

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Formulación de estudio propuesto .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivos generales.....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>1.3 Hipótesis de trabajo.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Metodología.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Gestión de la recarga de acuíferos .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Definición .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Objetivos .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Ventajas .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4 Aspectos técnicos .....</b>	<b>6</b>
2.4.1 Condiciones técnicas para una recarga gestionada exitosa .....	6
2.4.2 Mecanismos de infiltración .....	7
2.4.2.1 Sistemas de dispersión o distribución.....	8
2.4.2.2 Modificación del canal .....	9
2.4.2.3 Pozos y perforaciones .....	9
2.4.2.4 Sistemas de filtración .....	10
2.4.2.5 Ventajas y desventajas.....	11
2.4.2.6 Colmatación .....	12
2.4.3 Calidad de aguas a infiltrar.....	12
<b>2.5 Aspectos legales en Chile.....</b>	<b>13</b>
<b>2.6 Estudios y experiencia internacional.....</b>	<b>14</b>
<b>2.7 Estudio y experiencia en Chile .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Antecedentes generales .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Ubicación y vías de acceso .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Geomorfología y relieve .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Estructuras.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Hidrografía.....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 Antecedentes climáticos.....</b>	<b>21</b>

<b>4. Caracterización hidrológica.....</b>	<b>22</b>
4.1 Introducción .....	22
4.2 Recopilación de información.....	22
4.3 Corrección, relleno y extensión de estadística.....	23
4.4 Análisis de homogeneidad y consistencia.....	24
4.5 Análisis de la frecuencia de las estadísticas. ....	24
<b>5. Caracterización hidrogeológica de la cuenca .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1 Marco Geológico-Hidrogeológico .....</b>	<b>26</b>
5.1.1 Unidades de roca o unidades de importancia hidrogeológica baja a nula.....	27
5.1.1.1 Rocas estratificadas .....	27
5.1.1.2 Rocas intrusivas .....	28
5.1.1.3 Depósitos cuaternarios.....	28
5.1.2 Unidades de depósitos no consolidados o unidades de importancia hidrogeológicas baja a alta.....	29
<b>5.2 Unidades hidrogeológicas de acuerdo a la permeabilidad.....</b>	<b>34</b>
5.2.1 Unidad 1: Medios intergranulares de permeabilidad alta a moderada .....	34
Subunidad 1.1: Depósitos Sedimentarios de Origen fluvial de alta energía.....	34
Subunidad 1.2: Depósitos Sedimentarios de Origen No Fluvial.....	34
5.2.2 Unidad 2: Medios intergranulares y fracturados de permeabilidad moderada a baja .....	35
5.2.3 Unidad 3: Medios rocosos de permeabilidad muy baja a nula .....	35
<b>5.3 Estratigrafía de la cuenca .....</b>	<b>38</b>
<b>5.4 Acuífero .....</b>	<b>41</b>
5.4.1 Delimitación del acuífero .....	41
5.4.2 Transmisividad .....	41
5.4.3 Permeabilidades.....	42
5.4.4 Coeficiente de almacenamiento .....	43
<b>5.5 Niveles estáticos.....</b>	<b>43</b>
<b>5.6 Dirección del flujo subterráneo .....</b>	<b>45</b>
<b>5.7 Calidad del agua de la cuenca.....</b>	<b>47</b>
5.7.1 Aguas superficiales .....	47
5.7.2 Aguas subterráneas .....	48
<b>5.8 Relación río-acuífero. ....</b>	<b>50</b>

<b>6. Resultados</b> .....	<b>51</b>
<b>6.1 Determinación de sectores con potencialidad para la recarga gestionada</b> ..	<b>51</b>
6.1.1 Caracterización Sector 1 .....	55
6.1.1.1 Ubicación .....	55
6.1.1.2 Estratigrafía .....	55
6.1.1.3 Gradiente hidráulico y pendiente topográfica.....	61
6.1.1.4 Permeabilidad superficial.....	63
<b>6.2 Zonas con potencialidad para recarga gestionada en sector 1</b> .....	<b>64</b>
6.2.1 Caracterización subsector ORG.....	68
6.2.1.1 Permeabilidad horizontal .....	68
6.2.1.2 Permeabilidad superficial vertical .....	68
6.2.1.3 Nivel estático .....	69
6.2.1.4 Fuentes de recarga .....	69
6.2.1.5 Disponibilidad de agua para la recarga.....	71
6.2.1.6 Calidad de la fuente de recarga.....	73
6.2.1.7 Métodos de recarga.....	77
<b>7. Propuesta de alternativas de proyectos de recarga gestionada</b> ...	<b>79</b>
<b>7.1 Caudal susceptible de infiltración</b> .....	<b>79</b>
<b>7.2 Alternativas de proyectos</b> .....	<b>81</b>
7.2.1 Alternativa 1: Balsas o estanques de infiltración .....	81
7.2.1.1 Ubicación .....	81
7.2.1.2 Caudal de infiltración .....	82
7.2.1.3 Instalaciones y equipamiento .....	82
7.2.1.4 Presupuesto .....	84
7.2.2 Alternativa 2: Zanjas de infiltración.....	86
7.2.2.1 Ubicación .....	86
7.2.2.2 Caudal de infiltración.....	86
7.2.2.3 Instalaciones y equipamiento .....	86
7.2.2.4 Presupuesto .....	88
7.2.3 Alternativa 3: Pozos de inyección.....	89
7.2.3.1 Ubicación .....	89
7.2.3.2 Caudal de infiltración.....	89
7.2.3.3 Instalaciones y equipamiento .....	89
7.2.3.4 Presupuesto .....	91

7.2.4 Alternativa 4: Solución mixta 1: Balsas de infiltración junto con pozos de inyección .....	93
7.2.4.1 Ubicación .....	93
7.2.4.2 Caudal de infiltración .....	93
7.2.4.3 Instalaciones y equipamiento .....	93
7.2.4.4 Presupuesto .....	94
7.2.5 Alternativa 5: Solución mixta 2: Zanjas de infiltración junto con pozos de inyección. ....	95
7.2.5.1 Ubicación .....	95
7.2.5.2 Caudal de infiltración .....	95
7.2.5.3 Instalaciones y equipamiento .....	95
7.2.5.4 Presupuesto .....	96
<b>7.3 Estimación del volumen saturado generado.....</b>	<b>97</b>
<b>8. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>109</b>
<b>Anexo A: Mecanismos de recarga gestionada.....</b>	<b>110</b>
<b>Anexo B: Aspectos Legales .....</b>	<b>131</b>
<b>Anexo C: Fluviometría.....</b>	<b>140</b>
<b>Anexo D: Catastro de pozos.....</b>	<b>163</b>
<b>Anexo E: Normas de calidad de aguas.....</b>	<b>171</b>
<b>Anexo F: Derechos de aguas río Teno.....</b>	<b>176</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resumen de los dispositivos MAR. Fuente: Elaboración propia con datos de Bouwer (2002), UNESCO, (2005) y Fernández Escalante (2011).....	7
<b>Tabla 2.</b> Factores, Ventajas y desventajas de los métodos de recarga gestionada superficiales y en profundidad. Fuente: DGA (2012). .....	11
<b>Tabla 3.</b> Estaciones fluviométricas seleccionadas .Las Coordenadas UTM, corresponden al DATUM WGS 84, Huso 19 Sur. Fuente: DGA (2010) .....	23
<b>Tabla 4.</b> Puntos de medida y seguimiento de la calidad de las aguas superficiales en la Cuenca de los Ríos Teno y Lontué. Fuente: ARCADIS (2013). .....	47
<b>Tabla 5.</b> Caudales medios mensuales a distintas probabilidades de excedencia para la estación fluviométrica 06) Río Teno en el Puente Ferrocarril, estos se asumen para el caudal pasante por el subsector ORG. Elaboración propia a partir de datos del Portal en línea de la DGA.....	70
<b>Tabla 6.</b> Derechos de aguas superficiales otorgados en el río Teno. Se diferencian entre consuntivos y no consuntivos de ejercicio permanente o el total de derechos para todos los meses del año, más el caudal promedio anual otorgado. Fuente: Elaboración propia con datos online DGA.....	71
<b>Tabla 7.</b> Comparación de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales del río Teno en el subsector ORG mediante la representación de los pozos M-8, M-9, M-10 y las estaciones fluviométricas “Teno en los Queñes” y “Teno antes de junta con el río Mataquito. IP= Periodo Invierno-Primavera; TQ= Teno en los Queñes; TAJRM = Teno antes junta con río Mataquito; NM= No medido. Fuente: Elaboración propia con datos CNR, (2006); DGA, (2004) y DGA (en línea). .....	76
<b>Tabla 8.</b> Caudales medios mensuales a distintas probabilidades de excedencia para la estación fluviométrica 06) Río Teno en el Puente Ferrocarril, estos se asumen para el caudal pasante por el subsector ORG. En rojo se marcan los caudales asociados a un 25% de probabilidad de excedencia, los cuales son considerados como los susceptibles a infiltrar. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Portal en línea de la DGA. ....	80
<b>Tabla 9.</b> Caudal susceptible a infiltrar en un proyecto de recarga gestionada de acuíferos, considerando el 20% del caudal ecológico mínimo. Fuente: Elaboración propia.....	80
<b>Tabla 10.</b> Detalles de los costos de instalación de las obras del proyecto de balsas de infiltración. Fuente: Elaboración propia con los precios se obtenidos en CNR (2013) y DGA (2012). .....	85
<b>Tabla 11.</b> Detalles de los costos de instalación de las obras del proyecto de zanjas de infiltración. Fuente: Elaboración propia con los precios se obtenidos en CNR (2013), DGA (2012) y MINVU (1996). .....	88
<b>Tabla 12</b> Detalles de los costos de instalación de las obras del proyecto de pozos de inyección. Fuente: Elaboración propia con los precios se obtenidos en CNR (2013), DGA (2012) y MINVU (1996). .....	91

**Tabla 13.** Detalles de los costos de instalación de las obras del proyecto mixto 1. Fuente: Elaboración propia con los precios se obtenidos en CNR (2013), DGA (2012) y MINVU (1996).  
..... 94

**Tabla 14.** Detalles de los costos de instalación de las obras del proyecto mixto 2. Fuente: Elaboración propia con los precios se obtenidos en CNR (2013), DGA (2012) y MINVU (1996).  
..... 96

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> . División de la Cuenca del río Mataquito en 3 subcuencas: subcuenca del río Teno (rojo), río Lontué (rojo) y río Mataquito (verde) con sus principales vías de acceso. En rojo se observa la zona de estudio. Proyección UTM, DATUM WGS1984, Huso 19 sur. Fuente: Elaboración propia.....	17
<b>Figura 2.</b> Rasgos geomorfológicos de la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Fuente: Elaboración propia con los datos shapefile de Albers (2012). Proyección UTM, DATUM WGS1984, Huso 19 sur. ....	19
<b>Figura 3.</b> Estructuras ubicadas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de Alfaro (2011) y DGA (2012). ....	20
<b>Figura 4.</b> Red Hidrográfica cuenca de los ríos Teno y Lontué. Fuente: Elaboración Propia. Proyección UTM, DATUM WGS1984, Huso 19 sur.....	21
<b>Figura 5.</b> Ubicación de las estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas. Fuente: Modificado DGA (2012). ....	23
<b>Figura 6.</b> Curvas de variación estacional de caudales medios mensuales para las 9 estaciones en estudio, considerando 6 probabilidades de excedencia: 5%,10%,25%,50%,85%,95%; Q= caudal en m <sup>3</sup> /s. Fuente: Elaboración propia. ....	25
<b>Figura 7.</b> Distribución y ubicación de las Unidades Geológicas – Hidrogeológicas de la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Incluye diferenciación de unidades de acuerdo a la importancia hidrogeológica relativa. Proyección UTM, DATUM WGS1984, Huso 19 Sur. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de DGA, 2013; Hauser, 1990, 1995; SERNAGEOMIN, 2003 .....	33
<b>Figura 8.</b> Unidades Hidrogeológicas de acuerdo a su permeabilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CNR, 2006; y DGA, 2012. ....	37
<b>Figura 9.</b> Ubicación de los perfiles y pozos estratigráficos en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de DGA (2012).....	38
<b>Figura 10.</b> Perfiles Hidrogeológicos A-A', B-B' y C-C' en la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Fuente: Modificado DGA (2012). ....	39
<b>Figura 11.</b> Perfiles Hidrogeológicos D-D', E-E' y F-F', en la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Fuente: Modificado DGA (2012). ....	40
<b>Figura 12.</b> A) Acuífero de la cuenca de los ríos Teno y Lontué. B) Plano Isobático. Representación de la posición del basamento rocoso, marcando el limite Roca-Relleno de la cuenca en profundidad Proyección, UTM, Datum WGS84, Zona 19S. Fuente: Modificado DGA (2012). ....	41
<b>Figura 13.</b> Transmisividad del acuífero de la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Fuente: Modificado de CNR (1978).....	42
<b>Figura 14.</b> Distribución de permeabilidades (m/d) en la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Proyección UTM, Datum, WGS84, Zona 19S. Fuente: Modificado DGA (2012).....	43

<b>Figura 15.</b> Profundidad de los niveles estáticos (m) con sus respectivos pozos de medición en la cuenca de los ríos Teno y Lontué, Datum WGS84, zona 19S. Fuente: Modificado DGA, 2012. ....	44
<b>Figura 16.</b> Curvas Isofreáticas o equipotenciales de la cuenca de los ríos Teno y Lontué, junto con la dirección de los flujos de aguas subterráneas. Fuente: Modificado DGA (2012). ....	45
<b>Figura 17.</b> Gradiente hidráulico de las aguas subterráneas de los ríos Teno y Lontué en % relativo. Fuente: Elaboración propia.....	46
<b>Figura 18.</b> Puntos de medida y seguimiento de la calidad de las aguas superficiales en la Cuenca de los Ríos Teno y Lontué. Los puntos destacados presentan coliformes fecales por sobre de los parámetros establecidos. Fuente: Modificado de ARCADIS (2003). ....	48
<b>Figura 19.</b> Puntos de medida de la calidad ambiental de las aguas subterráneas en la cuenca de los ríos Teno y Lontué. Fuente: Modificado DGA (2006).....	49
<b>Figura 20.</b> Estaciones que sobrepasan el parámetro del Aluminio en aguas subterráneas según la Guía de normas Secundarias (CONAMA ,2003). Fuente: Modificado DGA (2006a.) ....	50
<b>Figura 21.</b> Relación de recarga entre los ríos Teno y Lontué, y el acuífero asociado. En color rojo se observan las zonas de afloramiento, en morado las zonas mixtas y en amarillo las zonas de infiltración permanente. Fuente: Modificado DGA (2006a).....	51
<b>Figura 22.</b> A) Polígono que encierra las áreas que tienen profundidades del nivel estático mayores a 20 m. B) Polígonos que abarcan las áreas que tienen permeabilidades mayores a 20 m/d. C) Polígonos que encierran los sectores con potencialidad para un proyecto de recarga gestionada, generados por la intersección de los polígonos del mapa A) y B). Existen 6: S1, S2, S3, S4, S5 y S6. Fuente: Elaboración propia. ....	53
<b>Figura 23.</b> A) Distribución de las profundidades de los niveles estáticos de la cuenca en estudio en los 6 sectores aptos para la recarga gestionada. B) Distribución de las permeabilidades de la cuenca en estudio en los 6 sectores C) relaciones rio-acuífero en los 6 sectores con potencialidad. Fuente: Elaboración propia. ....	54
<b>Figura 24.</b> Ubicación del sector 1 y de las columnas estratigráficas asociadas al sector. Fuente: Elaboración propia.....	55
<b>Figura 25.</b> Perfiles estratigráficos del sector 1, junto con la ubicación de las columnas geológicas utilizadas para la realización de los perfiles. Fuente: Elaboración propia. ....	56
<b>Figura 26.</b> Perfil A-A' Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	57
<b>Figura 27.</b> Perfil B-B' Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	58
<b>Figura 28.</b> Perfil C-C' zona de estudios. Fuente: Elaboración propia.....	59
<b>Figura 29.</b> Perfil D-D' Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	60
<b>Figura 30.</b> Gradientes Hidráulicas y curvas isofreáticas en el sector 1. Fuente: Elaboración propia. ....	61
<b>Figura 31.</b> Pendientes topográficas (%) del sector 1. Fuente: Modificado CIREN (2015). ....	62

<b>Figura 32.</b> Distribución de la permeabilidad vertical superficial del sector 1.;Proyeccion UTM, DATUM WGS84, Huso 19 Sur; Fuente: CIREN (2015).....	63
<b>Figura 33.</b> Delimitación del subsector ORG de acuerdo a las condiciones técnicas más favorables para captar caudales y posteriormente infiltrarlos. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IDE-Chile, 2016. ....	66
<b>Figura 34.</b> Características técnicas del subsector ORG en comparación con el resto del sector 1. A) Profundidad de los niveles estáticos. B) Permeabilidad lateral. C) Permeabilidad vertical superficial. D) Relación de recarga río acuífero. Fuente: Elaboración propia. ....	67
<b>Figura 35.</b> Permeabilidad lateral del Subsector ORG. Proyección UTM, DATUM WGS84, Huso 19 sur. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DGA, 2012. ....	68
<b>Figura 36.</b> Permeabilidad vertical superficial en el subsector ORG junto canales de regadío del lugar. Proyección UTM, DATUM WGS84, Huso 19 sur; Fuente: Elaboración propia con datos de CIREN (2015) e IDE-Chile (2016).....	68
<b>Figura 37.</b> Profundidad del nivel estático en el subsector ORG; Proyección UTM, DATUM WGS84, Huso 19 sur; Fuente: Elaboración propia con datos de DGA (2012).....	69
<b>Figura 38.</b> Estación fluviométrica río Teno en el puente ferrocarril, ubicada en el interior del subsector ORG; Proyección UTM, DATUM WGS84, Huso 19 sur; Fuente: Elaboración propia con datos DGA (2013).....	70
<b>Figura 39.</b> Propietarios de los derechos de aguas superficiales del río Teno. A) Propietarios de los derechos de aguas no consuntivos y sus caudales asociados. B) Propietarios de los derechos de aguas consuntivos y sus caudales asociados junto con el tipo de ejercicio asignado a cada derecho. EC = Eventual Continuo; ED = Eventual Discontinuo; EA = Eventual Alternado; PC = Permanente Continuo; PD = Permanente Discontinuo; PA = Permanente Alternado. Fuente: Elaboración propia con datos DGA online.....	72
<b>Figura 40.</b> Estaciones fluviométricas de calidad de agua subterránea M02 y M01. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ARCADIS (2003).....	74
<b>Figura 41.</b> Ubicación de los puntos de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas, M-8,M-9 Y M-10, junto con la ubicación de las estaciones fluviométricas que miden la calidad de las aguas superficiales del río Teno. Las mediciones de calidad de aguas subterráneas y de las estaciones fluviométricas son comparadas para analizar la factibilidad de infiltrar las aguas superficiales sin un tratamiento sobre éstas. Fuente: Elaboración propia con los datos de CNR (2006) y DGA (2013).....	75
<b>Figura 42.</b> Zonas aptas para la instalación de mecanismos de infiltración superficial: Cauce del río Teno y sus depósitos fluviales actuales junto con las zonas aledañas al río Teno (rosado). Proyección UTM, DATUM WGS84, Huso 19 sur Fuente. Elaboración propia con datos de CIREN (2015). ....	77
<b>Figura 43.</b> Zonas óptimas para la recarga gestionada mediante sistemas directos al acuífero. Fuente: Elaboración propia. ....	79
<b>Figura 44.</b> Zona escogida para implementar el proyecto de recarga gestionada con balsas de infiltración; Proyección UTM, DATUM WGS84, Huso 19 sur; Fuente: Elaboración propia. ....	82

<b>Figura 45.</b> Proyecto de recarga gestionada con 24 módulos de infiltración. Fuente: Elaboración propia .....	83
<b>Figura 46.</b> . Esquema de módulo de infiltración, y del muro enrocado. Fuente: Modificado de CNR (2012). .....	84
<b>Figura 47.</b> Elección del factor de seguridad para la instalación de obras de Zanjas de infiltración. Fuente: Azzout et al. (1994).....	87
<b>Figura 48.</b> Proyecto de recarga gestionada mediante 12 zanjas de infiltración de 576 x 2 x 5m. Proyección UTM, DATUM WGS 1984, Huso 19 sur. Fuente: Elaboración propia. ....	88
<b>Figura 49.</b> Diseño propuesto para un pozo de inyección en la zona saturada. Se muestran los parámetros que se utilizaron para calcular el caudal infiltrante mediante el Método de Lefranc, el que se muestra en las ecuaciones 4 y 5. N.E = Nivel estático; Criba slot 40 12” = Factor Criba 25%. Fuente: Elaboración propia. ....	90
<b>Figura 50.</b> Esquema de proyecto de recarga gestionada mediante 24 pozos de inyección en un área de 200m <sup>2</sup> . Fuente: Elaboración propia. ....	91
<b>Figura 51.</b> Esquema de proyecto de recarga gestionada mediante 10 piscinas de infiltración con su respectivo modulo y 14 pozos de inyección directos al acuífero. Fuente: Elaboración propia. ....	93
<b>Figura 52.</b> Esquema de proyecto de recarga gestionada mixto mediante 6 zanjas de infiltración de 567x2x5m y 7 pozos de inyección de 85 m directos al acuífero. Fuente: Elaboración propia	96