



EVALUACIÓN DE LA SALINIDAD DE LA SUBCUENCA OESTE DEL ACUÍFERO EL CULEBRÓN

Gustavo Cárdenas-Castillero

Geógrafo, M. Sc. Higrología e Hidrogeología

Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA-Intihuasi
Universidad la Sorbona – Pierre et Marie Curie. París – Francia.

Geología

Hidrología - Hidrogeología

Hidrofísica

Hidrogeoquímica

CONTENIDO DE LA PRESENTACIÓN

EVALUACIÓN DE LA SALINIDAD DE LA SUBCUENCA OESTE DEL ACUÍFERO EL CULEBRÓN

1. GEOLOGÍA: Reconocimiento de formaciones y unidades geológicas.
➔ *Exhaustiva revisión bibliográfica*
2. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA: Estimación de la recarga de la subcuenca Oeste del acuífero ➔ *Uso del software ESPERE (Estimación de la Precipitación Efectiva y de la Recarga a partir de diferentes métodos).*
3. HIDROGEOFÍSICA: Identificación de la salinidad de la subcuenca Oeste a partir de la implementación del dispositivo SMD ➔
Uso de un dispositivo de 100 metros de largo, compuesto por un tren de sensores, permitiendo medir la resistividad del agua cada metro, entre las profundidades 61.5 a la 97.5.
4. HIDROGEOQUÍMICA: Tipos de agua y origen de la salinidad ➔
Diagramas de Stiff, Piper, Binarios y correlación entre aniones y cationes.

GEOLOGÍA

Cuenca del estero el Culebrón

Geología

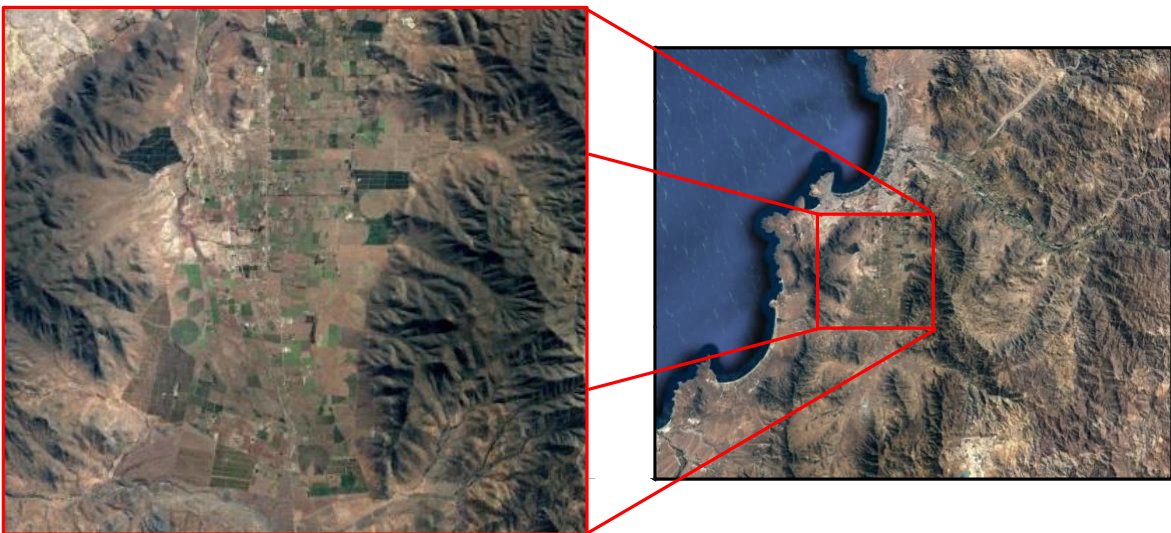
Hidrología - Hidrogeología

Hidrogeofísica

Hidrogeoquímica

GEOLOGÍA

Cuenca del estero El Culebrón



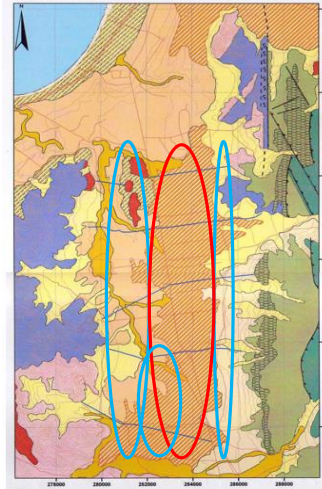
GEOLOGÍA

Cuenca del estero El Culebrón

FORMACIÓN COQUIMBO

Secuencia sedimentaria marina fosilifera con débil litificación

- Primera facies = intercalaciones de areniscas y rípios de diferente granulometría,
- Segunda facies = comprende calizas bioclásticas con intercalaciones de areniscas de diferente granulometría
- Terrazas marinas por depósitos



Fuente: INGEOREC. Compañía Minera Carmen de Andacollo, Hidrogeología y modelo numérico de la cuenca del estero Culebrón, primera etapa, Coquimbo - 2008, página 7.

FORMACIÓN CONFLUENCIA

Secuencia sedimentaria continental bien estratificada y de débil litificación

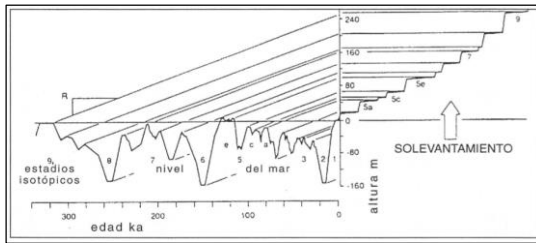
Gravas gruesas

Limo, arcillas y arenas



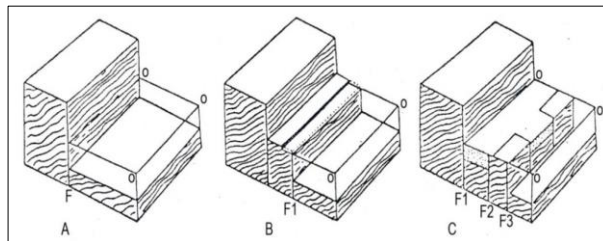
GEOLOGÍA

Origen de las terrazas marinas por depósitos



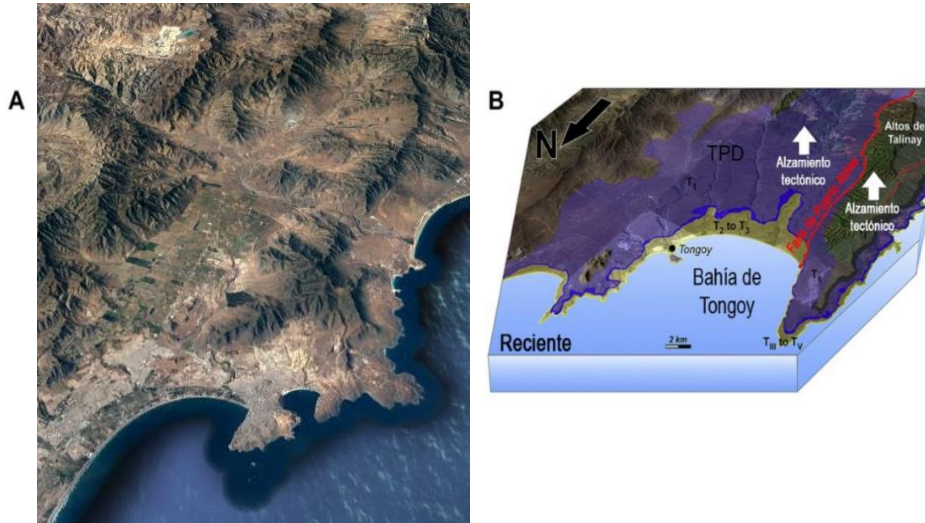
Paskoff identifica 6 transgresiones y regresiones a partir de 1970 a través de estudios isotópicos,

Las terrazas marinas por depósitos se originan a partir de la sedimentación de las transgresiones



GEOLOGÍA

Terrazas marinas por depósitos



HIDROLOGÍA – HIDROGEOLOGÍA

Subcuenca Oeste del estero el Culebrón

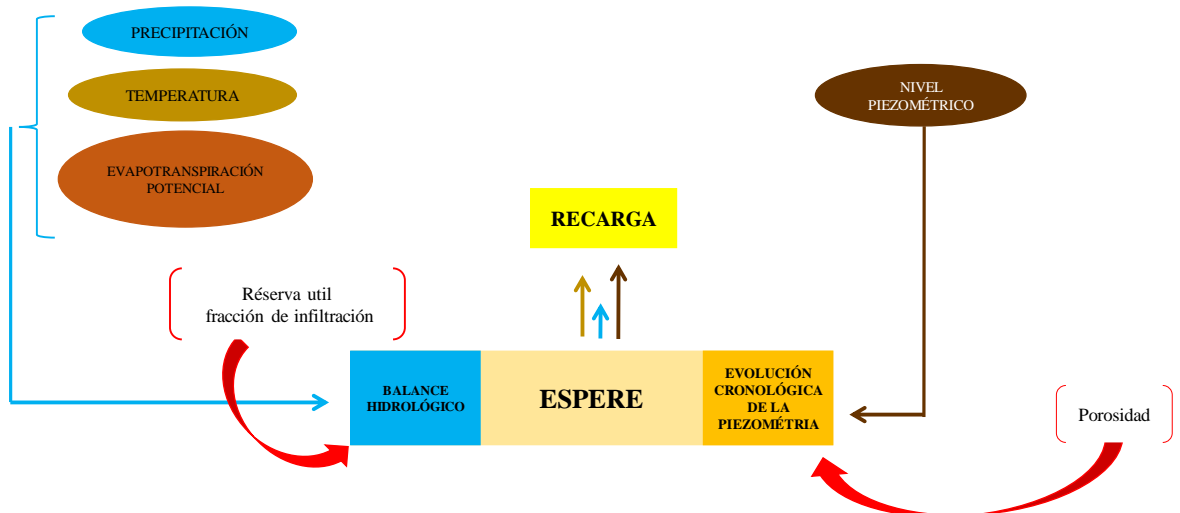
HIDROLOGÍA

Subuenca Oeste del estero El Culebrón



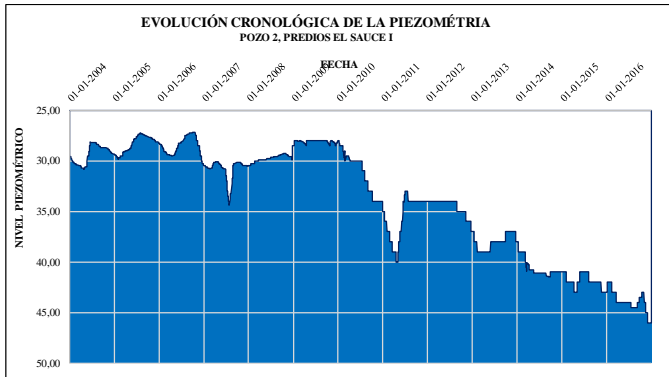
ESTIMACIÓN DE LA RECARGA A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA Y EL NIVEL PIEZOMÉTRICO

El modelo simula una recarga coherente a partir de la precipitación efectiva y la evolución cronológica de la piezometría.



HIDROLOGÍA-HIDROGEOLOGÍA

Estimación de la recarga a partir de la precipitación efectiva y el nivel piezométrico

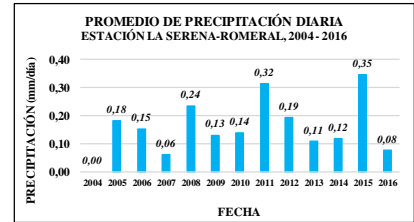


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de nivel estático de los pozos ubicados en los predios El Sauce, predio dedicado al cultivo de olivos para la producción de aceite.

Thornthwaite - Dingman - Turc

Déficit de la recarga a partir de la precipitación efectiva

Precipitación



WTF (Water Table Fluctuation)

Se estiman recargas que varían entre 280mm para los años 2007 y 2008, y una recarga de 300mm entre los años 2010 y 2011

HIDROLOGÍA-HIDROGEOLOGÍA

Evolución del uso de suelo - cuenca del estero El Culebrón

1985



1995



2005



2015



HIDROGEOLOGÍA

Nivel piezométrico- cuenca del estero El Culebrón

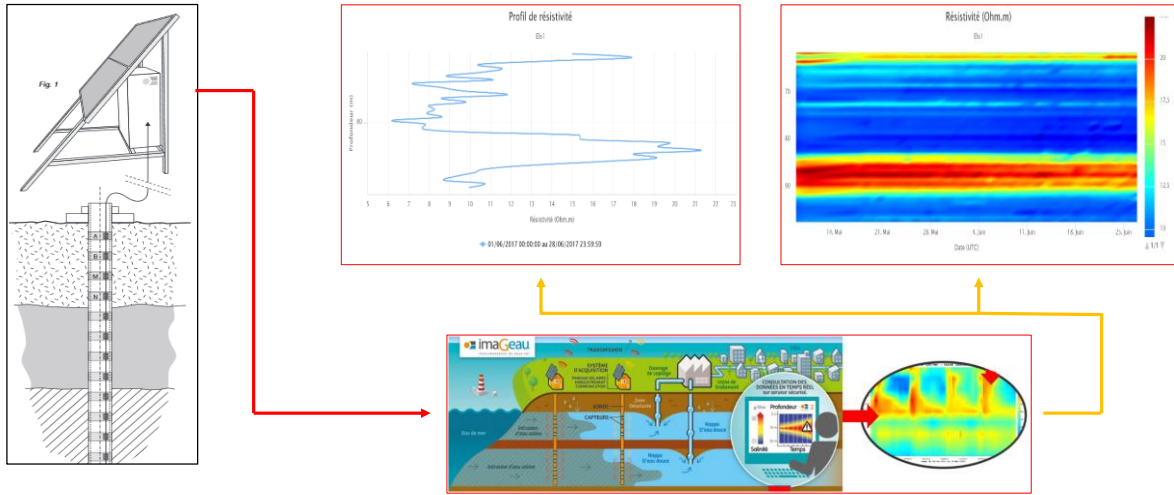


HIDROGEOFÍSICA

Subcuenca Oeste del estero el Culebrón

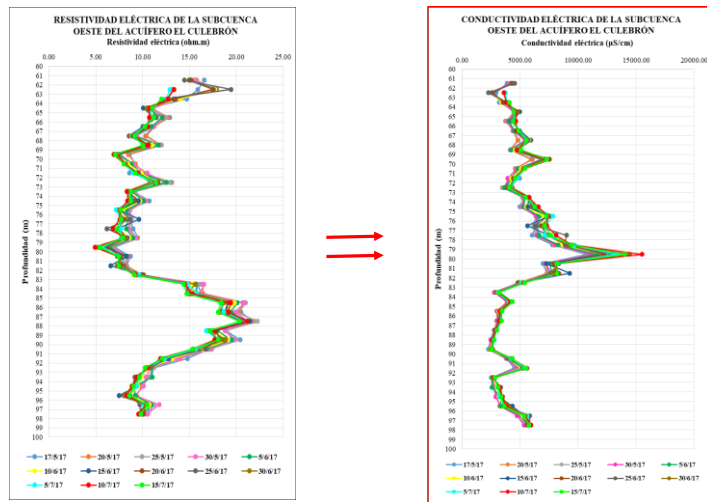
HIDROGEOFÍSICA

Funcionamiento del dispositivo de vigilancia de aguas subterráneas SMD



HIDROGEOFÍSICA

Resistividades medidas por el dispositivo SMD



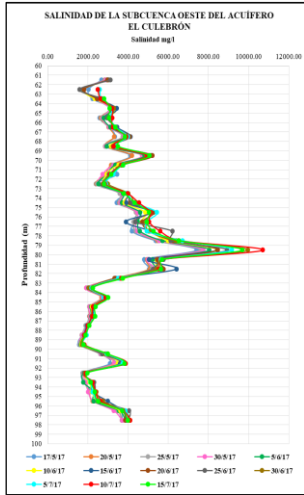
Fuente: Elaboración propia.
 Datos: Dispositivo SMD. Instituto de Investigación Agrícola, La Serena - Coquimbo.

Fuente: Elaboración propia.
 Datos: Dispositivo SMD. Instituto de Investigación Agrícola, La Serena - Coquimbo.



HIDROGEOFÍSICA

Salinidad estimada a partir de la conductividad eléctrica.



Profundidad	17/5/17	20/5/17	25/5/17	30/5/17	5/6/17	10/6/17	15/6/17	20/6/17	25/6/17	30/6/17	5/7/17	10/7/17	15/7/17
61.5	2578.87	2537.88	2558.69	2899.29	2971.84	3022.80	3000.45	2963.14	3122.42	No datos	No datos	No datos	No datos
62.5	2023.03	1772.79	1742.36	1742.36	1742.36	1756.86	1770.32	1787.70	1797.75	1756.23	2506.46	2853.64	2844.60
63.5	2221.55	2350.13	2360.03	2360.03	2435.55	2344.22	2488.95	2452.42	2693.98	2646.88	2669.23	2632.84	2810.44
64.5	3238.96	3103.37	3071.70	3103.37	3200.27	3397.74	3428.01	3270.76	3151.97	3288.38	3151.97	3185.12	3087.47
65.5	2588.58	2632.84	2693.98	2744.69	2789.11	3081.14	3019.16	3103.37	2950.54	3119.42	3135.62	3201.93	3040.60
66.5	3074.64	3025.26	3040.60	3056.08	3116.20	3342.26	3443.32	3306.17	3397.74	3368.58	3253.31	3360.58	
67.5	3345.20	3306.17	3323.69	3370.11	3870.24	4017.39	4110.63	4084.34	3894.51	3860.77	3982.15	3908.51	3837.30
68.5	2854.77	2805.18	2851.44	2892.26	2933.60	3148.07	3307.40	3290.12	3256.07	3236.69	3360.22	3206.12	3489.62
69.5	4115.51	4191.56	4091.88	4098.64	4032.43	3983.18	3553.37	3208.87	3941.13	4094.48	4041.13	4041.13	3980.04
70.5	3184.17	3161.36	3242.98	3285.16	3390.22	3453.72	3653.72	3738.45	3711.92	3634.29	3738.45	3685.72	3738.45
71.5	3443.44	2867.36	2971.95	2721.67	2971.95	2932.86	3121.86	3181.43	3045.33	3141.50	3263.95	3102.42	3161.36
72.5	2404.95	2423.43	2445.18	2559.20	2528.68	2814.45	2924.59	2748.59	2845.57	2995.62	2963.73	2845.57	2803.28
73.5	3673.47	3604.08	3582.42	3689.17	3743.89	3960.03	3986.04	3903.63	3883.85	4012.35	3908.94	3960.03	3786.33
74.5	3439.88	3552.42	3772.12	3612.49	3803.37	3827.00	3909.64	4115.09	4166.82	4197.24	4320.19	4533.08	4320.19
75.5	4540.61	4349.49	4385.69	4443.61	4807.48	4895.42	5000.00	5261.56	5066.68	5107.58	5428.89	5107.58	5610.92
76.5	4391.03	4282.20	4256.24	4309.09	4489.64	4885.56	4900.45	4710.40	4361.90	4871.43	4918.78	5043.13	4018.78
77.5	4831.01	4389.09	4389.09	4472.57	4882.67	5135.04	5151.72	5043.13	5209.58	5043.13	4918.78	5506.95	5264.60
78.5	3378.77	3466.91	4529.27	3546.95	4711.20	5991.89	6209.98	6218.98	6119.25	6388.39	6702.19	6529.46	6529.46
79.5													
80.5	4802.43	4952.99	5014.47	4983.55	5221.47	5411.10	5053.20	5452.96	5761.63	5641.98	5641.98	5681.32	5681.32
81.5	5048.70	5076.43	5174.79	5310.35	5359.43	5416.62	5611.72	5761.63	5411.72	5416.62	5527.07	5527.07	5641.98
82.5	3725.65	3378.70	3700.71	3465.19	3561.20	3753.93	3378.70	3324.00	3504.19	3636.11	3512.97	3657.41	3722.71
83.5	2017.99	1923.41	1964.79	1909.95	2034.30	2093.99	2183.54	2183.61	2197.12	2044.70	2171.77	2220.30	2203.85
84.5	2095.48	2066.88	2059.99	2127.49	2177.91	2076.45	2066.13	2050.93	2083.23	2097.29	2790.00	2876.45	2909.81
85.5	2097.56	2062.77	2067.98	2078.48	2046.29	2196.41	2200.03	2200.03	2344.89	2337.97	2854.60	2324.80	2371.39
86.5	2055.48	2096.67	2112.98	2118.64	2174.45	2235.68	2253.30	2225.60	2302.72	2339.58	2269.98	2207.07	2350.07
87.5	1924.77	1912.42	1880.14	1975.18	1885.18	1990.21	1951.51	2068.70	2045.91	2062.90	1990.21	1985.18	2068.70
88.5	1762.19	1699.25	1694.28	1709.26	1796.61	1811.03	1801.03	1855.58	1903.18	1884.41	1944.41	1824.80	1885.19
89.5	1563.85	1604.71	1609.21	1622.85	1643.22	1676.63	1744.63	1719.37	1762.40	1794.24	1787.94	1826.80	1782.40
90.5	2670.61	2627.70	2630.84	2651.54	2710.51	2763.34	2873.31	2888.47	2784.13	2877.06	2924.72	2983.97	2994.07
91.5	3101.76	3282.00	4256.24	3306.38	3966.53	3966.53	3959.69	3673.52	3830.37	3734.74	3880.00	3814.11	
92.5	1733.19	1753.27	1750.25	1812.66	1800.56	1892.13	1892.80	1900.56	1824.87	1862.18	1900.56	1887.65	1967.03
93.5	1861.50	1849.63	1862.18	1940.66	1707.20	2075.40	2165.38	2171.64	2202.61	2218.09	2125.31	2215.72	2146.99
94.5	2190.34	2085.72	2025.88	2008.68	2008.68	2105.78	2220.19	2272.49	2372.89	2408.62	2215.72	2272.49	2357.17
95.5	2544.75	2235.72	2268.81	2285.62	2292.39	2401.00	2390.97	2352.13	2483.37	2370.90	2522.06	2622.85	2592.60
96.5	3597.07	3472.19	3438.75	3280.06	3747.65	3619.47	3712.74	3743.54	4054.65	3842.80	3833.36	3743.54	3705.12
97.5	3708.06	3688.18	3688.18	3705.12	3871.60	4025.78	3917.52	3863.36	4012.47	4102.98	3990.51	4102.98	3990.51

Fuente: Elaboración propia. Datos: Dispositivo SMD. Proyecto INIA, La Serena - Coquimbo.

HIDROGEOFÍSICA

Capas salinas identificadas

Profundidad	17/5/17	20/5/17	25/5/17	30/5/17	5/6/17	10/6/17	15/6/17	20/6/17	25/6/17	30/6/17	5/7/17	10/7/17	15/7/17
61.5	2678.87	2537.88	2558.69	2899.29	2971.84	3022.80	3000.45	2963.14	3122.42	No datos	No datos	No datos	No datos
62.5	2023.03	1772.79	1742.36	1742.36	1742.36	1756.86	1770.32	1787.70	1797.75	1756.23	2506.46	2853.64	2844.60
63.5	2221.55	2350.13	2360.03	2360.03	2435.55	2344.22	2488.95	2452.42	2693.98	2646.88	2669.23	2632.84	2810.44
64.5	3238.96	3103.37	3071.70	3103.37	3200.27	3397.74	3428.01	3270.76	3151.97	3288.38	3151.97	3185.12	3087.47
65.5	2588.58	2632.84	2693.98	2744.69	2789.11	3081.14	3019.16	3103.37	2950.54	3119.42	3135.62	3201.93	3040.60
66.5	3074.64	3025.26	3040.60	3056.08	3116.20	3342.26	3443.32	3306.17	3397.74	3368.58	3253.31	3360.58	
67.5	3345.20	3306.17	3323.69	3370.11	3870.24	4017.39	4110.63	4084.34	3894.51	3860.77	3982.15	3908.51	3837.30
68.5	2854.77	2805.18	2851.44	2892.26	2933.60	3148.07	3307.40	3290.12	3256.07	3236.69	3360.22	3206.12	3489.62
69.5	4115.51	4191.56	4091.88	4098.64	4032.43	3983.18	3553.37	3208.87	3941.13	4094.48	4041.13	4041.13	3980.04
70.5	3184.17	3161.36	3242.98	3285.16	3390.22	3453.72	3653.72	3738.45	3711.92	3634.29	3738.45	3685.72	3738.45
71.5	3443.44	2867.36	2971.95	2721.67	2971.95	2932.86	3121.86	3181.43	3045.33	3141.50	3263.95	3102.42	3161.36
72.5	2404.95	2423.43	2445.18	2559.20	2528.68	2814.45	2924.59	2748.59	2845.57	2995.62	2963.73	2845.57	2803.28
73.5	3673.47	3604.08	3582.42	3689.17	3743.89	3960.03	3986.04	3903.63	3883.85	4012.35	3908.94	3960.03	3786.33
74.5	3439.88	3552.42	3772.12	3612.49	3803.37	3827.00	3909.64	4115.09	4166.82	4197.24	4320.19	4533.08	4320.19
75.5	4540.61	4349.49	4385.69	4443.61	4807.48	4895.42	5000.00	5261.56	5066.68	5107.58	5428.89	5107.58	5610.92
76.5	4391.03	4282.20	4256.24	4309.09	4489.64	4885.56	4900.45	4710.40	4361.90	4871.43	4918.78	5043.13	4018.78
77.5	4831.01	4389.09	4389.09	4472.57	4882.67	5135.04	5151.72	5043.13	5209.58	5043.13	4918.78	5506.95	5264.60
78.5	3378.77	3466.91	4529.27	3546.95	4711.20	5991.89	6209.98	6218.98	6119.25	6388.39	6702.19	6529.46	6529.46
79.5													
80.5	4802.43	4952.99	5014.47	4983.55	5221.47	5411.10	5053.20	5452.96	5761.63	5641.98	5641.98	5681.32	5681.32
81.5	5048.70	5076.43	5174.79	5310.35	5359.43	5416.62	6411.75	5761.63	5411.72	5416.62	5527.07	5527.07	5641.98
82.5	3725.65	3378.70	3700.71	3465.19	3561.20	3753.93	3378.70	3324.00	3504.19	3636.11	3512.97	3657.41	3722.71
83.5	2017.99	1923.41	1964.79	1909.95	2034.30	2093.99	2183.54	2183.61	2197.12	2044.70	2171.77	2220.30	2203.85
84.5	2095.48	2066.88	2059.99	2127.49	2177.91	2076.45	2066.13	2050.93	2083.23	2097.29	2790.00	2876.45	2909.81
85.5	2097.56	2062.77	2067.98	2078.48	2161.70	2196.31	2280.03	2280.03	2344.89	2337.97	2854.60	2324.80	2371.39
86.5	2055.48	2096.67	2112.98	2118.64	2174.45	2215.68	2253.30	2225.60	2302.72	2339.58	2269.98	2207.07	2350.07
87.5	1924.77	1912.42	1880.14	1975.18	1885.18	1990.21	1951.51	2068.70	2045.91	2062.90	1990.21	1985.18	2068.70
88.5	1762.19	1699.25	1694.28	1709.26	1796.61	1811.03	1801.03	1855.58	1903.18	1884.41	1944.41	1824.80	1885.19
89.5	1563.85	1604.71	1609.21	1622.85	1643.22	1676.63	1744.63	1719.37	1762.40	1794.24	1787.94	1826.80	1782.40
90.5	2670.61	2627.70	2630.84	2651.54	2710.51	2763.34	2873.31	2888.47					

HIDROGEOQUÍMICA

Subcuenca Oeste del estero el Culebrón

Geología

Hidrología - Hidrogeología

Hidrogeofísica

Hidrogeoquímica

HIDROGEOQUÍMICA

Análisis y estudio del tipo de agua

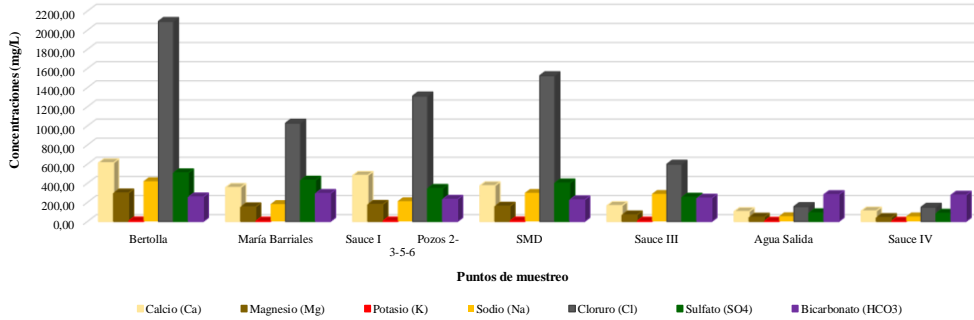
1. **Determinar las fuentes de salinidad de la subcuenca Oeste del acuífero.**
2. **Identificar el origen de la salinidad de la subcuenca Oeste del acuífero.**
 - ❖ Análisis de cationes y aniones
 - ❖ Diagramas de Stiff
 - ❖ Diagramas de Piper
 - ❖ Diagramas Binarios



HIDROGEOQUÍMICA

Análisis de aniones y cationes

CONCENTRACIONES DE ANIONES Y CATIONES



Calcio
 10 a 250 mg/l = aguas dulces,
 250 a 600 mg/L = terrenos yesíferos pueden,
 >600 mg/L salmueras de CaCl₂

Magnesio
 >100 mg/L = terrenos calcáreos
 ≥ 1000 mg/L = terrenos evaporíticos

Potasio
 ≤1000000 mg/L = salmueras

Bicarbonatos
 ≥1000 mg/L = aguas pobres en calcio, magnesio o sulfatos

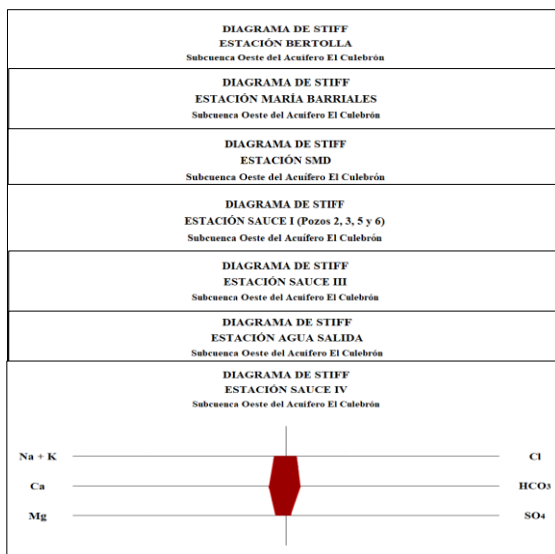
Sulfatos
 2 a 150 mg/L = aguas dulces,
 ≤5 000 mg/L = aguas salinas cálcicas,
 ≤200000 mg/L = salmueras magnésicas y sódicas

Cloruro
 >1000 mg/L = aguas salinas,
 >5000 mg/L = salmueras.

Sodio
 >100 a 150 mg/l = aguas dulces,
 >20000 mg/L = salmueras.

HIDROGEOQUÍMICA

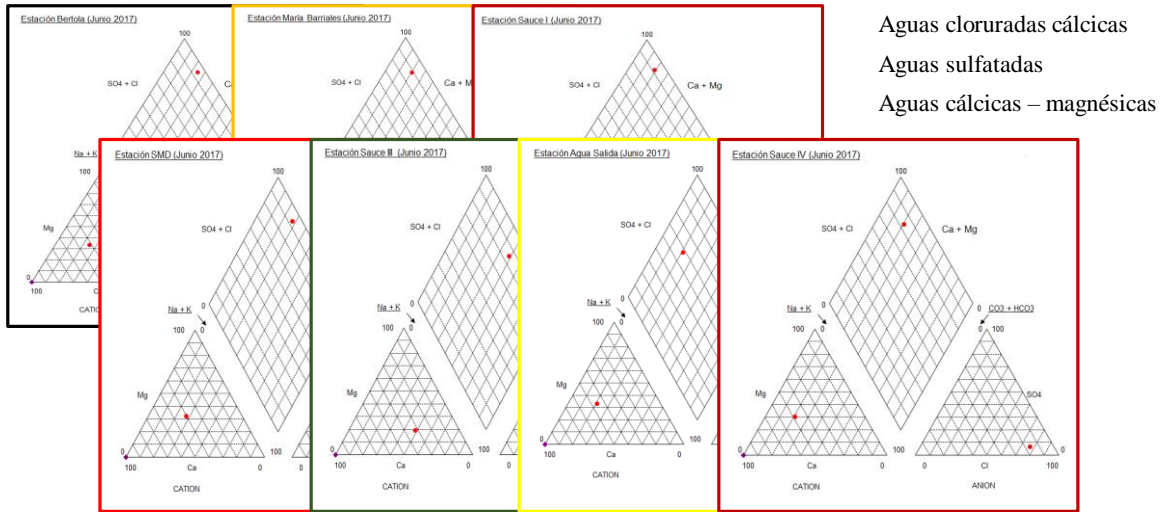
Diagramas de Stiff



- Aguas cloruradas cálcicas (2092 mg/L de Cl y 614mg/L Ca)
- Aguas cloruradas cálcicas (1028 mg/L de Cl y 356 mg/L de Ca)
- Aguas cloruradas cálcicas (1524 mg/L de Cl y 374 mg/L de Ca)
- Aguas cloruradas cálcicas (1312 mg/L de Cl y 482 mg/L de Ca)
- Aguas cloruradas sulfatadas (599 mg/L de Cl y 254 mg/L de SO4)
- Aguas cálcicas magnésicas (104 mg/L de Ca y 45 mg/L de Mg)
- Aguas cálcicas magnésicas (110 mg/L de Ca y 41 mg/L de Mg)

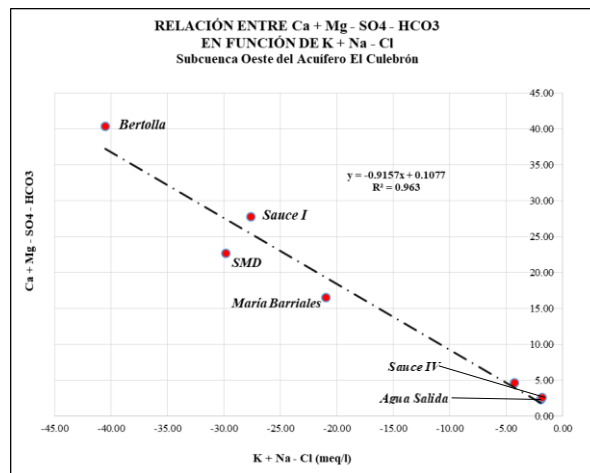
HIDROGEOQUÍMICA

Diagramas de Piper



HIDROGEOQUÍMICA

Diagrama Binario



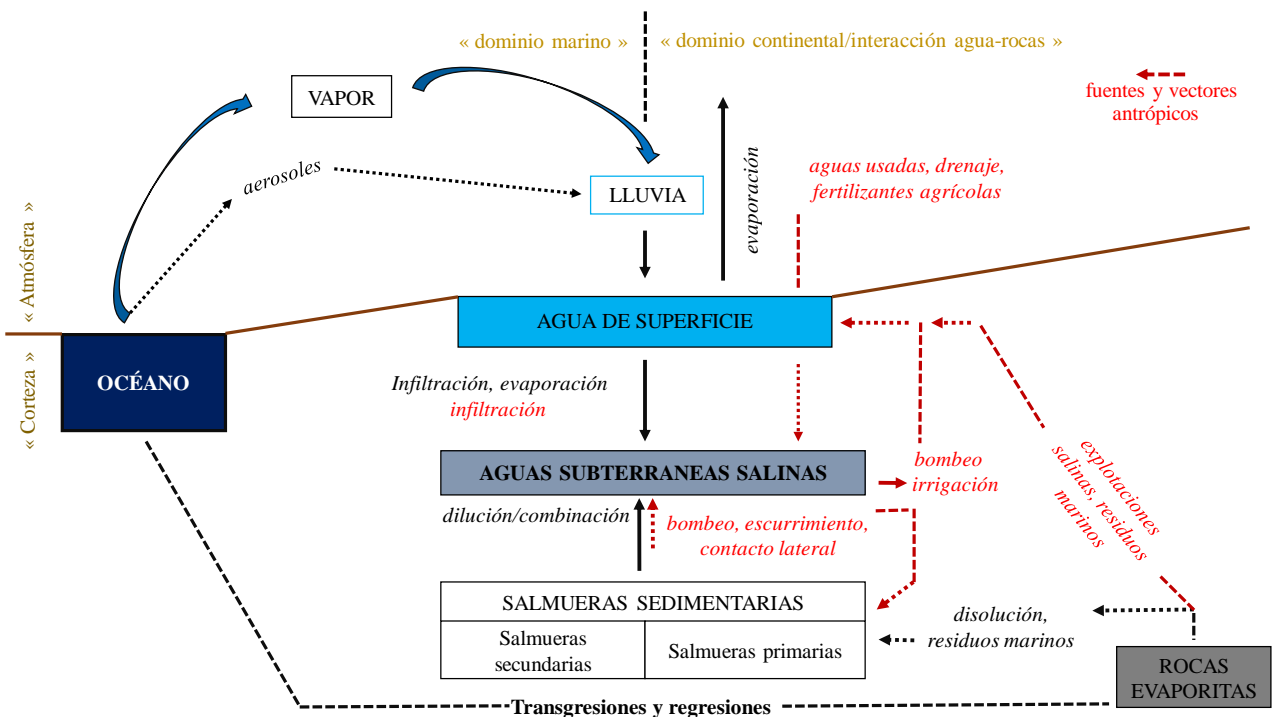
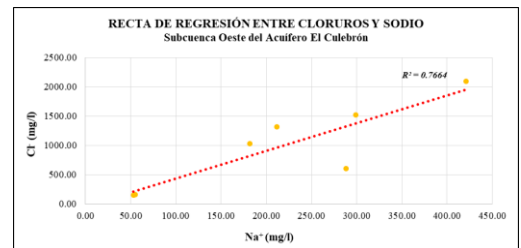
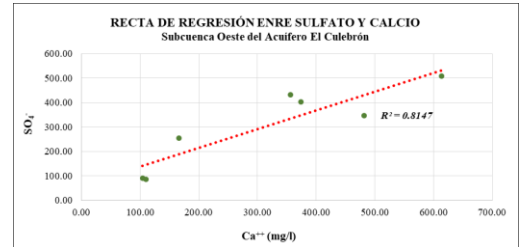
HIDROGEOQUÍMICA

Análisis y estudio del tipo de agua

Coefficientes de correlación = 0,81 para Ca^{++} y SO_4^- , y 0,77 para Na^{++} y Cl^-

La recta de regresión es muy próxima, lo que sugiere que las altas concentraciones de Na^{++} , Cl^- , Ca^{++} y SO_4^- en las aguas salinas de la estación Bertolla, María Barriales, Sauce I y SMD, provienen esencialmente de la disolución de cloruro de sodio o halita ($NaCl$) y de la disolución de sulfato de calcio, yeso ($CaSO_4 \cdot 2 H_2O$) o anhidrita ($CaSO_4$).

Por lo tanto, el exceso de Na^{++} , Cl^- , Ca^{++} y SO_4^- proviene de la redisolución de antiguas evaporitas asociadas a las formaciones sedimentarias.



CONCLUSIONES

1. El agua subterránea se encuentra en un sistema formado por un acuífero tipo libre, compuesto por sedimentos granulares y espesor de hasta 200 metros;
2. El acuífero El Culebrón representa la mayor fuente de agua para satisfacer las actividades realizadas en el Valle de Pan de Azúcar, en un 67% para usos agrícolas, 19% para la explotación minera y un 14% para agua potable, por lo cual, su desmedida explotación ha ejercido cambios en las escorrentías subterráneas y depresiones desde 15 a 20 metros en diferentes zonas del acuífero;
3. Las bajas precipitaciones en la subcuenca Oeste, la cual solo llega a 0,35 mm/día. y considerando un promedio diario anual de evapotranspiración potencial de la zona de 3,25 mm/día, determina un déficit de humedad en la zona no saturada del suelo;
4. El clima árido de la región, la ineficiente pluviosidad y la geología de la zona de Pan de Azúcar han determinado hidrogeoquímicamente las aguas del acuífero según el sector que se estudie, evidenciado por la altísima salinidad de 10.705 mg/l y una alta conductividad de 15.492 μ S/cm determinados en el punto del SMD;
5. La salinidad de la subcuenca Oeste se debe a la presencia de salmueras secundarias de origen evaporítico, confirmado por las altas concentraciones de calcio, la cual puede sobrepasar concentraciones de 600 mg/L para formaciones de origen evaporítico, y para el magnesio, el cual en terrenos calcáreos puede exceder los 100 mg/L; en tanto las concentraciones de cloruro, sobrepasan los 1000 y 2000 mg/L.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación y a la falta de datos observados en el transcurso del desarrollo de la misma, se proponen lo siguiente:

1. Establecer una red de pozos en todo el acuífero El Culebrón y realizar toma del nivel piezométrico al menos una vez al mes,
2. Construir piezómetros en aquellos lugares donde no se cuenta con información de niveles de agua,
3. Estudiar el impacto de la indiscriminada explotación de todo el acuífero en las direcciones de escorrentía,
4. Implementar una red para el monitoreo de la salinidad de las aguas del acuífero El Culebrón a partir de la implementación del dispositivo SMD,
5. Realizar un detallado estudio de uso de suelo, manejo de aguas servidas y sustancias vertidas en terreno,
6. Hacer análisis químicos y analizar las concentraciones de aniones y cationes en todo el acuífero,
7. Analizar las concentraciones de metales pesados en el acuífero y determinar sus fuentes.

*Geología**Hidrología - Hidrogeología**Hidrogeofísica**Hidrogeoquímica*

AGRADECIMIENTOS

“Gracias a Francisco Meza por acogerme en el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y hacerme participe de una investigación pionera en América Latina, y gracias a ti Viviana Andaur por caminar junto a mí durante mi estadía en Chile, gracias por tu apoyo metodológico, revisión y edición del texto de esta investigación.

Gracias en general al INIA, por su apoyo, a las nuevas amistades cultivadas, lo aprendido y la gratificante experiencia de vida recibida.

Gracias a todos...”

Gustavo Cárdenas.