determinó que lo más adecuado es aumentar la carga hidráulica hasta 2.5 m por cuanto de esta forma se genera una mayor presión hidrostática que permite mayor ingreso de flujo a través del suelo, considerando que los riesgos de colmatación son bajos por cuanto los sedimentos principalmente son de tipo coloidal los que se mantienen en suspensión y no de cantan. Por otra parte, los costos de escariado de fondo son

marginales respecto de los beneficios de contar con una mayor carga hidráulica y por tanto mayores tasas de infiltración al acuífero.

## 5.2 Resultados del Sistema de Recarga

El 9 de junio de 2020 a las 14:14 horas se iniciaron las pruebas de recarga artificial de acuíferos, comenzando con el llenado de las balsas de infiltración. El sistema de recarga funcionó 123 días finalizando el día 10 de octubre del 2020, siendo 77 días de infiltración efectiva que corresponde a los días que hubo ingreso de caudal al sistema de recarga.

Inicialmente los niveles freáticos del acuífero se encontraban aproximadamente a 11 m (medidos desde el fondo de las balsas previo a su operación), pero una vez se comenzó a operar las balsas de infiltración estos niveles aumentaron en aproximadamente 2 m dejando una diferencia entre la base de la balsa y el acuífero de 9 m, este aumento de niveles freáticos se percibió un mes después de haber comenzado con la operación de las balsas, cabe mencionar que en este periodo no se contó con una recarga continua debido al cierre de las compuertas de entrada por razones operativas del fundo.

La Tabla 5-2 presenta los resultados de la infiltración efectiva por los meses que duró la iniciativa de recarga. De la tabla se desprende que el volumen total infiltrado es de 270.974 m<sup>3</sup>. Por otra parte, se observa, que para un caudal de 20 l/s, la tasa de infiltración es del 1.700 m<sup>3</sup>/día aproximadamente. Por otra parte, los niveles estáticos aumentaron en alrededor de 2 m luego de iniciada la experiencia de recarga. Cabe destacar que los resultados de los volúmenes infiltrados podrían haber sido mucho mayores si se hubiera contado con un respaldo hídrico constante en el tiempo (sin interrupciones) y por otra parte manteniendo el caudal inicial de 50 l/s, en vez del promedio de 20 l/s que se mantuvieron los meses siguientes.

De los resultados de la etapa de operación de la balsa se infiere que:

- Una vez que las balsas se llenaron, a las 4 horas comenzó a recargar el acuífero, según los niveles del pozo P04 que es el más cercano a la balsa de infiltración.
- El pozo más alejado, P12, comenzó a aumentar su nivel a los 25 días desde que se llenó la balsa.

- La precipitación no tuvo efectos relevantes sobre el aumento de niveles en el periodo de operación del sistema de recarga
- La tasa de infiltración en la zona de la balsa de infiltración se estimó en 15.900 m<sup>3</sup>/día por hectárea para un caudal de infiltración de 50 l/s.
- La tasa de infiltración varía en función del caudal de ingreso que a su vez influye en la carga hidráulica sobre las balsas, para un caudal de 50 l/s se asegura una carga hidráulica sobre la Balsa 1 de 2,5 m considerado la condición de funcionamiento óptima para el sistema de recarga con el cual se obtiene una tasa de infiltración diaria de 4000 m<sup>3</sup>/día aproximadamente.
- En promedio con una carga hidráulica de 1,3 m se tienen caudales de 20 l/s.

Por último, señalar que para el periodo en el cual se realizó la experiencia de recarga no se explotaron los pozos de producción existentes dentro del Fundo, por lo que no hubo alteraciones en las mediciones de niveles freáticos.

**Tabla 5-2: Resultados de volúmenes infiltrados en el proyecto de recarga artificial de acuífero**

	Total Ponderado	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre
<b>Caudal promedio ingresado a Balsas desde canal (l/s)</b>	<b>42</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>5</b>
<i>Volumen Total Ingresado a Balsas (m<sup>3</sup>)</i>	<b>278.744</b>	<b>92.866</b>	<b>53.531</b>	<b>60.116</b>	<b>68.528</b>	<b>3.703</b>
<i>Volumen Balsas inicial llenado (Volumen muerto m<sup>3</sup>)</i>	7.520	<b>7.520</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<i>Volumen por precipitación directa (m<sup>3</sup>)</i>	250	<b>200</b>	<b>50</b>			
<i>Volumen Total Infiltrado real a acuífero</i>	<b>270.974</b>	<b>85.146</b>	<b>53.481</b>	<b>60.116</b>	<b>68.528</b>	<b>3.703</b>
<b>Inicio llenado</b>	09-06-2020	09-06-20	01-07-20	01-08-20	01-09-20	01-10-20
<b>Fecha control</b>	10-10-2020	30-06-20	31-07-20	31-08-20	30-09-20	10-10-20
<b>Días acumulados</b>	<b>123</b>	<b>21</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>9</b>
<b>Días sin caudal entrada</b>	<b>46</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Días infiltración efectiva</b>	<b>77</b>	<b>21</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>9</b>
<b>Infiltración diaria (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>3.524</b>	<b>3.978</b>	<b>1.725</b>	<b>1.940</b>	<b>2.284</b>	<b>411</b>
<b>Infiltración instantánea (l/s)</b>	<b>41</b>	<b>46</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>5</b>
<b>Ratio infiltración (caudal/área) (l/s /cada 500 m<sup>2</sup> de superficie)</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>
		<b>Óptimo</b>	<b>subutilizado</b>	<b>subutilizado</b>	<b>subutilizado</b>	<b>subutilizado</b>

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Análisis químicos de agua

En el desarrollo del Estudio se realizaron dos campañas de terreno para el muestreo de la calidad química del agua. La primera campaña se realizó previo al inicio de la operación de recarga y las calidades fueron analizadas bajo el DS 46 para las aguas subterránea, mientras que para el análisis de las aguas del canal se utilizó la NCh 1333 para en riego. Dicha campaña se realizó el día 28 de enero de 2020 a las 16:30 horas. Su principal objetivo fue analizar las calidades de las aguas superficiales para descartar un posible impacto negativo en la infiltración hacia aguas subterráneas.

La segunda campaña de terreno fue realizada durante la operación del sistema de recarga artificial, pero esta vez tanto para el análisis del agua superficial como la subterránea fue utilizada la NCh 1333 para uso en riego, con la finalidad de tener una comparación directa entre los parámetros analizados, esta campaña se llevó a cabo el día 03 de septiembre de 2020 a las 17:30 horas, en los puntos expuestos en la Tabla 5-3. La muestra de aguas superficiales fue tomada en el canal de ingreso a la balsa 1 y la muestra de aguas subterráneas fue tomada en el pozo de monitoreo P07), se presenta el resultado de los análisis en el **ANEXO I**.

**Tabla 5-3: Puntos de monitoreo de calidad físico-químico de aguas**

Campaña	Punto de análisis	Coordenadas UTM WGS84 H19S	
		Norte (m)	Este (m)
Campaña 1	P07	6.213.064	316.384
	Canal de Regadío	6.213.070	316.389
Campaña 2	Canal acceso Balsa 1	6.213.054	316.344
	P06	6.213.054	316.152

De los resultados se puede destacar los siguientes puntos:

El Hierro y Aluminio alto pueden deberse al estado del ducto y no representarán, a futuro, las concentraciones reales de estos u otros elementos. Importante sería encontrar otros metales pesados que tienen mayor riesgo a la salud, como por ejemplo Arsénico, Mercurio o Cadmio.

Los 2 análisis cumplen la normativa nacional vigente, según NCh 1333 Of78-87.

El agua en sí no producirá un impacto relevante en el acuífero, lo importante es verificar los elementos químicos que arrastra en su infiltración. No existen aniones o cationes que influyan negativamente en el agua subterránea, no se detectan metales pesados que pudieran empeorar la calidad del agua subterránea, tampoco existen concentraciones de nutrientes que pudieran ocasionar eutrofización en el acuífero.

El agua superficial corresponde a un agua dura, de tendencia corrosiva de baja intensidad, moderadamente agresiva, agua con la cual generalmente no se observan efectos perjudiciales sobre los cultivos. Según parámetros determinados, cumple con la norma NCh 1333, Of. 78-87, agua de riego requisitos (ver en ANEXO I gráficas de parámetros relevantes con sus respectivos límites máximos para NCh 1333 para uso de riego y DS 46 para vulnerabilidad baja de acuíferos).

Para el agua subterránea corresponde a un agua dura, de tendencia incrustante de baja intensidad, no agresiva, agua con la cual generalmente no se observan efectos perjudiciales sobre los cultivos. Según parámetros determinados, cumple con la norma NCh 1333, Of. 78-87, agua de riego requisitos.

## 5.4 Modelo de infiltración HYDRUS 1D

HYDRUS-1D es un modelo de dominio público desarrollado por Šimůnek et al. (1998) en Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California. El software incluye el modelo de elementos finitos unidimensionales HYDRUS para simular el movimiento del agua, flujo de calor y el transporte de múltiples solutos en medios saturados de forma variable. (Ordenes F., 2018)

El programa resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo de agua saturada/no saturada y la ecuación tipo advección-dispersión para el transporte de calor y solutos. La región de flujo puede estar compuesta por material no uniforme y el movimiento puede ocurrir en la vertical, horizontal o una dirección inclinada. La parte de flujos de agua del modelo puede emplear condiciones de carga hidráulica y/o flujos, condiciones controladas por variables atmosféricas, así como también condición de drenaje libre. Las ecuaciones son resueltas numéricamente usando el método tipo Galerkin de esquemas lineales de elementos finitos. (Ordenes F., 2018)

El movimiento del agua en una dimensión, en un medio poroso rígido parcialmente saturado, es descrito por una forma modificada de la ecuación de Richards asumiendo que la fase gaseosa juega un rol insignificante en el proceso de flujo del agua líquido y que el flujo debido a gradientes termales puede ser despreciado. (Ordenes F., 2018)

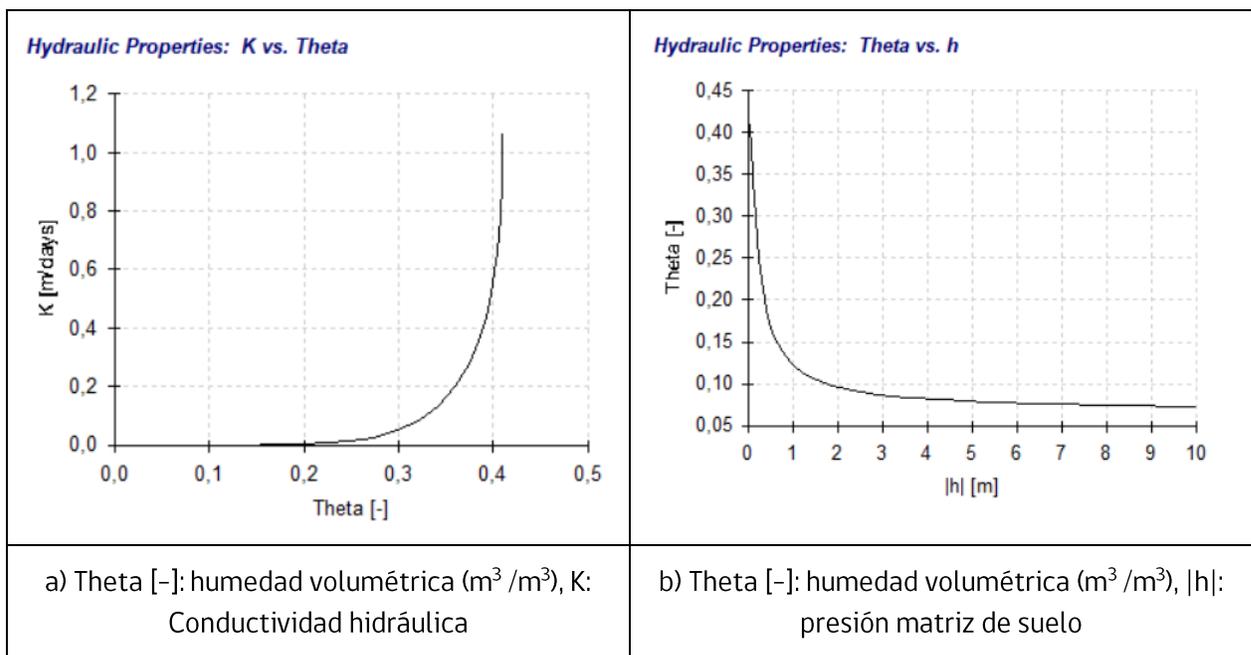
Una ventaja importante de los modelos en HYDRUS es que no están limitados a ninguna escala temporal o espacial, ya que han sido aplicados a escalas involucrando muy pequeñas columnas de suelo en laboratorio, perfiles de suelo de varios metros de profundidad, así como también perfiles de suelo de varios cientos de metros. (Ordenes F., 2018).

### 5.4.1 RESULTADOS

El agua subterránea se mueve en respuesta a dos factores principalmente, al gradiente potencial y a la capacidad del medio para conducir el agua, la cual varía con el contenido de humedad y el tipo de suelo. Considerando esto, se analizaron los resultados obtenidos del modelo en cuanto a las propiedades hidráulicas en el perfil del suelo. En Figura 5-8 se presentan las relaciones entre la conductividad hidráulica y la humedad volumétrica, y entre la humedad volumétrica y la presión de la matriz del suelo. Se observa

que el suelo con una humedad superior al 41% y a una carga hidráulica de 2 m ocurriría un flujo del orden de los 1,1 m/d.

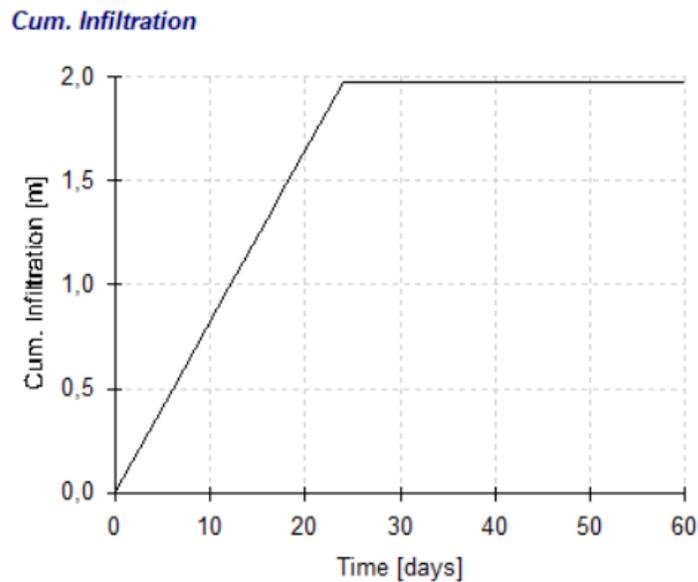
De la Figura 5-8 b) se observa que cuando disminuye el contenido de humedad volumétrica incrementa la presión de succión en la matriz del suelo, manteniendo al final de la columna una humedad residual cercana al 7%, lo que es esperable en un suelo con una matriz areno limosa, como encontrada en los sondajes realizados en el terreno estudiado.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-8: Resultados de parámetros hidráulicos**

La Figura 5-9 presenta la infiltración acumulada o aumento de niveles freáticos en el periodo de recarga para una carga hidráulica de 2,5m, en el gráfico se muestra un aumento casi 2 m, en 22 días del comienzo de la recarga. Este resultado es coincidente con los datos obtenidos en la experiencia de recarga, cual contó con un incremento de 2m aproximadamente en un periodo de 25 días.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-9: Aumento de niveles freático dada una carga hidráulica de 2,5m en las balsas**

## 5.5 Planes de acción ante eventuales contaminaciones

Se considera esencial para proyectos de este tipo contar con un plan de acción ante cualquier eventualidad respecto a la contaminación de las aguas. Se presentó un plan de acción donde la prioridad ante cualquiera contaminación de las aguas del canal de riego correspondiera cerrar las compuertas del sistema de recarga, impidiendo de esta forma la contaminación del acuífero.

Cuando se produzca un derrame en el suelo de alguna sustancia contaminante en las cercanías de la piscina o de la sección inmediatamente adyacente del río Cachapoal, se deben acatar las siguientes recomendaciones.

- Identificar la fuente del derrame e intentar detenerlo,
- Rodear y contener el derrame,
- Bloquear drenajes y canales para evitar la contaminación de las aguas.
- Utilizar material absorbente para controlar el derrame.
- Disponer del material utilizado para controlar el derrame y la capa de suelo contaminado en bolsas plásticas y desechar.

En el caso de que la sustancia contaminara directamente el agua se recomienda el siguiente curso de acción:

- Identificar la fuente del derrame e intentar detenerlo,
- Identificar el área susceptible estimando la ruta del derrame por los drenajes,
- Instalar barreras y/o diques en los puntos de control identificados. Estas barreras deben ser absorbentes.
- Utilizar material absorbente para controlar el derrame.
- Disponer del material utilizado para controlar el derrame en bolsas plásticas y desechar.

Después del derrame:

- Mantener la calma y cerciorarse que se haya controlado o confinado convenientemente el derrame.
- Acondonar o restringir el acceso de personas no autorizadas a las zonas donde se ha producido y confinado el derrame.
- Evaluar los daños ocasionados al entorno, suelo, cursos de agua y vecindad.
- La disposición final de materiales contaminados o impregnados deberá ser realizada a través de empresas autorizadas para dicho fin.
- De ser el caso se tomarán muestras del cuerpo de agua tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de vertimiento para conocer los niveles de contaminación, así como muestras de suelo en caso de que sea necesario.
- Informar a las autoridades locales o centrales según corresponda, si es que la magnitud del derrame lo amerita.

## 6 CONCLUSIONES

El sitio propuesto en primera instancia por la CNR no reunía las condiciones hidrogeológicas necesarias para un proyecto de recarga, lo que respaldado bajo una argumentación técnica y corroborado por los resultados obtenidos de los ensayos geofísicos, que presentaban resistencias asociadas a materiales arcillosos de baja a nula permeabilidad en los primeros 10 m de profundidad, y geotécnicos realizados en dicho sitio (calicatas, sondajes y ensayos de infiltración), por lo que se decidió en común acuerdo con CNR, analizar otras opciones que garantizaran el correcto desarrollo del proyecto de recarga artificial de acuífero.

La realización de calicatas de tres metros de profundidad permitió describir estratigráficamente los primeros metros de suelo atravesado, concluyendo que los materiales permeables comenzaban bajo los 2,5 m de profundidad, lo que fue corroborado con los ensayos de infiltración realizados, los que presentaban permeabilidades del orden de  $10^{-3}$  cm/s los que corresponden a materiales arenos limosos, aptos para la recarga artificial de acuífero.

La elección de los sensores Transductores de Presión con Datalogger fue necesaria para medir los niveles de balsas y pozos de forma continua para analizar de manera adecuada los volúmenes acumulados y las variaciones del nivel freático producto de la recarga artificial. Por otra parte, se puede obtener el caudal pasante mediante la observación de los niveles en un canal, previo a la calibración de un vertedero de pared delgada mediante curvas de descargas. En base a los resultados obtenidos en el proyecto se concluye que la cantidad de instrumental utilizado para la experiencia de recarga fue la adecuada, si bien lo ideal sería poder monitorear toda el área de estudio de manera continua, la alternativa de realizar mediciones puntuales en los pozos más alejados del sistema de recarga implica un ajuste para limitante económica.

Dado los datos presentados en cuanto al volumen infiltrado total ( $270.974 \text{ m}^3$ ) y el aumento de nivel freático (2 m aproximadamente en la ejecución del proyecto) se considera un proyecto exitoso, que podría haber obtenido un mayor volumen almacenado si se hubiera contado con el respaldo hídrico del mes inicial (50 l/s), los días de infiltración efectiva fueron 77 de 123 días totales que duró la experiencia.

En cuanto al radio de influencia del aumento de los niveles freáticos se evidencia en pozos a más de 900 m de distancia (P10) y si se asumen la horizontalidad de acuífero y su extensión hacia el poniente, dada la dirección natural de escurrimiento de aguas subterráneas, la influencia de la recarga podría percibirse hasta 3 km, en donde los niveles ya comienzan a sentir el efecto de la recarga natural del Río Cachapoal.

Se realizaron dos campañas de análisis de calidad química tanto para aguas superficiales como subterráneas y ambas cumplen la normativa nacional vigente, según NCh 1333 Of78-87, la primera campaña tuvo como objetivo analizar las calidades de las aguas superficiales para descartar posibles efectos negativos en la infiltración hacia aguas subterráneas, lo que fue descartado dado que las muestras cumplieron con los límites máximos señalados por las normas. El agua superficial corresponde a un agua dura, de tendencia corrosiva de baja intensidad, moderadamente agresiva. Mientras que el agua subterránea corresponde a un agua dura, de tendencia incrustante de baja intensidad, no agresiva. Ambas muestras de agua no generan efectos perjudiciales sobre los cultivos. Según parámetros determinados, cumple con el DS 46 para vulnerabilidad baja de acuíferos.

## 7 RECOMENDACIONES

Los principales hallazgos y aprendizajes que son útiles para futuros proyectos de recarga se listan a continuación.

### 7.1 Generales

- Las obras deben diseñarse según las realidades de cada predio de manera que se integren al normal y habitual sistema operacional del fundo, y no impliquen una adaptación o cambio que sea resistido por los agricultores. Por lo anterior los canales y obras deben ser diseñadas para operar con la capacidad máxima de porteo de los canales existentes, de tal manera que las nuevas obras no signifiquen un problema o preocupación para el dueño del predio.
- Se debe contar con un equipo profesional con experiencia en este tipo de desarrollos de recarga compuesto por profesionales especialistas en hidrogeología, hidráulica y mecánica de suelos con experiencia de terreno (levantamientos y mediciones de campo), tanto para la caracterización hidrológica como hidrogeológica, como para el diseño y operación de proyectos de recarga artificial. Esto se verá directamente relacionado en la calidad de los productos como en el ahorro de los recursos materiales y económicos.
- Se requiere un levantamiento previo y detallado de información hidrogeológica existente, que permita elegir de manera conceptual los potenciales punto de recarga, no todos los sitios son adecuados y se debe manejar al detalle con conceptos hidrogeológicos que permitan tomar una adecuada elección del sitio a recargar, como, por ejemplo, información técnica de habilitaciones de pozos (estratigrafía, pruebas de bombeo, calidad química), información hidrometeorológica (DGA, INIA etc.) información de evolución de niveles de pozos de la estadística de monitoreo de niveles DGA, por otra parte se debe realizar un análisis de antecedentes técnicos del área de estudio con fuentes de información pública como DGA, DOH, CNR o académicas.
- Se realiza un levantamiento topográfico, mediante la toma de ortofotos georreferenciadas, vinculado a la red geodésica nacional, que posee desviaciones menores a 2 cm en posición y a 3 cm en cota para realizar un barrido general por el área de Estudio, mientras que, para el diseño de las

obras, particular para los canales de aducción y salida, se realizó topografía tradicional con precisión milimétrica lo que aseguró los criterios de diseño hidráulico para las obras de recarga.

- Se requiere una relación proactiva mandante-desarrollador, propietarios de sitios y junta de vigilancia que asegure una rápida y expedita comunicación frente a eventualidades en el desarrollo de este tipo de experiencias, por ejemplo en caso de aumentos considerables en el caudal de los canales que alimentan los sistemas de recarga, se requerirá una rápida acción entre la parte técnica que valorará los potenciales problemas y los operadores que tomarán acciones para cerrar las compuertas tal que las obras no sufran daño.

## 7.2 Caracterización del área de Estudio

- Se recomienda realizar macro Ensayos de Infiltración, que en términos prácticos es realizar una excavación puntual tipo calicata con al menos la profundidad estimada de la alternativa proyectada y en ella realizar ensayos de infiltración de larga duración para estimar de mejor manera los parámetros hidráulicos del suelo sometidos a una carga importante en la columna de agua. Si bien los otros sistemas de ensayos de infiltración in-situ entregan información esta es solamente representativa en el primer estrato y no posee una carga hidráulica representativa de una experiencia de infiltración. Por otra parte, se debe considerar la disponibilidad hídrica para realizar este tipo de macro ensayos de infiltración. Cabe destacar que los macro ensayos de infiltración en calicatas pueden ser utilizados para todos los suelos que posean cierto grado de permeabilidad (exceptuando suelo impermeable), y teniendo en cuenta que se requerirá un respaldo hídrico de al menos de dos camiones aljibes, considerando una calicata con una profundidad de 3 m de ancho 1 m y de largo 2 m.
- Se deben realizar ensayos geofísicos para tener una mejor comprensión de los tipos de estratos existentes en el sitio seleccionado, en general los métodos recomendados son el TEM o ERT para determinar la resistencia de los materiales e identificar los medios conductores (acuífero). Para estimar la geometría del acuífero (basamento rocoso) se deben realizar ensayos tipos gravimétricos. Cabe destacar que los ensayos geofísicos se deben calibrar mediante el conocimiento de la estratigrafía de un sondaje cercano lo mismo para el basamento rocoso, por lo

que es necesario contar con la información de un pozo que sido perforado hasta la roca basamental, esto es de suma importancia para tener seguridad a la profundidad a la que se encuentran los diferentes estratos atravesados y para eliminar incertidumbres respecto a tipos de estratos con similar grado de resistividad que pudieran inducir a un error.

- Es muy favorable ejecutar un sondaje con método de perforación en diamantina con recuperación de muestras inalteradas de suelo para la adecuada caracterización del perfil estratigráfico.
- Se recomienda la utilización de dron para el levantamiento topográfico, mediante la toma de ortofotos georreferenciadas, vinculado a la red geodésica nacional, que posee desviaciones menores a 2 cm en posición y a 3 cm en cota para generar un barrido general por el área de Estudio, mientras que, para el diseño de las obras, particularmente para los canales de aducción y salida, se requiere una topografía tradicional con precisión milimétrica para asegurar que las pendientes proyectadas hidráulicamente sean las adecuadas.
- Se recomienda para futuras experiencias de pilotos de recarga, probar bajo dos regímenes de alimentación a las balsas uno con el ingreso de caudales de manera continua y otro con pulsos de ingreso de caudal para comprobar cuál de los dos sistemas es más eficiente desde el punto de vista de la recarga artificial de acuíferos, dada que la segunda opción podría en teoría aumentar las tasas de infiltración debido a la infiltración por medio no saturados que es más rápida que en medio completamente saturados.

### 7.3 Operación y monitoreo

- Para asegurar una medición precisa de los caudales se requiere la construcción de una sección estable, ya sea mediante una instalación de hormigón y otro material que asegure una sección que no se altere en el tiempo y la instalación de un vertedero de control.
- Se recomienda el uso sensores de presión con datalogger (para el almacenamiento de los datos) o instrumentación con telemetría, para el monitoreo, tanto de los caudales de entrada y salida de las balsas (debidamente calibrados con modelo numérico que relaciones altura de escurrimiento y caudal, validados con aforos realizados en terreno) como también de las variaciones de los niveles

freáticos del acuífero. El monitoreo continuo y sistemático permitirá estimar adecuadamente y valorar la efectividad del volumen infiltrado durante la experiencia de recarga.

- Se requiere un diseño del sistema de recarga seguro y bajo parámetros de Ingeniería hidráulica, por ejemplo, el cálculo hidráulico estructural que permita un correcto diseño en los taludes de la estructura, los anchos de los canales de alimentación y evacuación que considere el caudal máximo de los canales de alimentación, y la altura máxima de llenado de balsas. Lo anterior para asegurar que ante un evento extremo el sistema de recarga pueda amortiguar las eventuales crecidas en el canal de aportante y el flujo sobrante se pueda descargar nuevamente al canal. Con este tipo de diseños más la implementación de instrumental de monitoreo continuo, se logrará una mayor autonomía del sistema de recarga abaratando costos de operación.
- En base a lo observado en la experiencia de recarga artificial se aprecia que, con mayores cotas o carga hidráulica en las balsas, se logra mayor tasa de Infiltración, donde la altura máxima en las balsas del piloto fue de 2.5m. Sin embargo, hay que evitar la colmatación del fondo de las balsas, que en casos de aguas con alto contenido de sedimentos de tamaño tal que puedan sedimentar, ya sea por el tamaño de las partículas o por el excesivo tiempo de residencia, lo que generaría una disminución de la tasa de infiltración.
- Se muestras para análisis químico de aguas con una frecuencia de cuatro veces al año; una vez en la estación seca y luego cada 3 meses o 3 veces con una separación de tiempo uniforme durante el período de recarga. Se deben analizar los parámetros básicos de monitoreo de calidad del agua como lo son el color, olor, temperatura, pH, EC, TDS, SST, turbiedad, **Nutrientes:**  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{P}_{\text{total}}$ , **Materia orgánica:** COD, BOD **Iones principales:**  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , **Otros inorgánicos** F, B. Además, cualquier otro parámetro de interés específico dada la ubicación del proyecto de recarga (e.g. Fe, As), Microbial, E. coli, **Químicos orgánicos** (ej. pesticidas). Además, dependiendo de la ubicación, puede ser relevante monitorear los siguientes **metales:** aluminio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo y zinc. Otros parámetros relevantes para medir podrían ser elementos relacionados con la eutrofización (ej. Nitrógeno total, fósforo de ortofosfato), coliformes fecales, pesticidas, herbicidas, aceites y grasas.

- En caso fortuitos en que se encuentren empresas que infiltren sus riles cerca del acuífero, se realizará análisis según DS46 al RIL de la empresa, se recomienda realizar análisis según uso del agua 2 veces al año y verificar cercanía de empresas infiltrantes. En caso de existir, realizar seguimiento cada 3 meses.
- Por otra parte, se debe tener en consideración que la calidad físico-química de un piezómetro que solo se ha utilizado para el monitoreo de niveles y no de manera productiva, podría verse alterada por su estanqueidad, por lo que se debe utilizar un sistema de extracción mecánico, hasta alcanzar aguas cristalinas, siendo el tiempo de purgado relativo al nivel de turbidez, capacidad de bombeo y volumen de agua almacenado en el pozo, pero se recomienda al menos 1 hora, luego se debe esperar 24 horas de terminado el bombeo para tomar la muestra.