

Recarga de Agua Subterránea

Natural y por Gestión

Carlos Flores Arenas

Modelador Hidrológico DGA

PhD in Hydrologic Sciences UC Davis

MSc en Ingeniería Agrícola UdeC

BS Ingeniero Agrónomo UMayor

24 de Julio 2019

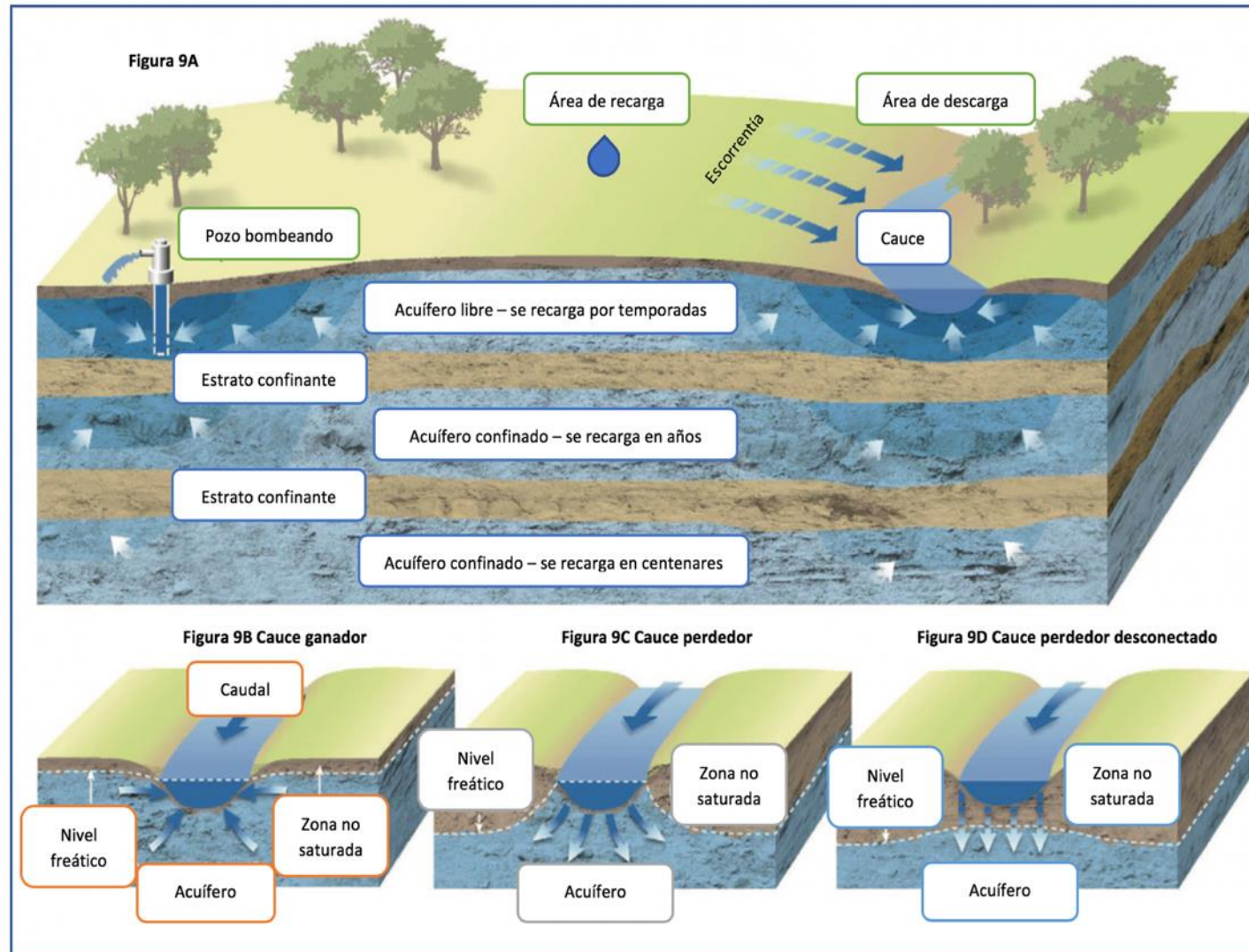
Contenidos

1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión
3. Experiencias en el Extranjero
4. Experiencias en Chile
5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero

Contenidos

- 1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas**
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión
3. Experiencias en el Extranjero
4. Experiencias en Chile
5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero

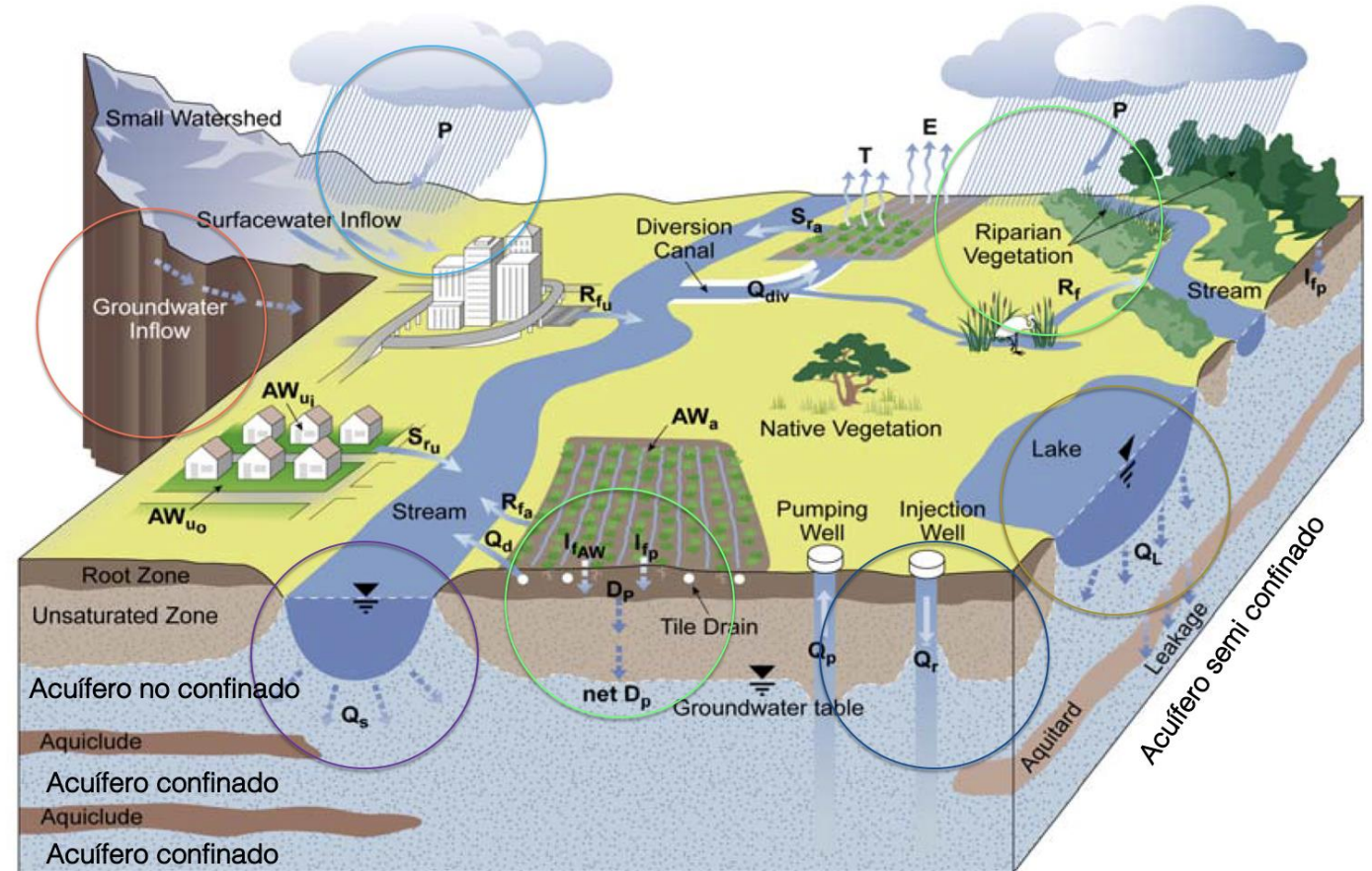
Interacciones entre agua superficial y subterránea



Procesos Hidrológicos en Recarga de Acuíferos

Recarga por

- Cauces
- Lluvia/deshielos en pie de montes
- Riego/lluvia en superficie
- Flujo subterráneo cuencas aledañas
- Planicies de inundación/embalses/lagos
- Inyección por pozos



LEGEND

P.....Precipitation

AW_a..... Water applied to agricultural lands

AW_{ui}..... Water applied to indoor urban lands

AW_{uo}..... Water applied to outdoor urban lands

E.....Evaporation

T..... Transpiration

I_{fp}..... Infiltration of precipitation

I_{fAW}..... Infiltration of applied water

Q_{div}..... Surface water diversion

S_{fa}..... Agricultural runoff

S_{ru}..... Urban runoff

R_f..... Return flow

R_{fa}..... Agricultural return flow

R_{ru}..... Urban return flow

D_p.....Deep percolation of water to the unsaturated zone

net D_p.....Recharge to the groundwater aquifer

Q_p.....Pumping from groundwater aquifer

Q_r..... Recharge to groundwater aquifer

Q_s..... Stream-groundwater interaction

Q_L.....Lake-groundwater interaction

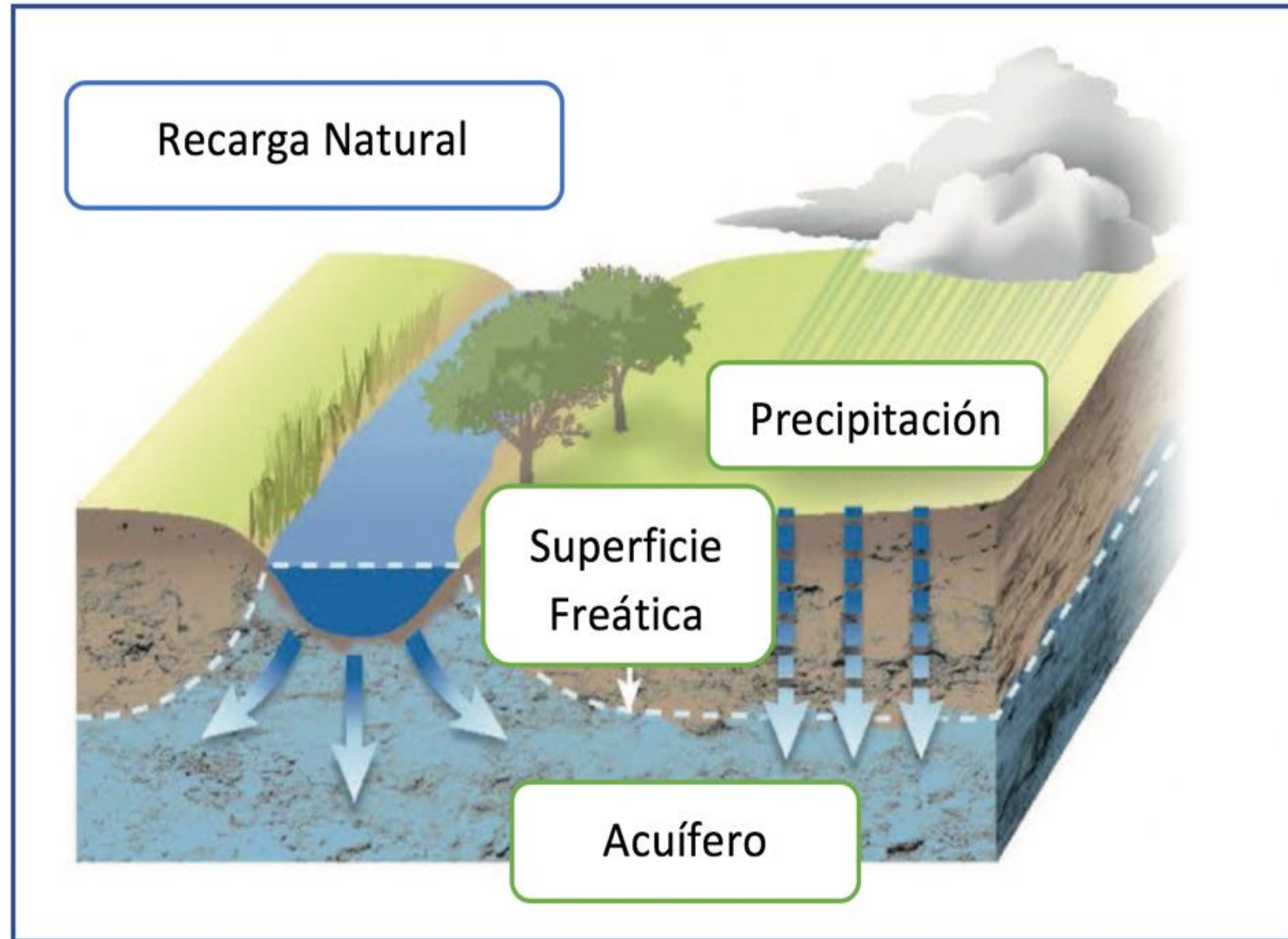
Q_d.....Tile drainage flow

(IWFM Integrated Water Flow Model) Theoretical Documentation, (2018)

Contenidos

1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
- 2. Mecanismos de recarga de agua subterránea**
 - i. Natural**
 - ii. Por gestión
3. Experiencias en el Extranjero
4. Experiencias en Chile
5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero

Recarga natural de agua subterránea



Partición de la Recarga Acuíferos

Naturalmente:

- Cauces aportantes al agua subterránea por infiltración (50%).
- Recarga en pie de montes por efecto de precipitaciones y deshielos (20%).
- Infiltración por riego agrícola/precipitación (15%), variable según cuenca, puede llegar a más del 90% en cuencas con altas tasas de riego.
- Flujo desde cuencas aledañas (10%).
- Flujo base, i.e. caudales móviles en la zona no saturada que descargan a los acuíferos (5%).

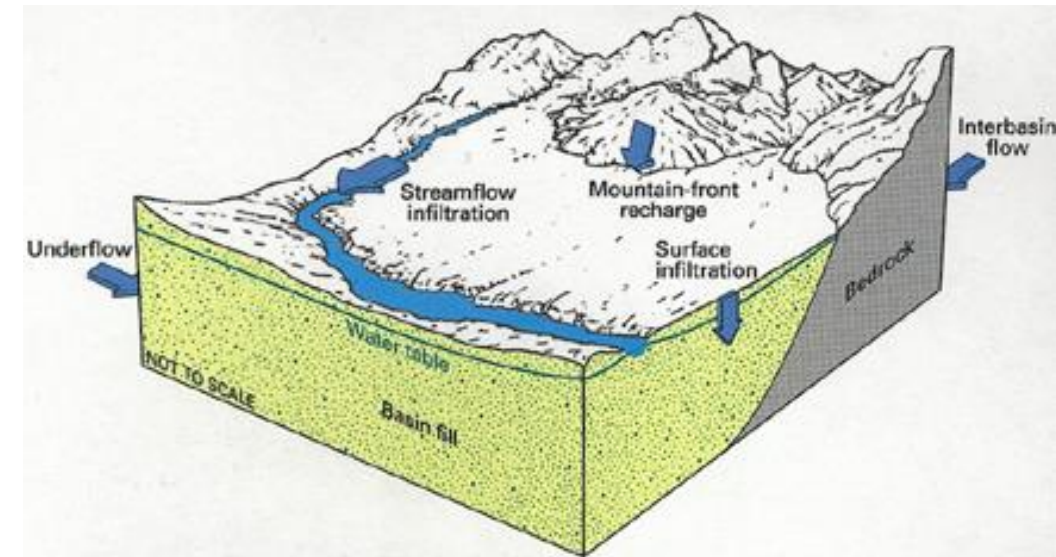


Figure 37. The Basin and Range aquifers have five principal components of ground-water recharge. Streamflow infiltration is the largest component; mountain-front recharge is the second largest.

Contenidos

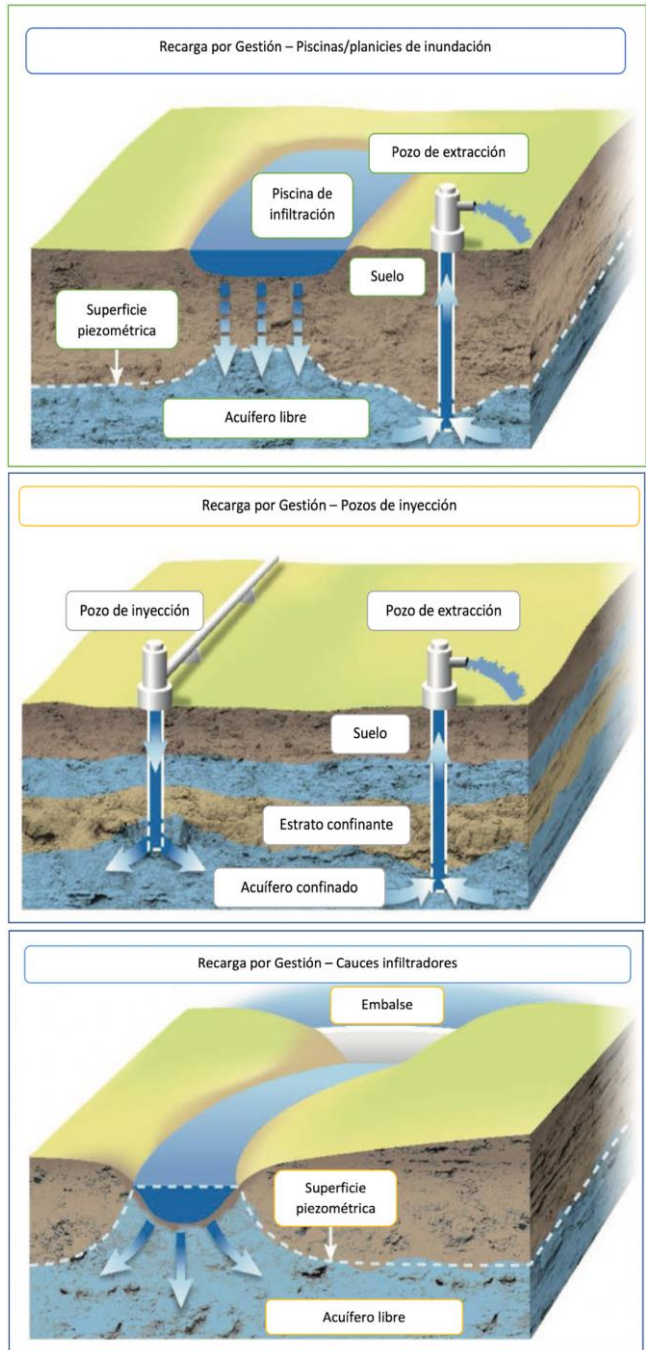
1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
- 2. Mecanismos de recarga de agua subterránea**
 - i. Natural
 - ii. Por gestión – Managed Aquifer Recharge (MAR)**
3. Experiencias en el Extranjero
4. Experiencias en Chile
5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero

Métodos de Recarga por Gestión



- Piscinas de infiltración
- Recarga desde ríos inducida por bombeo
- Pozos de inyección
- Cauces infiltradores
- Captura de lluvia y escorrentía

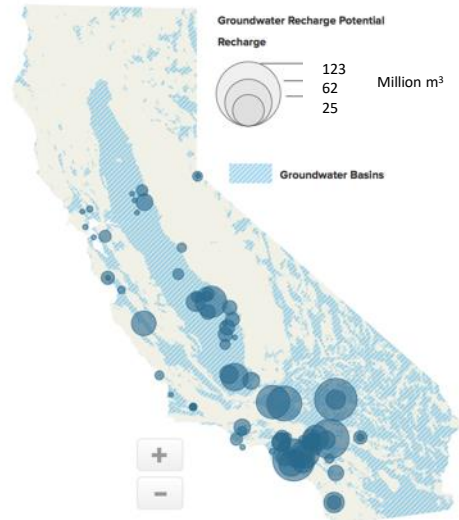
Más comunes:



Contenidos

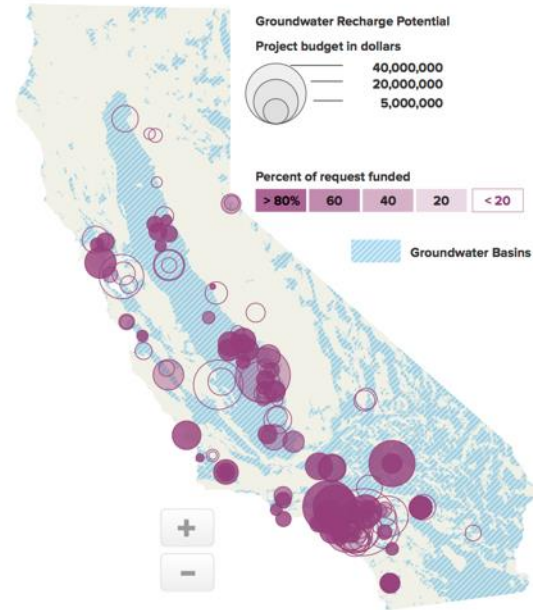
1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión – Managed Aquifer Recharge (MAR)
- 3. Experiencias en el extranjero**
4. Experiencias en Chile
5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero

California



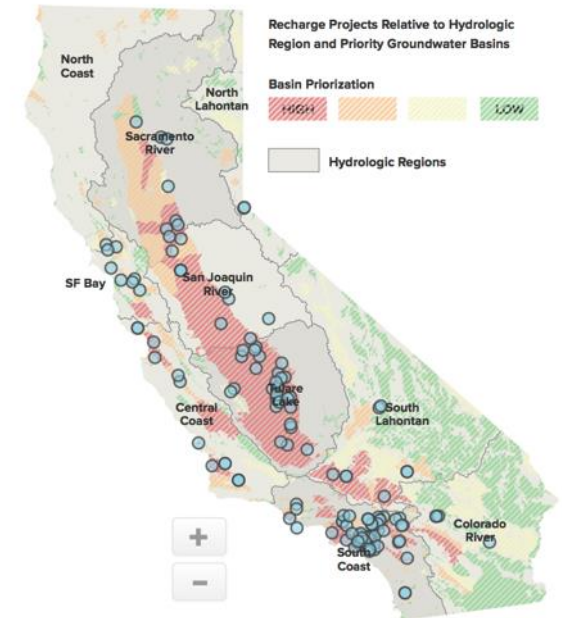
The amount of recharge from studied projects that were funded is at least

378
Million m³



There is unmet demand for groundwater recharge

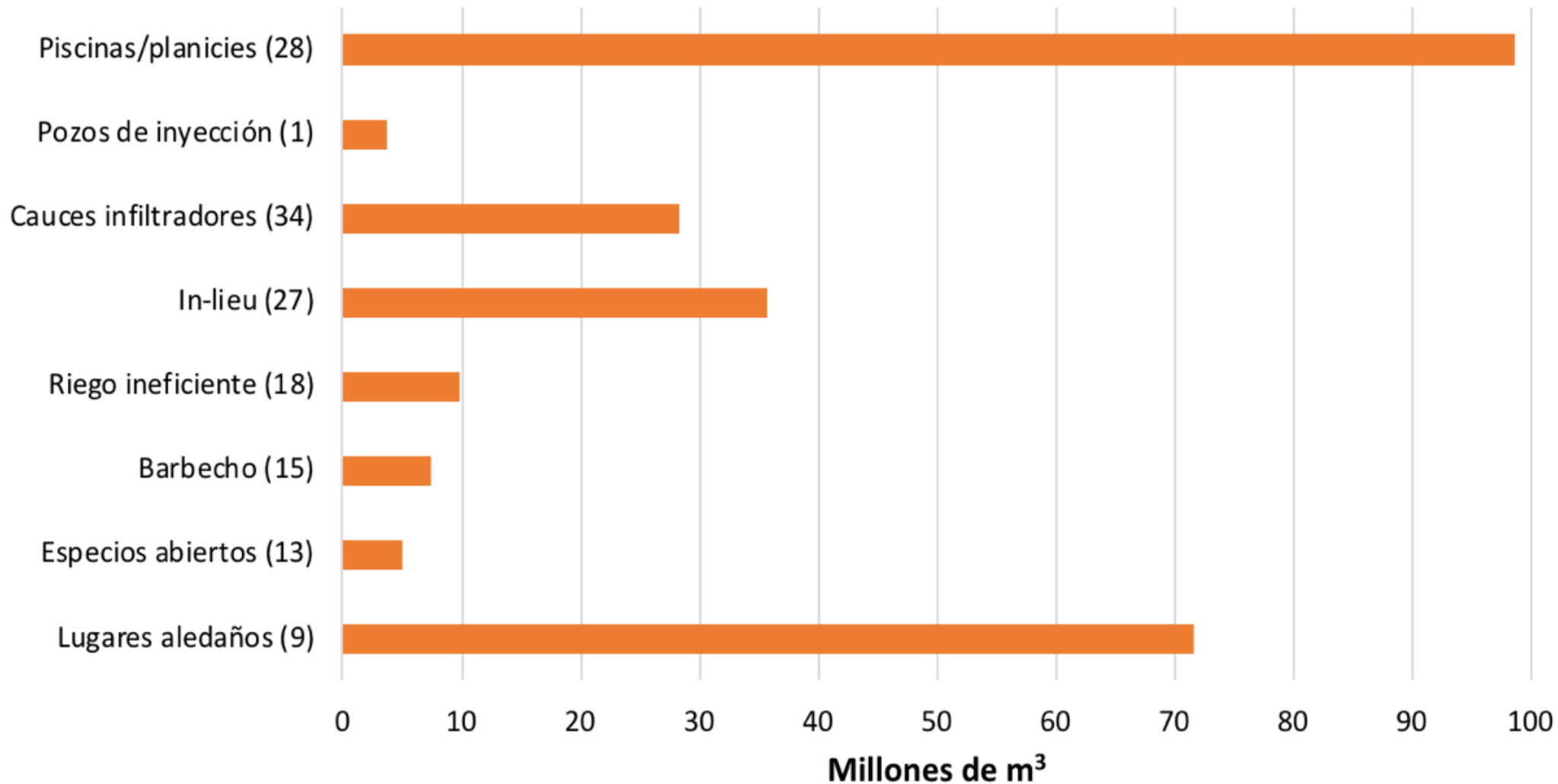
The 78 awarded projects we studied were awarded at different funding levels. This map shows all grant proposals **sized by their requested budget** and **shaded by granted percentages**, including unfunded applications (0%). The number of unfunded and partially funded applications is evidence of unfulfilled need for recharge across the state.



Funding was concentrated in areas with the highest needs

Funded projects were concentrated in the Central Valley and in southern California – areas with groundwater basins that have been [identified by the Department of Water Resources](#) as higher priority and having a greater need.

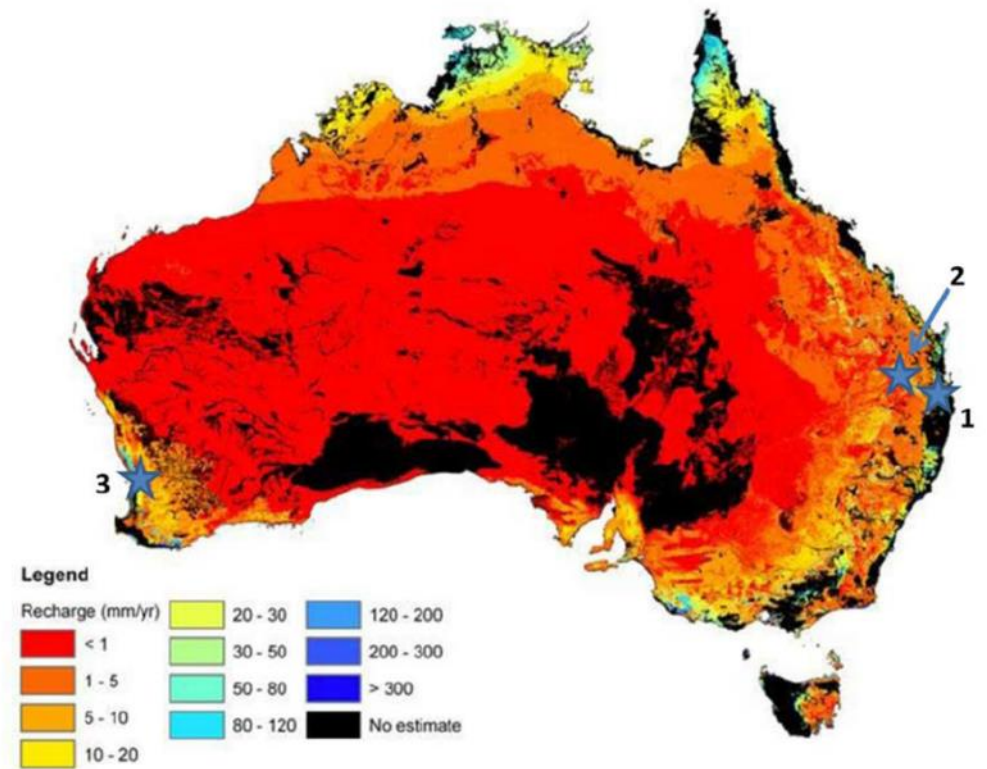
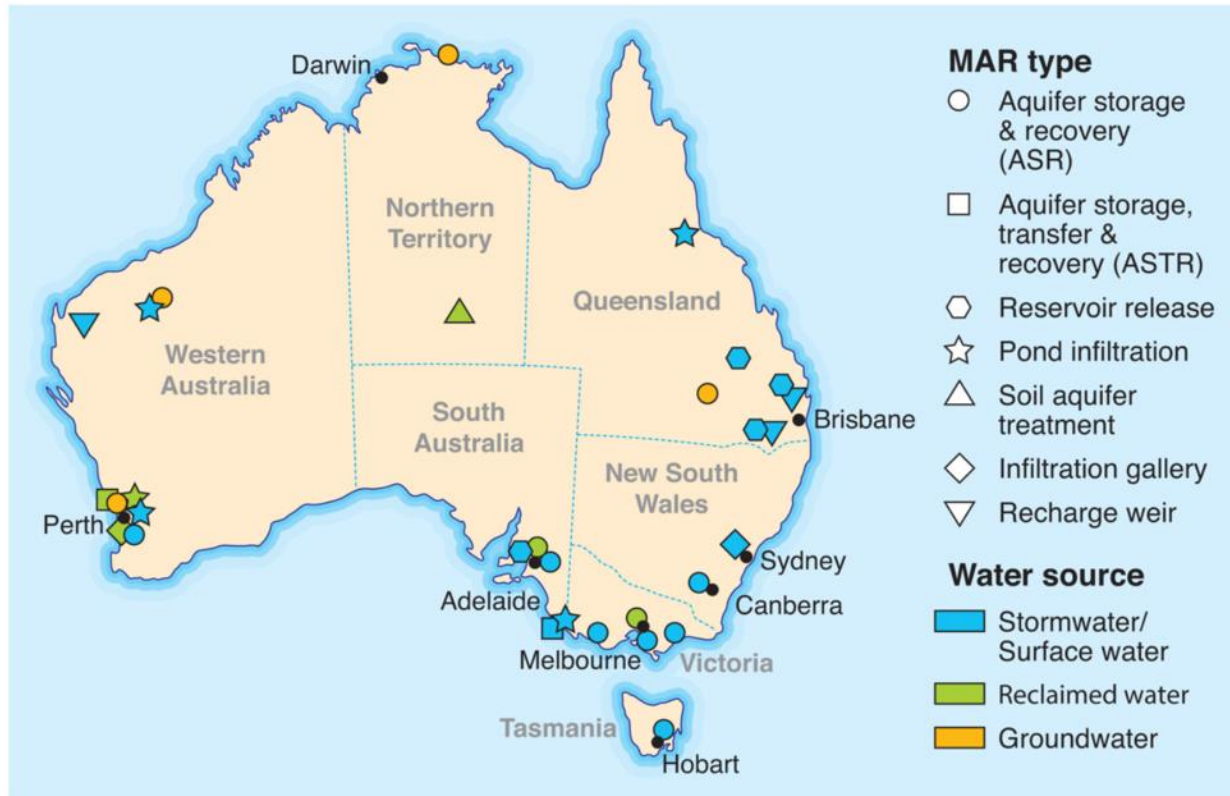
Métodos de recarga utilizados en California y sus volúmenes producidos anualmente



*Números en paréntesis () indican casos reportados en 46 distritos de gestión hídrica en California.

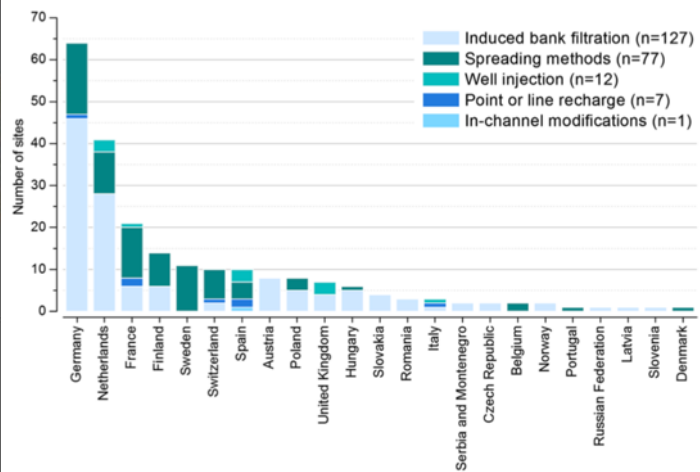
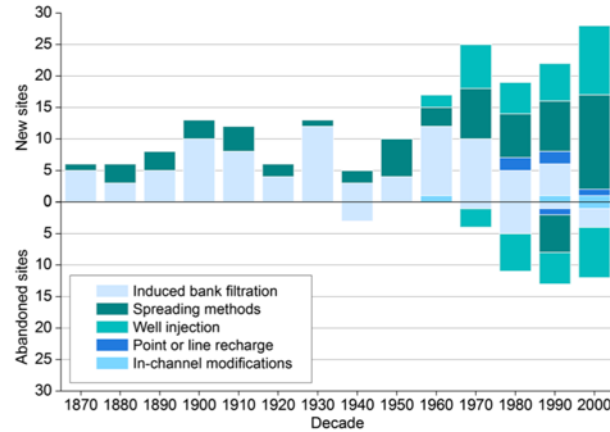
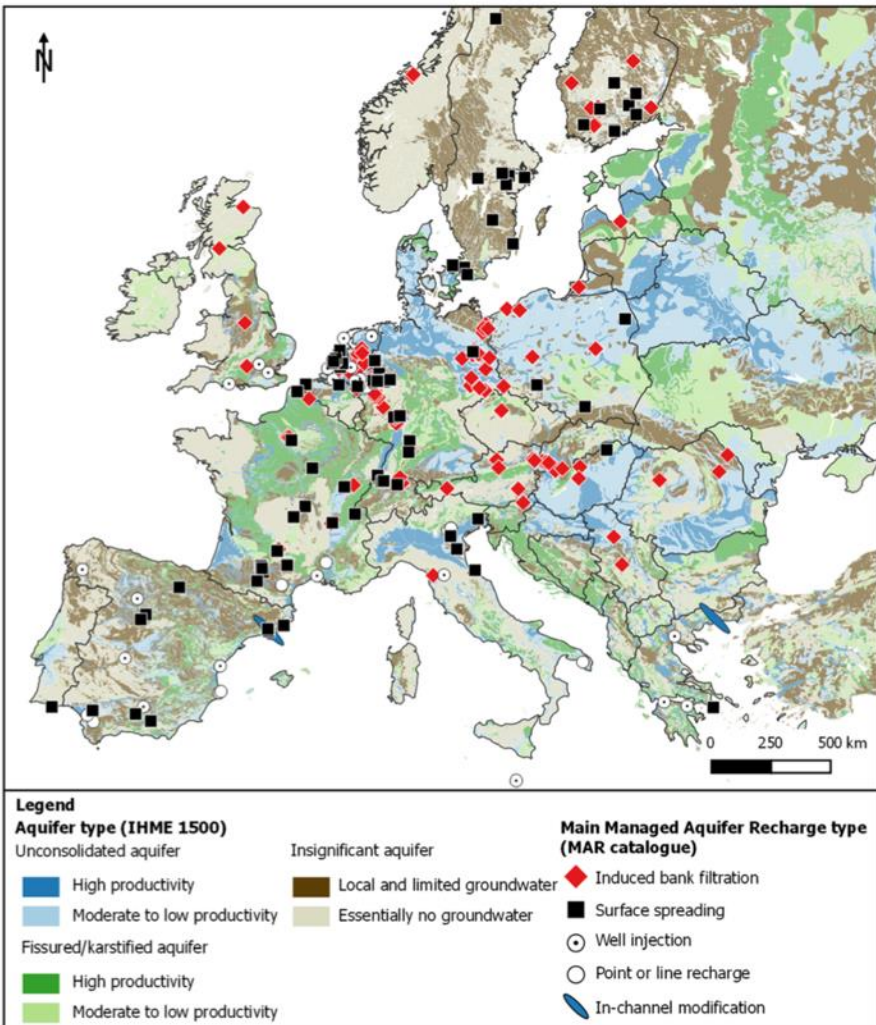
Australia

MAR: Managed Aquifer Recharge

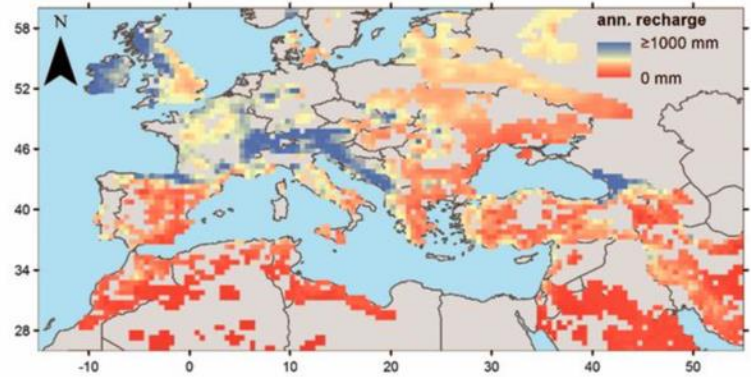


Europa

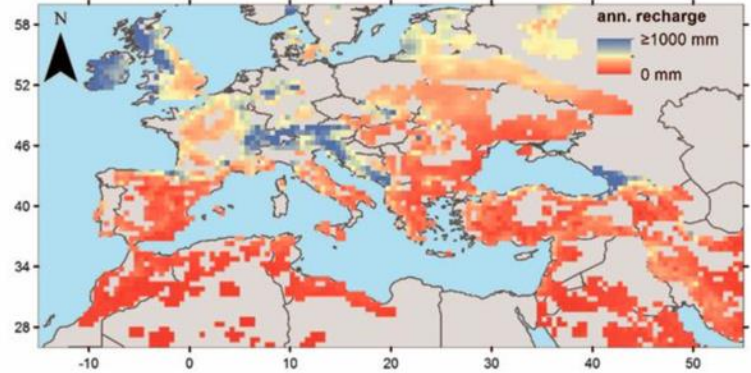
MAR: Managed Aquifer Recharge



present
(1991-2010)



future
(2080-2099)



Contenidos

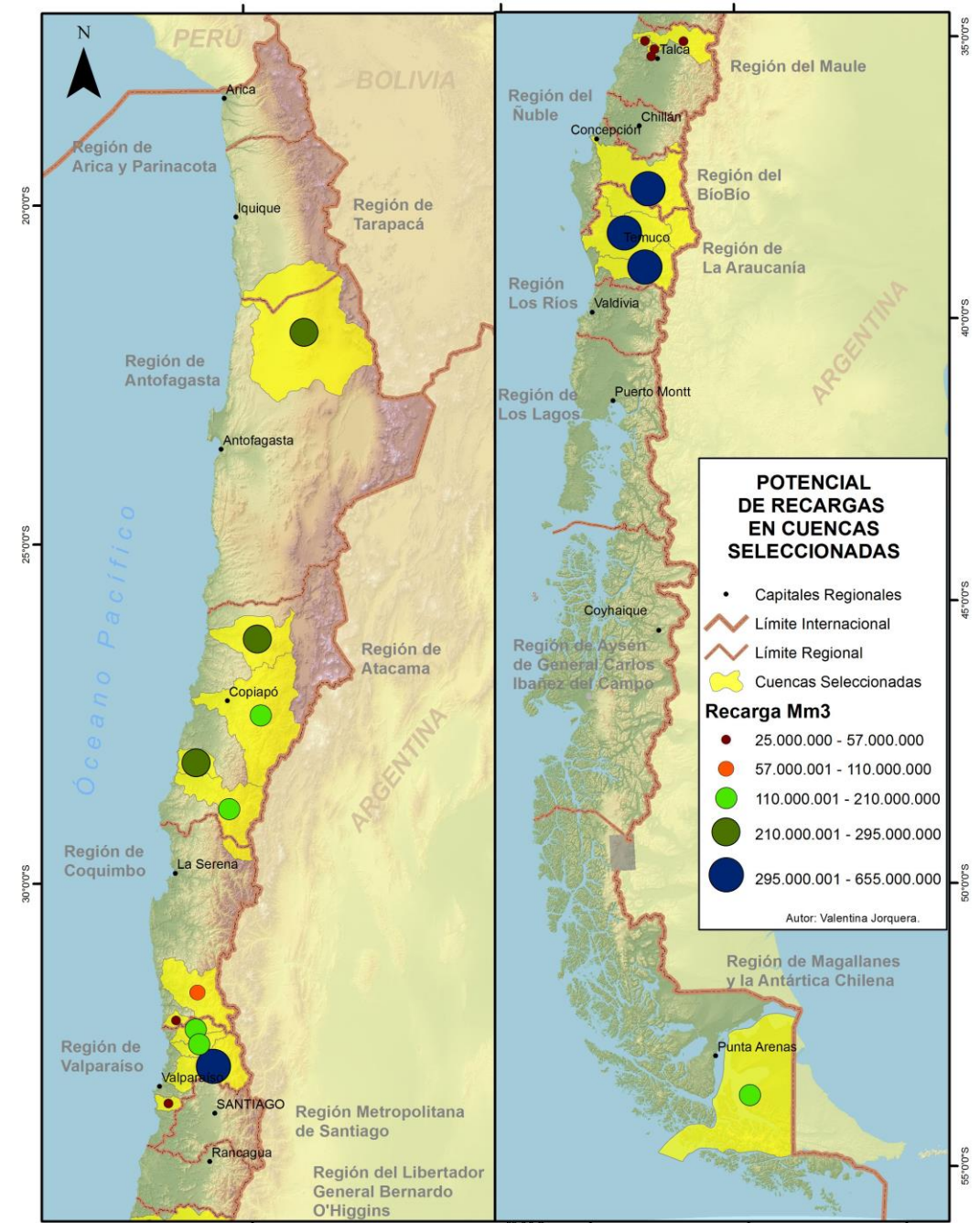
1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión – Managed Aquifer Recharge (MAR)
3. Experiencias en el extranjero
- 4. Experiencias en Chile**
5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero

Estudios
hidrogeológicos con
información para
realizar obras de
recarga

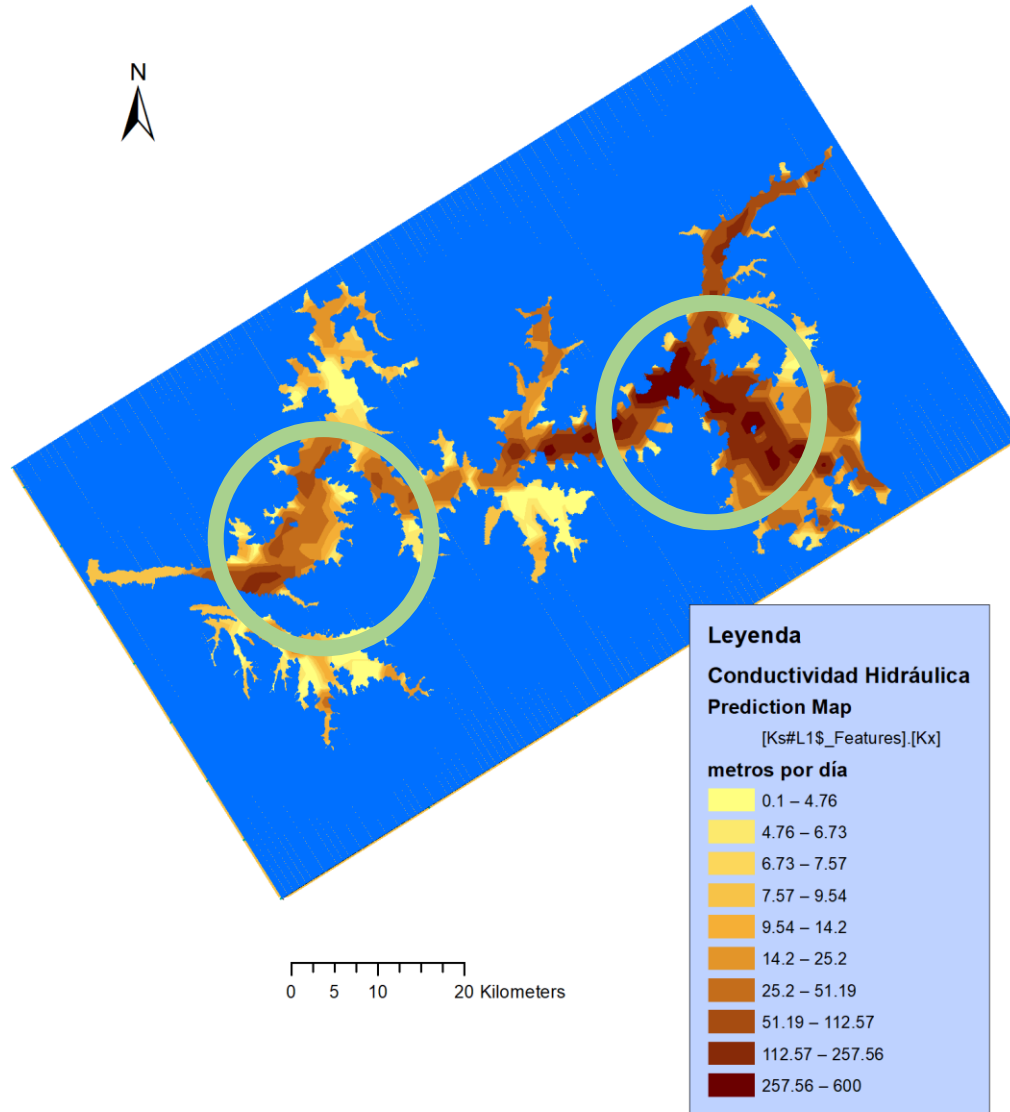
Cuenca	Estudio
Maipo	2005.Modelación superficial para la cuenca de los ríos Maipo Mapocho. Estimación de recarga para escenario actual 2005
Aconcagua	2009. Modificación modelos DGA Visual Modflow-MOS y MOS PS
Petorca	2019. Actualización de la modelación hidrogeológica del sistema acuífero la Ligua-Petorca.
Copiapó	2013. Actualización de la modelación integrada y subterránea del acuífero de la cuenca del río Copiapó
Imperial	2016. Estudio Hidrogeológico Región de la Araucanía
Bio Bio	2012. Estudio hidrogeológico cuenca Bio Bío
Río Valdivia	2012. Estudio cuencas principales región de Los Ríos
Choapa	2017. Análisis para el Desarrollo de un Plan de GIRH en la Cuenca del Choapa
Pampa del Tamarugal	2018. Investigación de acuíferos de gran volumen y baja recarga fase II
Ligua	2019. Actualización de la modelación hidrogeológica del sistema acuífero la Ligua-Petorca.
Maule	2010. Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule: informe final
Itata	2013. Modelación hidrogeológica cuenca Itata bajo, región del BioBío: informe final
Limarí	2013. Diagnóstico plan maestro para la gestión de recursos hídricos, Región de Coquimbo
Elqui	2013. Diagnóstico plan maestro para la gestión de recursos hídricos, Región de Coquimbo
Loa	2014. Sectorización de los Acuíferos de la cuenca del río Loa
Salar de Atacama	2019. Modelación hidrogeológica del Salar de Atacama – Proyecto Corfo
Quilimarí	2012. Investigación recarga artificial acuíferos de las cuencas de los ríos Choapa y Quilimarí Región Coquimbo
Concordia	2011. Análisis de los recursos subterráneos de la Quebrada de la Concordia
Rapel	2016. Desarrollo de un modelo para la Gestión Integrada de los recursos hídricos de la cuenca del Río Rapel
Río Bueno	2012. Estudio cuencas principales región de Los Ríos
Mataquito	2012. Estudio hidrogeológico cuenca del río Mataquito
Costeras Rapel-E.Nilahue	2013. Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y Región del Bio-Bío: informe final
Costeras Elqui-Limari	2004. Aplicación de la modelación hidrogeológico valle Pan de Azúcar
Lluta	1998. Estudio hidrogeológico y modelo de simulación del valle del río Lluta
Isla de Pascua	2013. Modelo hidrogeológico Isla de Pascua
Valle Casablanca	2014. Actualización de la modelación hidrogeológica e integrada de los acuíferos de la cuenca del estero Casablanca
Aculeo	2019. Caracterización del consumo hídrico y del sistema hidrogeológico en la cuenca de Aculeo. Proyecto FIC-R
Talcahuano	2013. Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y Región del Bio-Bío : informe final
Magallanes	2016. Actualización de Información y Modelación hidrológica de acuíferos de la región de Magallanes y la Antártica.
Huasco	2013. Análisis integrado de gestión en cuenca del río Huasco región de Atacama
San José - Azapa	2009. Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región
Costeras Copiapó-Salado	2016. Caracterización de suelos y generación de información meteorológica para prevención de riesgos hidrometeorológicos cuencas Salado y Copiapó
Los Choros	2005. Modelación hidrogeológica en la Quebrada Los Choros
Totoral-Carrizal	2010. Análisis y evaluación de los recursos hídricos subterráneos de los acuíferos costeros ubicados entre los ríos Salado y Huasco, III región de Atacama
Serrano-Las Chinas	2016. Análisis de la Variación de Caudales río Las Chinas - río Serrano
Cauquenes	2013. Modelación hidrogeológica de la cuenca del río Cauquenes, región del Maule
Curepto	2013. Modelo hidrogeológico preliminar del acuífero de la cuenca del Estero Curepto
Los Puercos	2013. Modelación hidrogeológica cuenca estero Los Puercos, Región del Maule
Nilahue	2013. Modelación hidrogeológica cuenca Nilahue
Toltén	2016. Estudio Hidrogeológico Región de la Araucanía

Muestra del potencial de recarga en Chile

Estimación simulada con modelos DGA operativos, sobre la base del espacio disponible en el acuífero para recibir flujos de entrada.



Mapa de Conductividades Hidráulicas Acuífero Cuenca del Aconcagua



Consideración:



Zonas de recarga ubicadas en áreas de mayor conductividad y potencial de recarga, equivalente a 350 Millones de m³.

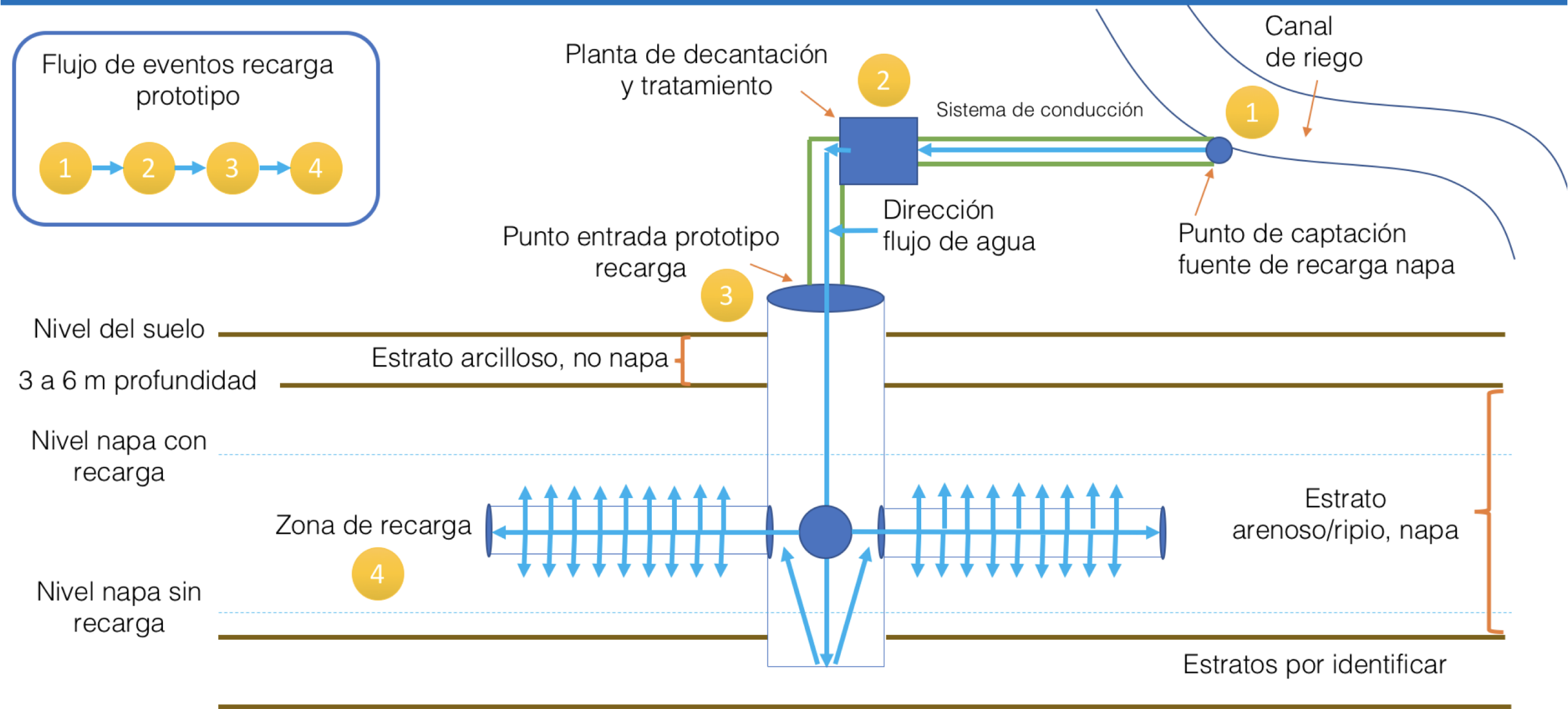
Prototipos activos de recarga de agua subterránea en Chile

Método de recarga	Cuenca	Sector	Desarrollador	Tasa recarga (lt/s)	Almacenamiento (Millones m ³ por año)	Valor del agua (\$/m ³)
Piscinas de infiltración	Copiapó	Piedra Colgada	Comunidad de Aguas Subterráneas CASUB	200	6,3	15
	Aconcagua	Curimón	Dirección de Obras Hidráulicas	1000	31,5	48
Cauces infiltradores	Aconcagua	Catemu	Regantes de Canales de Riego alto y abajo de Catemu	120	3,8	8
Pozos de inyección	Maipo	La Pintana	Sociedad del Canal de Maipo	50	1,5	450

Ejemplos en el Valle del Río Copiapó

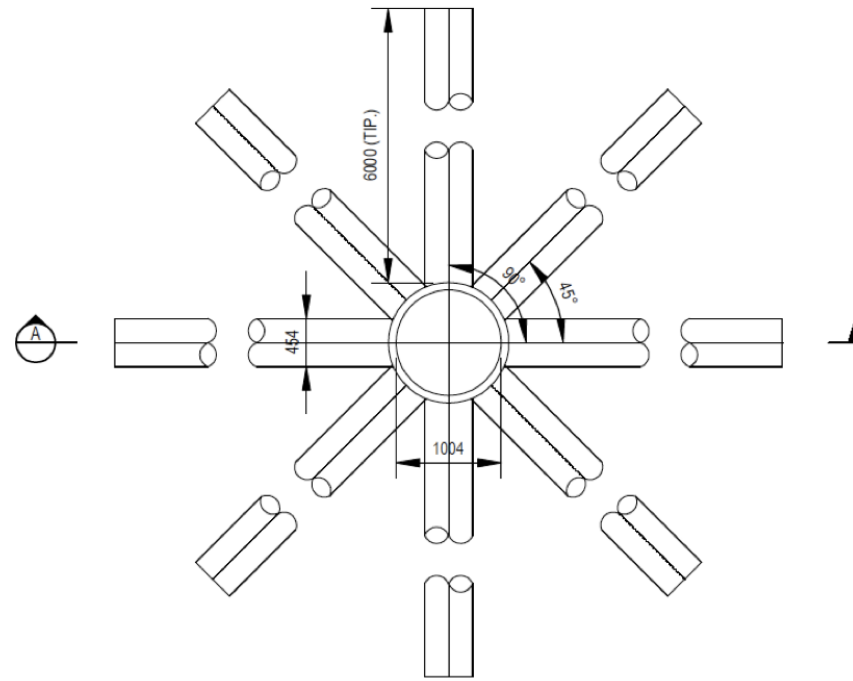
Prototipo Pozo Radial para Recarga Agua Subterránea con Uso Conjunto del Recurso Hídrico

Modelo Conceptual Prototipo Recarga Acuífero

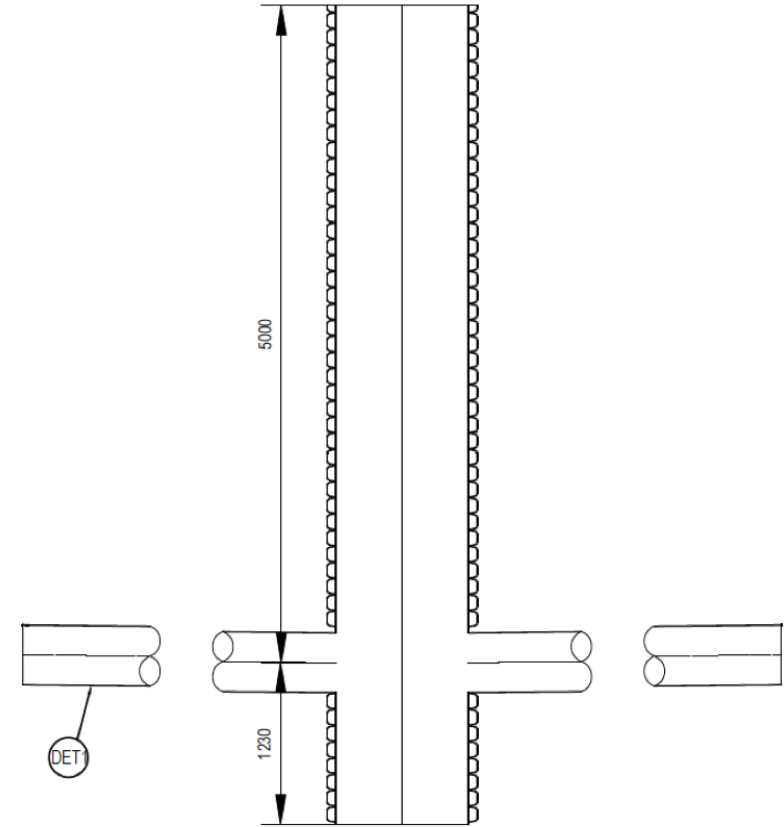
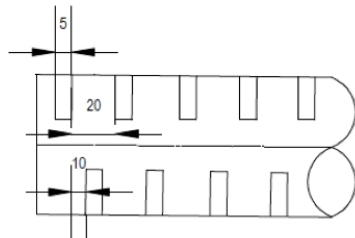


*modelo no a escala

Bosquejo Prototipo



POZO DE INFILTRACIÓN MULTIDIRECCIONAL
PLANTA
ESCALA 1:50



SECCIÓN A
ESCALA 1:20





Datos Prototipo Pozo Radial de Recarga

- Origen fuente de agua: Canal de regadío
- Caudal de infiltración: 10 lt/s, escalable a otros caudales.
- Costo diseño y construcción: \$7.000.000
- Costo operacional: \$150.000/mes
- Costo del agua: \$14/m³

Planicies de Inundación para Recarga Agua Subterránea con Uso Conjunto del Recurso Hídrico

Inspección en terreno DGA y MOP – Septiembre 2018

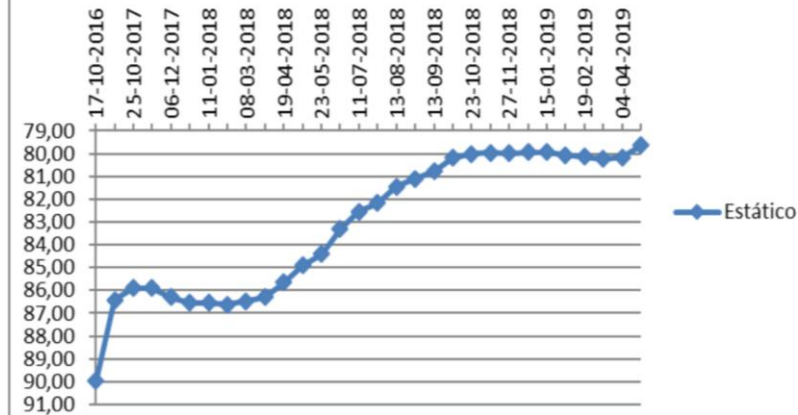




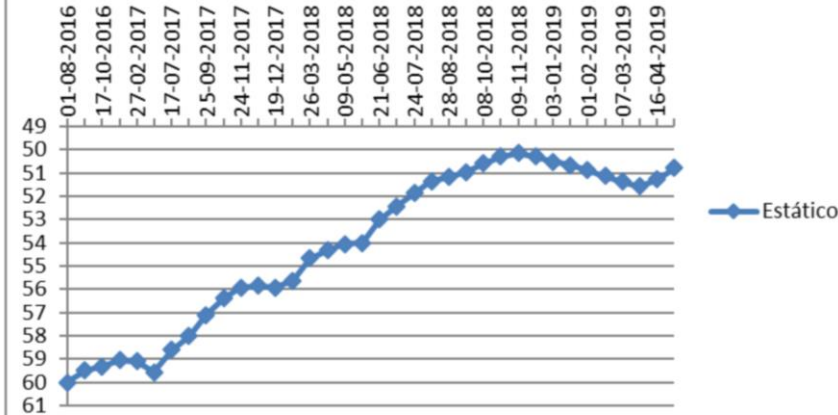
Pozos de Monitoreo Casub Copiapó – Funcionamiento Piscinas desde Agosto 2016

Profundidad de Agua Subterránea (m)

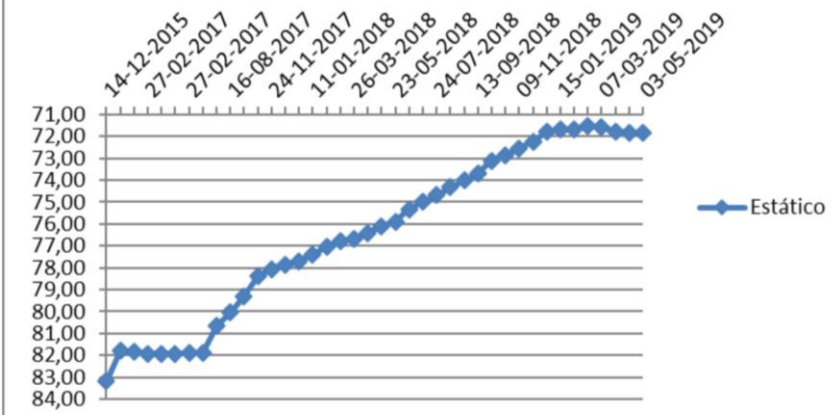
Pozo Sara Bodega



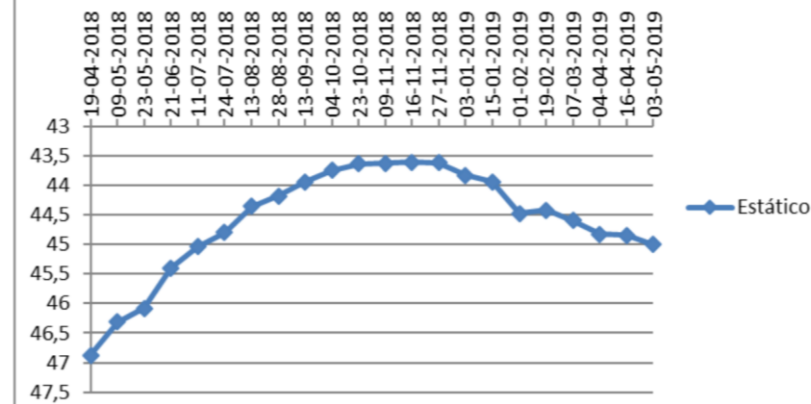
Pozo las Pircas



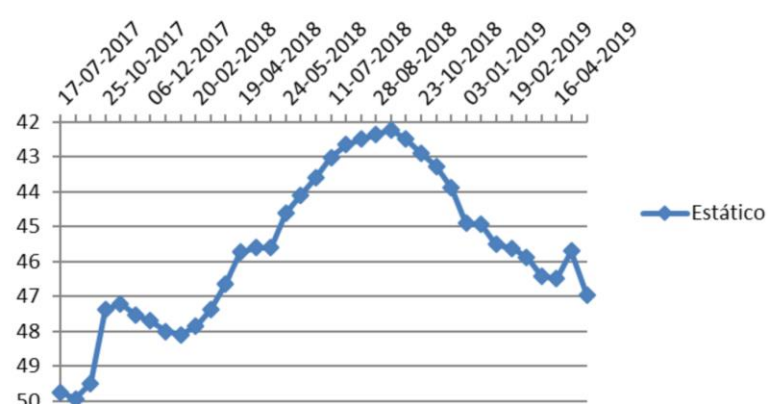
Pozo UDA



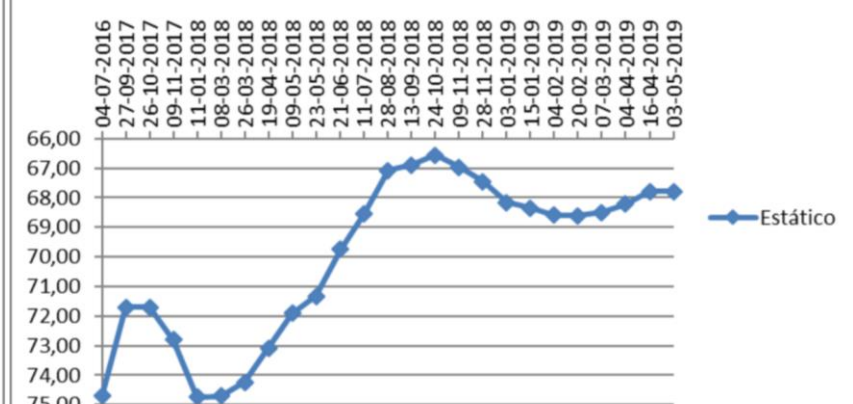
Pozo San Francisco



Pozo Vasangel Rinconada



Pozo Valle Dorado



Datos Planicies de Inundación para Recarga

- Origen fuente de agua: Río Copiapó
- Caudal de infiltración: 150-200 lt/s, 5,6 millones de m³/año
- Costo diseño y construcción: \$30.000.000
- Costo operacional: \$350.000/mes
- Costo del agua: \$6/m³

Contenidos

1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión – Managed Aquifer Recharge (MAR)
3. Experiencias en el extranjero
4. Experiencias en Chile
5. **Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile**
 - I. **Técnico**
 - II. Legal
 - III. Financiero

Marco Técnico-Operativo

Recarga de agua subterránea =
Gestión conjunta aguas
superficiales y subterráneas



Contenidos

1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión – Managed Aquifer Recharge (MAR)
3. Experiencias en el extranjero
4. Experiencias en Chile
- 5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile**
 - I. Técnico
 - II. Legal**
 - III. Financiero

Política de Promoción de Recarga de Acuíferos

- El código de aguas regula las iniciativas de recarga de agua subterránea, Artículo 66 y 67.
- Decreto Supremo N°203/2013 que “Establece las Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas”.
- Circulares:
 - Circular N° 1 del 14 de febrero de 2019, sobre las obras hidráulicas permeables, en la recarga de acuíferos.
 - Circular N°2 del 2 de abril de 2019, establece condiciones para exceptuarse de cumplir la orden de cierre de bocatomas ante peligro de grandes avenidas.

Contenidos

1. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
2. Mecanismos de recarga de agua subterránea
 - i. Natural
 - ii. Por gestión – Managed Aquifer Recharge (MAR)
3. Experiencias en el extranjero
4. Experiencias en Chile
- 5. Visión de desarrollo de obras de recarga por gestión en Chile**
 - I. Técnico
 - II. Legal
 - III. Financiero**

Oportunidades de acción y de negocio

- Estudios para determinar el marco Técnico-Operativo -> DGA
- Privados que inviertan en I+D para generar dispositivos de recarga y comercializarlos en el Mercado -> CORFO
- Sistemas de concesiones para suministrar agua por ASR, u otro -> MOP
- Fomento a la inversión privada en obras de recarga -> CNR y MOP

Modelo conceptual del negocio de recarga

(asume marco técnico-operativo favorable)

DGA Define certeza jurídica del lugar y volumen del acuífero que está sujeto al negocio

e.g.
Aconcagua:
350 Millones m^3 en áreas de San Felipe y Quillota



Agente desarrollo negocio de recarga

Demanda insatisfecha en Aconcagua
 $1 m^3/s$ equivalente a 310 Millones m^3 por temporada

Posibles fuentes de agua:

- Uso de caudales excedentes en cauces
- Recargas naturales en banco de agua
- Cuotas de volúmenes superficiales de usuarios clientes
- Importación de agua desde otras cuencas para mantener stock
- Compra y tratamiento de aguas residuales

Unidades de Negocio*:

- Almacenamiento subterráneo de agua superficial en periodos húmedos, y extracción en tiempos de sequía
- Venta de volúmenes subterráneos periódicos según stock

*(incluyen conducción desde/hacia clientes y trámites administrativos/legales)

Dispositivos de recarga y conducción

- Piscinas/planicies de recarga
- Pozos de recarga
- Red de canales
- Canales, tuberías, bombas

Costo estandarizado servicio: \$450/ m^3

Clientes:
Agricultores
Industrias
Sanitarias
Mineras



Voluntad de pago: desde \$1200/ m^3



Ingreso Agente negocio recarga \$750/ m^3



Recarga de Agua Subterránea

Natural y por Gestión

Carlos Flores Arenas

PhD in Hydrologic Sciences UC Davis

MSc en Ingeniería Agrícola UdeC

BS Ingeniero Agrónomo UMayor

24 de Junio 2019