

## Anexo 5

### Extracto del capítulo 3, tesis “Procesamiento y visualización web de datos hidrogeológicos en la cuenca del río Limarí, Región de Coquimbo, Chile”

#### 3.2. Procesamiento de información

La información obtenida de las campañas de terreno y las propiedades hidráulicas calculadas durante el gabinete se estructuran en el organigrama de la Figura 3.4. y se visualizan en el *software* ArcGis Pro. Los datos se separan en los diez sectores de continuidad hidrogeológica para una mejor visualización. Además, se agrega un mapa general de la cuenca, denominado “Visualizador general”, que contiene capas de contenido administrativo de toda el área.

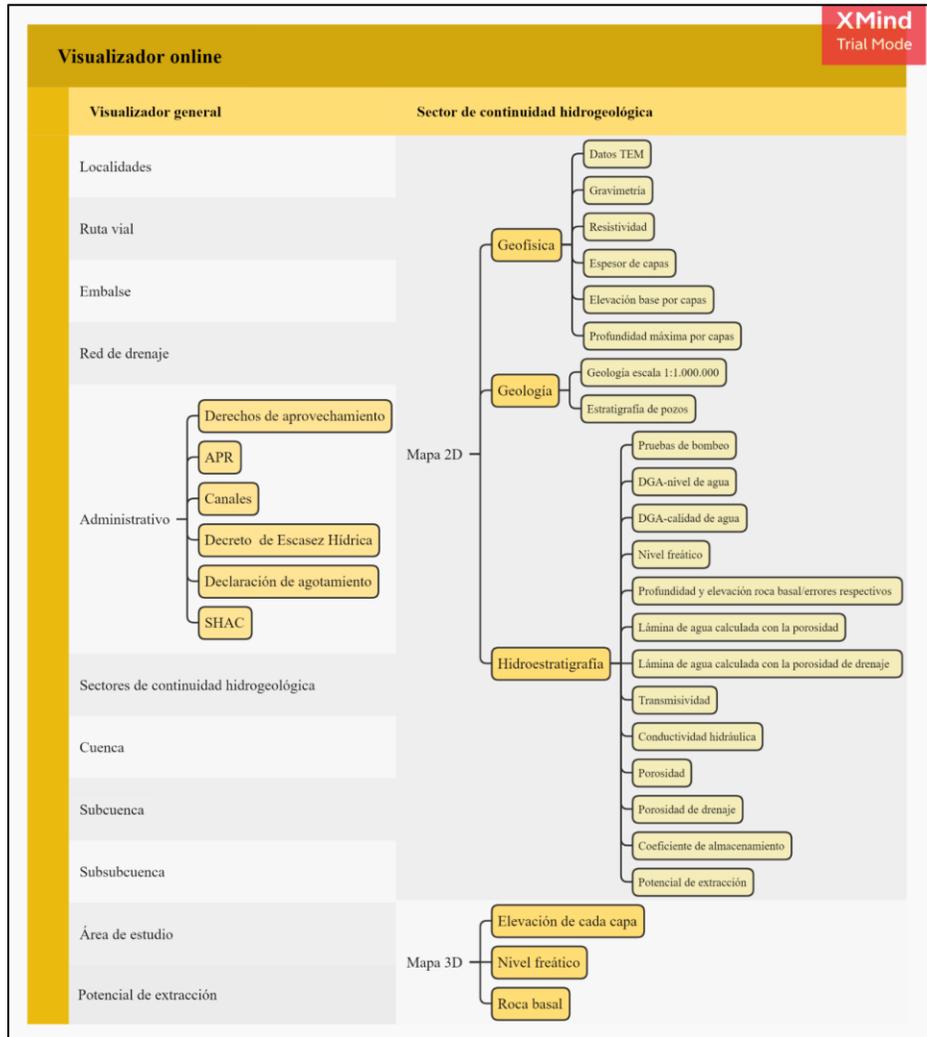


Figura 3.4. Organigrama de la aplicación web.

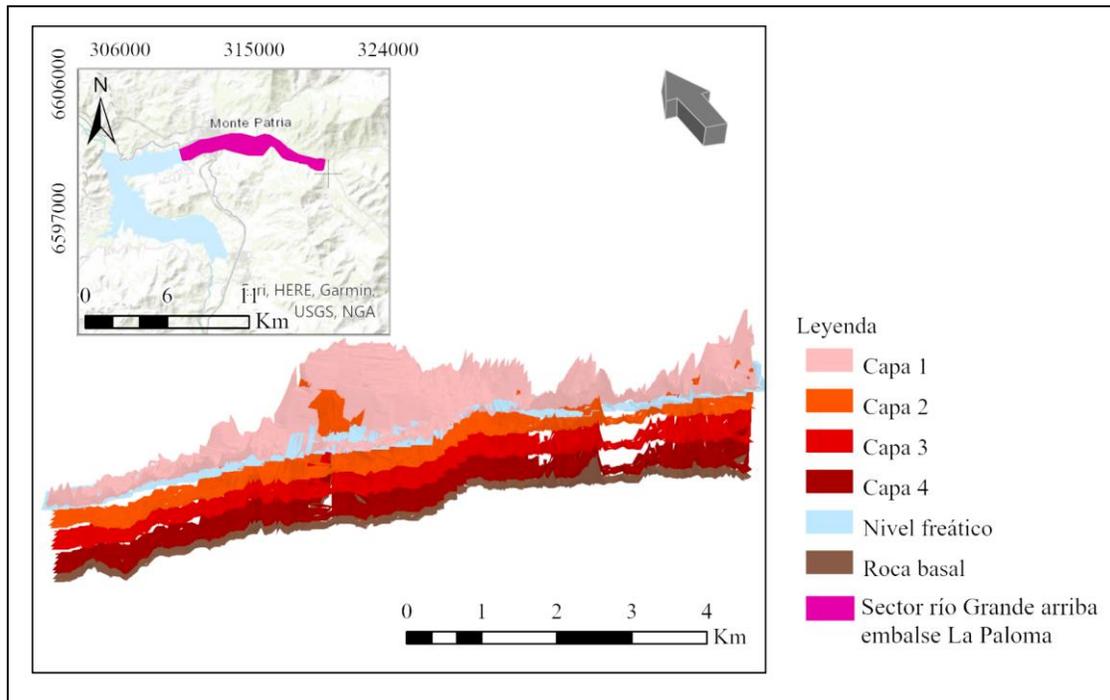
Cada sector de continuidad hidrogeológica (Figura 3.2.) contiene capas con información geofísica, geológica e hidrogeológica. La geofísica incluye la localización de los puntos de toma de datos de trasciente electromagnético (TEM) y gravimetría de Antecedentes. Además, se incluyen las resistividades eléctricas, las profundidades máximas y las elevaciones de la base de cada capa dentro de un sector. La información geológica consiste en la ubicación de los pozos con información estratigráfica utilizados para modelar la hidroestratigrafía y la geología de Chile a escala 1:1.000.000, obtenida de SERNAGEOMIN (2003) Se decide utilizar este mapa por el gran tamaño de la cuenca y la simbología de esta capa se simplifica al tipo de roca; intrusiva, volcánica, sedimentaria, y sedimentos, esto con la finalidad de mejorar la comunicación con el público esperado de la aplicación.

La información hidrogeológica corresponde a todas las propiedades hidráulicas calculadas por capas para cada sector. Estas son: coeficiente de almacenamiento específico, porosidad de drenaje, porosidad, conductibilidad hidráulica, nivel freático, transmisibilidad, lámina de agua calculada con la porosidad y con la porosidad de drenaje. Todas las capas se crean en archivos raster así, los valores de cada capa están en formato pixel de tamaño 50 x 50. Además, cada una de ellas tiene asociado una capa de error que equivale a la variabilidad del valor y a la interpolación del modelo 3D.

Para los sectores de continuidad hidrogeológica se incluye un mapa de visualización “3D” que permite observar las elevaciones de cada capa definidas por el modelo de resistividad, más la profundidad del nivel freático y la ubicación de la roca basal. Producto de la gran extensión de la superficie areal en comparación a las profundidades se agrega una exageración vertical que varía según el área para mejorar la visualización (Figura 3.5.)

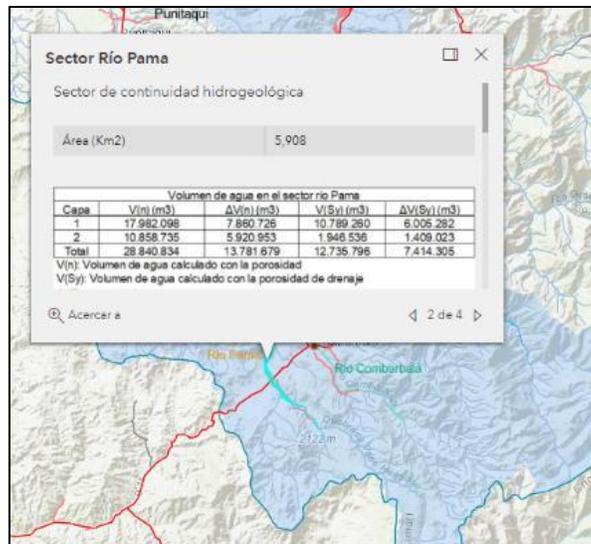
El visualizador general contiene el área de estudio, las localidades, red de drenaje y ruta vial dentro de la cuenca. Además, se agrega el límite de esta, más las divisiones de subcuencas y subsubcuencas. Se incluye información administrativa como los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas obtenidas hasta julio del 2021, puntos de ubicación de los Programas de Agua Potable Rural (APR) y canales de distribución. Se incorpora el Decreto de escasez hídrica definido para la región de Coquimbo y la declaración

de agotamiento de aguas superficiales en escala de cuenca. Finalmente, se suma la división de la cuenca en Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) que se simbolizan según su estado de restricción (abierto, abierto sin disponibilidad, restricción sin disponibilidad).



**Figura 3.5. Mapa 3D con las elevaciones de cada capa del sector río Grande arriba del embalse La Paloma. El mapa tiene una exageración vertical de 20.**

Cada capa agregada al visualizador general como a los sectores de continuidad hidrogeológica contiene una “ventana emergente” con mayor información, que varía según la propiedad que se esté observando. En particular, en el visualizador general, las capas de sectores de continuidad hidrogeológica presentan una tabla con los volúmenes de agua calculados con la porosidad y la porosidad de drenaje, y una imagen con la columna hidroestratigráfica (Figura 3.6.).



**Figura 3.6. Ventana emergente con información del volumen de agua en el sector río Pama.**

Toda la información se comparte con la red ArcGis *Online* y se crea una aplicación en *Building Explorer*, que es parte de la red ArcGis, para organizar los mapas y hacerlo público. Esta permite tener mapas interactivos, en que el usuario puede activar o desactivar las propiedades que sean de interés, aumentar o disminuir la transparencia de las capas y cambiar de un mapa a otro. Además, se incluyen instrucciones como guía de uso y un glosario de los términos hidrogeológicos más ocupados. La aplicación se prueba con varios formatos que se someten a evaluación durante las reuniones con los usuarios del visualizador, entre ellos la Junta de Vigilancia del río Limarí, río Grande y sus afluentes, la Dirección General de Aguas (DGA), el ministerio de Obras Públicas, Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) y el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). Finalmente, se diagrama un formato de aplicación que se ilustra en la Figura 3.7.

La aplicación puede abrirse en dispositivos móviles, tablet y computadores y queda alojada en la página web del proyecto, cuyo dominio es <http://aguasubterraneanalimari.cl/>. Además, la misma aplicación puede compartirse a través de código QR y con el link siguiente: <https://experience.arcgis.com/experience/075bc064855c48ac962aacba163a58b8/page/Visualizador-general/?views=Visualizador-general-&org=prommra>.



Figura 3.7. Aplicación web.

### 3.3. Potencial de extracción

El potencial de extracción permite visualizar que sectores son mejores a la hora de extraer agua. Esto se puede obtener a través del caudal máximo posible. Al momento de realizar un pozo de extracción de agua se establece un caudal para su funcionamiento. En terreno este se determina con pruebas de bombeo de régimen variable o constante en un sondaje para evaluar la depresión del nivel de agua. En el proyecto se obtiene las propiedades hidroestratigráficas en la cuenca, por lo que el caudal se puede calcular a partir de ellas.

Para obtener un mejor resultado en los cálculos de caudales se analiza cada sector de continuidad hidrogeológica por separado y se identifica en cada uno de ellos la presencia de uno o dos acuíferos. Esto se determina observando las columnas hidroestratigráficas de cada zona (Figura 3.3.), tanto la litología definida como la extensión espacial de cada capa, poniendo énfasis en las que contienen arcilla o limo, ya que estas pueden formar un acuitardo y delimitar dos acuíferos. Con esta información se desarrolla un mapa conceptual de la situación de cada sector, como lo indica la Figura 3.8. para la zona del río Guatulame. Los demás sectores de continuidad hidrogeológica se encuentran en Anexos (Figuras 1-9).

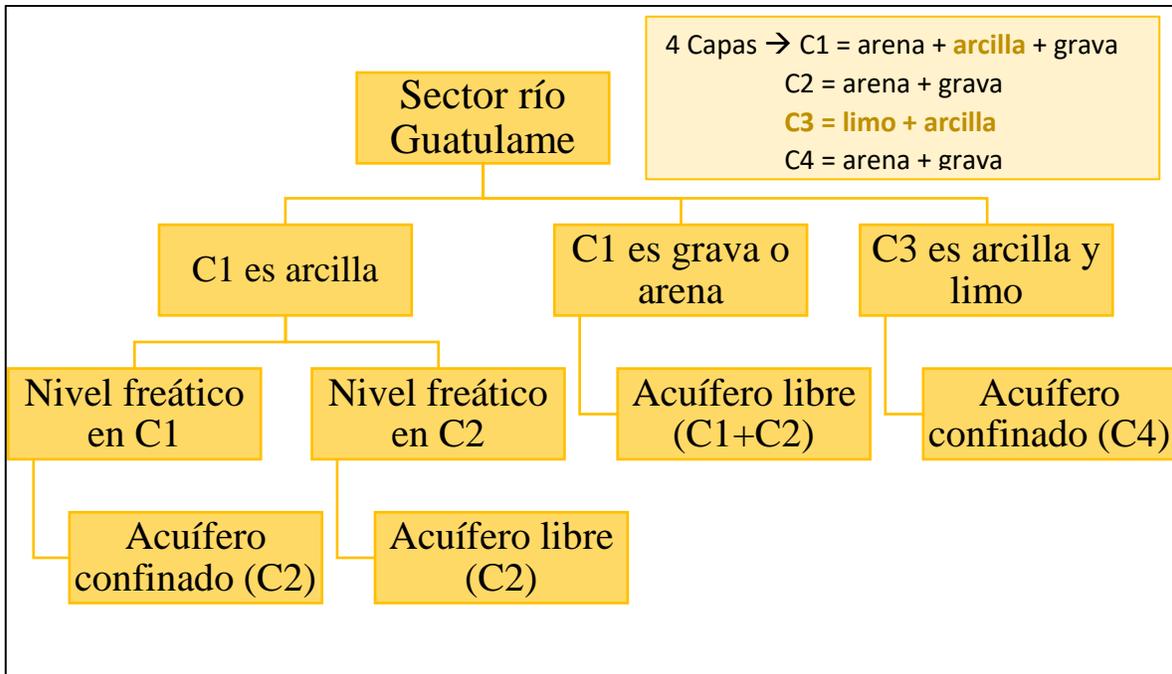


Figura 3.8. Mapa conceptual del sector río Guatulame. Los demás sectores de continuidad hidrogeológica se encuentran en Anexos (Figuras 1-9).

Se puede ver en el mapa conceptual del sector río Guatulame que este contiene la capa 3 compuesta de limo y arcilla, lo que permite definir la capa 4 como acuífero confinado. Además, la capa 1 tiene un sector de arcilla que debe ser analizado en función de la profundidad del nivel freático para establecer si la capa 2 se comporta como acuífero confinado o libre. Finalmente, las zonas de la Capa 1 compuestas de grava o arena se consideran como acuífero libre.

Las propiedades hidráulicas se encuentran en imágenes ráster por lo que los cálculos de caudales se escriben en un código en lenguaje Python y se crean imágenes de píxeles con los resultados. Los códigos de programación de acuífero libre y confinado se encuentran en Anexos (Figuras 10-12).

### 3.3.1. Caudal en acuífero libre

El caudal, a partir de las propiedades hidráulicas se puede obtener con la fórmula de Theis (1935), que expresa el descenso del nivel de agua en un acuífero confinado en función de un

caudal conocido, el tiempo de extracción, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento (Ecuación 1).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \times \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $s$  es el descenso del nivel de agua en metros,  $Q$  es el caudal de extracción en metros<sup>3</sup>/día,  $T$  es la transmisividad en metros<sup>2</sup>/día y  $u$  es una función auxiliar cuyo valor se expresa en la Ecuación 2.

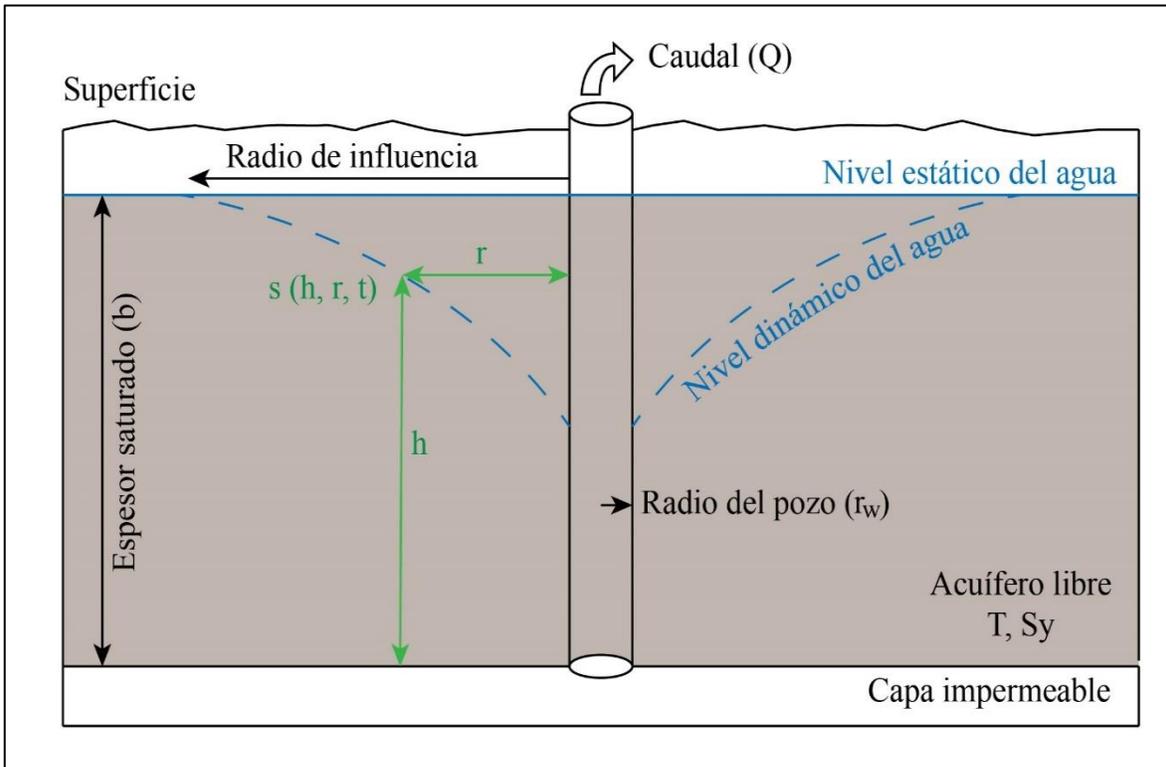
$$u = \frac{r_w^2 S}{4Tt} \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo  $r_w$  el punto de observación en metros,  $S$  el coeficiente de almacenamiento adimensional,  $T$  es la transmisividad en metros<sup>2</sup>/día y  $t$  es el tiempo en días. La integral exponencial de  $u$  se denomina función de pozo,  $W(u)$  (Villanueva e Iglesias, 1984). Para utilizar esta ecuación se considera que el acuífero es homogéneo y de área infinita, el pozo es de un diámetro pequeño que atraviesa todo el espesor saturado y el caudal de extracción es constante. Además, la transmisividad no cambia a lo largo de la capa permeable. Por lo tanto, de esta fórmula se despeja el caudal y se obtiene la Ecuación 3.

$$Q = \frac{s4\pi T}{W\left(\frac{r_w^2 S}{4Tt}\right)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para obtener el caudal de extracción en un acuífero libre (Figura 3.9.) se puede utilizar la ecuación de Theis (1935) si se definen ciertas condiciones. Una de ellas es que el volumen de agua en los sedimentos que se extrae se descarga instantáneamente con la caída del nivel freático. La segunda, es la ausencia de extracciones anteriores, por lo que no existe una interferencia entre pozos. Además, se utiliza el radio de un pozo promedio de 0,15 metros (15 centímetros) como punto de observación. El tiempo de duración de la extracción de agua se define en 6 meses, que corresponde al funcionamiento de un derecho provisional durante

un Decreto de escasez hídrica. Finalmente, el descenso se considera como todo el espesor saturado de las capas permeables, por lo que el caudal será el máximo a extraer.



**Figura 3.9. Pozo de bombeo en acuífero libre.** s es el descenso del nivel de agua a una altura h, en una distancia de observación r en un tiempo t.

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica con el espesor de la capa permeable. Al considerar que esta es constante a medida que desciende el nivel freático existe una sobreestimación de la cantidad de agua a extraer. Esto se puede enmendar con la corrección de Jacob (1944 en Kruseman y Ridder, 1994), que modifica el cálculo del descenso del nivel de agua (Ecuación 4).

$$s' = s - \left(\frac{s^2}{b}\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

El s' es el descenso corregido, s es el nivel de agua observado y b es el espesor saturado del acuífero. Finalmente, el caudal máximo se obtiene con la Ecuación 5.

$$Q_{max} = \frac{s' \times 4\pi T}{W\left(\frac{r_w^2 S_y}{4Tt_f}\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

$Q_{max}$  es el caudal máximo de extracción en metros<sup>3</sup>/día al descender todo el espesor saturado del acuífero, en un tiempo final ( $t_f$ ) de 6 meses. Al ser un acuífero libre el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad de drenaje,  $S_y$ .

### 3.3.1. Caudal en acuífero confinado

Theis (1935) crea una ecuación para evaluar el descenso del nivel piezométrico en acuíferos confinados. Sin embargo, existen los casos en que el nivel dinámico del agua cae bajo el techo de la capa permeable convirtiendo el acuífero en libre.

Esta situación se analiza por Moench y Prickett (1972), quienes definen una solución para la conversión bajo ciertas consideraciones. Entre ellas, se establece una extensión areal infinita de un acuífero homogéneo e isotrópico. Además, el pozo bombea a caudal constante, debe atravesar todo el espesor de la capa permeable y su diámetro debe ser muy pequeño y despreciable. Otra condición es que la transmisividad no varíe mientras descende el nivel de agua (Moench y Prickett, 1972).

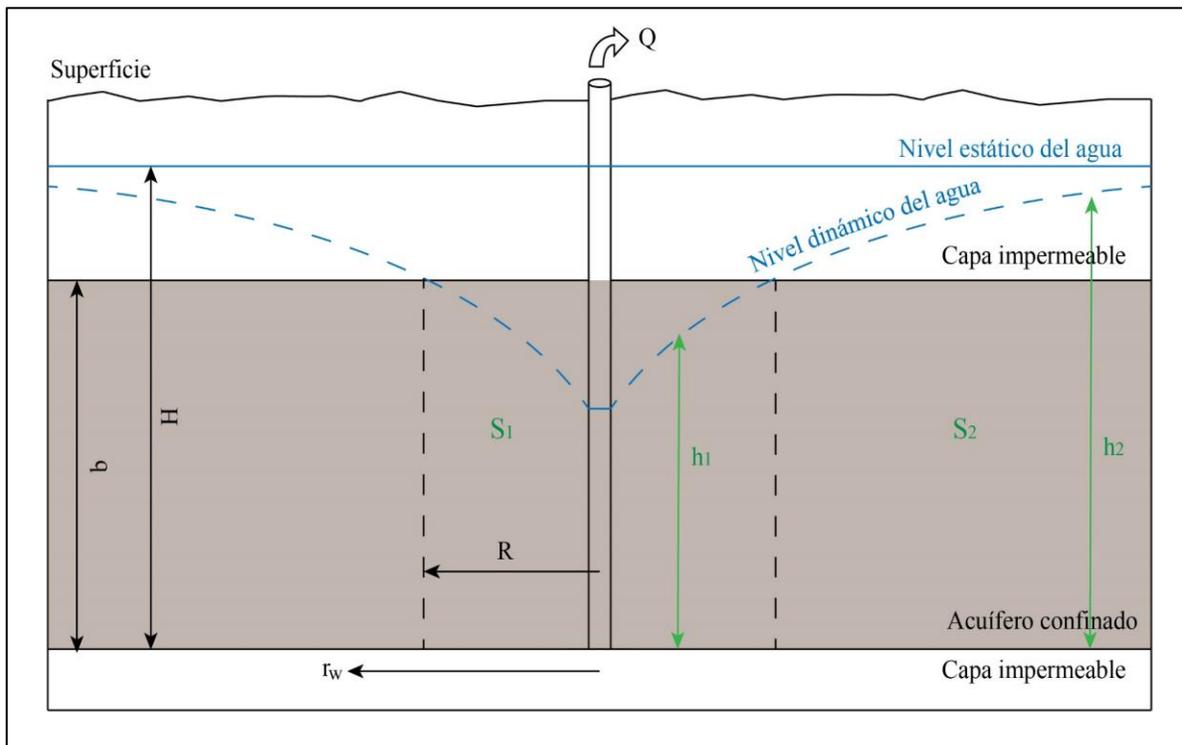
Esta conversión del acuífero confinado a libre se ilustra en la Figura 3.10. La solución para los descensos del nivel de agua se divide entre lo que sucede en la zona que ya están libres (Ecuación 6,  $r_w < R$ ) y lo que pasa en las partes que siguen confinadas (Ecuación 7,  $r_w > R$ ).

$$b - h_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r_w^2 S_1}{4Tt}\right) - W\left(\frac{R^2 S_1}{4Tt}\right) \right] \quad r_w < R \quad \text{Ecuación 6}$$

$$H - h_2 = \frac{Q}{4\pi T} e^{\left(\frac{R^2 S_2}{4Tt} - 1\right)} W\left(\frac{r_w^2 S_2}{4Tt}\right) \quad r_w > R \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $h_1$  y  $h_2$  son las elevaciones de nivel de agua en las zonas libres y confinadas, respectivamente.  $b$  es el espesor saturado del acuífero,  $Q$  es el caudal de extracción,  $T$  es la

transmisividad,  $W$  es una integral exponencial denominada función del pozo,  $r_w$  es la distancia radial al punto de observación,  $t$  es el tiempo de bombeo del pozo,  $H$  es la elevación del nivel piezométrico,  $R$  es la distancia radial al punto de conversión y  $S_1$  y  $S_2$  son los coeficientes de almacenamiento de las zonas de comportamiento libre y confinado, respectivamente. Además, existe la Ecuación 8 para la condición de  $r_w = R$  (Moench y Prickett, 1972).



**Figura 3.10. Esquema del acuífero confinado que se convierte en libre.**  $H$  es la elevación del nivel piezométrico,  $b$  es el espesor saturado del acuífero,  $Q$  es el caudal de extracción,  $R$  es la distancia radial al punto de transformación,  $r_w$  es la distancia radial al punto de observación,  $h_1$  y  $h_2$  son las elevaciones de nivel de agua en las partes libres y confinadas, respectivamente.  $S_1$  y  $S_2$  son los coeficientes de almacenamiento de las zonas de comportamiento libre y confinado, respectivamente. Modificado de Moench y Prickett (1972).

$$\frac{Q}{4\pi T} e^{-\frac{R^2 S_1}{4Tt}} - \frac{(H-b)e^{-\frac{R^2 S_2}{4Tt}}}{W\left(\frac{R^2 S_2}{4Tt}\right)} = 0 \quad r_w = R \quad \text{Ecuación 8}$$

Al igual que para el cálculo de caudal en el acuífero libre se determinan ciertas condiciones de funcionamiento; ausencia de extracciones anteriores, descenso total del nivel de agua, que es igual al espesor saturado de las capas permeables; corrección de este descenso observado

(Ecuación 4), se utiliza el radio de un pozo promedio de 0,15 m (15 cm) como punto de observación ( $r_w$ ) y el tiempo de duración del bombeo es de 6 meses. Además, se considera que la superficie piezométrica coincida con el nivel estático de agua establecido de antecedentes (Flores y Aliaga, 2020). Con estos datos y las propiedades hidráulicas de transmisividad, porosidad de drenaje y coeficiente de almacenamiento se calcula el caudal con los siguientes pasos:

1. Creación de un *solver* de la Ecuación 8, para encontrar los valores de R en el tiempo de funcionamiento de 6 meses.
2. Cálculo del descenso del nivel de agua con las ecuaciones 6 y 7.
3. Creación de un *solver* de la ecuación de descenso de nivel de agua para encontrar el valor del caudal. La función a resolver es la Ecuación 9.

$$\text{Descenso (s)} - \text{Descenso(s)} = 0$$

Ecuación 9

El código de Python para calcular el caudal en un acuífero confinado se localiza en Anexos (Figuras 11-12).

## REFERENCIAS

FLORES, C. & ALIAGA, M. 2020. Diagnóstico del estado hidrogeológico de la Cuenca del Limarí. Dirección General de Aguas. División de estudios y planificación. SDT N° 427:46 pp. Santiago.

KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. 1994. Analysis and Evaluation of pumping test data (2<sup>nd</sup> ed). International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. 47: 372 pp. Países Bajos.

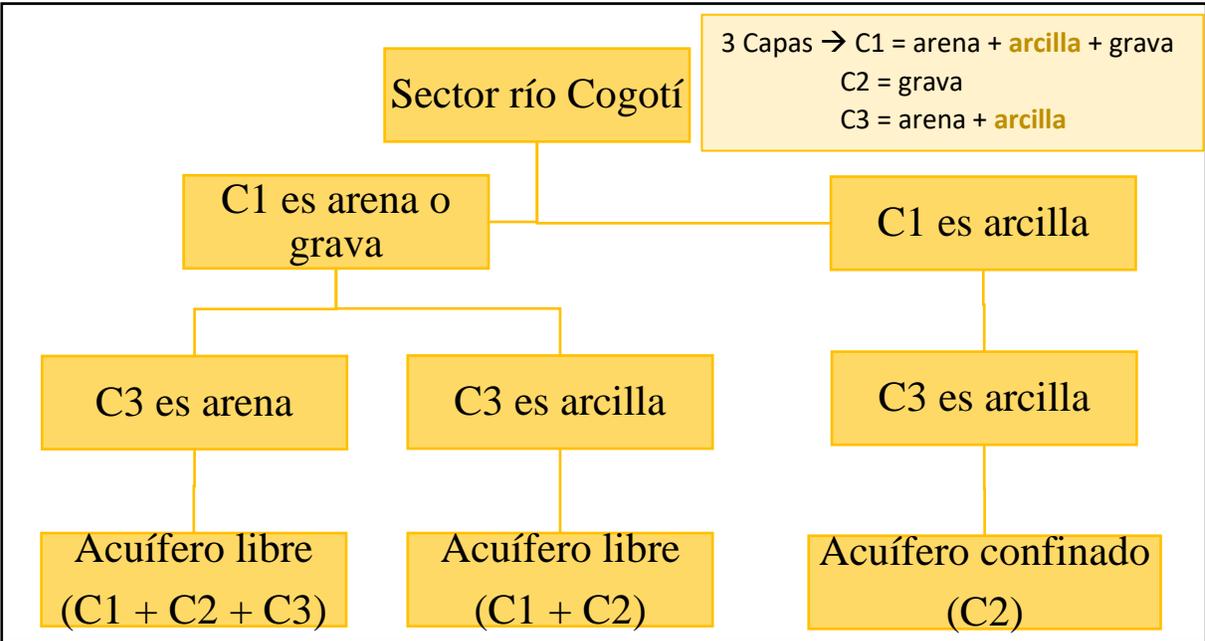
MOENCH, A. F. & PRICKETT, T. A. 1972. Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions. *Water Resources Research*. Vol 8 (2): 494-499.

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.

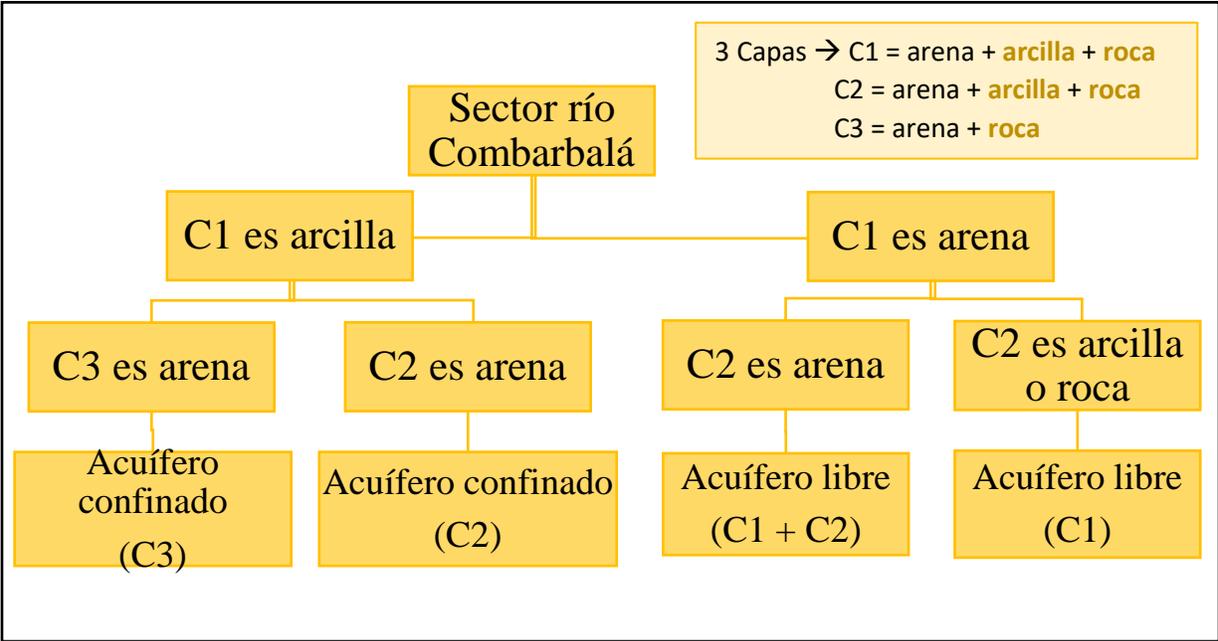
THEIS, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Vol. 16 (2): 519-524.

VILLANUEVA, M. & IGLESIAS, A. 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero de España, IGME: 435pp. Madrid.

# ANEXOS



**Figura 1.** Mapa conceptual del sector río Cogotí.



**Figura 2.** Mapa conceptual del sector río Combarbalá.

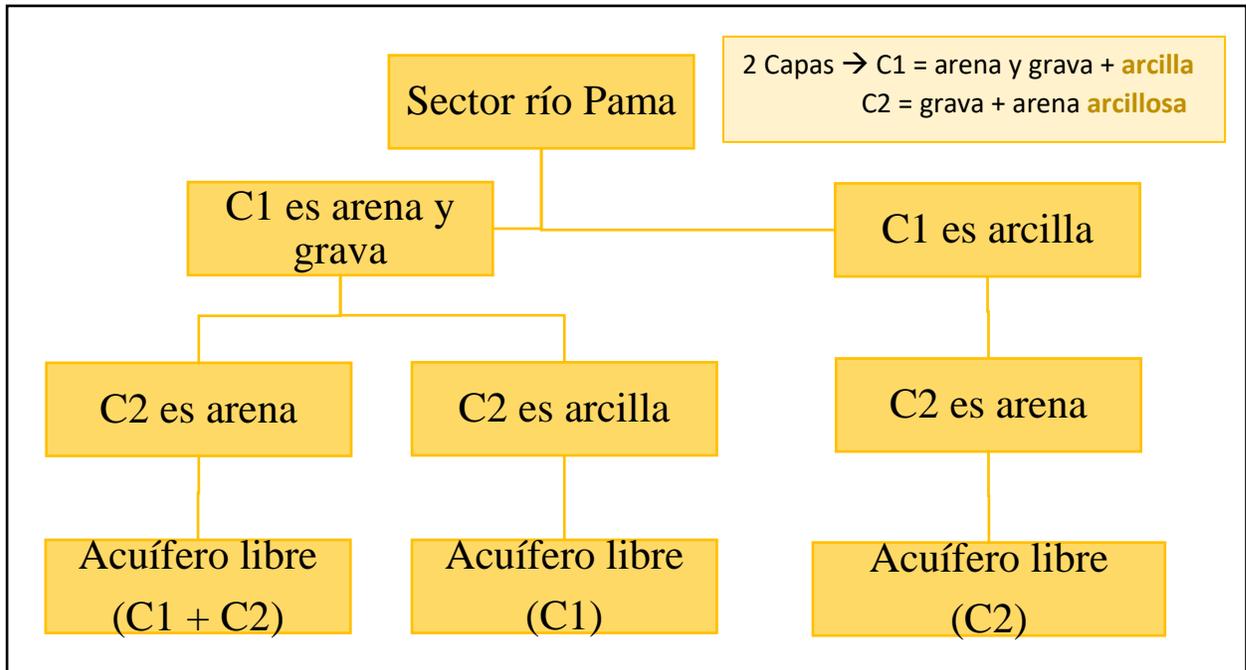


Figura 3. Mapa conceptual del sector río Pama.

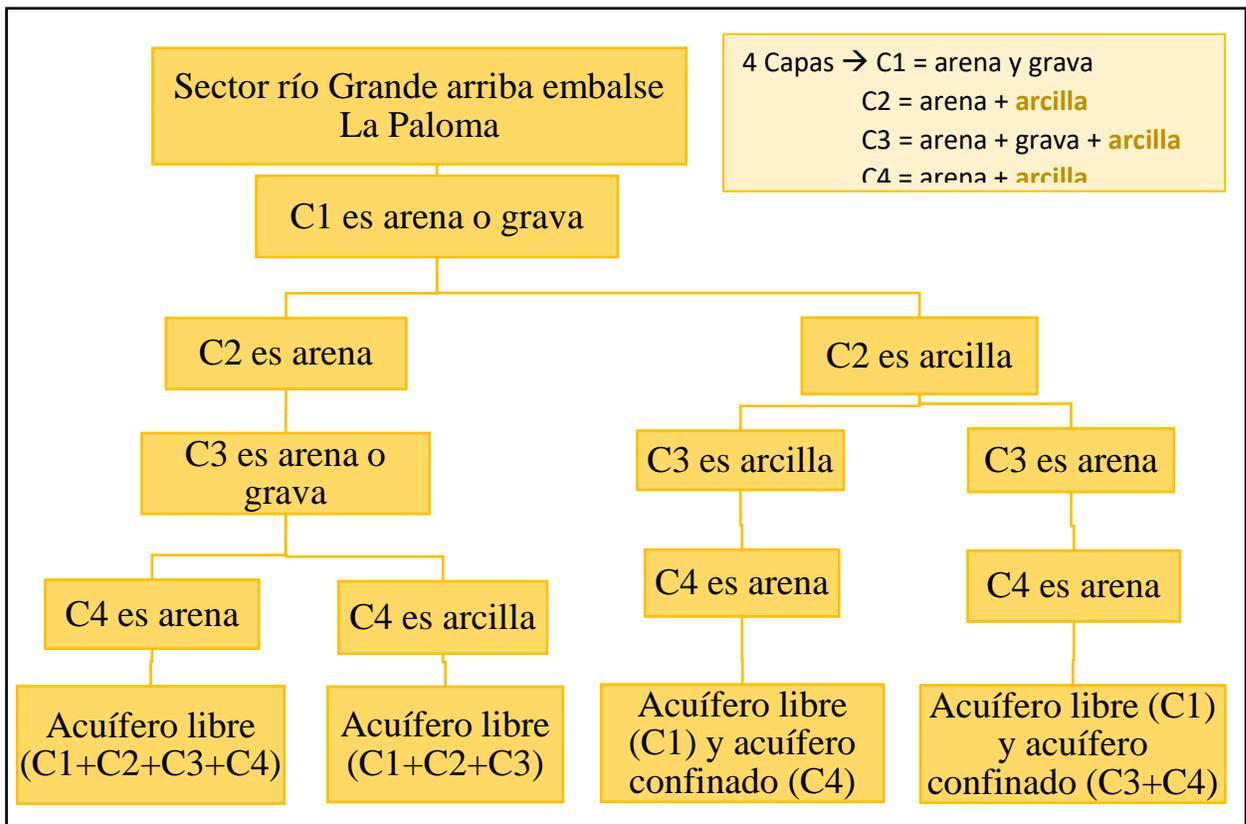


Figura 4. Mapa conceptual del sector río Grande arriba del embalse La Paloma.

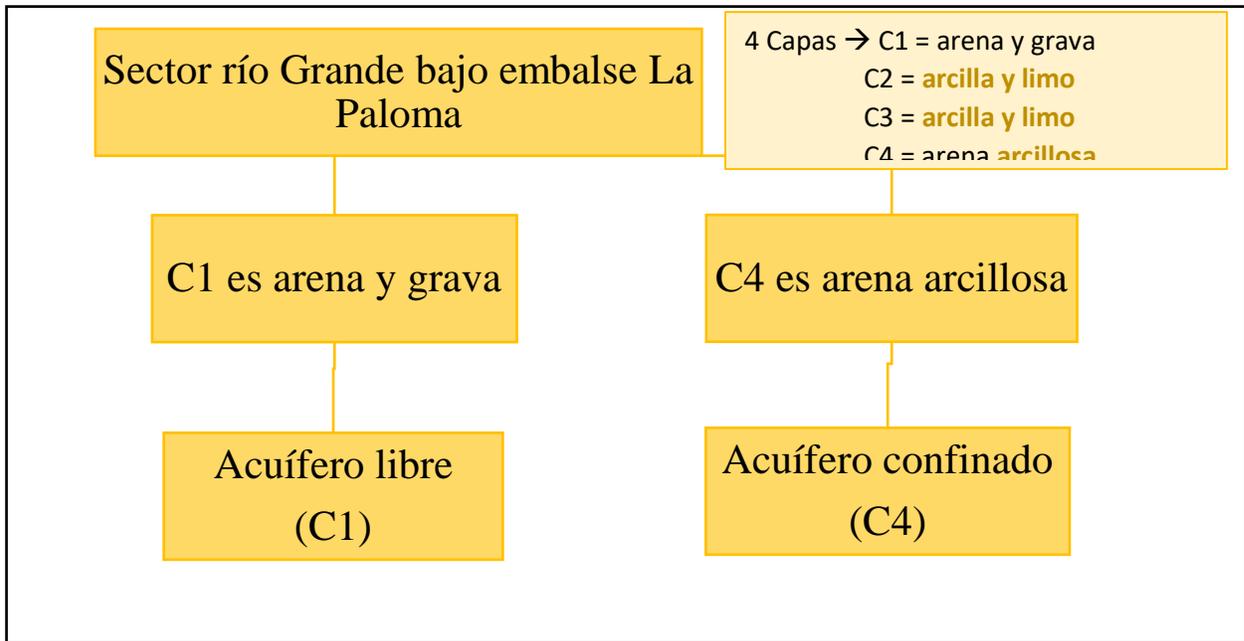


Figura 5. Mapa conceptual del sector río Grande bajo del embalse La Paloma.

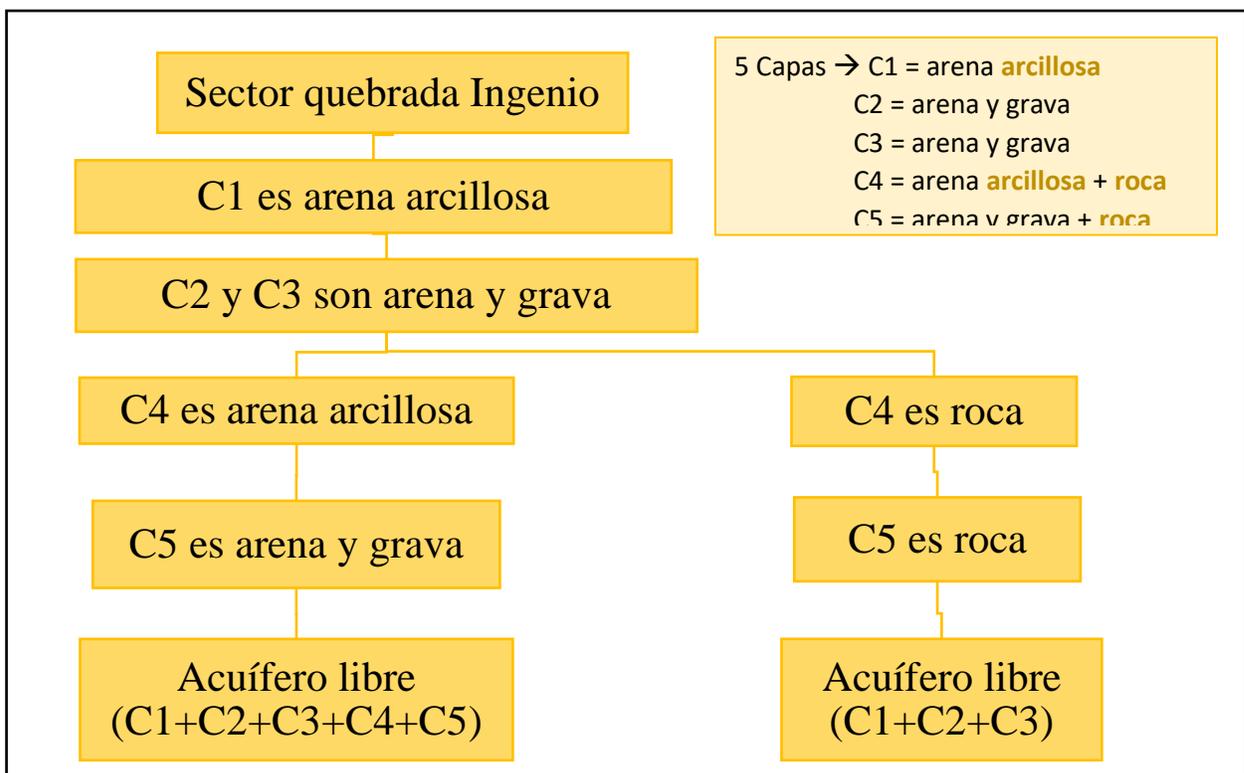


Figura 6. Mapa conceptual del sector quebrada Ingenio.

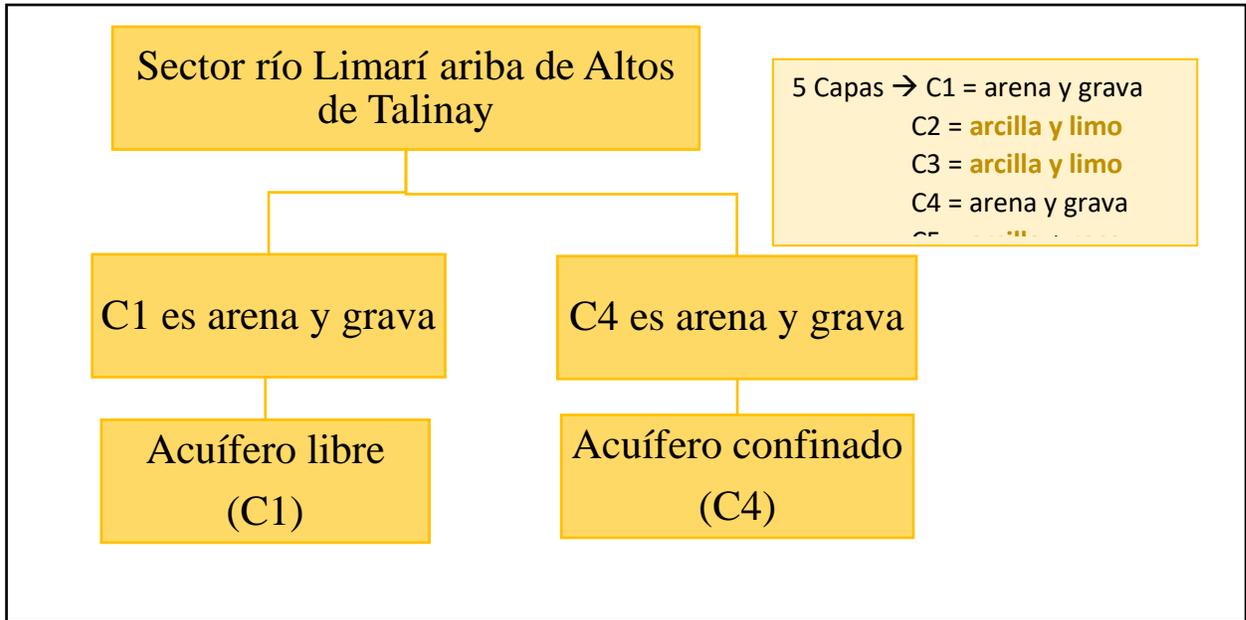


Figura 7. Mapa conceptual del sector río Limarí arriba de Altos de Talinay.

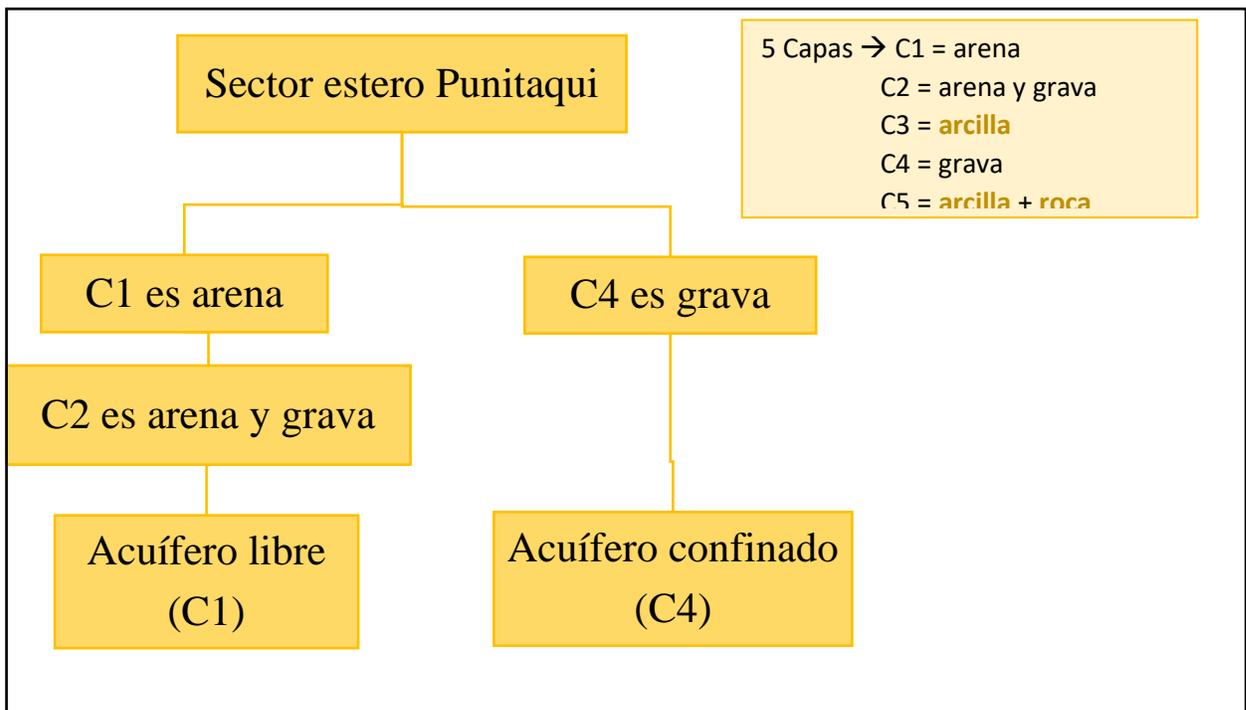


Figura 8. Mapa conceptual del sector estero Punitaqui.

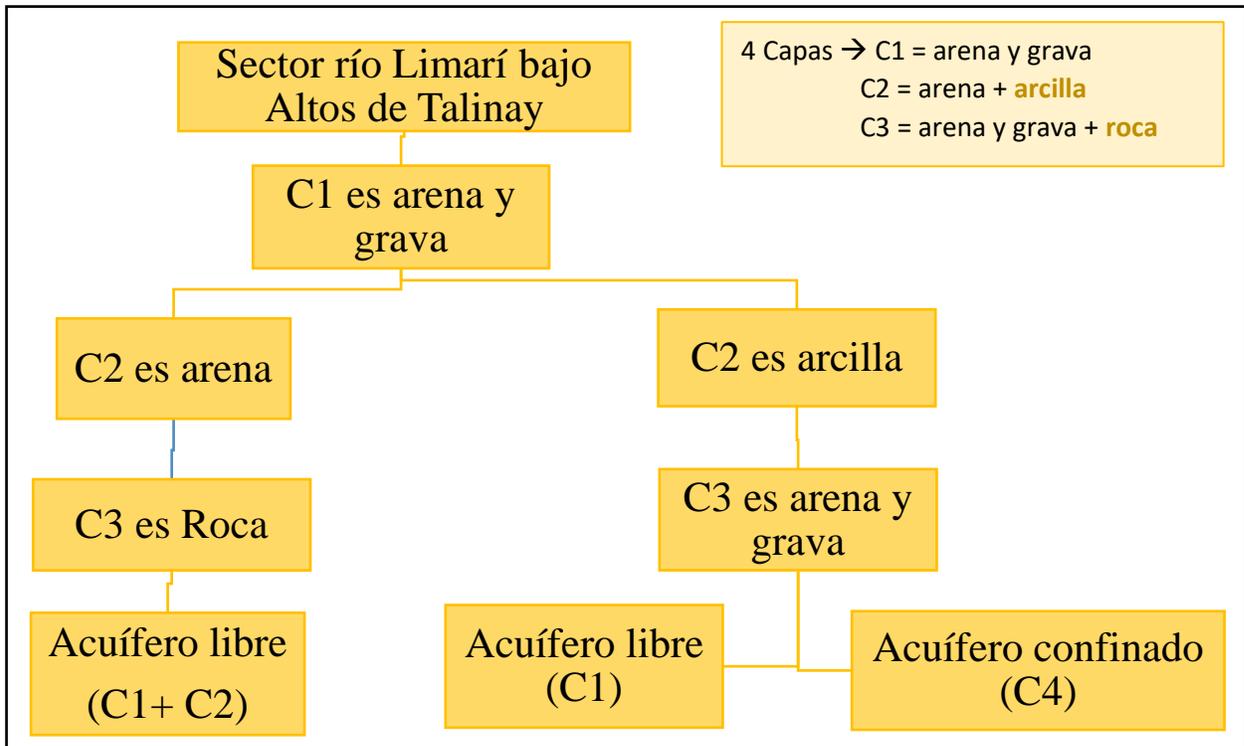


Figura 9. Mapa conceptual del sector río Limarí bajo los Altos de Talinay.

```

1  """
2  Cálculo de Potencial de extracción para acuífero libre C1
3  """
4  import rasterio
5  import numpy as np
6  import scipy.special as sc
7
8  #Abrir las propiedades hidráulicas que se utilizaran en el cálculo
9  Espesor_saturado1 = rasterio.open('b1.tif')
10 Error_es1 = rasterio.open('db1.tif')
11 Transmisividad1 = rasterio.open('Transmisividad_Capa1.tif')
12 max_Trans1 = rasterio.open('max_Transmisividad1.tif')
13 min_Trans1 = rasterio.open('min_Transmisividad1.tif')
14 Porosidad_Drenaje1 = rasterio.open('Sy_L1.tif')
15 Error_PorDren1 = rasterio.open('dSy_L1.tif')
16 DMS = Transmisividad1.meta
17
18 #Valores promedio
19 s1 = np.float64(Espesor_saturado1.read(1).astype(float))
20 T1 = np.float64(Transmisividad1.read(1).astype(float))
21 Sy1 = np.float64(Porosidad_Drenaje1.read(1).astype(float))
22
23 #Incerdidumbres
24 ds1 = np.float64(Error_es1.read(1).astype(float))
25 max_T1 = np.float64(max_Trans1.read(1).astype(float))
26 min_T1 = np.float64(min_Trans1.read(1).astype(float))
27 dSy1 = np.float64(Error_PorDren1.read(1).astype(float))
28
29 #Index donde rasters tienen información
30 I = T1>DMS['nodata']
31 I = np.logical_and(I, s1>DMS['nodata'])
32 I = np.logical_and(I, Sy1>DMS['nodata'])
33
34 #Valores mínimos y máximos
35 s1min = s1[I]-2*ds1[I]
36 s1min[s1min<0.] = 0.
37 s1max = s1[I]+2*ds1[I]
38 s1max[s1max<0.] = 0.
39 Symin1 = Sy1[I]-dSy1[I]
40 Symax1 = Sy1[I]+dSy1[I]
41
42 I1 = s1[I]>1e-03
43 b = s1[I][I1] #Descenso espesor saturado (m)
44 S = b-((b**2)/(2*b)) #Corrección de Jacob (m)
45 S[S<0.] = 0.
46 T = T1[I][I1] #Transmisividad acuífero (m/d)
47 Sy = Sy1[I][I1] #Porosidad de drenaje
48 rw = 0.15 #Radio típico de un pozo 0.15 (m)
49 tf = 180 #Tiempo final (d)
50 t0 = 1e-5*tf #Tiempo inicial (d)
51
52 #Cálculos caudal Q=a/W(u)=sx4piT/W(r2SY/ATt)
53 Caudal = np.full(s1.shape, np.nan)
54 Q = np.empty(s1[I][I1].shape)
55 for i in range(s1[I][I1].shape[0]):
56     if T[i]>0:
57         a = S[i]*4*np.pi*T[i]
58         u = rw**2*Sy[i]/(4*T[i]*tf)
59         if u <=1:
60             W = sc.expl(u)
61             Q[i] = a/W
62         else:
63             Q[i] = 0.
64     else:
65         Q[i] = 0.
66 Valores_Caudal = Caudal[I]
67 Valores_Caudal[I1] = Q
68 Valores_Caudal[~I1] = 0.0
69 Caudal[I] = Valores_Caudal
70 Caudal[~I] = DMS['nodata']
71
72 # Guardar raster
73 with rasterio.open('Qpromedio_AL1.tif', 'w', **DMS) as file:
74     file.write(Caudal.astype(rasterio.float32),1)
75

```

Figura 10. Código de Python para acuífero libre.

```

1  """
2  Cálculo de Potencial de extracción para acuífero confinado C2
3  """
4  import rasterio
5  import numpy as np
6  import Moench
7
8  #Importar los raster necesarios para los cálculos
9  Espesor_saturado1 = rasterio.open('b1.tif')
10 Espesor_saturado2 = rasterio.open('b2.tif')
11 Error_es1 = rasterio.open('db1.tif')
12 Error_es2 = rasterio.open('db2.tif')
13 Transmisividad = rasterio.open('Tprom.tif')
14 max_Trans = rasterio.open('Tmax.tif')
15 min_Trans = rasterio.open('Tmin.tif')
16 Porosidad_Drenaje = rasterio.open('Sy.tif')
17 Error_PorDren = rasterio.open('dSy.tif')
18 Coef_AlmacEspec = rasterio.open('Ss.tif')
19 Error_CAE = rasterio.open('dSs.tif')
20 DMS = Espesor_saturado1.meta
21
22 #Valores promedio
23 s1 = np.float64(Espesor_saturado1.read(1).astype(float))
24 s2 = np.float64(Espesor_saturado2.read(1).astype(float))
25 T = np.float64(Transmisividad.read(1).astype(float))
26 Ss = np.float64(Coef_AlmacEspec.read(1).astype(float))
27 Sy = np.float64(Porosidad_Drenaje.read(1).astype(float))
28
29 #Incerdidumbres
30 ds1 = np.float64(Error_es1.read(1).astype(float))
31 ds2 = np.float64(Error_es2.read(1).astype(float))
32 max_T = np.float64(max_Trans.read(1).astype(float))
33 min_T = np.float64(min_Trans.read(1).astype(float))
34 dSs = np.float64(Error_CAE.read(1).astype(float))
35 dSy = np.float64(Error_PorDren.read(1).astype(float))
36
37 #Index donde rasters tienen información
38 I = T>DMS['nodata']
39 I = np.logical_and(I, s1>DMS['nodata'], s2>DMS['nodata'])
40 I = np.logical_and(I, Ss>DMS['nodata'])
41 I = np.logical_and(I, Sy>DMS['nodata'])
42
43 #Valores mínimos y máximos
44 s1min = s1[I]-2*ds1[I]
45 s1min[s1min<0.] = 0.
46 s2min = s2[I]-2*ds2[I]
47 s2min[s2min<0.] = 0.
48 s1max = s1[I]+2*ds1[I]
49 s1max[s1max<0.] = 0.
50 s2max = s2[I]+2*ds2[I]
51 s2max[s2max<0.] = 0.
52 Symin = Sy[I]-dSy[I]
53 Ssmin = Ss[I]-dSs[I]
54 Symax = Sy[I]+dSy[I]
55 Ssmax = Ss[I]+dSs[I]
56
57 I1 = s2[I]>1e-03
58 H = s1[I][I1]+s2[I][I1] #Elevación sup. potenciométrica inicial (m)
59 b = s2[I][I1] #Espesor acuífero confinado(m)
60 S = H-((b**2)/(2*b)) #Corrección de Jacob (m)
61 S[S<0.] = 0.
62 T = T[I][I1] #Transmisividad acuífero (m/d)
63 S1 = Sy[I][I1] #Almacenamiento condición de acuífero libre
64 S2 = Ss[I][I1]*b #Almacenamiento condición de acuífero confinado
65 r = 0.15 #Punto de observación radio típico de un pozo (m)
66 tf = 180 #Tiempo final (d)
67 t0 = 1e-5*tf #Tiempo inicial (d)
68
69 #Cálculo del caudal
70 Q = Moench.Q(S, r, tf, T, S1, S2, H, b)
71 Caudal = np.full(s1.shape, np.nan)
72 Valores_Caudal = Caudal[I]
73 Valores_Caudal[I1] = Q
74 Valores_Caudal[~I1] = 0.0
75 Caudal[I] = Valores_Caudal
76 Caudal[~I] = DMS['nodata']
77
78 # write output rasters
79 with rasterio.open('Qpromedio_AC2.tif', 'w', **DMS) as file:
80     file.write(Caudal.astype(rasterio.float32),1)
81

```

Figura 11. Código de Python para acuífero confinado.

```

1  import numpy as np
2  import scipy.special as spe
3  import scipy.optimize as opt
4
5  # Resuelve Ecuación 8
6  def func_root_R(R, t, Q, T, S1, S2, H, b): #S1 libre (Sy), S2 confinado (Ss*b)
7      v1 = R**2*S1/(4.*T*t)
8      v2 = R**2*S2/(4.*T*t)
9      res = Q/(4.*np.pi*T)*np.exp(-v1) - (H-b)*np.exp(-v2)/(spe.exp1(v2))
10     return res
11
12 def solve_R_scalar(t, Q, T, S1, S2, H, b):
13     ub = np.sqrt(4.*T*t/S2)*10. #normalmente es 10
14     lb = ub*1e-12
15     if func_root_R(lb, t, Q, T, S1, S2, H, b) < 0.:
16         R = 0.
17     else:
18         R = opt.root_scalar(func_root_R, args=(t, Q, T, S1, S2, H, b),
19                             method='bisect', bracket=(lb, ub), rtol=1e-5,
20                             xtol=1e-5).root
21     return R
22
23 #Cálculo del descenso nivel de agua
24 def drawdown_scalar(r, t, Q, T, S1, S2, H, b):
25     # Buscar punto de transición
26     R = solve_R_scalar(t, Q, T, S1, S2, H, b)
27     # Descenso área no confinada
28     if r < R: #h1
29         u1 = r**2*S1/(4.*T*t)
30         v1 = R**2*S1/(4.*T*t)
31         s = H-b + Q/(4.*np.pi*T)*(spe.exp1(u1)-spe.exp1(v1))
32     # Descenso área confinada
33     else: #h2
34         u2 = r**2*S2/(4.*T*t)
35         v2 = R**2*S2/(4.*T*t)
36         v1 = R**2*S1/(4.*T*t)
37         s = Q/(4.*np.pi*T)*np.exp(v2-v1)*spe.exp1(u2)
38     return s
39 #Vectorizar la función
40 drawdown = np.vectorize(drawdown_scalar)
41
42 #Cálculo del caudal (Q) en función del descenso (s)
43 def func_root_Q(Q, s, r, t, T, S1, S2, H, b):
44     res = s - drawdown_scalar(r, t, Q, T, S1, S2, H, b)
45     return res
46
47 def Q_scalar(s, r, t, T, S1, S2, H, b):
48     ub = 4*np.pi*T*s*1e2
49     lb = 4*np.pi*T*s*1e-2
50     Q = opt.root_scalar(func_root_Q, args=(s, r, t, T, S1, S2, H, b),
51                         method='bisect', bracket=(lb, ub), rtol=1e-5,
52                         xtol=1e-5).root
53     return Q
54
55 Q = np.vectorize(Q_scalar)
56

```

Figura 12. Código Moench utilizado en el código de acuífero confinado (Figura 11).