

**ANEXO D.10
ESPECIALIDADES
ESTRATIGRAFÍA Y VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO
PROYECTO FANTASILANDIA SAN BERNARDO**

Elaborado por:



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.	2
1.1 Objetivos y alcances del estudio.	2
1.1.1 Antecedentes de referencia.	2
1.2 Antecedentes.	3
1.2.1 Geología del área de estudio.	3
1.2.2 Antecedentes Mecánica de Suelos.	3
2. RESULTADOS	4
2.1 Estratigrafía pozo	4
3. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO	7
3.1 metodología	7
3.2 resultados	8
3.2.1 Capacidad de Campo Efectiva (Puntaje S)	8
3.2.2 Recarga del Acuífero (Puntaje R)	9
3.2.3 Litología	10
3.2.4 Puntaje Total y Condición de Vulnerabilidad del Acuífero.	14
4. REFERENCIAS	16

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO.

En el marco del EIA del Proyecto Fantasilandia San Bernardo, localizado en el sector Lo Herrera, de la Comuna de San Bernardo, Región Metropolitana, se ha solicitado la elaboración de un informe de estratigrafía del pozo de abastecimiento de agua potable construido hasta 170 m de profundidad, y una evaluación de la vulnerabilidad del acuífero.

El presente informe, incluye los resultados de la exploración de terreno, la información sobre la profundidad del nivel estático en el pozo construido, y finalmente la caracterización del acuífero en función de la vulnerabilidad a la contaminación del mismo.

1.1.1 Antecedentes de referencia.

En la preparación de este informe se han considerado los antecedentes siguientes:

- a) Visita a terreno y exploración geológica efectuada durante el mes de Enero del año 2019.
- b) Registro estratigráfico durante construcción del pozo.
- c) Carta Geológica del área Talagante-San Francisco de Mostazal elaborada por Sernageomin (Selles & Gana, 2001; escala 1:100.000)
- d) Estudio de Mecánica de Suelos efectuado en el predio del Proyecto por CASE Ingenieros, con fecha Octubre del año 2018.
- e) Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002, elaborado por el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos para la DGA.

1.2 ANTECEDENTES.

1.2.1 Geología del área de estudio.

De acuerdo a lo expuesto en la carta geológica “Geología del Área Talagante-San Francisco de Mostaza” (Selles & Gana, 2001; escala 1:100.000), el subsuelo del predio del Proyecto se compone principalmente a depósitos aluviales asociados al abanico del río Maipo. Estos depósitos se encuentran constituidos por una alternancia de gravas clastosoportadas y gravas arenosas con menor proporción de limos, estratificadas en capas de espesor variable entre 0,3 y 2 m.

1.2.2 Antecedentes Mecánica de Suelos.

El detalle de la granulometría y características de estos depósitos se obtuvo desde el estudio de Mecánica de Suelos realizado en el predio del Proyecto por CASE Ingenieros durante Octubre del año 2018. La exploración geotécnica efectuada en este estudio consistió básicamente en la confección, inspección y toma de muestras de cuatro (4) calicatas de 3,0; 2,3; 2,1 y 2,5 m. de profundidad, ubicadas dentro del predio en estudio. Las muestras extraídas fueron debidamente estudiadas en laboratorio posteriormente con lo que se obtuvieron las clasificaciones completas de dicho material.

Con los resultados arrojados por esta prospección se levantó un modelo estratigráfico para describir los primeros 3 m de suelo en el predio del Proyecto, el cual se detalla en la Tabla 1:

Tabla 1: Modelo estratigráfico subsuelo predio.

Horizonte	Espesor (m)	Descripción
H-1	2,3	Terreno natural, constituido por una arcilla, color café, humedad seca, plasticidad media, consistencia media a firme, estructura homogénea. Clasificación USCS: CL.
H-2	>1m	Terreno natural, constituido por gravas areno limosas y areno arcillosas con presencia de bolones (8” a 10”), humedad media alta, plasticidad baja y alta, compacidad densa, gravas de cantos redondeados y subredondeados, tamaño máximo 8” a 10”. Clasificación USCS: GM-GC.

2. RESULTADOS

2.1 ESTRATIGRAFÍA POZO

Respecto a los aspectos técnicos de la construcción del pozo, este alcanzó los 170 m de profundidad y fue perforado con el método de rotopercusión junto al uso de diluyentes para lubricar y lograr cohesión al momento de retirar el material perforado.

Se tomaron muestras del material perforado cada 6 m, antecedentes como la proporción de material tamaño fino o la presencia de bolones de 8" a 10" fueron recabados y cotejados entre los datos de mecánica de suelos y lo observado por los operadores durante las labores de perforación (Ver Fotografía 1).

Fotografía 1: izq, labores de perforación en terreno. Der, muestras.



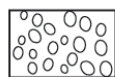
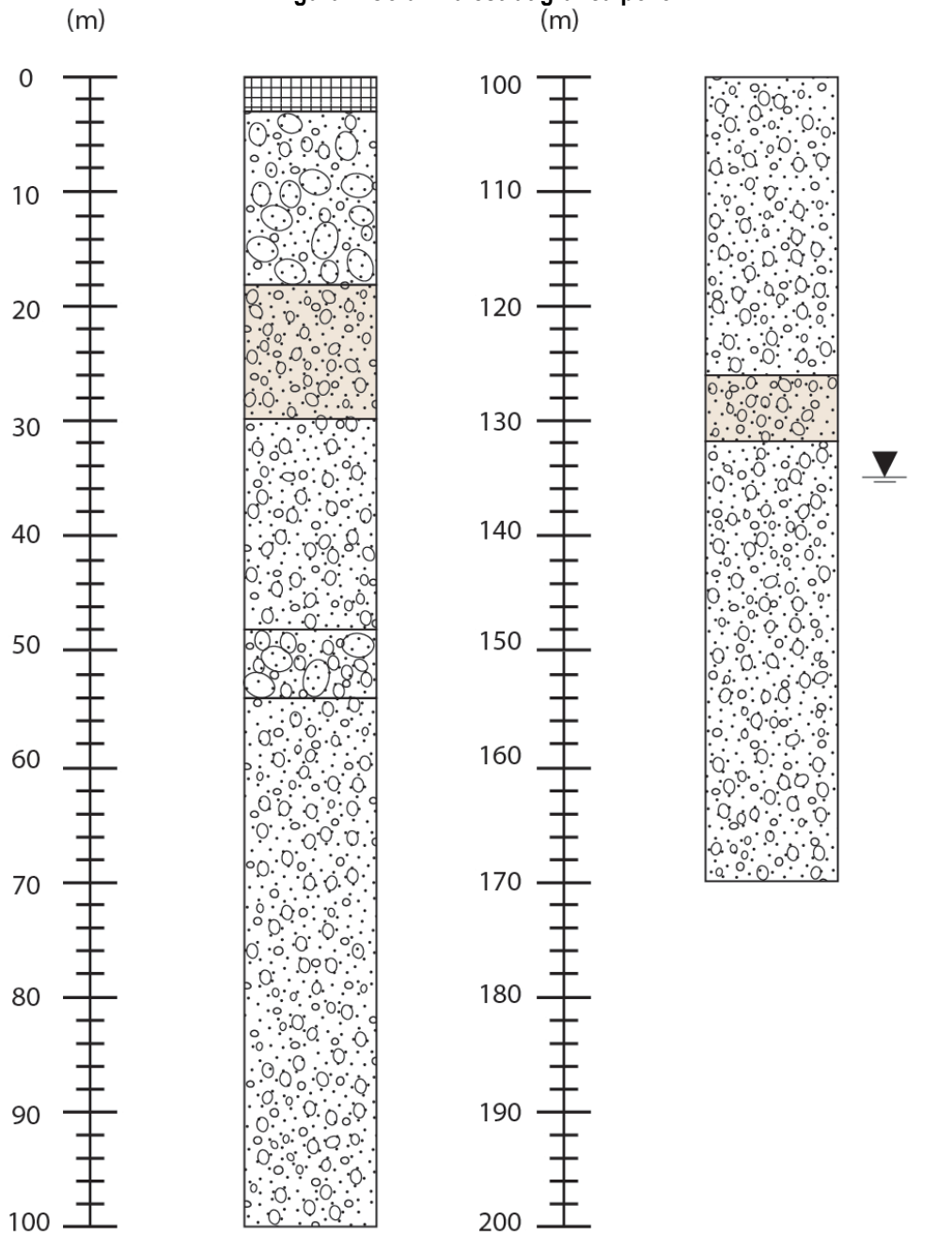
La estratigrafía del subsuelo, a grandes rasgos, responde a las características recabadas en los antecedentes expuestos en el acápite anterior, correspondiendo en su mayoría a material de gravas arenosas con presencia de finos en menor orden, se registraron tramos con presencia de bolones de 8" a 10" y tramos donde el material presentaba material fino y plasticidad baja (proporción menor de arcillas). El registro completo de la estratigrafía se describe a continuación en la Tabla 2 y en la Figura 1. Para el detalle de las descripciones en detalle de cada muestra revisar Apartado 1.

Respecto a la presencia de agua en el subsuelo y la profundidad del nivel freático detectado en el pozo, éste fue detectado a los 138 m durante la perforación, para luego estabilizarse en torno a los 134,9 m, profundidad correspondiente al nivel estático.

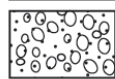
Tabla 2: Estratigrafía Pozo.

Horizonte	Tramo		Unidad Estratigráfica
	Desde (m)	Hasta (m)	
1	0,00	2,30	Terreno natural, color café, alto contenido de raíces. Suelo arcilloso de plasticidad media y humedad media. Consistencia media a firme, estructura homogénea. Clasificación USCS: CL.
2	2,30	18,00	Gravas areno limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.
3	18,00	30,00	Gravas areno limosas y areno arcillosas en menor orden, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.
4	30,00	48,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.
5	48,00	54,00	Gravas areno limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.
6	54,00	126,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.
7	126,00	132,00	Gravas areno limosas y areno arcillosas en menor orden, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.
8	132,00	170,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.

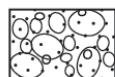
Figura I: Columna estratigráfica pozo.



Gravas



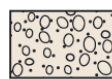
Grava con arenas y bajo contenido de finos



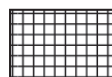
Grava con arenas, bolones de hasta 10''



Nivel Estático



Gravas arena limosas y arena arcillosas en menor orden



Suelo orgánico, raíces

3. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO

La literatura técnica (Ground Water Vulnerability Assesment, 2000) indica que la vulnerabilidad se puede definir como el nivel de penetración con que un contaminante alcanza una posición específica en un sistema acuífero, después de su introducción en alguna posición sobre la zona no saturada. Por otro lado, el riesgo de contaminación está determinado básicamente por las características del acuífero, las que son relativamente estáticas (es decir, permanentes a escalas razonables de tiempo) y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas.

3.1 METODOLOGÍA

Para efectos del presente estudio, y de acuerdo a las recomendaciones del Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos (DGA, 2002), se ha optado por el método **BGR**, desarrollado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (en adelante, método) en conjunto con los Servicios Geológicos Federales de Alemania.

El método combina, mediante un esquema de puntaje, cuatro factores relevantes que determinan o influyen en la rapidez y en el potencial con la que una determinada sustancia pueda alcanzar el acuífero, suponiendo una infiltración desde la superficie o bajo ella, según sea el caso. Dichos factores son:

- a) Capacidad de Campo Efectiva Unitaria del suelo (ocupado por organismos vegetales), atravesado por el contaminante. La Capacidad de Campo Efectiva corresponde al porcentaje de humedad, en peso, que tiene el suelo después de drenar por acción de la gravedad. Este parámetro se estima para el primer metro de profundidad de suelo y se denomina (**S**).
- b) Recarga al acuífero, dada por la precipitación efectiva (precipitación menos evapotranspiración en mm/año), y la recarga artificial de la infiltración del Proyecto (mm/año), cuando corresponde. Este factor se denomina (**R**).
- c) La litología, es decir el tipo de sedimentos o rocas presentes en la zona no saturada (bajo el primer metro de suelo), que atravesará la infiltración (**L**).
- d) Espesor (m) de cada estrato en la zona no saturada que atravesará la infiltración antes de alcanzar el acuífero (**E**).

Estos factores son utilizados en los cálculos que permiten obtener la Efectividad de Protección Total o Vulnerabilidad del Acuífero a infiltraciones, ya sea para la condición natural (Recarga Natural) o para la condición con Proyecto (Recarga Natural + Recarga Artificial/Infiltración Proyecto). Para este cálculo se realizan las siguientes estimaciones:

P1: Efectividad de Protección del suelo (primer metro de suelo):

$$P1 = S \times R$$

P2: Efectividad de Protección de la Cobertura Litológica (bajo el primer metro de suelo):

$$P2 = R \times \sum Li \times Ei$$

Donde:

Li: corresponde a cada estrato de la zona no saturada

Ei: corresponde al espesor (m) de cada estrato

PT: Efectividad de Protección Total o Vulnerabilidad del Acuífero:

$$PT = P1 + P2$$

El resultado obtenido se interpreta de acuerdo a la siguiente clasificación:

Tabla 3: Clases de Efectividad Generalizada de Vulnerabilidad del acuífero

Pt, número total de puntos	Vulnerabilidad asociada, estimada, del acuífero ante emisiones	Tiempo de residencia aproximado del contaminante en el suelo y subsuelo sobre el acuífero
≥ 4000	Baja	> 25 años
2000 – 3999		10-25 años
1000 – 1999	Media	3-10 años
500 – 999	Alta	Varios meses a 3 años
≤ 499		Unos pocos días a 1 año

3.2 RESULTADOS

Los resultados de vulnerabilidad del acuífero del sector se calcularon para 2 escenarios: el primer escenario considera la infiltración “natural” dada por las precipitaciones desde la superficie (desde los 0 m de profundidad), y un segundo escenario que considera la infiltración de efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas del Proyecto a partir de los 1,5 m de profundidad, que es nivel considerado por Proyecto a partir del cual se realizarán las infiltraciones. En este segundo escenario el diseño de infiltración se realizará desde un dren tipo “espina de pescado” el cual consiste en una estructura con una tubería principal dispuesta horizontalmente a la profundidad anteriormente señalada, y una serie de tuberías dispuestas, también horizontalmente, conectadas perpendicularmente o semi perpendicular a partir de la tubería principal, emulando la geometría de una espina de pescado desde donde se realizará el drenaje subsuperficial.

A través de este sistema se proyecta la infiltración de efluentes con un caudal de 3,52 lts/s en un área de 1200 m². Considerando que el nivel estático de la napa está a aproximadamente 135 m.b.n.s, se tiene un espesor de zona no saturada de 133 m.

A continuación se detallan los valores obtenidos para cada parámetro del método BGR, el valor obtenido de la ponderación de éstos, y finalmente los resultados de vulnerabilidad para cada caso de acuerdo a lo descrito anteriormente. Para el detalle de cada uno de los cálculos e interpretación de puntajes ver Apartado 1.

3.2.1 Capacidad de Campo Efectiva (Puntaje S)

Este valor se estima para el caso de recarga desde la superficie, considerando la caracterización del primer metro de suelo. De acuerdo a lo expuesto en el acápite de estratigrafía, este nivel corresponde a un suelo arcilloso de plasticidad media y humedad media, clasificación USCS

equivalente a CL. De acuerdo al Manual de Mapeo de Suelos AG BODENKUNDE 1982, para este tipo de descripción el valor de la capacidad de Campo de este material se encuentra entre 110 y 185 mm lo que le asigna un puntaje S de 250 (ver Tabla 4).

Tabla 4: Evaluación de los suelos sobre la base de la capacidad de campo efectiva (CCE)

Σ CCE (mm) hasta 1,0 m de profundidad	Puntaje S
≥ 250	750
200 - 249	500
140 - 199	250
90 - 139	125
50 - 89	50
= 49	10

3.2.2 Recarga del Acuífero (Puntaje R)

La recarga total se constituye de dos términos independientes que se suman entre sí cuando corresponde, estos son la Recarga Natural (RN) y la Recarga Artificial (RA).

Para la Recarga Natural, en caso que no pueda ser calculada *in situ* en el área de estudio, se considera Recarga Natural Estimada (RNest) equivalente a las precipitaciones anuales menos la evapotranspiración (en mm/año).

La Recarga Artificial corresponde al volumen anual de infiltración desde el Proyecto. Este es expresado en mm/año, en proporción a la superficie de infiltración de la descarga, a saber:

$$RA = \text{Volumen total anual de infiltración} / \text{superficie de infiltración (mm/año)}.$$

Finalmente ambos valores de recarga se suman y se obtiene el factor R de acuerdo a la siguiente tabla (ver Tabla 5).

Tabla 5: Valoración de la Recarga (Factor R)

R para RN estimada	
RNest + RA [mm/a]	Factor R
≤ 99	1,50
100 - 199	1,25
200 - 299	1,00
300 - 399	0,75
≥ 400	0,50

3.2.2.1 Recarga Natural Estimada

Para el caso de infiltración desde la superficie, se tomaron los valores de precipitaciones (mm/año) desde la Estación Pirque (Red Hidrométrica DGA) correspondientes al año 2016. Los datos de evapotranspiración se obtuvieron desde la Estación Los Tilos (Red Agrometeorológica INIA) correspondientes al año 2018. Los valores se pueden ver en la Tabla 6:

Tabla 6: Precipitaciones y evapotranspiración anual en el sector del Proyecto.

Precipitaciones (mm/año)	Evapotranspiración (mm/año)	Recarga Natural Estimada (mm/año)
421	1007,2	-586,2

De acuerdo a la metodología BGR, para estos valores de precipitación y evapotranspiración se obtiene un puntaje R de 1,5 (puntaje para el cálculo de vulnerabilidad del escenario 1).

3.2.2.2 Recarga Artificial (Proyecto)

De acuerdo a lo indicado anteriormente, la recarga artificial se realizará desde un sistema de “espina de pescado” a razón de 3,52 l/s, a una profundidad de 1,5 m, y con un área de infiltración de 1.200 m² para el caudal asociado a la infiltración.

El valor de Recarga Artificial asociado al caudal y área de infiltración según Proyecto es la siguiente (ver Tabla 7):

Tabla 7: Valores de caudal de infiltración y recarga artificial.

Infiltración (m ³ /año)	Área (m ²)	Recarga Artificial (mm/año)
111.006,72	1.200	92.505,6

Finalmente, los valores de Recarga Natural Estimada (RNest) y Recarga Artificial (RA) se suman obteniéndose un valor de 91919,4, valor equivalente a un puntaje R de 0,5 (puntaje para el cálculo de vulnerabilidad en el escenario 2)

Tabla 8: Resumen y suma de valores de Recarga Natural y Artificial.

Recarga Natural Estimada (mm/año)	Recarga Artificial (mm/año)	RNest + RA
-586,2	92.505,6	91919,4

3.2.3 Litología

De acuerdo a lo expuesto en el acápite de estratigrafía, es posible obtener los puntajes (L) de cada estrato de la zona no saturada de acuerdo a su descripción litológica. En la Tabla 9 a continuación, se presentan además de los Puntajes (L) de cada estrato los espesores de cada uno de ellos, y el valor de la Efectividad de Protección de la Cobertura Litológica (P2), de cada uno de ellos al ponderarlos con la Recarga (R) estimada. Finalmente la sumatoria de los P2 nos da el valor de la Efectividad de Protección de la Cobertura Litológica de la zona no saturada.

El detalle de los resultados obtenidos y los valores ponderados para cada estrato se exponen en las Tablas 9 y 10 (Escenarios 1 y 2, respectivamente):

Tabla 9: Puntaje L para cobertura de zona no saturada y valores ponderados por espesor y recarga (Caso 1 sin Proyecto).

Horizonte	Desde (m)	Hasta (m)	Descripción	Puntaje L(i)	Espesor (m)	R	Ponderado P2=R*(LE)
1	1	2,30	Terreno natural, color café, alto contenido de raíces. Suelo arcilloso de plasticidad media y humedad media. Consistencia media a firme, estructura homogénea. Clasificación USCS: CL.	300	1,3	1,5	585
2	2,30	18,00	Gravas areno limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.	5	15,7	1,5	117,75
3	18,00	30,00	Gravas areno limosas y areno arcillosas, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.	50	12	1,5	900
4	30,00	48,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10	18	1,5	270
5	48,00	54,00	Gravas areno limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.	5	6	1,5	45

Horizonte	Desde (m)	Hasta (m)	Descripción	Puntaje L(i)	Espesor (m)	R	Ponderado P2=R*(LE)
6	54,00	126,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10	72	1,5	1080
7	126,00	132,00	Gravas areno limosas y areno arcillosas, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.	50	6	1,5	450
8	132,00	170,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10	2,9	1,5	43,5
PUNTAJE P2 CASO 1							3491,25

Tabla 10: Puntaje L para cobertura de zona no saturada y valores ponderados por espesor y recarga (Caso 2 con infiltración artificial desde el Proyecto).

Horizonte	Desde (m)	Hasta (m)	Descripción	Puntaje L(i)	Espesor (m)	R	Ponderado P2=R*(LE)
1	1,5	2,30	Terreno natural, color café, alto contenido de raíces. Suelo arcilloso de plasticidad media y humedad media. Consistencia media a firme, estructura homogénea. Clasificación USCS: CL.	300	0,8	0,5	120

Horizonte	Desde (m)	Hasta (m)	Descripción	Puntaje L(i)	Espesor (m)	R	Ponderado P2=R*(LE)
2	2,30	18,00	Gravas arena limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.	5	15,7	0,5	39,25
3	18,00	30,00	Gravas arena limosas y arena arcillosas, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.	50	12	0,5	300
4	30,00	48,00	Gravas arena limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10	18	0,5	90
5	48,00	54,00	Gravas arena limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.	5	6	0,5	15
6	54,00	126,00	Gravas arena limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10	72,00	0,5	360

Horizonte	Desde (m)	Hasta (m)	Descripción	Puntaje L(i)	Espesor (m)	R	Ponderado P2=R*(LE)
7	126,00	132,00	Gravas areno limosas y areno arcillosas, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.	50	6	0,5	150
8	132,00	170,00	Gravas areno limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10	2,9	0,5	14,5
PUNTAJE P2 CASO 2							1088,75

3.2.4 Puntaje Total y Condición de Vulnerabilidad del Acuífero.

3.2.4.1 Vulnerabilidad Caso 1 – Recarga Natural sin Proyecto

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, junto con lo expuesto en la Tabla 3, la suma de los puntajes permite obtener el siguiente puntaje total.

P1: Efectividad de Protección del suelo (primer metro de suelo):

$$P1 = S(250) \times R(1,5) = 375$$

P2: Efectividad de Protección de la Cobertura Litológica (bajo el primer metro de suelo):

$$P2 = R(1,5) \times (\sum LiEi 2.327,5) = 3.491,25$$

PT: Efectividad de Protección Total o Vulnerabilidad del Acuífero:

$$PTotal = P1(375) + P2(3.491,25) = 3.866,25$$

Este valor de Puntaje Total le asigna al acuífero una condición de **Vulnerabilidad Baja** ante las descargas provenientes de las aguas lluvias en superficie, que pudiesen potencialmente transportar contaminantes hacia la napa.

3.2.4.2 Vulnerabilidad Caso 2 – Recarga Natural + Recarga Artificial desde el Proyecto

Para este caso no se considera el Puntaje P1 dado que la descarga desde el Proyecto se efectuará a través del sistema de infiltración a partir de los 1,5 m de profundidad, obteniéndose entonces los siguientes resultados:

P2: Efectividad de Protección de la Cobertura Litológica (bajo los 1,5 m de suelo):

$$P2 = R(0,5) \times (\sum LiEi 2177,5) = 1088,75$$

PT: Efectividad de Protección Total o Vulnerabilidad del Acuífero:

$$PTotal = P1(0) + P2(1088,75) = 1088,75$$

Este valor de Puntaje Total le asigna al acuífero una condición de **Vulnerabilidad Media** ante las descargas provenientes de las aguas lluvias en superficie más la infiltración que se realizará desde el sistema de infiltración descrito anteriormente.

4. REFERENCIAS

CASE Ingenieros, 2018. INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS Estudio de Mecánica de Suelos, Sector Lo Herrera, Comuna de San Bernardo.

MOP-DGA. 2004. Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002 Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos.

Sellés, D.; Gana, P. 2001. Geología del Area Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, No. 74, 30 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

1. APARTADO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente Apartado muestra en detalle los procedimientos y cálculos de puntajes para la estimación de vulnerabilidad del acuífero en el sector de Lo Herrera, comuna de San Bernardo.

El método ocupado corresponde al método BGR y la información utilizada se extrae del pozo profundo construido en el predio del Proyecto. Como bien se detalla en el Informe de Vulnerabilidad del cual se desprende este Apartado, el puntaje asociado al espesor de la zona no saturada (Puntaje E) corresponde al espesor (m) de cada estrato de la zona no saturada, por lo que no se asocia a un cálculo propiamente tal.

A continuación, se detallan los cálculos de puntaje de acuerdo a la información recopilada para cada ítem.

1.1.1 Capacidad de campo efectiva del suelo (Puntaje S)

Para determinar la CCE con los datos de terreno se utilizaron las tablas y figuras del Manual de Mapeo de Suelos AG BODENKUNDE 1982, que permiten la estimación de la CCEU (mm/dm) por la composición del suelo.

El material en cuestión corresponde al primer metro de suelo, que corresponde a un material arcilloso de plasticidad media y humedad media, de clasificación USCS CL. Este suelo fue tamizado en el estudio de Mecánica de Suelos efectuado por CASE Ingenieros obteniéndose así el porcentaje del material de acuerdo al tamaño de grano (ver Tabla 1).

Tabla 1: Granulometría primer metro de suelo.

Calicata	%Gravas	%Arenas	%Finos
2	9	19	72
3	4	26	71
4	10	14	76

Con esta información es posible clasificar el tipo de suelo como “arcilla con limo con poca arena” de acuerdo a la clasificación expuesta en el Manual de Mapeo de Suelos AG BODENKUNDE 1982 (clasificación N° 28, ver Tabla 2). Con esta clasificación se obtiene una CCEU entre 11 y 18,5 (mm/dm).

Finalmente este valor de CCEU se multiplica por el espesor de cada horizonte o de la cobertura total de suelo (dm) para determinar la CCE total. En este caso se tiene un rango de 11-18,5 (mm/dm) que se multiplican por 10 (dm) que es el espesor de la cobertura de suelo lo que nos da un rango entre 110-185. Con este último valor se obtiene un puntaje S de 250 (ver Tabla 3).

Tabla 2: Capacidad de Campo Efectiva Unitaria [mm/dm de espesor del estrato de suelo] o [%] según el tipo de suelo y la densidad efectiva de depositación (Dd) para suelos minerales con poco humus.

No.	Descripción litológica del suelo	Traducción	Litología (código edafológico alemán)	CCEU (mm/dm)		
				Dd ₁₋₂	Dd ₃	Dd ₄₋₅
1	A	Arena	S	12,0	10,5	9,0
2	A, l'	Arena poco limosa	Su2	17,5	16,0	13,0
	A, l	Arena limosa				
3	A, l	Arena limosa	Su3	23,0	20,5	18,0
	A, l!	Arena muy limosa				
4	A+L	Arena y limo	Su4	26,5	22,0	20,0
5	L+A	Limo y arena	Us	27,0	25,5	21,5
	L, a!	con mucha arena				
6	L, a	con arena	U	28,5	26,0	23,0
	L, a'	Limo con poca arena				
7	L	Limo	St2	18,5	14,0	13,5
8	A, ac'	Arena con poca arcilla	St2	18,5	14,0	13,5
9	A, l, ac'	Grava 1%, arena 71%, limo -arcilla 28%	Sl2	19,0	17,5	16,0
10	A, l, ac'	Grava 1%, arena 71%, limo -arcilla 28%	Sl3	21,5	18,0	15,5
	A, l!, ac'	Grava 1%, arena 64%, limo -arcilla 35%				
11	A, l, ac	Arena 59%, limo-arcilla 41%	Sl4	20,5	17,0	14,5
	A, l!, ac	55%, limo -arcilla 45%				
	A+L, ac	limo con arcilla				
12	L+A, ac'	Limo y arena con poca arcilla	Slu	27,5	21,0	17,0
	L+A, ac	Limo y arena con arcilla				
13	L, a!, ac'	Limo con mucha arena y poca arcilla	Uls	26,0	22,0	19,5
	L, a!, ac	Limo con mucha arena y arcilla				
	L, a, ac'	Limo con arena y poca arcilla				
	L, a, ac	Limo con arena y arcilla				
14	L, a, ac'	Limo con arena y poca arcilla	Ut2	27,0	25,0	21,0
	L, a', ac'	Limo con poca arena y poca arcilla				
	L, ac'	Limo con poca arcilla				
15	L, ac, a'	Limo con arcilla y poca arena	Ut3	25,5	23,5	21,5
	L, ac	Limo con arcilla (Greda)				
16	A, ac	Arena con arcilla (arena arcillosa)	St3	19,5	15,5	12,0
17	A, ac, l'	Arena arcillosa poco limosa	Ls4	21,0	16,0	12,5
18	A, ac, l	Arena arcillosa limosa	Ls3	20,0	15,0	13,0
19	A+L, ac	Arena y limo con arcilla	Lsu	25,0	22,0	18,0

19	L, a!, ac L, ac, a L, ac, a' L, ac!, a! L, ac!, a L, ac!, a' L, ac!	Limo con mucha arena y arcilla Limo con arcilla y arena Limo con arcilla y poca arena Limo con mucha arcilla y mucha arena Limo con mucha arcilla y arena Limo con mucha arcilla y poca arena Limo con mucha arcilla	Lu	21,0	17,0	14,5
20	L, ac!	Limo con mucha arcilla	Ut4	22,0	20,5	18,0
21	A, ac!	Arena muy arcillosa	Ts4	17,5	15,5	12,0
22	A, ac!, l' A, ac!, l A, ac!, l! A+Ac, l Ac+A, l	Arena muy arcillosa poco limosa Arena muy arcillosa limosa Arena muy arcillosa muy limosa Arena y arcilla con limo y arena con limo	Arcilla Lts	17,5	13,5	10,5
23	L, ac!, a L+A, ac!	Limo con mucha arcilla y arena Limo y arena con mucha arcilla	Lt2	17,5	15,5	11,0
24	L+Ac, a! L+Ac, a L+Ac, a'	Limo y arcilla con mucha arena Limo y arcilla con arena arcilla con poca arena	Limo y Lt3	17,5	14,0	10,0
25	L+Ac L+Ac, a'	Limo y arcilla Limo y arcilla con poca arena	Ltu	20,0	19,0	18,0
26	A+Ac	Arena y arcilla	Ts3	18,5	15,5	11,5
27	Ac+A	Arcilla y arena	Ts2	18,5	15,0	11,5
28	Ac, l!, a! Ac, l, a! Ac, l, a'	Arcilla con mucho limo y mucha arena Arcilla con limo y mucha arena Arcilla con limo y poca arena	T1	18,5	14,5	11,0
29	Ac, l!	Arcilla con mucho limo	Tu	19,5	16,0	12,0
30	Ac Ac, a' Ac, l' Ac, a', l' Ac, a, l' Ac, l, a'	Arcilla plástica (arcilla pura) (plástica) con poca arena Arcilla con poco limo Arcilla con poca arena y poco limo Arcilla con arena y poco limo Arcilla limosa con poca arena	Arcilla T	18,0	16,0	11,0

Tabla 3: Evaluación de los suelos sobre la base de la capacidad de campo efectiva (CCE)

Σ CCE (mm) hasta 1,0 m de profundidad	Puntaje S
≥ 250	750
200 - 249	500
140 - 199	250
90 - 139	125
50 - 89	50
= 49	10

1.1.2 Recarga del acuífero (Puntaje R).

1.1.2.1 Recarga Natural

La Recarga Natural corresponde a la diferencia entre la precipitación anual (mm/año) y la evapotranspiración potencial anual (mm/año). Para el caso de infiltración desde la superficie, se toman los valores de precipitaciones (mm/año) desde la Estación Pirque (Red Hidrométrica DGA) correspondientes al año 2016. Los datos de evapotranspiración se obtuvieron desde la

Estación Los Tilos (Red Agrometeorológica INIA) correspondientes al año 2018. La ubicación de estas estaciones se puede ver en la Tabla 4:

Tabla 4: Fuente de información precipitaciones y evapotranspiración

Fuente Evapotranspiración: http://agromet.inia.cl/estaciones.php			
Estación Los Tilos			
latitud: -33.70726005 longitud: -70.70165517 elevación: 530			
Fuente Precipitaciones: Red Hidrometeorológica DGA			
Estación Pirque			
Altitud (msnm):	659	UTM Norte (mts):	6272884
Latitud S:	33° 40' 26"	UTM Este (mts):	352897
Longitud W:	70° 35' 12"	Área de Drenaje (km	0

Los valores de precipitaciones y evapotranspiración anual se pueden ver en la Tabla 5, obteniéndose una Recarga Natural Estimada de -586,2 mm/año. Este valor permite obtener un factor R de 1,5 (ver Tabla 6).

Tabla 5: precipitaciones y evapotranspiración anual en el sector del proyecto.

Precipitaciones (mm/año)	Evapotranspiración (mm/año)	Recarga Natural Estimada (mm/año)
421	1007,2	-586,2

Tabla 6: Valoración de la Recarga (Factor R)

R para RN estimada	
RNest + RA [mm/a]	Factor R
≤ 99	1,50
100 - 199	1,25
200 - 299	1,00
300 - 399	0,75
≥ 400	0,50

1.1.2.2 Recarga Artificial

La recarga artificial se realizará desde un pozo de infiltración a una tasa de infiltración de 250711,2 m³/año. Sobre las dimensiones de la obra requerida, se ha considerado un pozo de diámetro de 2,5 m. y una altura de infiltración de 45 m., obteniéndose un área de infiltración de 353 m² para el caudal asociado a la infiltración.

Posteriormente se calcula el valor de Recarga Artificial asociado al caudal y el área mencionado anteriormente (ver Tabla 7).

Tabla 7: Valores de caudal de infiltración y recarga artificial.

Infiltración (m ³ /año)	Área (m ²)	Recarga Artificial (mm/año)
250711,2	353	710.230,03

Finalmente, los valores de Recarga Natural Estimada (RNest) y Recarga Artificial (RA) se suman obteniéndose un valor de 709.643,8, valor equivalente a un puntaje R de 0,5 (ver Tabla 6)

Tabla 8: Resumen y suma de valores de Recarga Natural y Artificial.

Recarga Natural Estimada (mm/año)	Recarga Artificial (mm/año)	RNest + RA
-586,2	710.230,03	709.643,8

1.1.3 Litología (Puntaje L).

La efectividad de la protección que provee la zona no saturada desde 1 m bajo la superficie del terreno (en el caso que la infiltración sea superficial), o desde el punto de infiltración /a cualquier profundidad) hasta el nivel freático se calcula para cada estrato separadamente. Los puntajes de todos los estratos en la sección se suman finalmente para obtener el puntaje total.

Para este caso se cuenta con las descripciones estratigráficas (sin proporciones o porcentajes estimados) las cuales son cotejadas con la Tabla 9 la cual muestra el puntaje Ln asociado para cada tipo de material según su granulometría. Dicha tabla se encuentra adaptada para los sedimentos no consolidados que se describen en el presente método, con puntajes asociados, y para algunas de las equivalencias encontradas comúnmente en las descripciones estratigráficas de sondajes.

Finalmente, en la Tabla 10 se muestran los horizontes o estratos definidos para el caso del pozo del presente estudio junto a su puntaje Ln respectivo.

Tabla 9: Equivalencias Litológicas para Descripciones Estratigráficas Comunes de Sondajes y puntajes asociados para la evaluación de Ln.

Depósitos no consolidados	Equivalencias	Término comúnmente por MINAGRI	Puntaje Ln
Arcilla			500
Arcilla poco limosa	Arcilla-Limo, Arcilla fangosa	Arcillo limosa liviana	400
Ceniza fina			400
Turba		Turba	300
Sapropel		Saprolito	300
Limo	Limo-Arcilla, Limo arcilloso, Limo cementado		300
Arcilla arenosa	Arcilla-Arena, Limo arenoso, Limo-Arena, Arcilla-limo-arena	Arcillo arenosa pesada	270
Arcilla con grava	Arcilla con Bolones o Ripio, Limo arenoso con Grava o Bolones o Ripio, Arcilla arenosa con Grava o Bolones o Ripio, Arcilla-Arena-Grava o Bolones o Ripio, Arcilla-Grava o Ripio, Limo-arena-arcilla		200
Ignimbrita semiconsolidada	Pumicita, liparita, cinerita		200
Ceniza gruesa			200
Arena arcillosa	Arena-Arcilla, Arena-Arcilla (>20%)-arena, Arena-Limo, "cancagua" Arena limosa, Arena cementada, Arena-arcilla-limo	Franco areno fino	140
Grava arcillosa arenosa	Ripio o Grava o Bolones-Arcilla (>20%), Bolones o grava limo-arcilla		75
Grava arenosa arcillosa	Grava - Arena - Arcilla ($\leq 20\%$), Bolones o Ripio o Grava arenosa-poca Arcilla Arena arcillosa ($\leq 20\%$), Ripio-Arcilla-Arena, arena-arcilla-grava Arena con Grava poco limo		50
Tefra de lapilli	Manto de lapilli, Gravilla volcánica, "chicharrones", "piedra pómez"		50
Arena	Arena con grava fina, Arena con piedrecilla o gravilla, Arena-arcilla-bolones o grava	Arenosa	25
Grava arenosa	Ripio-Arena, Bolones o Ripio arenoso, Gravilla		10
Grava	Bolones o Ripio, Roca, Bloques, Grava-Bolones-Ripio	Sustrato de ripio abierto	5

Horizonte	Tramo		Unidad Estratigráfica	Puntaje Ln
	Desde (m)	Hasta (m)		
1	0,00	2,30	Terreno natural, color café, alto contenido de raíces. Suelo arcilloso de plasticidad media y humedad media. Consistencia media a firme, estructura homogénea. Clasificación USCS: CL.	300
2	2,30	18,00	Gravas arena limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.	5
3	18,00	30,00	Gravas arena limosas y arena arcillosas en menor orden, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.	50
4	30,00	48,00	Gravas arena limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10
5	48,00	54,00	Gravas arena limosas con presencia de bolones (8" a 10"), humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos angulosos a subredondeados, tamaño máximo 8" a 10". Clasificación USCS: GP-GM.	5
6	54,00	126,00	Gravas arena limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10
7	126,00	132,00	Gravas arena limosas y arena arcillosas en menor orden, humedad baja a nula, plasticidad baja, gravas de cantos redondeados y subredondeados. Clasificación USCS: GM-GC.	50
8	132,00	170,00	Gravas arena limosas, humedad baja, plasticidad baja a nula, compacidad densa, gravas de clastos redondeados a subredondeados. Clasificación USCS: GP-GM.	10

2. REFERENCIAS

CASE Ingenieros, 2018. INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS Estudio de Mecánica de Suelos, Sector Lo Herrera, Comuna de San Bernardo.

MOP-DGA. 2004. Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002 Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos.