

Informe relativo al funcionamiento de la cuenca del Salar de Atacama como apoyo a la respuesta a los cargos de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) por las actuaciones de SQM en el Salar

Emilio CUSTODIO Gimena, Dr. Ing. Ind.

Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias, España

Profesor catedrático emérito, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona

Barcelona / Santiago de Chile, Octubre de 2017

Realizado para SQM, Santiago, Chile.

Resumen

El Salar de Atacama es una vasta cuenca endorreica y cerrada (terminal), en un área hiperárida. Además de la lluvia local, el Salar recibe aportes de agua permanentes subterráneos y ocasionalmente superficiales de sus laderas NE, E y S y prácticamente nulos por el lado W. Estos aportes alimentan un conjunto importante de lagunas, cuyas aguas son la mezcla con la recirculación de salmuera periférica, de modo que son saladas y con cierto grado de concentración adicional por evaporación. La parte de agua que no se evapora, rebosa de estas lagunas sobre umbrales físicos de rebose¹ (Figura 0.1) y se vierten al salar. Entre la salmuera del salar y el agua subterránea dulce o algo salobre de aportación lateral existe una zona de mezcla que responde a las características generales hidrodinámicas de sistemas de fluidos miscibles de densidad variable. Esta zona de mezcla es muy tendida y se extiende lateralmente a causa de la gran diferencia de densidad y pequeño gradiente freático lateral. Dada la gran superficie de contacto, cabe esperar que esa zona de mezcla sea notablemente activa, aunque con pocos y lentos cambios a lo largo del tiempo. Esto, junto con la evaporación, explica que las aguas que llegan a aflorar en la periferia del salar sean de salinidad variable espacialmente, pero poco variable a corto plazo si no hay aportes superficiales. Los procesos hidrogeoquímicos en el entorno de la zona de mezcla son intensos, en un medio muy heterogéneo en detalle. Se produce disolución y precipitación de sales y la posible formación y mantenimiento de los umbrales físicos de rebose antes mencionados. La explotación de la salmuera para recuperar K y Li produce un descenso del nivel freático en el núcleo del salar. En el caso del Salar de Atacama, gran parte de la extracción se compensa con la reducción de la evaporación en el salar. Así, el efecto sobre las lagunas laterales puede considerarse como no significativo en tanto exista agua que rebosa de las lagunas y se mantenga el umbral físico. Esta es la situación general actual y será la futura hasta el cese de las actividades extractivas previstas y después durante la recuperación subsiguiente.

Para los procesos de producción de la actividad minera SQM extrae agua industrial de la ladera E del sistema hidrogeológico mediante 5 pozos. Aun suponiendo que todo el caudal de extracción de agua industrial se detrajese del aporte natural de agua a las lagunas, todavía quedaría un excedente de agua que mantendría el caudal de rebose si los umbrales físicos se mantienen. Esto explica que el nivel y superficie observado de las lagunas apenas varíe y lo haga sin tendencia significativa.

¹ Se denomina Umbral Físico de Rebose al límite perimetral de los cuerpos lagunares, que contiene y regula el nivel del agua en la respectiva laguna. El rebose de agua ocurre cuando el nivel del agua supera este umbral.

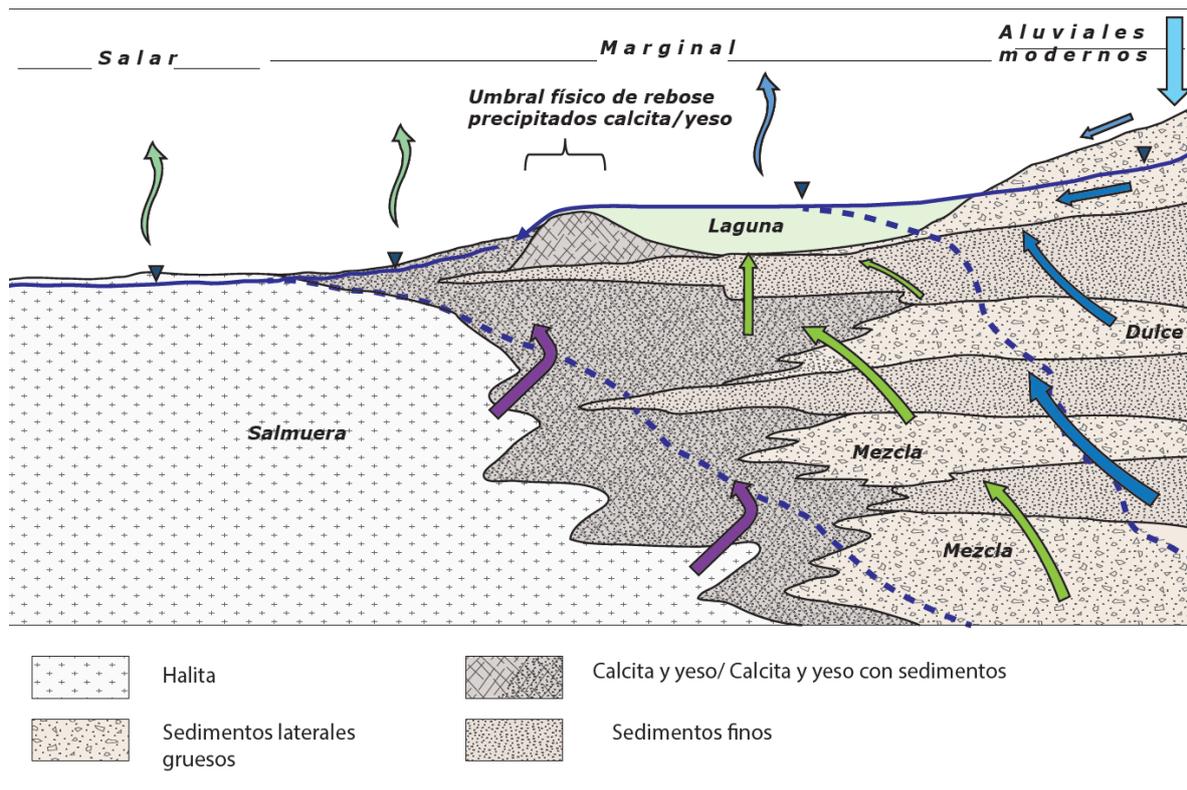


Figura 0.1.- Perfil conceptual de los sistemas lagunares del Salar de Atacama. La escala vertical es variable, en especial por encima de la superficie del salar, para resaltar los fenómenos. La salmuera diluida puede quedar por encima de la superficie del salar al ser menos densa.

Respecto a las cuestiones específicas planteadas en los requerimientos de la Administración, se puede concretar los resultados de su consideración en los apartados que siguen.

Las pequeñas variaciones de la extracción de salmuera en el salar respecto a un valor dado tienen un efecto en los caudales y niveles del agua que es aproximadamente proporcional a dicha variación. Por lo tanto, el exceso de extracción de salmuera del 3,9 % realizada por SQM produce una variación de niveles freáticos inferior a 2 mm. Este valor es menor que lo observable y que la incertidumbre inevitable en la modelación numérica, tanto en el momento actual como al final del periodo de concesión, en 2031.

La explotación de agua dulce en la ladera E supone un descenso piezométrico en el nivel freático en el entorno de donde se ubican los pozos de extracción de no más de dos metros, normalmente menor que 1 m, tal como se observa.

El nivel freático en el entorno del pozo Camar-2 está naturalmente a unos 50 m de profundidad. Esta profundidad no es alcanzable por el sistema radical complementario vertical de los Algarrobos, salvo quizás en situaciones extremas, que son improbables en el área de Camar. Por esta razón se puede considerar que los Algarrobos existentes en la zona no pueden funcionar como freatófitas si no es a través de posibles niveles acuíferos colgados más someros e independientes del acuífero general. En el caso extremo de la existencia de algunos Algarrobos con raíces del orden de los 50 m de profundidad, el potencial efecto de las extracciones de agua industrial podría hipotéticamente ser atribuido a que los Algarrobos no son capaces de extender las raíces con suficiente rapidez para adaptarse al descenso freático, pero esto es improbable ya que las

fluctuaciones naturales del nivel freático parecen ser similares a las que se producen por las extracciones.

En el área de Peine las condiciones son similares a las descritas y observadas en las otras áreas, aunque con un descenso de nivel en las salmueras de borde del orden de 0,4 m en 10 años. Este descenso se observa en los piezómetros próximos al salar y se aminora rápidamente al alejarse de ese borde. Las lagunas del área no muestran cambios significativos en su nivel y superficie salvo una débil disminución de nivel en la llamada laguna Interna por su mayor proximidad al salar. Esta laguna Interna es en realidad un cuerpo de agua de rebose, que corresponde a la parte terminal de un sistema alimentado por flujo procedente de las lagunas Salada y Saladita. Las observaciones realizadas en el área de Peine permiten caracterizarla a un nivel similar a las otras áreas lagunares y por lo tanto es posible analizar correctamente su comportamiento pasado y deducir que no se aprecia una evolución ambientalmente desfavorable.

INDICE

Resumen

1.- Introducción	4
2.- Modelo hidrogeológico conceptual general	5
3.- Aspectos hidrogeológicos específicos	9
4.- Efecto de cambios en la extracción de salmuera	21
5.- Efecto de la extracción de agua industrial sobre el acuífero en el sector de existencia de algarrobos	29
6.- Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico Sistema Peine	35
Apéndice.- Variabilidad química del agua de las lagunas	49
Agradecimientos	58
Referencias utilizadas y consultadas	59
Anexo 1.- Mapas y gráficos de soporte	62
Anexo 2.- Comparación de balances iónicos	84
Anexo 3.- Representación de las series hidroquímicas de las lagunas	87
Anexo 4.- Pluviometría	131
Anexo 5.- Series de niveles de piezómetros del Sistema Peine	136

1.- Introducción

Contenido del Informe

Se analizan los rasgos principales y el modelo conceptual validado del área del Salar de Atacama (CSIC-IDAEA, 2017) como soporte a las consideraciones en cuanto a implicaciones ambientales, con énfasis en los tres cargos que forman parte del objetivo de este escrito solicitado, los cuales se identifican a continuación. La documentación de soporte es numerosa, detallada y de calidad. Es la base de los razonamientos que se realizan y cuyos resultados se exponen.

Motivación del informe

Este informe tiene como objetivo aportar una opinión experta respecto al estado de las variables ambientales de interés, con referencia a los cargos formulados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) relativos a las actuaciones de SQM en la explotación de salmueras y agua dulce en el Salar de Atacama, en lo que respecta a los cargos no estrictamente administrativos. Estos cargos hacen referencia a:

1.- Cargo 1: *Extracción de salmuera por sobre lo autorizado*. Es debido a que se ha considerado 365 días de operación en vez de los 360 de la autorización y que se ha considerado la infiltración en pozas como recarga.

2.- Cargo 2: *Afectación progresiva del estado de vitalidad de algarrobos*. Hace referencia al área aluvial aledaña del pozo de Camar-2 del sector de Aguas de Quelana.

4.- Cargo 4: Evaluación del posible *efecto ambiental* en el Sistema de Peine por no contar con un Plan de Contingencia (PC) de similares características a los ya definidos.

Contenido del informe

El informe se inicia con un conjunto de consideraciones generales que tratan de reunir las bases conceptuales que soportan el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del área tributaria al Salar de Atacama y de los lugares periféricos. Con ello se apoyan las consideraciones relativas a los aspectos específicos planteados.

Se trata de un informe sintético, que no repite lo que ya ha sido desarrollado en los diferentes informes disponibles. En esos informes se llega al detalle de numerosos aspectos, en muchos casos más allá de lo que es habitual en estudios de conocimiento. Aquí no se entra en los aspectos generales del área ni en la elaboración de datos. Esto ya se encuentra en la información disponible. En el apartado final de referencias se relacionan las publicaciones e informes utilizados o consultados. Se añaden los datos y elaboraciones complementarios de soporte como anexos. El conocimiento se apoya en parte en lo apreciado regionalmente en dos visitas al área lateral oriental y altiplánica, realizadas anteriormente con ocasión de otros estudios fuera del salar y sin relación alguna con SQM, dentro de los acuerdos de colaboración en investigación aplicada que se mantienen entre la Universidad Católica del Norte de Antofagasta y la UPC.

2.- Modelo hidrogeológico conceptual general

El área del Salar de Atacama es una cuenca endorreica y cerrada subterráneamente (terminal), que se extiende entre los Andes al E y la Cordillera de Domeyko–Cordillera de la Sal al W. Es alargada de N a S, con una superficie vertiente total de unos 17.000 km², que es difícil concretar con precisión ya que hay numerosas cuencas endorreicas en el entorno altiplánico que no tienen definido su posible relación profunda subterránea con la depresión principal y no se conoce bien el papel final de las grandes efusiones ignimbríticas miocenas, las depresiones asociadas y el papel modificador de los sistemas de flujo de agua superficial y subterránea causadas por el volcanismo posterior. La Figura 2.1 muestra el límite de la cuenca del Salar de Atacama y el área más próxima y la Figura 2.2 la designación de ambientes de relevancia hidrogeológica. El salar propiamente dicho (núcleo) ocupa una superficie de unos 1650 km², con un entorno (áreas marginal y aluvial) de unos 2000 km² y un área de piedemonte y laderas de algo más de 9000 km², lo que suma cerca de 12.000 km². El conjunto es una fosa que se ha ido rellenando sucesivamente y que llega a contener hasta varios centenares de metros de sedimentos sin- y post-tectónicos que incluyen derrames volcánicos andinos, principalmente ignimbritas del intenso episodio volcánico mioceno regional, que afloran abundantemente en el área.

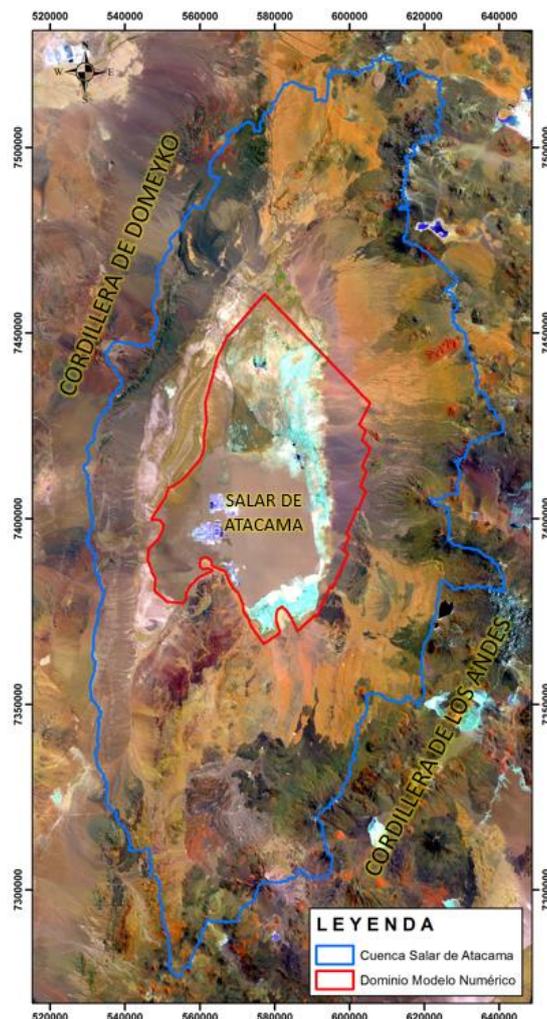


Figura 2.1.- Ubicación del Salar de Atacama y su entorno (SQM). Fuente: IDAEA-CSIC (2017).

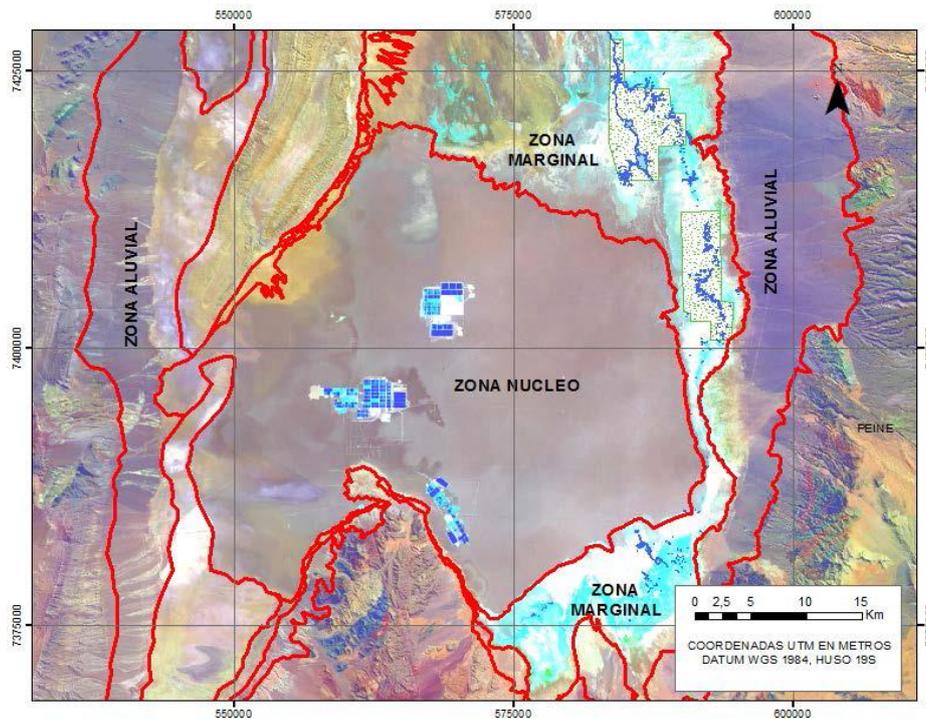


Figura 2.2.- Zonas que se consideran en el Salar de Atacama y su entorno (PSAH, 2016). Las áreas más al E de la zona aluvial son las de piedemonte y laderas andinas y a continuación están las áreas altiplánicas y sus cuencas endorreicas.

La parte más baja de la depresión es una gran cubeta de evaporación de las escorrentías superficiales y subterráneas de toda el área, en un clima árido a hiperárido. El resultado es la precipitación de sales, primero carbonatos, luego sulfatos y finalmente halita, en una secuencia variable vertical y horizontalmente. Actualmente se refleja como una vasta extensión de halita con caracteres eflorescentes, es decir por evaporación de salmuera subterránea por ascenso capilar. Es lo que se denomina núcleo. La salmuera residual que existe en profundidad, en depósitos de permeabilidad media a alta, está enriquecida en las especies cloruradas más solubles, entre ellas las de K y Li, que son el objeto principal de las actuales explotaciones mineras.

El Salar de Atacama propiamente dicho y las elevaciones al W son áreas hiperáridas, aunque pueden recibir lluvias esporádicas. La precipitación media crece hacia el E a medida que aumenta de altitud, desde pocos mm/año (10 a 15 mm/año en la zona baja y hasta 40 mm/año en el aluvial del lado Este) hasta alcanzar 200 mm/año y algo más en el Altiplano, en parte como nieve. Esta precipitación no es suficiente para generar escorrentía no ocasional en condiciones ordinarias en la ladera este, pero en las circunstancias propias del área, con depósitos volcánicos recientes no vegetados, casi sin suelo y con acumulación invernal de nieve, se pueden generar recursos de agua significativos, de hasta el 25% de la precipitación, en especial en determinadas áreas del Altiplano (Herrera et al., 2016).

En el Altiplano y elevaciones andinas abundan pequeñas cuencas endorreicas de origen tectónico–volcánico. Estas han ido modificándose a lo largo del tiempo, dejando pequeños salares locales en superficie o que han quedado enterrados (Herrera et al., 2016). Esto no impide que gran parte de la recarga fluya subterráneamente desde el elevado borde del Altiplano por las laderas, formaciones de piedemonte y aluviales hasta el borde del Salar de Atacama, donde afloran. Dadas las grandes diferencias altimétricas, este flujo es unidireccional desde las zonas altas a la depresión en que se sitúa el salar, de modo que no es ni puede ser afectado por las actuaciones en el Salar y su entorno. A la escorrentía

subterránea se suma la ocasional escorrentía superficial, que se extiende al pie de los abanicos aluviales de las quebradas. La parte de la misma que no se evapora se suma a la recarga.

El Salar de Atacama contiene una salmuera saturada en cloruro sódico de densidad aproximada 1,23 kg/L. Este cuerpo fluido denso se extiende lateralmente por el terreno más allá de los límites físicos del salar, hasta donde la permeabilidad se reduce notablemente. La existencia de este cuerpo fuerza a que la descarga de agua subterránea dulce y algo salobre procedente del lado E descargue a lo largo de la periferia, deslizando por encima del cuerpo de salmuera. Es un proceso igual al de las relaciones agua dulce–agua marina en los acuíferos costeros, pero con mayor contraste de salinidad y más tendido. El agua dulce y la salmuera son miscibles y en su contacto se forma una mezcla de agua que fluye junto con la de origen regional hacia los puntos de descarga y arrastra parte de la salmuera. Algunos de los sondeos existentes cortan el conjunto agua dulce–agua mezcla–salmuera. Los sedimentos en la zona de descarga tienen una permeabilidad de media a alta, lo que permite niveles freáticos con pequeña pendiente. Esto se traduce en una zona de mezcla con superficies de igual densidad moderadamente inclinadas hacia el exterior del salar, como muestra esquemáticamente la Figura 0.1. Esta disposición de notable extensión lateral favorece que el agua aportada se vaya salinizando, de modo que sus descargas en cauces y en lagunas es cada vez más salina, además del efecto de evaporación, hasta aproximarse a una salmuera. Esta mezcla se realiza en un medio muy heterogéneo, con depósitos estratificados de distinta naturaleza, desde los de arenas hasta los limoso-arcillosos y ricos en materia orgánica, además de los de precipitación química. Así, la posición de la zona de mezcla, que en los distintos informes se denomina impropriamente interfaz (más correctamente zona de interfaz), sea de disposición y espesor irregular en detalle, con indentados. La zona de mezcla es distinta para cada laguna, ya que cada una tiene sus peculiaridades sedimentológicas y distintas condiciones hidráulicas, aunque hay un denominador común. El agua menos salina puede tener un aumento progresivo de potencial con la profundidad que es más acusado que en medios homogéneos, con posibles situaciones de surgencia de las perforaciones profundas o a merced de discontinuidades tectónicas.

Las salmueras que se encuentran en el Salar de Atacama están enriquecidas en determinados iones cuyos cloruros y otras sales son más solubles que el cloruro sódico dominante. Tienen especial interés el K y el Li, que son objeto de explotación para luego recuperarlos de la salmuera. En 1984 se inició la extracción de salmuera en el núcleo por parte de la Sociedad Chilena del Litio. Posteriormente, en 1995, SQM comenzó su explotación. Actualmente las empresas SQM y Albermarle (anteriormente Rockwood, cuyo nombre se mantendrá en adelante cuando convenga y que se abrevia como RWD) extraen salmuera. Esta extracción de salmuera, como es de esperar, modifica el sistema hidrogeológico. En el caso del Salar de Atacama, las peculiaridades del sistema permiten diseñar estrategias, de modo que la explotación pueda hacerse con alteraciones asumibles y en especial sin afecciones sensibles al conjunto de las lagunas periféricas al salar propiamente dicho.

Para el seguimiento de los posibles efectos de las extracciones se ha instalado una red de monitoreo y se ha establecido un conjunto de reglas operativas para poder actuar apropiadamente ante posibles desviaciones. Esto supone estudios, monitoreo sistemático y revisión periódica de los resultados obtenidos. Todo ello se basa en un modelo conceptual de funcionamiento, que es el que se ha descrito abreviadamente en los párrafos anteriores y que ha sido comprobado y cuantificado con la modelación numérica realizada (IDAEA-CSIC, 2017).

Este modelo conceptual general se deriva de los numerosos y detallados trabajos hidrodinámicos e hidrogeoquímicos, que incluyen isotopía ambiental, y que se cuantifican en el modelo de flujo, actualmente en su cuarta versión (IDAEA-CSIC, 2017). Se trata de un modelo numérico de flujo tridimensional, de cuatro capas, con consideración del efecto de las variaciones de densidad en los potenciales hidráulicos. No es un modelo de interfaz. Tampoco es un modelo de transporte de masa. El transporte de masa se está abordando por el IDAEA-CSIC para SQM a nivel de simulación 2D (bidimensional) de secciones verticales. Es una alternativa práctica y eficaz a un modelo tridimensional de transporte, ya que el tratamiento regional puede exceder la capacidad de cálculo actual y no estar justificado por la información disponible, aunque esta es abundante y mayor que lo que es habitual. El tratamiento de dicha información ha permitido cartografiar en 3D (tridimensional) la zona de mezcla. El modelo parte de la distribución actual de salinidad y la mantiene. Esta hipótesis es aceptable para dar respuesta suficientemente aproximada a las cuestiones actuales durante un tiempo de varias décadas, que cubren el periodo de explotación y el de recuperación posterior.

El área modelada comprende todo el salar y el área marginal de descarga regional y aluvial, pero no incluye el piedemonte y las laderas, al no formar parte de su objetivo. El aporte lateral de agua subterránea forma parte de las condiciones de contorno. La calibración del modelo con las observaciones existentes es muy razonable, con diferencias pequeñas con lo observado. Los pequeños desajustes son menores de lo que es habitual en modelación numérica, no afectan al comportamiento general. En parte no son tales ya que las propias observaciones no siempre representan exactamente lo que se modela, dada la complejidad de la naturaleza. Por otro lado, a pesar de pequeños desajustes, el análisis de perturbaciones se puede hacer con gran precisión relativa. En áreas de periferia, las ecológicamente significativas, el margen de error es inferior a ± 0.5 m y frecuentemente menor que $\pm 0,2$ m. Esto no invalida las deducciones pero explica que se puedan tener algunas diferencias de detalle entre lo simulado y lo observado a causa de la gran heterogeneidad y no coincidencia conceptual entre lo simulado y lo medido, como sucede con frecuencia. Esta heterogeneidad no es reproducible a la escala de trabajo del modelo, además de la difícilmente evitable incertidumbre asociada a las observaciones en cuanto a su significación. El modelo es una herramienta satisfactoria para las interpretaciones regionales y de detalle moderado, así como para generar y ensayar escenarios futuros o escenarios hipotéticos. Para definir lo que sucede en detalle en situaciones particulares pueden requerirse estudios singularizados complementarios.

Como en todo modelo, lo realizado es una simplificación de la realidad, pero que recoge la mayor parte –la más significativa– de los rasgos. También, como sucede en cualquier estudio del medio natural, tiene incertidumbres. Parte de la incertidumbre se puede reducir con mayores estudios en el espacio y en el tiempo y con mayor detalle, pero con un incremento posiblemente desproporcionado del coste para lograr sólo una mejora moderada, además de diferir la toma de decisiones más allá de lo razonable y de no resolver la incertidumbre intrínseca del conocimiento de los procesos naturales, que en este caso es significativa.

Una fuente de incertidumbre del modelo es debida a la dificultad para determinar la parte de la precipitación sobre el área de salar que se convierte en recarga y la relación entre evaporación difusiva del nivel freático por el medio no saturado. Sin embargo, el modelo permite un ajuste razonable a las observaciones. Por otro lado, las aportaciones laterales, que son cuantitativamente importantes y significativas, son una condición de contorno. La evaluación de esas aportaciones laterales es difícil e incluye algunas incertidumbres, en

especial en la cuantificación de la recarga. No obstante, esa incertidumbre no invalida las deducciones ya que los factores de estrés sobre el sistema quedan notablemente por debajo los valores de las magnitudes naturales.

3.- Aspectos hidrogeológicos específicos

Balances hídricos

El balance hídrico general medio en estado natural es el que se muestra en la Figura 3.1, que sigue el esquema propuesto en el cuarto informe de actualización del modelo numérico para SQM del Salar de Atacama (IDAEA-CSIC, 2017) . Corresponde al balance en estado estacionario inicial, natural, según la mejor simulación lograda. A los efectos de las evaluaciones que cabe realizar, puede considerarse que este balance regional es suficientemente detallado y contrastado a efectos de valoraciones generales y toma de decisiones.

Las aportaciones laterales y de las cuencas alto-andinas son una condición de contorno, calibrada con los datos disponibles. Para una longitud de contorno activo de 85 km (respectivamente de 24, 34 y 27 km al NE, E y S), el aporte de 12994 L/s supone alrededor de 170 L/s/km. Teniendo en cuenta la forma del área de aportación, esto equivale a unos 10 a 20 mm/año de recarga en el lado E. Este alto valor para una zona árida es razonable a la luz de la experiencia existente en situaciones parecidas altiplánicas entre Atacama y Tacna debido a la existencia de materiales volcánicos muy recientes en superficie, la formación de nieve y la escasez de vegetación, como ya se ha comentado.

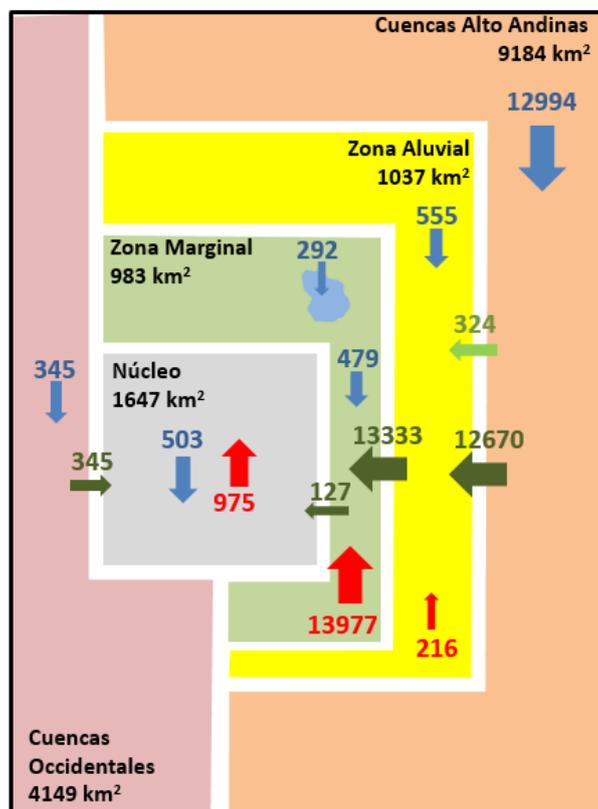


Figura 3.1.- Balance de agua medio por zonas del área del modelo numérico estacionario, natural, del área realizado por IDAEA-CSIC (2017) para SQM. Valores en L/s.

La gran parte de las aportaciones laterales de agua subterránea y la ocasional de agua superficial descargan a lo largo del área periférica lagunar, donde la mayor parte se evapora y el resto rebosa hacia el Salar, donde se evapora y en parte se infiltra. Eso permite mantener un nivel freático alto, cuya evaporación deposita sales, en parte como eflorescencias.

Las extracciones de salmueras en el núcleo del salar para aprovechamientos minerales, actualmente 1500 L/s netos, por parte de SQM y 442 L/s por parte de Albermarle, producen un descenso piezométrico que se traduce en un descenso freático. El descenso freático hace que la evaporación difusiva a través del medio no saturado vaya disminuyendo hasta prácticamente anularse cuando el descenso es igual o superior a un valor crítico. Este decrecimiento de la evaporación por descenso de los niveles freáticos en el núcleo compensa buena parte de la extracción neta de salmuera (extracción menos retornos). El resto se compensa con el descenso de la evaporación en el área marginal, que en el estado estacionario final es menos del 10 % de la que se produce actualmente (véase la Figura 3.1).

El estado modificado incluye también la extracción de agua dulce (agua industrial) por parte de SQM y terceros en la periferia NE, E y S para el proceso de aprovechamiento mineral. Por parte de SQM se trata de un total de 240 L/s mediante 5 pozos a una distancia entre 3 y 6 km del área de descarga regional. La extracción comenzó a finales de la década de 1990 y se completó al máximo caudal autorizado a finales del 2008. La evolución temporal de estas extracciones de agua industrial de SQM se representa en la Figura 3.2.

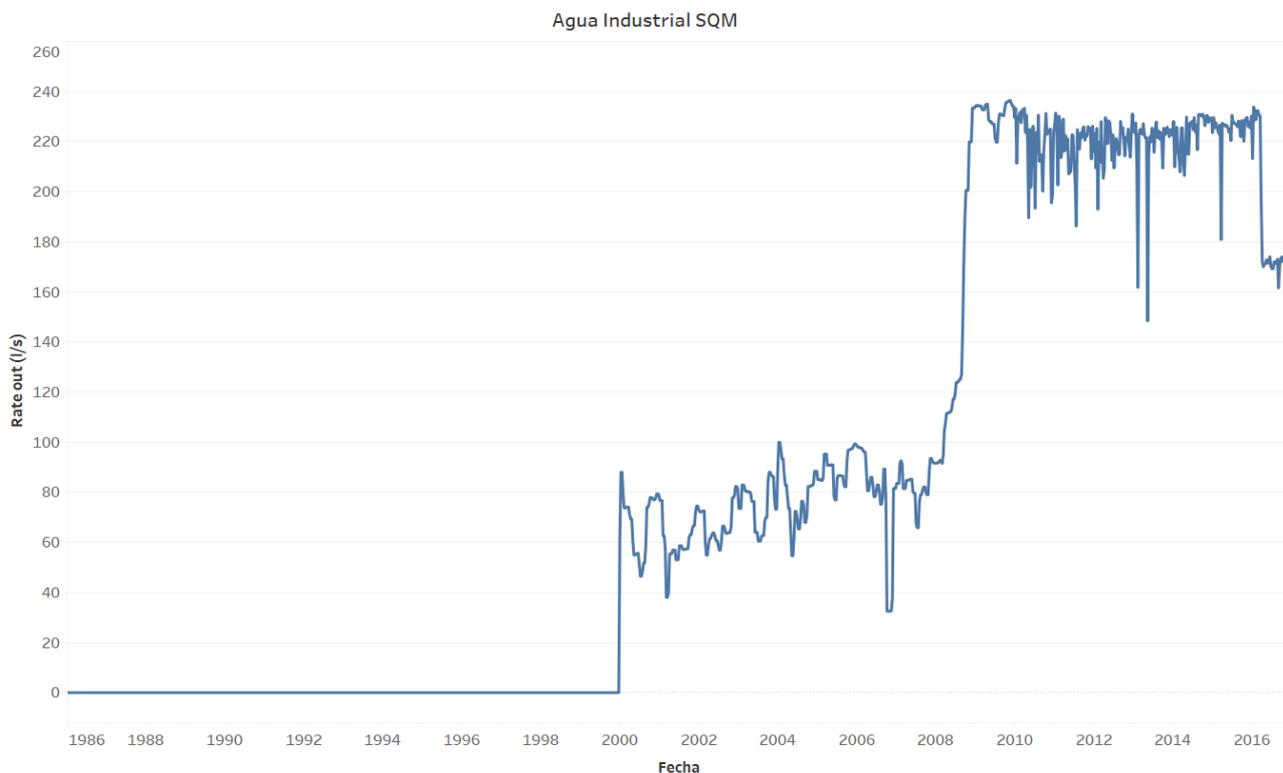


Figura 3.2 Serie de extracción de agua industrial de SQM considerada en el modelo de la 4ª Actualización, con los datos hasta diciembre de 2016. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Fecha: agosto 2017

Esta extracción va acompañada del correspondiente descenso piezométrico. Tras el tiempo de reajuste hidrodinámico, en el que los niveles de agua evolucionen tendiendo a un valor final si la excitación se mantiene constante, el caudal de descarga periférica quedará disminuido en el caudal extraído menos la reducción de evaporación que se pueda producir en áreas de nivel freático somero. El tiempo de reajuste τ se puede estimar en primera aproximación como $\tau \approx 0,25 \cdot L^2 S / T$ (Custodio y Llamas, 1976, Sección 9, Apartado 17.3), para el caso de los aportes de agua subterránea de las laderas con niveles freáticos profundos y sin que se produzcan descargas laterales durante el tránsito. L = tamaño representativo de la cuenca de descarga; T = transmisividad hidráulica del acuífero y S = coeficiente de almacenamiento, que a largo plazo y para un acuífero libre es la porosidad llenable / drenable (eficaz). Esta es la condición dominante en el área de Aguas de Quelana. A partir de $L = 10$ a 15 km, $m = 0,03$ a $0,1$ y T de la parte saturada de la ladera y piedemonte = 200 a 500 m²/d según los descensos de bombeo y las conductividades hidráulicas recogidas en el modelo numérico, los valores resultantes pueden variar entre 100 y 400 años. La variable que más influye es el tamaño. A falta de estudios específicos sobre el tiempo de renovación (tránsito) del agua subterránea, cabe observar que el rango de valores anterior parece correcto para el Sistema de Aguas de Quelana ya que el nivel freático es profundo, más que el encajamiento de la red de quebradas, y no hay manantiales intermedios significativos. Los valores indicados son coherentes con la tasa de descenso de los niveles piezométricos observados, como se comenta más adelante, a partir de una evolución exponencial negativa. Como consecuencia, los efectos dinámicos durante el periodo de explotación suponen que la mayoría del agua industrial que se está actualmente extrayendo procede del almacenamiento en el acuífero, sin afectar actualmente a las descargas periféricas en más del 20% de esa extracción. En el periodo de cese de la operación, en 2031, la detracción posiblemente no superaría el 50% del caudal de agua extraída, afectando en menos del 1% al aporte de agua lateral a la periferia del salar. La recuperación posterior será un proceso inverso de características similares, extendido a lo largo de varias décadas y nueva estabilización a finales del presente siglo. Los tiempos de respuesta anteriormente considerados encajan razonablemente bien con la interpretación hidrodinámica de los datos de ¹⁴C en áreas similares del Norte de Chile.

Las lagunas periféricas

Las lagunas periféricas al Salar de Atacama están por un lado mantenidas por la descarga de los aportes subterráneos laterales del lado E y por la escorrentía superficial ocasional que pueda producirse, mientras que sus salidas son la evaporación y desbordes ocasionales. Estas áreas lagunares son las del Sistema Soncor en el NE, las del área alargada de Aguas de Quelana al E y las de Peine y de Vegas de Tilopozo, al SE (Figura 3.3). Según lo expuesto al final del apartado anterior, las explotaciones de agua industrial están lo suficientemente alejadas de las lagunas como para no afectarles directamente. Las distancias a la línea de descarga varían entre 6 km frente al sistema de Soncor y 3 km en la parte de Aguas de Quelana. La longitud lateral de afección sensible es posiblemente menor que 5 km, a falta de un cálculo más preciso hidrodinámico que lo acote. Se ha estimado como $Q / (i \cdot T)$ en la que Q es el caudal de extracción, i el gradiente piezométrico y T la transmisividad hidráulica. Según lo anteriormente comentado, el caudal extraído procede preferentemente del almacenamiento en el sistema. No obstante lo anterior, aunque todo el caudal extraído se detrajese de las descargas, en cada caso éste es menor que el 10% de la descarga por km de longitud de frente de descarga.

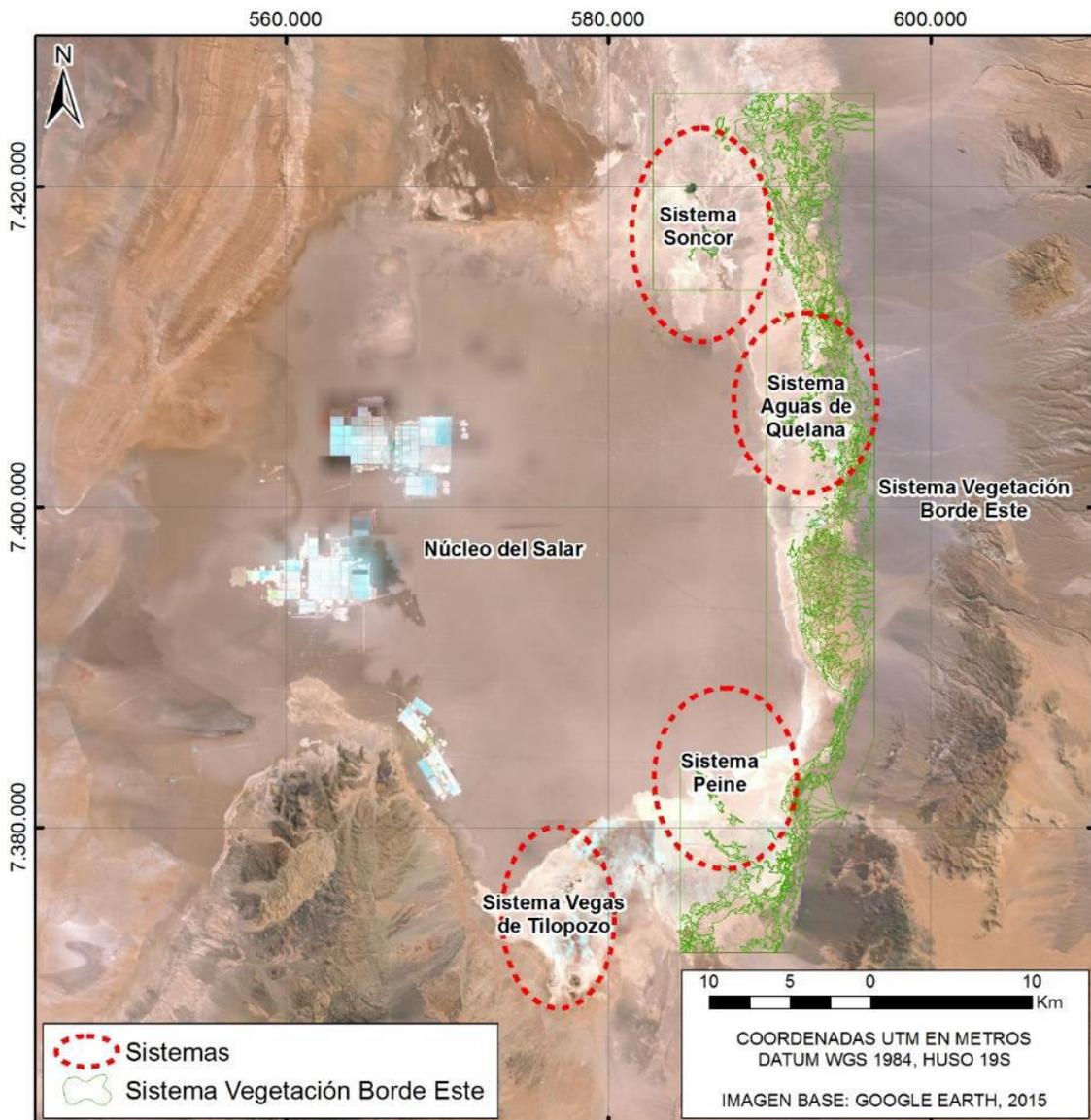


Figura 3.3.- Sistemas de descarga periférica que mantienen las diferentes lagunas (PSAH; 2016).

La descarga de agua subterránea a lo largo del borde se hace por encima del cuerpo de salmuera antes mencionado. En este proceso se produce una mezcla entre el agua dulce y la salmuera, de modo que lo que se descarga en la realidad es agua aportada del lado E más salmuera diluida, en cantidad variable según las circunstancias. Esta descarga es de salinidad variable según los lugares y cambiante en el tiempo. Entraña complejos procesos químicos asociados de disolución y precipitación de sales. Uno de los procesos es el que parece mantener un umbral físico de rebose de las lagunas, al menos en algunas de ellas (como en Barros Negros y Salada), por formación de una barrera de precipitación de minerales. Es un proceso no conocido en detalle. Estos permiten que el nivel de agua y la superficie lagunares sean poco variables en el tiempo. El caudal que rebasa el umbral físico en parte se evapora y el resto se infiltra y repone el consumo de salmuera local por la dinámica de la zona de mezcla. Con la explotación de aguas subterráneas del lado E a largo plazo disminuiría la descarga en las lagunas, pero sin anular el rebose, con lo que se mantiene la superficie y la elevación del nivel del agua libre. Sin embargo, la consideración de los efectos hidrodinámicos, como se ha expuesto, permite suponer que esa disminución en el lado E (Aguas de Quelana) es actualmente menor del 20% del caudal de extracción y quedaría por debajo del 50% al final del periodo de explotación.

Los posibles cambios en la dinámica lagunar cabe centrarlos en la existencia de umbrales físicos, que son un rasgo esencial de su funcionamiento y conservación, cuyo detalle y vulnerabilidad no es del todo conocida, aunque los esquemas de funcionamiento en varios de los estudios realizados y reunidos en el informe para SQM por IDAEA-CSIC (2017) aportan una aproximación razonable. Las posibles modificaciones futuras se podrían traducir en cambios en los umbrales de rebose, cuya dinámica evolutiva natural puede haber dejado señales identificables. El principal factor de modificación estaría asociado a las variaciones climáticas de largo periodo.

La precipitación (lluvia) histórica en el área del salar se registra en las estaciones existentes en la estación Chaxa ubicada a un costado del centro turístico, en el lado Norte y en el núcleo del salar en la estación KCL (Figura 3.4).

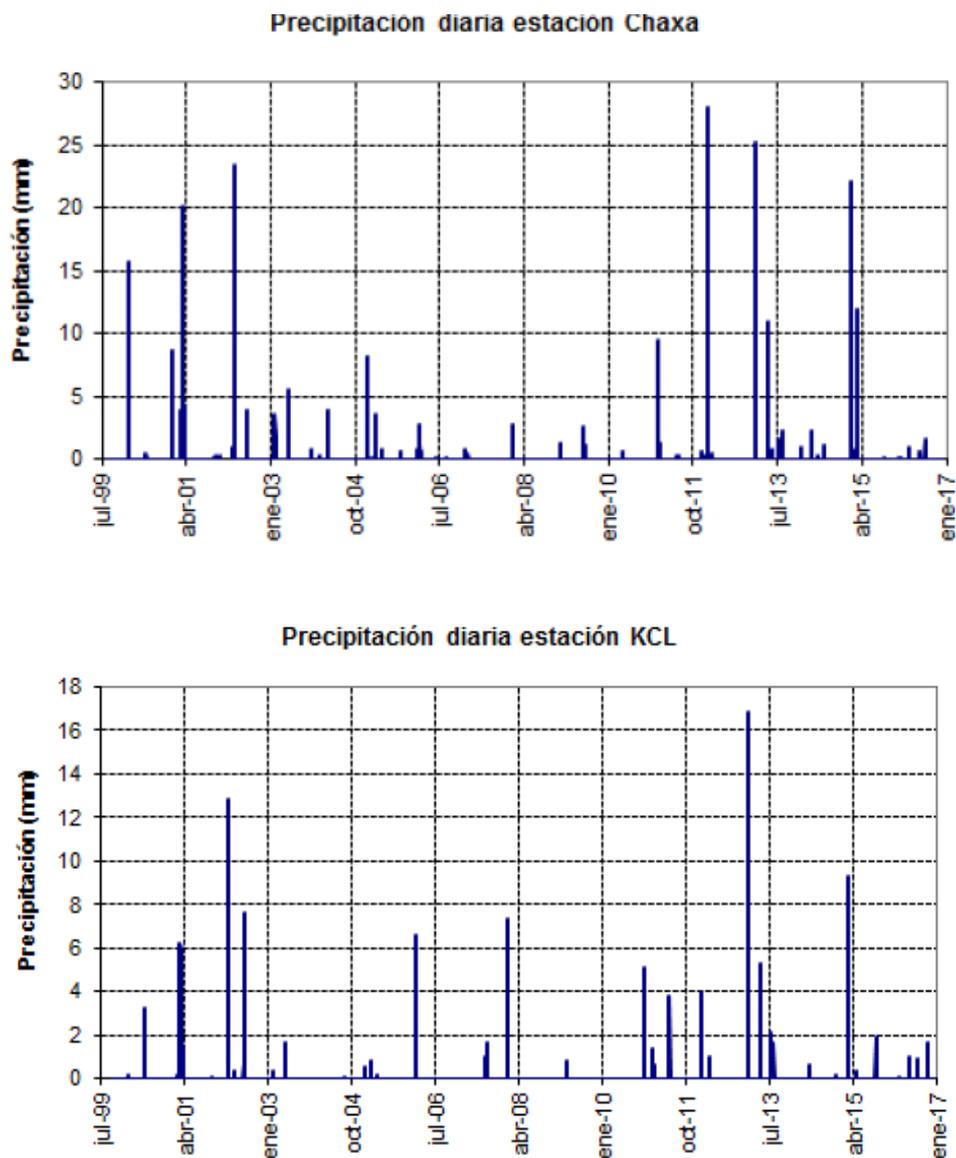


Figura 3.4. Precipitación diaria en la estación próxima a la laguna de Chaxa, en el lado Norte y en la estación en el núcleo del salar (KCL)

En el Anexo A.4 se analizan las pluviometrías de cinco estaciones ubicadas en el salar y próximas al mismo. Tomando como referencia a la estación de Camar, se tienen las

siguientes relaciones de las acumulaciones de la pluviometría del mismo periodo: El Tatio/Camar = 4,08; Socaire/Camar = 1,23; Chaxa/Camar = 0,52; y KCI/Camar = 0,16.

En la Figura 3.5 se representan las desviaciones acumuladas de la pluviometría respecto a la media de las series de datos de 5 estaciones pluviométricas. Aparece un ciclo de aproximadamente 15 años, en el supuesto que 2017 esté ya próximo a completar un ciclo. Para Socaire se insinúa un periodo superpuesto de 23 años. Las series son cortas para establecer bien la posible periodicidad.

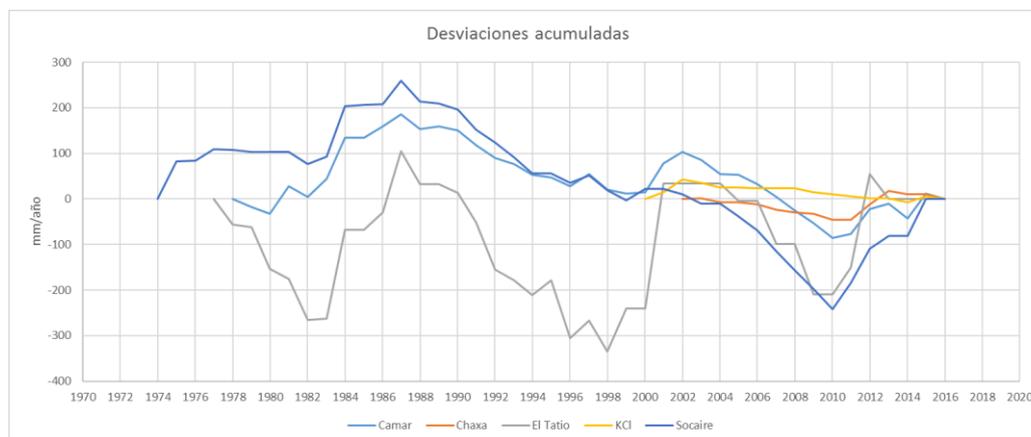


Figura 3.5 Desviaciones acumuladas de la pluviometría respecto a la media de la serie para 5 estaciones pluviométricas. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Fecha: agosto 2017

Se distinguen bien periodos secos (desacumulación) y periodos húmedos (acumulación), con ausencia de periodos medios (sin clara acumulación o desacumulación).

Periodos húmedos: 1982-1987; 1998-2002; 2010-2017

Periodos secos: 1987-1998; 2002-2010

El periodo en que se inició la extracción de salmuera en el Salar de Atacama fue húmedo, el de la extracción de agua industrial a caudal máximo ha sido también húmedo. La posible repercusión en el agua subterránea de los acuíferos laterales no puede establecerse a priori sin modelación ya que la respuesta a los periodos se amortigua y retrasa y en parte responde a la precipitación y nieve en altura más que la precipitación en áreas bajas.

Evoluciones piezométricas en la ladera oriental que limita con el Salar de Atacama.

Para entender ciertos detalles importantes del funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos que aportan agua al Salar de Atacama hay que considerar las razones que explican las fluctuaciones y tendencias que se reflejan en los hidrogramas de niveles piezométricos en la serie continua de observaciones que cubre desde 2008 a la actualidad y de los puntos de observación con datos desde 1999. Las situaciones son muy variadas y requieren una cuidadosa sistemática de estudio, que hasta el momento no se ha llevado a cabo. Aquí sólo se aportan algunos comentarios generales basados en los hidrogramas del PSAH (2016). Estos comentarios son preliminares y puede que tengan que ser matizados tras un análisis más profundo. A efectos de simplificar los comentarios,

se consideran los niveles piezométricos y freáticos (h) referidos al nivel medio de la salmuera del Salar de Atacama, tomada como 2300,00 m.

En las áreas de nivel freático bajo, menor que $h = 2$ m, se aprecia en general un claro efecto de variación cíclica anual del nivel, con los mínimos en febrero-marzo y los máximos más suaves en agosto-octubre. Se interpreta como un efecto estacional a causa de la variación anual de la evaporación-evapotranspiración. Los puntos donde se observa claramente, con oscilaciones entre 0,05 y 0,4 m, raramente hasta 0,5 m, corresponden a sondeos cortos con nivel del agua entre 0,0 y 2 m, pero que se llega a extender hasta niveles de 10 m o algo más, como se presenta más adelante. Aquí no se muestran las oscilaciones que corresponden a puntos con h menor que 2 m. Esta misma oscilación periódica aparece en las simulaciones representadas en la Figura 4.6 de la sección 4. A la causa estacional por evaporación se puede adicionar la estacionalidad de las extracciones de salmuera en el núcleo del salar, de similares características, aunque en esas áreas es de un orden de magnitud inferior. En la parte N del área, hacia San Pedro de Atacama, estas oscilaciones se ven también en puntos de observación con nivel freático considerablemente más alto a causa de la notable extensión hacia el interior que tiene allí la zona marginal.

Para una porosidad volumétrica drenable / llenable del orden de 0,03 a 0,1, estas oscilaciones estacionales suponen una evaporación (evapotranspiración si hay un cierto desarrollo vegetal) de hasta 50 mm/año, mucho menor que el valor potencial de la evapotranspiración. Esto tiende a indicar el dominio de la evaporación por difusión desde el nivel freático a través del medio no saturado. En las proximidades de los cuerpos de agua libre y en el núcleo del salar, estas oscilaciones estacionales se producen algo adelantadas respecto a las de los puntos de agua subterránea marginales, posiblemente por una menor inercia térmica.

También los hidrogramas muestran el efecto de las ocasionales precipitaciones sobre el área. Los efectos son más acusados en las partes de menor altitud y se reflejan también los cambios de niveles de la salmuera. Los ascensos son rápidos y los descensos más lentos, con una tendencia evolutiva exponencial negativa. Los ascensos no superan normalmente 0,2 m, lo que se puede interpretar como una recarga de agua en un evento lluvioso intenso no superior a 10 a 20 mm. Estas estimaciones pueden compararse con los datos diarios de precipitación de que se dispone ya que se tiene un registro continuo de niveles. La rápida respuesta a los eventos de precipitación allí donde la profundidad del nivel freático es somera, de menos de 1 m hasta quizás unos pocos m, hace posible calcular la recarga que produce cada evento lluvioso.

La razón de que el efecto estacional llegue hasta puntos de monitoreo con h (altura sobre el nivel de referencia del salar) de hasta 20 m o más y hasta más de 1 km del área marginal es el resultado de las oscilaciones piezométricas en el frente de descarga a lo largo de la periferia del salar. Esto se muestra en las figuras 3.6 y 3.7.

La oscilación piezométrica en un punto del acuífero de gran extensión (semiinfinito) por un efecto periódico viene dada por (Custodio y Llamas, 1976, Sec. 8):

$$h = h_0 \cdot \exp \left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}} \right)$$

En la que:

h_0 = oscilación en el borde a $x = 0$

h = oscilación a distancia x

T = transmisividad hidráulica

S = coeficiente de almacenamiento

t_0 = periodo de la oscilación

Se hace con un retraso $t_R^2 = x^2 \cdot S / (4 \pi T)$

Para $h = h_0/2$ a $x = 500$ m y $t_0 = 365$ días resulta aproximadamente que $T/S = 5000$ $m^2/día$, en el rango de los valores que son característicos del área. Para hacer la estimación a partir del retraso se requeriría un estudio más afinado.

En un caso y posiblemente en otro, no representados, la oscilación es semestral. Podría resultar del efecto combinado de las oscilaciones anuales producidas en dos lugares distintos, con respuestas diferidas de dos a tres meses. El que no se aprecien en otros lugares podría ser debido a tiempos de retraso menores, de modo que la suma se refleja en un pico más romo o se trata de efectos de amplitud bastante distinta.

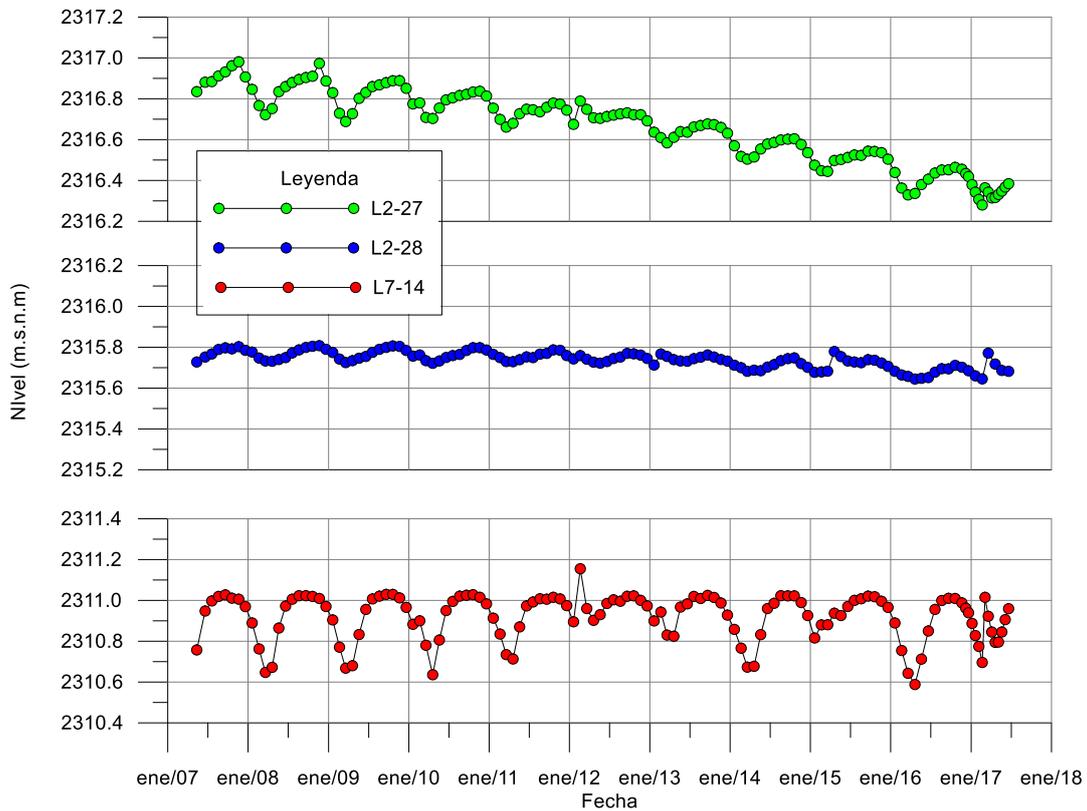


Figura 3.6.- Hidrogramas de los puntos indicados en el entorno del pozo Mullay-2.

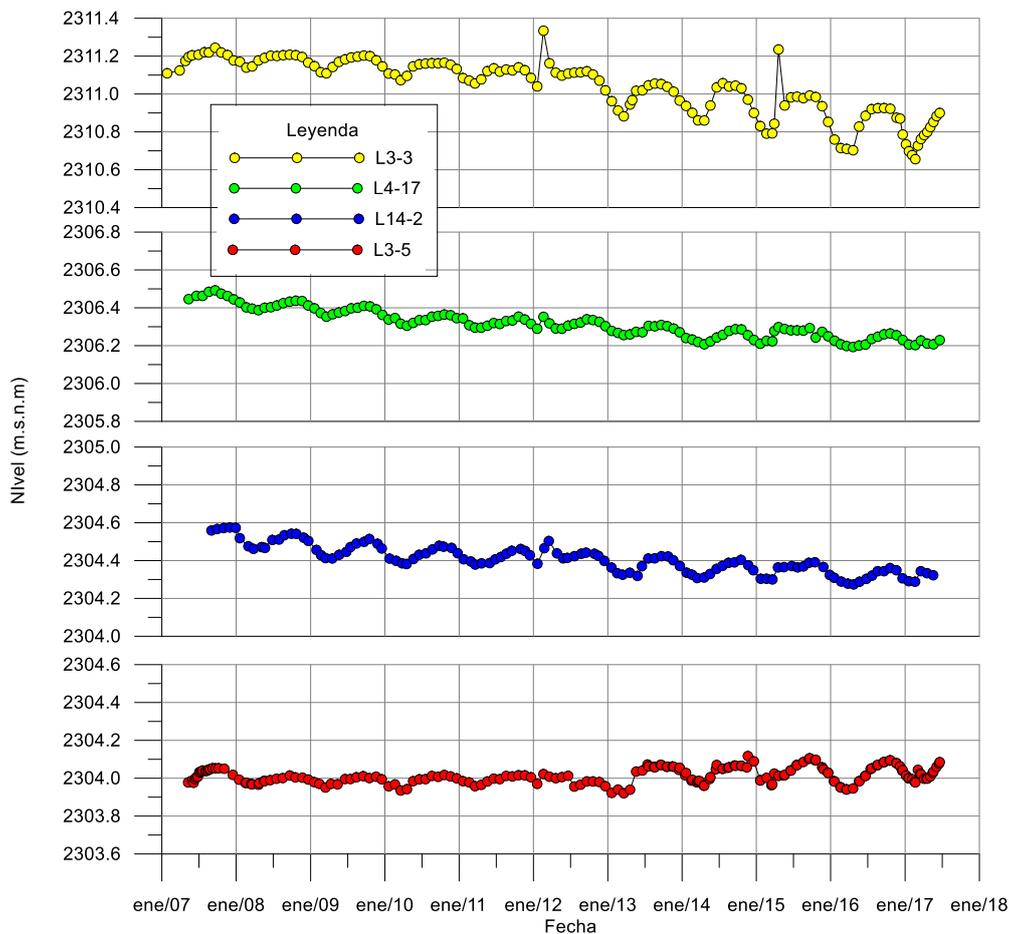


Figura 3.7.- Hidrogramas de los puntos indicados en el entorno del pozo Camar-2

En sondeos de nivel piezométrico alto, por encima de 25 m, ya no se aprecia el efecto oscilatorio anual y las evoluciones son regulares, aunque con fluctuaciones milimétricas que pueden responder a diversas causas, entre ellas las de la presión atmosférica. No se aprecia respuesta a corto plazo a la precipitación, lo que es de esperar dado el espesor no saturado entre 10 y 50 m. La respuesta está amortiguada y puede ser imperceptible.

Los pozos Mullay-2, Allana y Camar-2 se pusieron en funcionamiento entre finales de 2007 y principios de 2008, al tiempo que se alcanzó el caudal autorizado en los pozos Socaire y P-2. El pozo Socaire venía ya funcionando desde 1998 y el P-2 desde 1997. El pozo Camar-2 tuvo una parada temporal en 2015 para estudiar su comportamiento local.

En los sondeos de nivel piezométrico alto se aprecia claramente el efecto de los pozos de extracción de agua industrial, con un descenso sostenido de entre 0,01 a 0,04 m/año, decreciente al alejarse de los pozos de extracción, de modo que en los más alejados el efecto puede llegar a ser inapreciable. No hay datos de la evolución del nivel piezométrico en el entorno de los pozos de extracción previos a 1997 salvo un corto periodo en el entorno del pozo Mullay-2. Los tiempos de observación son cortos para obtener conclusiones robustas, aunque son las esperables de un sistema acuífero variable lateralmente y con recarga media también cambiante a la escala de décadas.

En las Figuras 3.8 a 3.12 se muestra un conjunto de hidrogramas, ordenados desde la parte N de Mullay hasta Socaire. Algunas de las peculiaridades de interés, además del efecto de las extracciones de agua industrial, son:

- a) Ciertos descensos ocasionales pueden ser el resultado de ensayos hidráulicos esporádicos en el sondeo de medición
- b) En la parte más al N los niveles son estables desde 1999 hasta 2008, aunque parece que anteriormente hubo un periodo de descenso natural, posiblemente debido a una menor recarga en el periodo precedente. El periodo de niveles estables se observa igualmente en el área de Mullay y Allana. No se aprecia en Camar por iniciarse las series de mediciones en 2007.
- c) En el área de Socaire los niveles son descendentes desde 1999 y corresponden al inicio de las extracciones en 1998.
- d) El ascenso en 2016 que se observa en el punto L3-16 es debido al paro temporal en la extracción en el pozo Camar-2, que sólo se insinúa en el punto L3-15.

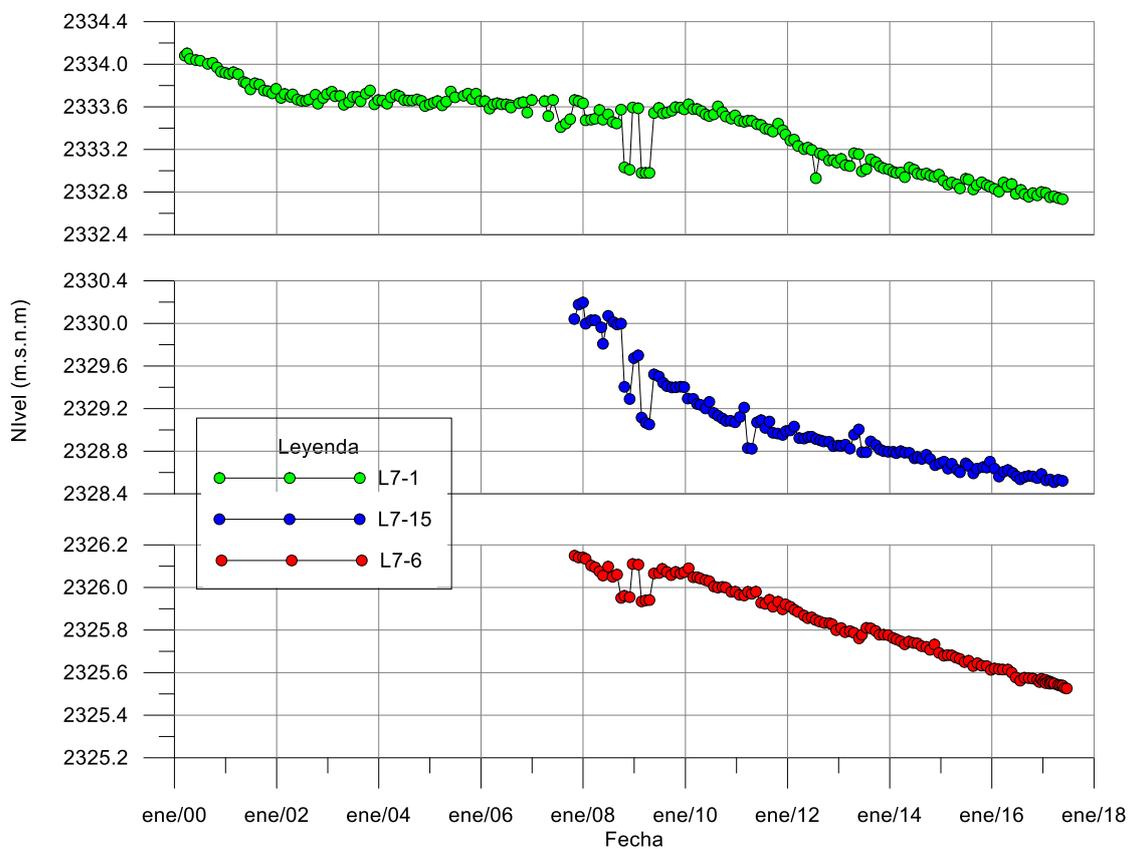


Figura 3.8.- Hidrogramas de los puntos indicados en el entorno alejado del pozo Mullay-2

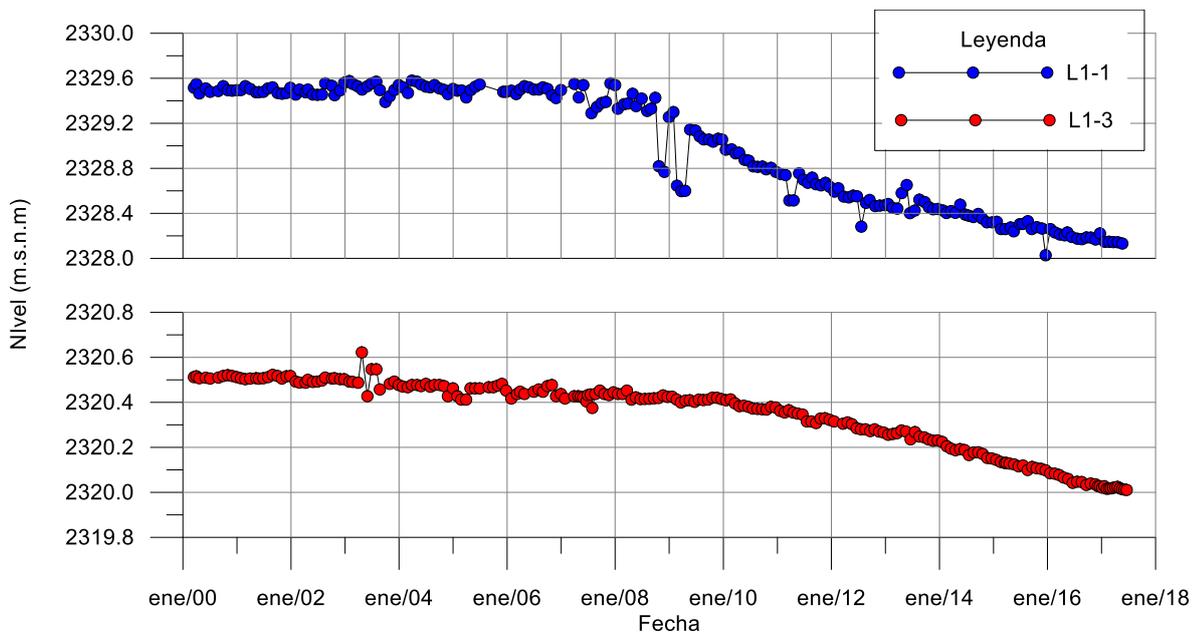


Figura 3.9.- Hidrogramas de los puntos indicados en el entorno próximo al pozo Mullay-2

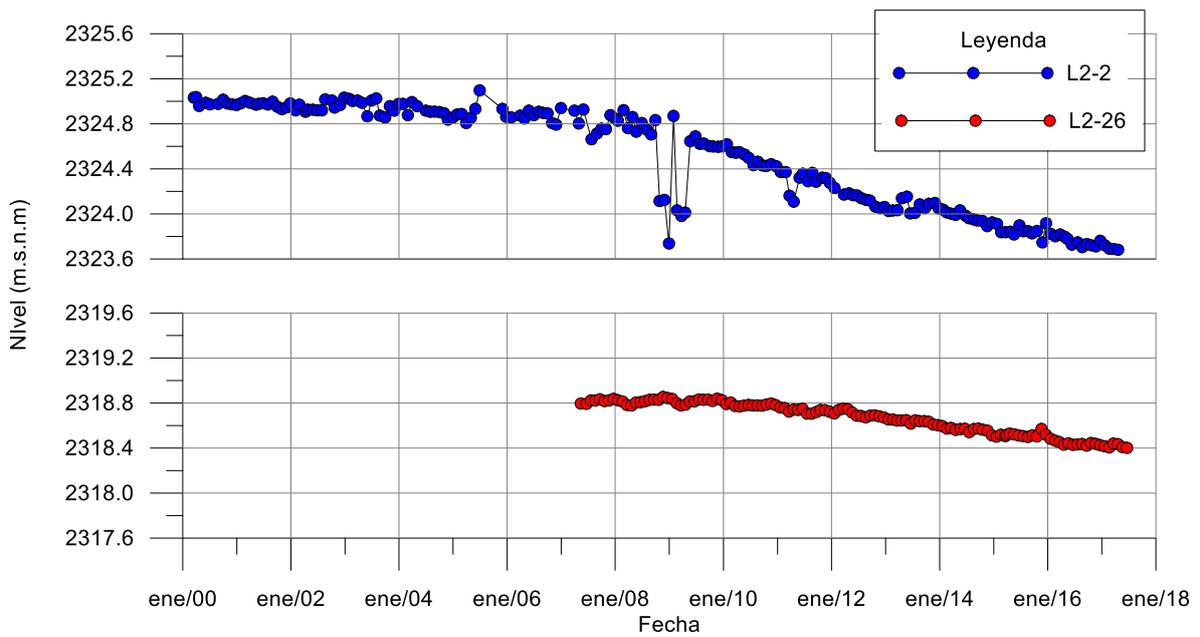


Figura 3.10.- Hidrogramas de los puntos indicados en el entorno del pozo Allana

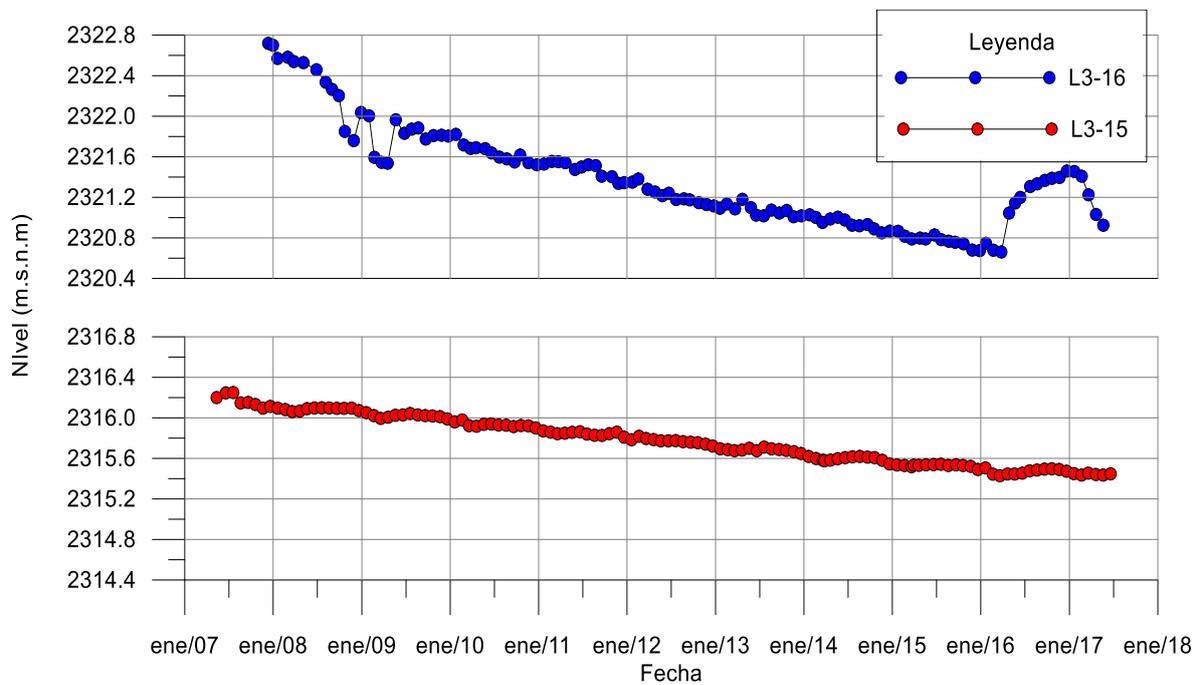


Figura 3.11.- Hidrogramas de los puntos indicados.

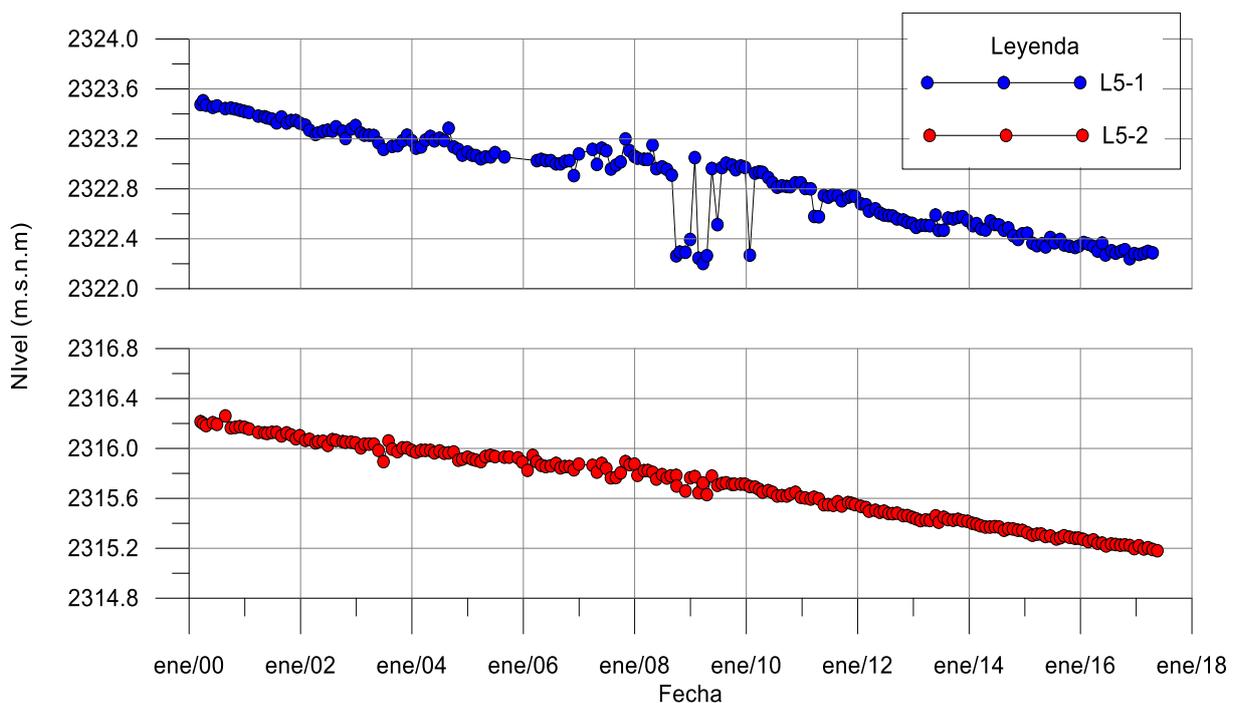


Figura 3.12.- Hidrogramas de los puntos indicados en el entorno de Socaire

SQM ha realizado un análisis de la influencia de las extracciones de agua industrial, utilizando el modelo de simulación de IDAEA-CSIC (2017). El objetivo es cuantificar dicha influencia por comparación con diferentes escenarios. En el Anexo 1 se dan las diferentes simulaciones.

La diferencia con la situación natural previa a esas extracciones con la actual permite determinar ese efecto (Figura 3.13). El descenso máximo en el entorno de los pozos está entre 0,5 y 1,0 m y decrece hasta hacerse imperceptible (menor a 1 mm) al alejarse más de 1 km, como sucede en el área de Peine, donde no se aprecian efectos atribuibles a la extracción de agua desde el campo de pozos de SQM.

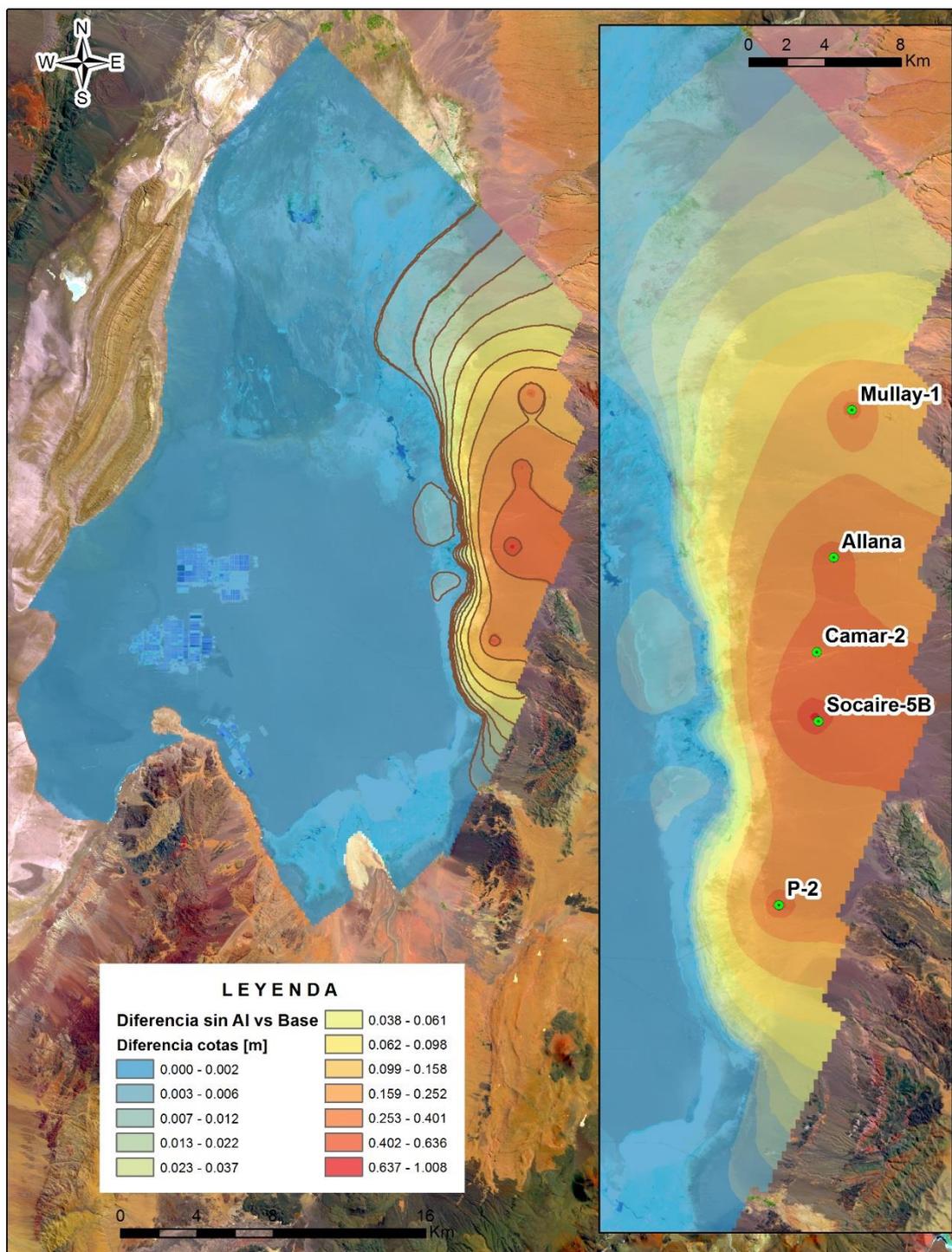


Figura 3.13. Diferencia entre el estado actual y el estado natural sin extracciones de agua industrial para el caso en que no se cambie la extracción y reinyección de salmuera en el núcleo del salar. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar: agosto 2017

4.- Efecto de cambios en la extracción de salmuera

Los efectos de pequeños cambios en la explotación de la salmuera respecto a una situación de base, se pueden evaluar fácilmente y con seguridad dado el comportamiento lineal del sistema, ya que se está en una posición lejana de donde se produzcan

modificaciones substanciales de las condiciones de contorno. Además se pueden analizar directamente con el modelo de simulación que IDAEA-CSIC (2017) ha realizado para SQM. El Cargo 1 referido en la motivación de este informe hace referencia al efecto de una modificación de los caudales de extracción, como se expone más abajo.

Información de soporte

Para la evaluación de lo que se dice en el Cargo 1 en cuanto a un exceso de extracción de salmuera, tras una reunión de comentario, SQM ha realizado dos simulaciones utilizando la cuarta actualización del modelo hidrogeológico de simulación ambiental elaborado por el IDAEA-CSIC (2017) para SQM. En dichas simulaciones se cuantifica la magnitud de los cambios producidos por la extracción de salmuera adicional realizada en el periodo 2013-2015 y el efecto que tendría una devolución de dicha extracción de salmuera adicional en el periodo 2017-2020. El valor incremental del caudal es aproximadamente del 3,9%. Los escenarios definidos para esta cuantificación son los siguientes:

CASO BASE: Resultados de la Cuarta Actualización del Modelo Ambiental del Salar de Atacama con la información de las extracciones realizadas y proyectadas: 47.139.102 m³ en 2013-2014 y 46.991.274 m³ en 2014-2015 y futuras de 47.304.000 m³ en 2017-2018, 47.328.192 m³ en 2018-2019 y 50.580.288 m³ en 2019-2020

CASO I: Se parte de los datos del Caso Base descontando la extracción de salmuera adicional durante el período 2013-2015: 45.166.631 m³ (que incluye un descuento de 1.972.471 m³) en 2013-2014 y 45.190.426 m³ (que incluye un descuento de 1.800.848 m³) en 2014-2015

CASO II: Se parte de los datos del Caso Base pero se devuelve posteriormente la extracción de salmuera adicional; durante el período 2017-2020 se disminuye la extracción de salmuera neta en una cantidad igual al exceso: 46.046.227 m³ (que incluye un descuento de 1.257.773 m³) en 2017-2018, 46.070.419 m³ (que incluye un descuento de 1.257.773 m³) en 2018-2019 y 49.322.515 m³ (que incluye un descuento de 1.257.773 m³) en 2019-2020.

Para el resto del período de simulación se mantiene la extracción histórica de salmuera y la proyección esperada según la regla operacional aprobada (Figura 4.1). En la Figura 4.2 se muestra el detalle de la extracción realizada y en la Figura 4.3 la reinyección

Para cuantificar las diferencias se han obtenido los descensos para el último día de la simulación (13/08/2031) para el Caso I y Caso II y se ha comparado con el descenso producido en el Caso Base para la misma fecha (Figuras 4.4 y 4.5).

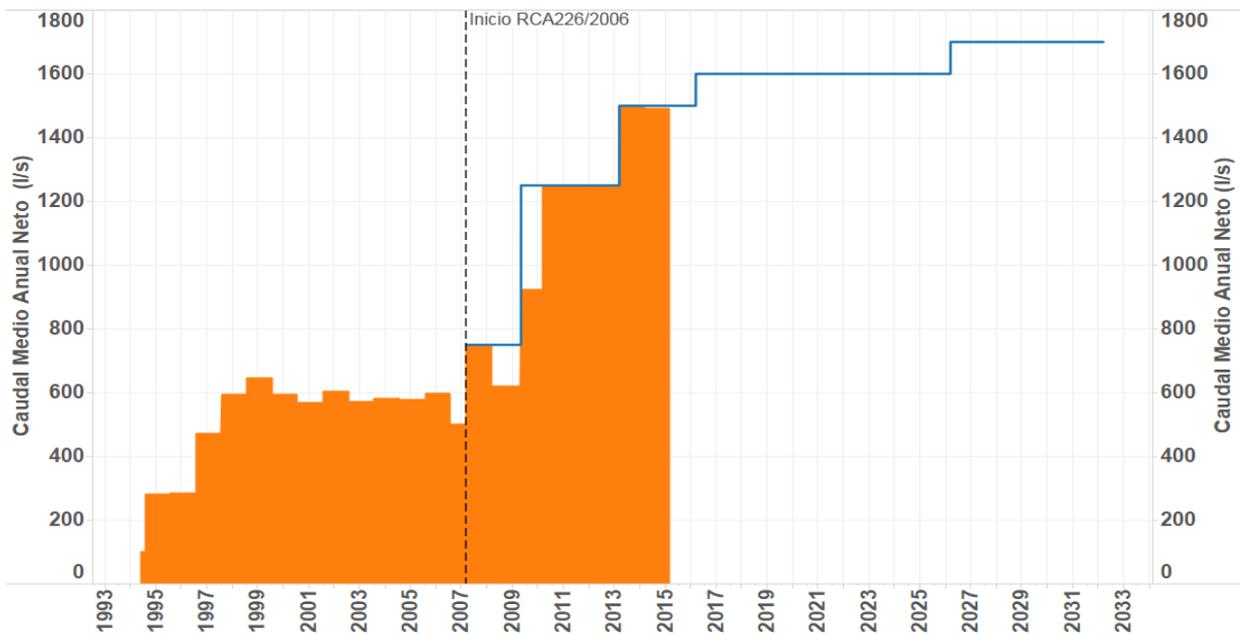


Figura 4.1.- Evolución temporal de la extracción neta anual de salmuera para el periodo histórico (naranja) y para la proyección hasta el año 2031 (azul). Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Versión: 1.0 Fecha: 24/05/2017

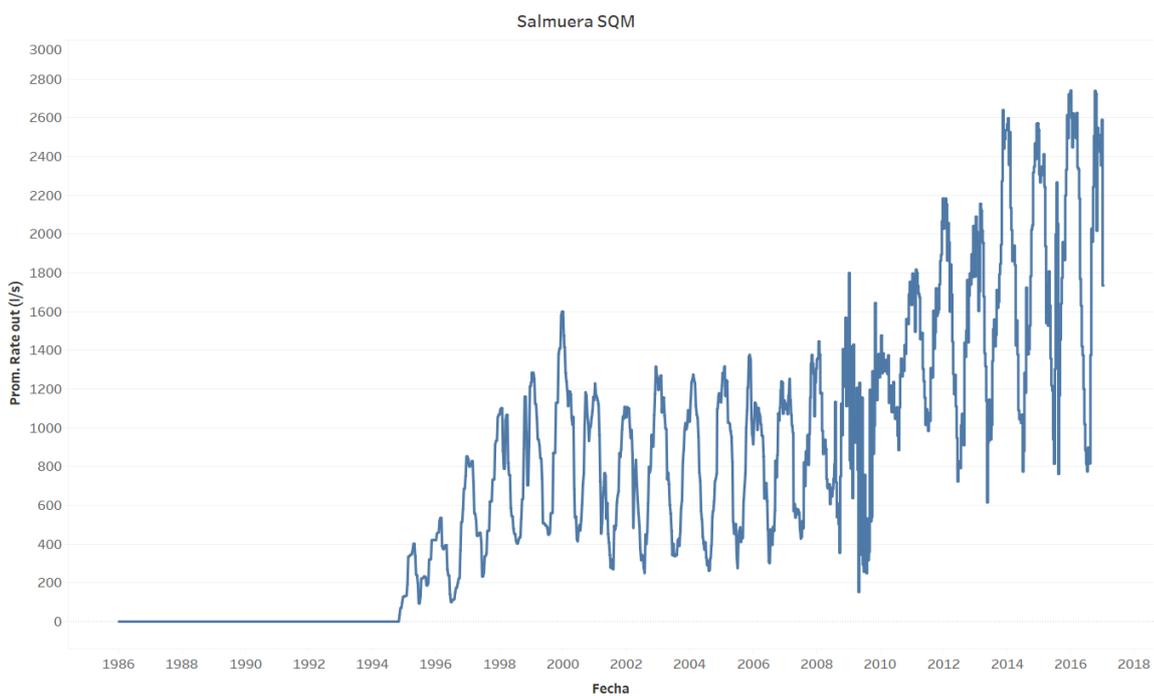


Figura 4.2 Serie de extracción total de salmuera de SQM considerada en el modelo de la 4° Actualización, actualizada hasta diciembre de 2016. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Versión: 1.0 Fecha: agosto 2017

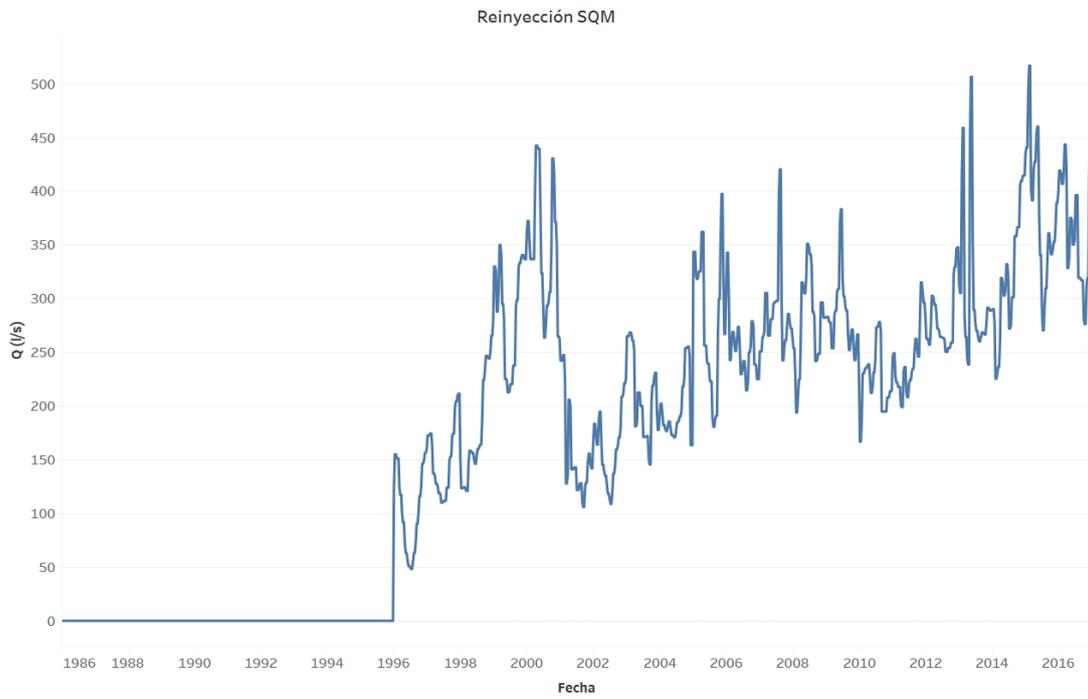


Figura 4.3. Series de Reinyecciones de salmuera de SQM considerada en el modelo de la 4° Actualización, actualizada hasta diciembre de 2016. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Versión: 1.0 Fecha: 24/05/2017

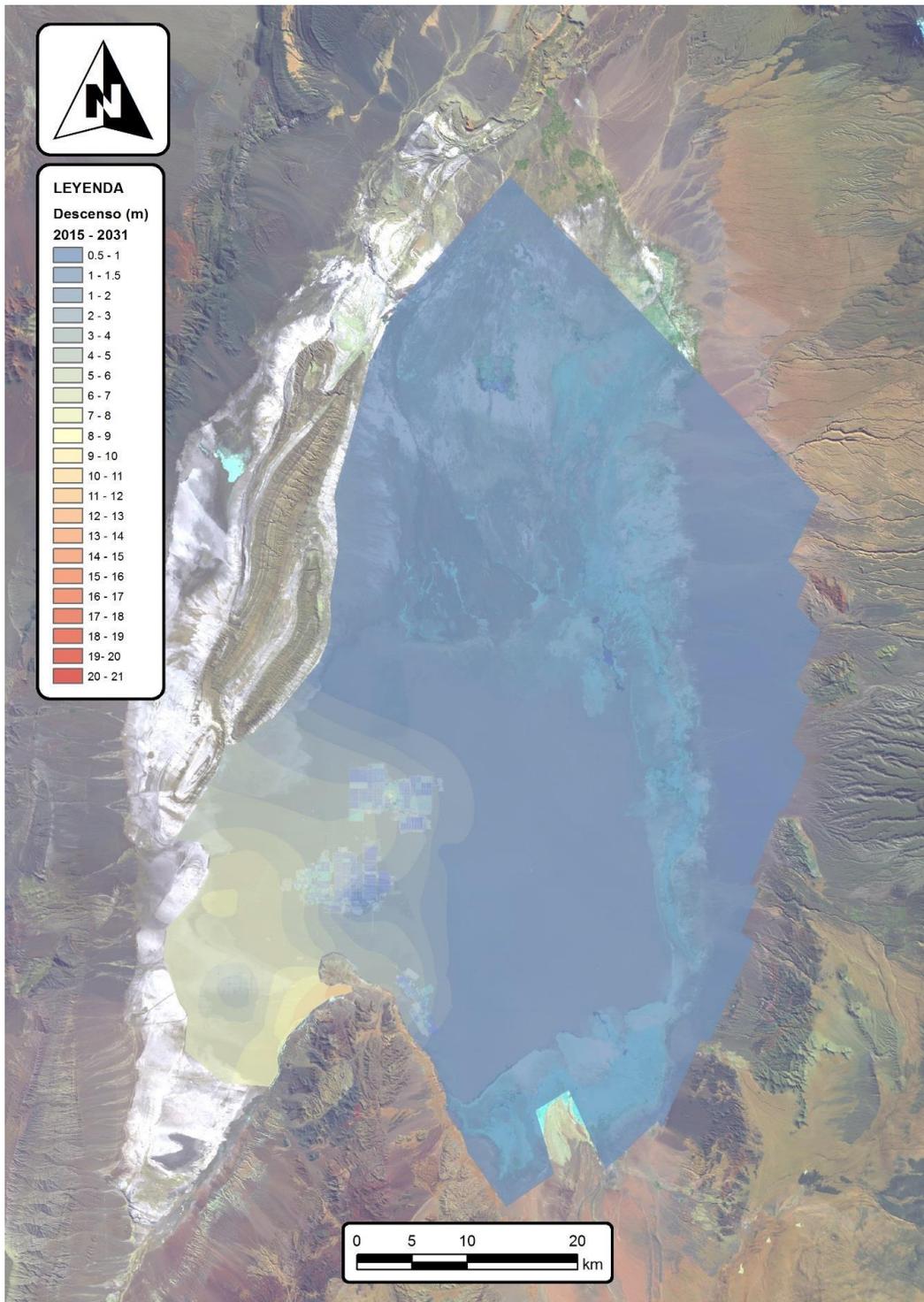


Figura 4.4.- Mapa de descensos piezométricos para el Caso Base a 13/08/2031 según el modelo de simulación. Realizado por IDAEA-CSIC (2017). Versión: 1.0 Fecha: 24/05/2017

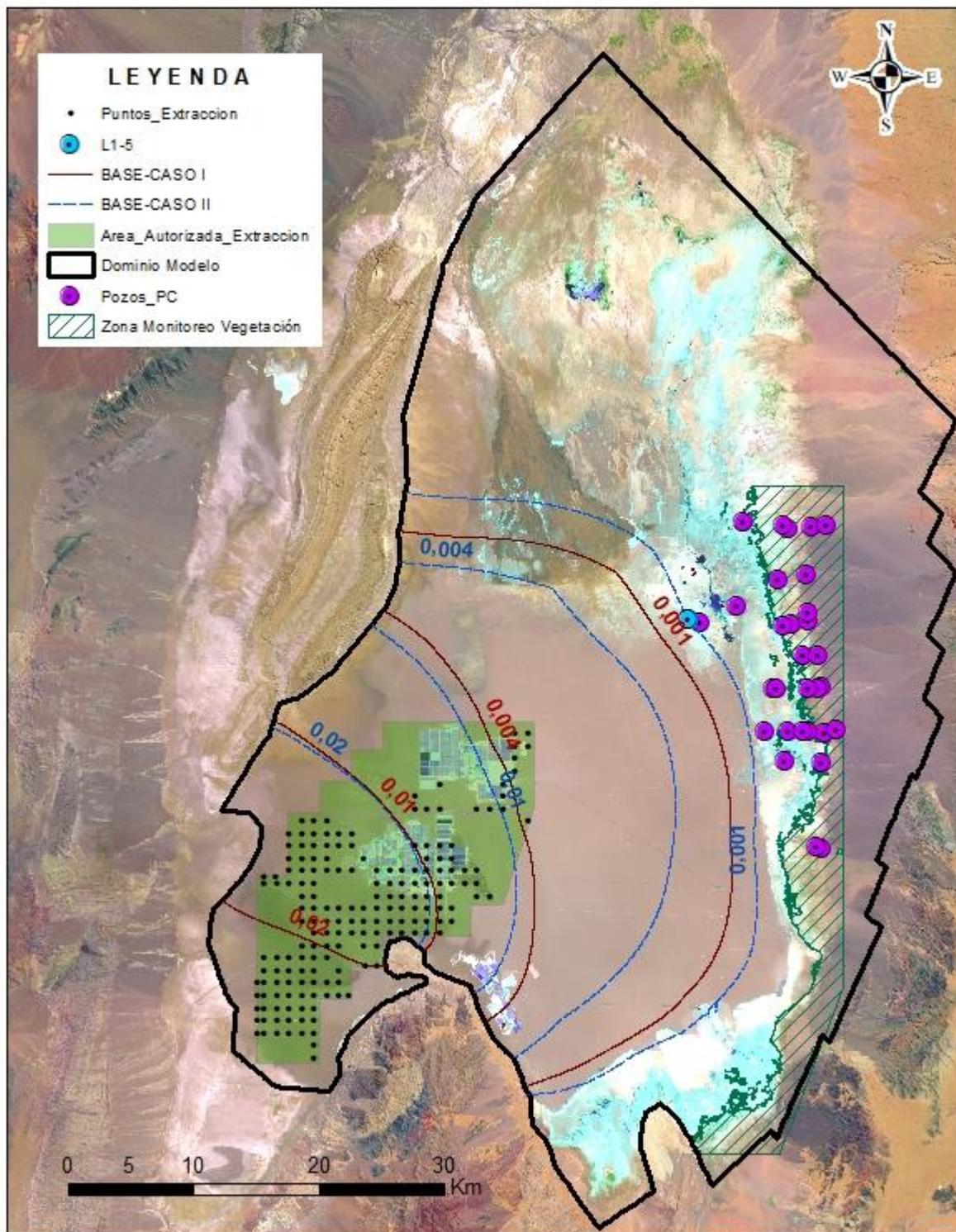


Figura 4.5.- Isolíneas de diferencia de descensos (metros) entre el Caso Base y los Casos I (en rojo) y II (en azul), según el modelo de simulación a agosto de 2031. Valores en metros. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Versión: 1.0 Fecha: 24/05/2017

Las diferencias simuladas en 13/08/2031 de los descensos producidos con las simulaciones de los casos I y II respecto al Caso Base son menores a 1 milímetro en la zona marginal y aluvial y centimétrico en la zona operativa. Tomando como referencia el pozo del Plan de Contingencia situado más al oeste (L1-5), se observa que el cambio en los niveles a lo largo del periodo de simulación para los Casos I y II no se diferencia gráficamente del Caso Base (Figura 4.6). Las oscilaciones observadas son debidas a la

estacionalidad de la evaporación, principalmente en las áreas marginales, con un efecto menor debido al programa de extracción dentro de cada año para acoplarla a las variaciones de la capacidad ambiental de evaporación en las instalaciones del aprovechamiento minero. Estos valores son inferiores a la incertidumbre de simulación y en el rango de las mediciones si se tienen en cuenta los efectos de densidad.

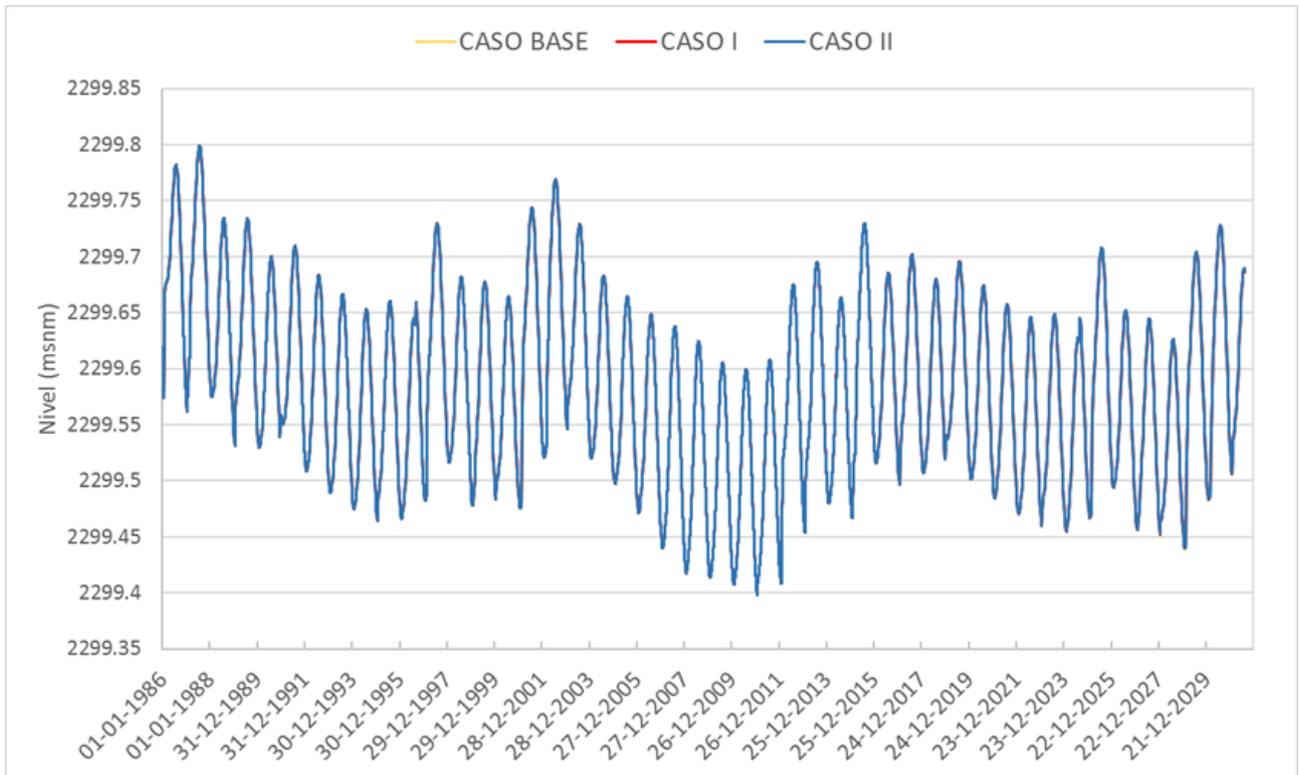


Figura 4.6.- Serie temporal de niveles (m snm) en el pozo L1-5, para el Caso Base, Caso I y Caso II, simuladas por SQM. Como las diferencias son menores a 1 milímetro en la zona marginal y aluvial y centimétrico en la zona operativa, las diferencias no son visibles en el dibujo.

En la Figura 4.7 se detalla la evolución de niveles en el último mes de operación en cada uno de los tres casos en el pozo L1-5. La extracción de salmuera adicional produce un descenso extra de medio milímetro con respecto a la extracción sin exceso. Con la devolución de la salmuera extra mediante reducción de la extracción se lograría una recuperación de 1 mm. Estos valores son poco significativos e inferiores a la propia incertidumbre de simulación y en el rango de las mediciones si se tienen en cuenta los efectos de densidad.

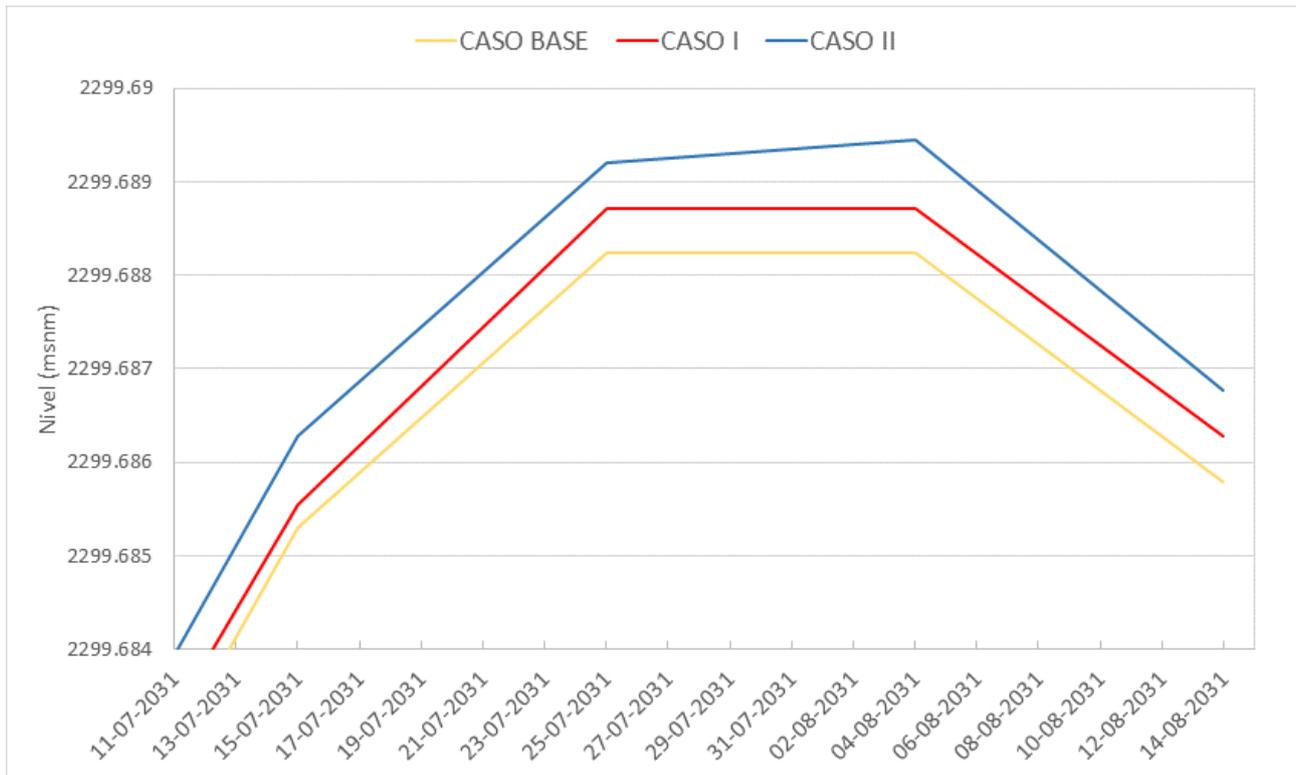


Figura 4.7.- Detalle de la serie temporal de niveles (m snm) para el pozo L1-5, para el Caso Base, Caso I y Caso II, en el mes final del periodo de simulación. Simulación realizada por la Gerencia de Hidrogeología Salar. Versión: 1.0 Fecha: 24/05/2017

Conclusión

Los cálculos y elaboraciones para esclarecer los posibles efectos se han hecho por el equipo de modelación de la Gerencia de Hidrogeología de SQM con este objetivo, previa coordinación entre IDAEA-CSIC, SQM y el autor de este informe. Se ha utilizado el modelo calibrado por IDAEA-CSIC (2017), introduciendo los valores de extracción que se dan al principio de esta sección. Como ya se ha especificado antes, el modelo es la mejor herramienta de cálculo disponible y la calibración se cierra con diferencias entre lo simulado y lo observado que son milimétricas y como mucho centimétricas en las áreas más variables de la zona activa. Esto está dentro de las tolerancias asociadas a las inevitables simplificaciones e imprecisiones de cálculo y a los errores de representación de los propios datos. Así pues, cabe considerar que la mencionada sobre-extracción no ha tenido efectos perceptibles en el estado hidrogeológico actual, ni lo tendrá en el del momento de cese de las operaciones. Como para pequeñas variaciones el comportamiento es lineal una vez que se ha casi anulado la evaporación freática en el salar, el exceso de extracción de salmuera que se ha realizado supone una variación de 2 mm en los niveles de salmuera, por debajo de la incertidumbre en las áreas periféricas lagunares y del mismo orden de magnitud de la precisión de las observaciones (1 mm). Además, el comportamiento del área lagunar, incluso en las áreas con mayor cambio en el nivel de salmueras marginales, no está influenciado por ese nivel.

5.- Efecto de la extracción de agua industrial sobre el acuífero en el sector de existencia de algarrobos

Comentarios generales sobre la vegetación

En el área del que se extrae agua dulce (agua industrial) para abastecer a las operaciones en el salar existe una vegetación pobre, pero significativa, en especial algarrobos, como especímenes singulares, y *Brea atriplex* como vegetación de menor porte. Según DGA (2004), en el borde Este y hacia el Sur del Salar de Atacama se encuentran comunidades esteparias desarrolladas.

Se ha considerado importante la observación de los algarrobos para conocer su estado de vitalidad a lo largo del proyecto y en su caso tomar las medidas de protección o de corrección adecuadas para su conservación. Se trata de la especie *Prosopis flexuosa* DC, conocida vulgarmente como algarrobo dulce. Se ha consultado diversa información acerca de sus condiciones vitales en relación con la hidrogeología, utilizando material aportado por SQM y material escrito disponible (González Loyarte et al., 2000; Villaga et al., 2009, 2011; Villaga, 2010; Álvarez et al., 2006; Calderón et al., 2015; Garrido et al., 2016). Es de especial relevancia el avance del estudio que realiza CONICET (2017) para SQM.

Según los datos bibliográficos, el algarrobo es un árbol que crece en unidades aisladas, de 2 a 6 m de porte, con un sistema de raíces dimórfico: a) superficiales laterales para el aprovechamiento de la humedad del suelo alimentada por la precipitación, con penetración mayor que la de las plantas comunes, hasta 0,6 m, y b) pivotantes verticales con penetración hasta 6–12 m., AA, a semejanza del tamarugo; esta raíz vertical, que se puede ramificar, es leñosa y tiene un crecimiento más rápido que la parte aérea. Parece que en algunos casos el sistema radicular puede funcionar a tres niveles cuando la disposición de los sedimentos permite la formación de un nivel intermedio con alta humedad ocasional.

Si la precipitación es inferior a 350 mm/a el árbol puede funcionar como una freatófita (vadosófita), de modo que complementa el agua necesaria para sus procesos vitales mediante la toma de agua freática, si está accesible, y es capaz de soportar altas salinidades del agua, de 2,6 a 17 mS/cm de conductividad eléctrica (Álvarez et al., 2006). La presencia de algarrobos es mayor cerca de ríos permanentes. Si los niveles freáticos son excesivamente altos, como en épocas de lluvia frecuente, el sistema radical puede fallar por asfixia. Esto último no es el caso del área en consideración.

El algarrobo tiene capacidad de soportar cierto déficit hídrico. La disponibilidad de agua condiciona el patrón de distribución espacial. Los datos existentes apuntan a que con niveles freáticos más profundos que 20 m y déficit hídrico prolongado, el árbol muere. Sin embargo, datos recientes apuntan a que el sistema radical vertical podría excepcionalmente llegar a alcanzar 50 m (CONICET, 2017), aunque es posible que se tratase de una situación extrema. Haase et al. (1999) citan profundidades radicales de ese porte para acacias sahelianas y algarrobos (mescal) del desierto de Sonora.

Problema planteado

En el Cargo 2 se considera que algunos de los árboles censados han empeorado su estado vital en el área de la quebrada de Camar, en la franja de Aguas de Quelana, donde opera el pozo de extracción de agua industrial Camar-2. La Figura 5.1 muestra la

situación de los árboles a lo largo de un transecto E–W por el pozo Camar–2, que son objeto de vigilancia especial, y dos sondeos de observación. El perfil piezométrico es el de la Figura 5.2, con la escala vertical exagerada. La franja en gris indica la mayor profundidad esperable de las raíces verticales (20 m) según los conocimientos comunes (Calderón et al., 2015). Dadas las características de los algarrobos existentes en el sector del pozo Camar, es improbable que tengan raíces de esa extensión

El descenso del nivel freático causando por la explotación de agua subterránea, según los datos de monitoreo, es de no más de 2 m respecto al estado natural, salvo en el entorno inmediato a los pozos de extracción, donde podría llegar a algunos metros, lo anterior en un radio del orden de 100 m.

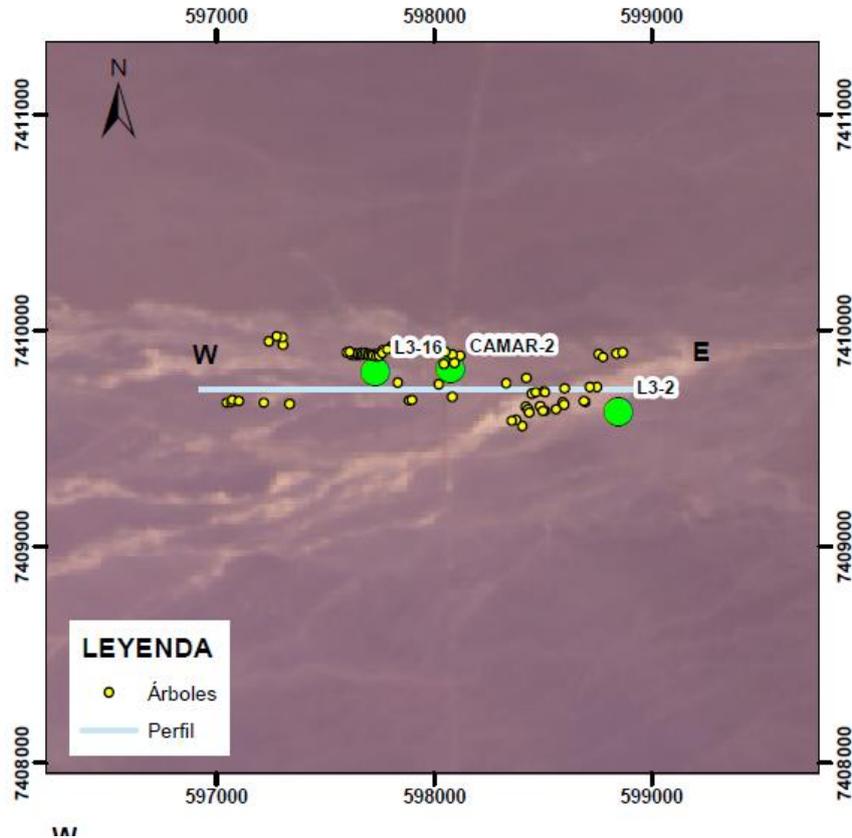


Figura 5.1.- Ubicación de los algarrobos censados a lo largo de un transecto E-W pasando por el pozo de bombeo Camar-2 y traza de la quebrada de Camar. Se indican los dos puntos próximos de monitoreo (aportado por SQM).

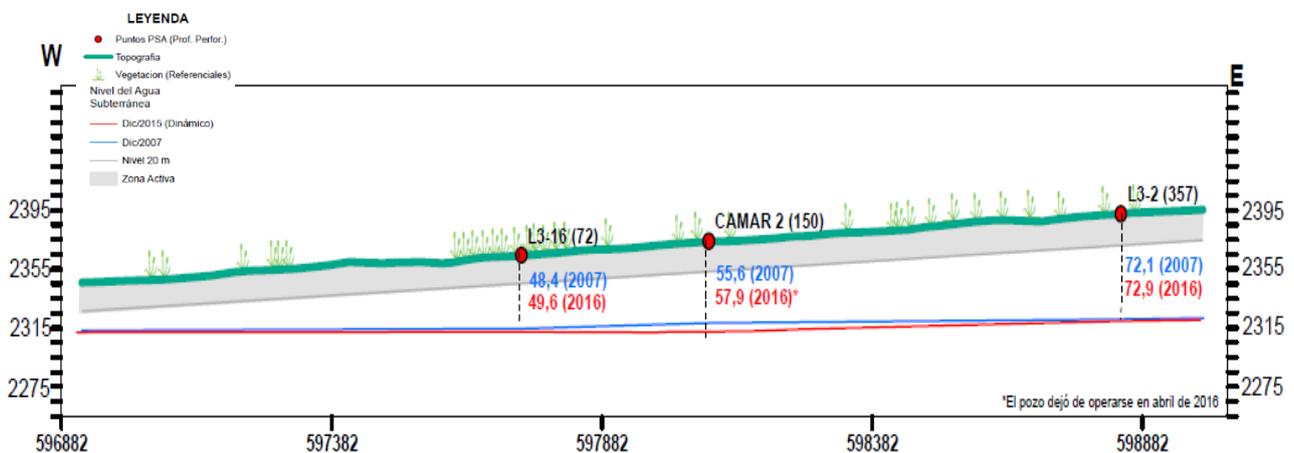


Figura 5.2.- Sección piezométrica a lo largo de un transecto E-W pasando por el pozo de bombeo Camar-2 (aportada por SQM). La escala vertical está exagerada. Lo que se indica como zona activa es la franja en que las plantas con sistemas radicales de hasta 20 m pueden captar agua subterránea (Calderón et al., 2015), cuando ésta existe. Se muestra la posición aproximada de los algarrobos a lo largo de la sección.

En la Figura 5.3 se muestra de forma simplificada la profundidad del nivel freático bajo el terreno en los sectores marginal y aluvial del E. En el entorno del pozo Camar-2 los valores están próximos a los 50 m.

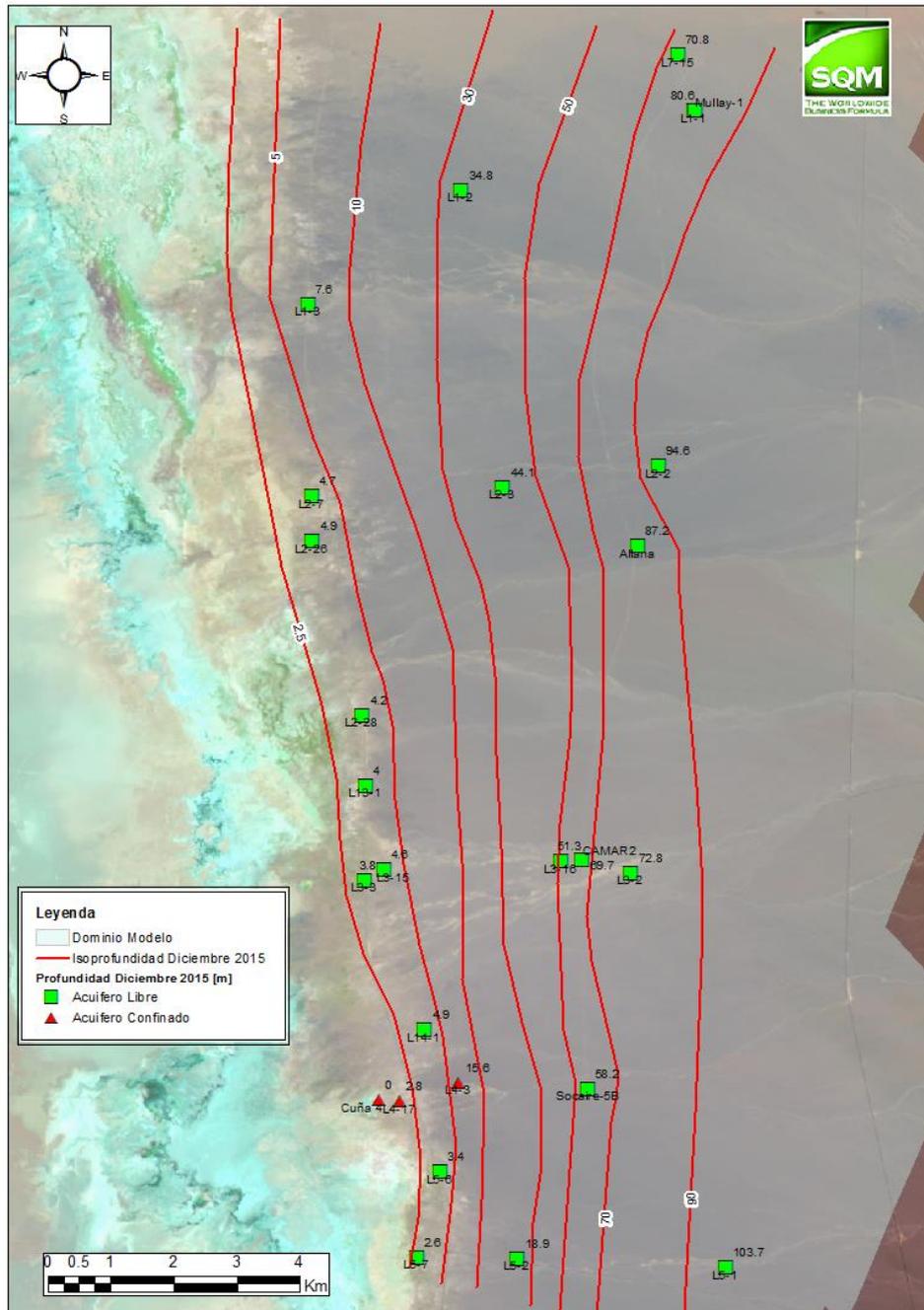


Figura 5.3.- Representación mediante isolíneas simplificadas (no se parte del modelo digital de elevación del terreno) de la profundidad del nivel freático bajo el terreno en el sector E de las áreas marginal y aluvial, para Diciembre de 2015. Preparado por SQM.

Las sucesivas isolíneas de W a E corresponden a las profundidades de 2.5, 5, 10, 30, 50, 70 y 90 m.

La extensión de la sección hasta el contacto con el salar para observar las variaciones piezométricas se puede hacer con los datos del PSAH (2016), tomando los hidrogramas de los puntos de monitoreo más significativos entre el entorno del pozo Camar-2 y el salar (Figura 5.4). En la Figura 5.5 se muestran cuatro de los hidrogramas. En 2008 se inició la operación del pozo Camar-2, cuyo caudal máximo autorizado es de 60 L/s. Las extracciones realizadas en el pozo Camar-2 se representan en la Figura 5.6. El agua captada tiene una salinidad en el entorno de 2,8 mS/cm. Los hidrogramas se inician en ese momento, excepto para el punto más al interior que tiene datos desde 1999. h es la altura sobre la cota 2300,00. Los rasgos más destacados son (H se refiere a la altitud sobre el nivel de referencia de 2300,00 m, correspondiente al salar):

Punto L3-14: $h \approx 0$. En la zona marginal. Posible efecto de lluvias de 2011 y 2014. Sin clara estacionalidad. Sin tendencia. Se trata de un pozo profundo, no freático, con recarga alejada

Punto L3-8: $h \approx 0$. En la zona marginal. Débil efecto de lluvias de 2011 y 2014. Clara estacionalidad. Sin tendencia

Punto L3-3: $h \approx 11$ m. En el aluvial próximo a la zona marginal. Sin efecto de lluvias. Doble estacionalidad aparente. Tendencia descendente

Punto L3-2: $h \approx 25$ m. En el aluvial, unos 0,5 km aguas arriba del pozo. Sin efecto de lluvias. El salto brusco en enero de 2005 es posiblemente un cambio de la altitud del punto de referencia de las mediciones. Tendencia descendente. Al final muestra el efecto del paro temporal del pozo.

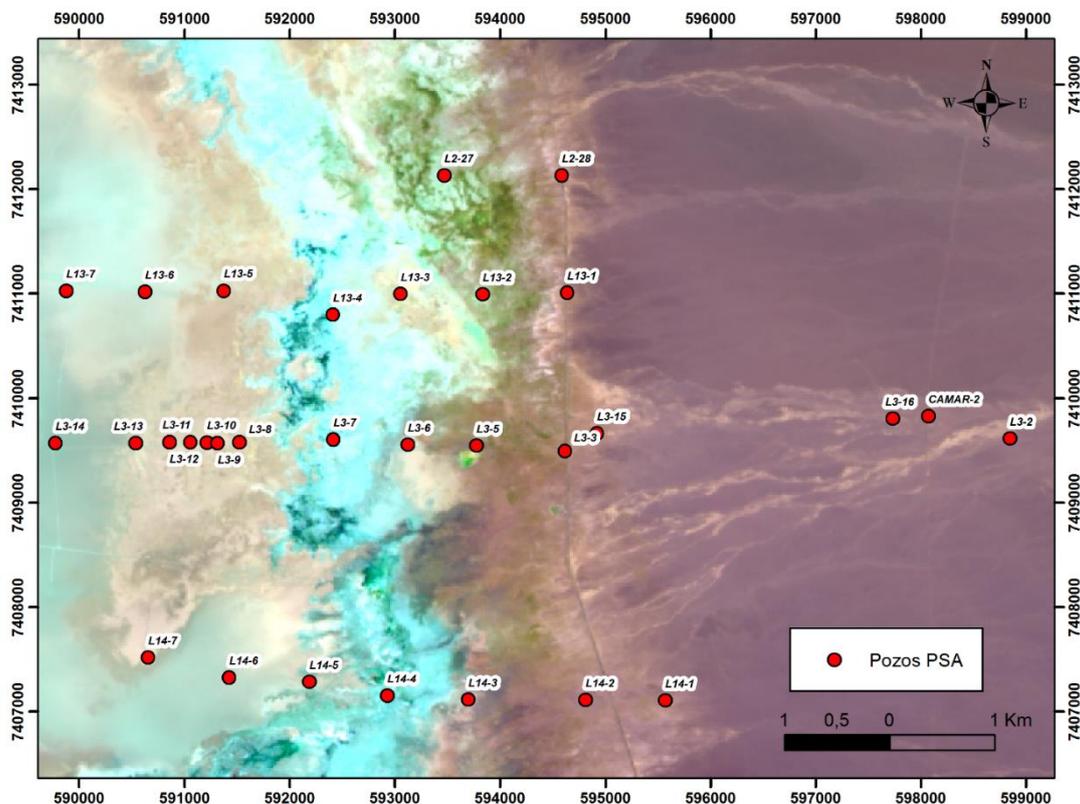


Figura 5.4.- Puntos de monitoreo entre el entorno del pozo Camar-2 y el salar.

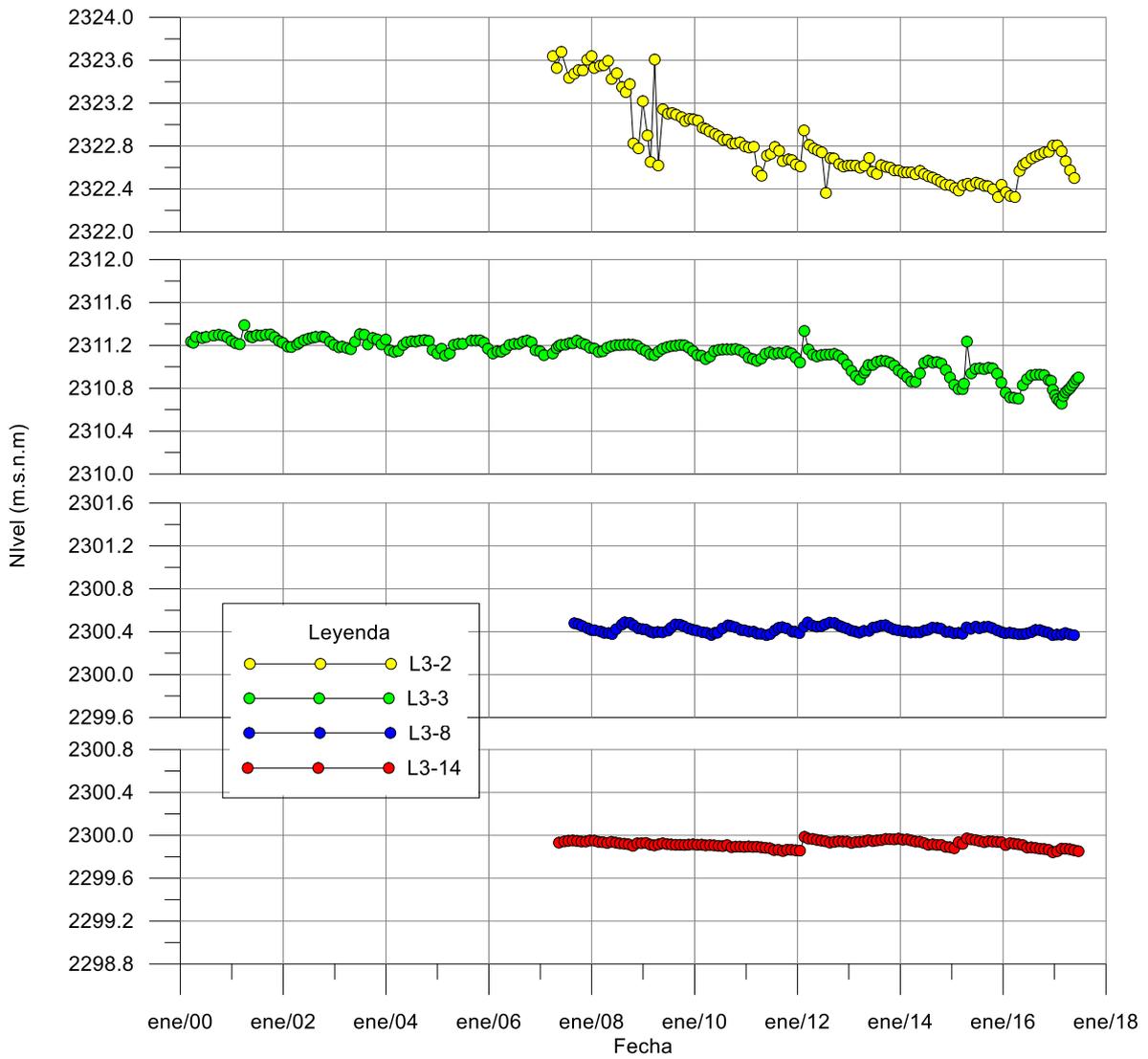


Figura 5.5.- Cuatro hidrogramas de puntos de monitoreo entre el salar y el entorno del pozo Camar-2. Son los puntos de monitoreo L3-14, L3-8, L3-3 y L3-2.

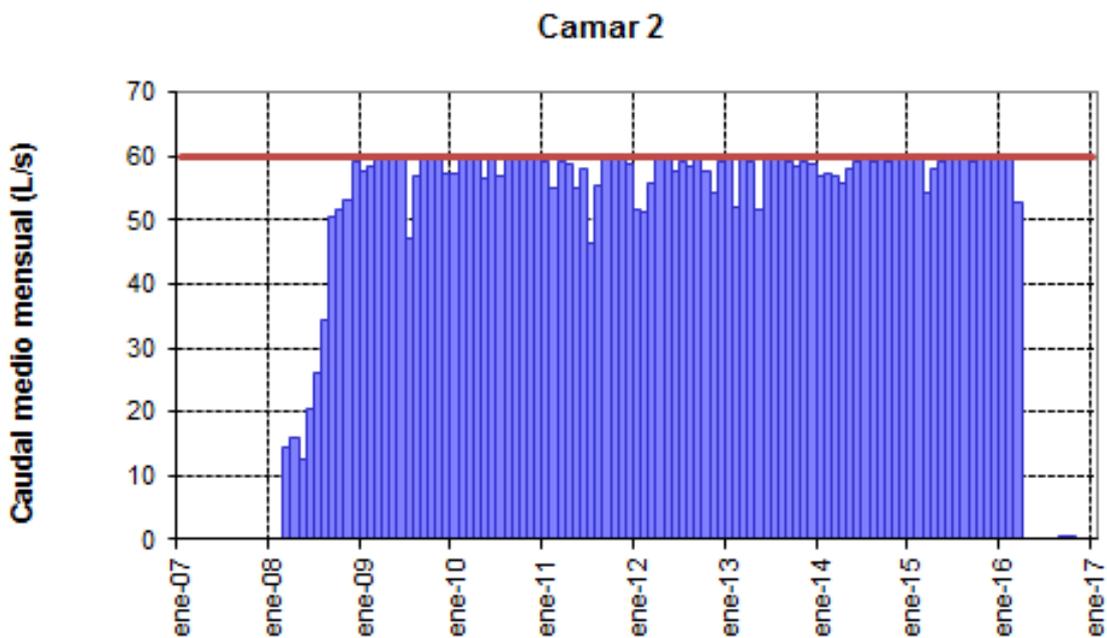
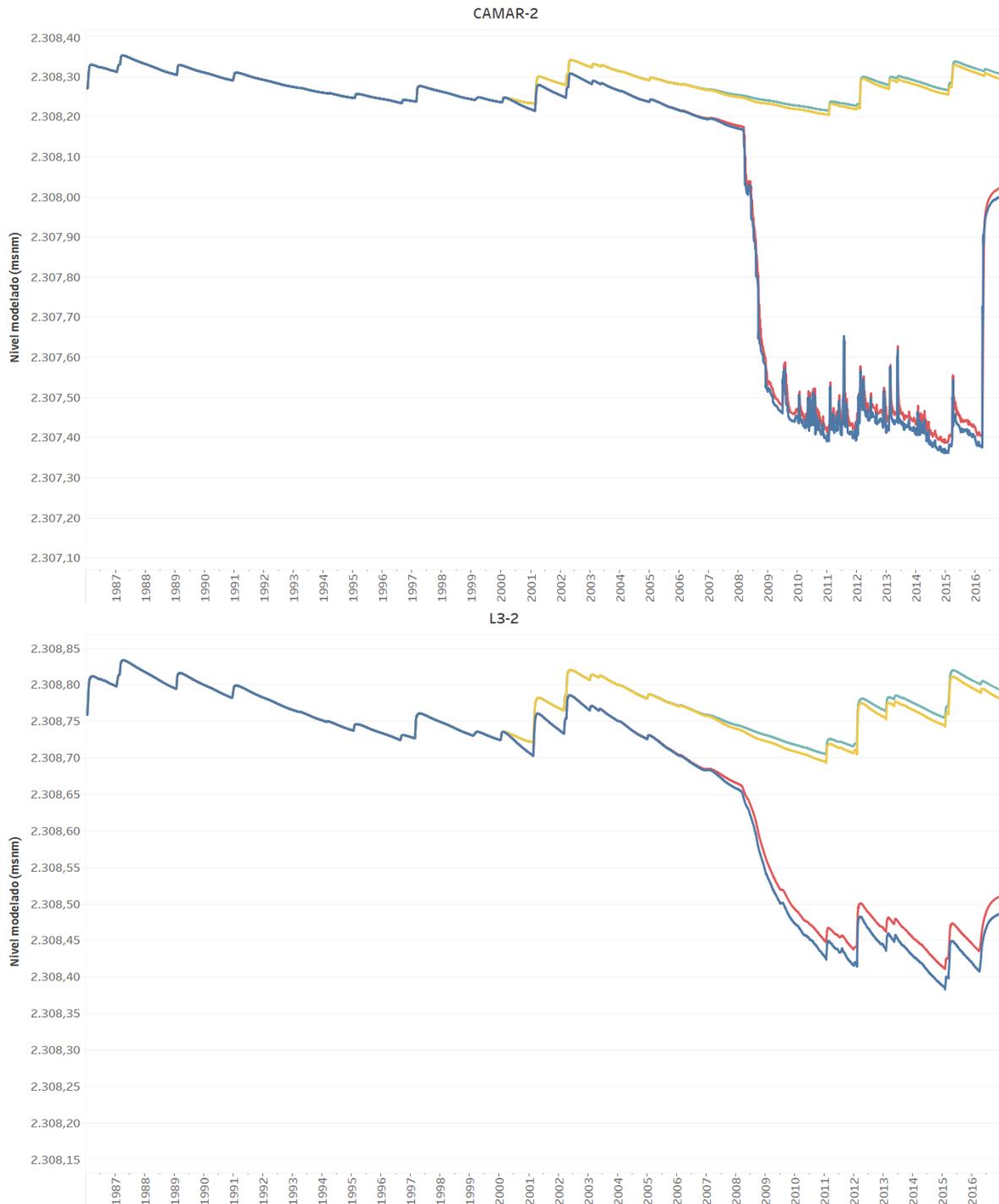


Figura 5.6.- Extracciones realizadas en el pozo Camar-2. Datos mensuales. Tomado de PSAH (2016).

Para detallar los efectos de las extracciones se ha simulado con el modelo (IDAEA-CSIC,2017) las variaciones del nivel piezométrico en diferentes pozos de control, en los escenarios: 1.- estado actual, 2.- sin extracciones de agua industrial, 3.- sin extracciones ni reinyección de salmuera y 4.- sin extracción ni reinyección de salmuera y sin extracción de agua industrial (Figura 5.7). La extracción y reinyección de salmuera casi no afecta (submilimétrico) y la extracción de agua industrial afecta al entorno del pozo Camar-2 (excluyendo el efecto local) en 75 cm y en 30-40 cm en los puntos de monitoreo.



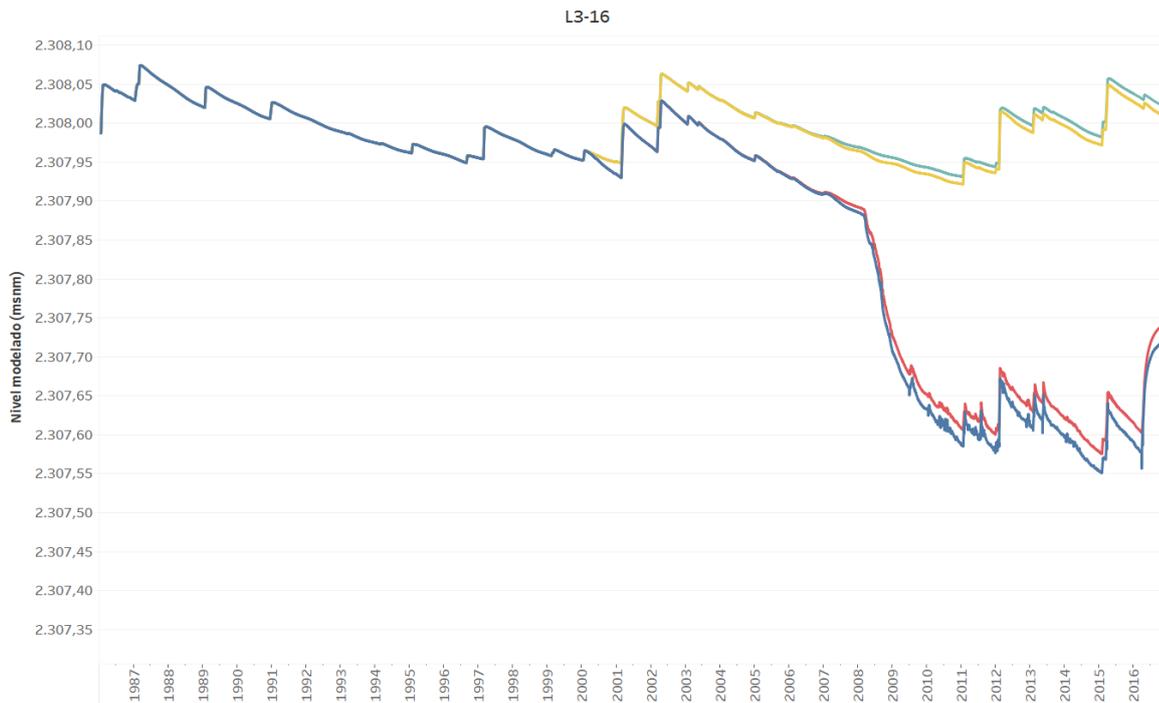


Figura 5. 7. Comparación de la evolución de niveles piezométricos en el pozo Camar-2 y en los puntos de monitoreo L3.2 y L3.16 para el estado actual (en azul) y los que se hubieran observado (mediante simulación) en el caso de no haber extracción de agua industrial (en amarillo), en el caso de no haber extracción ni reinyección de salmuera (en rojo) y en el caso de no haber extracción ni reinyección de salmuera ni extracción de agua industrial (en verde).

Conclusión

Con la información disponible y dada la configuración del acuífero en el sector de Camar, no es de esperar que los Algarrobos en el entorno del pozo Camar-2 estén captando agua del nivel freático profundo, a unos 50 m de profundidad. Desde el punto de vista de la hidrología subterránea, el descenso freático general del área no supera 2 m y en general se ha hecho a una tasa de algunos dm/año a lo largo de 10 años. Aunque no se conocen las fluctuaciones del nivel del agua durante un largo periodo de tiempo, cabe esperar que el sistema radical esté adaptado a las variaciones naturales de la profundidad del nivel freático de hasta varios m. No hay ninguna manifestación clara de estacionalidad del nivel freático por captación de agua subterránea por vegetación con raíces muy profundas, aunque la baja densidad de Algarrobos es posiblemente incapaz de dar una reacción perceptible. Por lo tanto, salvo situaciones extremas poco probables y verosímiles para la situación bajo estudio, cabe concluir que la explotación de agua industrial en el pozo Camar-2 no ha producido efectos sobre el estado de los Algarrobos.

6.- Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico Sistema Peine

Información de soporte

El EIA de SQM fue aprobado en 2006 según Resolución de Calificación Ambiental (RCA) 0226 de 2006, en el que se establece la red de monitoreo del PSA.

Para las lagunas del NE y E, la vegetación del borde E y el núcleo del Salar se ha establecido un plan de Contingencia (PC), con indicadores de estado y umbrales de

activación incorporados al Plan de Seguimiento Ambiental (PSA). El interés del control y por lo tanto de la existencia del PC incluye la extracción de agua dulce industrial de las áreas laterales para abastecer a las necesidades mineras. El PC se ha definido en las diferentes áreas de extracción del E (Soncor y Aguas de Quelana), pero aún no en las del SE (Figura 3.3). Para el PC en el área de Peine se requiere definir umbrales y fases de activación a partir de la mejor información disponible. Para ello se puede utilizar la información derivada de los pozos de seguimiento de SQM ya existentes y la aportada por la última versión de la herramienta de simulación disponible (IDAEA-CSIC, 2017).

El monitoreo de niveles piezométricos en el área de Peine que realiza SQM comprende los 25 puntos de la Tabla 6.1. La ubicación de dichos puntos está en la Figura 6.1 y la representación conjunta de la evolución a lo largo del tiempo de esos niveles se da en la Figura 6.1. El detalle de cada punto de monitoreo de encuentra en el Anexo 4.

Tabla 6.1.- Piezómetros del PSAH Sistema Peine

POZO	ESTE WGS84	NORTE WGS84	PROFUNDIDAD metros
L10-17	591.616,70	7.388.611,17	5,85
L10-16	590.452,50	7.386.333,41	5,88
L10-15	589.152,94	7.383.839,76	5,78
L10-14	582.762,63	7.382.944,90	11,46
L10-13	584.610,14	7.382.758,82	11,44
L10-12	584.400,10	7.388.772,89	7,85
L10-11	585.193,01	7.386.713,22	8,07
L10-10	588.561,22	7.382.729,91	5,66
L10-9	588.859,80	7.383.281,37	5,36
L10-8	587.479,41	7.383.323,18	5,84
L10-7	587.591,24	7.382.733,40	5,21
L10-6	586.579,51	7.382.951,64	5,26
L10-5	585.257,67	7.382.630,96	5,45
L10-4	584.907,77	7.381.407,76	5,42
L10-3	585.556,47	7.381.276,01	5,56
L10-2	589.534,38	7.382.683,18	1,78
L10-1	591.440,07	7.380.660,66	201
GD-04	586.142,95	7.383.853,99	30,39
GD-03	586.688,01	7.382.384,73	
2037R	583.465,29	7.391.949,15	7,91
2018	578.015,44	7.391.893,05	100
1028	584.432,98	7.383.997,75	30,42
1024	589.474,55	7.391.600,13	1,75
Cuña 7	587.722,59	7.382.218,75	42,85
Cuña 6	591.524,35	7.379.240,90	120,8

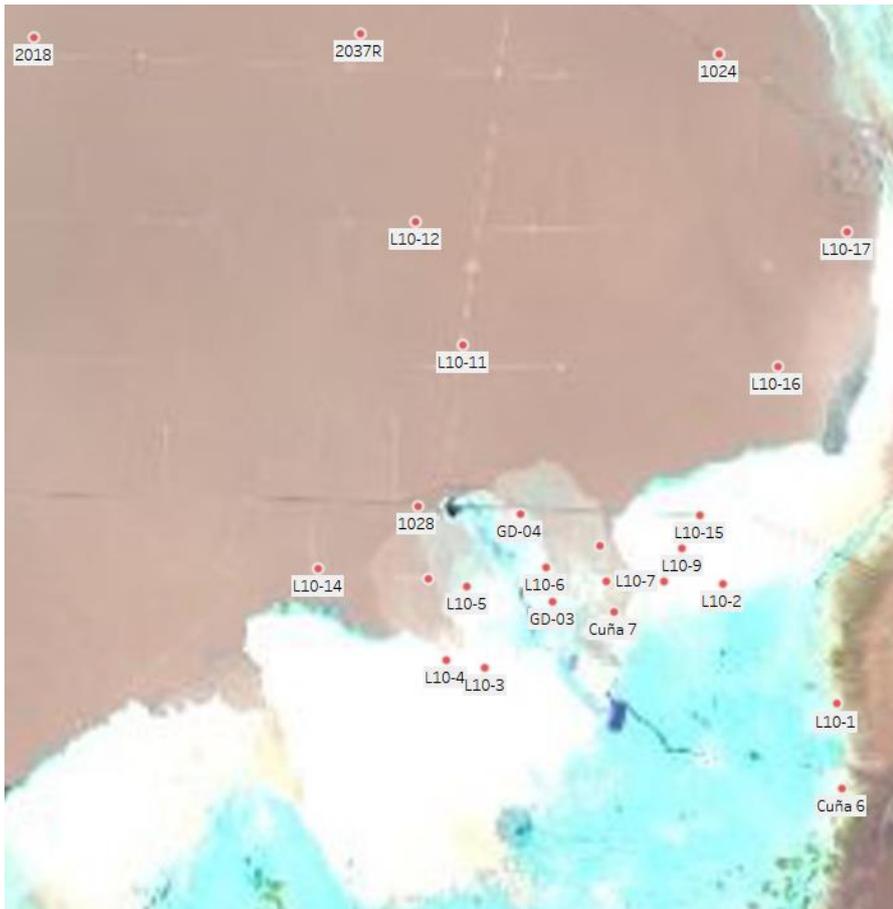


Figura 6.1.- Ubicación de los puntos de monitoreo del área de Peine

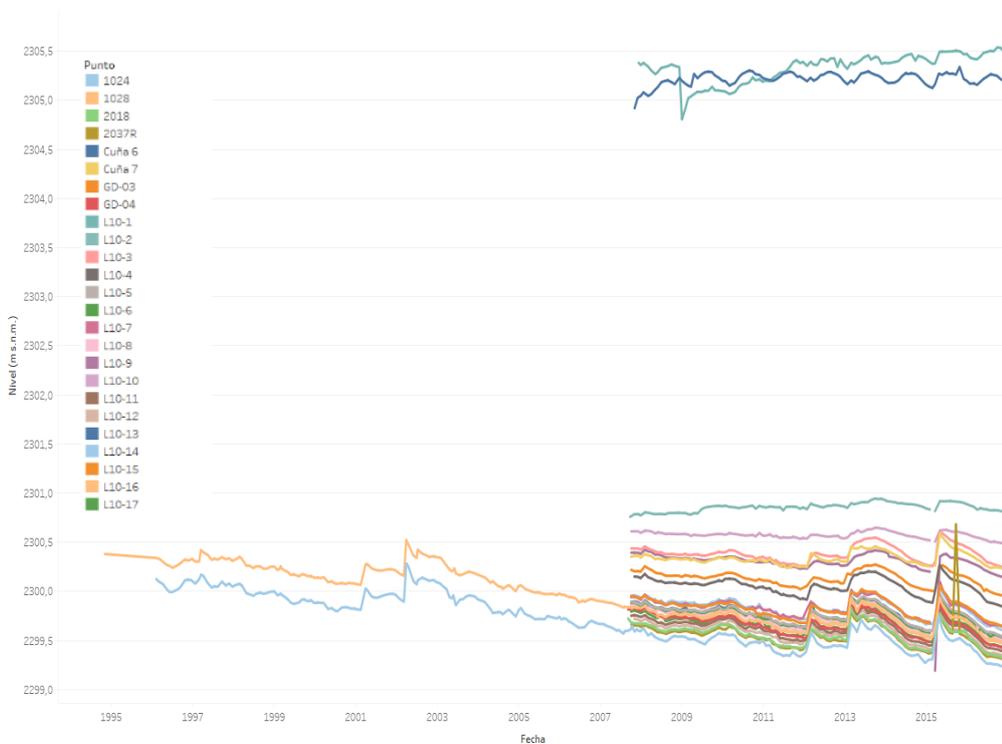


Figura 6.2.- Representación conjunta de la evolución temporal de los niveles piezométricos en el área de Peine, monitoreados por SQM para el PSAH. Preparado por

SQM. Todos los puntos tienen niveles próximos a los de la salmuera del salar por estar en el mismo o en la zona marginal próxima, excepto dos (Cuña 6 y L10.1) que están en el borde interior de la misma, junto al margen aluvial, y por tanto con niveles más elevados.

Las isopiezas generales en el entorno de Peine se muestran en la Figura 6.3. El pozo de extracción de agua industrial de SQM más al S, el P-2 (hoy CA-2015), queda alejado del área de Peine del orden de 15 km, que es más que la posible área longitudinal de influencia, de alrededor de 5 km. Esto se aprecia en la Figura 6.3 y en el casi nulo efecto en el punto de monitoreo de la Figura 6.4. Por lo tanto no se considera que haya influencia directa de la explotación de agua industrial por SQM en el Sistema Peine.

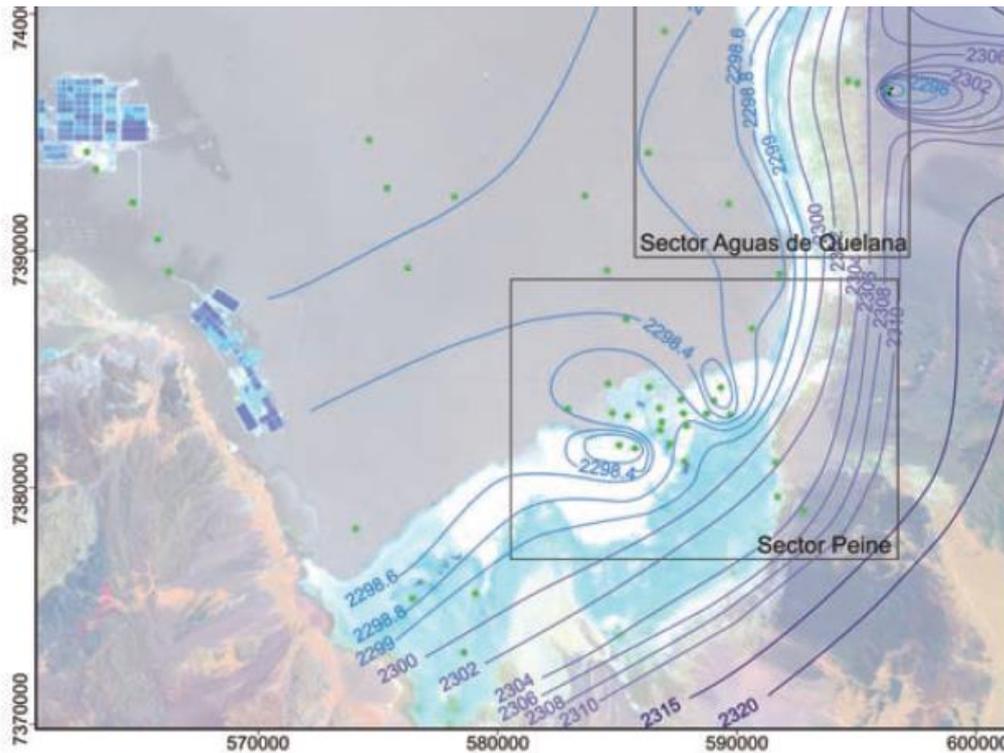


Figura 6.3.- Isopiezas generales del área marginal lateral SE y ubicación de puntos de control del sistema Peine. El pozo de extracción CA-2015 (que reemplaza al P-2) se ubica en la parte derecha superior de la figura. Fuente: es parte de la correspondiente figura de IDAEA-CSIC (2017)

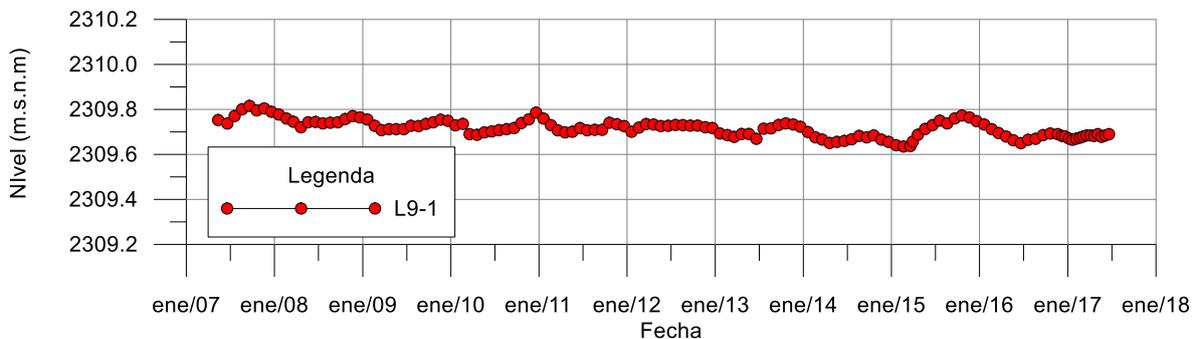


Figura 6.4.- Hidrograma del punto de monitoreo L.9.1 del área del pozo de extracción P-2, en el lado Sur.

En lo que sigue se ha utilizado la información contenida en el Anexo V-2C del Resumen del Modelo Conceptual de los Sistemas Lagunares de IDAEA-CSIC (2017), que recoge lo contenido en el anterior Plan de Seguimiento del PSA desarrollado por Amphos-21 (2009) para SQM y en el informe interno de la Superintendencia de Geología de SQM (2016) sobre el sistema lagunar de Soncor, Aguas de Quelana y Peine. Se incluye el estudio hidrogeológico y modelo numérico del Sector Sur del Salar de Atacama (diciembre, 2015) de RWD (2015) como Apéndice 1. La información de detalle de los resultados de monitoreo está en el PSAH (2016), que se ha utilizado como base de información. Desde 2007 se realiza el monitoreo sistemático de niveles del agua y determinaciones fisicoquímicas, trimestrales a cuatrimestrales, como parte del PSA.

Las formaciones geológicas del sector SE, que cierran por el S la fosa en la que se ha instalado el Salar de Atacama, son complejas. Responden en parte a un volcanismo reciente con calor residual, dominado por el volcán Socompa (Figura 6.5).

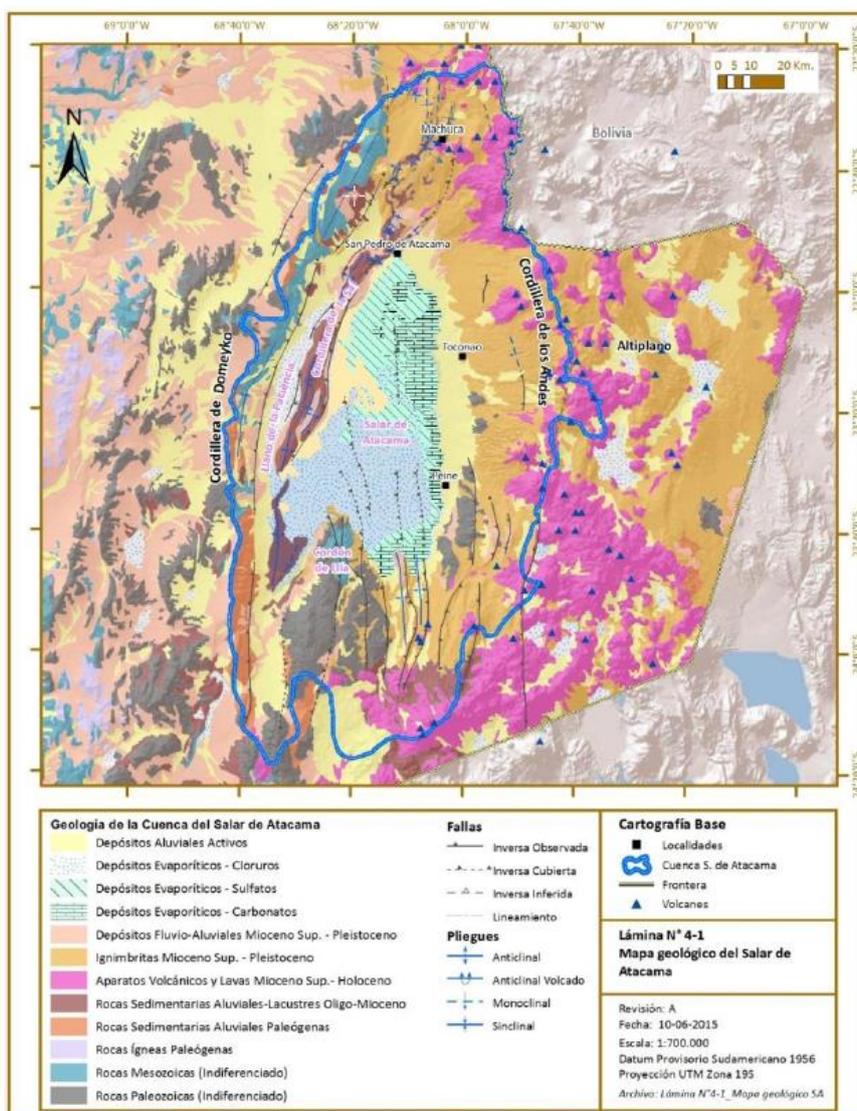


Figura 6.5.- Mapa geológico general del Salar de Atacama. Fuente: Xterrae (2015) a partir de Bevacqua (1993), SERNAGEOMIN (2003), Aron et al. (2008), Arriagada et al. (2005). Tomado de IDAEA-CSIC (2017).

La Figura 6.6 representa la geología local además de los sondeos existentes y la traza de la sección hidrogeológica que se representa en la Figura 6.7. La Figura 6.8 muestra los sondeos que intersectan la zona de mezcla y la salmuera en profundidad.

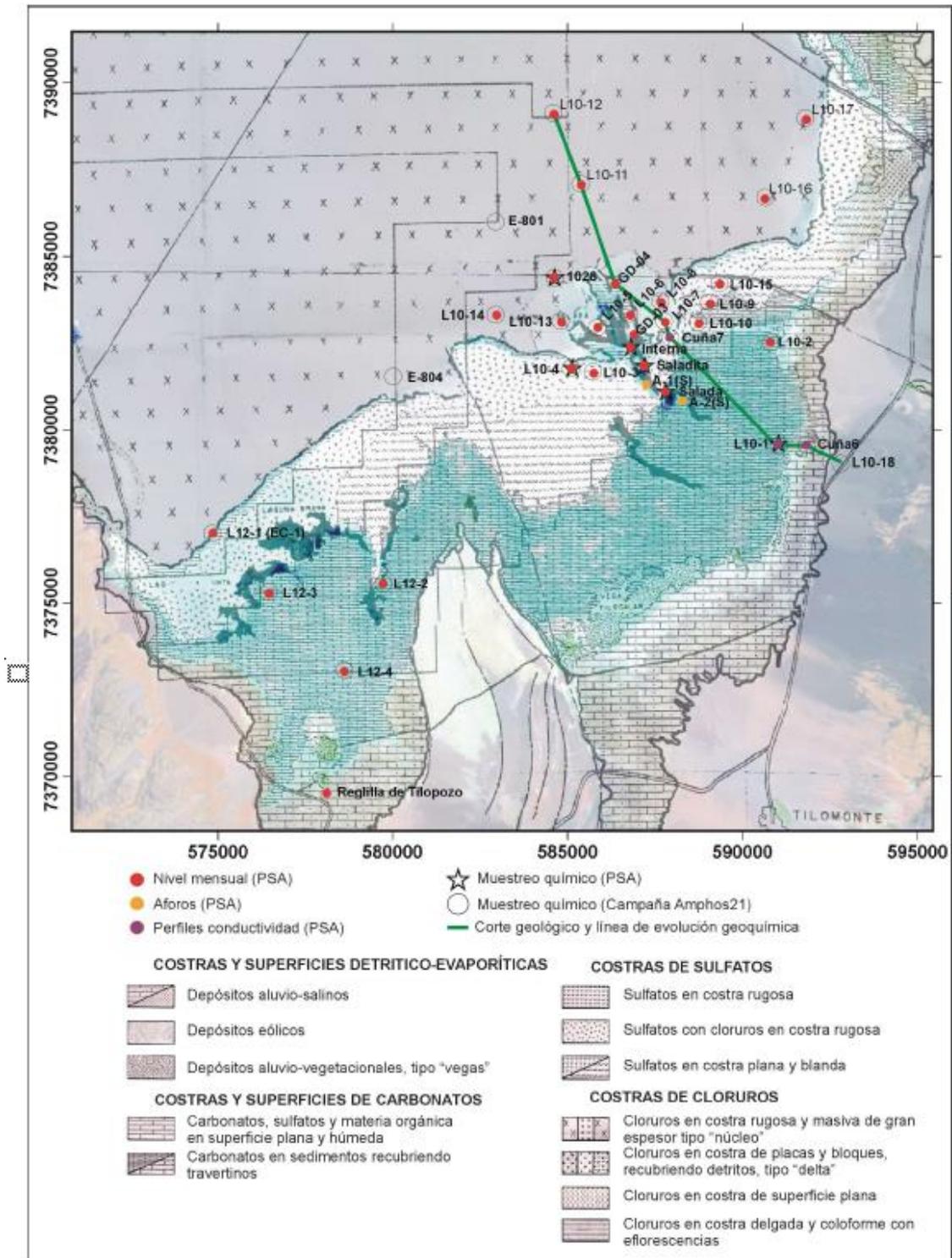


Figura 6.6. Geología local del área de Peine-Tilopozo, situación de los sondeos existentes y traza del corte geológico-hidrogeológico por el área de Peine (Amphos-21, 2009).

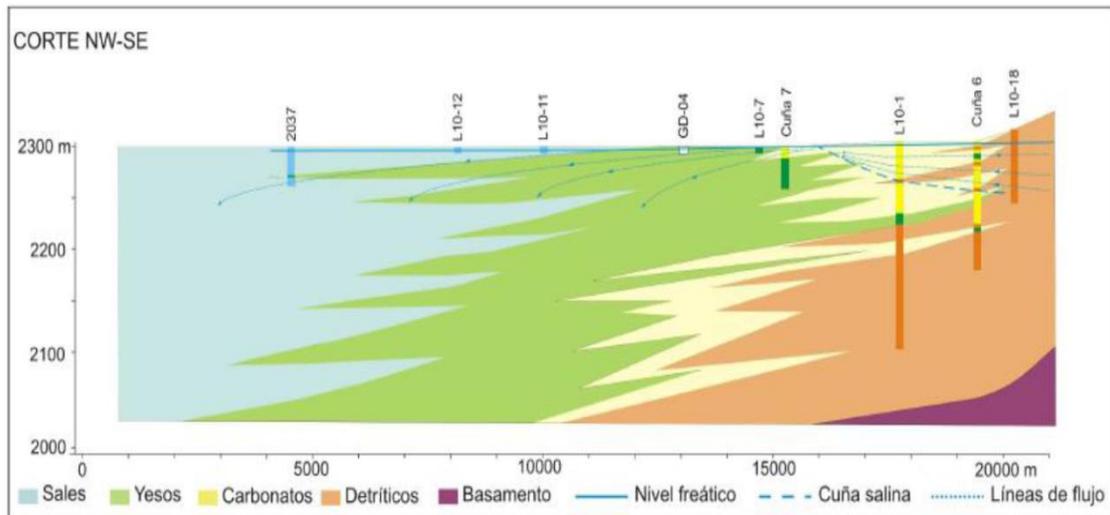


Figura 6.7.- Corte geológico-hidrogeológico del contacto lateral-salar en el área de Peine, según la traza de la Figura 6.6 (Amphos-21, 2009).

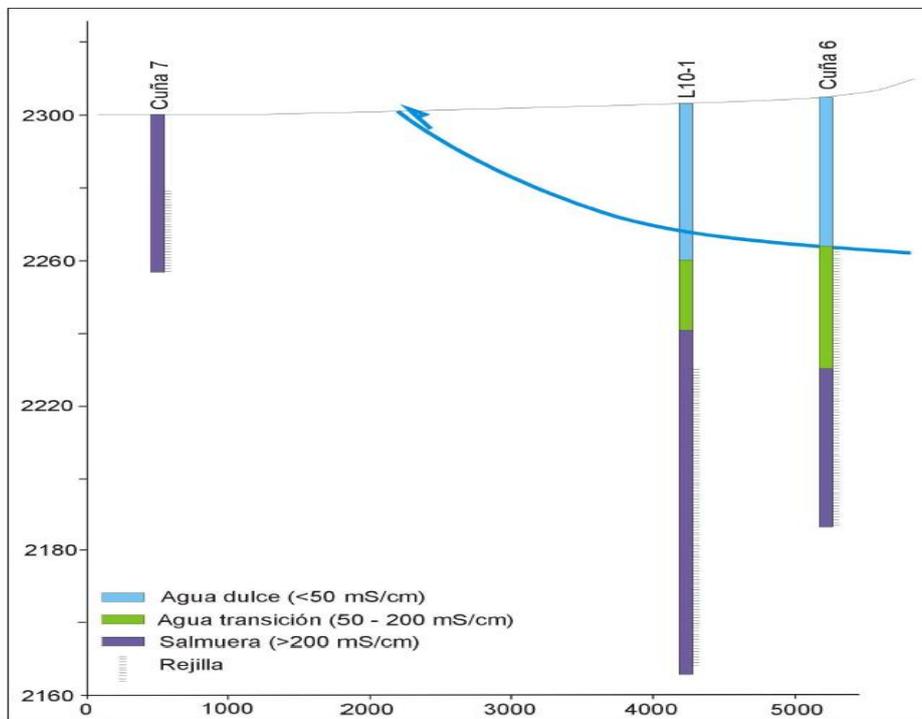


Figura 6.8.- Localización de la zona de mezcla salmuera-agua de recarga lateral en el área lagunar de Peine (Amphos-21, 2009). El eje de abscisas es la distancia en m y el eje de ordenadas es la altitud en m snm.

El Sistema Peine no recibe aportaciones superficiales externas de agua. Sólo hay descargas generadas internamente. Las descargas finales principales del Sistema Peine se muestran en la Figura 6.9. Consisten en la Laguna Salada y en la Laguna Saladita agua abajo. Ambas lagunas están comunicadas por un canal de modo que la laguna principal es la Salada. Son estables a lo largo del tiempo. Sus desbordes de agua al N, hacia el salar, forman la llamada Laguna Interna y su rosario de manifestaciones encharcadizas en el área marginal, que son variables en extensión y situación. En realidad se trata de cuerpos de agua de rebose. El agua circulante puede llegar ocasionalmente hasta el salar.

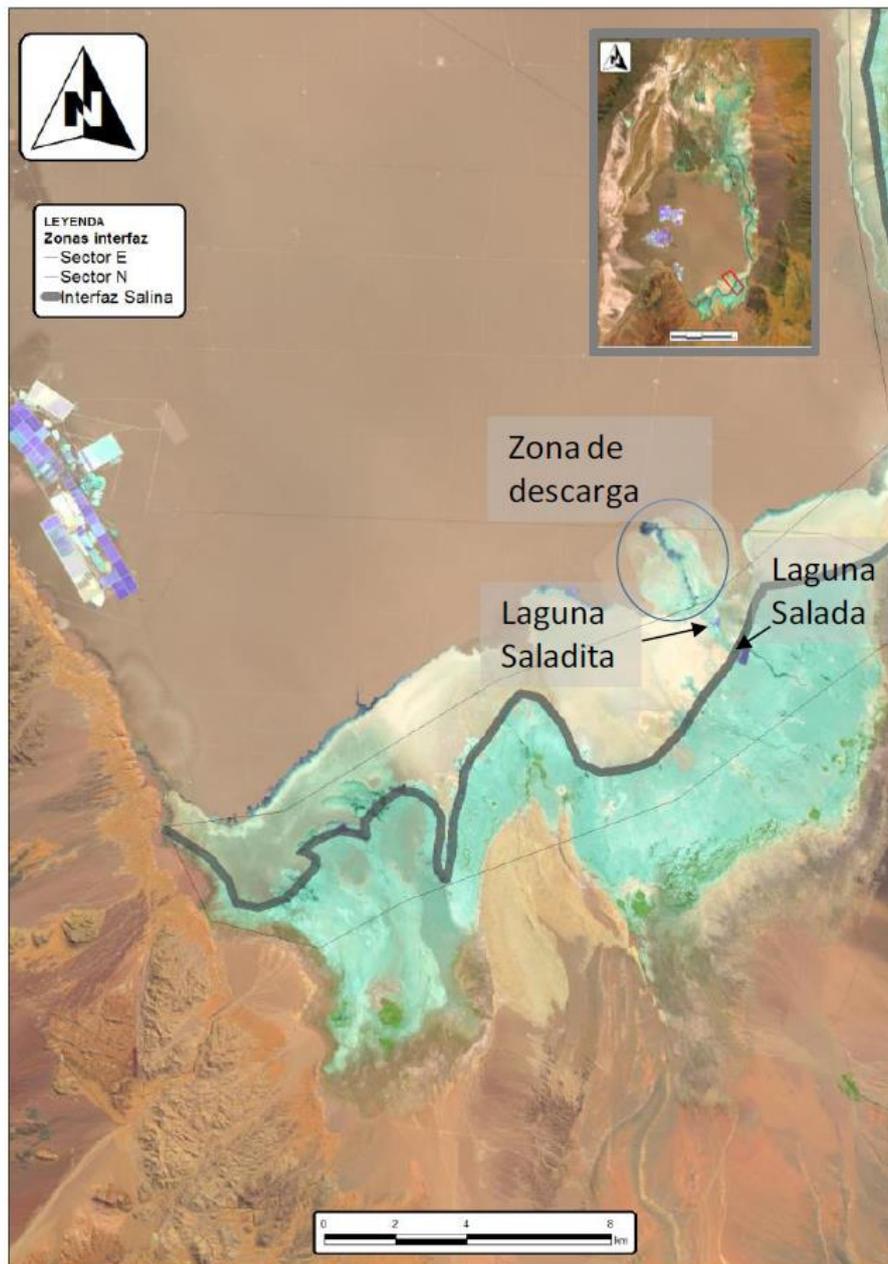


Figura 6.9.- Descargas principales del Sistema Peine: laguna Salada al SE, laguna Saladita el NW y desbordes de agua hacia el salar que forman la llamada laguna Interna y otros cuerpos de agua asociados variables.

La evolución química en el tránsito hacia el salar es el de concentración por evaporación y finalmente procesos adicionales que permiten la precipitación de carbonatos y la disolución de halita, según el momento, como se muestra en la Figura 6.10. Una consideración más completa debe incluir el flujo de salmuera dentro de la zona de mezcla. En el gráfico $\delta^{18}\text{O}$ en función de $\delta^2\text{H}$ para la isotopía del agua (valores en ‰ V-SMOW) de la Figura 6.11 se muestra la evaporación progresiva lagunar, la mezcla de agua inicial con salmuera y las posibles mezclas entre ellas. La interpretación hidrogeoquímica se muestra en la Figura 6.12. La Figura 6.13 muestra la piezometría del Sistema Peine correspondiente a diciembre de 2015. La ubicación de los puntos de muestreo y estudio se muestra en la Figura 6.14.

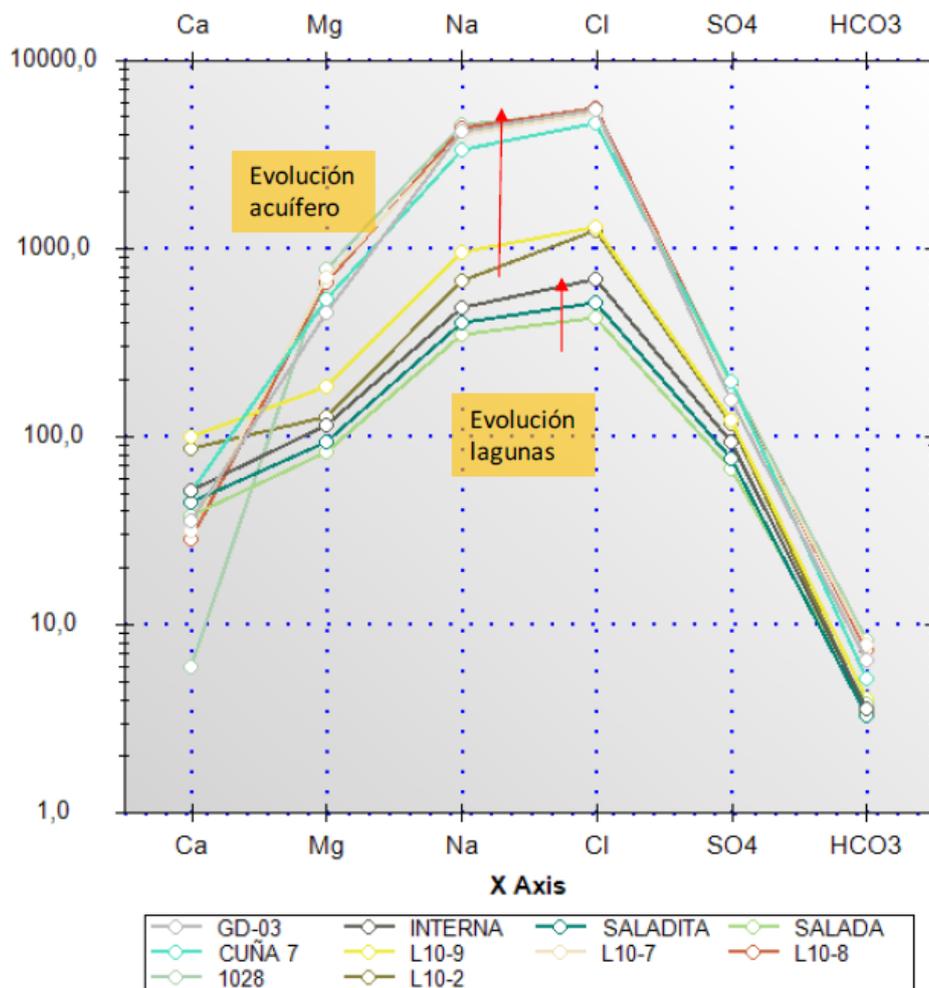


Figura 6.10.- Evolución hidroquímica de las aguas del Sistema Peine por las Lagunas Salada y Saladita en el tránsito hacia el salar y en el sistema de rebose que forma la Laguna Interna, con progresiva lenta salinización por evaporación y efecto de mezcla con la salmuera. Aguas abajo sigue la concentración con precipitación de calcita y de yeso-anhidrita. La escala vertical de concentraciones es en meq/L

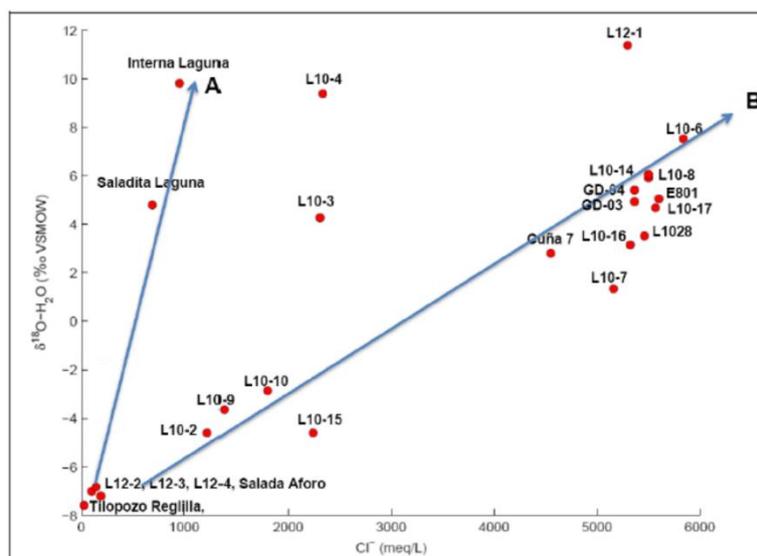
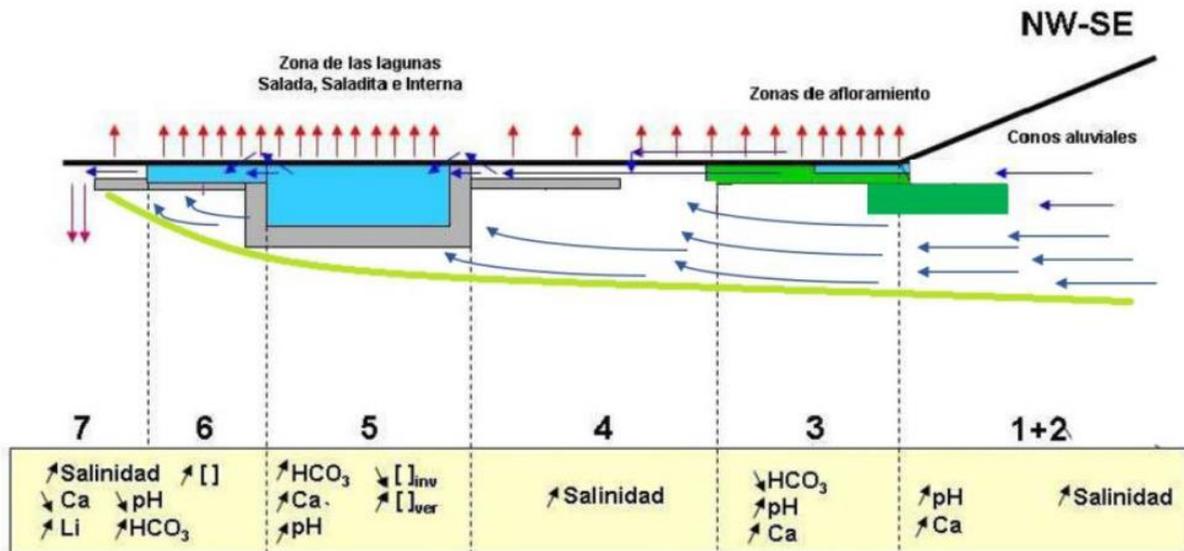


Figura 6.11. Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ en función de $\delta^2\text{H}$ para la isotopía del agua (valores en ‰ V-SMOW). Se observa la evaporación progresiva lagunar entre la laguna Salada y la laguna

Saladita, la mezcla de agua inicial con salmuera y las posibles mezclas entre ellas. El agua de recarga del sistema es isotópicamente ligera, correspondiente a altitudes claramente superiores a la del salar. Posiblemente es una mezcla de aguas recargadas en las laderas superiores, hasta altitudes de 5000 m.



Sectores / procesos

- 1: circulación conos aluviales. Disolución componentes evaporíticos. Ascenso zona cuña
 - 2: interacción y disolución costra carbonatada y sulfatada
 - 3: desbordamiento y equilibrio condiciones meteóricas (CO₂ y evaporación). Infiltración
 - 4: circulación superficial y subsuperficial. Infiltración
 - 5: interacción arcillas y materia orgánica. Mezcla aguas superficiales y evaporación. Gran variación estacional
 - 6: desbordamiento aguas de la laguna y evaporación
 - 7: circulación subsuperficial e infiltración
- []: concentraciones solutos

Figura 6.12.- Interpretación hidrogeoquímica según AMPHOS21 (2009) de la evolución del agua superficial y subterránea en el sistema Peine en su tránsito hacia el salar. La existencia de sedimentos arcillosos ricos en materia orgánica puede tener un papel relevante y facilitar la formación de umbrales físicos estables que controlan el rebose de las lagunas. La línea verde-amarilla representa la posición de la interfaz (zona de mezcla). No se considera la recirculación hidrodinámica de salmuera, que es un proceso clave.

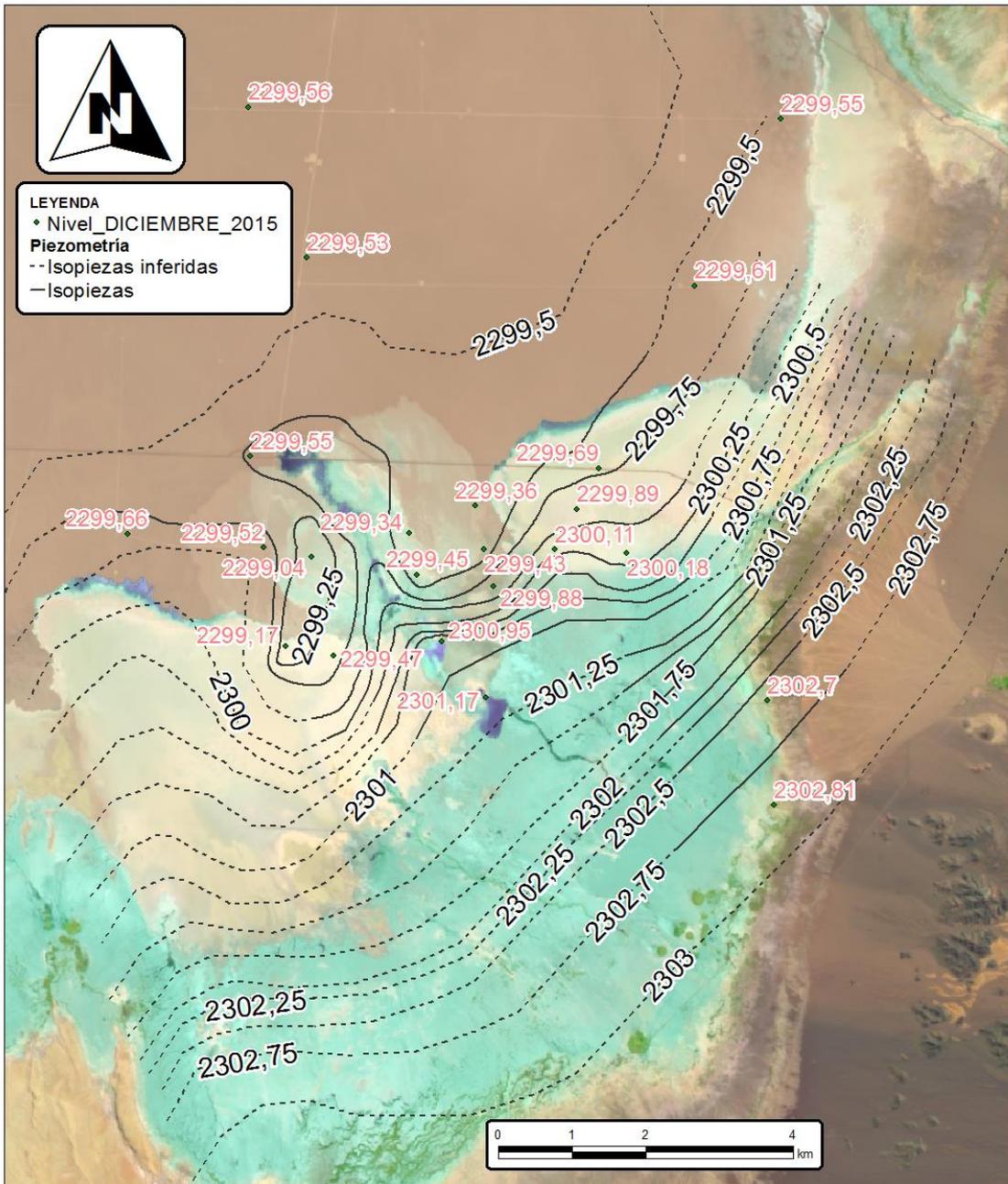


Figura 6.13.- Piezometría de detalle del Sistema Peine correspondiente a diciembre de 2015, con corrección por densidad sobre el plano de referencia 2290,00 m de altitud. El fluido de referencia es la salmuera.

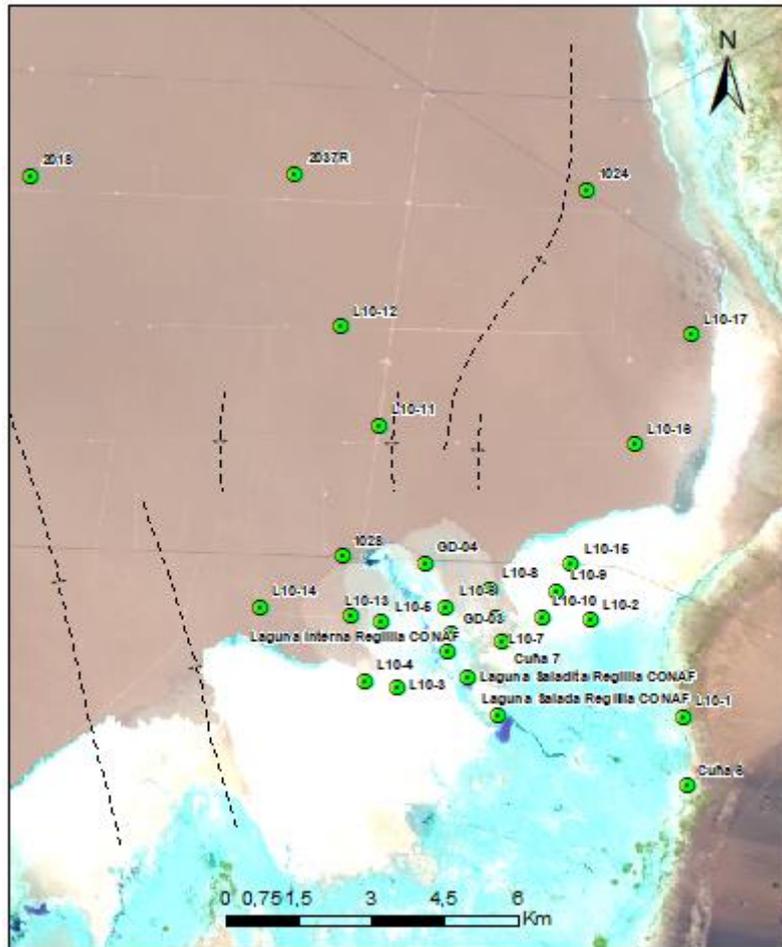


Figura 6.14.- Ubicación de los puntos de monitoreo del Sistema Peine

Los puntos de control del Sistema Peine en los que se mide el nivel del agua son tres sondeos en los depósitos salinos y tres reglillas en cada una de las lagunas Salada, Saladita e Interna (rebose). Los resultados se reflejan en la Figura 6.15 para esos seis puntos. En el área marginal hay respuesta a las lluvias y a eventos de desborde. No sucede lo mismo en el nivel en las lagunas, que es estable. Entre 1995 y 2016 (datos de PSAH, 2016) el nivel de la laguna Salada se mantiene estable a 1,18 m sobre la referencia de 2300,00 m, sin tendencia apreciable. El nivel de la laguna Saladita parte de 0,96 m y a partir de 2009 se sitúa a 0,93 m. El nivel de la laguna Interna, entre 2003 y 2015 pasa de 0,65 m a 0,60 m, con estabilización. Estas variaciones pueden ser compatibles con cambios en la tasa de evaporación total a causa de las fluctuaciones climáticas naturales

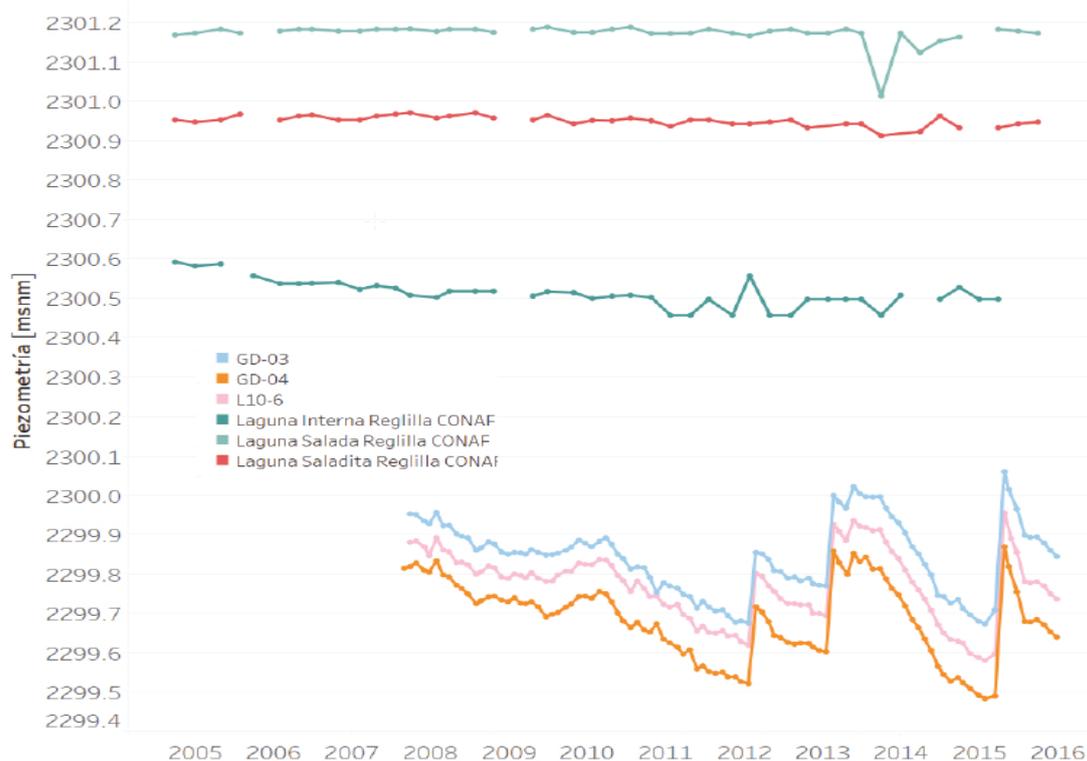


Figura 6.15.- Niveles medidos en los seis puntos de la Figura 6.14 (IDAEA-CSIC, 2017).

En el Apéndice adjunto al presente documento, se aporta una evaluación preliminar de la variabilidad química de las lagunas periféricas, que incluye a las del área de Peine.

Las características químicas principales de las lagunas del área de Peine se resumen en la Tabla 6.2. Se trata de aguas saladas, en el entorno del agua marina, con aproximadamente 1/10 de la salinidad de una salmuera saturada en cloruro sódico. Entre 1995 y 2008 las lagunas Salada y Saladita se mantienen estables, con valores respectivos de 30-40 y 30-50 mS/cm, pero a partir de 2008, aproximadamente, existe una ligera tendencia al aumento, que se define con mayor claridad a partir de 2011, hasta 35-60 y 40-65 mS/cm respectivamente. Este aumento no se observa bien en la laguna interna, más fluctuante, que se mantiene en 30-70 mS/cm. Cabe explicar este aumento por un menor flujo a través de las lagunas, sin variación sensible de nivel, que supone mayor evaporación relativa y mayor reciclado de la zona de mezcla, aunque con variación inferior al 20%. El periodo de observación es corto para definir si se tiende a un nuevo estado de estabilidad dentro de las fluctuaciones estacionales por causas naturales, pero es probable que así sea y en cierto modo se insinúa.

El cambio total es apreciable pero relativamente moderado y posiblemente similar o menor que el rango de valores esperable de los ciclos hidrológicos naturales. Esto último no se puede cuantificar con los datos y herramientas disponibles. La tendencia al ascenso de la salinidad de las lagunas del área de Peine, que están relacionadas, muy difícilmente sería atribuible a la extracción de agua industrial de SQM ya que la simulación matemática muestra un efecto muy pequeño y por lo tanto cabe pensar en otras acciones en la propia cuenca de alimentación (recarga). El efecto en la conductividad eléctrica como consecuencia de un eventual descenso del nivel de salmuera en la zona del salar y marginal sería de sentido contrario al observado.

Tabla 6.2.- Resumen de la composición química de las lagunas del Sistema Peine, según los datos de CONAF entre 1995 y 2015 contenidos en el PSAH (2016). LSda = Laguna Salada; LSta = Laguna Saladita; LInt = Laguna Interna; i = rango frecuente de valores al principio; f = rango frecuente de valores al final. Valores en g/L

ión	LSda i	LSda f	LSta i	LSta f	LInt i	LInt f
Ca	0,2-0,5	0,4-1,0	0,4-0,8	0,5-0,8	0,7-0,9	0,8-1,2
Mg	0,5-1,2	1,0-1,6	0,6-1,2	0,8-1,6	0,6-1,5	1,0-2,0
Na	4-9	8-12	6-12	8-14	7-12	8-16
K	0,9-1,4	1,4-2,0	2	2	1,0-2,0	1,0-2,5
Cl	12-17	15-22	12-25	15-25	12-30	15-25
SO ₄	2-4	2-4	2-5	2-5	2-5	2-5
HCO ₃	0,25	0,20	0,20-0,25	0,16-0,26	0,25	0,25

En el Anexo V-2dD de variación estacional de la superficie lagunar, de la Cuarta Actualización del Modelo Hidrogeológico del Salar de Atacama, realizado por IDAEA-CSIC (2017) para SQM, se muestra la evolución de la superficie lagunar en el área de Peine, según las imágenes satelitales. Cubren mensualmente los años 2014 y 2015 y se indica el caudal medio mensual saliente de las lagunas Salada y Saladita y la precipitación acumulada en el periodo entre imágenes. No se produjeron lluvias directas sobre el área, salvo un evento moderado en junio de 2014 y otro intenso (27,5 mm) en abril de 2015. El caudal de descarga subterránea que aflora desde la cuenca hidrogeológica varía entre 0 y 200 L/s de media mensual. Los momentos sin aporte corresponden principalmente al periodo octubre 2014-abril 2015. Los caudales más frecuentes están en el intervalo 60-100 L/s. No se aprecia variación en la superficie de las lagunas Salada y Saladita, pero se producen cambios importantes en los cuerpos de agua de la parte aguas abajo. Este sistema de reboses asociado a la Laguna Interna estuvo casi seco en 2014 y mantuvo un notablemente mayor encharcamiento después de la lluvia extraordinaria de febrero de 2015, con tendencia a remitir hacia finales de ese año.

En principio parece que la estabilidad del nivel y la superficie lagunar podrían estar controladas por umbrales físicos de rebose, posiblemente de precipitación, como ya se exponen en AMPHOS21 (2009), que en parte pueden estar relacionados con la existencia de sedimentos arcillosos ricos en materia orgánica en su base y entorno. Un conocimiento más detallado de la génesis geológica, quizás acompañada de dataciones, puede ser de interés aplicado, así como un estudio de detalle morfológico y de geología somera (primeros metros). Esto ayudaría a proponer medidas de monitoreo y, en su caso, de conservación y quizás de intervención de cara al futuro en caso de evolución por la dinámica natural. Cabe recordar aquí que se trata de sistemas morfológicamente dinámicos en estado natural, que pueden cambiar tras eventos naturales ocasionales. Esta evolución no es conocida. Se podría tratar de deducir mediante un estudio de detalle de la sedimentación local.

En cualquier caso, los periodos de observación son cortos con respecto a las variaciones interanuales y las a largo plazo, de tipo climático de baja frecuencia.

Es recomendable disponer de algunos puntos adicionales de observación en la zona marginal próximos a la zona de afloramiento y de agua dulce, con el propósito de conocer mejor estos aportes.

El efecto de las extracciones de agua industrial de SQM en el área del Sistema de Peine es despreciable, inferior a 1 mm, como se ve en la Figura 3.13, resultante de simulación con el modelo numérico. La mayor influencia es la de descenso del nivel de salmuera en el borde del núcleo y en la zona marginal. Para cuantificarlo, con el modelo numérico de simulación se compara el hidrograma de niveles piezométricos en 19 puntos del área con registros históricos, según figura en el Anexo 1, con el resultado de suprimir las acciones mineras sobre la salmuera y las extracciones de agua industrial. Los efectos son milimétricos, imperceptibles en la parte más alejada del salar, y en resto sólo son debidas a las acciones sobre la salmuera, crecientes desde menos de 1 cm hasta un máximo de 12 cm en el interior del propio núcleo, aunque en general quedan por debajo de 8 cm.

Conclusión

En el área de Peine se dispone de suficiente información para analizar sus características, estudiar, la influencia de las actuales extracciones de agua industrial sobre las lagunas y ver su evolución para apreciar los posibles cambios que puedan haber acontecido. No obstante, sería de interés incrementar en futuro la red de monitoreo. El resultado del estudio de la información disponible en el entorno del Sistema Peine es que no se aprecia tendencia evolutiva significativa en las cantidades, más allá de las variaciones ordinarias y las que se derivan de los efectos de algunos eventos de lluvia ocasionales y una mayor variabilidad del nivel de salmuera. Dado que se trata de un sistema dinámico, la interpretación de los cambios observados en la composición iónica mayoritaria requiere considerar los factores locales y un marco temporal más largo, pero que parecen responder a la dinámica esperable y que tiende a una estabilización.

Apéndice Variabilidad química del agua de las lagunas

El agua de las lagunas presenta variación a lo largo del tiempo, además de las espaciales por diferencias de mezcla y evaporación. Las causas de estas variaciones podrían ser eventualmente r naturales y antrópicas.

Las variaciones naturales pueden ser principalmente debidas a las variaciones de evaporación y recarga estacionales e interanuales de ciclo de varios años, que pueden ser más largos que el del periodo de muestreo. También hay variaciones por cambios en el punto de muestreo en función de la accesibilidad, cambio en el perímetro y en el nivel del agua; para minimizarlo se busca un punto fijo de rebose o en el caso de un sondeo, en condiciones bien definidas.

Las variaciones pueden ser debidas a cambios en el balance de agua por extracciones o inyecciones o por modificación de la recarga o de las condiciones físicas de los cuerpos de agua y sus cauces, todo ello por causas antrópicas.

En general, la explotación de salmuera disminuye su potencial hidráulico y eso induce un lento desplazamiento de la zona de mezcla hacia el núcleo y su profundización, con lo que se espera una disminución de la salinidad en las lagunas periféricas. Este efecto es pequeño en el Salar de Atacama, poco marcado en el N y E y algo más en Peine y Tilopozo. Por otro lado, la extracción de agua que se hace por otras entidades reduce la llegada de agua lateral y como consecuencia se acerca la zona de mezcla a la periferia, se hace menos profunda y aumenta la salinidad de las lagunas por advección-difusión además de por evaporación al aumentar el tiempo de renovación. En la realidad se suman

ambos fenómenos opuestos, pero el efecto de la extracción de agua industrial por otros domina en el N y E, mientras que no es definible a priori en el S, donde se añaden otras acciones más alejadas que se realizan en la cuenca.

Los datos disponibles proceden de la vigilancia ambiental que lleva a cabo la CONAF y la de las empresas del sector (SQM, Albermarle). Para evitar problemas de referenciación se da prioridad a la serie más extensa de un determinado lugar cuando hay datos de otros orígenes.

Las series de datos se entienden entre la segunda mitad de 1995 y la primera mitad de 2017, con un vacío entre 2002 y 2007.

Se hace una estimación preliminar de la variabilidad mediante inspección visual de las representaciones gráficas a lo largo del tiempo, tratando de cuantificar en lo posible, aunque no es evitable una cierta subjetividad en algunos casos en cuanto a calificación de cambios y no consideración de valores posiblemente anormales por posibles errores analíticos o manuales. Un tratamiento más detallado y cuantitativo requiere un esfuerzo matemático notable, cuya justificación es discutible.

Se consideran los datos del área de Soncor (Laguna de Barros Negros, Chaxa y Puilar, con muestreos en los rebosaderos realizados por CONAF), Aguas de Quelana representada por el sondeo L4-10 (en realidad el valor medio de las dos profundidades, según datos de SQM), área de Peine (lagunas Salada, Saladita e Interna, muestreadas por CONAF en la orilla con ciertas variaciones según el estado de la laguna) y en el área de Tilopozo (lagunas de La Punta y La Brava, muestreadas por RWD, actual Albermarle, y sólo con datos recientes).

Se consideran los periodos:

A.- 1995-2002, que ya existe extracción moderada de salmuera y de agua industrial

B.- Lapso sin datos 2002-2007, al final del cual se inicia mayor extracción de salmuera

C.- 2007-2011 con extracción de salmuera y de agua de los pozos de agua industrial de SQM

D.- 2011 como año de plena extracción de agua industrial por SQM

E.- 2011-2017 en situación actual

Se observan notables fluctuaciones en los valores químicos de los distintos componentes que se pueden atribuir a errores analíticos, inestabilidad de los métodos y aumento inducido de la variabilidad, en especial en el periodo E. En el periodo A hay grandes fluctuaciones que parecen debidas a problemas analíticos que se traducen en errores en el balance iónico.

En el Anexo 2 se comparan las sumas de cationes (Cat) y de aniones (An), en meq/L. Al mismo tiempo se representa la conductividad eléctrica CE, como $CE(\mu S/cm)/A$ en la que A es un factor que produce el mejor ajuste posible a Cat y An. Estos factores varían entre 60 para las aguas más concentradas y 90 para las aguas menos salinas, en coincidencia con lo esperable (Sección 4, en Custodio y Llamas, 1976).

Para analizar las variaciones hidroquímicas se ha representado las variaciones temporales en concentración ponderal con todos los datos disponibles (información que no se incluye en este informe) de cada uno de los iones mayoritarios (el HCO_3 como

alcalinidad total en CaCO_3), el pH y la concentración de As, y en el Anexo 3 los mismos valores para las series más largas de la misma procedencia y en escala logarítmica para relativizar las fluctuaciones. En las Figuras Ap.1 a Ap.9 se representan agrupados los diferentes iones en escala logarítmica de meq/L más la CE/100 (para evitar superposiciones) para CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

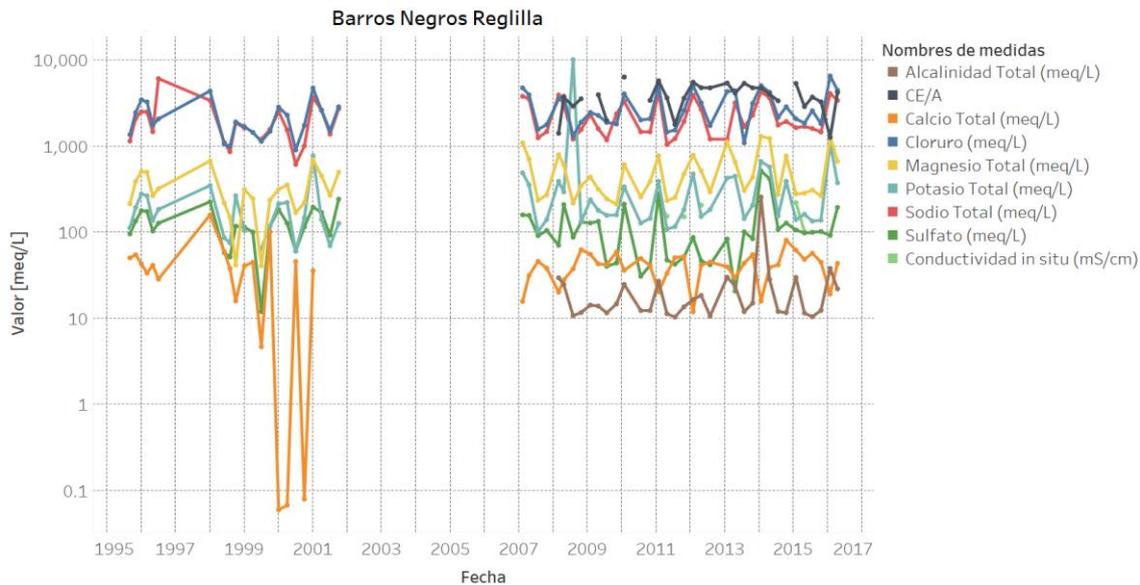


Figura Ap.1.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de CONAF de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna Barros Negros. Se superpone la CE($\mu\text{S}/\text{cm}$)/100.

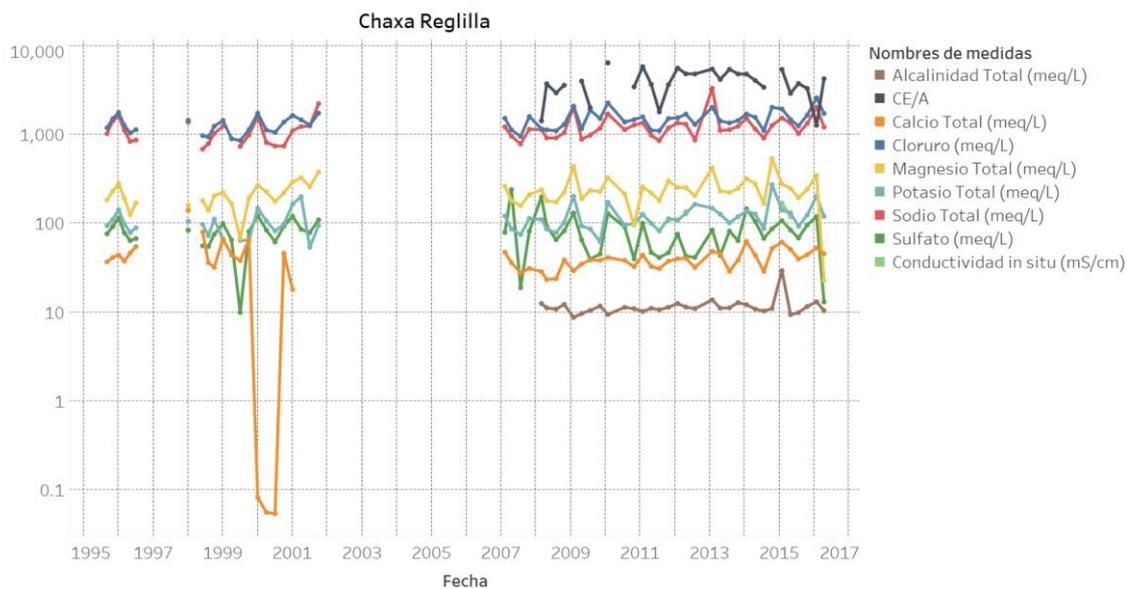


Figura Ap.2.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de CONAF de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna Chaxa. Se superpone la CE($\mu\text{S}/\text{cm}$)/100.

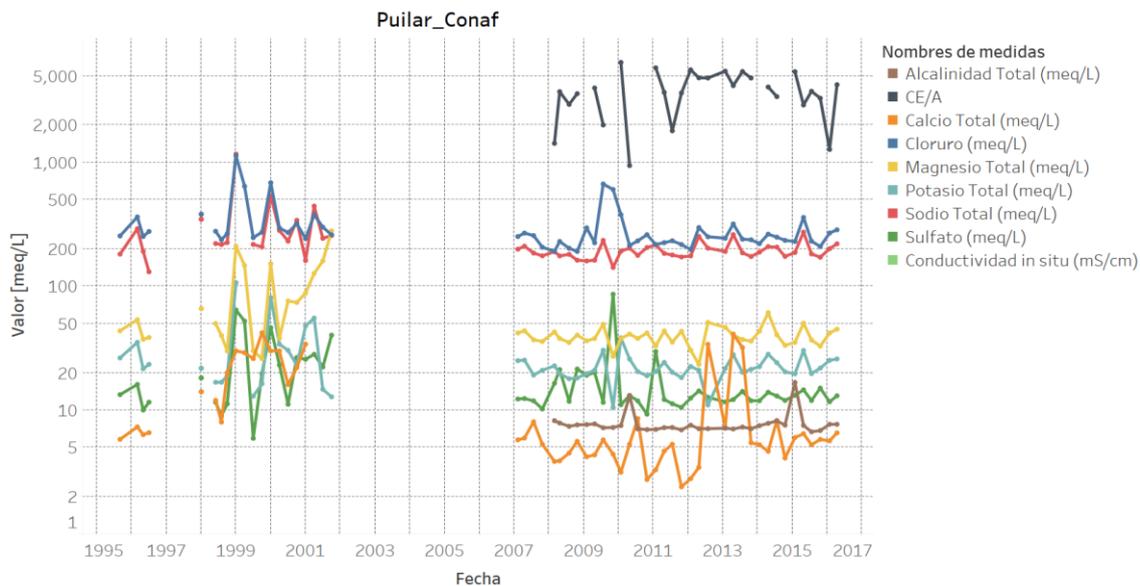


Figura Ap.3.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de CONAF de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna Puilar.

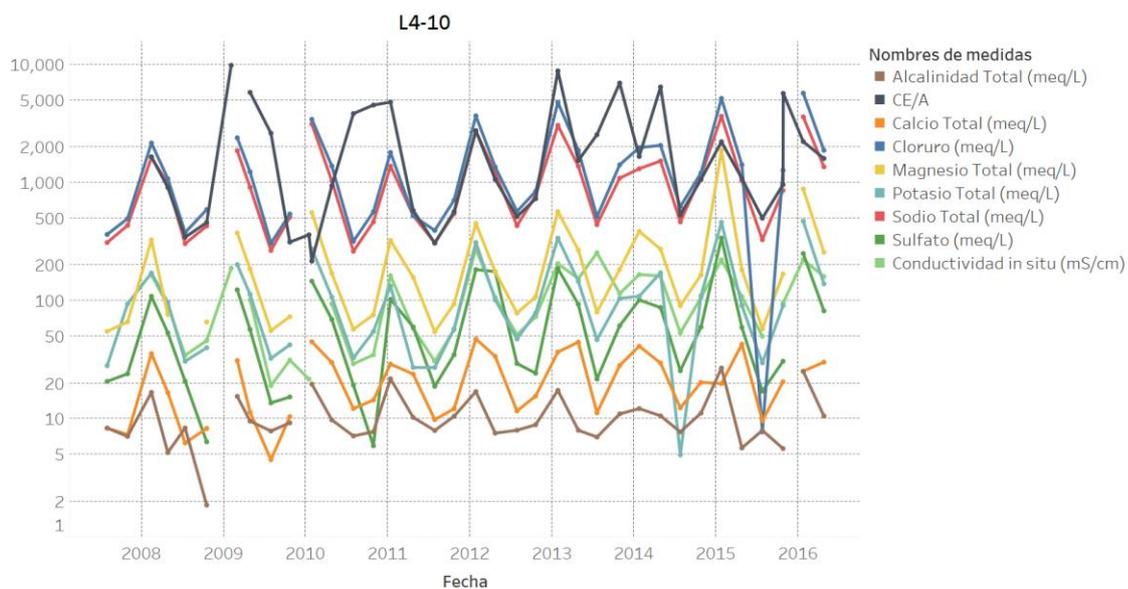


Figura Ap.4.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de SQM de las muestras de agua tomadas en el sondeo doble L4.10 en la zona marginal de Aguas de Quelana. Se superpone la CE(μ S/cm)/100.

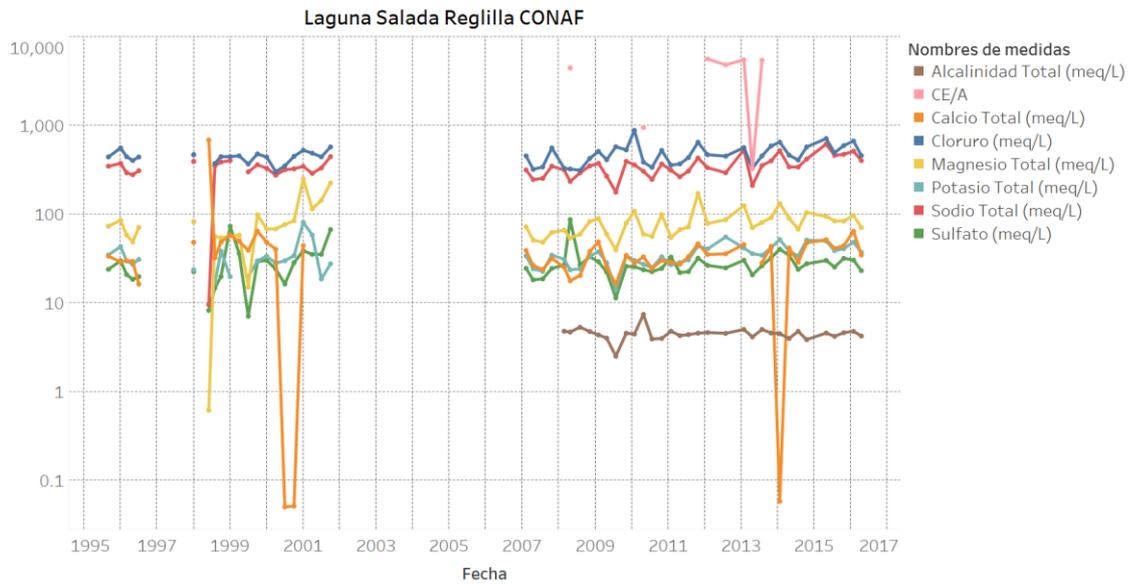


Figura Ap.5.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de CONAF de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna Salada.

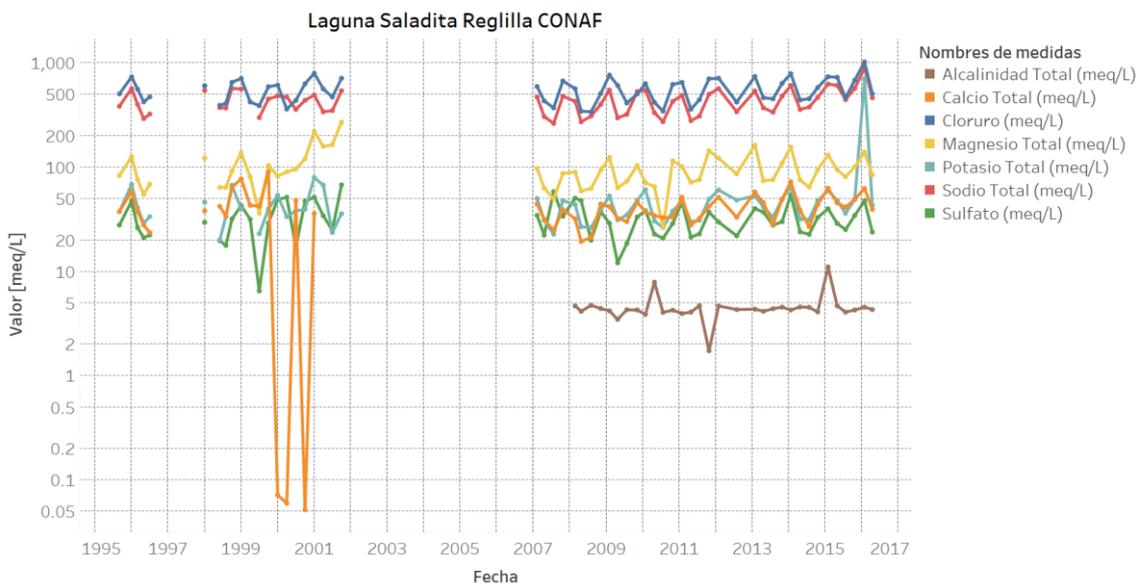


Figura Ap.6.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de CONAF de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna Saladita.

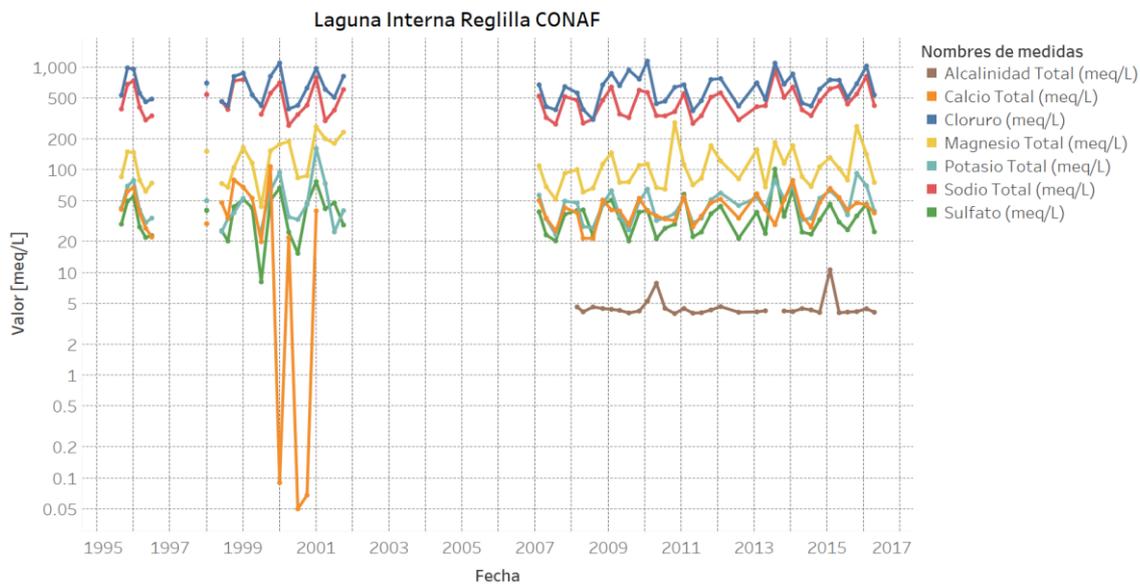


Figura Ap.7.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de CONAF de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna Saladita.

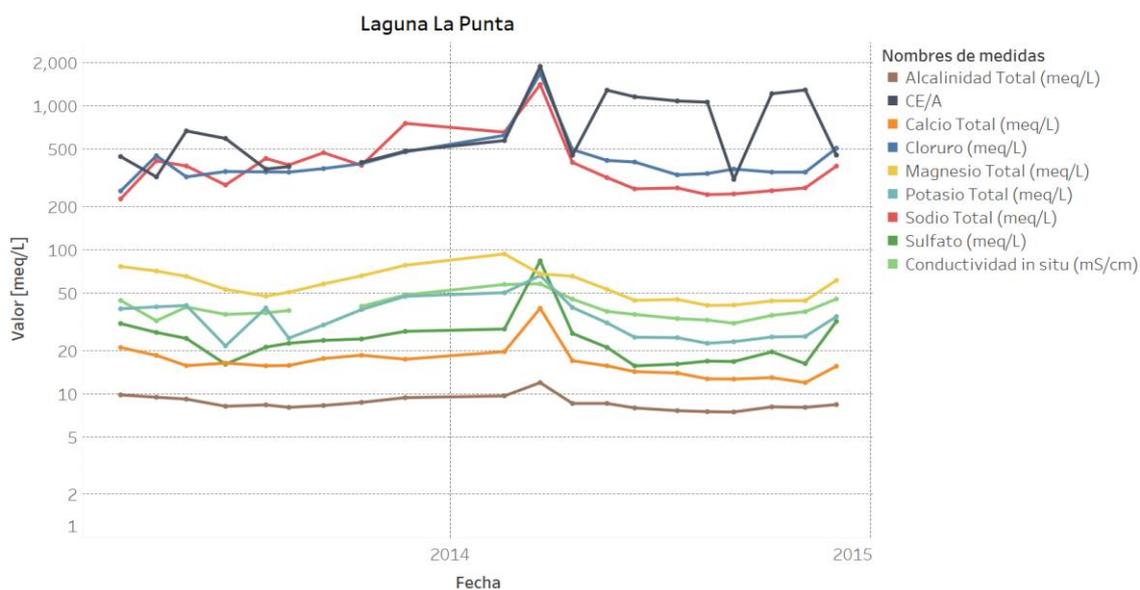


Figura Ap.8.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de RWD de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna La Punta. Se superpone la $CE(\mu S/cm)/100$.

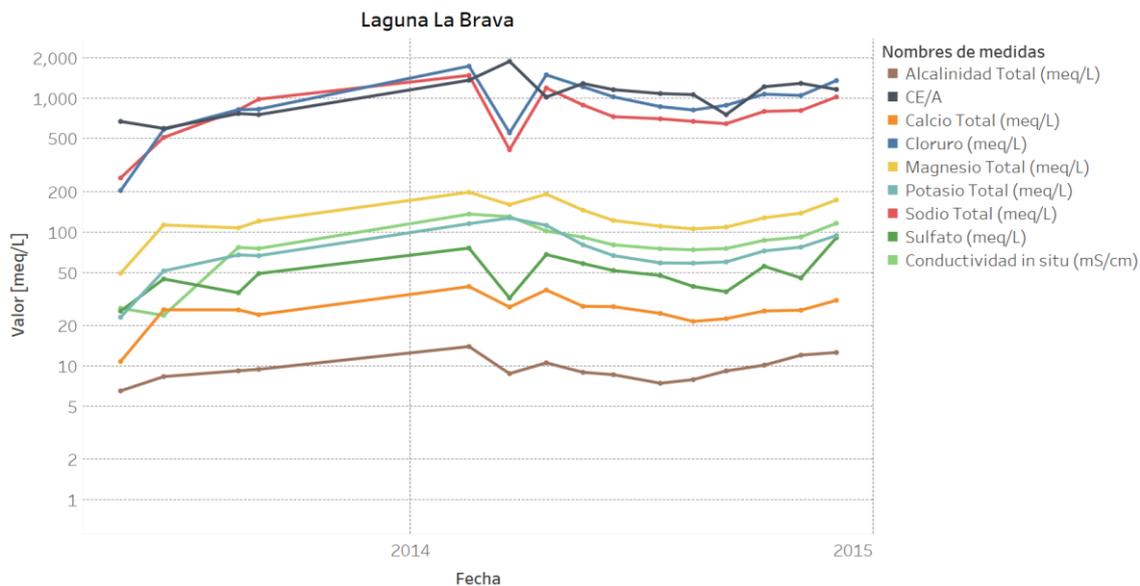


Figura Ap.9.- Representación en escala logarítmica de las series hidroquímicas de RWD de las muestras de agua tomadas en la reglilla de la laguna La Brava. Se superpone la $CE(\mu S/cm)/100$.

En la Tabla Ap.1 se muestra la estimación de los valores medianos de las concentraciones y valores químicos de las aguas de las lagunas periféricas de la serie, del tramo inicial de la serie, del tramo final de la serie y la apreciación de la amplitud normal de fluctuación dada como amplitud de variación más frecuente relativa la mediana

Tabla Ap.1 Estimación de los valores medianos de las concentraciones y valores químicos de las aguas de las lagunas periféricas. La columna b indica: c = valor de la serie; i = tramo inicial de la serie; f = tramo final de la serie; a = apreciación de la amplitud normal de fluctuación dada como amplitud de variación más frecuente relativa a la mediana

Laguna	n	pH	CE mS/cm	Cl g/l	Na g/l	K g/l	Mg g/l	Ca g/l	SO ₄ g/l	Alc g/l	As mg/L
Área de Soncor											
Barros Negros	c	7,4	180	100	45	6	5,5	0,8	10	0,7	5
	i	7,2	-	70	45	5	5	0,6	12	-	(10)
	f	7,4	160	100	60	10	6	0,9	10	0,5	2
	a	0,12	0,6	1,0	1,3	1,6	1,2	1,0	1,7	1,4	1,8
Chaxa	c	7,9	140	50	25	4,0	3,0	0,8	9	0,55	4
	i	8,0	-	35	25	3,5	2,0	0,8	6	-	8
	f	7,9	120	45	30	5,5	3,0	0,8	9	0,55	2
	a	0,10	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,5	0,2	(0,7)
Puilar	c	8,2	-	11	4,5	0,9	0,5	0,10	1,4	0,37	2,5
	i	8,4		10	6	0,9	0,6	0,10	1,4	0,10	(2,5)
	f	7,8		8	4,5	0,9	0,5	0,05	1,4	0,36	2,5
	a	0,15		0,2	0,2	0,3	0,2	0,8	0,2	0,12	0,6
Aguas de Quelana L4.10	c	8,1	(120)	60	30	6,0	2,5	0,5	10	0,5	(4)
	i	8,3		(40)	(20)	7	(2,2)	0,5	(6)	0,5	7
	f	7,8	140	80	35	7	3,0	0,5	12	0,5	(5)
	a	0,10	1,0	0,8	1,0	1,2	1,5	1,2	1,2	1,0	(1,2)
Área de Peine											
Salada	c	8,2	-	16	7	1,2	0,9	0,8	2,5	0,22	1

Laguna	n	pH	CE mS/cm	Cl g/l	Na g/l	K g/l	Mg g/l	Ca g/l	SO ₄ g/l	Alc g/l	As mg/L
	i	8,2		16	8	1,2	0,8	0,6	2,0	(0,20)	(2)
	f	(7,8)		19	11	1,6	1,6	0,9	2,6	0,22	0,7
	a	0,15		0,4	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4	0,15	0,6
Saladita	c	8,2	-	18	10	1,6	1,0	0,7	2,8	0,22	3
	l	8,2		16	9	1,4	1,0	0,5	2,5	(0,22)	(3,5)
	f	7,5		19	12	1,6	1,2	0,9	2,8	0,22	(0,5)
	a	0,12		0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,5	0,15	1,5
Interna	c	8,2		24	12	1,6	1,2	0,7	1,5	0,22	1
	i	8,3		22	11	1,5	1,2	0,7	3,0	(0,22)	(2)
	f	7,5		22	13	1,8	1,4	0,9	3,0	0,22	1
	a	0,10		0,5	0,5	0,6	0,5	0,7	0,3	0,12	0,5
Área de Tilopozo											
La Punta	c/f	8,7	40	15	8	1,3	0,7	0,3	0,22	0,42	2,2
La Brava	c/f	8,4	(90)	35	20	3,2	1,8	0,5	0,5	0,50	0,7

Se tiene los siguientes resultados sintéticos:

Laguna Barros Negros del área de Soncor: semi-salmuera de carácter muy cambiante por aportes y evaporación variables, posiblemente sobresaturada en calcita y yeso. pH bajo por posible actividad biológica y precipitación de calcita

Laguna Chaxa del área de Soncor: semi-salmuera de carácter moderadamente cambiante por evaporación variable, posiblemente sobresaturada en calcita. Posible dominio de agua subterránea.

Laguna Puilar del área de Soncor: agua salada de carácter poco cambiante por evaporación variable y evaporación cambiante. Posible dominio de agua subterránea.

Sondeo doble L4.10 del área de Aguas de Quelana: semi-salmuera de carácter cambiante por evaporación variable, posiblemente sobresaturada en calcita.

Laguna Saladita del área de Peine: salada de carácter moderadamente cambiante por evaporación variable. Posible dominio de agua subterránea. Alcalinidad regulada.

Laguna Salada del área de Peine: salada, algo más que la Laguna Saladita, de carácter moderadamente cambiante por evaporación variable. Posible dominio de agua subterránea. Alcalinidad regulada

Laguna Interna (rebose) del área de Peine: salada, algo más que las Lagunas Salada y Saladita, de carácter moderadamente cambiante por evaporación variable. Posible dominio de agua subterránea. Alcalinidad regulada

Laguna La Punta del área de Tilopozo: salada. pH alto

Laguna La Brava del área de Tilopozo: salada. pH algo alto

De la observación de la forma de cambio se obtiene lo que se expresa en la Tabla Ap.2. Parte de los cambios en los parámetros químicos son coherentes entre sí, principalmente entre Cl, Na y K, pero otros pueden tener una evolución diferente o contraria a la dominante, principalmente el Ca y en ocasiones el SO₄; puede en parte ser debido a precipitación química o a aporte de agua salina de composición influenciada por precipitaciones-disoluciones.

Tabla Ap.2 Apreciación de los cambios en la composición química del agua de las lagunas periféricas considerando los diferentes periodos de tiempo en las series: A.- 1995-2002 en que ya existe extracción moderada de salmuera y de agua industrial; B.- Lapso sin datos 2002-2007, al final del cual se inicia mayor extracción de salmuera; C.- 2007-2011 con extracción de salmuera y de agua de los pozos de agua industrial de SQM; D.- 2011 como año de plena extracción de agua industrial por SQM; y E.- 2011-2017 en situación actual. La simbología utilizada es: = sin cambio significativo; a tendencia al ascenso; d tendencia al descenso; s subida rápida; b bajada rápida; - sin datos; ¿ situación dudosa; * grandes fluctuaciones; entre paréntesis si el cambio no es claro; gran cambio si el símbolo se duplica.

Laguna	tramo	pH	CE	Cl	Na	K	Mg	Ca	SO ₄	Alc	As
Área de Soncor											
Barros Negros	A	-	-	=	=	=	=	*	=	-	-
	B	b	-	=	s	s	s	=	=	-	-
	C	=	*	=	=	=	=	=	=	=	(=)
	D	b	s	s	=	s	s	=	=	=	¿
	E	d	d	=	=	=	=	=	=	=	¿
Chaxa	A	=	-	=	=	=	a	=	(a)	-	-
	B	=	-	=	=	=	=	b	(=)	-	-
	C	d	=	(a)	(a)	=	=	a	d	(a)	=
	D	=	=	=	=	s	=	=	b	=	b
	E	d	=	a	a	a	s	a	a	=	=
Puilar	A	-	-	=	=	=	a	a	(=)	-	-
	B	-	-	b	(b)	(b)	b	b	b	-	-
	C	-	-	=	=	=	=	(d)	=	=	=
	D	b	-	(s)	=	=	=	s	b	=	=
	E	(a)	-	=	(a)	(a)	=	=	(a)	=	=
Aguas de Quelana L4.10	C	=	=	a	(a)	a	a	a	a	=	a
	D	=	s	s	(s)	s	=	=	s	=	=
	E	(d)	=	=	(a)	a	a	=	=	=	a
Área de Peine											
Salada	A	=	-	=	=	=	a	¿	¿	-	-
	B	=	-	=	=	=	b	(b)	(b)	-	-
	C	=	-	=	=	=	a	=	=	=	-
	D	(a)	-	(s)	s	ss	(s)	=	s	=	b
	E	=	-	=	a	=	=	a	=	=	-
Saladita	A	=	-	=	=	=	a?	(=)	=	-	-
	B	=	-	=	=	s	d	d	=	-	-
	C	=	-	=	=	a	a	=	=	=	=
	D	d	-	=	=	=	=	=	(d)	=	dd
	E	=*	-	a	a	=	=	a	=	=	=
Interna	A	(=)	-	=	=	(=)	(a)	(=)	(=)	-	-
	B	=	-	=	(b)	=	b	(=)	=	-	-
	C	=	-	=	=	=	a	=	=	(a)	=
	D	b	-	=	s	=	=	=	(s)	=	b
	E	=	-	=	a	a	=	a	=	=	=
Área de Tilopozo											
La Punta	E	(=)	-	a	=	=	(d)	d	=	(d)	(=)
La Brava	E	(a)	¿	a	(=)	a	a	=	a	(a)	¿

La información de la Tabla Ap.2 se puede resumir en lo que expresa la Tabla Ap.3 en cuanto a las tendencias generales. Mientras la laguna de Barros Negros no tiene una tendencia definida, en todas las otras se aprecia una tendencia al aumento de la salinidad, que se queda en insinuada en la laguna de Puilar y la laguna de La Punta. El aumento se define con mayor claridad a partir de 2011. El periodo de observación es corto para definir si se tiende a un nuevo estado de estabilidad dentro de las fluctuaciones por causas estacionales, pero es probable que así sea y en cierto modo se insinúa. El cambio total es apreciable pero relativamente moderado y posiblemente similar o menor que el rango de valores esperable de los ciclos hidrológicos naturales. Esto último no se puede cuantificar con los datos y herramientas disponibles. La tendencia al ascenso de la salinidad de las lagunas del área de Peine (las tres están relacionadas) no parece atribuible a la extracción de agua industrial de SQM ya que la simulación matemática muestra un efecto muy pequeño y por lo tanto cabe pensar en otras acciones en la propia cuenca de alimentación (modificaciones en la recarga). El efecto del descenso del nivel de salmuera en la zona del salar y marginal sería de sentido contrario.

La causa principal de la tendencia al aumento parece ser la disminución del aporte de agua lateral (recarga), que se traduce en cierto ascenso y expansión de la zona de mezcla y del mayor tiempo de renovación que comporta una mayor evaporación. Esta disminución de los aportes laterales se puede identificar con la acción de extracción de agua lateral por los distintos actores presentes en el área, sin dejar de tener en cuenta la tendencia natural.

Tabla Ap.3 Resumen de las tendencias principales dominantes que se deducen de las las apreciaciones de la Tabla Ap.2. Se usa la siguiente simbología: = sin cambio significativo; a tendencia al ascenso; d tendencia al descenso; s subida rápida; b bajada rápida; - sin datos; entre paréntesis si el cambio no es claro.

Laguna	1995-2002	2002-2007	2007-2011	2011	2011-2017	General
Barros Negros	=	(s)	=	s	=	=
Chaxa	(=)	=	=	s	a	a
Puilar	(=)	b	=	(s)	a	(a)
Aguas de Quelana Sondeos L4.10			a	s	a	a
Salada	(a)	(=)	(a)	a	a	a
Saladita	(=)	(=)	(a)	=	a	a
Interna	=	(=)	=	(c)	a	a
La Punta						(a)
La Brava						a

Agradecimientos

SQM, ha aportado la documentación y las elaboraciones complementarias requeridas y acordadas en reuniones de discusión.

El Dr. Enric Vázquez-Suñé, del IDAEA-CSIC, autor-coordinador de la muy reciente cuarta revisión del modelo del salar, ha apoyado con documentación, comentarios e ideas de relevancia.

Referencias utilizadas y consultadas

- Álvarez, J.A., Villagra, P.E., Cony, M.A., Cesca, E.M., Boninsegna, J.A. (2006). Estructura y estado de conservación de los bosques de *Prosopis flexuosa* D.C. (Fabaceae, subfamilia: Mimosoideae) en el noreste de Mendoza (Argentina). *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(1):75-87
- Arcadis (2016). Estudio hidrogeológico del Sistema Soncor orientado al Plan de Contingencia del Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera en el Salar de Atacama. Proyecto 4582. Santiago de Chile. 1-100
- Aravena, R., Salas, J., Cornellà, O., Guimerà, J., von Igel, W., Guzmán, E., Tore, C. (2009). Evaluation of sources of water to lagoons, Salar de Atacama basin: an isotope and geochemical approach: 1-9.
- Bobst, A.L., Lowenstein, T.K., Jordan, T.E., Godfrey, L.V., Ku, T-L., Luo, S. (2001). A 106 ka paleoclimate record from a drill core of the Salar de Atacama, northern Chile. *Paleogeography, paleoclimatology, Paleoecology*, 173: 21-42.
- Boutt, D.F., Hynek, S.H., Munk, L.A., Corenthal, LG. (2016). Rapid recharge of fresh water to the halite-hosted brine aquifer of Salar de Atacama, Chile. *Hydrological Processes* (on line): 21 pp.
- Amphos 21 (2009). Análisis sistemático de la información hidrológica del PSA. Informe para SQM Salar S.A. Santiago de Chile: 1-233.
- Calderon G., Garrido M., Acevedo E. (2015). *Prosopis tamarugo* Phil.: a native tree from the Atacama Desert groundwater table depth thresholds for conservation. *Revista Chilena de Historia Natural*, 88(18). doi:10.1186/s40693-015-0048-0.
- CONICET (2017). Primer informe de avance sobre estudios e investigaciones que intentan explicar el estado actual de ejemplares de algarrobo, en una población ubicada en las proximidades del pozo CAMAR 2 de SQM, en el Salar de Atacama, Chile. CONICET-Mendoza – Argentina: 1-30. Para SQM.
- Custodio, E., Llamas, M.R. (eds.) (1976). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona. 2Vols.: 1-2350.
- DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Dirección General de Aguas, Chile: 1-84. http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Atacama.pdf
- Garrido, M., Silva, P., Acavado, E. (2016). Water relations and foliar isotopic composition of *Prosopis tamarugo* Phil., an endemic tree of the Atacama Desert growing at three levels of water table depth. *Frontiers in Plant Science*, 7(article 375).
- GCL (2011). Origen de las aguas del Sistema Soncor: Hidrogeología e hidrogeoquímica, Informe final, Rev 1. Geohidrología Consultores Ltda., Santiago: 1-126
- González Loyarte, M., Rodeghiero, A.G., Buk, E., Trione, S. (2000). Análisis comparativo de dos comunidades en el bosque de *Prosopis flexuosa* dc. del NE de Mendoza, Argentina. *Muldequina* 9: 75-89. ISSN 0327-9375.
- Haase, P., Pugnaire, F.I., Fernández, E.M., Puigdefábregas, J. Clark, S.C., Insoll, L.D. (1996). An investigation of rooting depth of the semiarid shrub *Retama sphaerocarpa* (L.) Bois. by labelling of groundwater by a chemical tracer. *Journal of Hydrology*, 177: 23-31.
- Herrera, C., Custodio, E., Chong, G., Lambán, L.J., Riquelme, R., Wilke, H., Jódar, J., Urrutia, J., Urqueta, H., Sarmiento, A., Gamboa, C., Lictevout, E. (2016). Groundwater flow in a closed basin

with a saline shallow lake in a volcanic area: Laguna Tuyajto, northern Chilean Altiplano of the Andes. *Science of the Total Environment*, 541: 303-318.

IDAEA-CSIC (2017). Cuarta actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama. Memoria + Anexos+ Resumen ejecutivo. Barcelona

Lowenstein, T.K., Hein, M.C., Bobst, A.L., Jordan, T.E., Ku, T-L., Luo, S. (2003). An assessment of stratigraphic completeness in climate-sensitive closed-basin lake sediments: Salar de Atacama, Chile. *Journal of Sedimentary Research*, 73(1): 91–104.

Muñoz-Pardo, J.F., Ortiz-Astete, C., Mardones-Pérez, L., de Vidis, Sabelle, P. (2004). Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, XIX(3): 69-81.

Muñoz, J.F., Ortiz Astete, C., Chicurel, P. (2004). Modelo hidrogeológico del acuífero de salmuera del núcleo del salar de atacama. Descripción del modelo y simulaciones, II Región. DICTUC, Santiago: 1-127.

Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., Muñoz, J.F. (2013). Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2): 336-350. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.829231>

PSAH (2016). Informe nº 20 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico; proyecto de cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe de monitoreo semestral actualizado a diciembre 2016. SQM Salar S.A.: 1-321.

Rissmann, C., Leybourne, M., Benn, C., Christenson, B. (2015). The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. *Chemical Geology*, 396: 164-181.

Risacher F, Alonso H, Salazar C. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*; 2003. 63, 249–293.

Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Cornellà, O., Guimerà, J., Tore, C., von Igel, W., Fock, A., Henríquez, A. (2009). Modelo de evolución hidroquímica e isotópica de la recarga del Salar de Atacama: Soncor y Aguas de Quelana. XII Congreso Geológico Chileno Santiago: 1-4.

Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., Muñoz, J.F. (2013). Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2): 336-350. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.829231>

Salas, J., Aravena, R., Moreno, R., Juarez, I. (2009). Actualización del modelo conceptual del sector Soncor, Informe final. Amphos 21, Santiago de Chile: 1-172

Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., W. von Igel, W., R. Moreno, R. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 121 (4): 357-372

Tejeda, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J.F., Mario Durán, M. (2003). Numerical modeling of saline intrusion in salar de Atacama. *Journal of Hydrologic Engineering*, January/February 2003: 25-34.

Villagra, P.E., Mariano A. Cony, M.A., Nancy G. Mantován, N.G., Bertilde E. Rossi, B.R., González Loyarte, M.M., Villalba, R., Marone, L. (2009). En: M.F., Arturi, M.F.; J.L. Frangi y J.F. Goya (eds.), *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina* Editores: Ecología y manejo de los algarrobales de la Provincia Fitogeográfica del Monte. 35 (1): 47-61.

Villagra, P.E. (2010). *Prosopis flexuosa* DC. (Fabaceae, Mimosoideae). *Kurtziana*, 35(1).

Villagra, P.E., Giordano, C. Álvarez, J.A., Cavagnaro, J.B., Guevara, A., Sartor, C., Passera, C. B., Greco, S. (2011). Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. *Ecología Austral*, 21:29-42.

Anexos

Anexo1 Mapas y gráficos de soporte

En este anexo se incluyen los mapas y gráficos de soporte obtenidos por simulación con el modelo numérico realizado para SQM (4º actualización) por el IDAEA-CSIC (2017) para obtener las diferencias con la situación actual de los distintos escenarios de uso del agua que se discuten en el informe. Todas esas simulaciones han sido realizadas por la Gerencia de Hidrogeología Salar, según los acuerdos de apoyo derivados de las reuniones de discusión. Son para responder de forma documentada y bien asentada a las cuestiones planteadas que se derivan de los cargos formulados. Los resultados de las simulaciones son para el 31/12/2016. Se considera la totalidad del área (escenarios regionales) y las situaciones de más detalle en cuanto al área de Camar y el Sistema Peine. Todas las extracciones o sus ceses se refieren a lo que corresponde a SQM.

1.-Escenario regional base: situación actual según los datos disponibles y conjuntados de acuerdo con la calibración final del modelo. Supone extracción de aguas industriales, extracción de salmuera y retorno de salmuera (Figura A1.1).

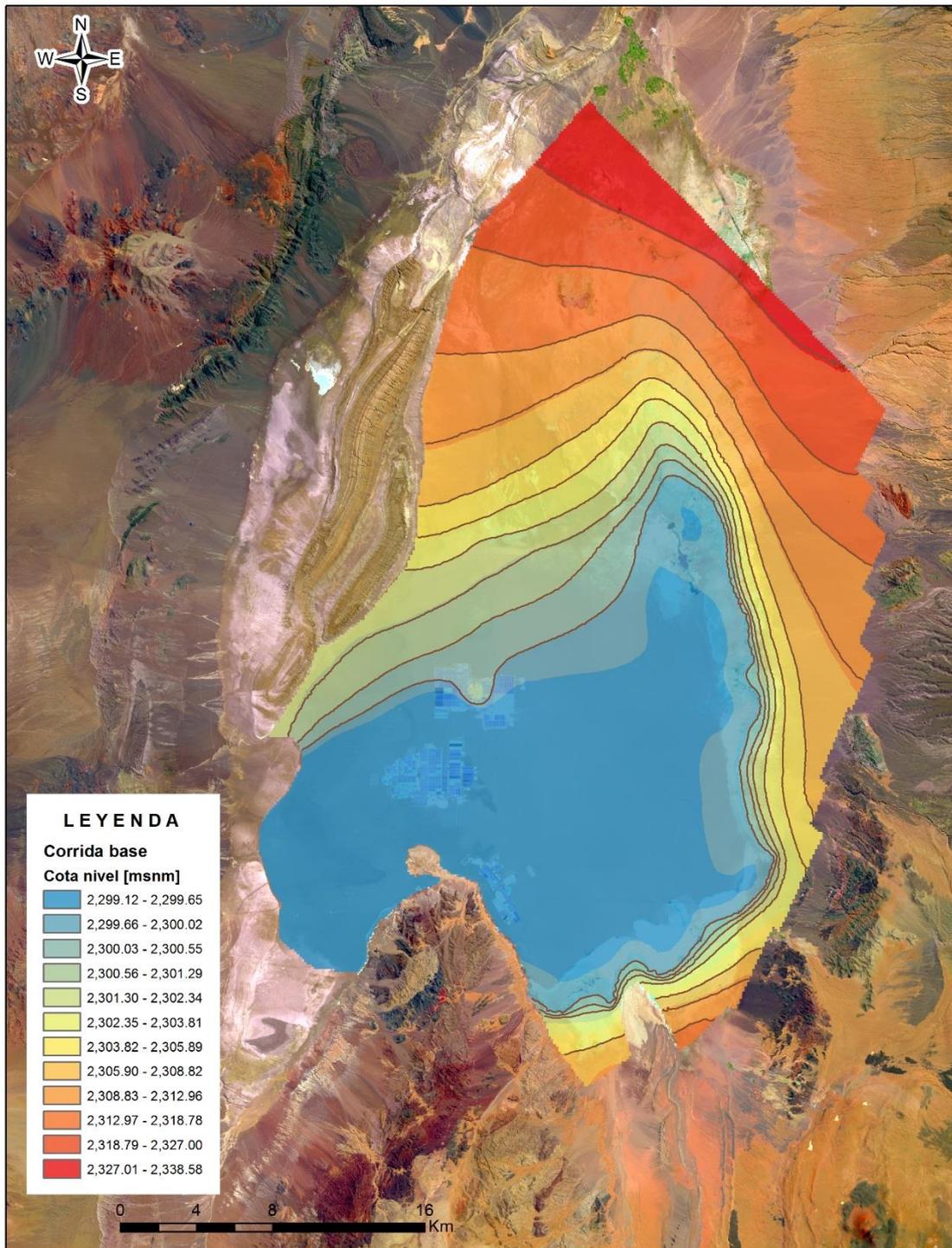


Figura A1.1. Simulación de niveles piezométricos para el caso base, actualizado a diciembre de 2016.

2.- Escenario regional sin extracción de agua industrial. Modificación del escenario base, sin extracción ($Q = 0$ L/s) en los pozos de agua industrial y con extracción de salmuera (Figuras A1.2 y A1.3).

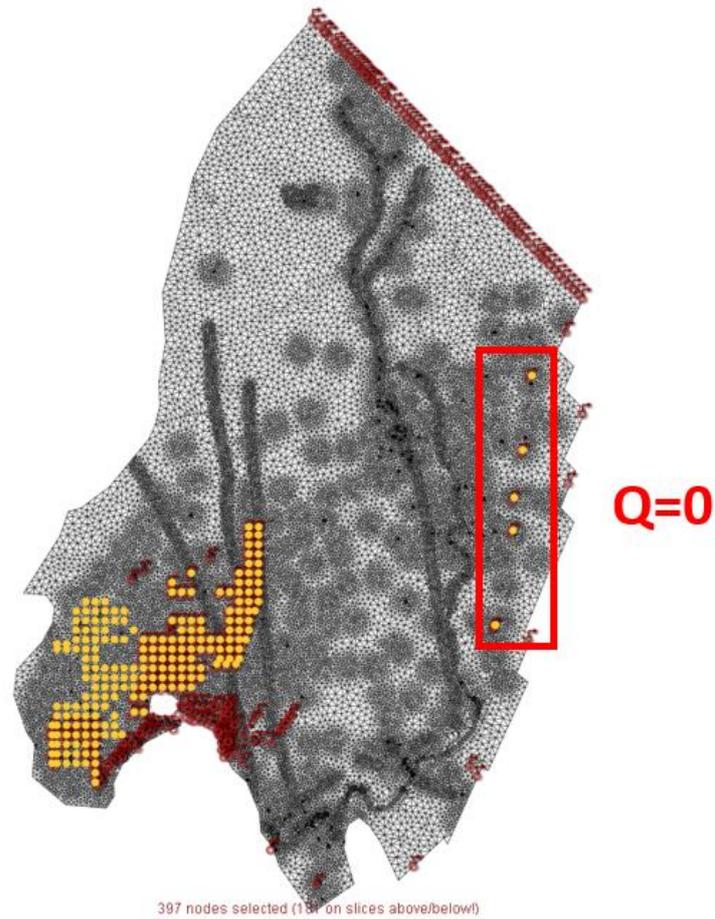


Figura A1.2. Esquema de extracciones en el escenario 2

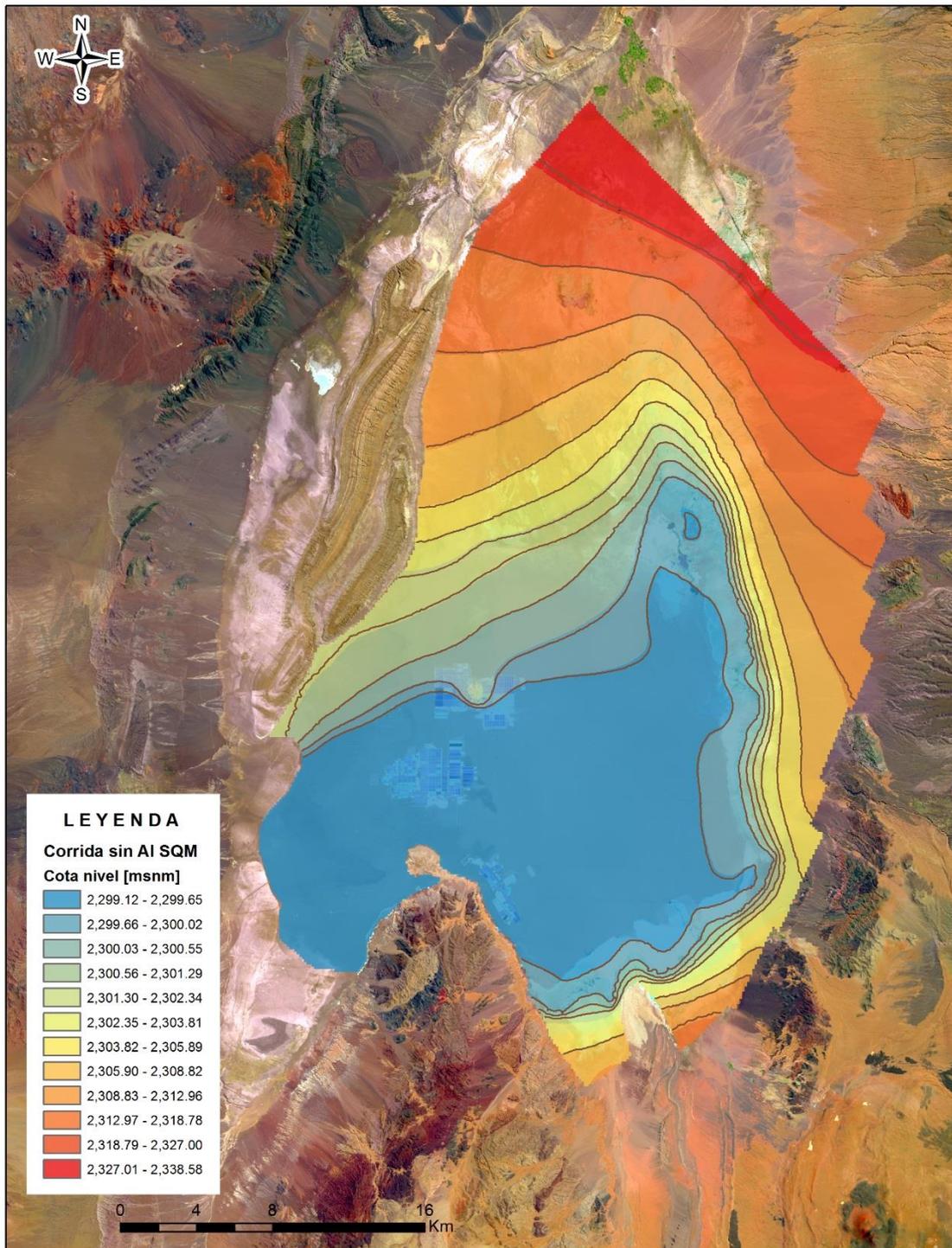


Figura A1.3. Simulación sin extracciones de agua industrial pero con extracción de salmuera

3.- Escenario regional sin extracción ni reinyección de salmuera pero con extracción de agua industrial (Figura A1.4).

Al resultar los niveles freáticos en el núcleo más someros, acercándose al régimen natural previo a la explotación, se modifica la evaporación. Dado a que la evaporación está introducida en el modelo como una serie temporal previamente elaborada considerando las profundidades freáticas, dichas series debieron modificarse considerando los nuevos valores de profundidad. Esta corrección se ha hecho en el bloque oeste del núcleo, desde la falla Caballo hacia el oeste, considerando la zonificación definida en el modelo. La modificación ha consistido en replicar la serie temporal desde 1986 hasta inicios de 1994 (como condición de evaporación en régimen natural), durante todo el periodo de simulación 1986-2016 (Figura A1.5). El resultado es el de la Figura A1.6. Así resulta un escenario conservador, pues la sobrevaloración de la evaporación en el bloque oeste conlleva una subestimación de la recuperación del nivel piezométrico al considerar un periodo histórico en régimen natural.

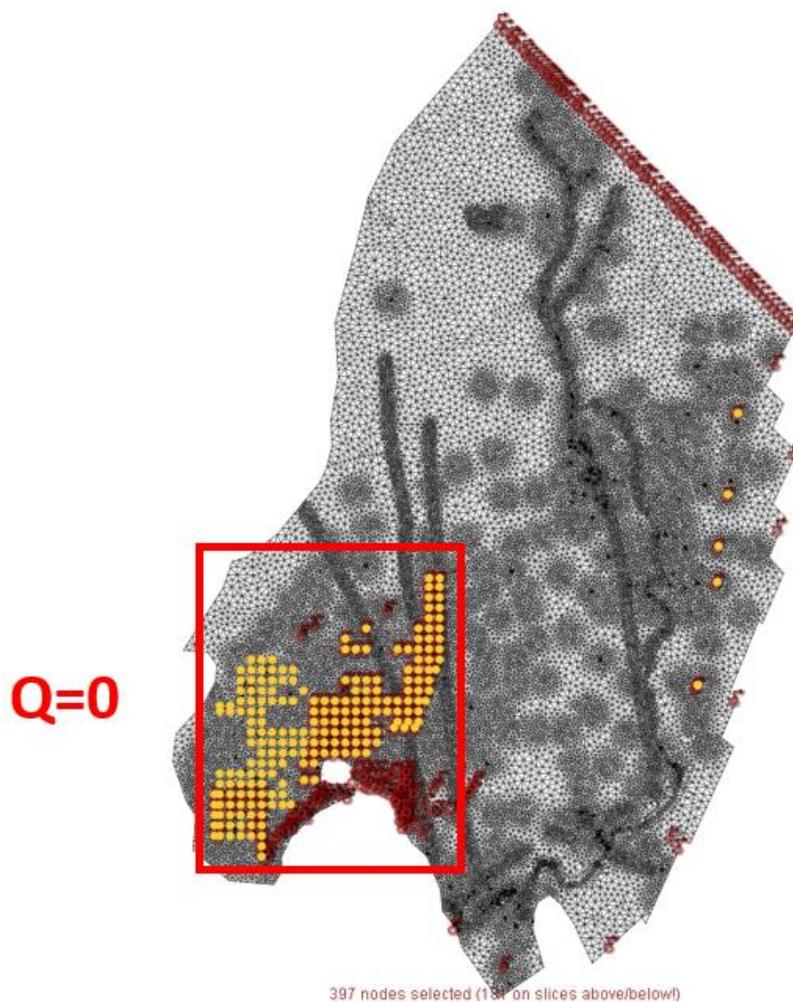


Figura A1.4. Esquema de extracciones y reinyecciones

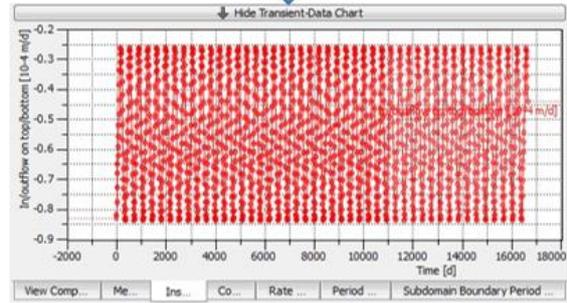
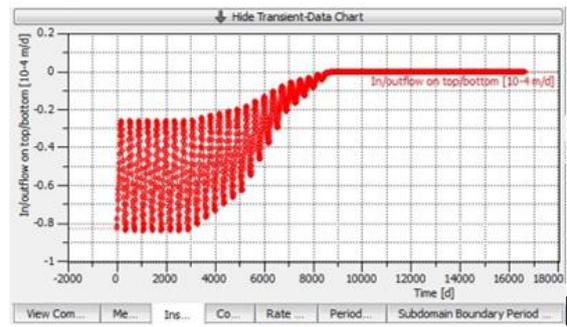
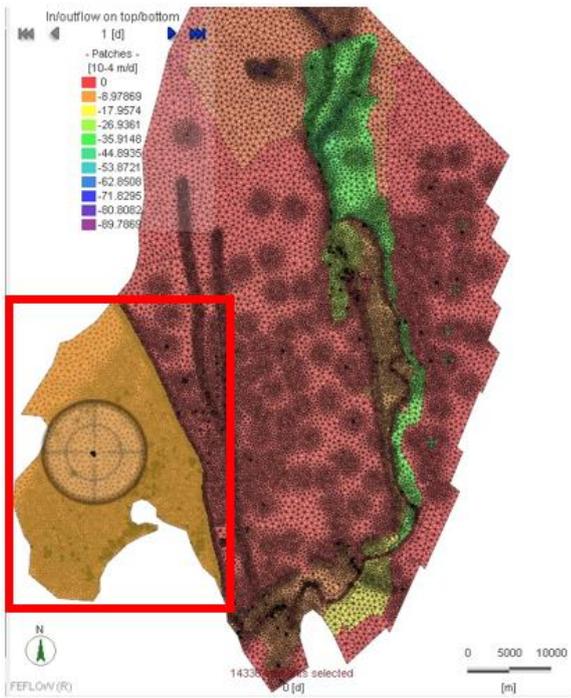


Figura A1.5. Modificación temporal de la evaporación con respecto al escenario base como consecuencia de la disminución de la profundidad del nivel freático en el núcleo

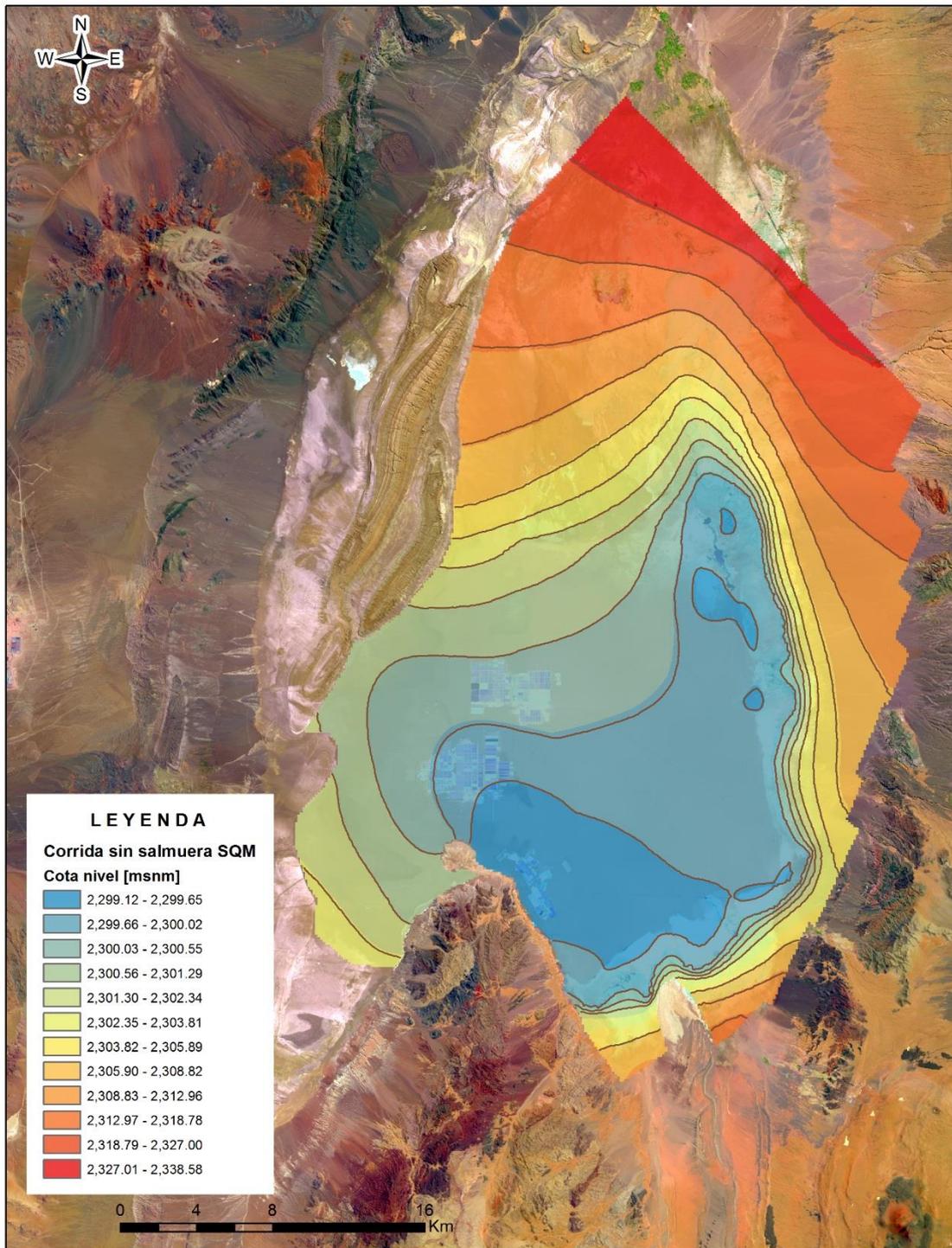


Figura A1.6. Simulación sin considerar las extracciones y reinyecciones de SQM pero con extracción de agua industrial

4.- Escenario regional sin extracción ni reinyección de salmuera y sin extracción de agua industrial (Figuras A1.7 y A1.8).

Al igual que en el escenario anterior, se debe modificar la evaporación en el núcleo, de la misma forma.

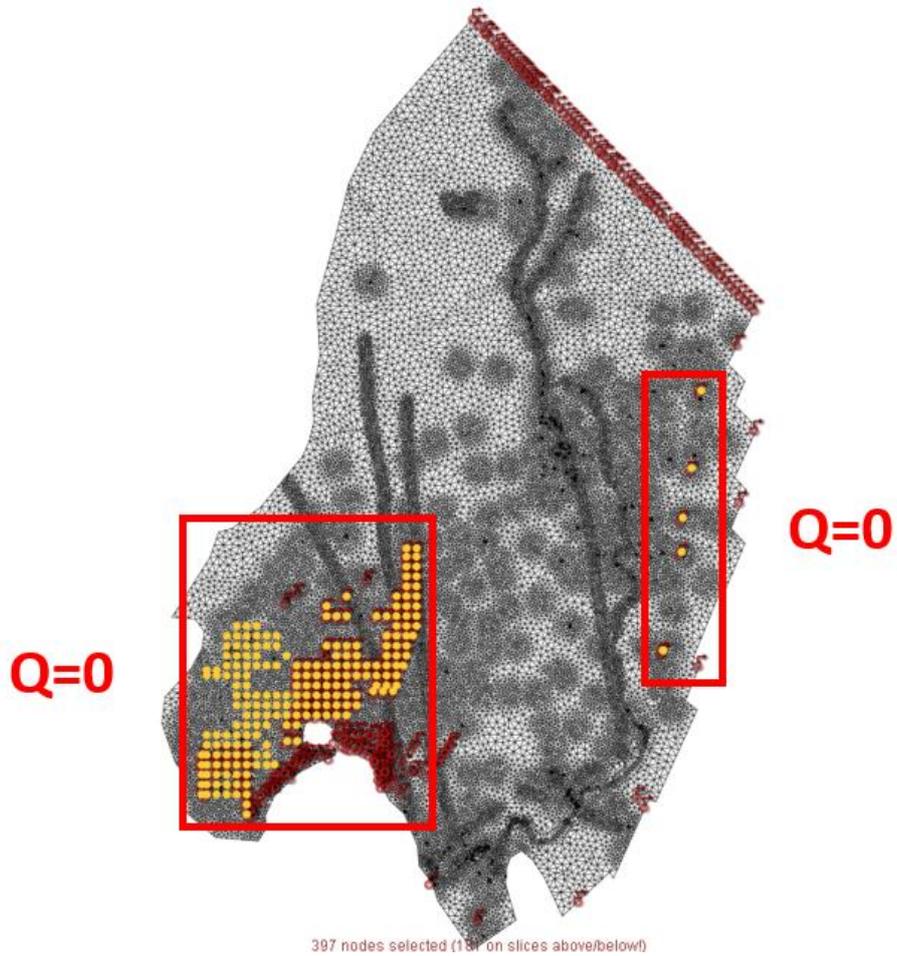


Figura A1.7. Esquema sin extracciones ni reinyecciones

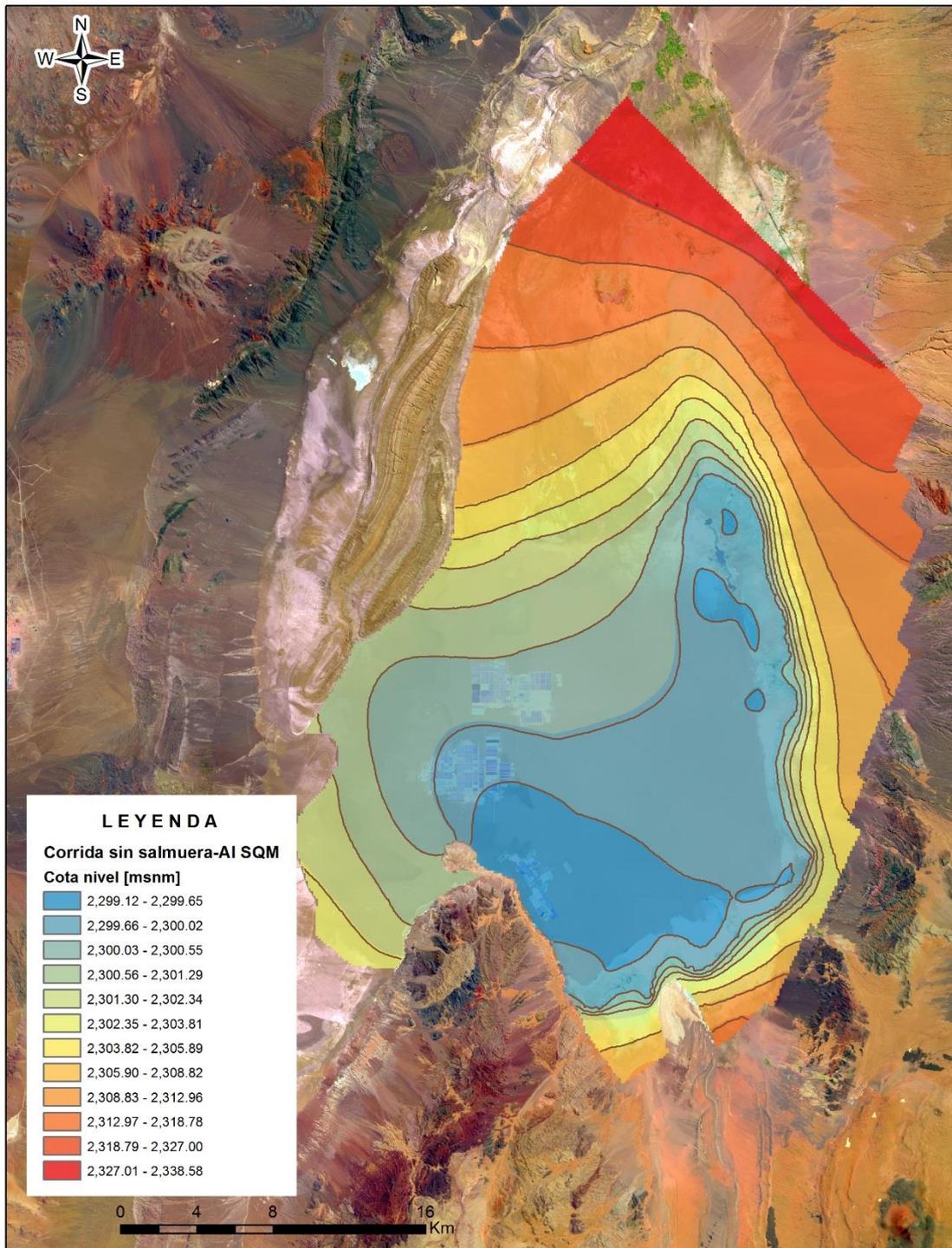


Figura 1. Simulación sin extracciones ni reinyecciones de salmuera y sin extracción de agua industrial

Los resultados simulados para cada escenario se han analizado especialmente para los pozos localizados en el sector de los Algarrobos y del Sistema Peine. Asimismo, se ha realizado una comparación entre las piezometrías obtenidas en el caso base y cada escenario considerado, utilizando los resultados obtenidos en formato raster. Se exporta el nivel para cada uno de los nodos del dominio del modelo, se comparan los datos nodo a nodo y finalmente se interpola el resultado. Dada la densidad de puntos de la malla del modelo, la interpolación con el método del inverso a la distancia resulta conveniente.

Al comparar los resultados de las simulaciones con el caso base (situación actual), a nivel regional se genera diferencias de hasta 1 m en la zona aluvial. Al comparar la situación sin extracción ni reinyección de salmuera por SQM, pero con extracción de agua industrial, desaparece la depresión de nivel y una disminución del nivel respecto del caso base hacia el borde oeste a causa del restablecimiento de la evaporación (Figura A1.9). Si no se considera ni extracciones ni reinyección se producen todos esos efectos al mismo tiempo (Figura A1.10).

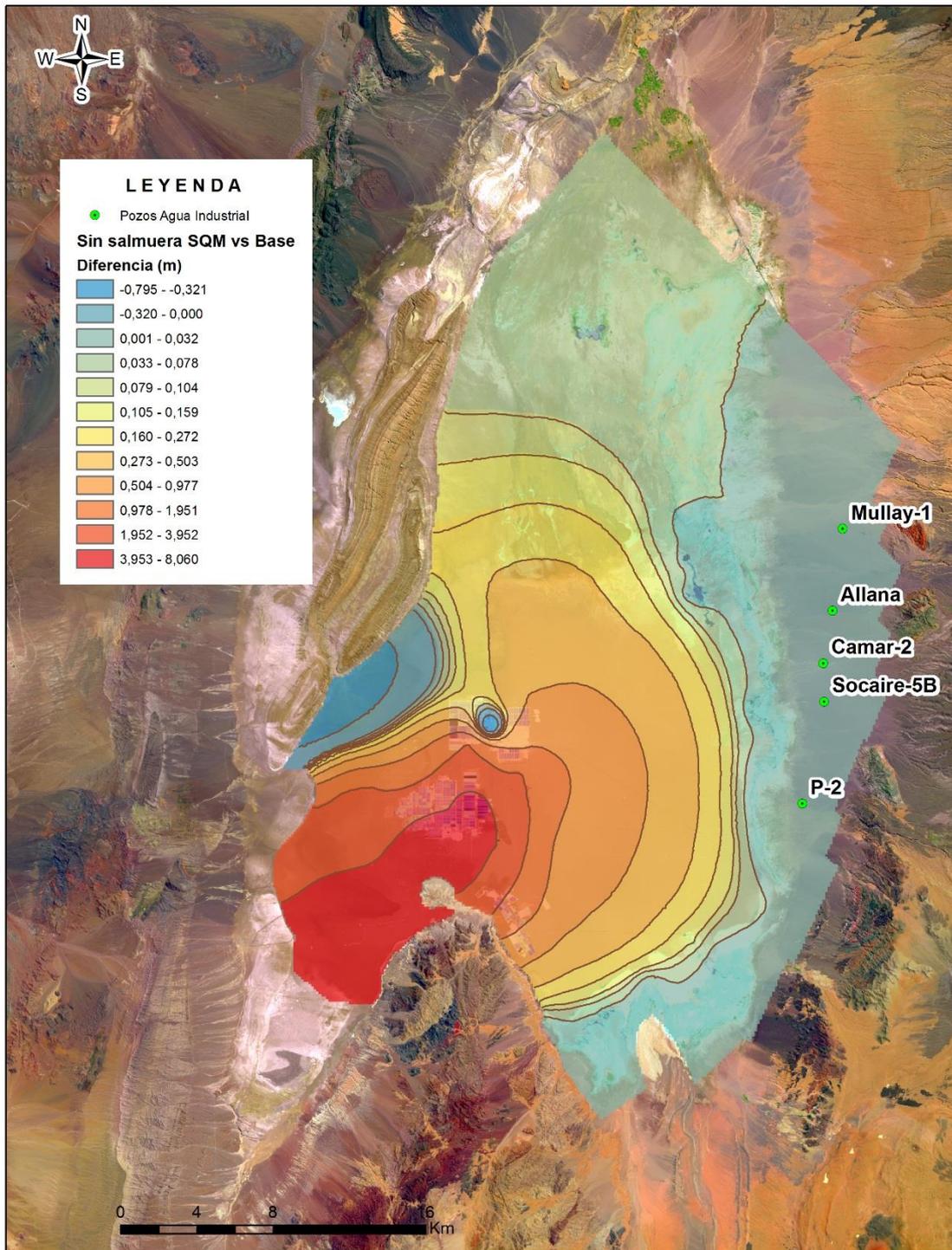


Figura 2. Diferencia entre el escenario base (situación actual a 31-12-2016) y la situación simulada sin extracción ni reinyección de salmuera y con extracción de agua industrial

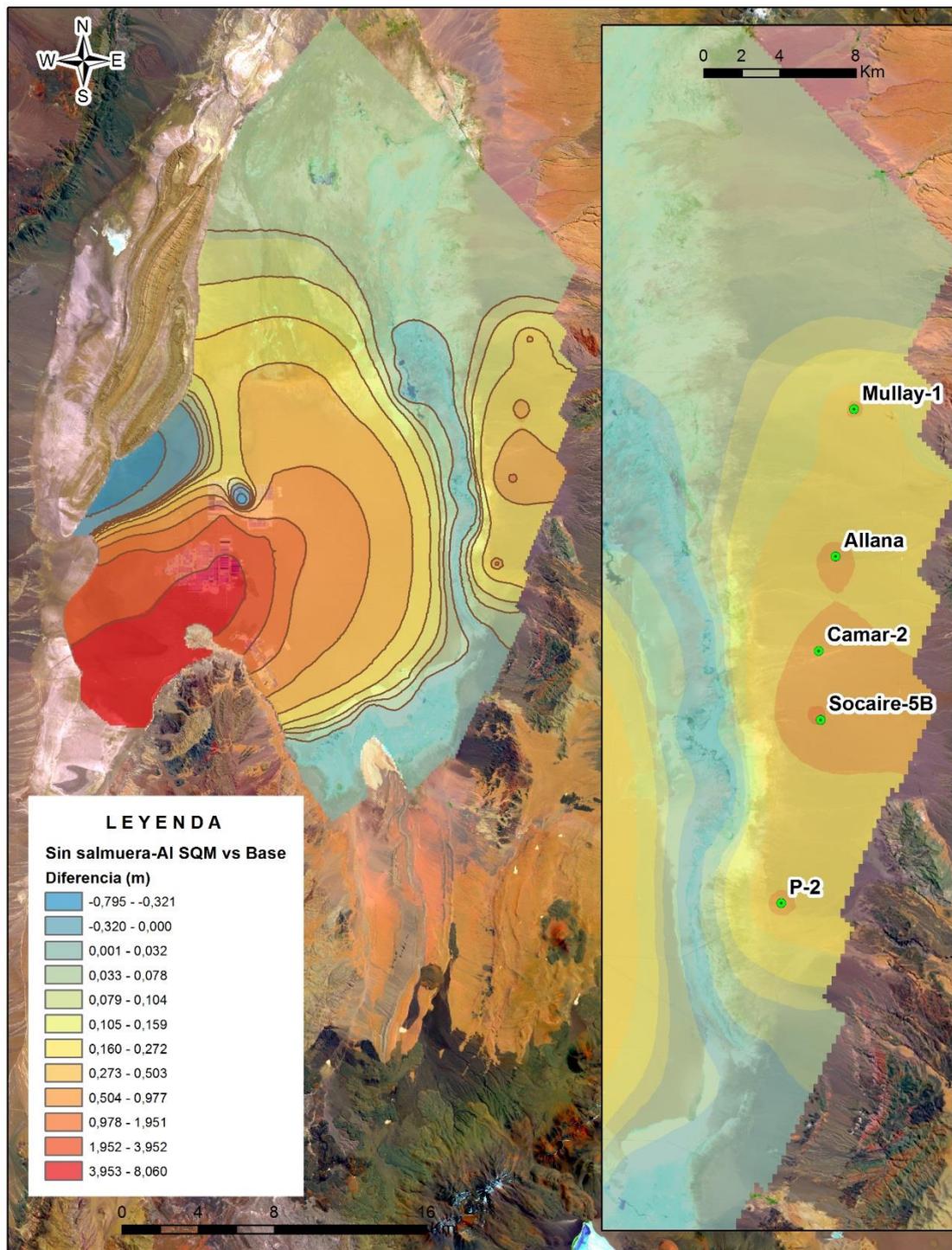


Figura 3. Diferencia entre el escenario base (situación actual a 31-12-2016) y la situación simulada sin extracción ni reinyección de salmuera y sin extracción de agua industrial

Con los resultados obtenidos es posible analizar los cambios que se ha producido en el **Sistema Peine** y en el **sector del pozo Camar-2**.

La Figura A1,11 muestra la red de monitoreo existente en el área del Sistema Peine.

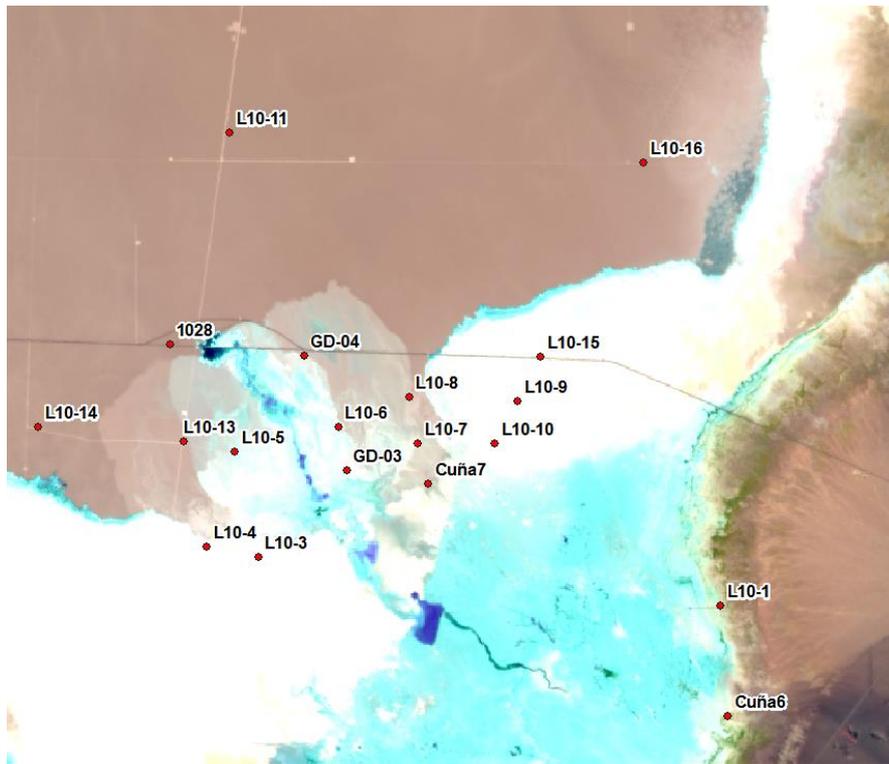
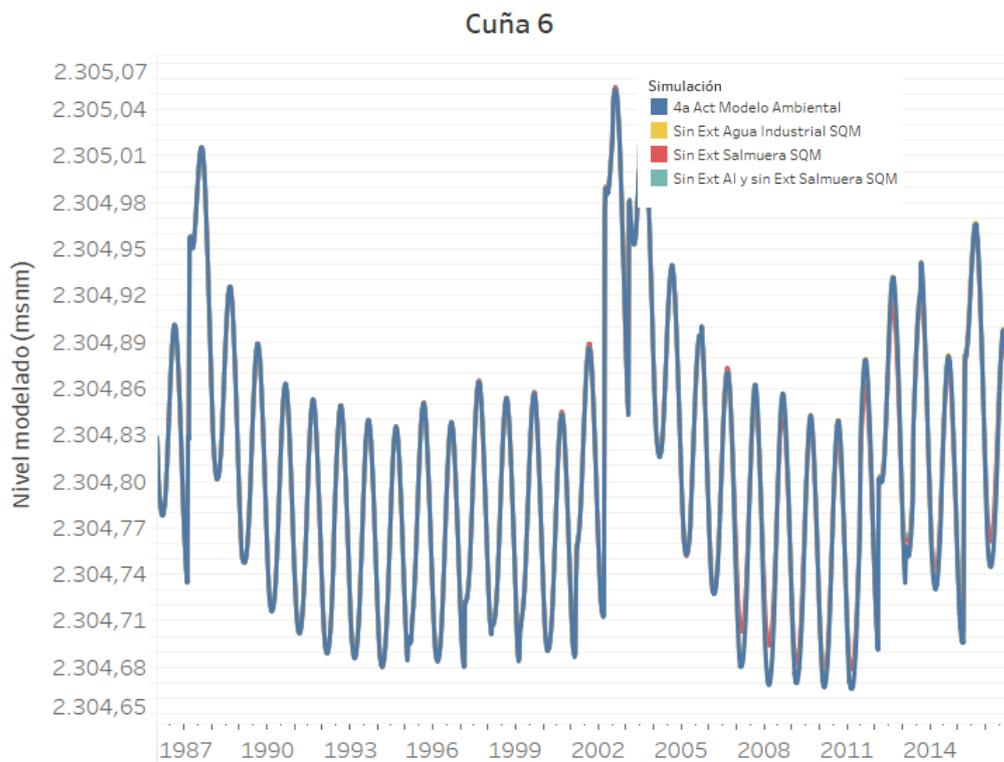
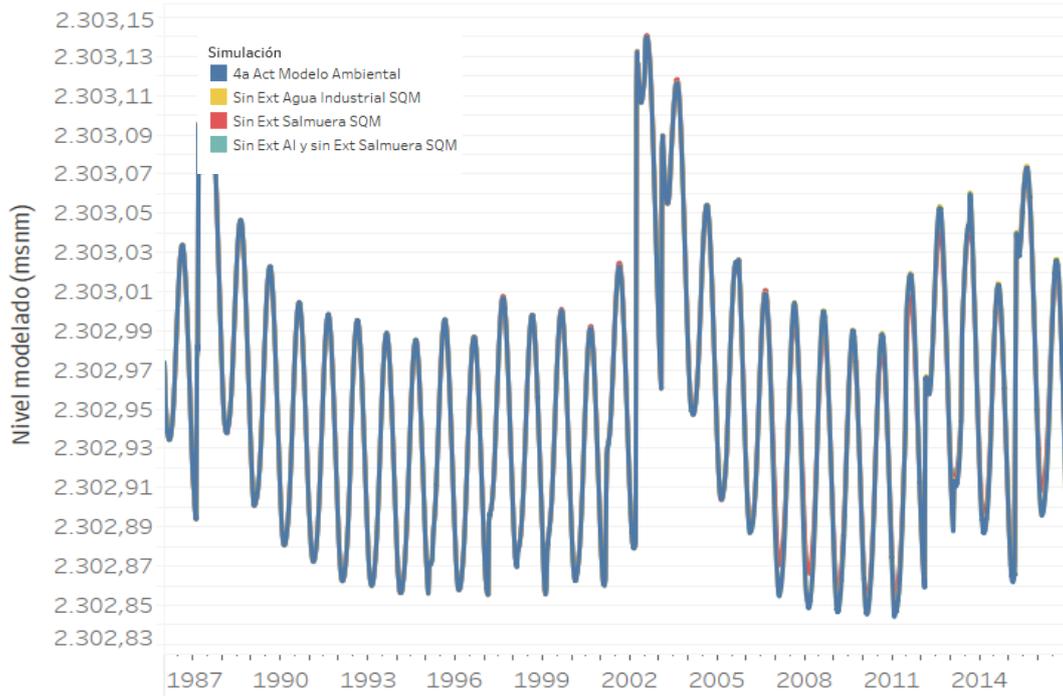


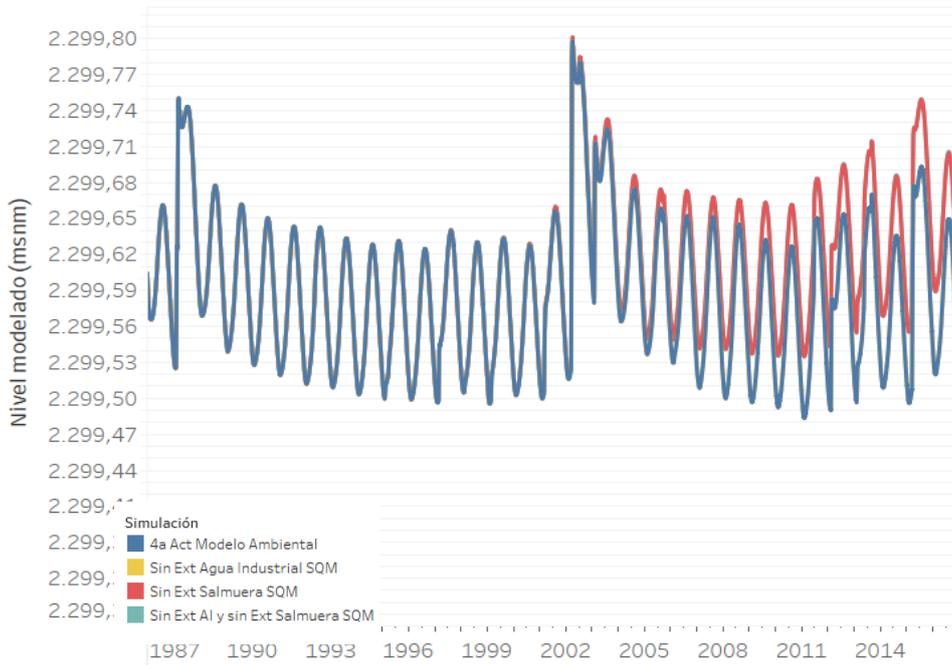
Figura A1.11. Pozos utilizados para visualizar los resultados de las simulaciones en el Sistema Peine



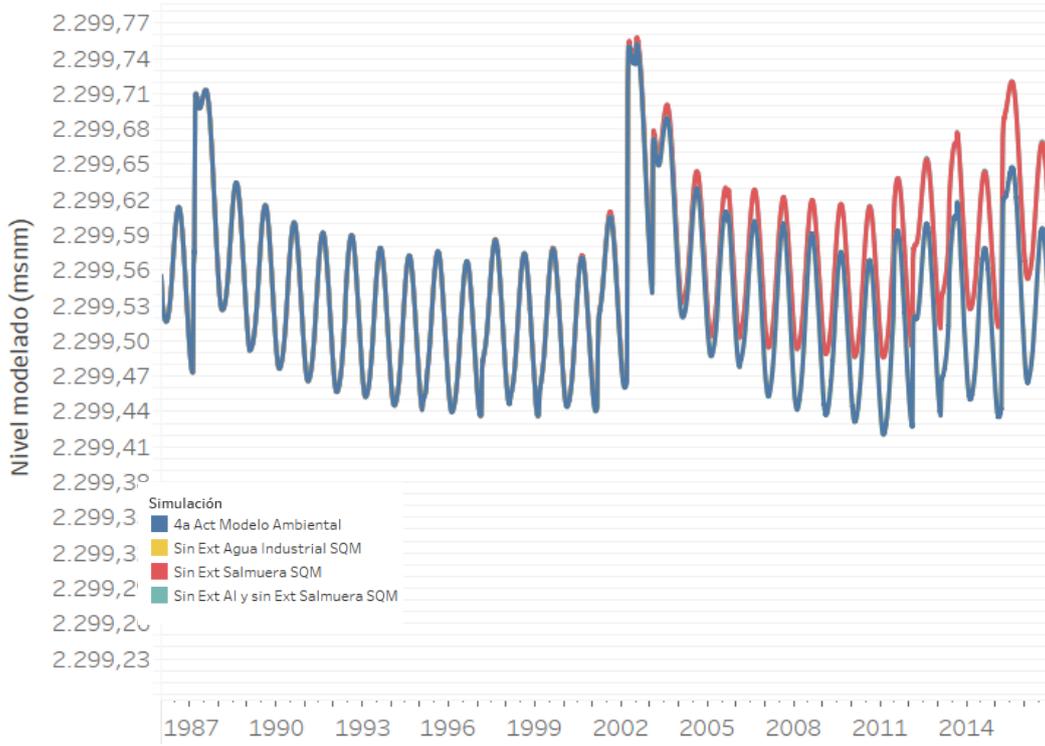
L10-1



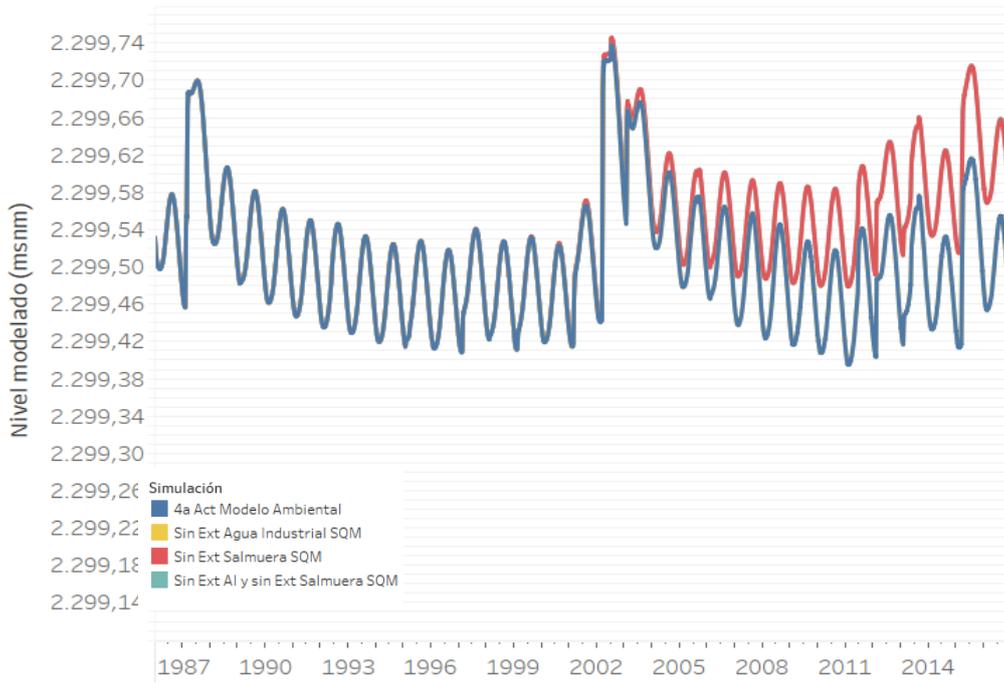
L10-3



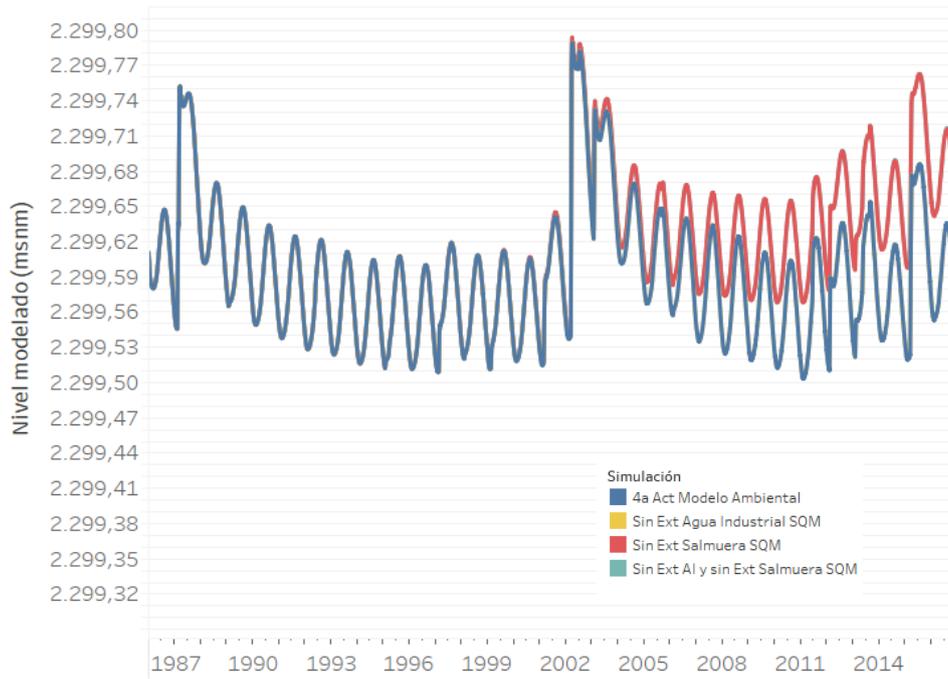
L10-4



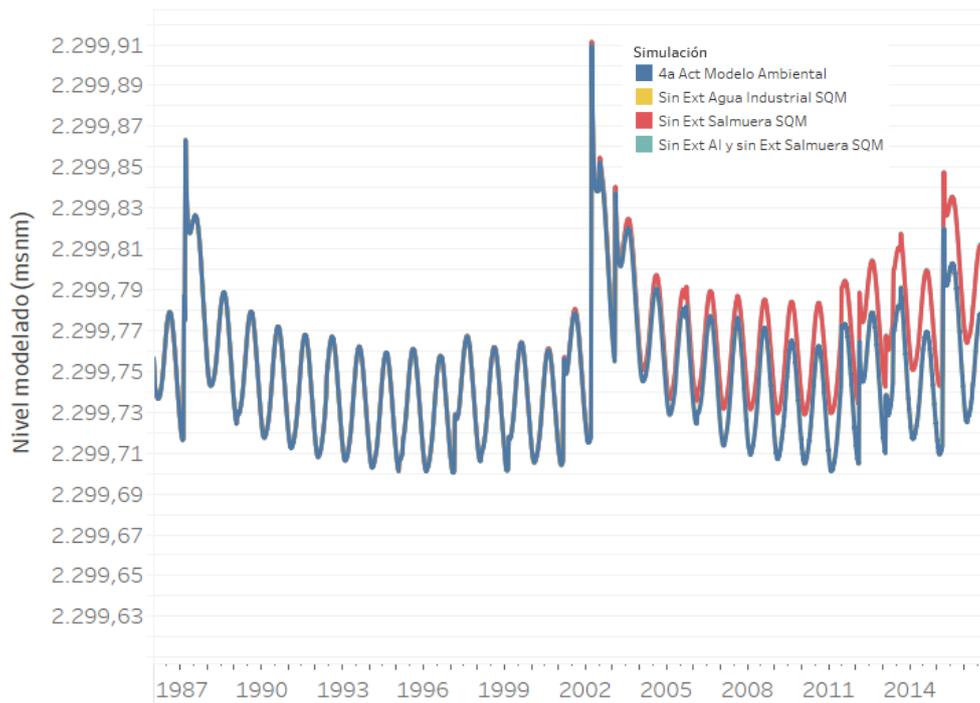
L10-5



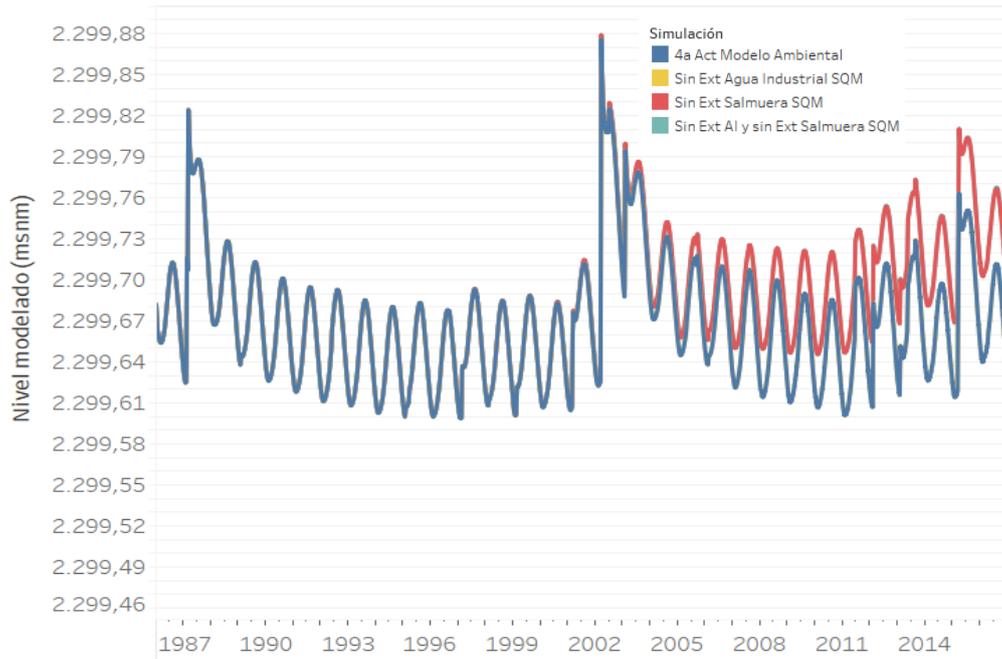
L10-6



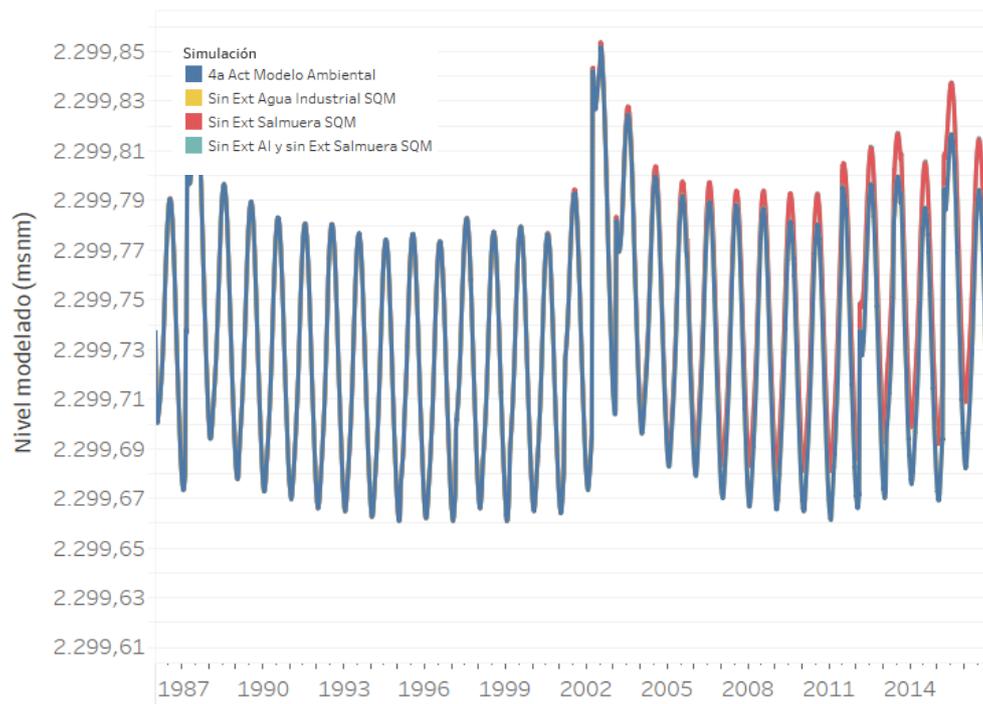
L10-7



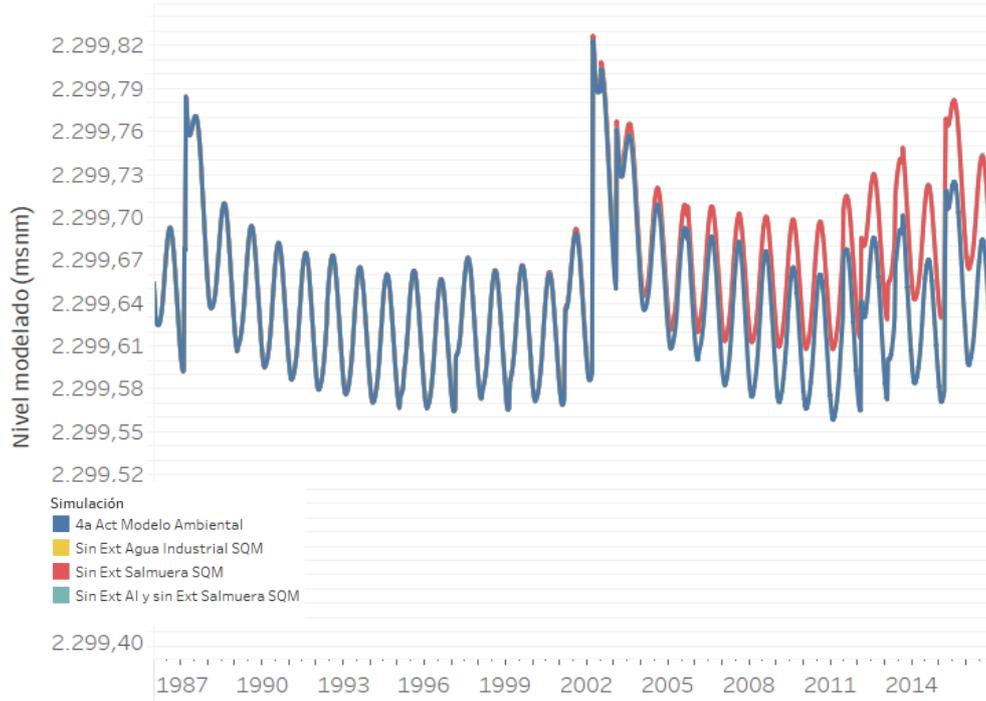
L10-8



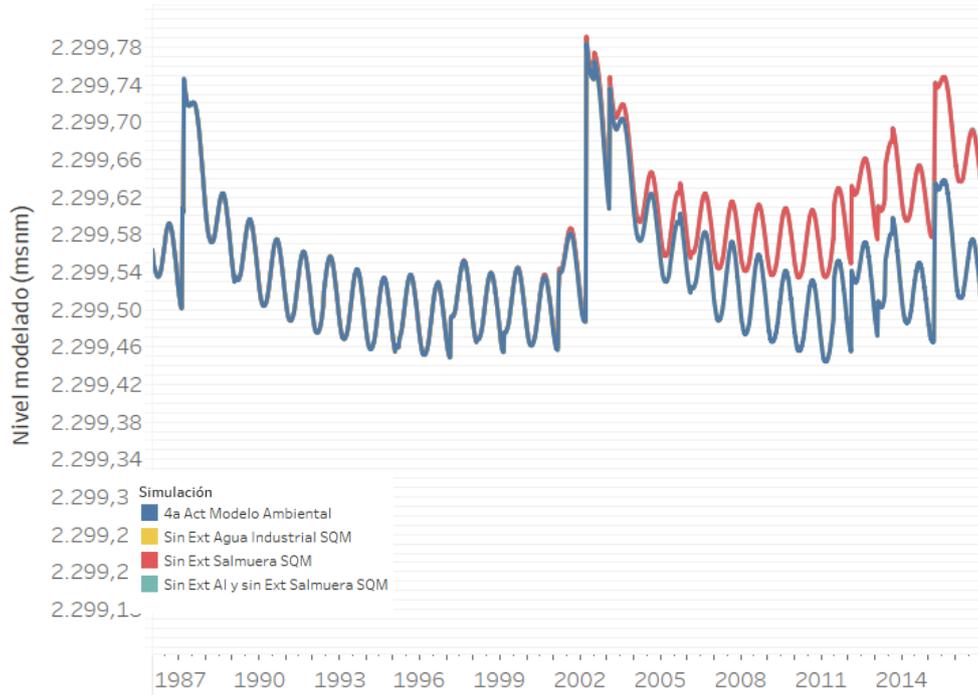
L10-9



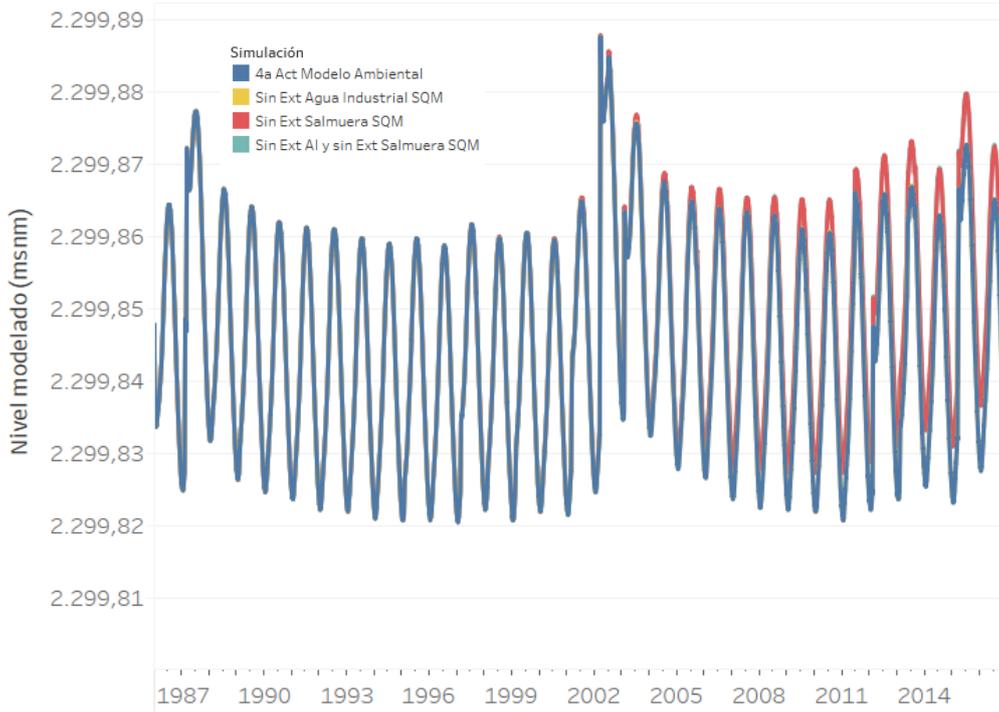
GD-03



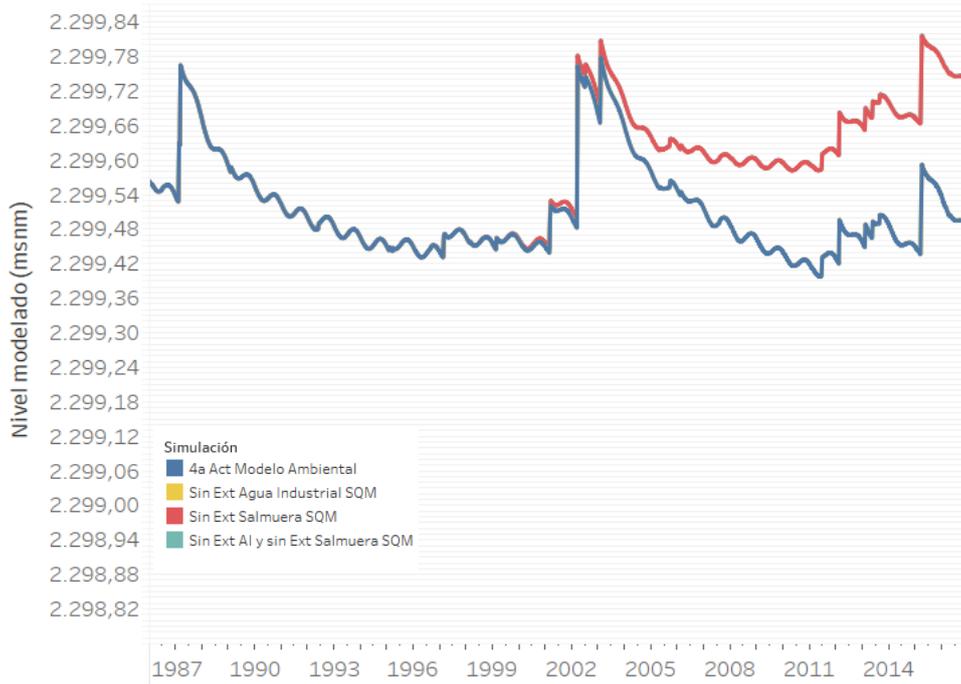
GD-04



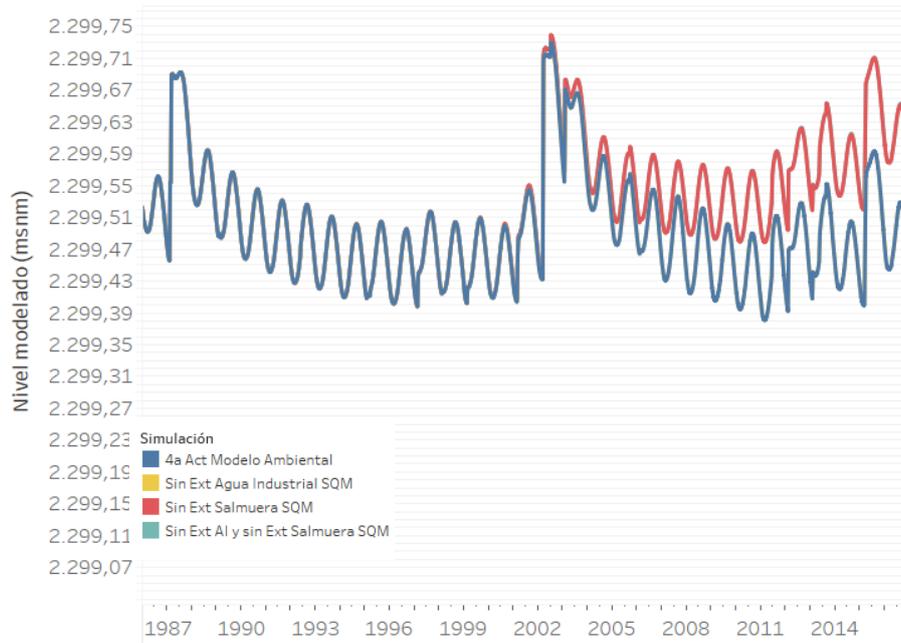
L10-10



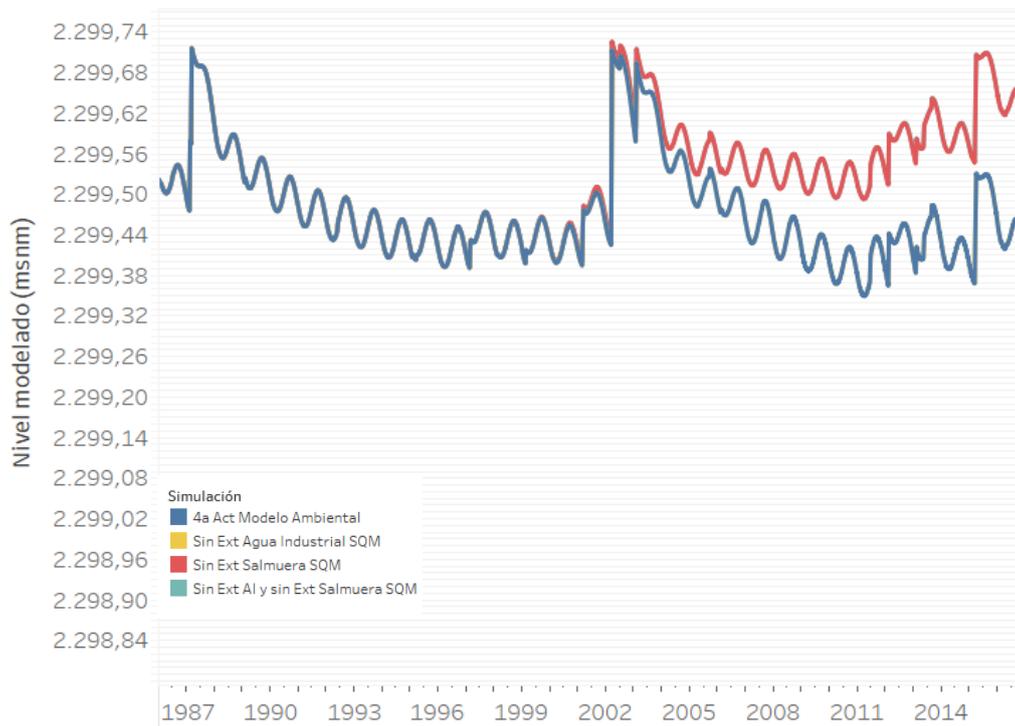
L10-11



L10-13



L10-14



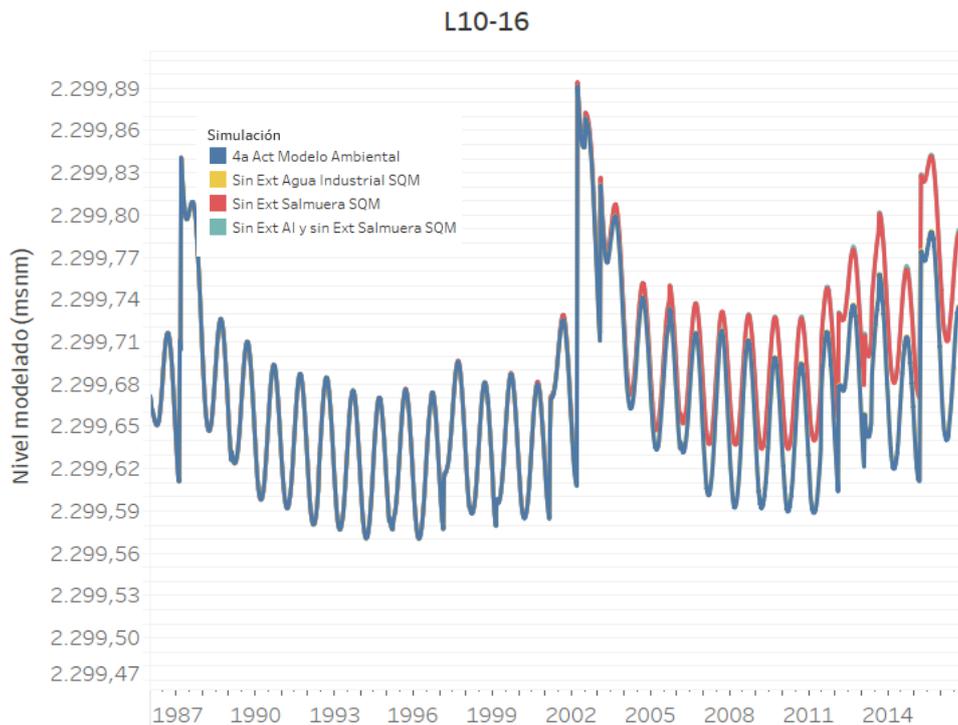
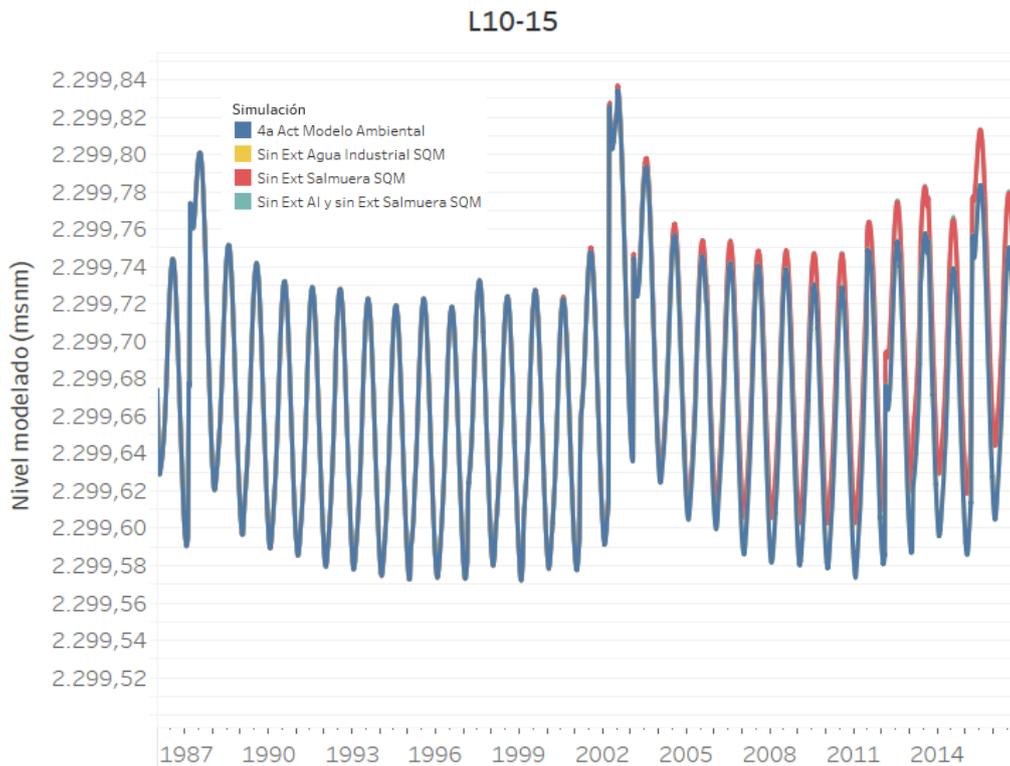
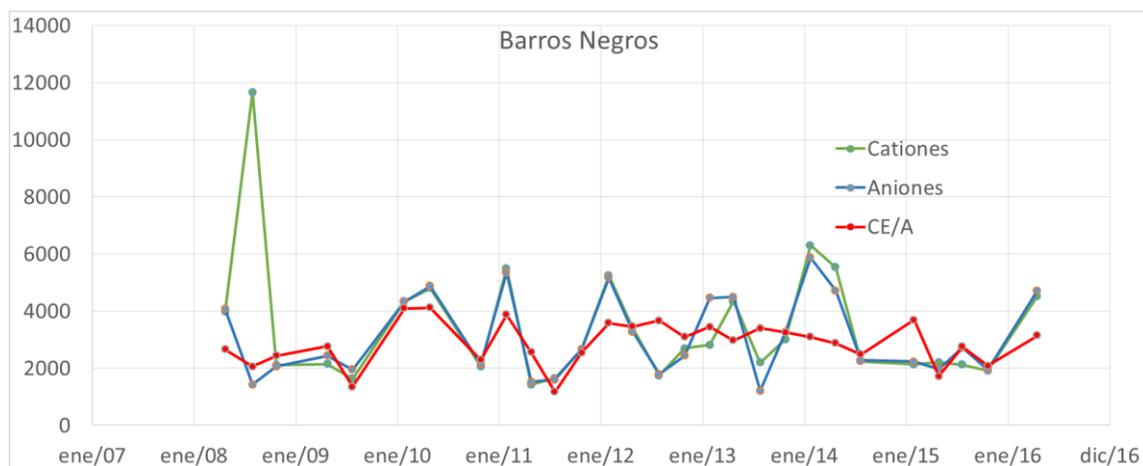


Figura A1.12. Evolución de niveles en los diferentes puntos de monitoreo del área del Sistema Peine en los distintos escenarios considerados. En azul la situación real, en amarillo la situación sin extracción de agua industrial, en rojo sin extracción ni reinyección de salmuera y en verde sin extracción ni reinyección de salmuera ni extracción industrial. Cuando el color no aparece reflejado es que se superpone al estado natural u otro estado en el orden indicado. En realidad los colores amarillos no aparecen por no diferir del azul y tampoco el verde por no diferir del rojo

Anexo2 Comparación de balances iónicos

Dentro del apoyo a este informe, la Gerencia de Hidrogeología Salar, en agosto de 2017 ha realizado gráficas de comparación entre el total de meq/L de cationes Cat y el de aniones An y al mismo tiempo se ha superpuesto la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$ CE como CE/A , siendo A el coeficiente que mejor ajusta la evolución de CE a la de Cat y An. Idealmente debe ser $\text{Cat} = \text{An}$. Las diferencias son debidas a errores analíticos o de transposición de datos. Hay desajustes con CE/A que en parte son debidos a que CE es el valor medido en campo y no el valor de laboratorio. Los datos utilizados son las series temporales de CONAF para las lagunas de Barros Negros, Chaxa y Puilar, del sondeo doble L4.10 en la zona marginal de Aguas de Quelana según datos de SQM y de las Lagunas La Punta y La Brava según datos de RWD.

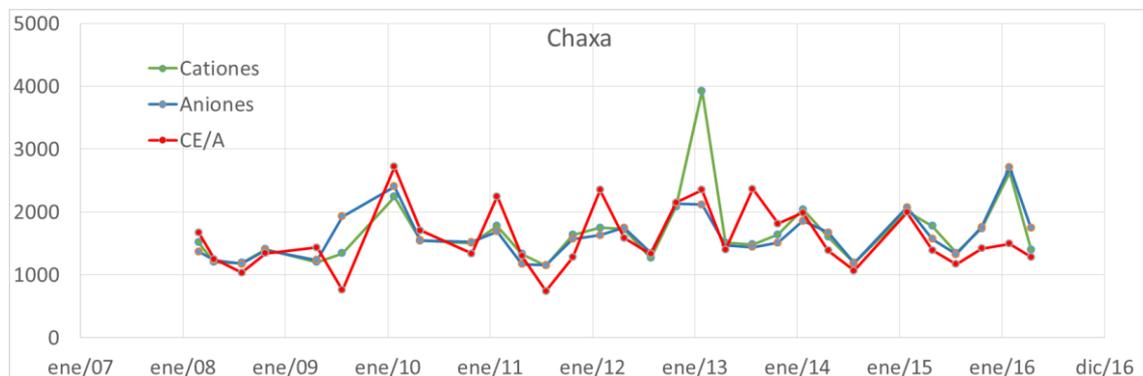
En todos los gráficos los cationes Cat y los aniones An están en meq/L y la conductividad eléctrica CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ es el valor leído en la escala de ordenadas dividido por A.



A = 60

Error de balance iónico razonable salvo en un caso

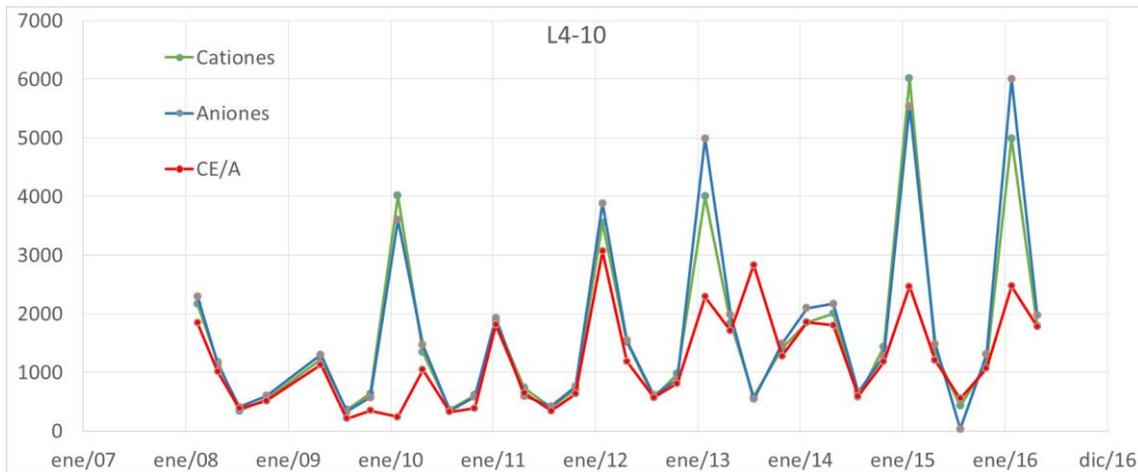
Suavización de las fluctuaciones de CE en la mitad del segundo periodo de tiempo



A = 85

Error de balance iónico razonable salvo en dos casos

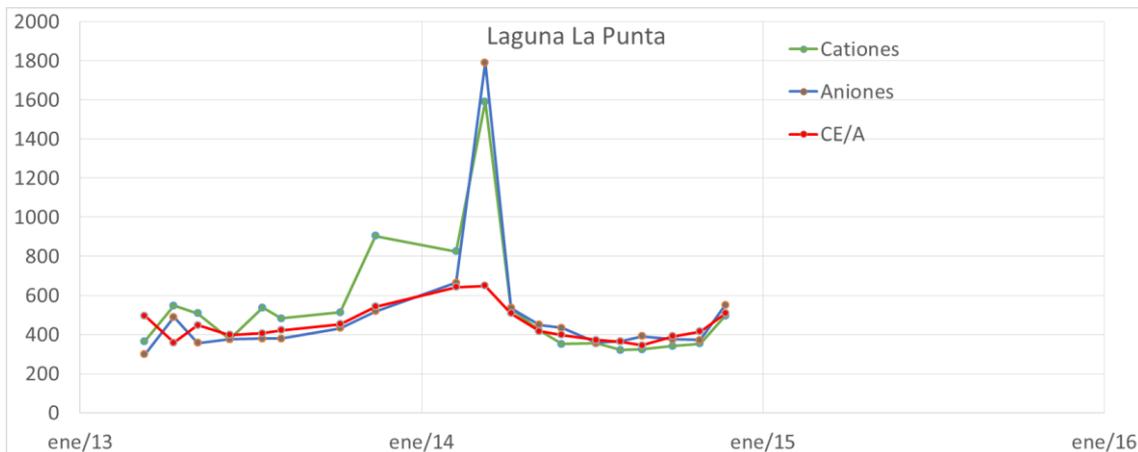
Adecuación razonable de las fluctuaciones de CE



A = 90

Error de balance iónico razonable

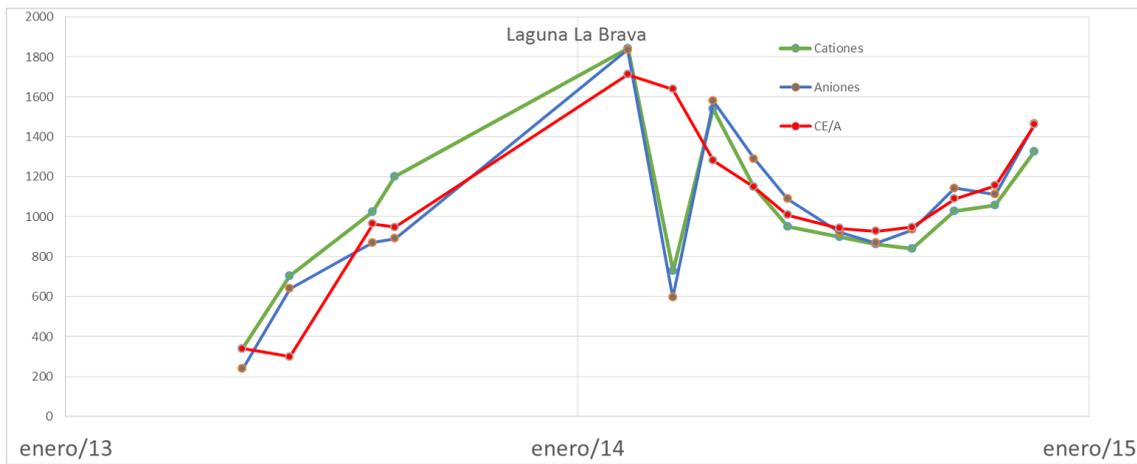
Moderada suavización de las fluctuaciones de CE



A = 90

Notable error de balance iónico en la primera mitad del periodo; principales errores en los cationes

Adecuación de las fluctuaciones de CE a los aniones, con una excepción



A = 80

Notable error de balance iónico en todo el periodo; principales errores posiblemente en los cationes

Adecuación de las fluctuaciones de CE a los aniones, con una excepción

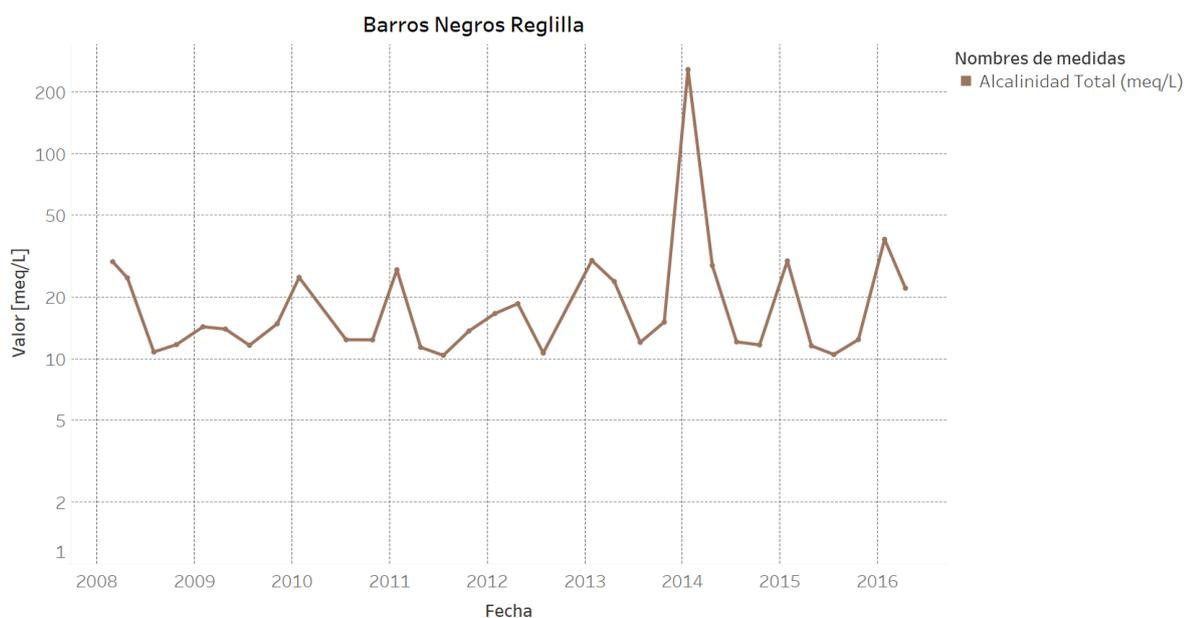
Anexo 3 Representación de las series temporales hidroquímicas de las lagunas

Como soporte a este informe, la Gerencia de Hidrogeología Salar, de SQM, en agosto de 2017 ha realizado las gráficas hidroquímicas de los datos disponibles de las lagunas periféricas del Salar de Atacama en dos fases. En una primera fase se han representado todos los valores en los dos periodos de datos, por separado y con concentraciones ponderales. En general hay coincidencia entre las distintas fuentes de datos, pero en algunos casos hay discrepancias, que aquí no se han estudiado. Estos resultados quedan como una elaboración interna y no se incluye aquí. Para un mejor estudio se han unido los dos periodos y se han representado logarítmicamente, menos el pH que queda en escala lineal. Se trata de los datos de las series más largas, sin considerar las otras fuentes de datos

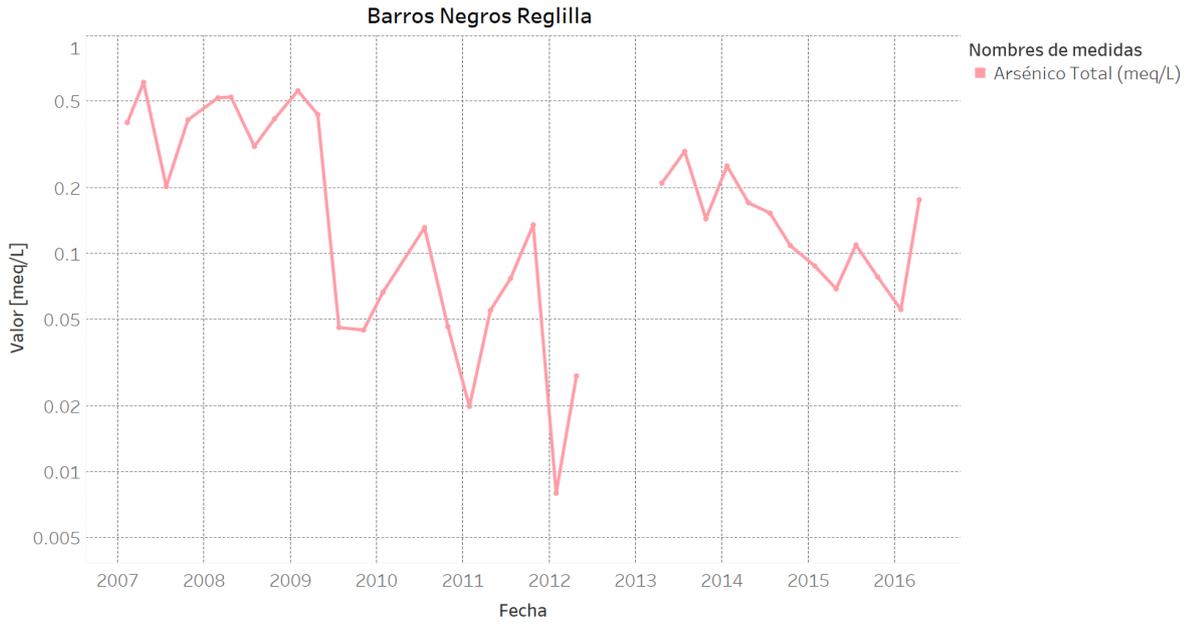
1 Sistema Soncor.

1.1 Laguna Barros Negros.

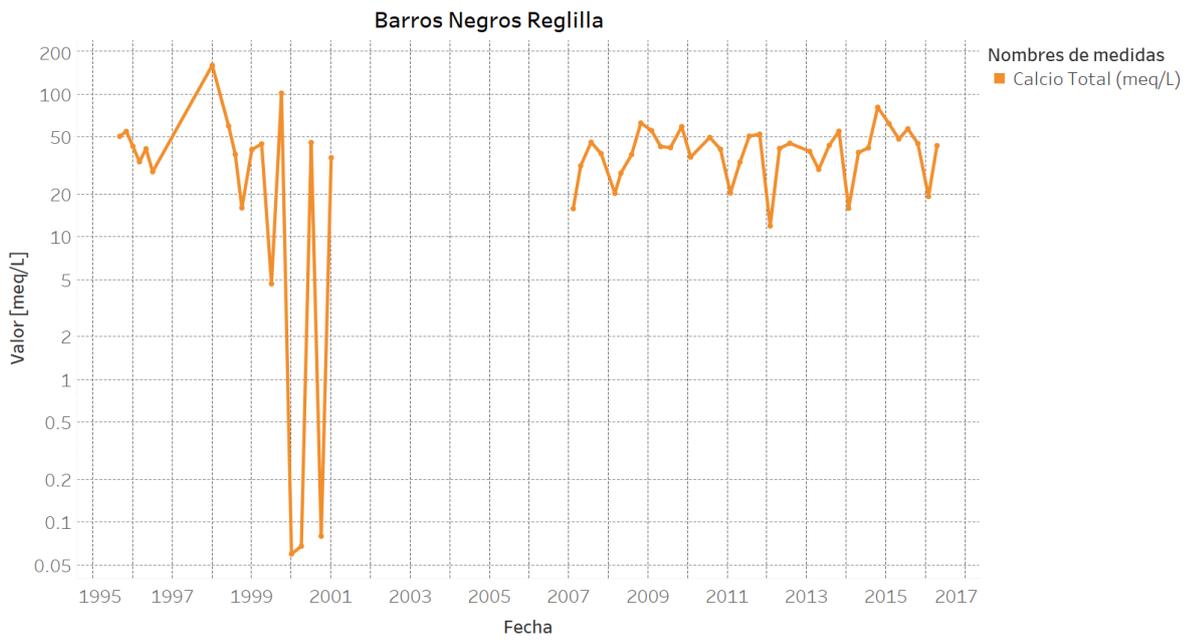
Laguna Barros Negros, alcalinidad total



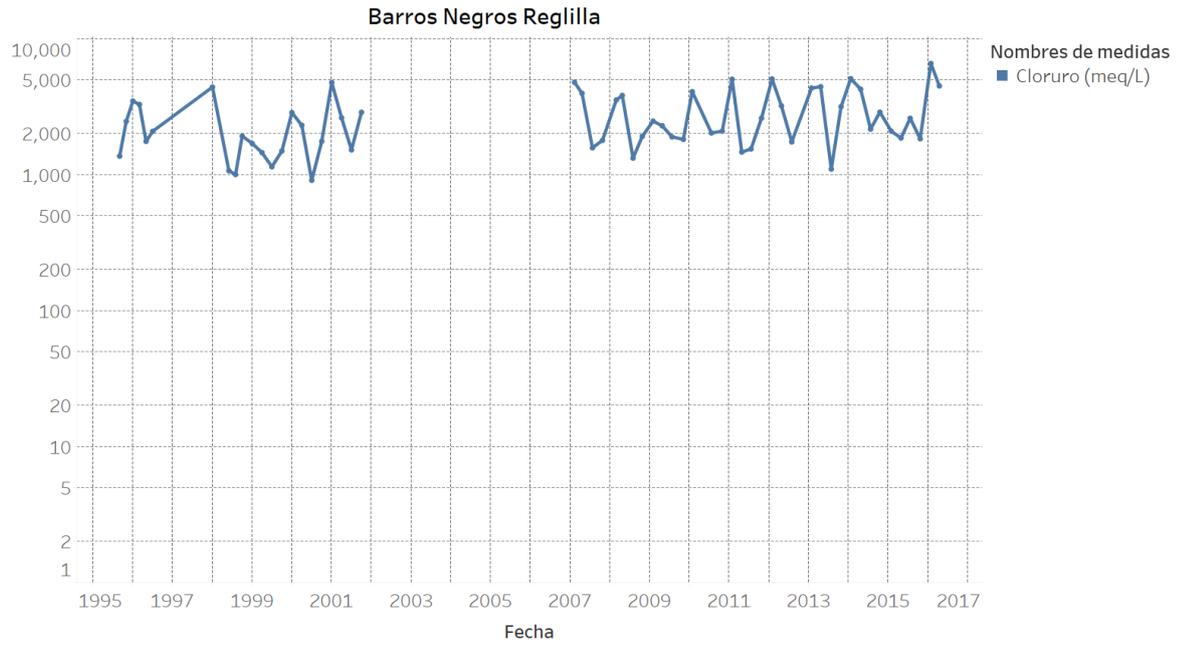
Laguna Barros Negros, arsénico total



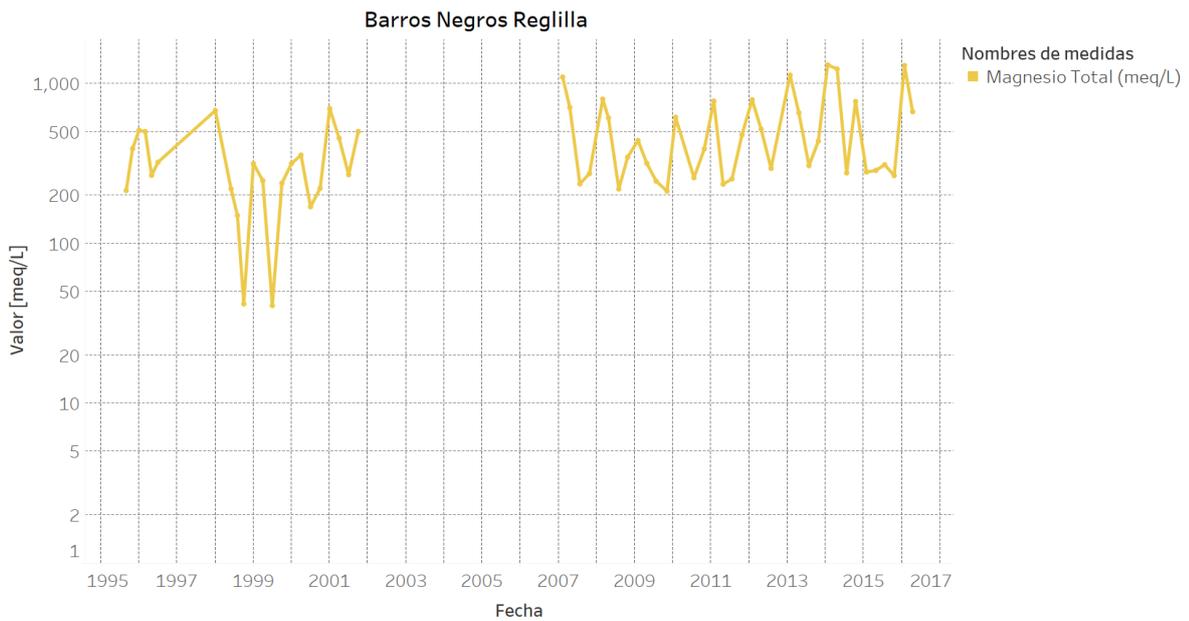
Laguna Barros Negros, calcio total



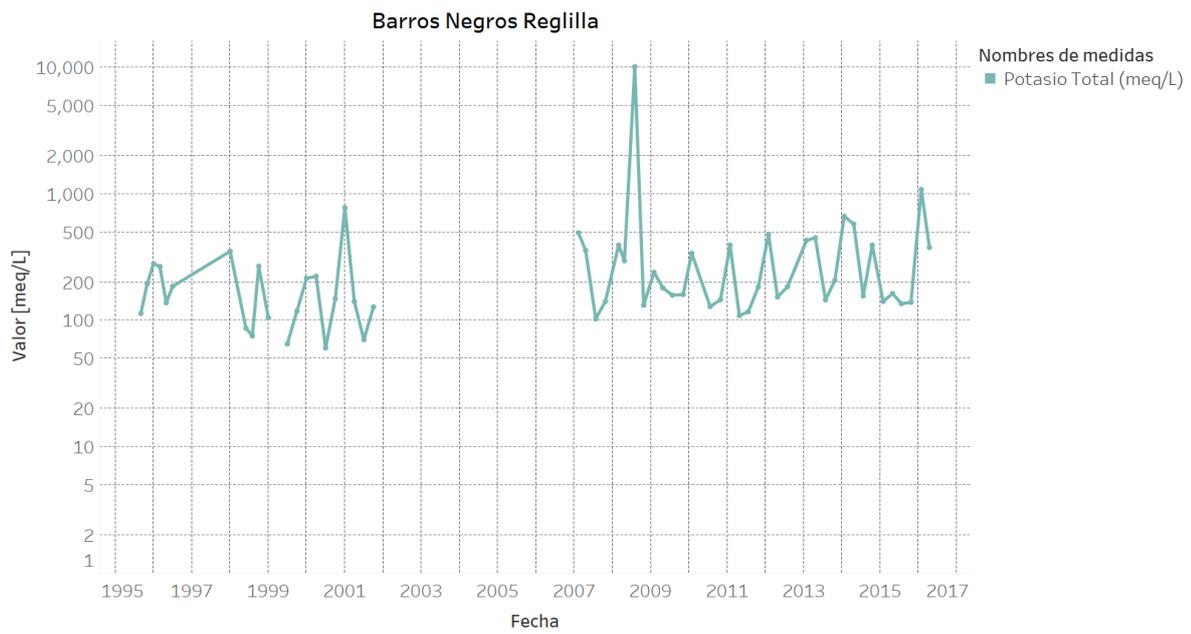
Laguna Barros Negros, cloruros



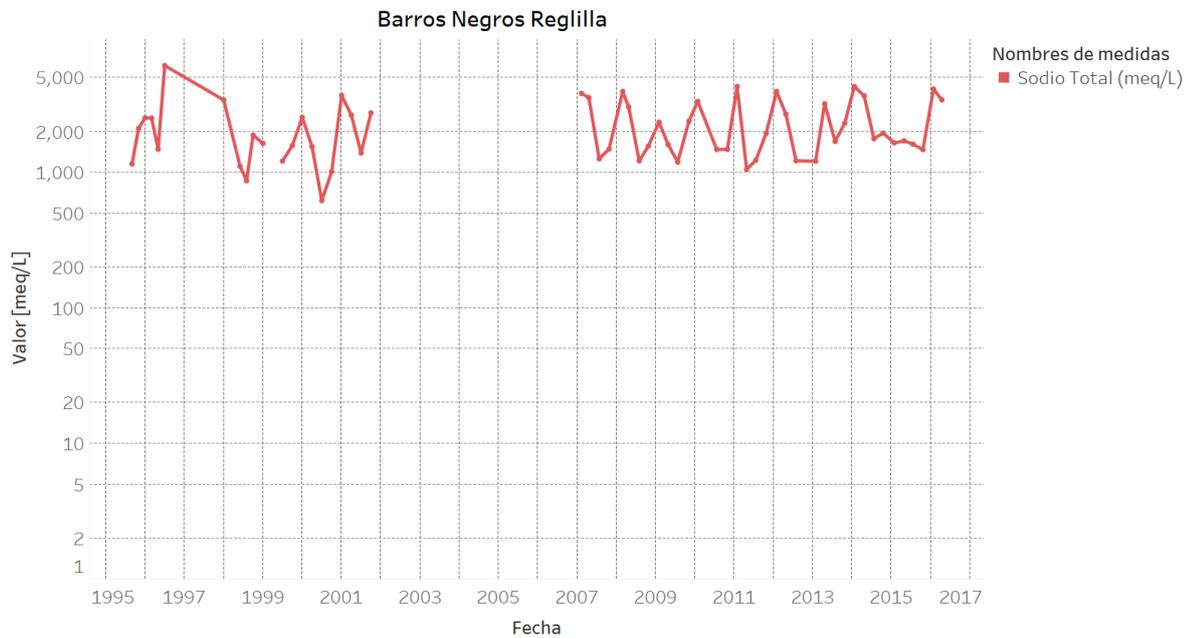
Laguna Barros negros, magnesio total.



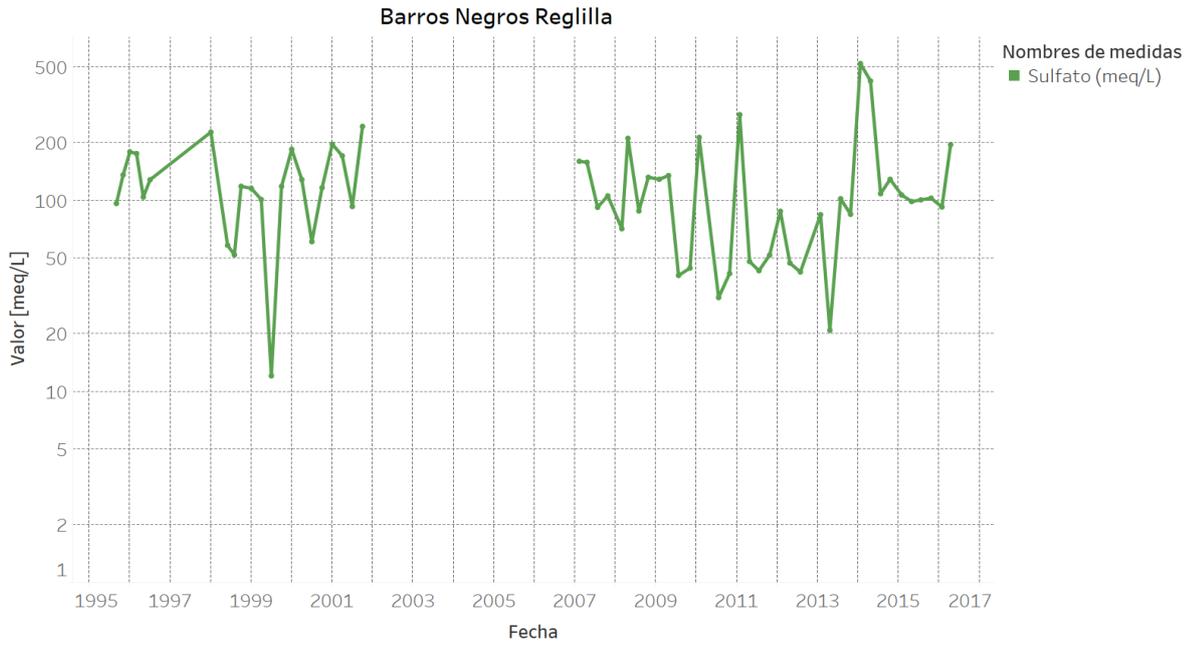
Laguna Barros Negros, potasio total.



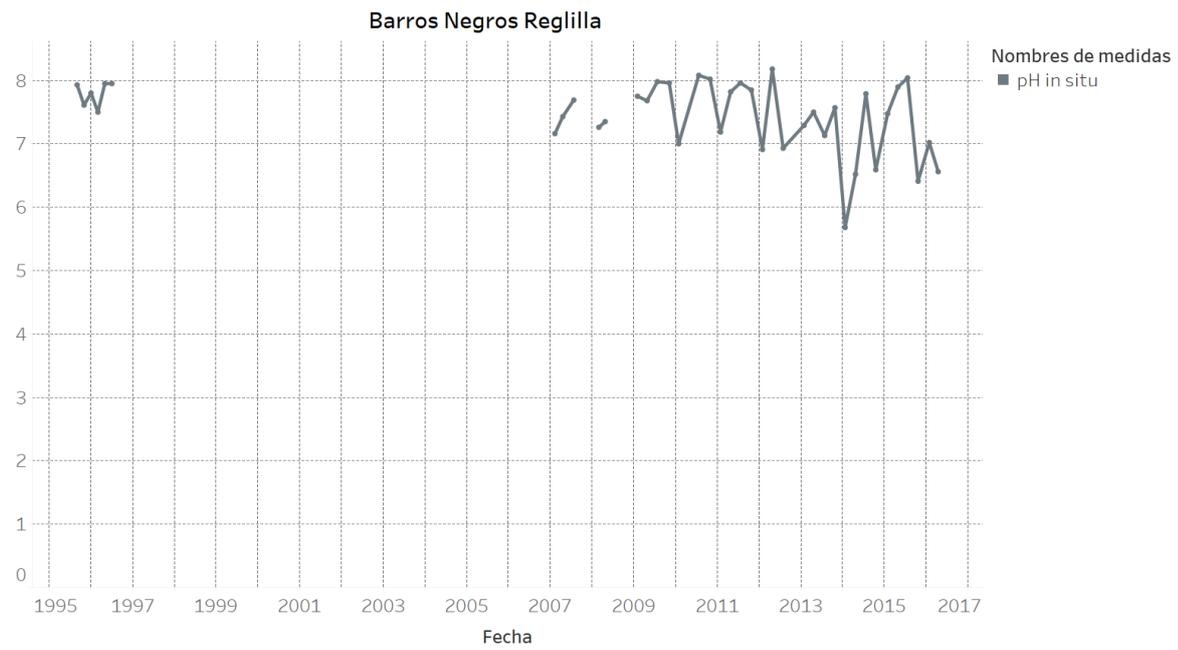
Laguna Barros Negros, sodio total



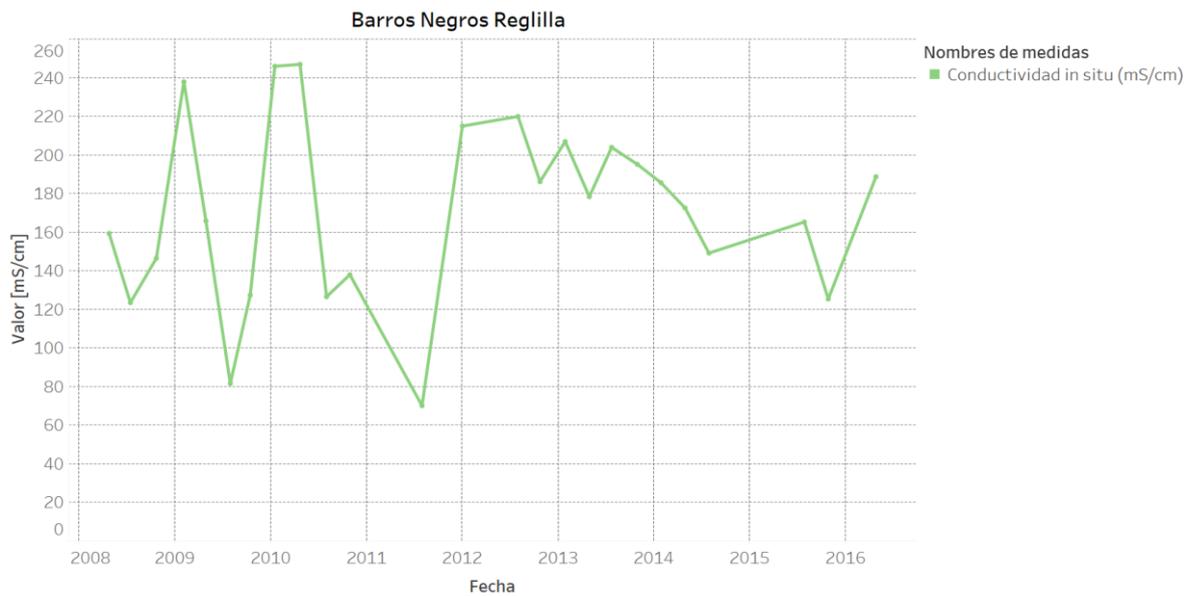
Laguna Barros Negros, sulfatos



Laguna Barros Negros, pH

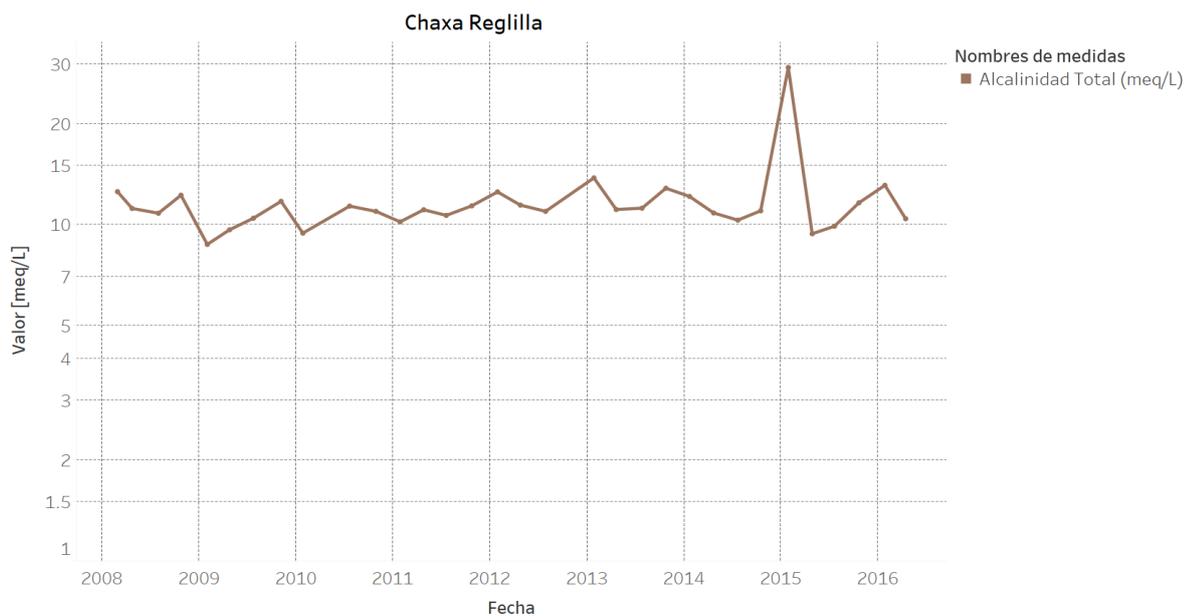


Laguna Barros Negros, CE.

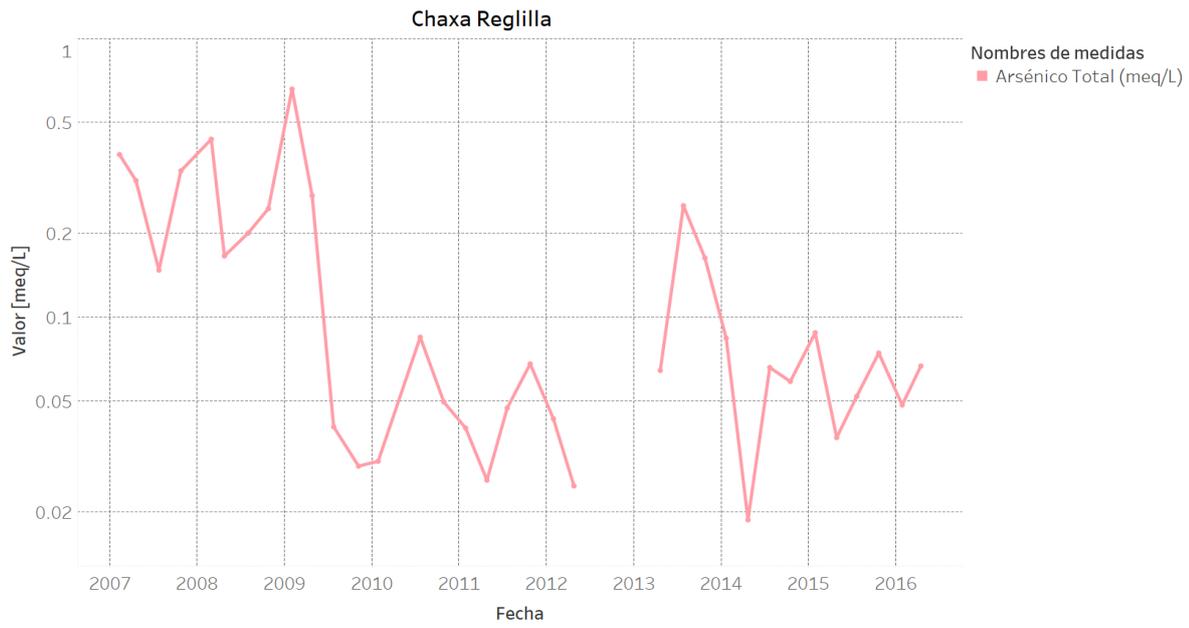


1.2 Laguna Chaxa.

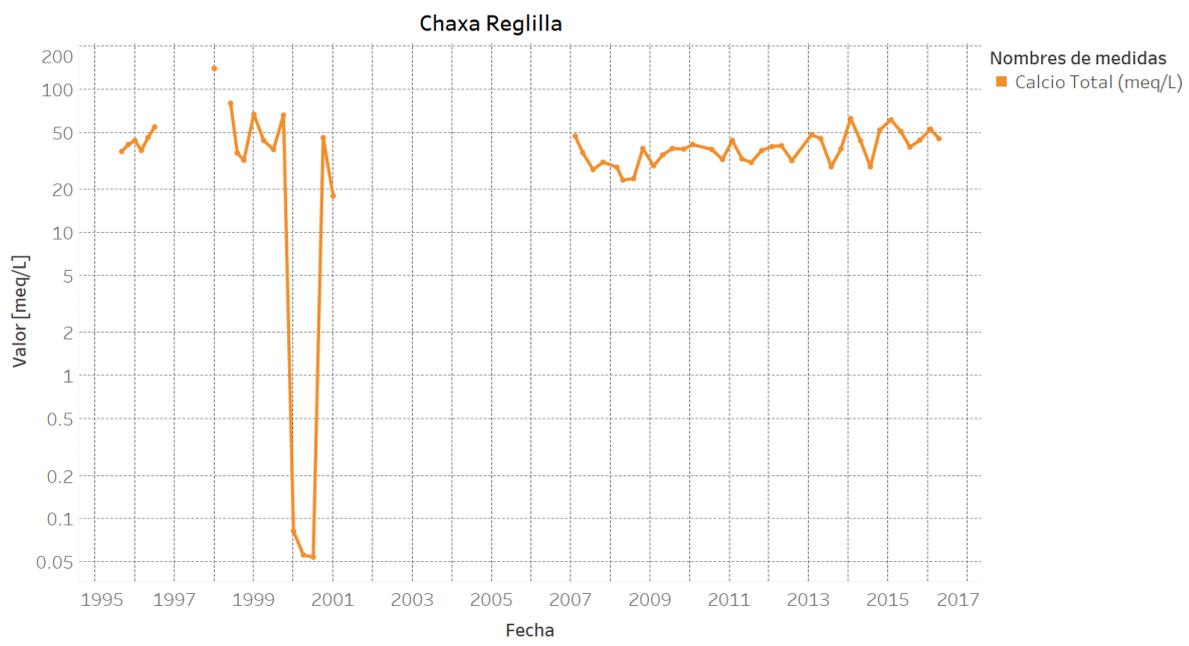
Laguna Chaxa, alcalinidad total



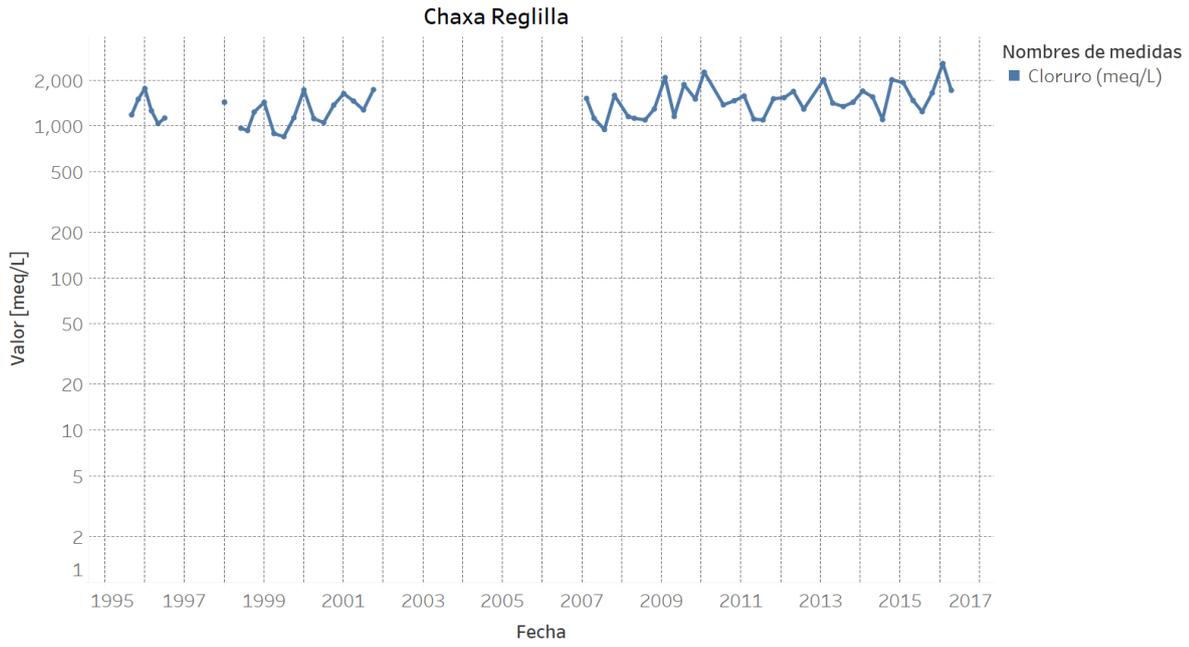
Laguna Chaxa, arsénico total



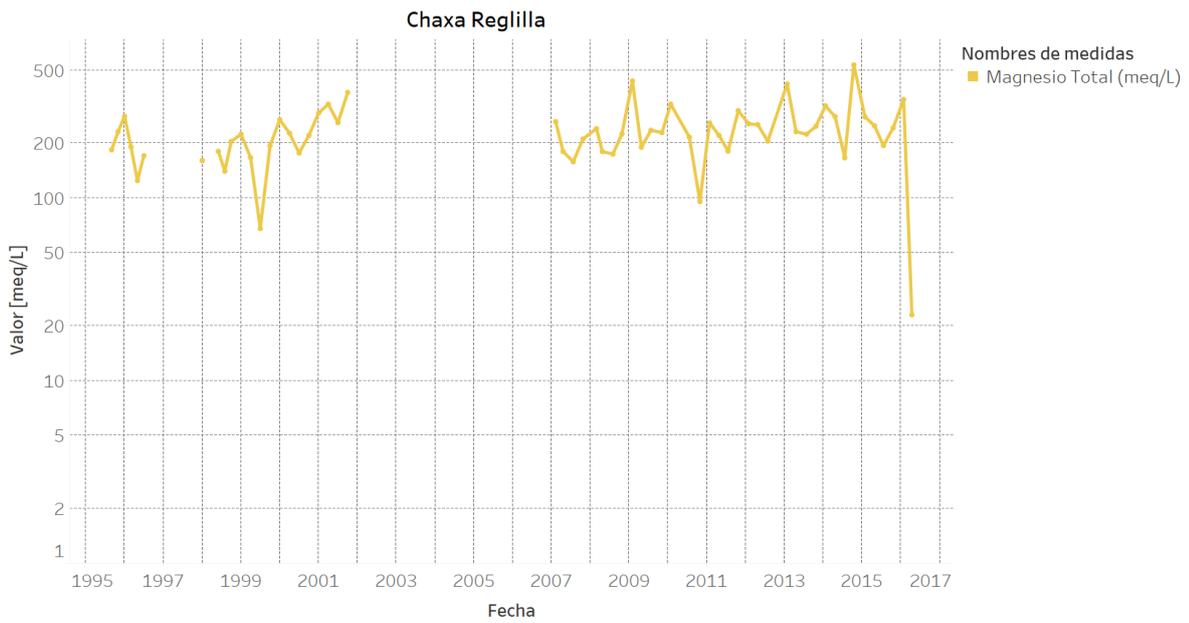
Laguna Chaxa, calcio total.



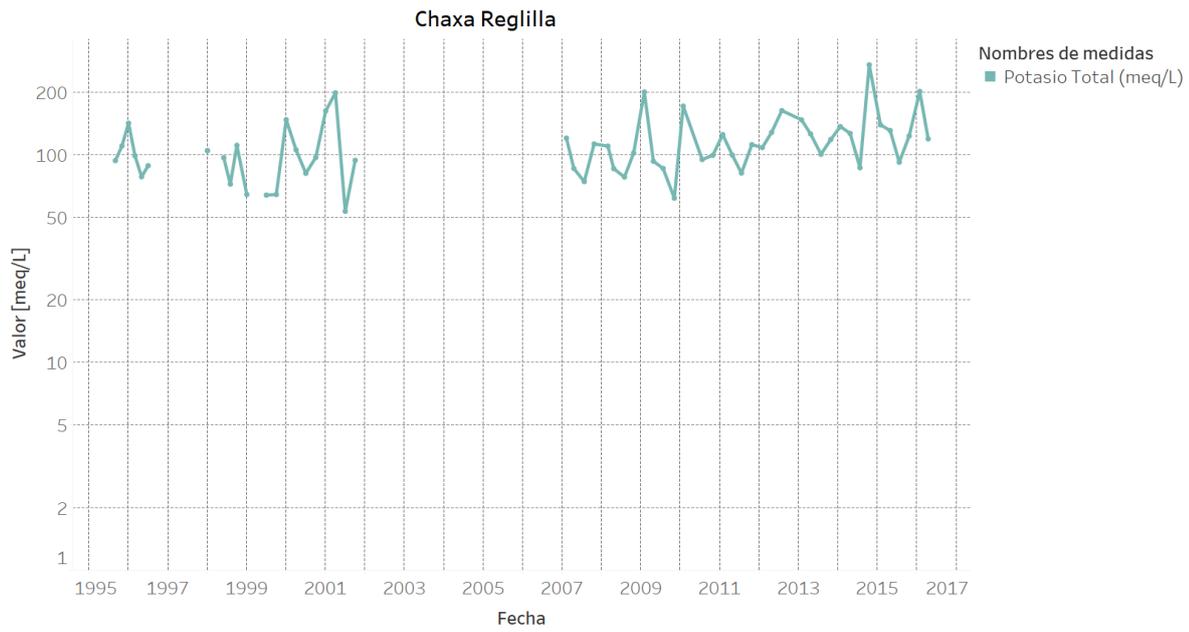
Laguna Chaxa, cloruros.



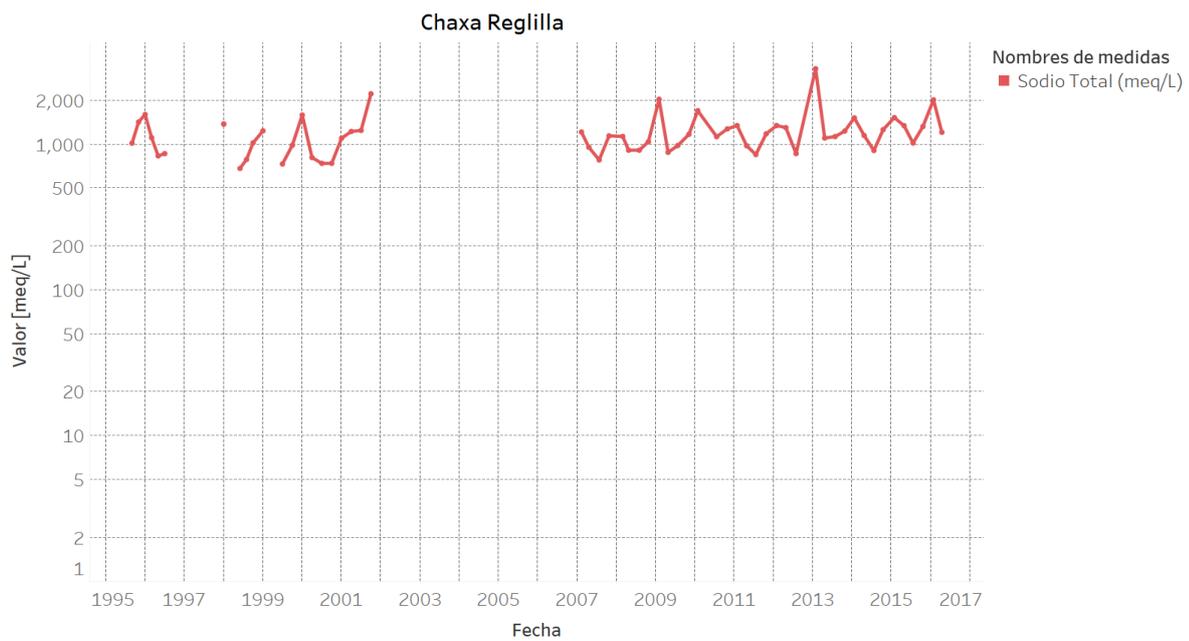
Laguna Chaxa, magnesio total



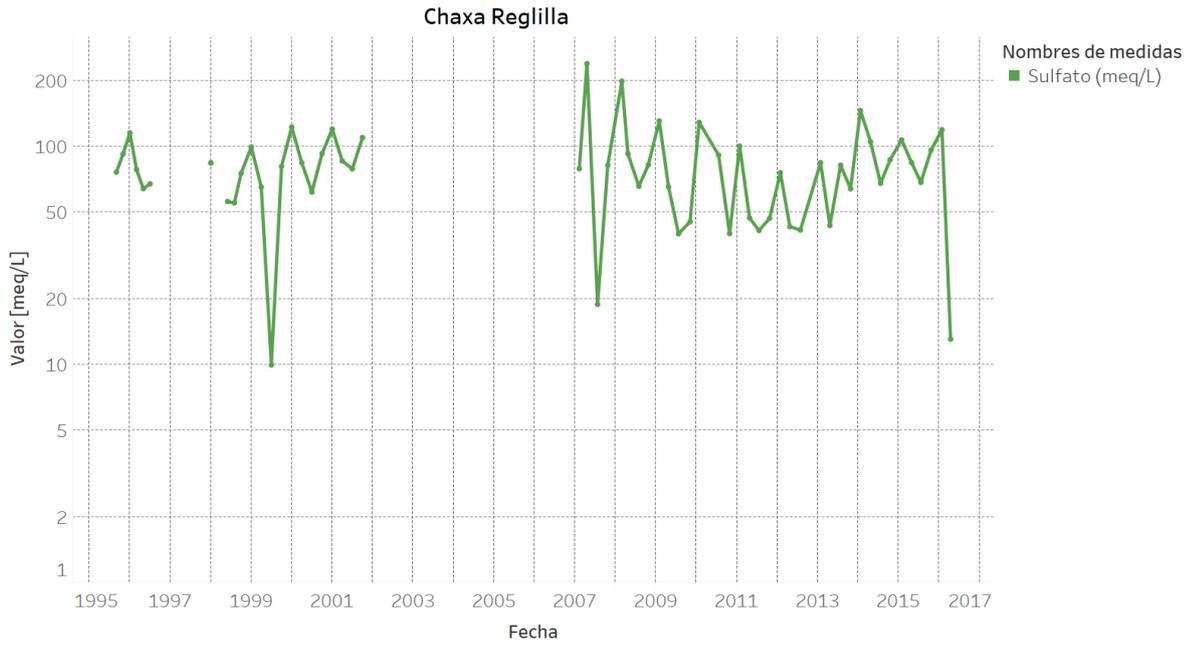
Laguna Chaxa, potasio total



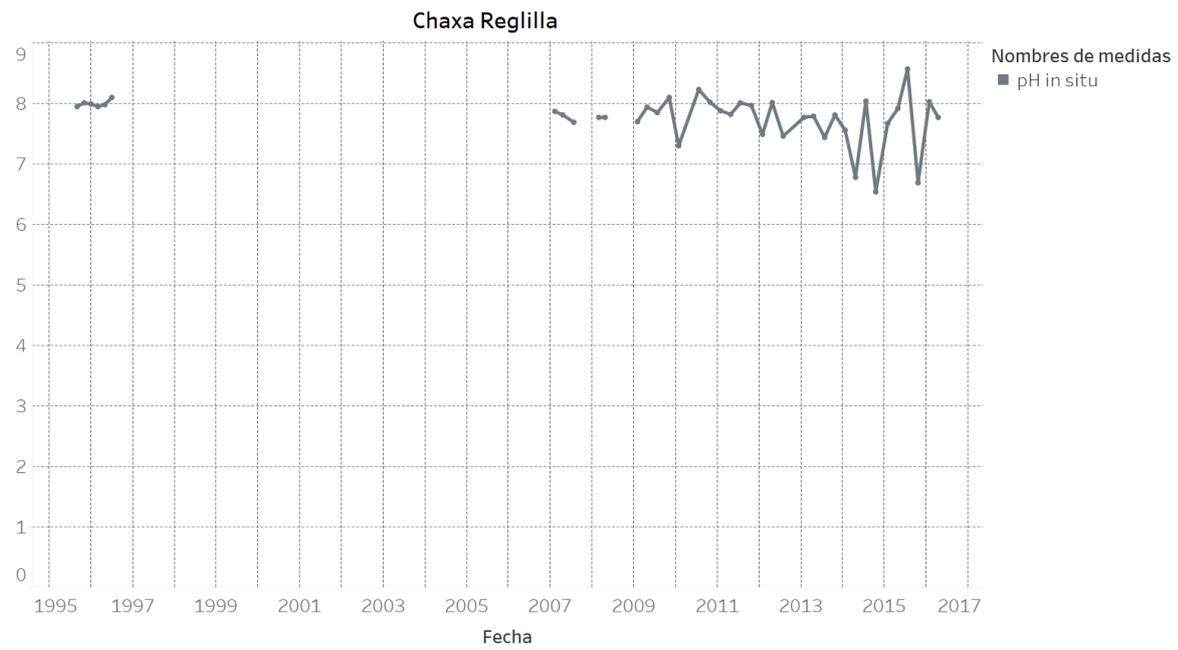
Laguna Chaxa, sodio total.



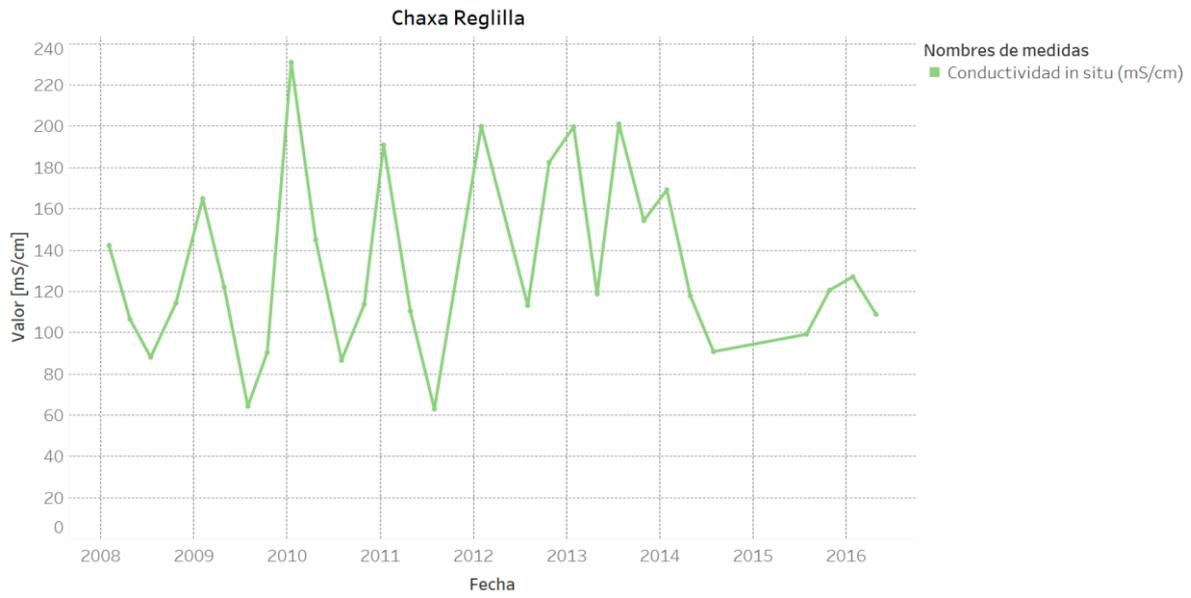
Laguna Chaxa, sulfato.



Laguna Chaxa, pH

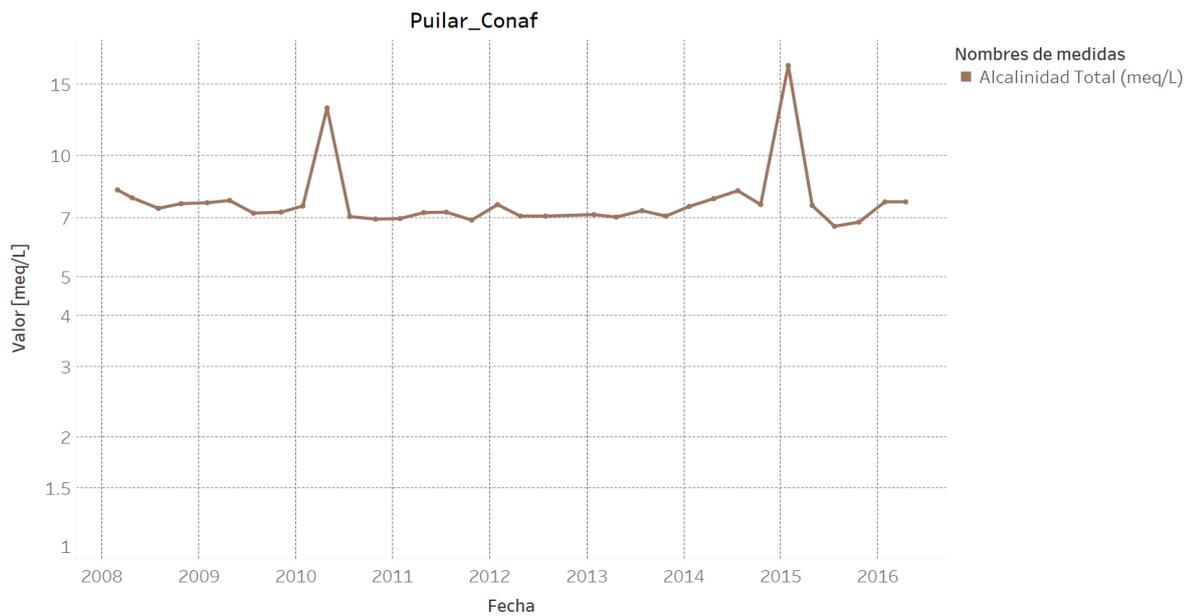


Laguna Chaxa, CE in situ.

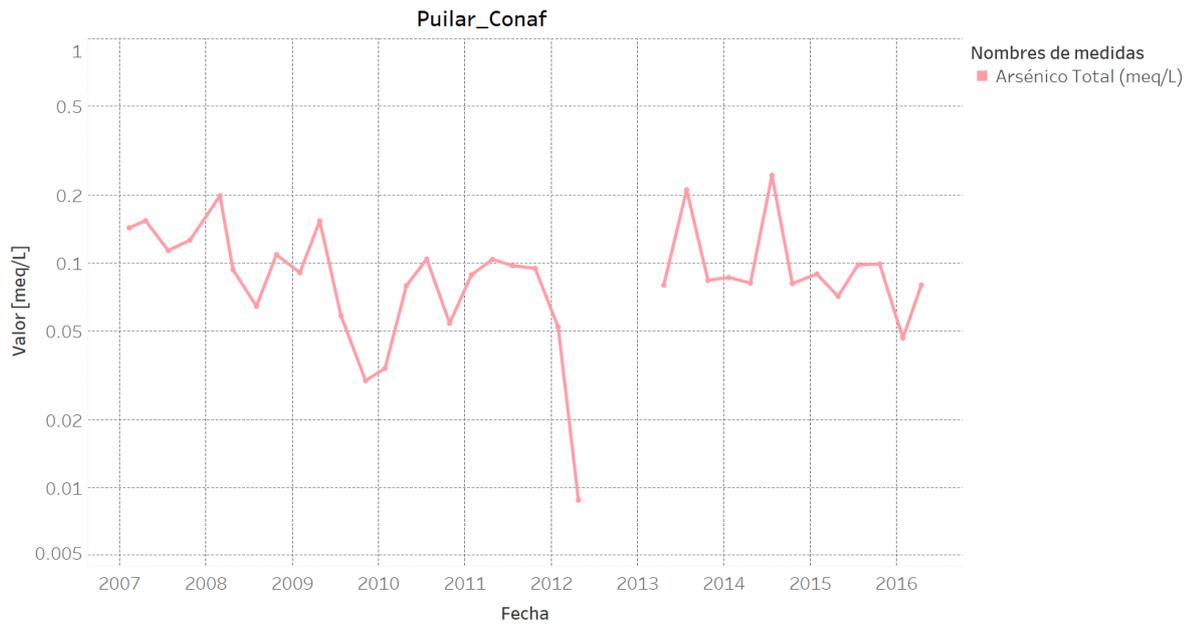


1.3 Laguna Puilar

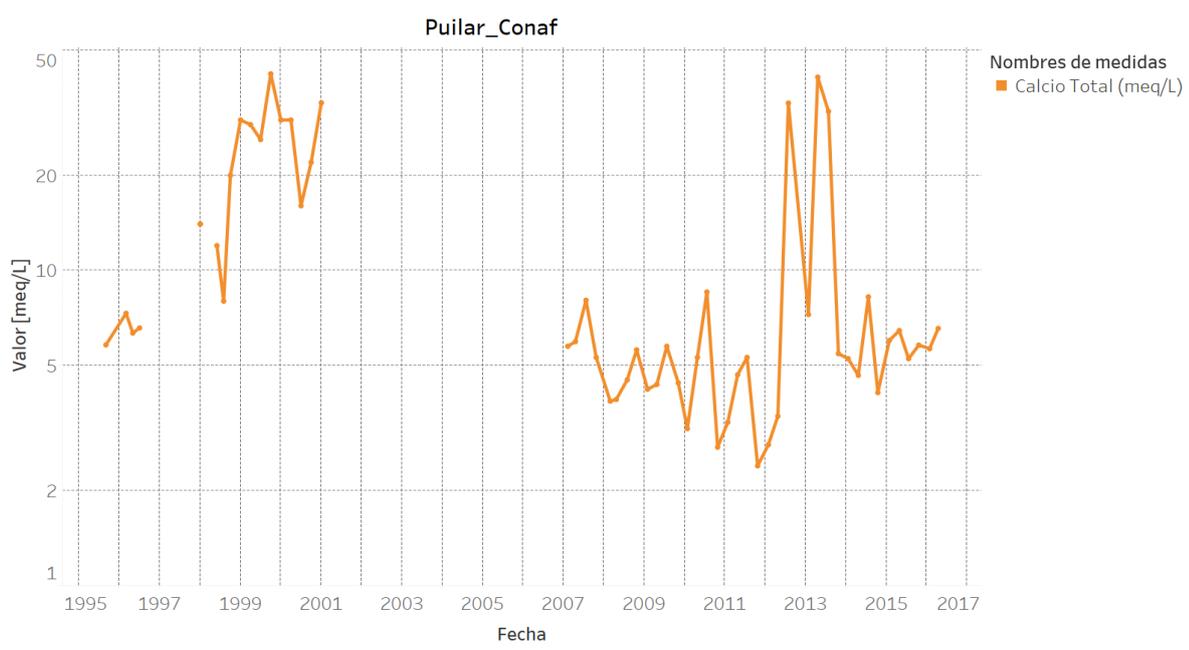
Laguna Puilar, alcalinidad total



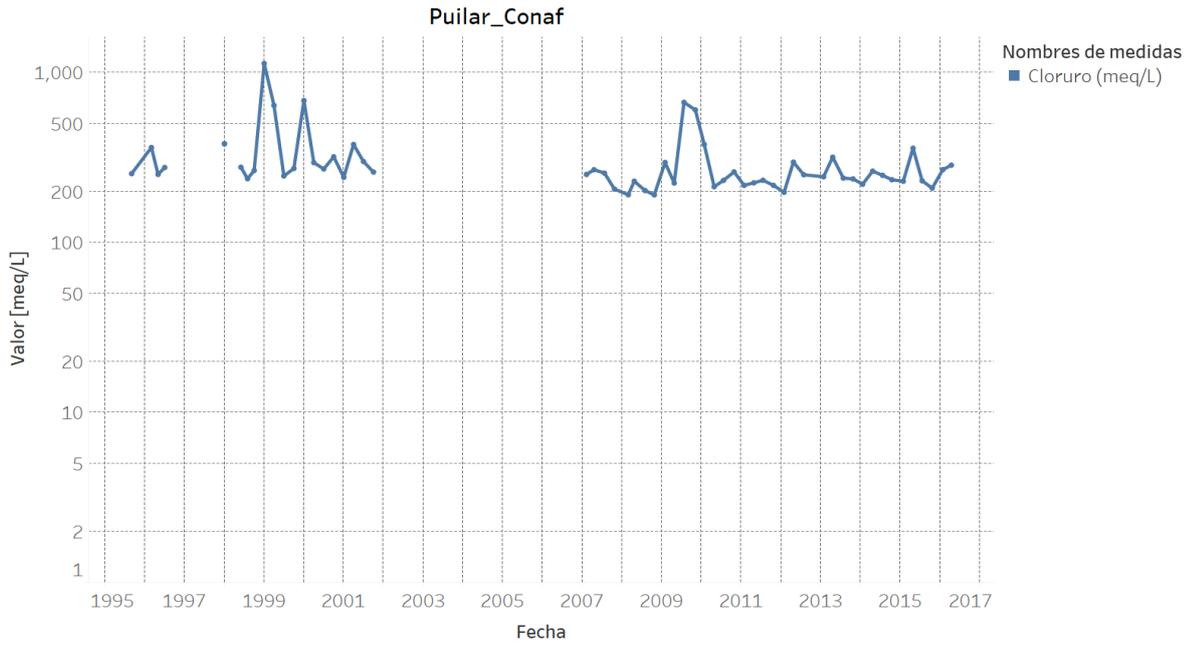
Laguna Puilar, arsénico total



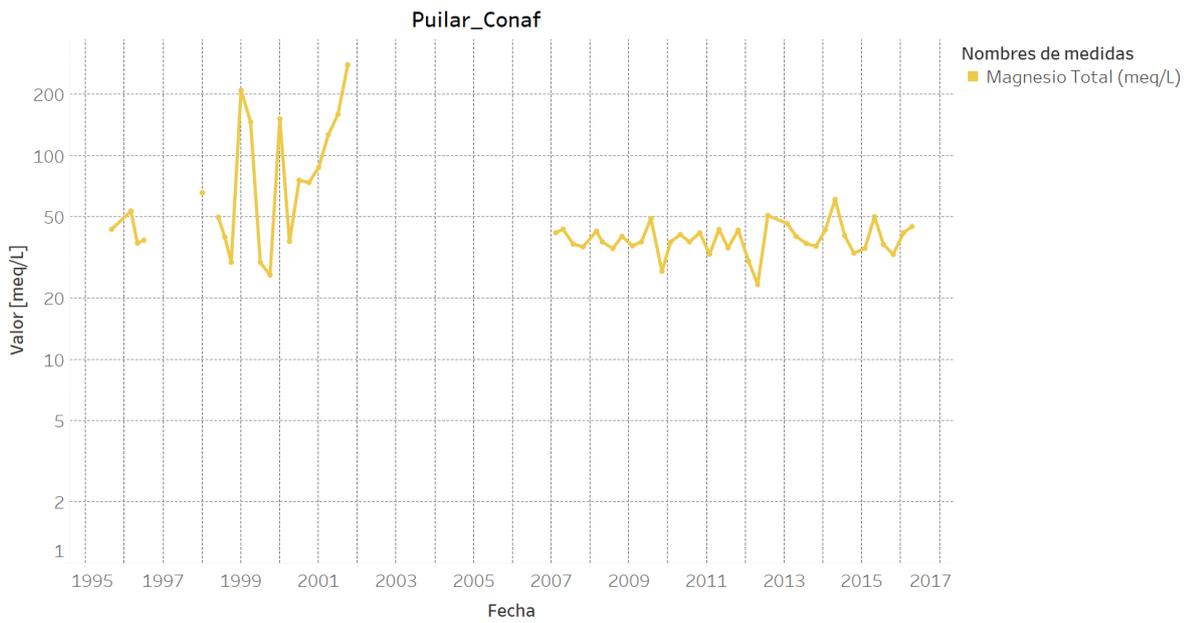
Laguna Puilar, calcio total



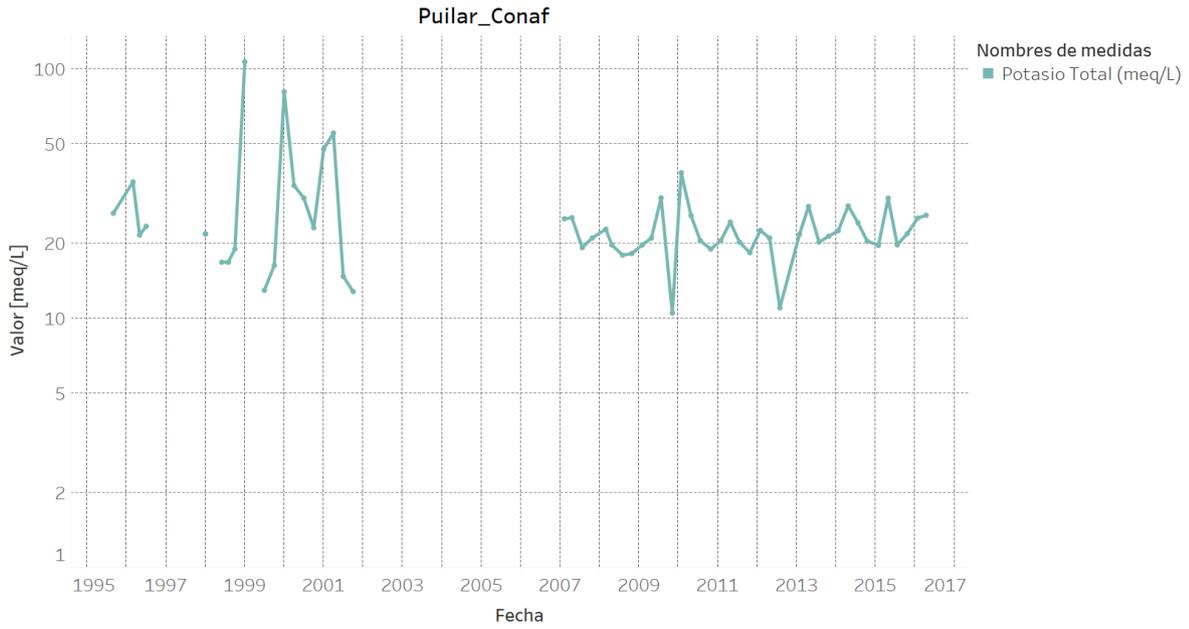
Laguna Puilar, cloruros.



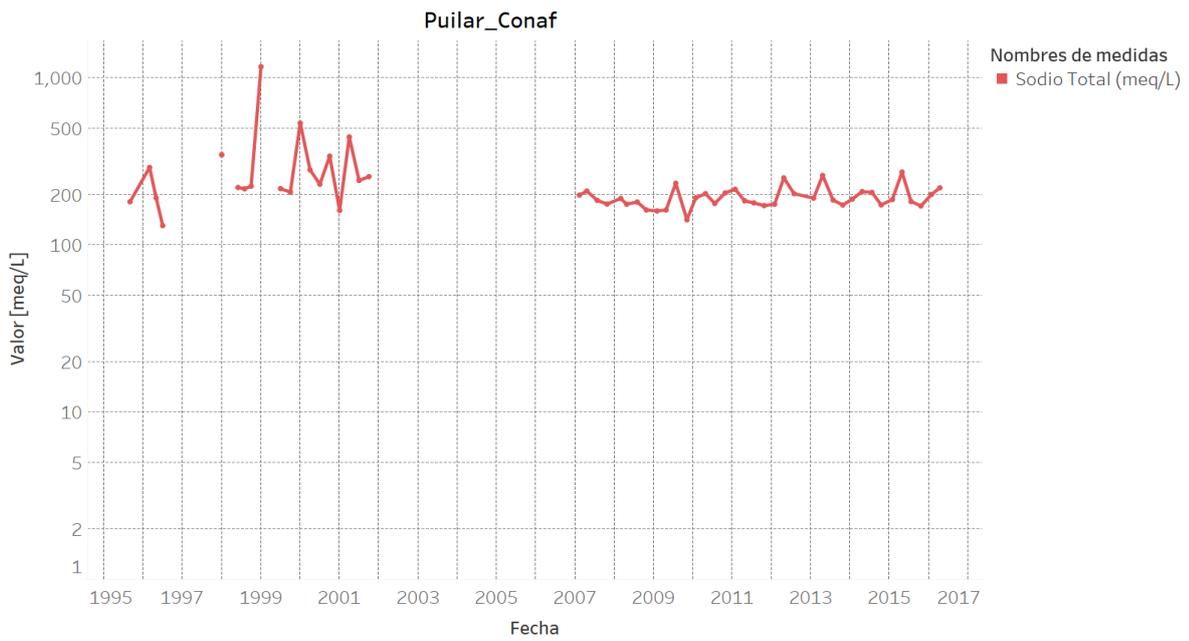
Laguna Puilar, magnesio total



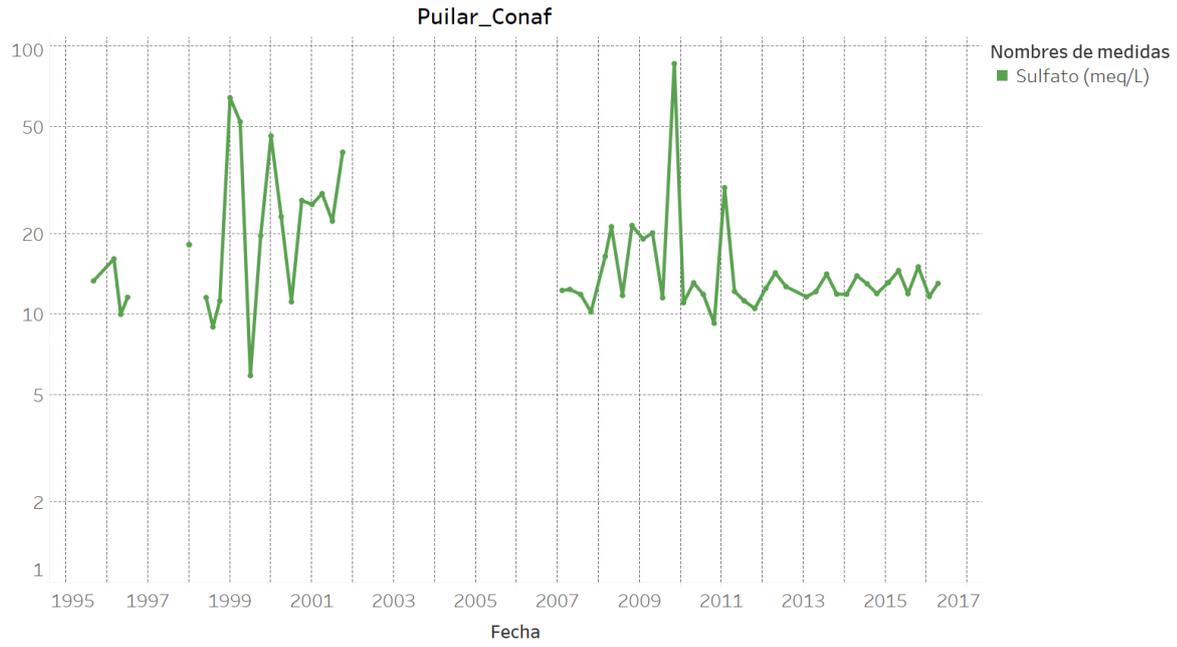
Laguna Puilar, potasio total



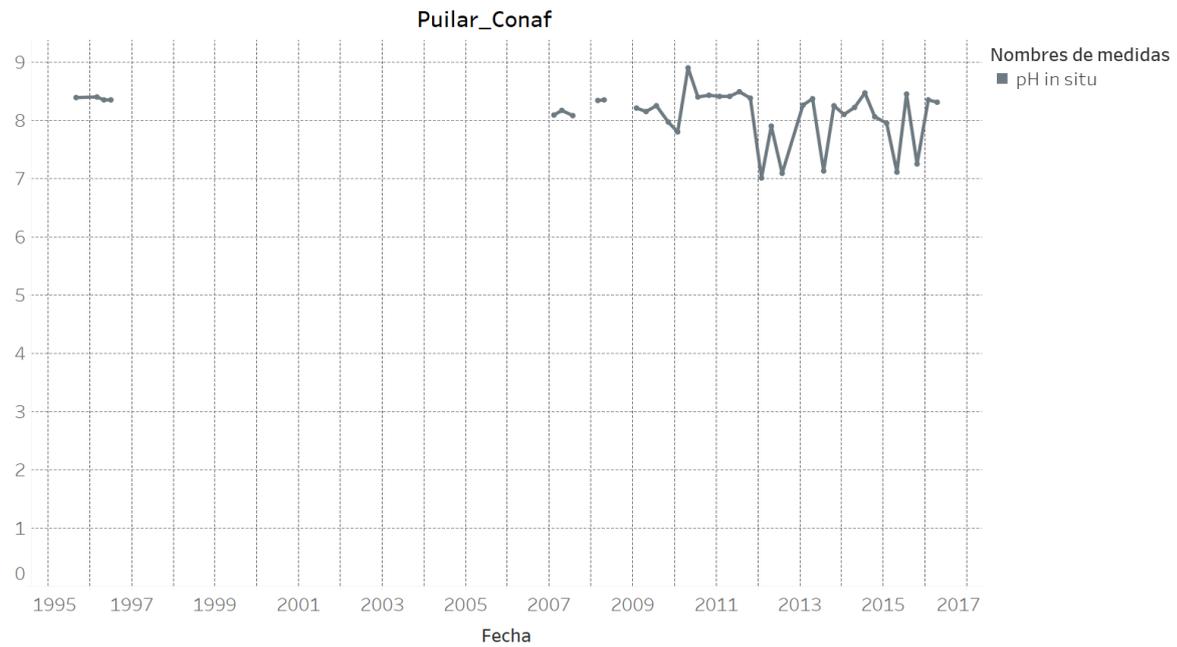
Laguna Puilar, sodio total



Laguna Puilar, sulfatos

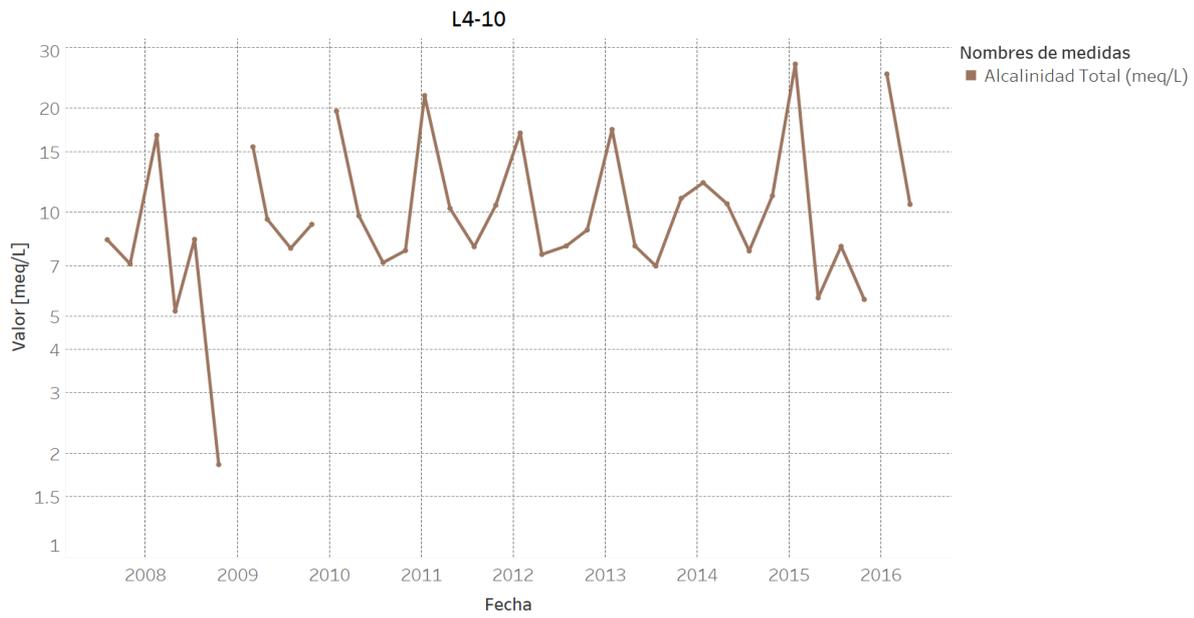


Laguna Puilar, pH in situ.

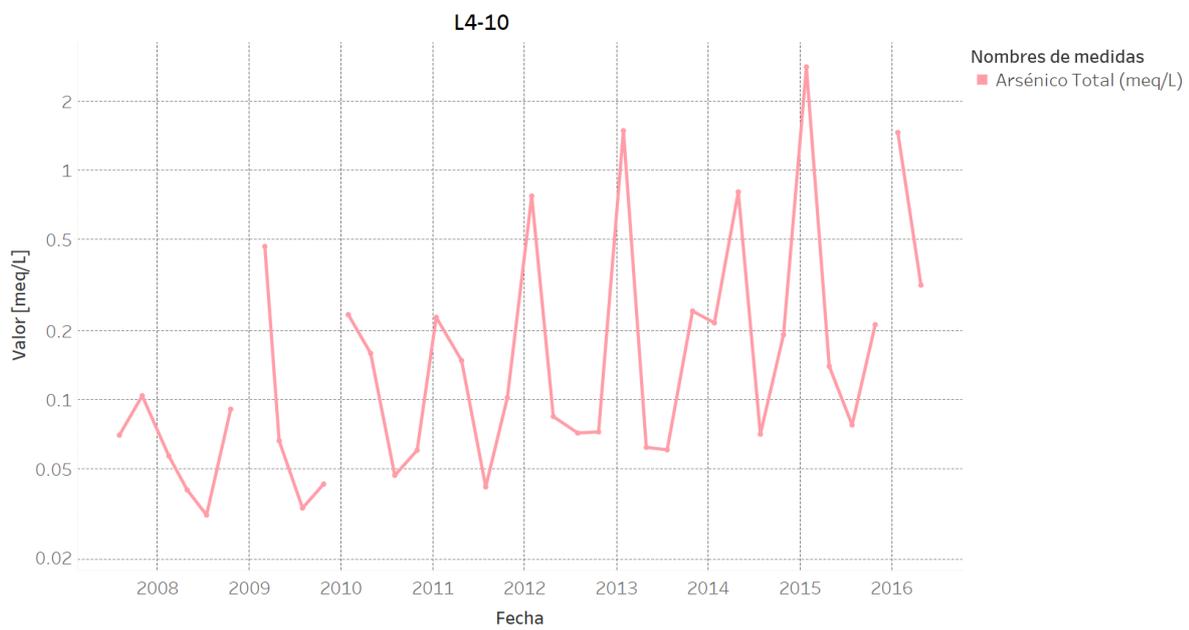


2 Sistema Aguas de Quelana.

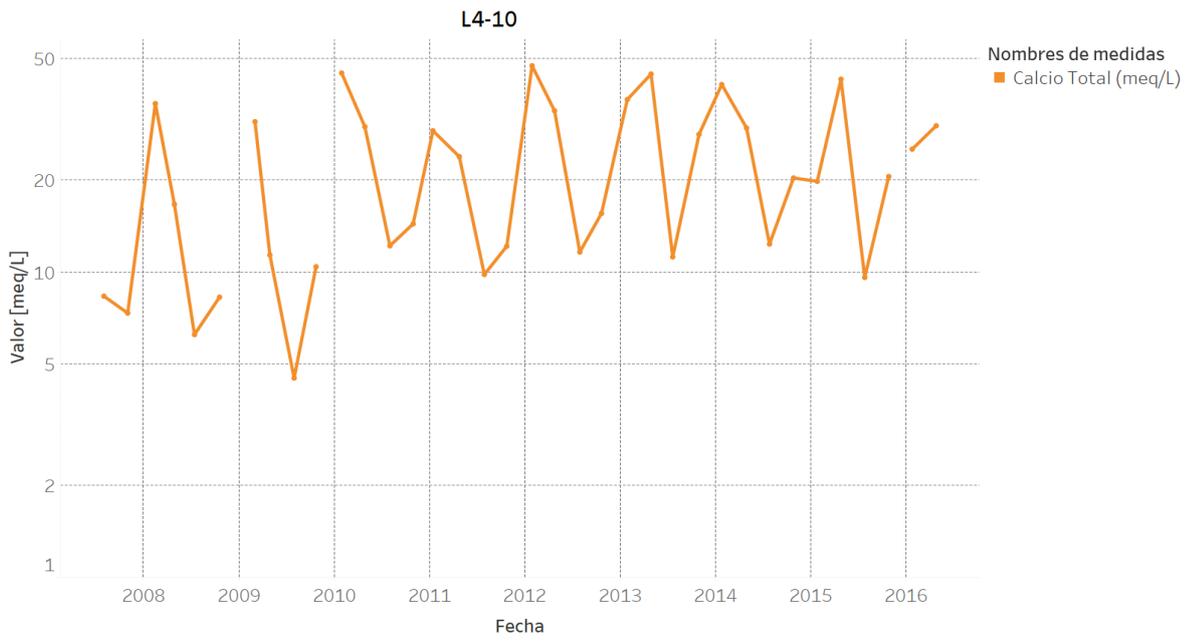
L4-10, alcalinidad total



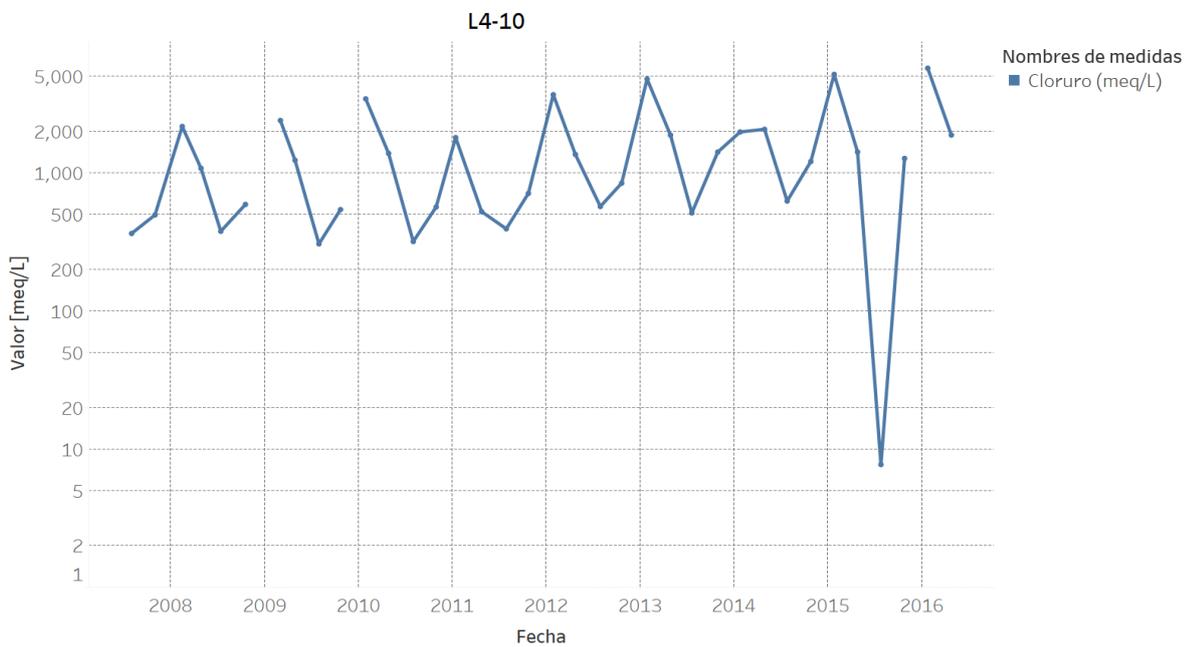
L4-10, arsénico total.



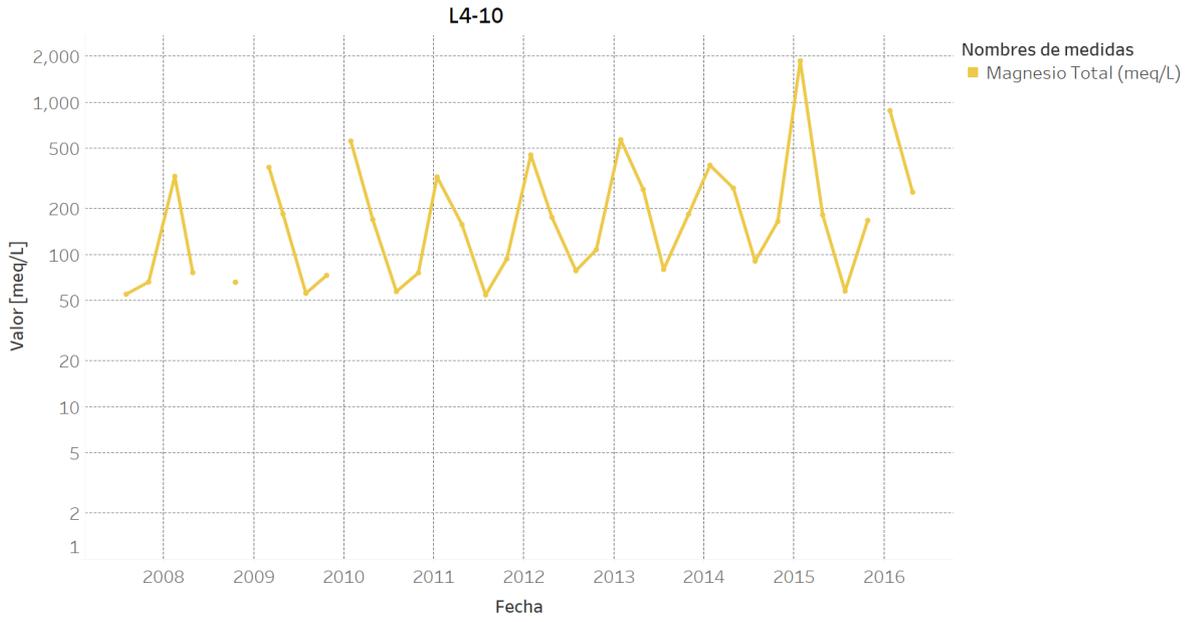
L4-10, calcio total



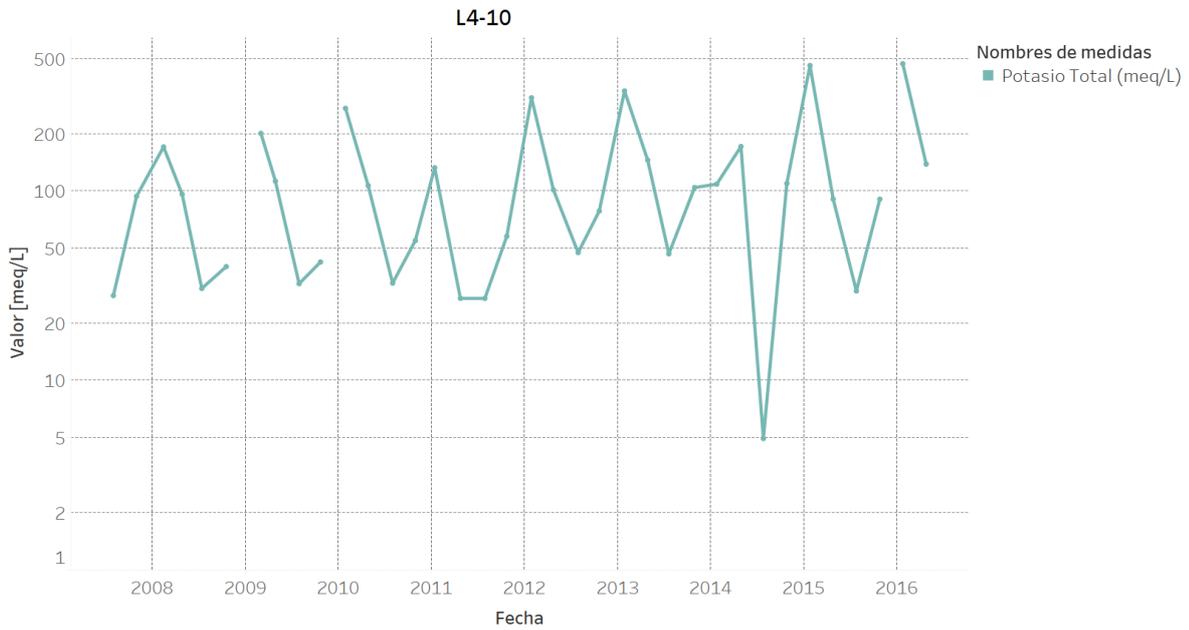
L4-10, cloruros



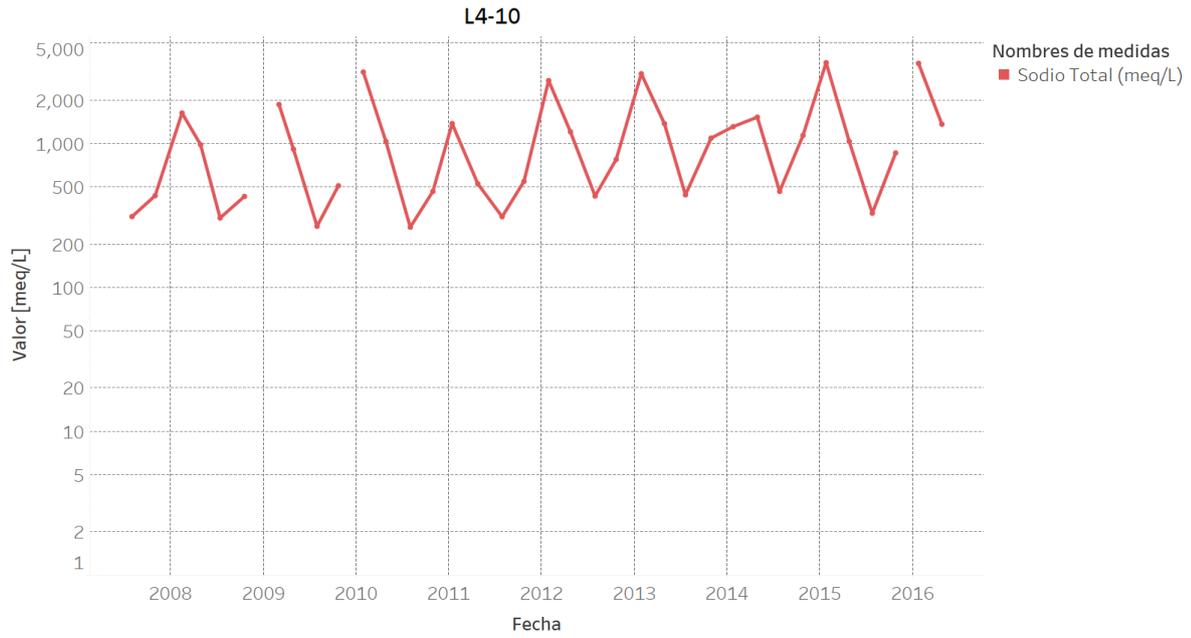
L4-10, magnesio total



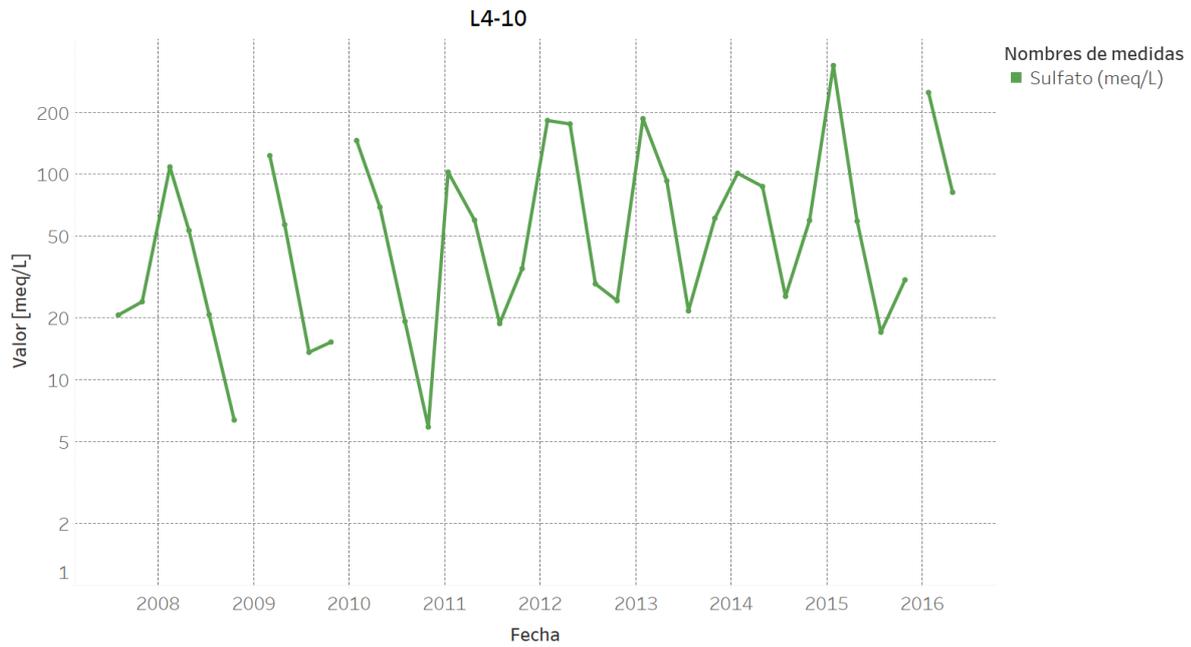
L4-10, potasio total



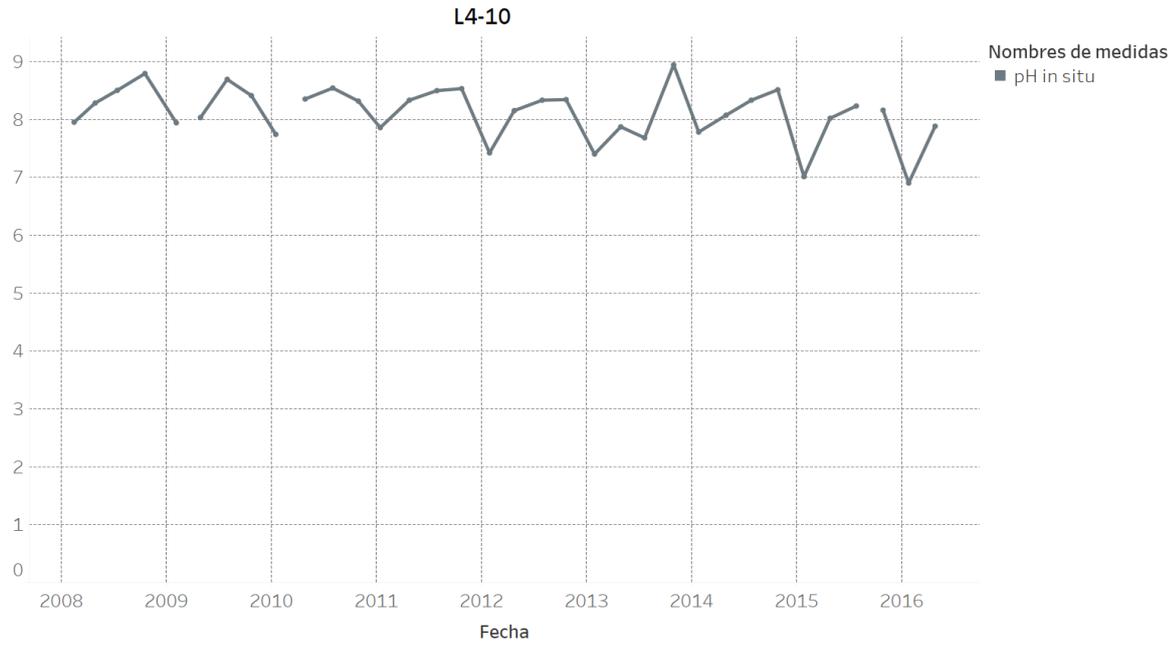
L4-10. sodio total



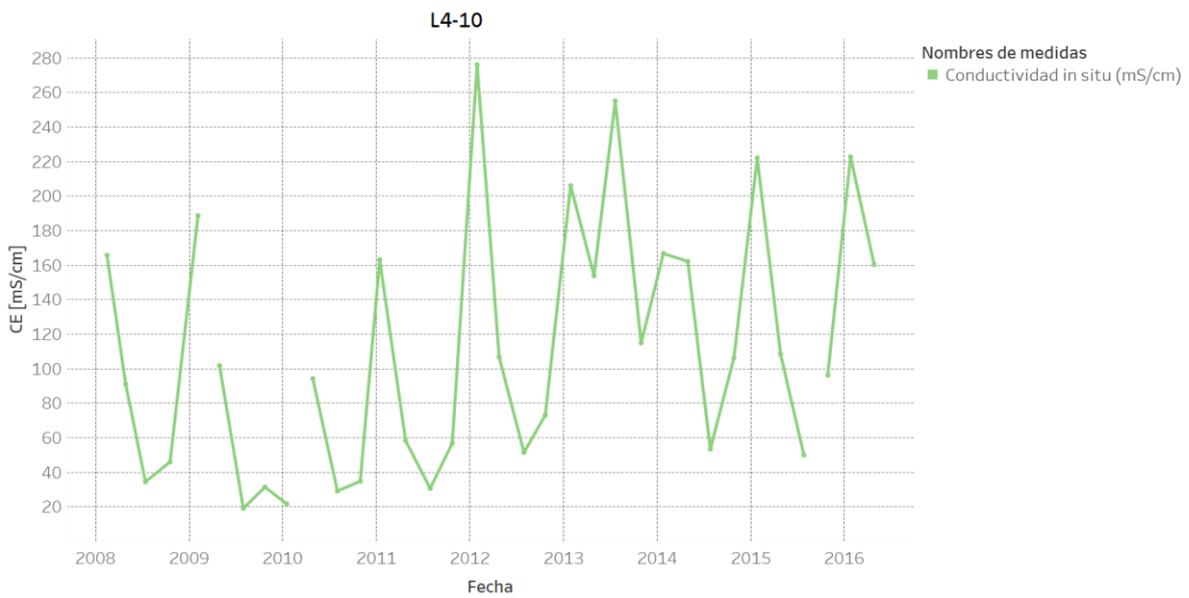
L4-10, sulfatos



L4-10, pH in situ



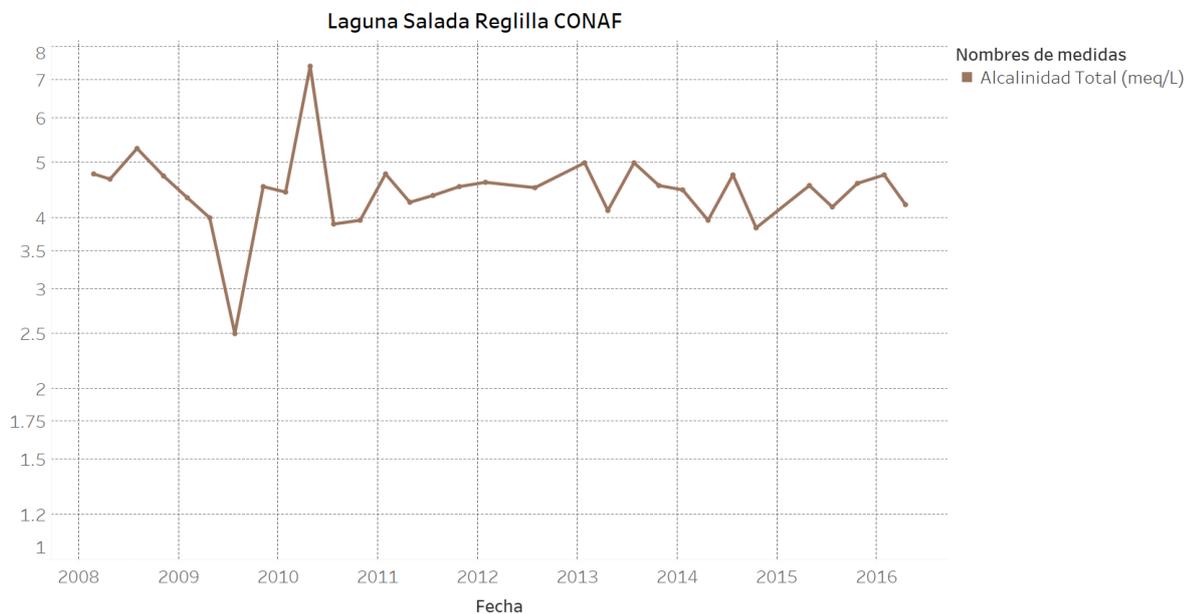
L4-10, CE in situ



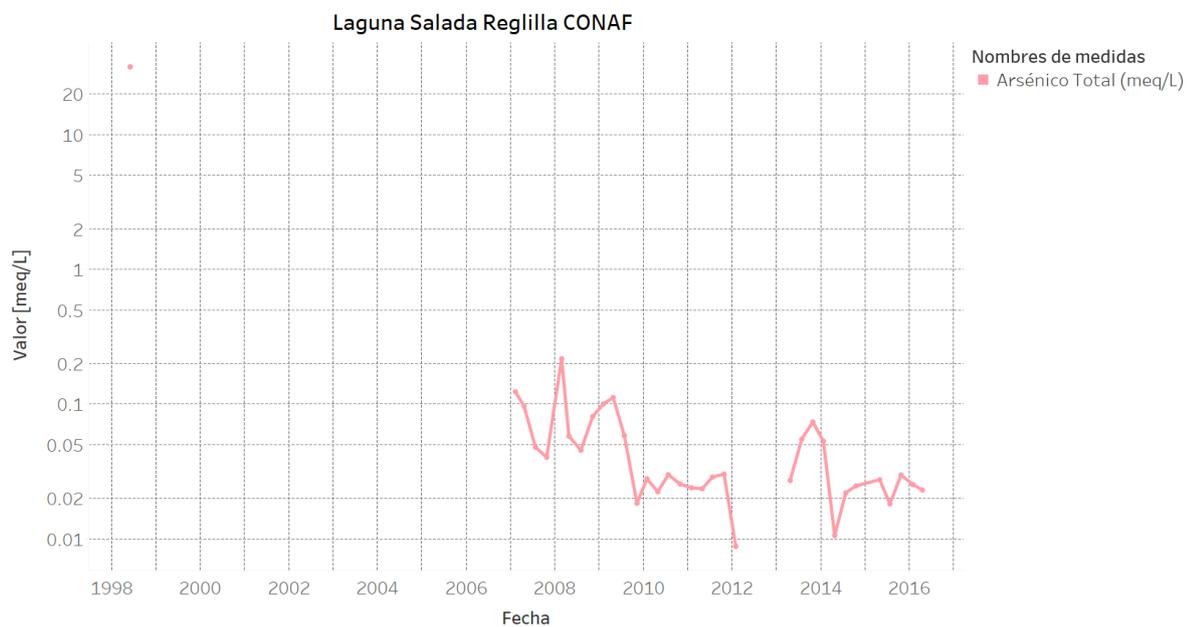
3 Sistema Peine

3.1 Laguna Salada

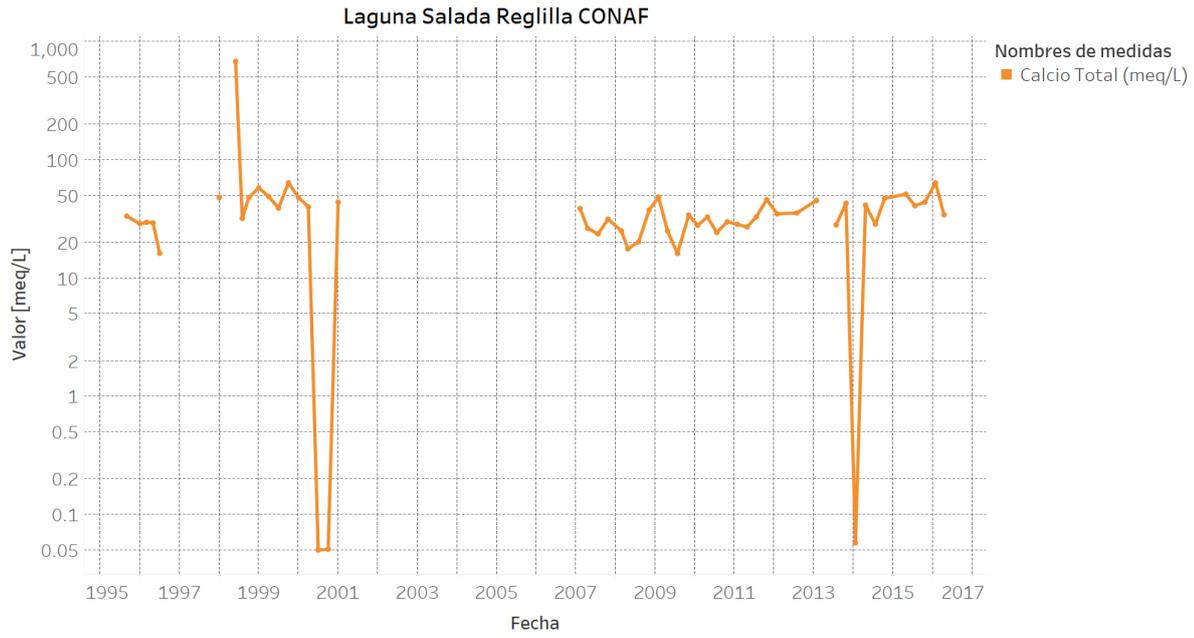
Laguna Salada, alcalinidad total



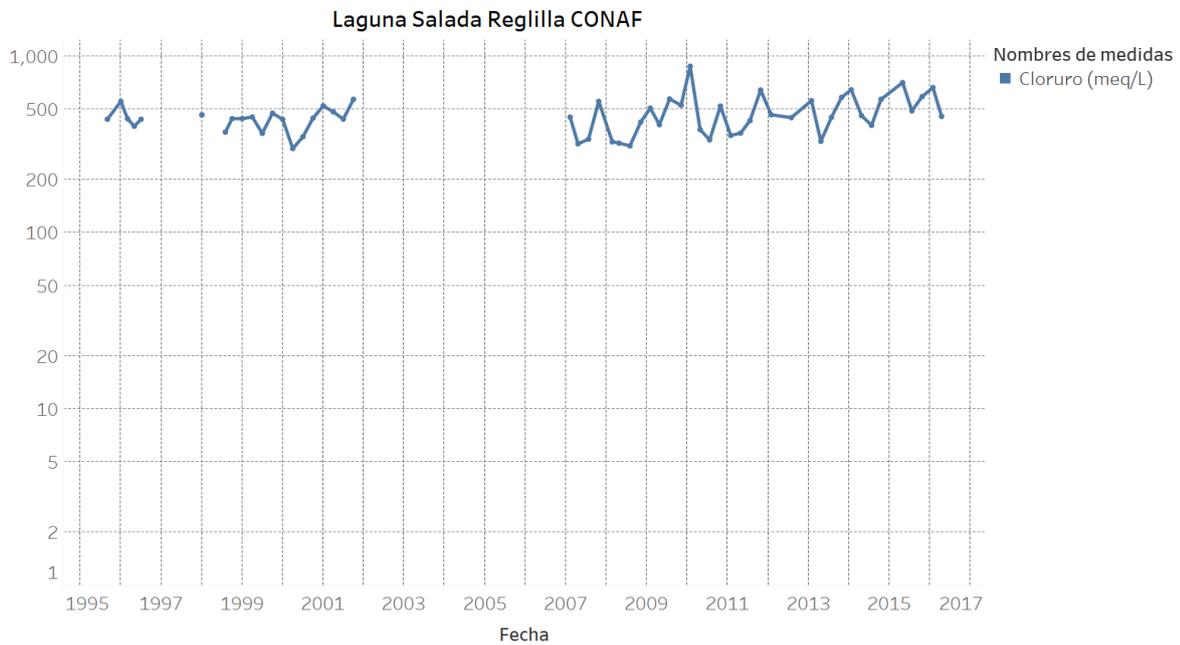
Laguna Salada, arsénico total



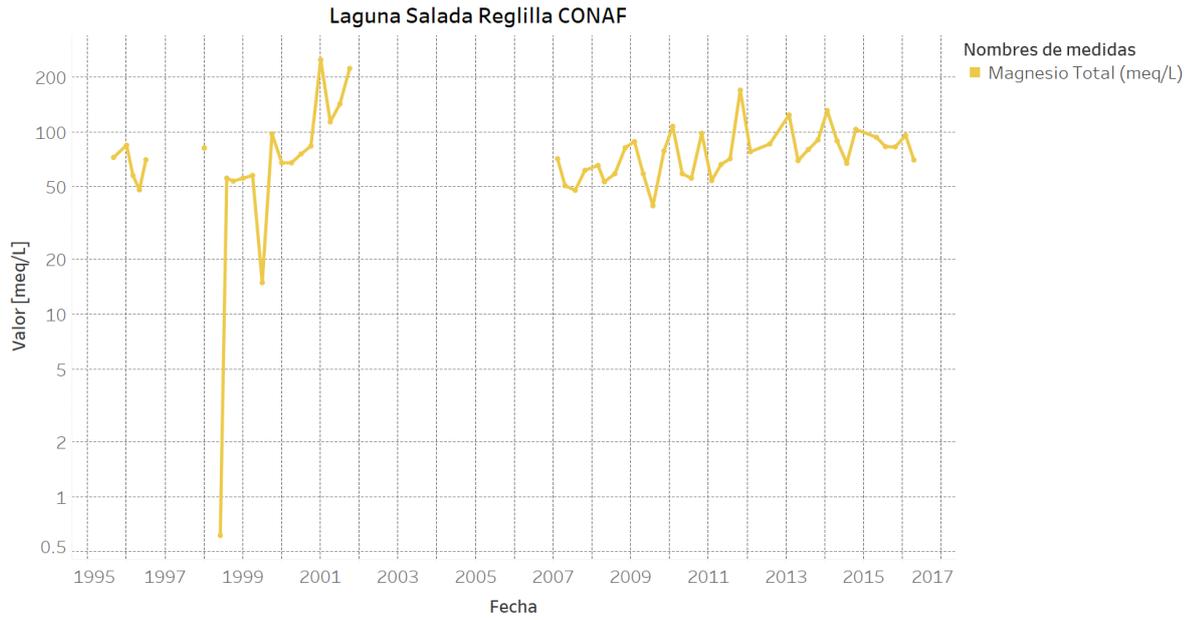
Laguna Salada, calcio total



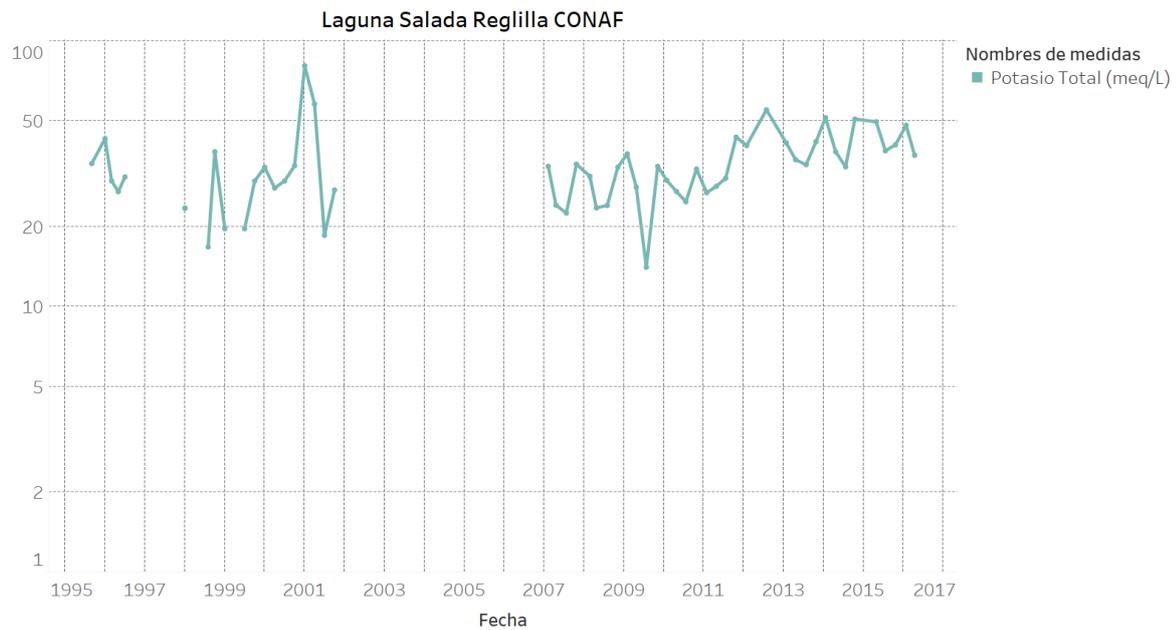
Laguna Salada, cloruros.



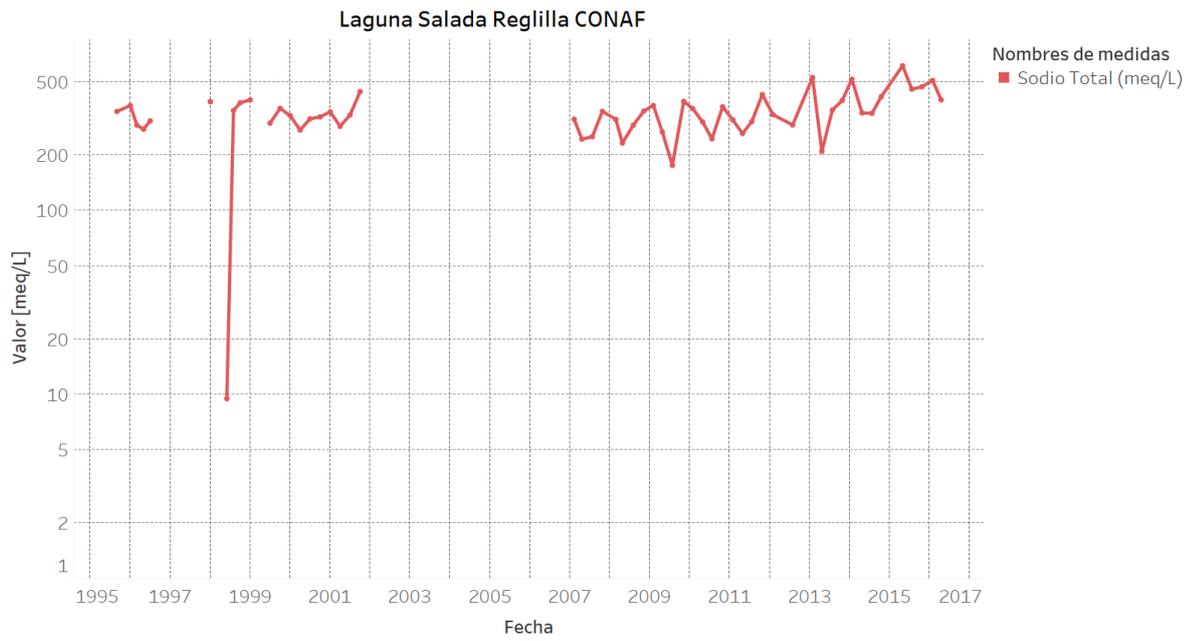
Laguna Salada, magnesio total



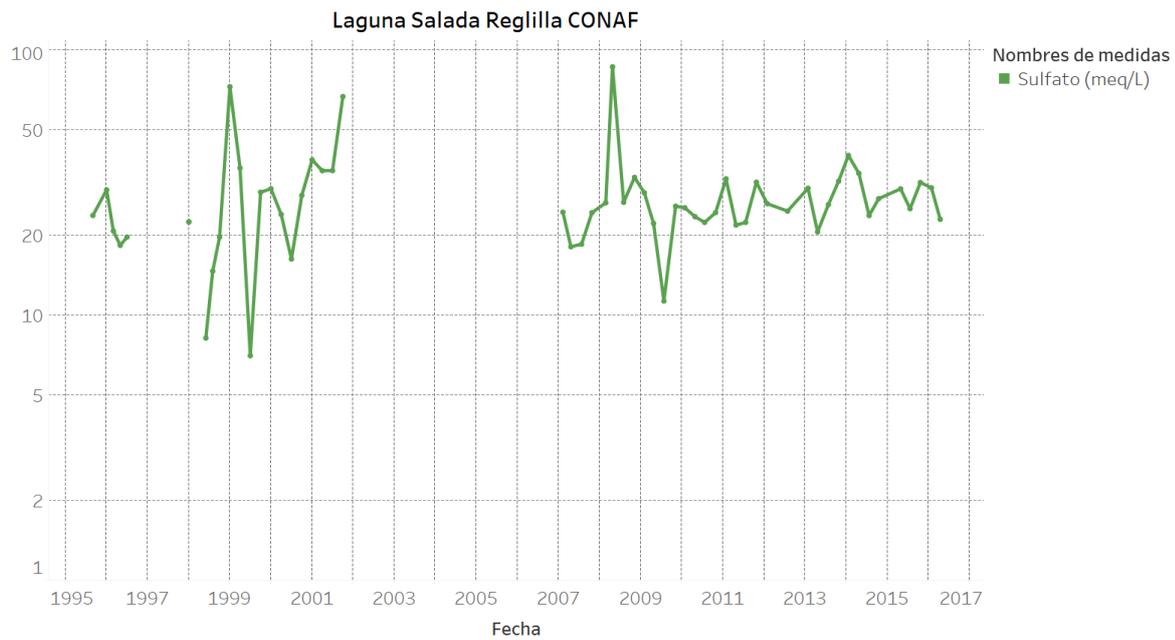
Laguna Salada, potasio total



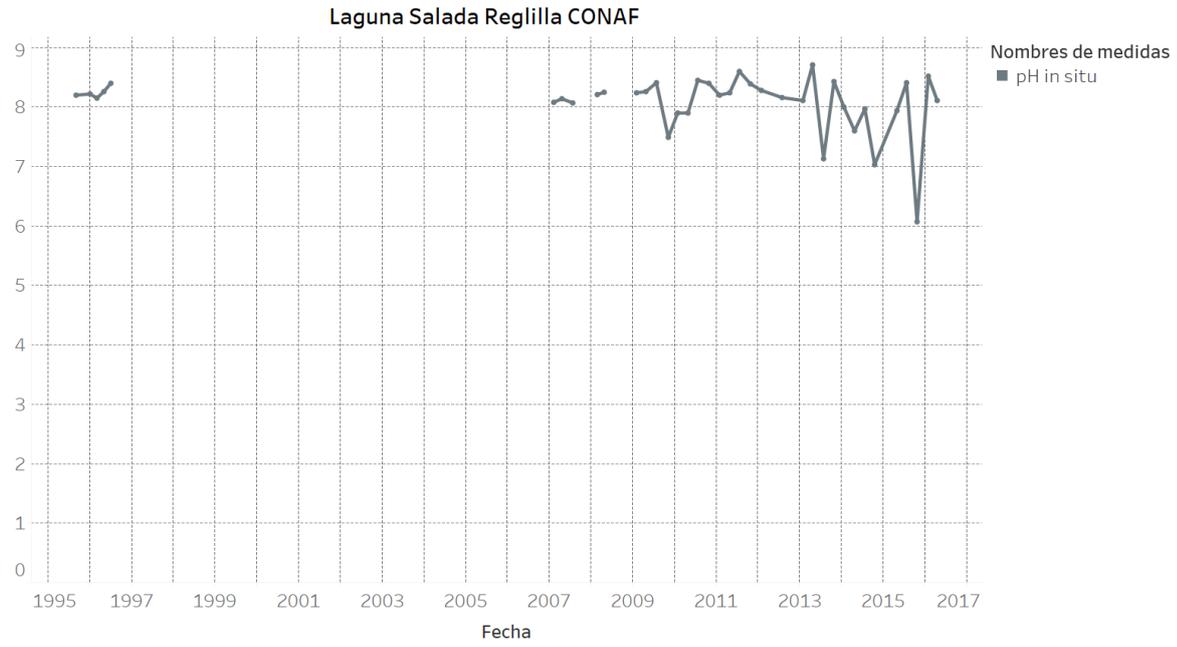
Laguna Salada, sodio total



Laguna Salada, sulfatos.

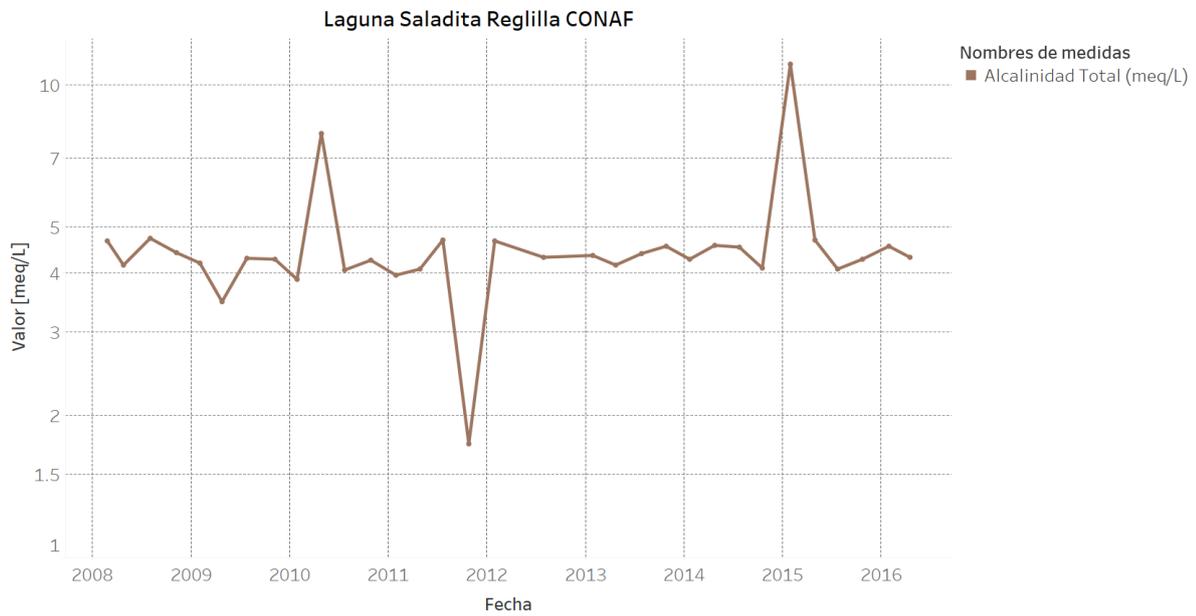


Laguna Salada, pH in situ

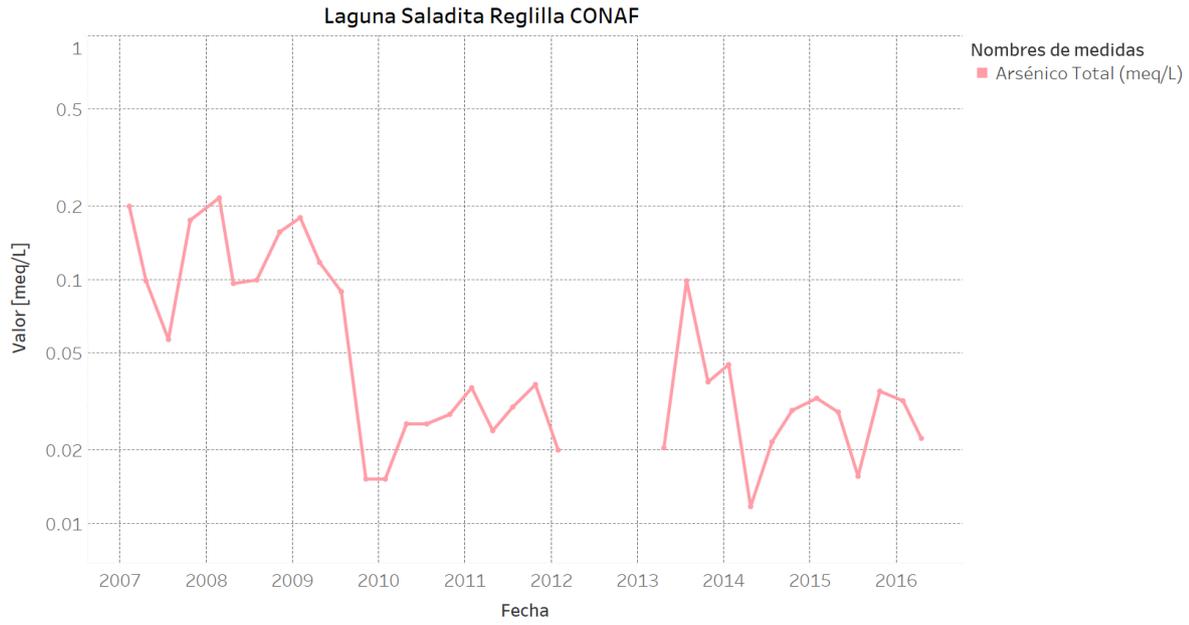


3.2 Laguna Saladita

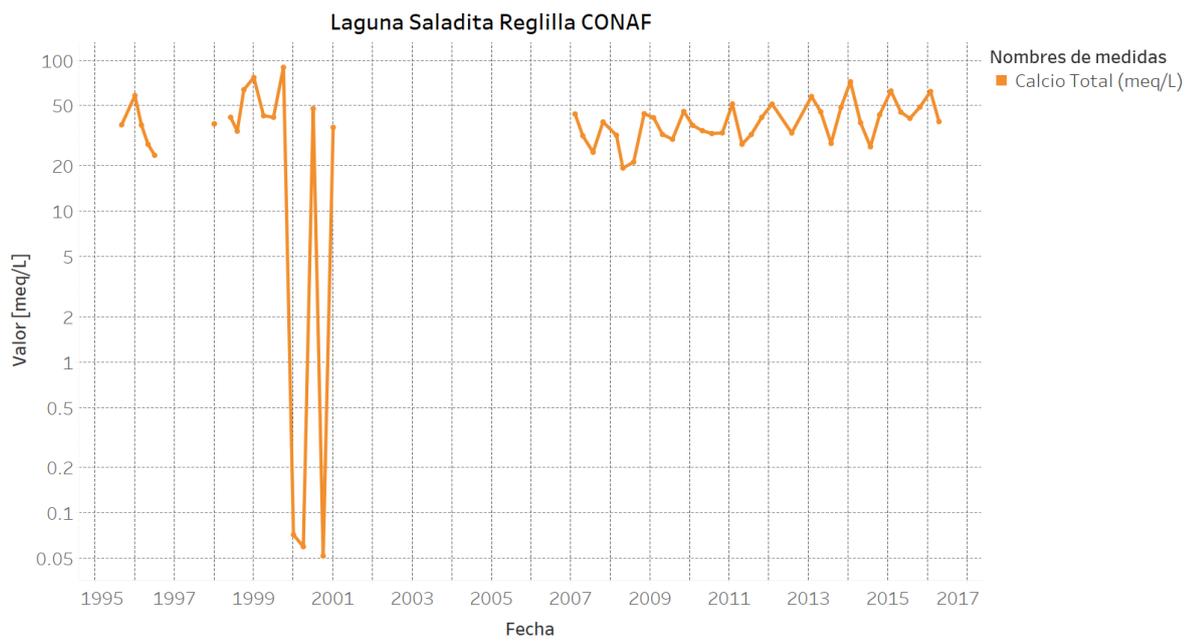
Laguna Saladita, alcalinidad total.



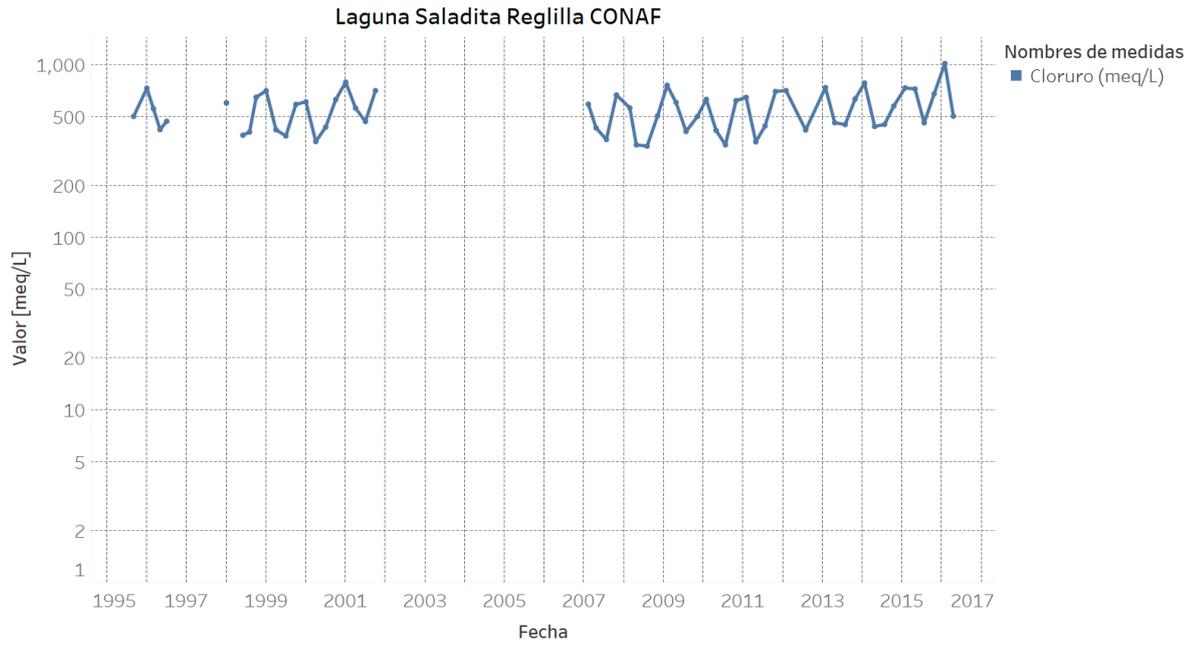
Laguna Saladita, arsénico total



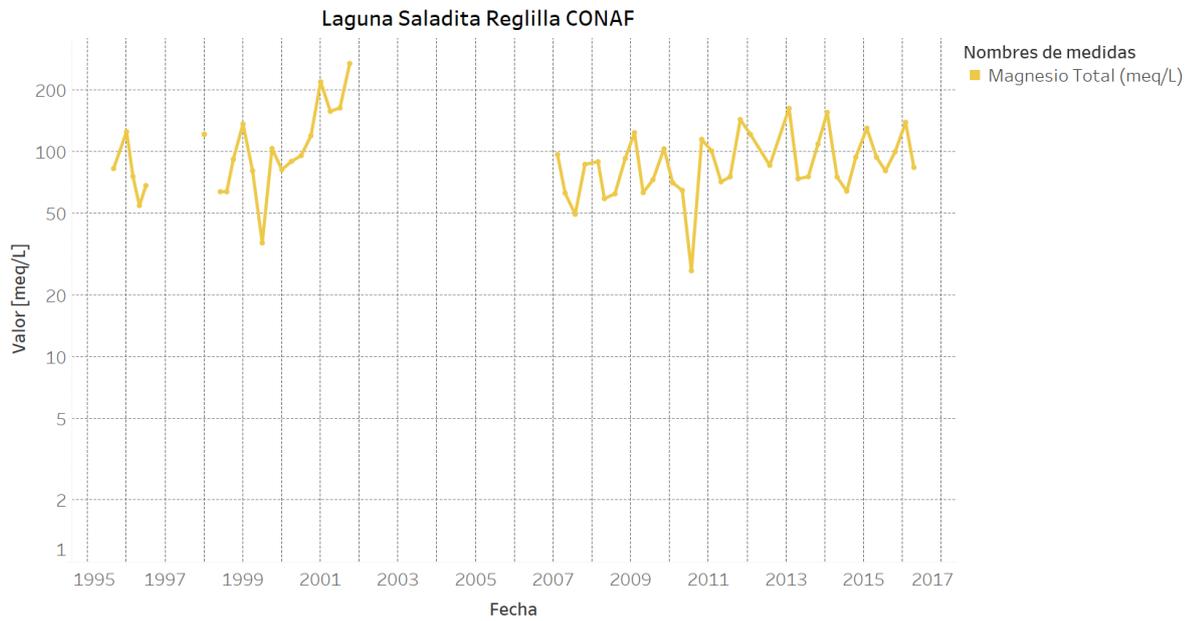
Laguna Saladita, calcio total.



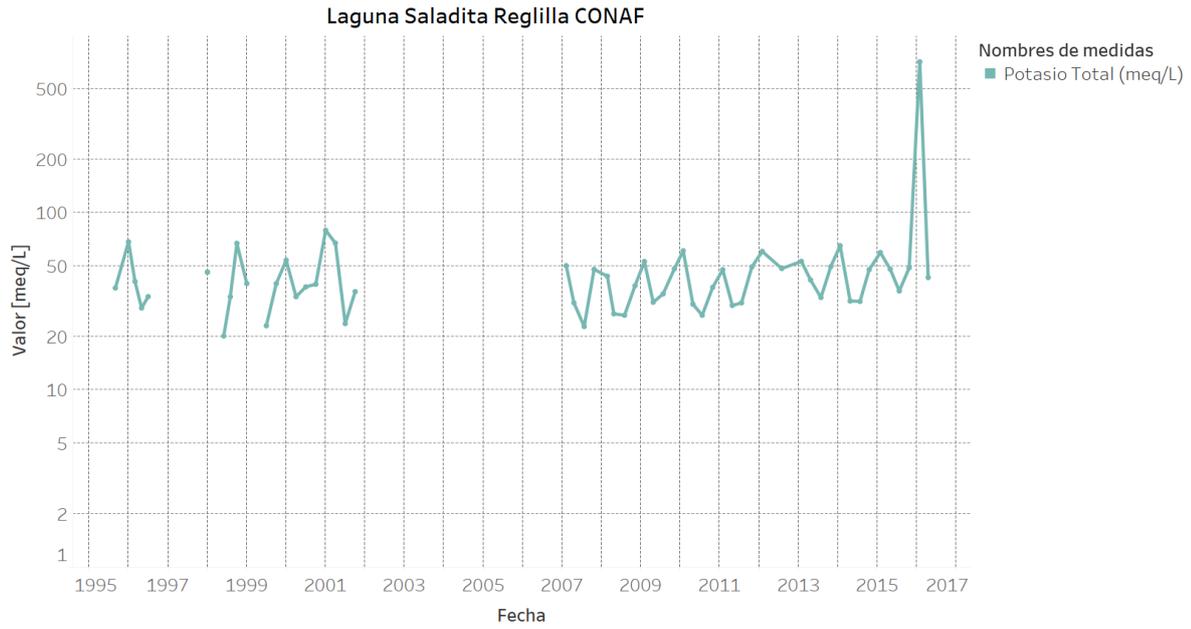
Laguna Saladita, cloruros



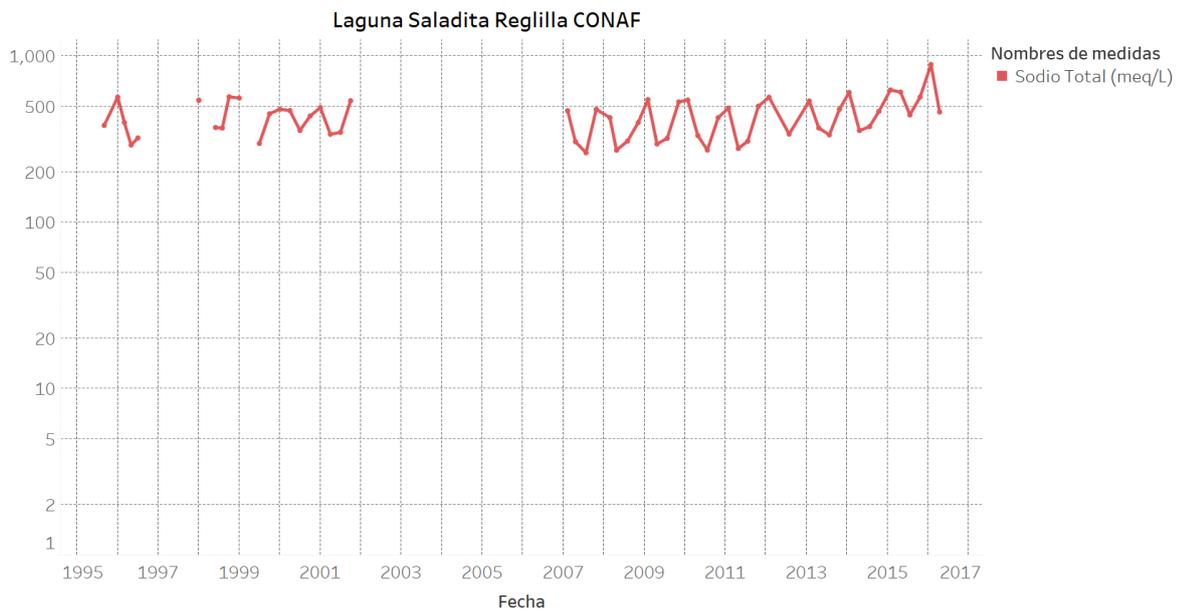
Laguna Saladita, magnesio total



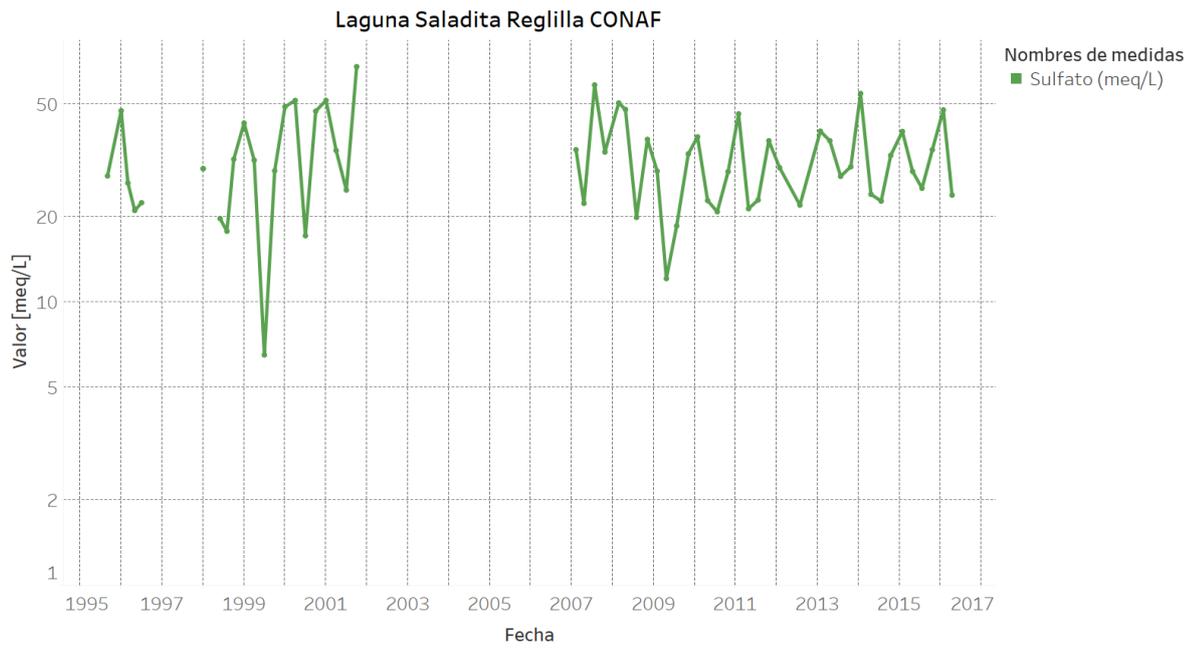
Laguna Saladita, potasio total



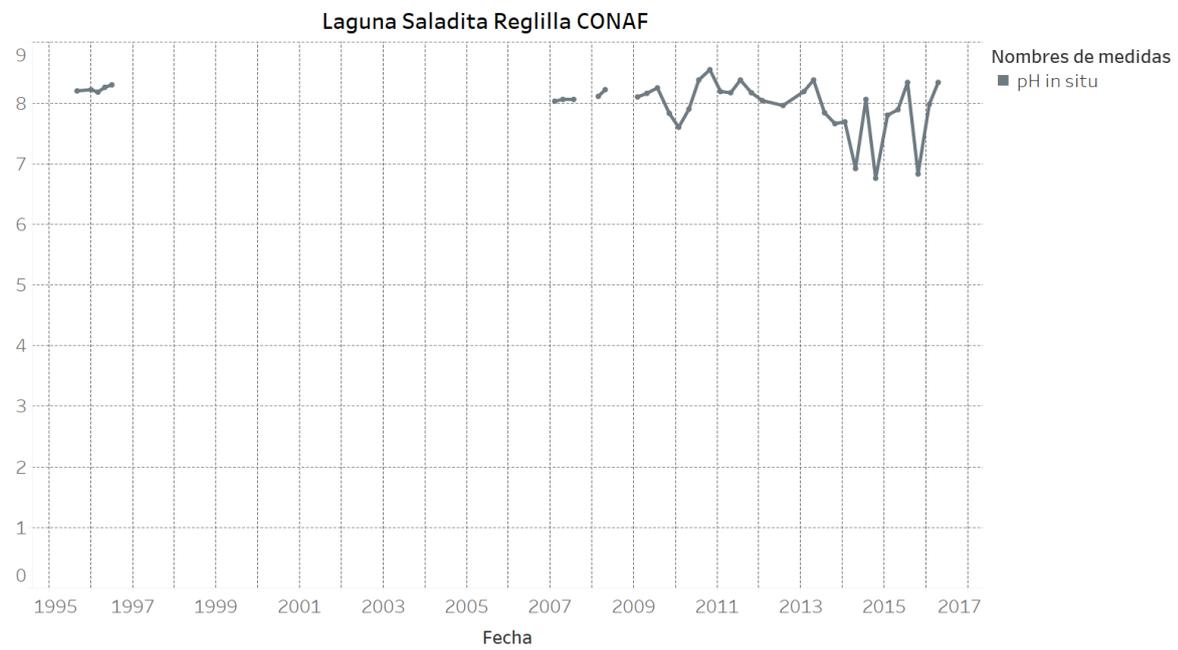
Laguna Saladita, sodio total



Laguna Saladita, sulfatos.

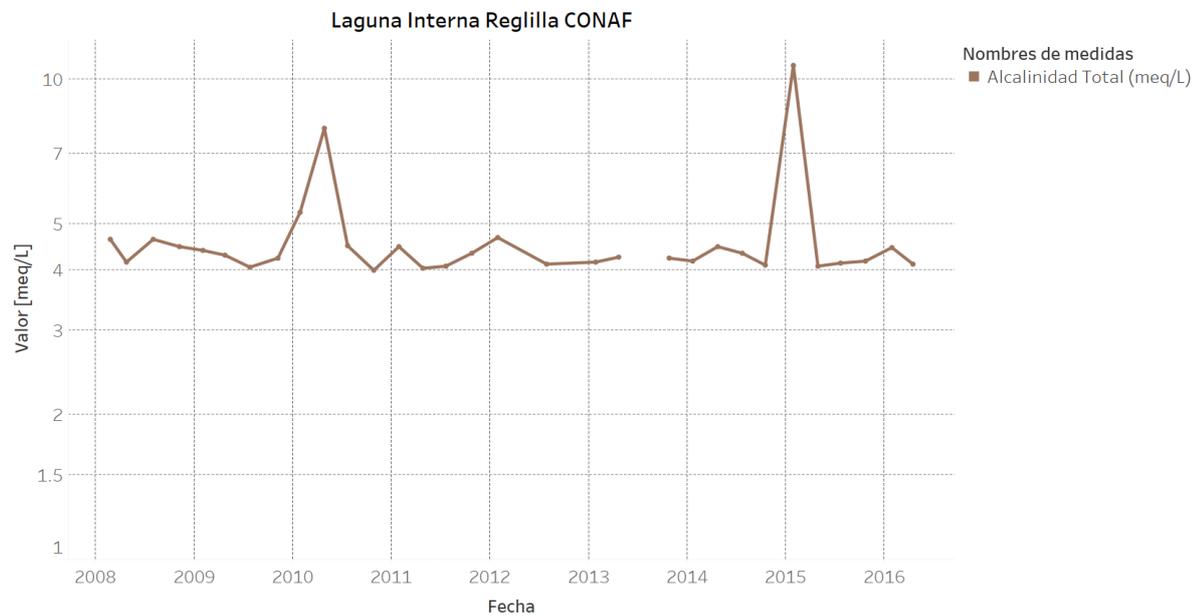


Laguna Saladita, pH

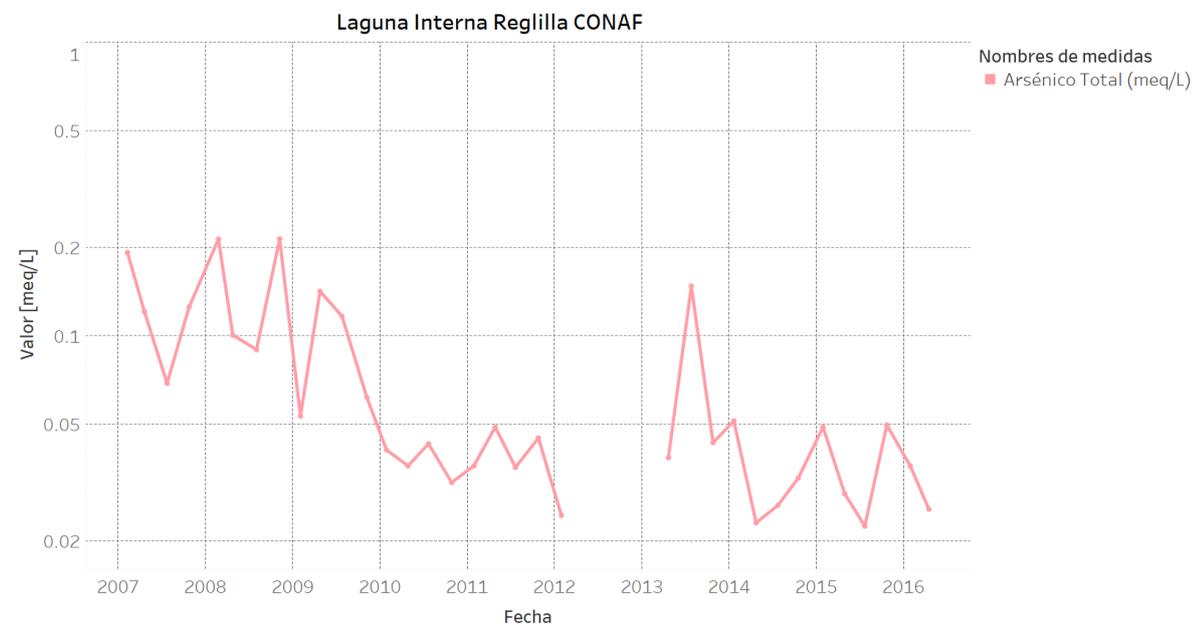


3.3 Laguna Interna.

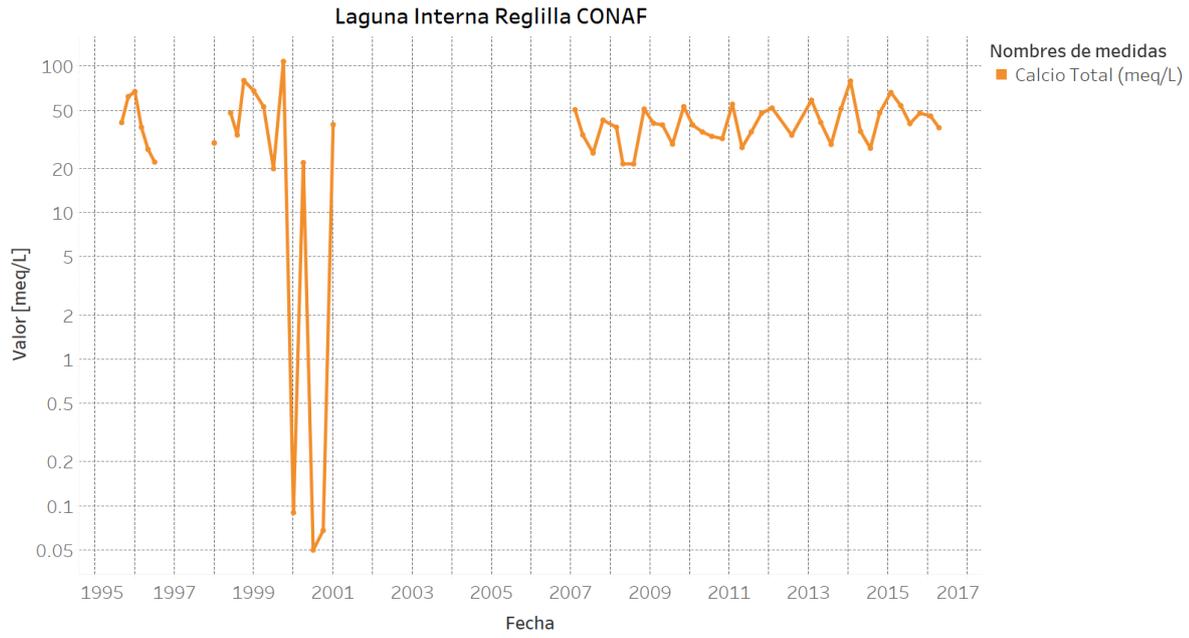
Laguna Interna, alcalinidad total



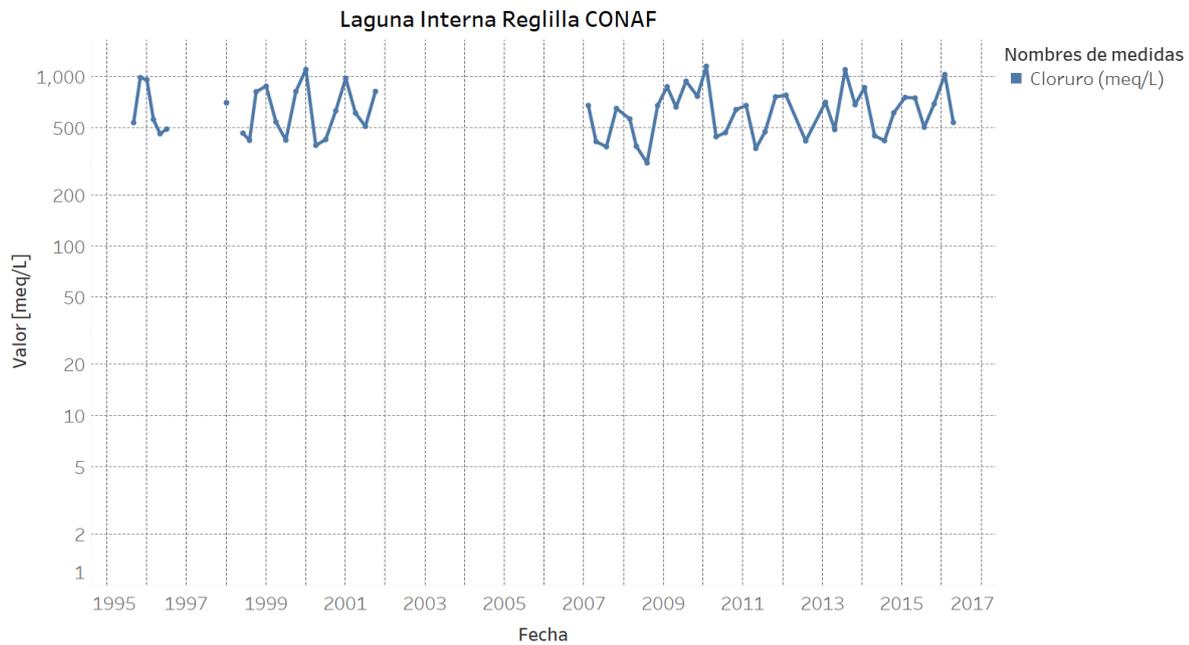
Laguna Interna, arsénico total



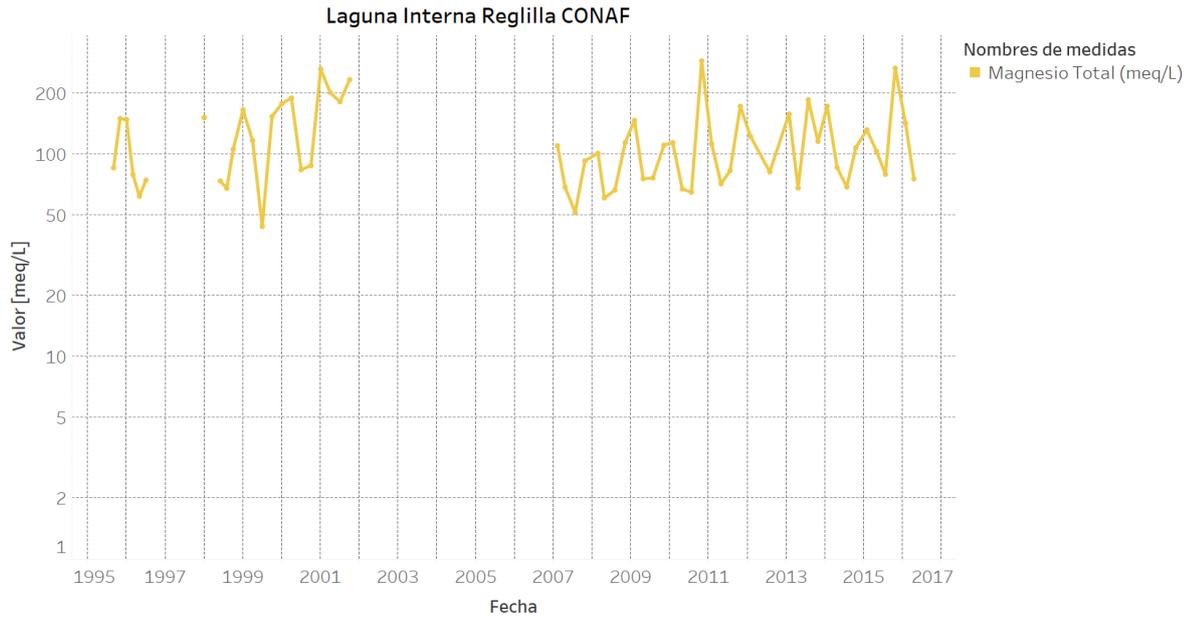
Laguna Interna, calcio total



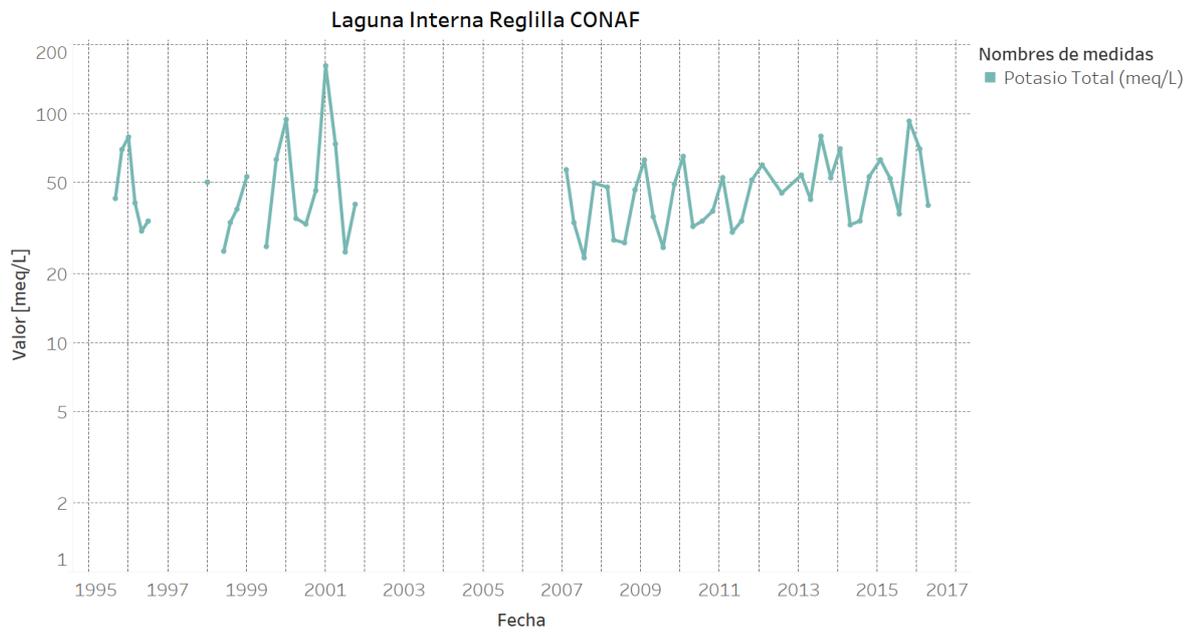
Laguna interna, cloruros



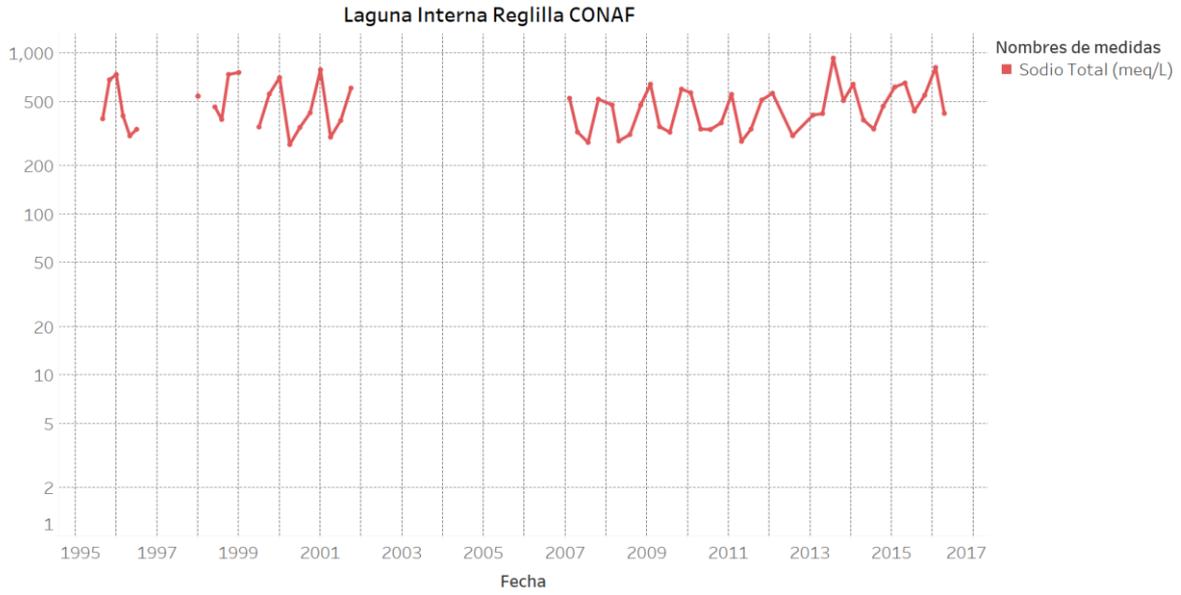
Laguna Interna, magnesio total



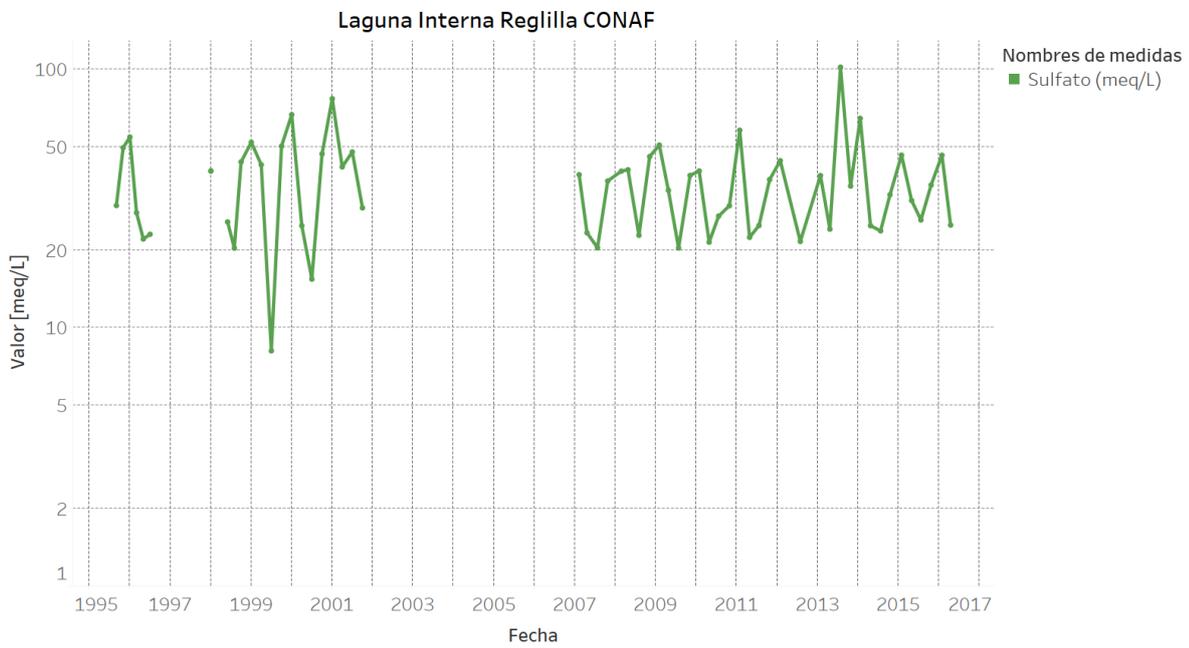
Laguna Interna, potasio total



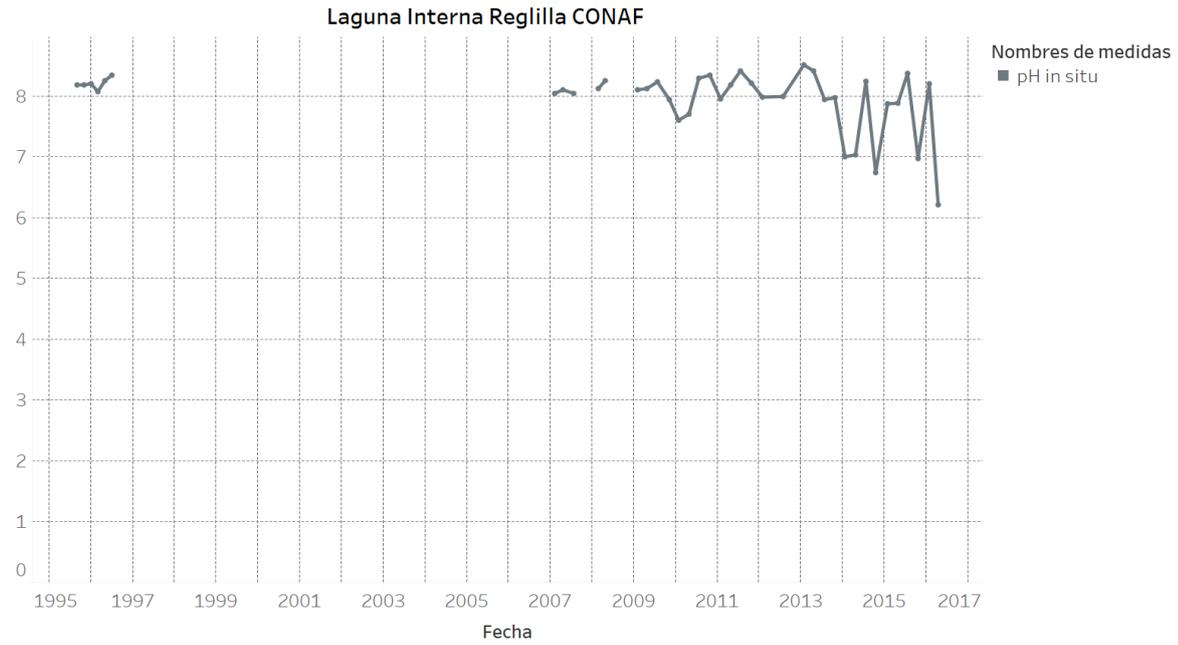
Laguna Interna, sodio total



Laguna interna, sulfato.



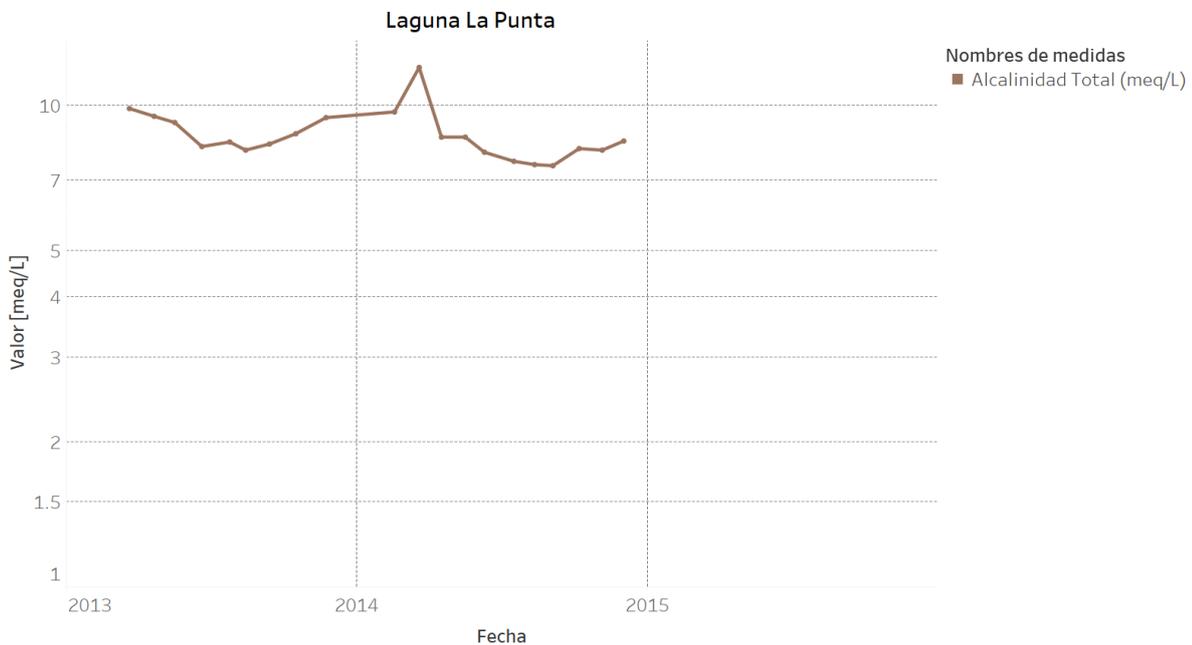
Laguna interna, pH



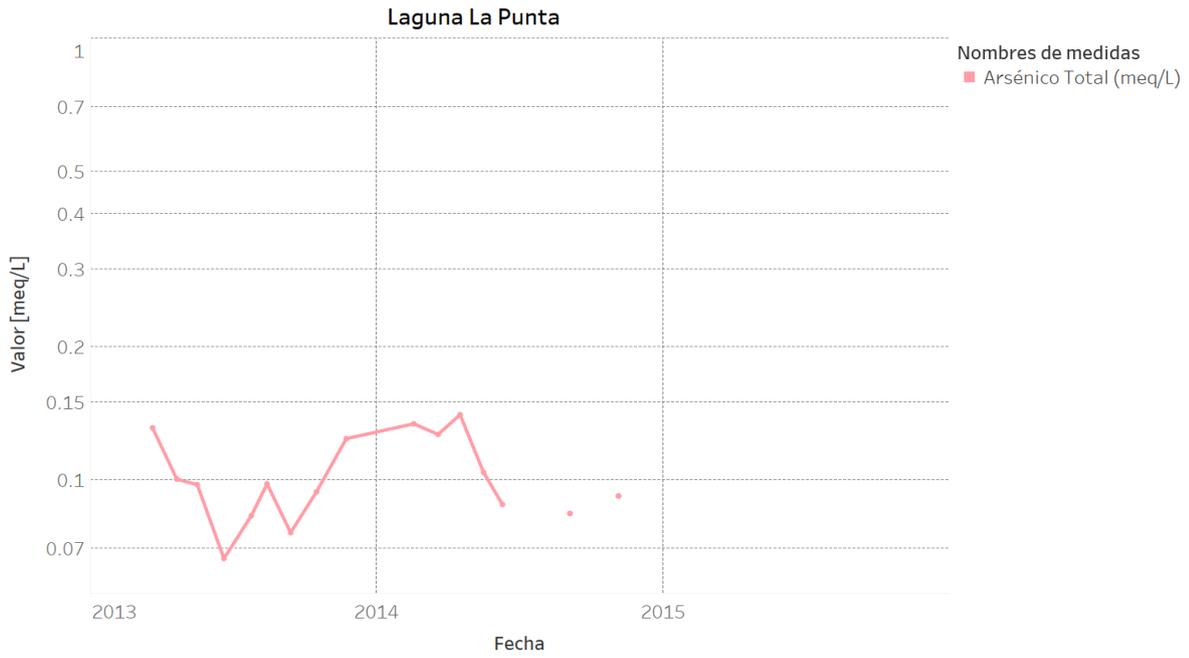
4 Sistema Tilopozo.

4.1 Laguna La Punta

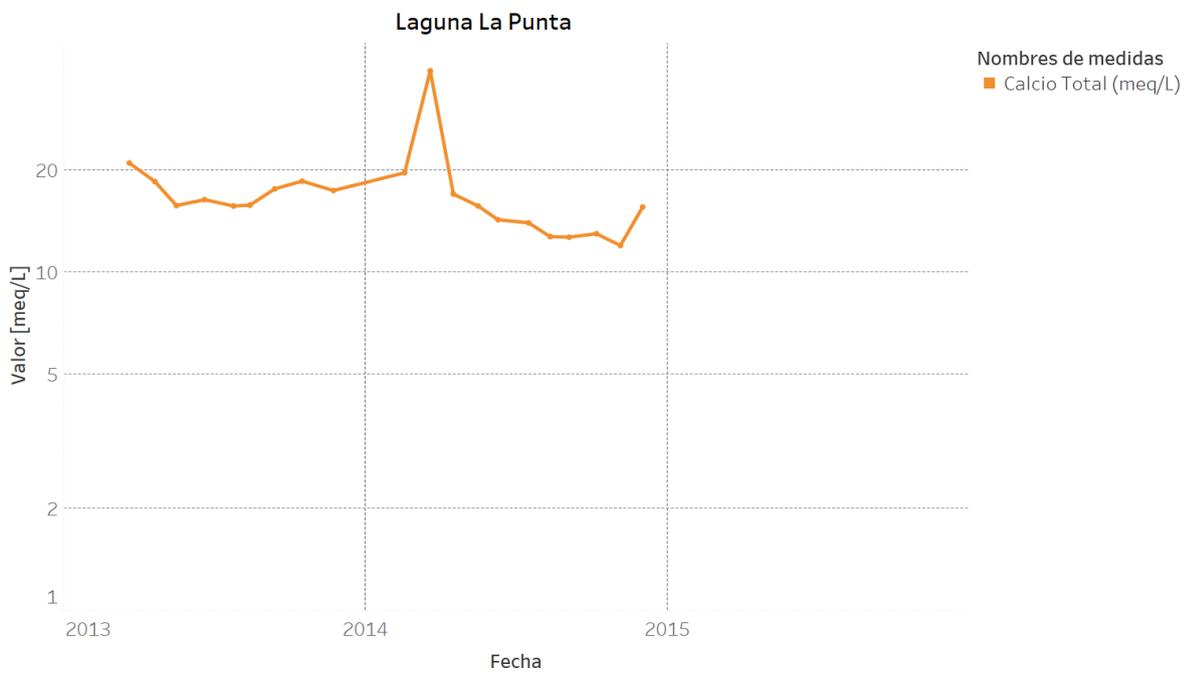
Laguna La Punta, alcalinidad total



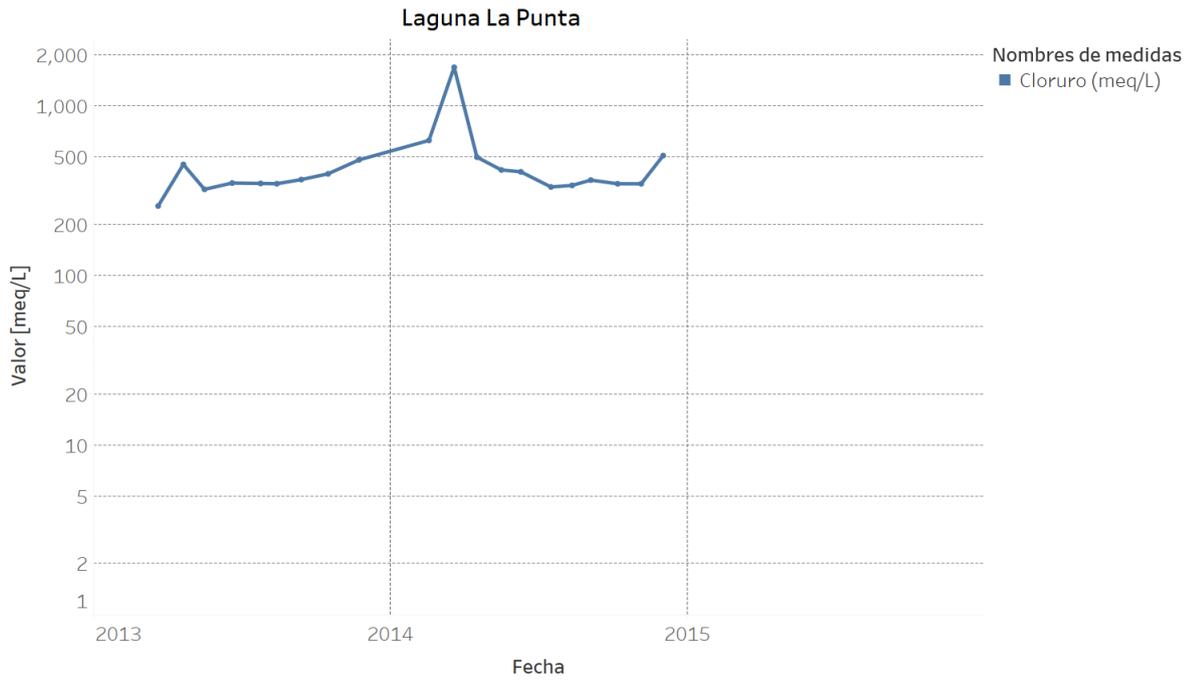
Laguna La Punta, arsénico total



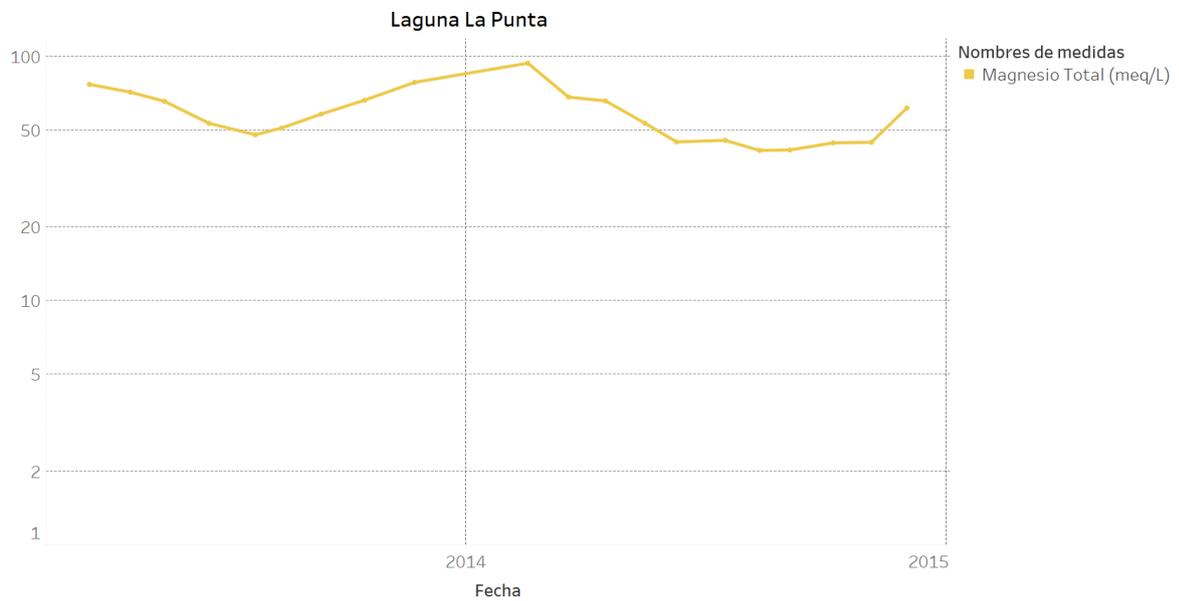
Laguna La Punta, calcio total



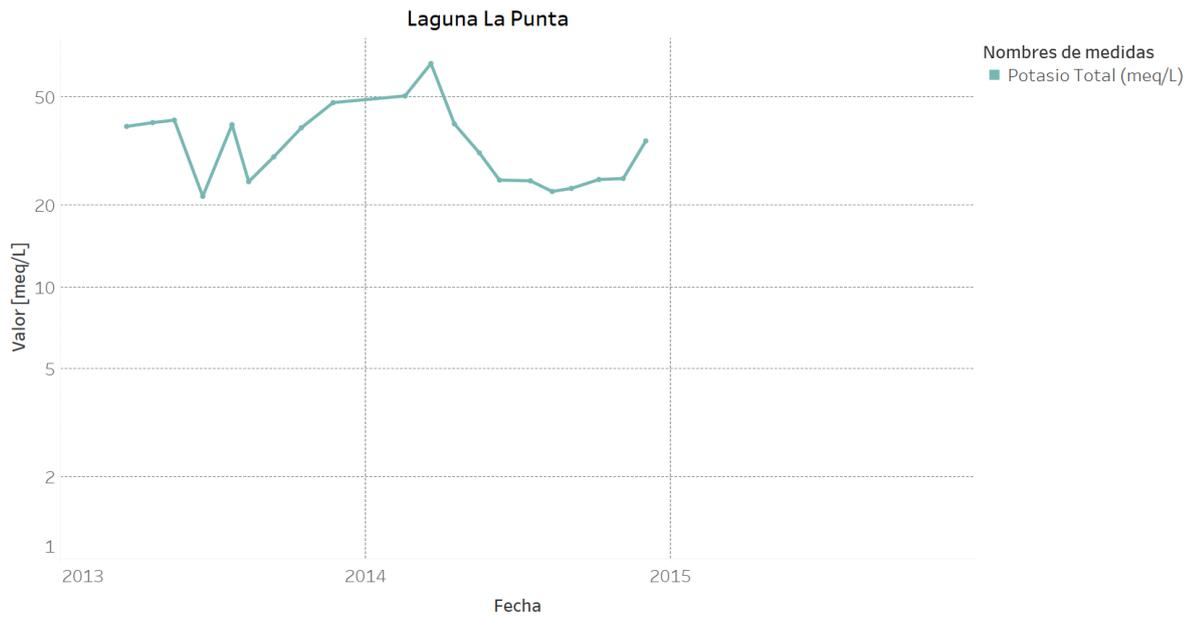
Laguna La Punta, cloruros



Laguna La Punta, magnesio total



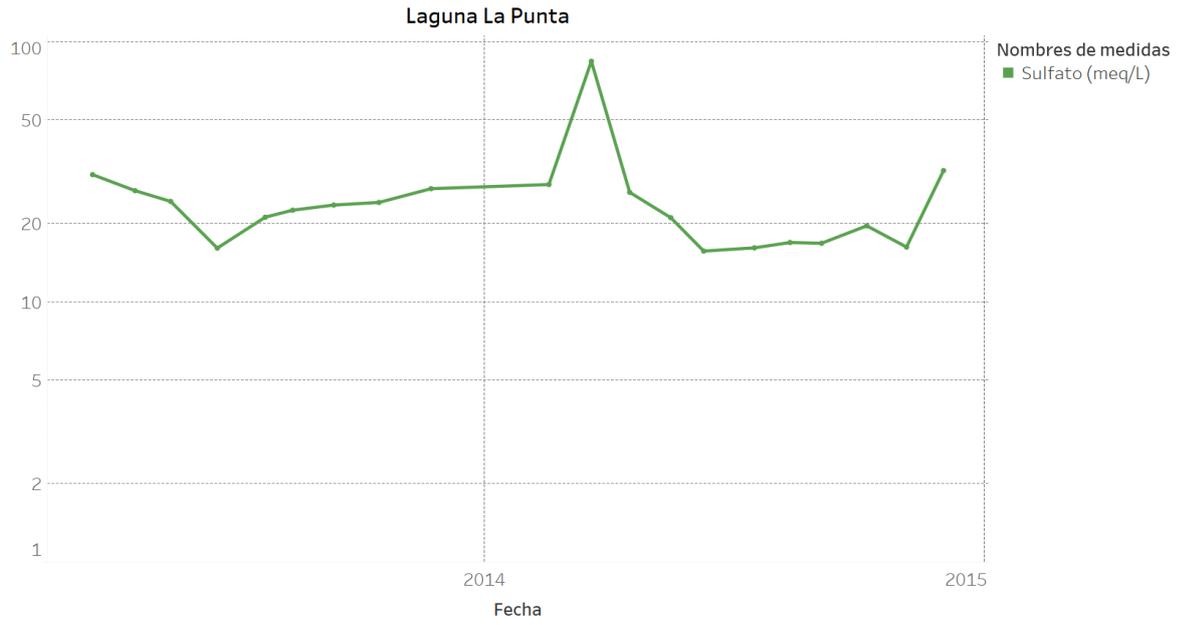
Laguna La Punta, potasio total



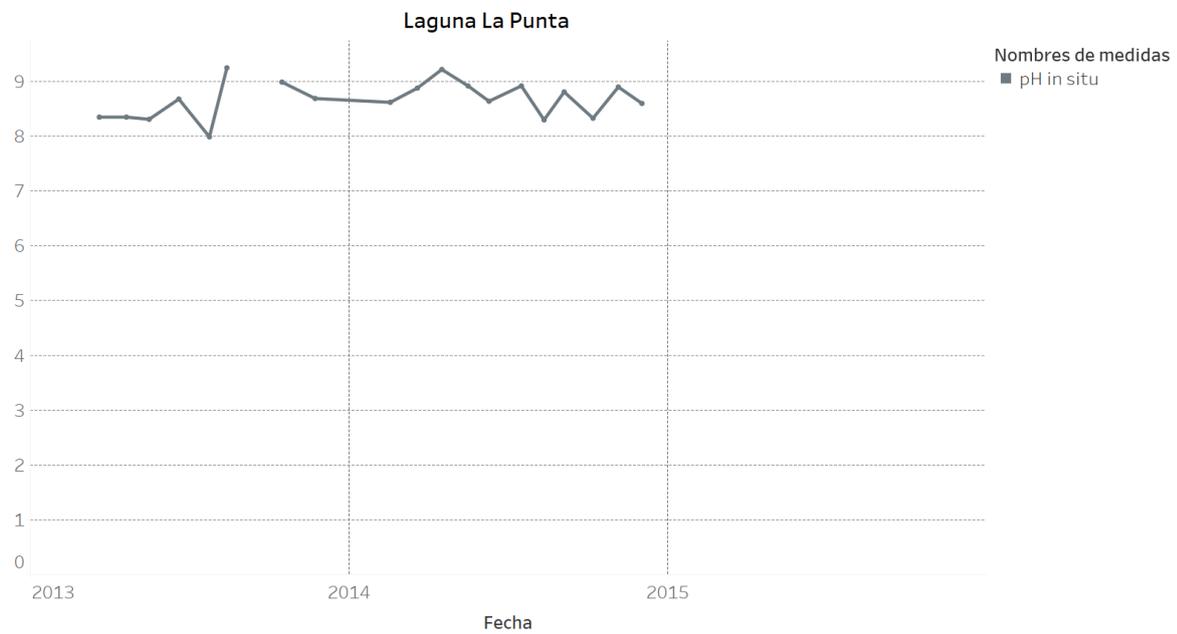
Laguna La Punta, sodio total



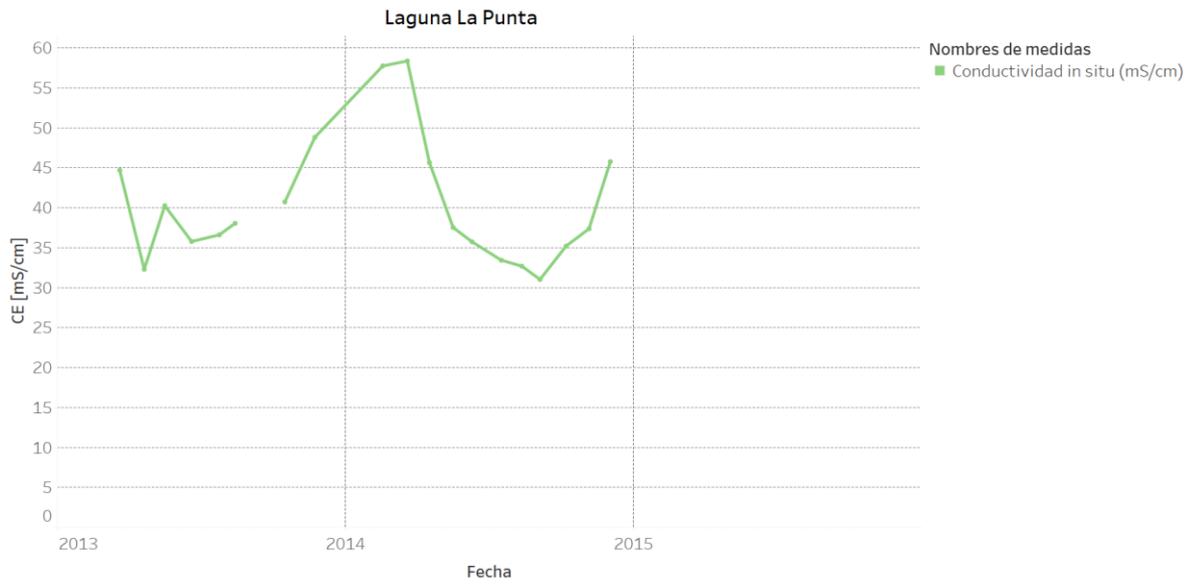
Laguna La Punta, sulfato



Laguna La Punta, pH in situ.

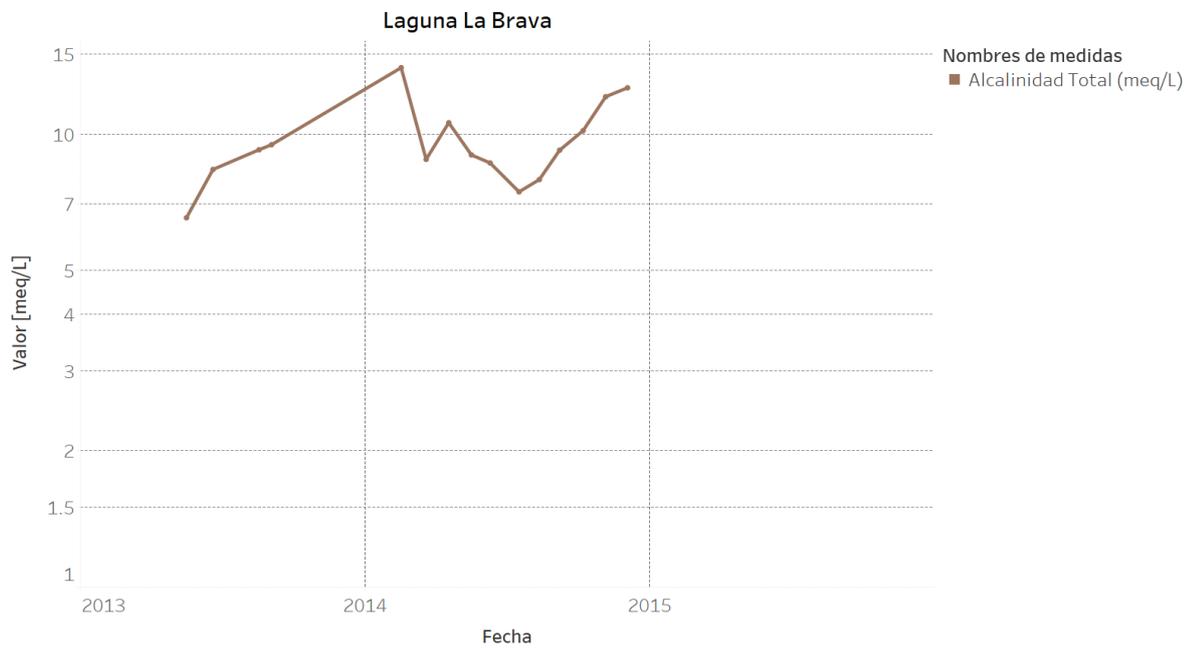


Laguna La Punta, CE in situ.

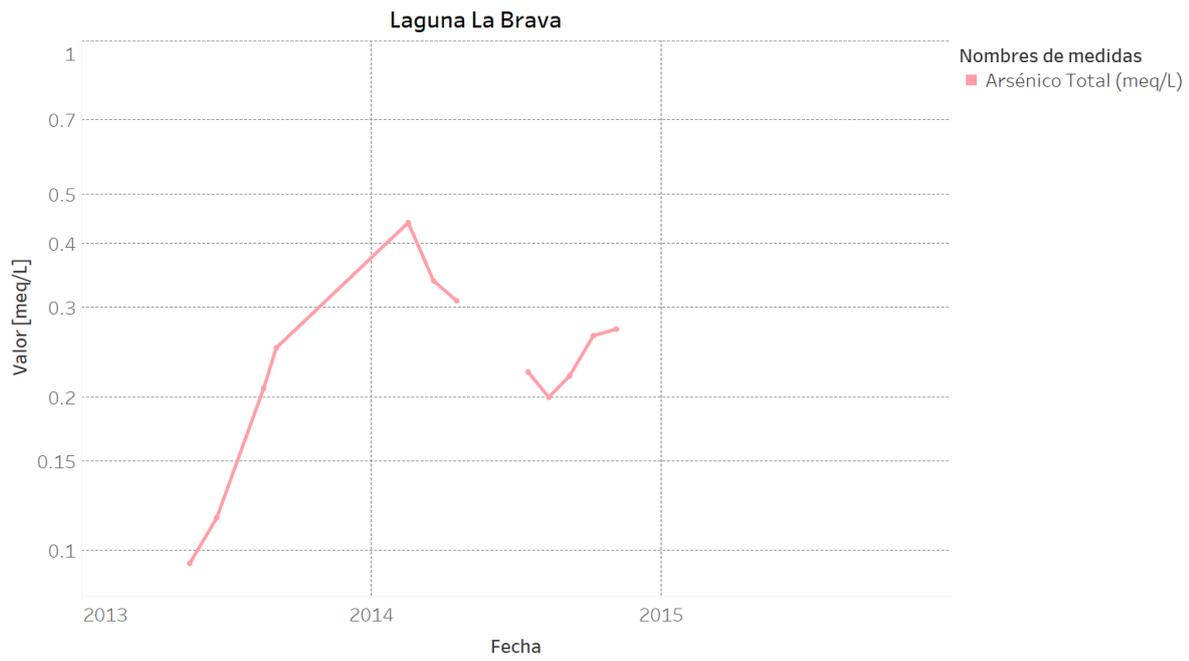


4.2 Laguna La Brava.

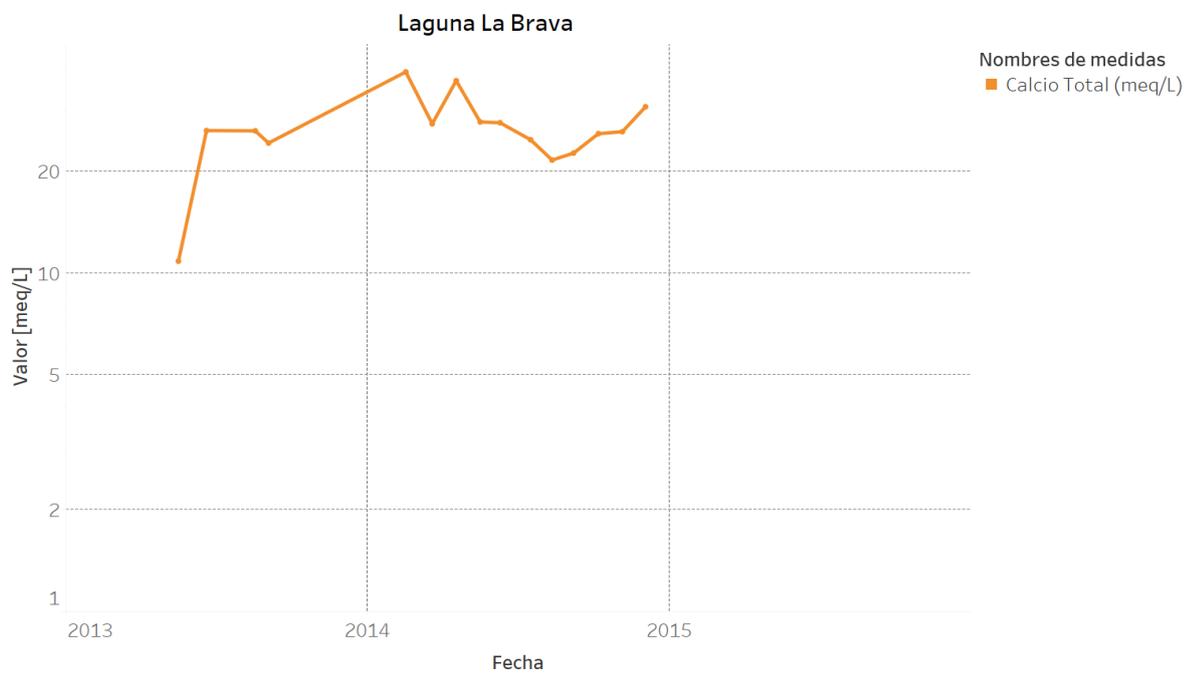
Laguna La Brava, alcalinidad total.



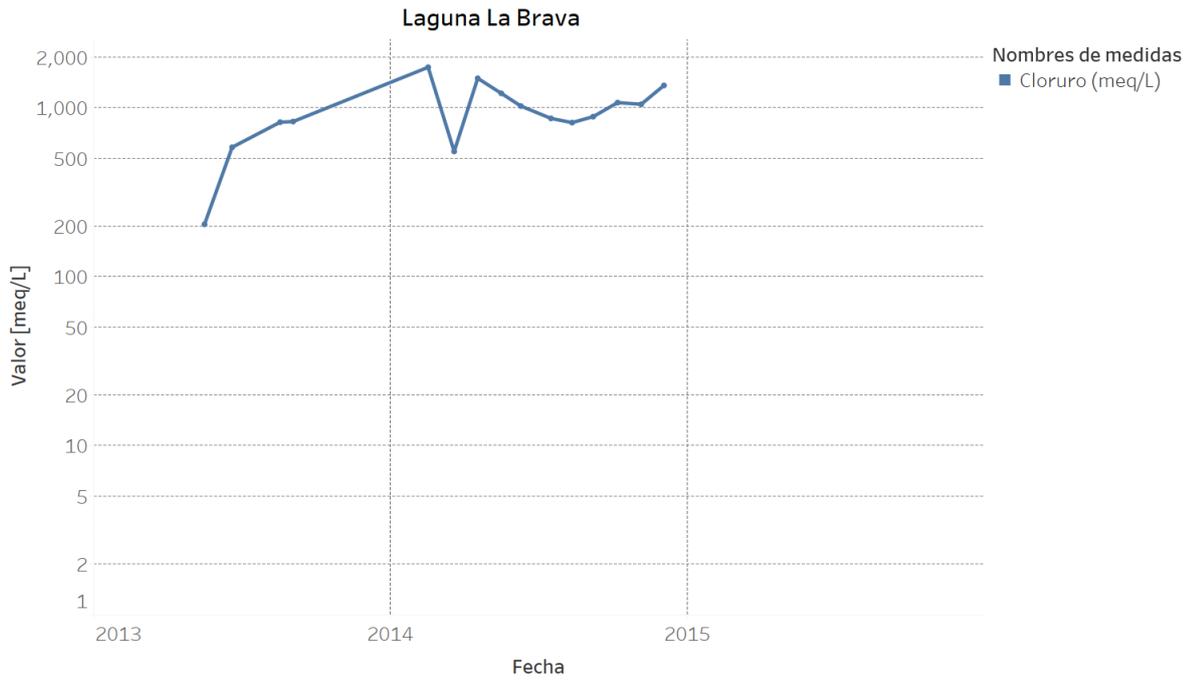
Laguna La Brava, arsénico total



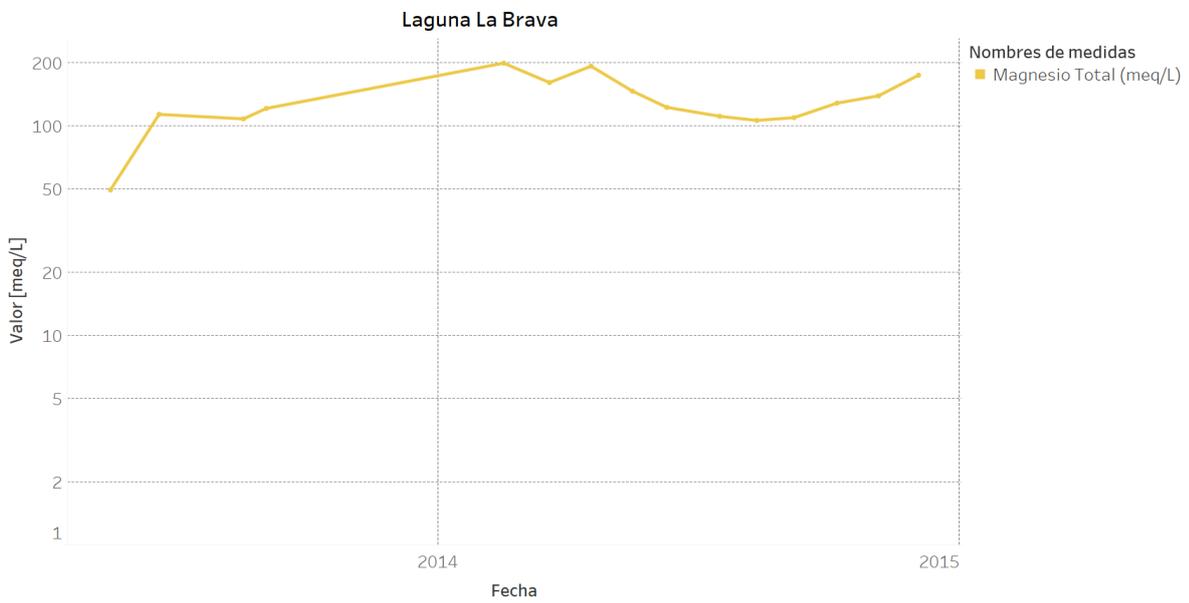
Laguna La Brava, calcio total.



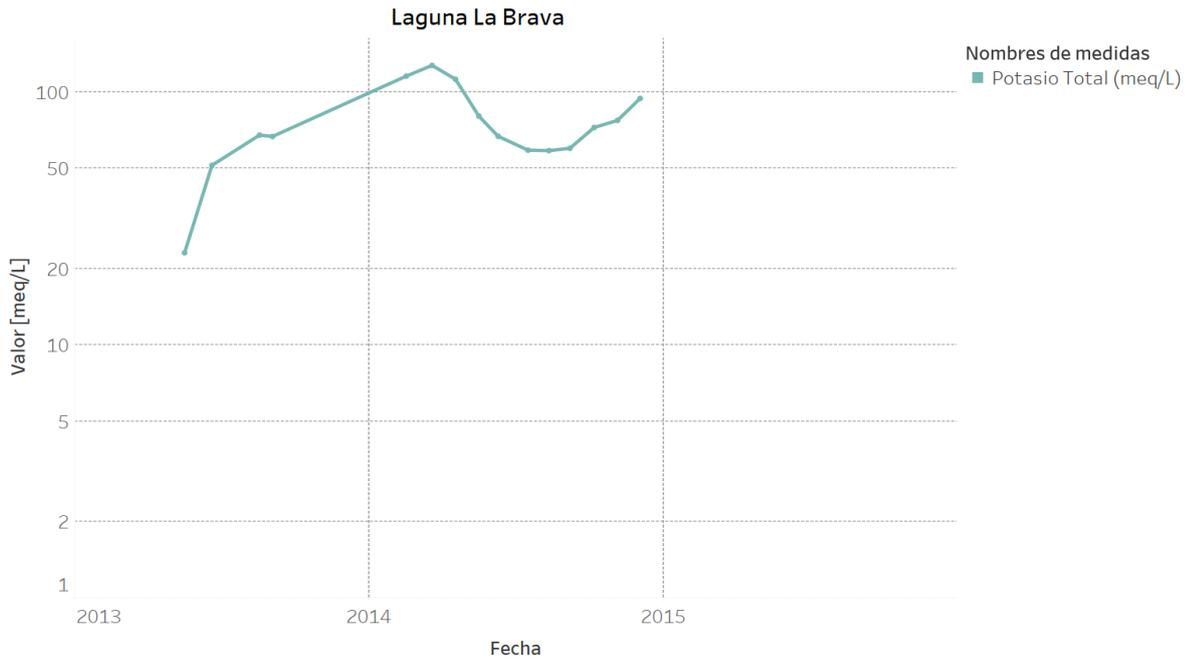
Laguna La Brava, cloruro



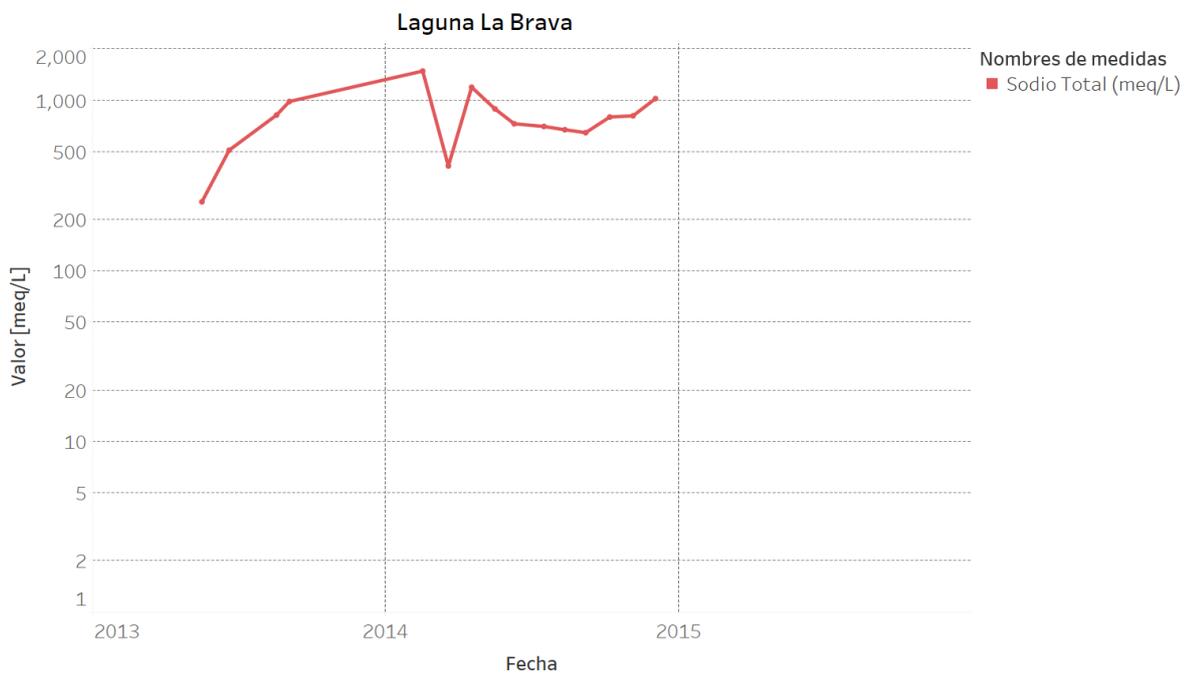
Laguna La Brava, magnesio total.



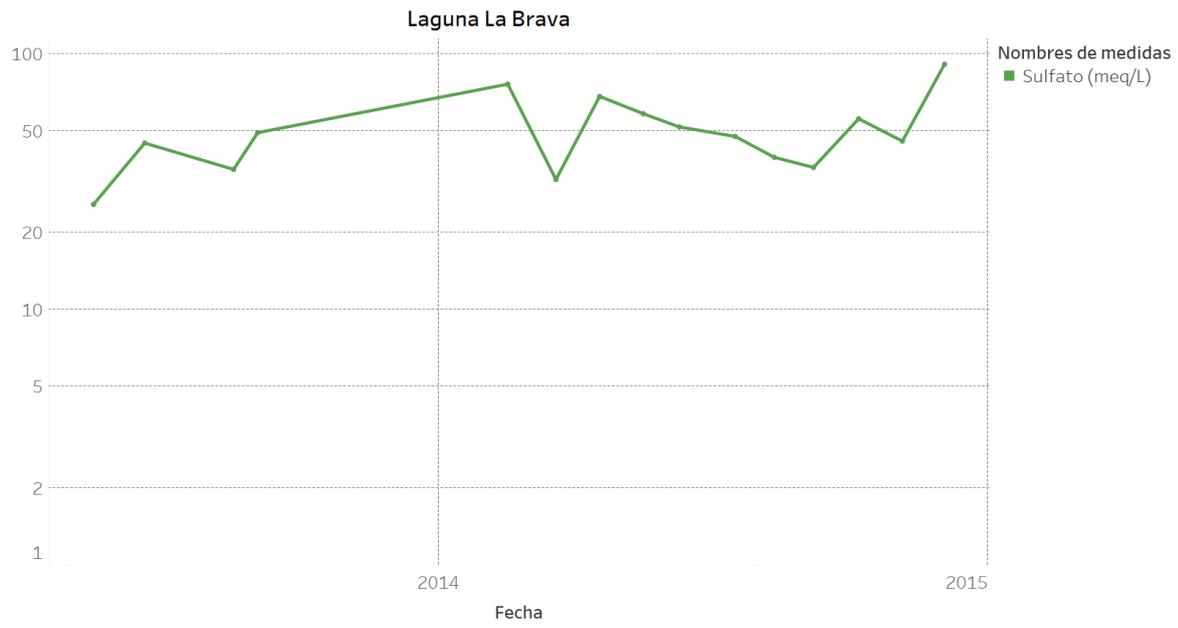
Laguna La Brava, potasio total



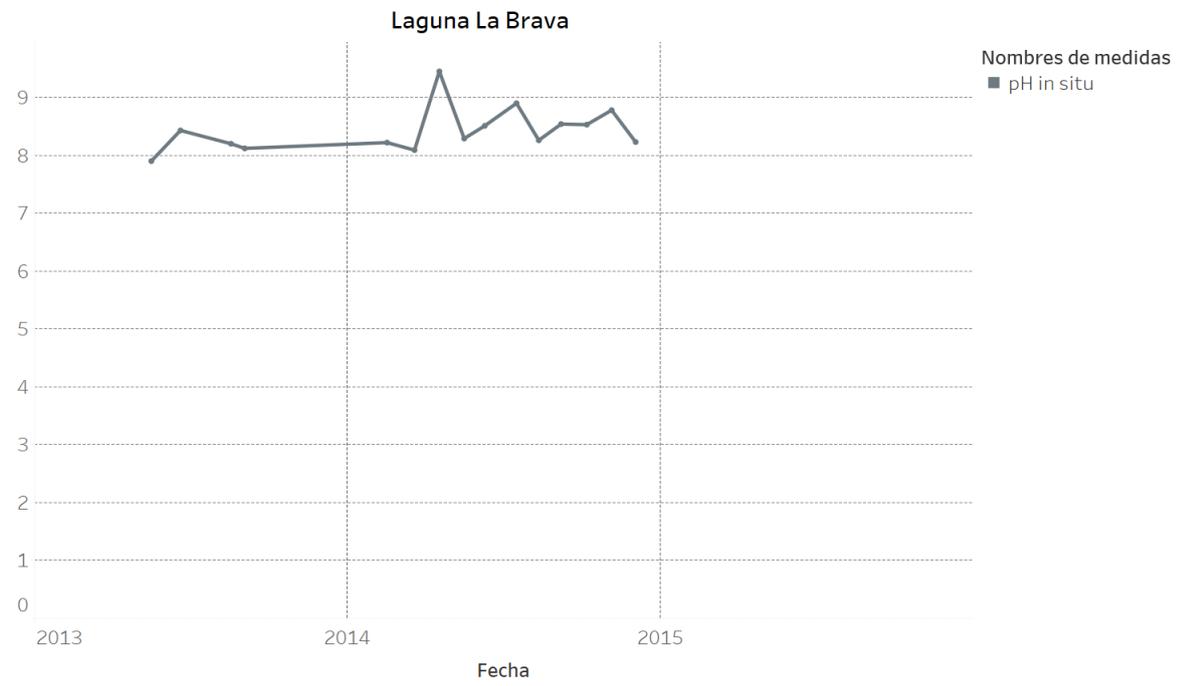
Laguna La Brava, sodio total



Laguna La Brava, sulfatos.



Laguna La Brava, pH in situ.



Laguna La Brava, CE in situ.



Anexo 4 Pluviometría

Para el conocimiento de la pluviometría en el área del Salar de Atacama se dispone de los datos de estaciones en o inmediatas al salar y otras en su entorno, A pesar de que existe un número considerable de estaciones meteorológicas, su distribución en la cuenca no es la deseada, concentrándose principalmente en el borde oriental y norte en altura, dejando el sector sur y occidental sin monitoreo alguno. Para el conocimiento de la pluviometría se ha recurrido a simplificaciones de acuerdo a la orografía, teniendo en cuenta que la temporalidad de los registros no es igual para todas las estaciones y que algunas de ellas tienen vacíos de datos considerables.

Se cuenta con registros propios de SQM y de terceros, especialmente de la DGA (Dirección General del Agua) que incluyen el monitoreo de las variables meteorológicas: precipitación, radiación, presión atmosférica, temperatura máxima y mínima para algunas de las estaciones indicadas en la Figura A4.1. Existen otras estaciones significativas que no se consideran aquí, como la San Pedro de Atacama, por tener vacíos de datos o ser cortas.

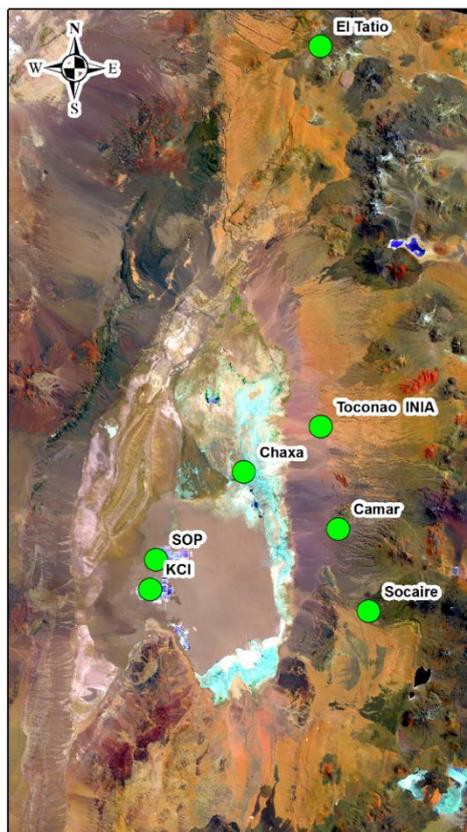


Figura A4.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas próximas al Salar de Atacama que se consideran. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Fecha: agosto 2017

En lo que sigue se considera únicamente la precipitación. Con respecto a las otras variables, en los datos disponibles, que no se reproducen aquí, se aprecia un ligero aumento de la radiación solar en las estaciones localizadas en el núcleo del Salar, similar

a lo que ocurre con la variable presión atmosférica, a pesar de que su variación intra-anual es poco perceptible.

En los registros más largos de la temperatura máxima y mínima se aprecia un aparente ciclo, dominado por eventos extremos muy cálidos o muy fríos, si bien las series de pocos años (alrededor de 20 años) no permiten realizar un análisis estadísticamente significativo. Los ciclos de la temperatura parecen replicarse en los valores de la evaporación de bandeja (tanque de evaporación), mostrando valores extremos de máxima y mínima evaporación coincidentes con los valores extremos de temperatura máxima especialmente.

En la Figura A4.2 se muestra las precipitaciones mensuales de las diferentes estaciones que se consideran. Los valores medios crecen desde el núcleo del salar hasta la ledera occidental de los Andes, en el lado oriental del área aquí considerada.

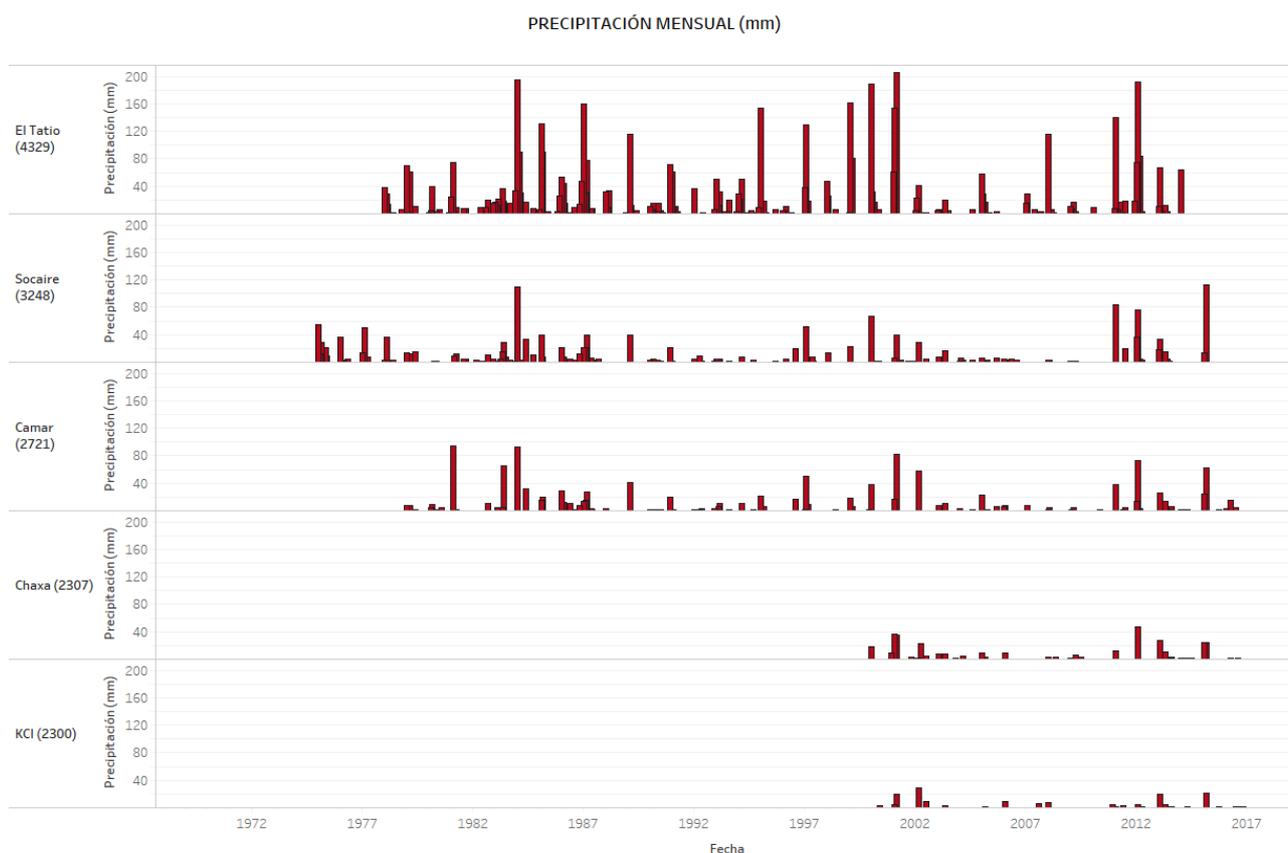
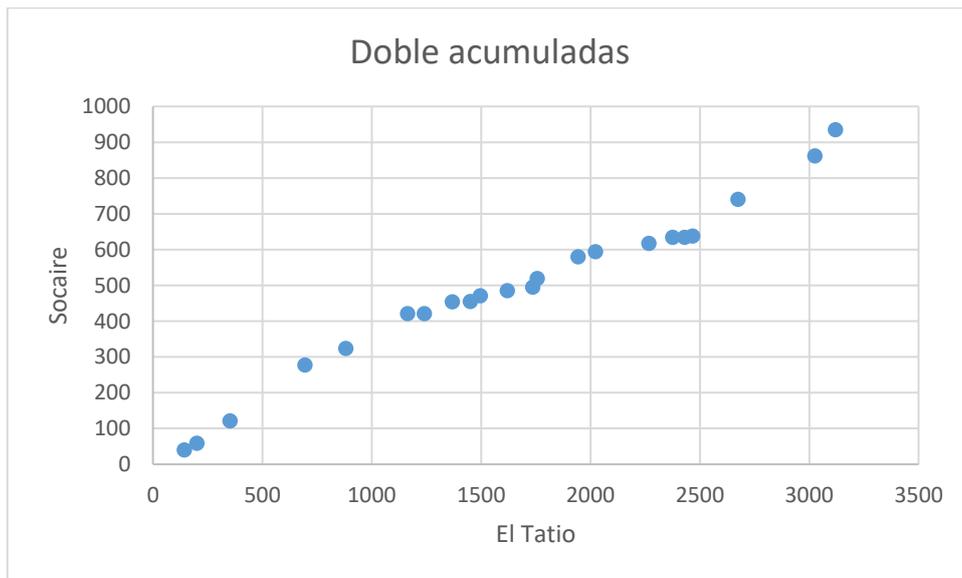
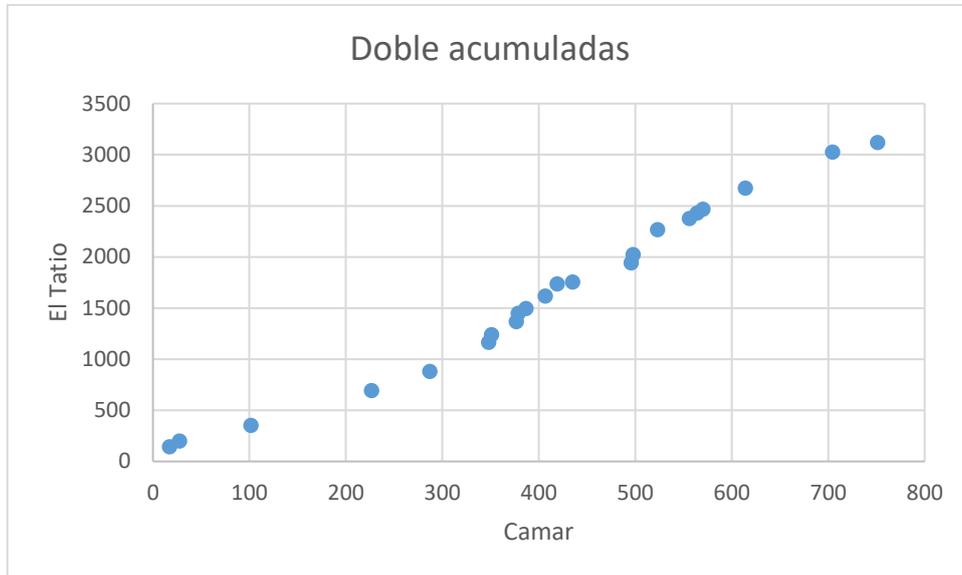


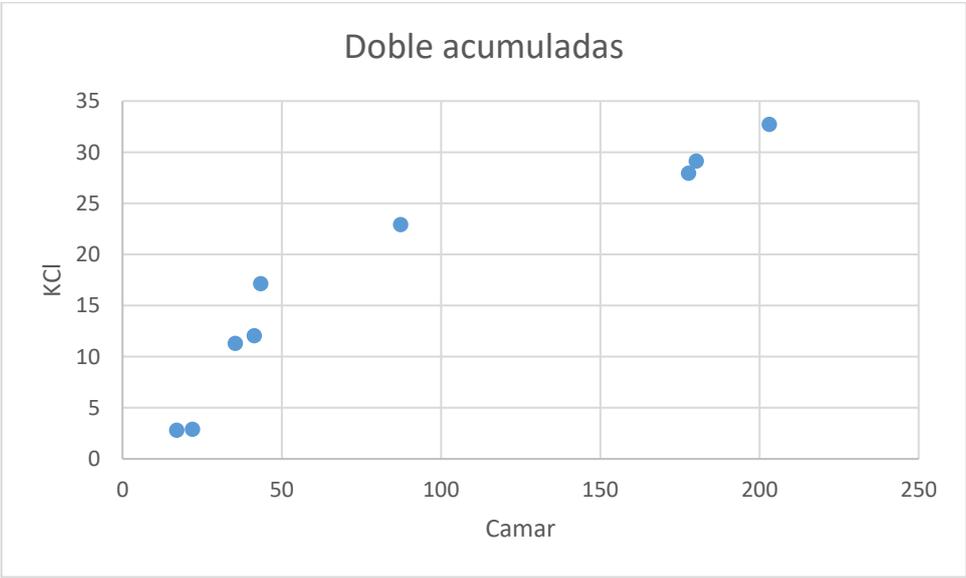
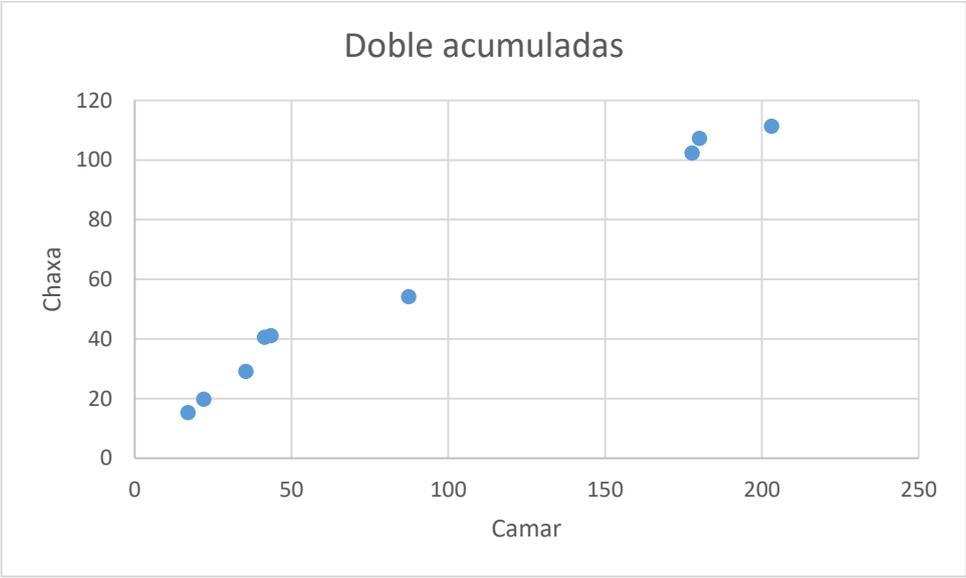
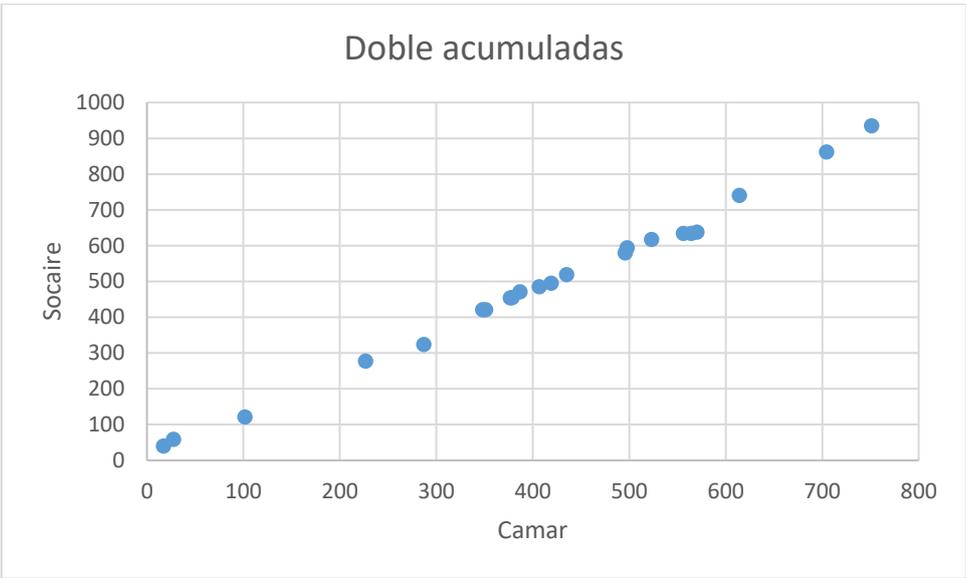
Figura A4.2 Series de precipitación mensual en las estaciones del Salar de Atacama y su entorno, que se consideran aquí para su estudio. La ubicación está en la Figura A4.1. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Fecha: agosto 2017

En la Figura A4.3 se muestran los gráficos de las dobles acumulaciones (dobles masas) de los datos anuales de las estaciones pluviométricas consideradas, tres de ellas con series semi-largas (37 a 43 años), y dos (las del salar y con menor precipitación) semi-cortas (17 años). Para los comentarios se adoptan las siguientes abreviaturas: T = El Tatio, S = Socaire, C = Camar, X = Chaxa y K = KCI.

Tomando como referencia a la estación de Camar, C, se tienen las siguientes relaciones de las acumulaciones del mismo periodo: $E/C = 4,08$; $S/C = 1,23$; $X/C = 0,52$; y $K/C = 0,16$. Las dobles acumulaciones no son lineales excepto para el par S y C, que son

estaciones que estan relativamente próximas y en ambiente similar. La relación no lineal en las otras relaciones indica que el comportamiento responde a causas no del todo similares. Este hecho no se ha estudiado en detalle.





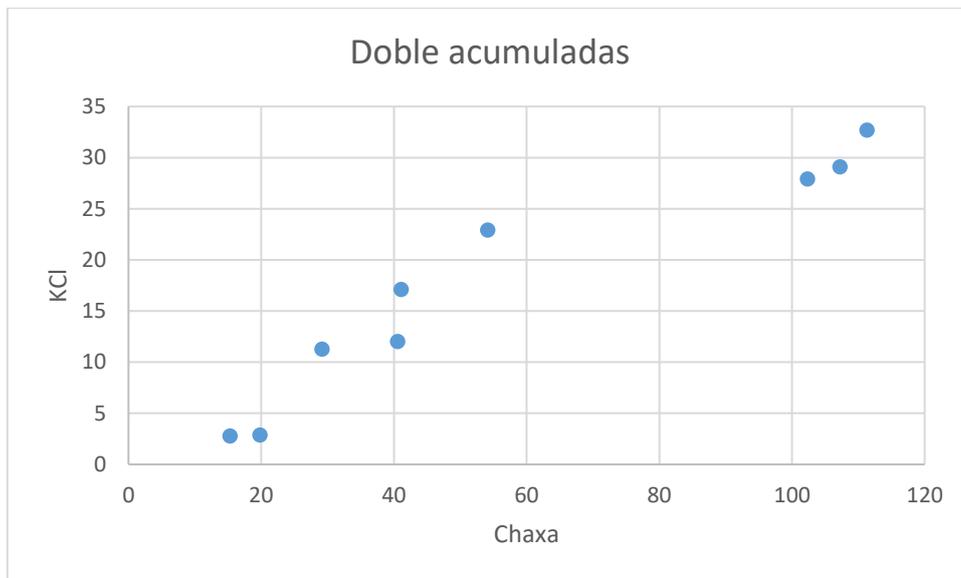


Figura A4.3 Gráficos de las dobles acumulaciones (dobles masas) de los datos anuales de las estaciones pluviométricas consideradas, Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Fecha: agosto 2017

En la Figura A4.4 se representan las desviaciones acumuladas de la pluviometría respecto a la media de la serie para las 5 estaciones consideradas. Las diferentes curvas casi se superpondrían si se les aplica una homotecia con los factores (relaciones) entre las acumulaciones de las distintas estaciones anteriormente dadas, pero subsistirían diferencias atribuibles a las influencias variables entre las subáreas. Aparece un ciclo de aproximadamente 15 años, en el supuesto que 2017 esté ya próximo a completar un ciclo. Para la estación de Socaire domina la tendencia a la desacumular, con una doble inflexión; si es así, se insinúa un ciclo de unos 23 años. Las series son cortas para establecer con seguridad la periodicidad. Se trata de periodos próximos al de 10-11 años que se aprecia en otros casos y se insinúa el posible de 20-22 años.

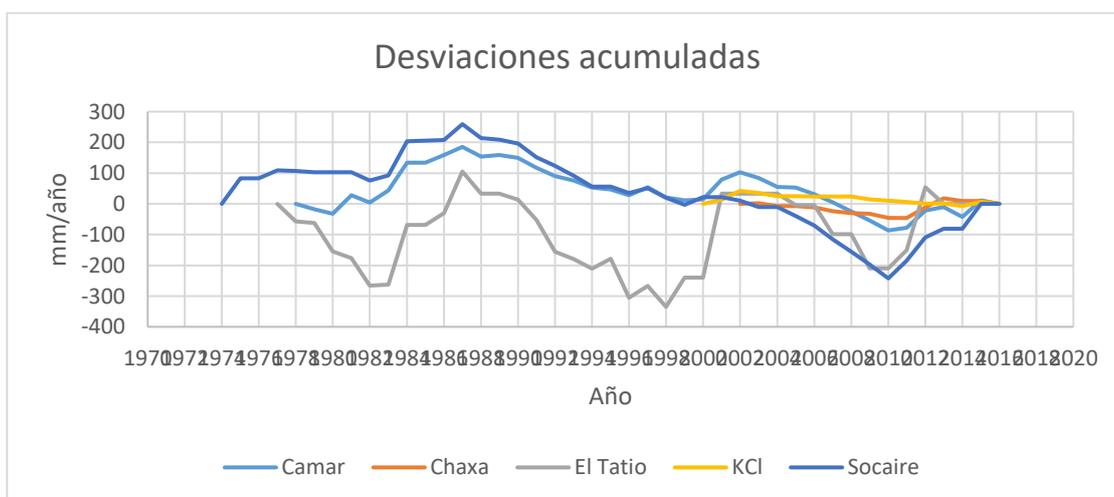


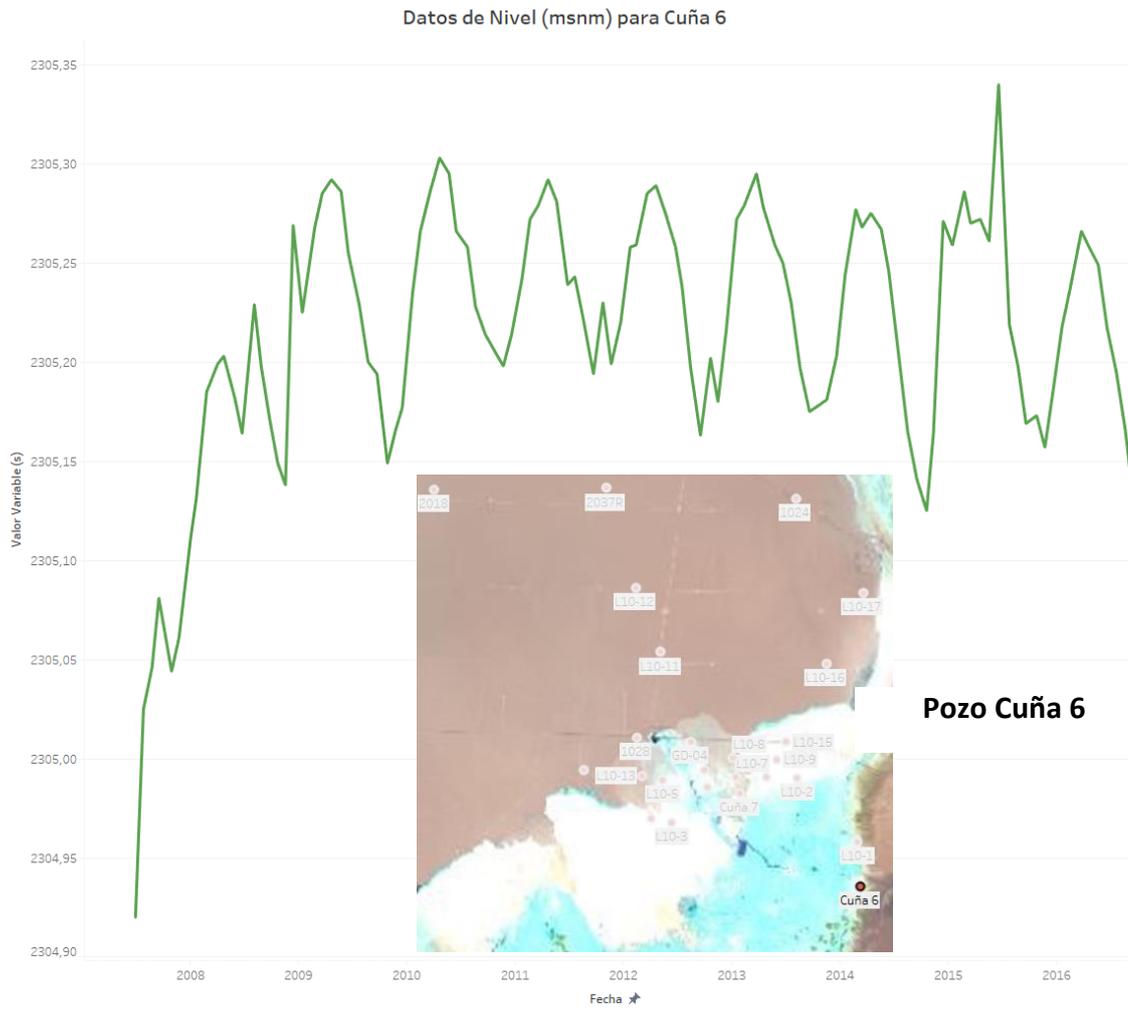
Figura A4.4 Desviaciones acumuladas de la pluviometría respecto a la media de la serie para las 5 estaciones consideradas. Realizado por Gerencia de Hidrogeología Salar. Fecha: agosto 2017

Se distinguen bien periodos secos (des-acumulación) y periodos húmedos (acumulación), con ausencia de periodos medios.

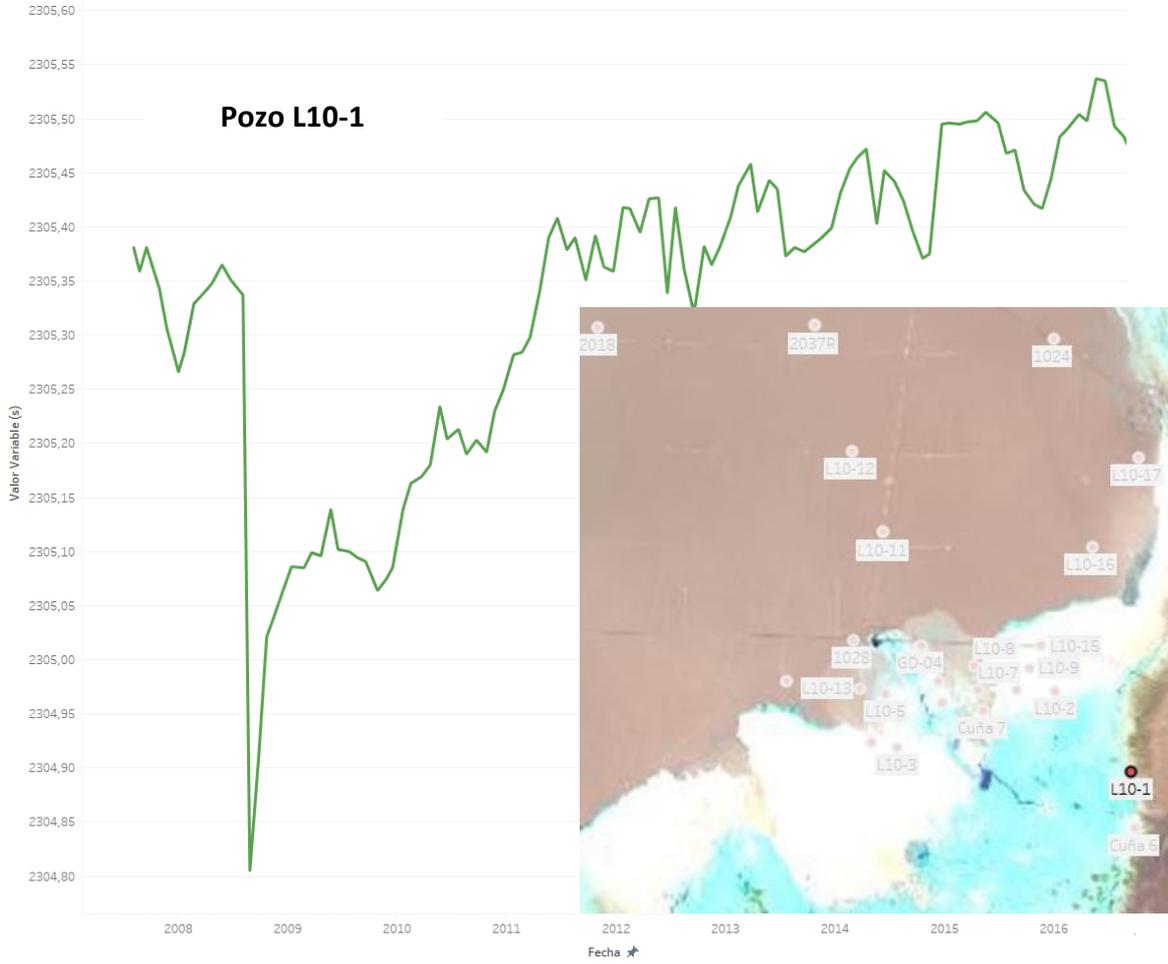
Periodos húmedos: 1982-1987; 1998-2002; 2010-2017

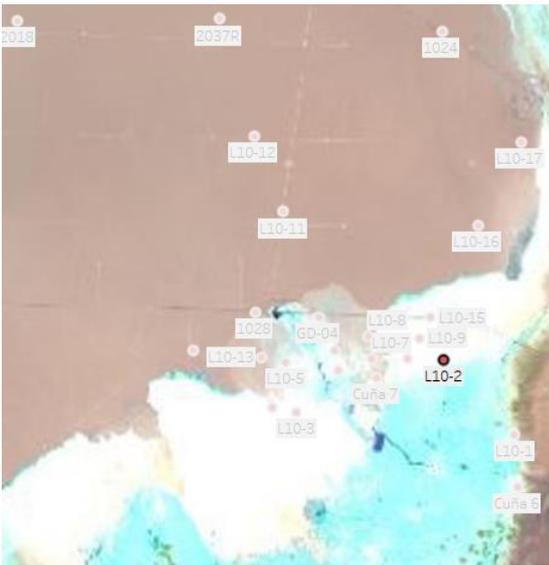
Periodos secos: 1987-1998; 2002-2010

Anexo 5 Series de niveles de piezómetros del Sistema Peine



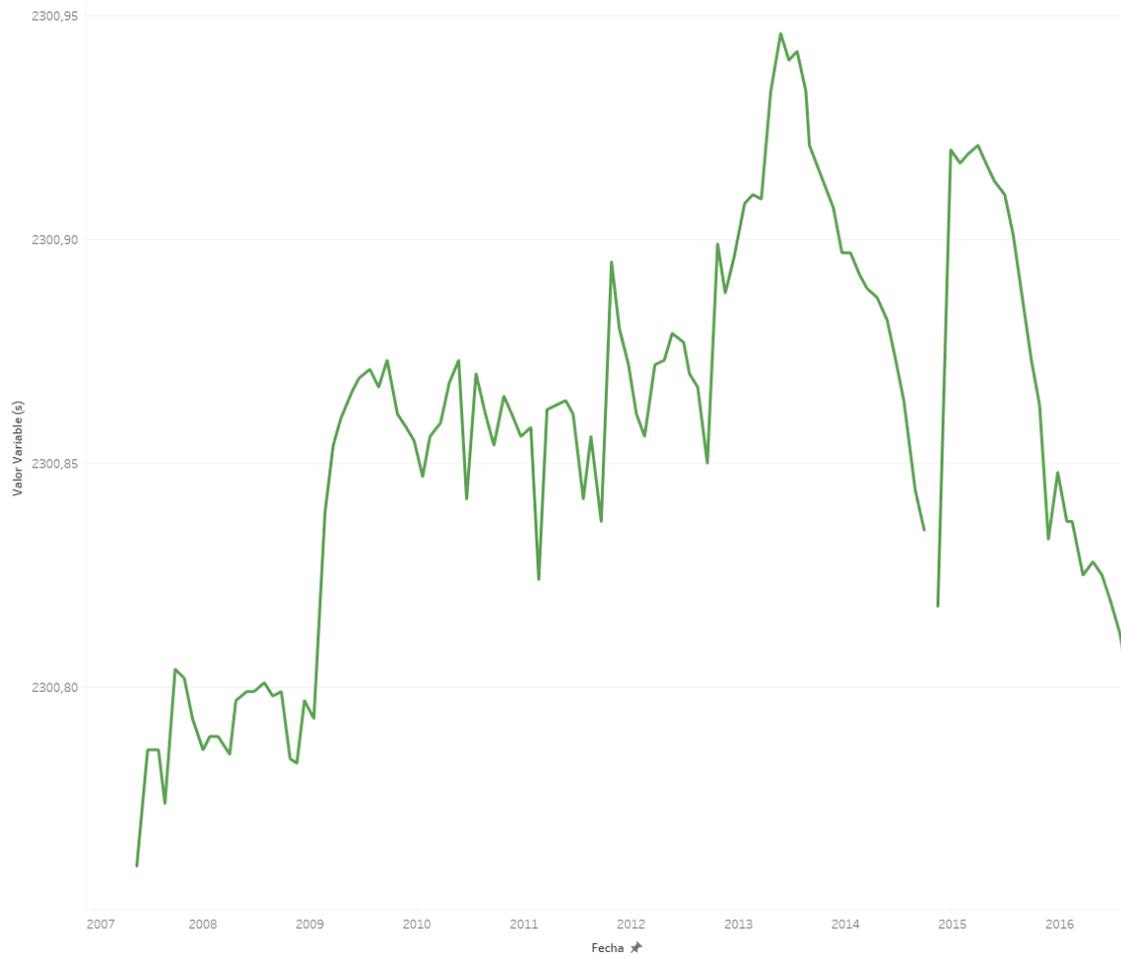
Datos de Nivel (msnm) para L10-1

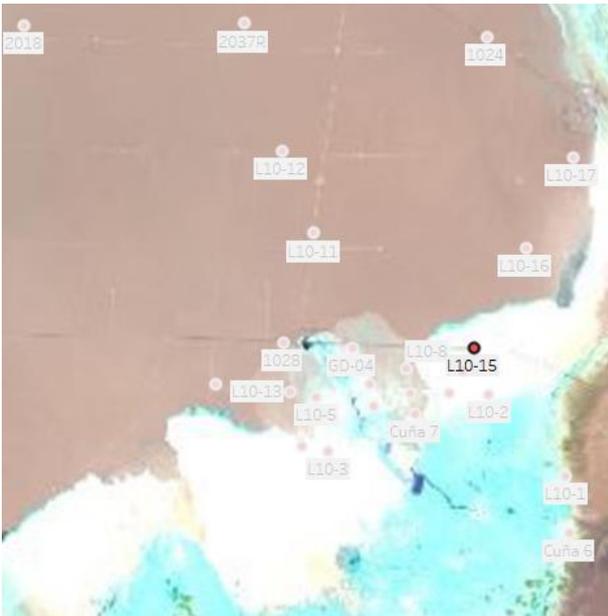




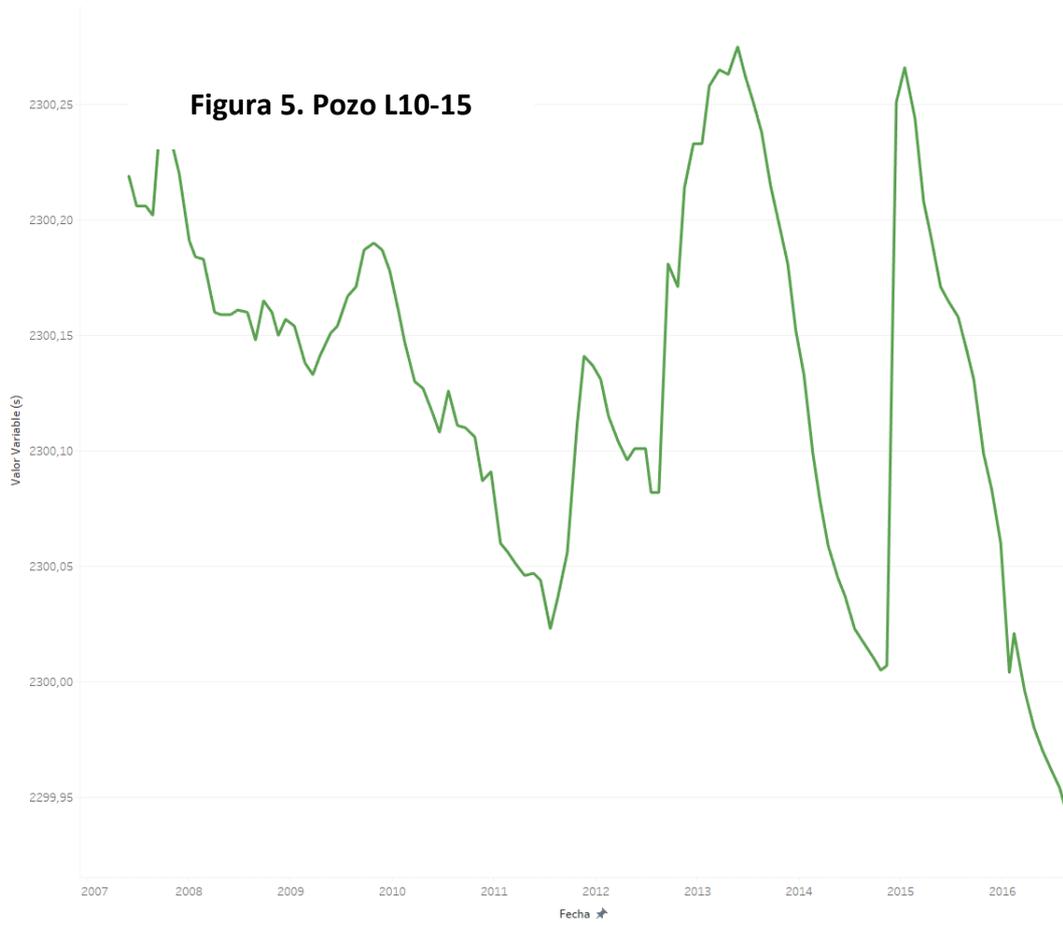
Datos de Nivel (msnm) para L10-2

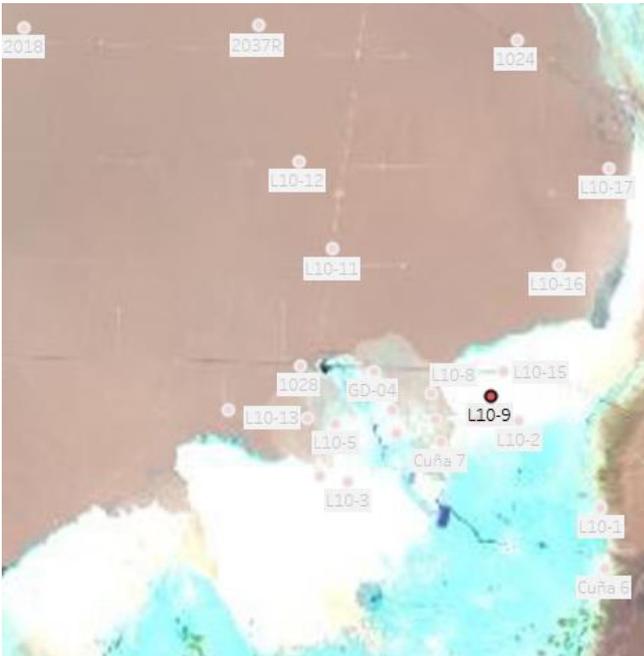
♂





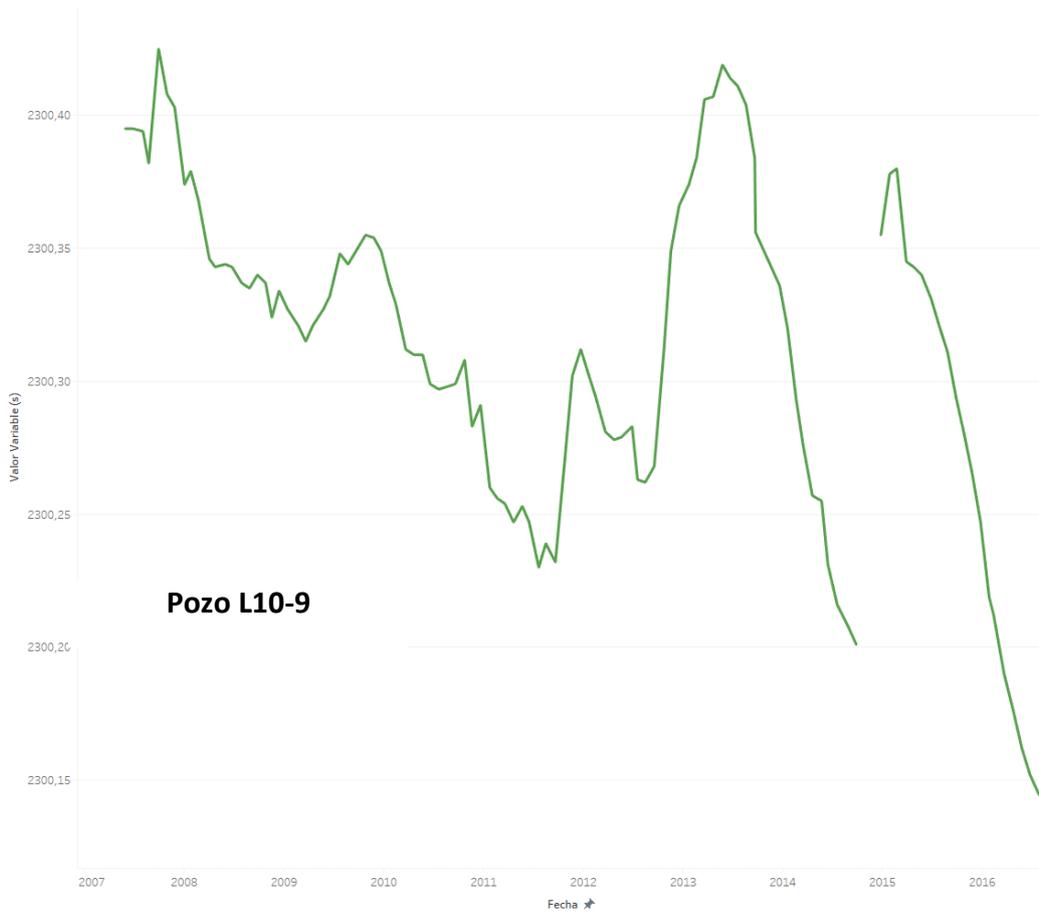
Datos de Nivel (msnm) para L10-15

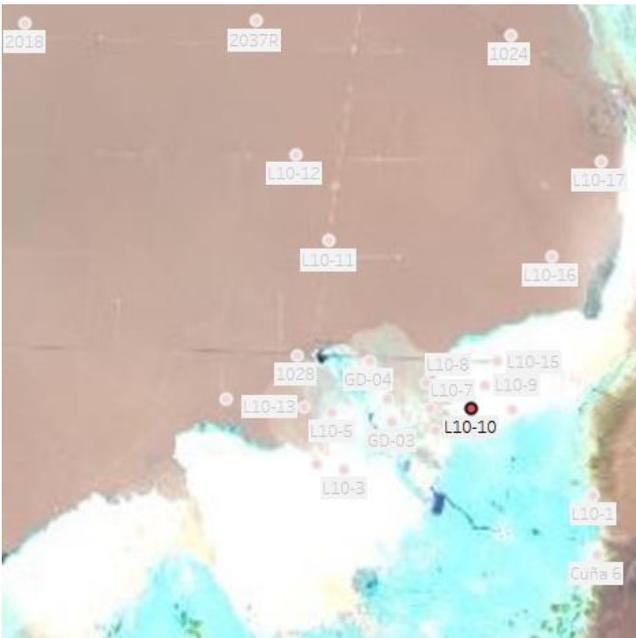




Datos de Nivel (msnm) para L10-9

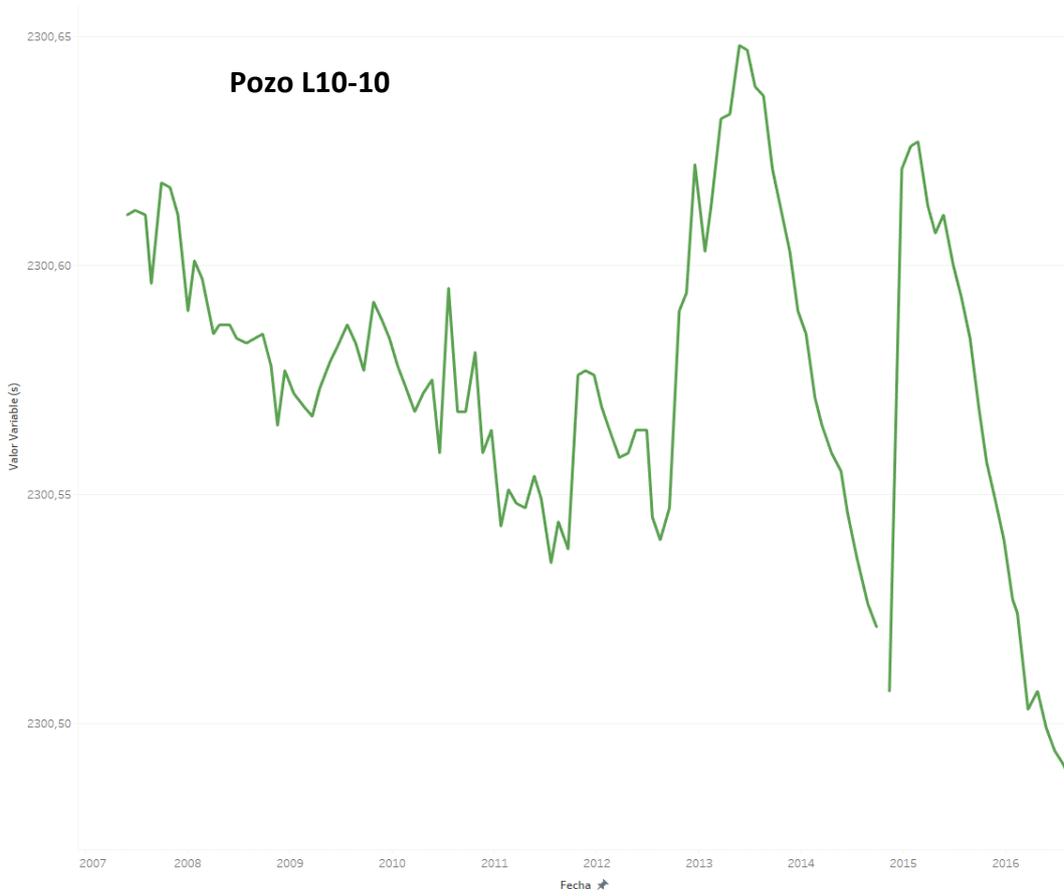
☐

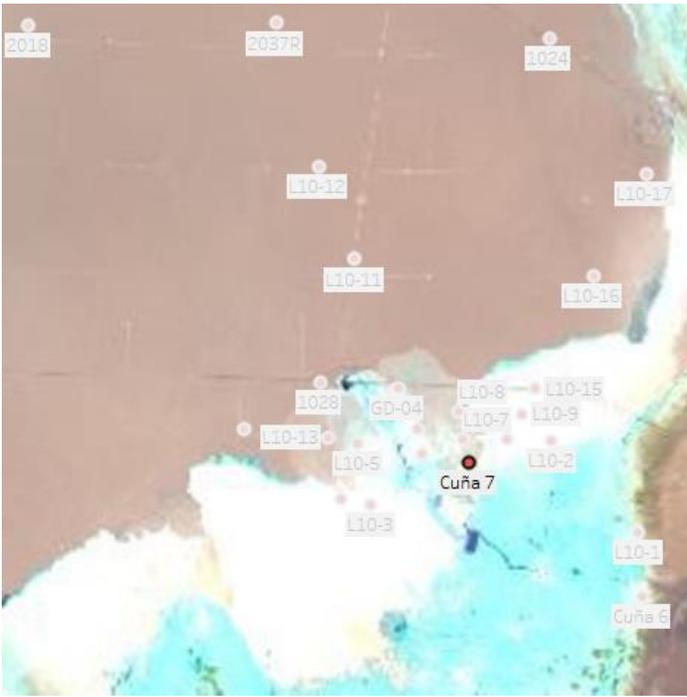




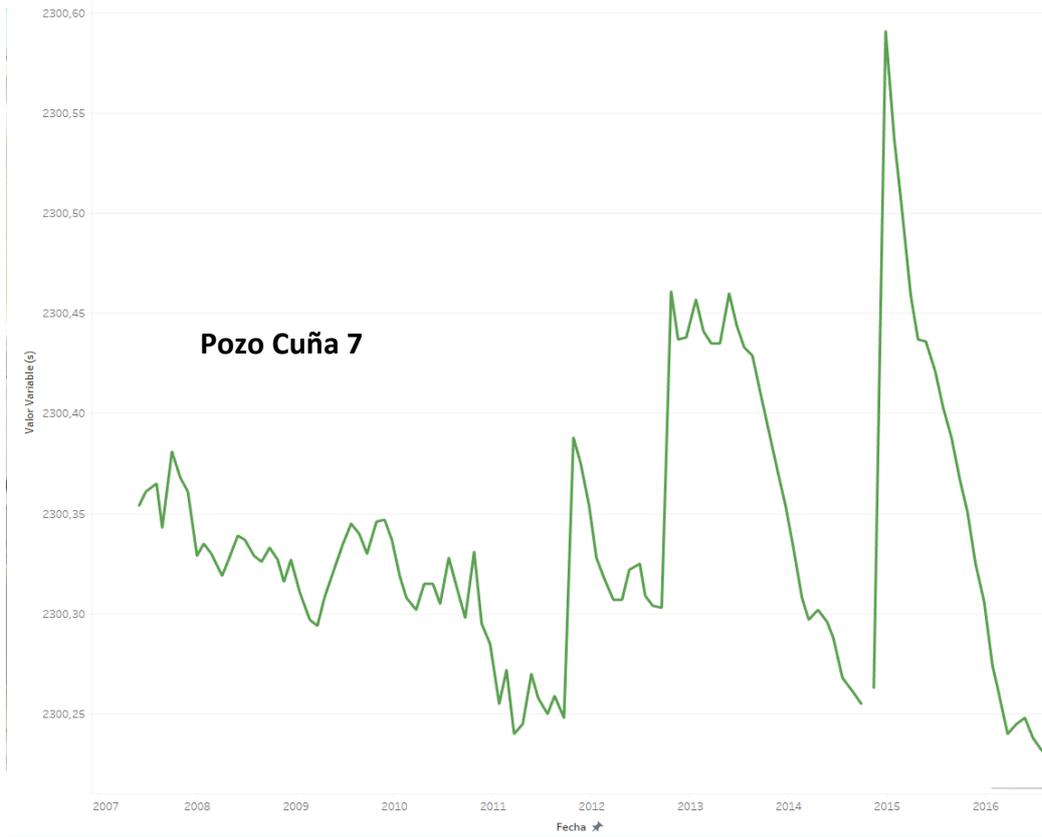
Datos de Nivel (msnm) para L10-10

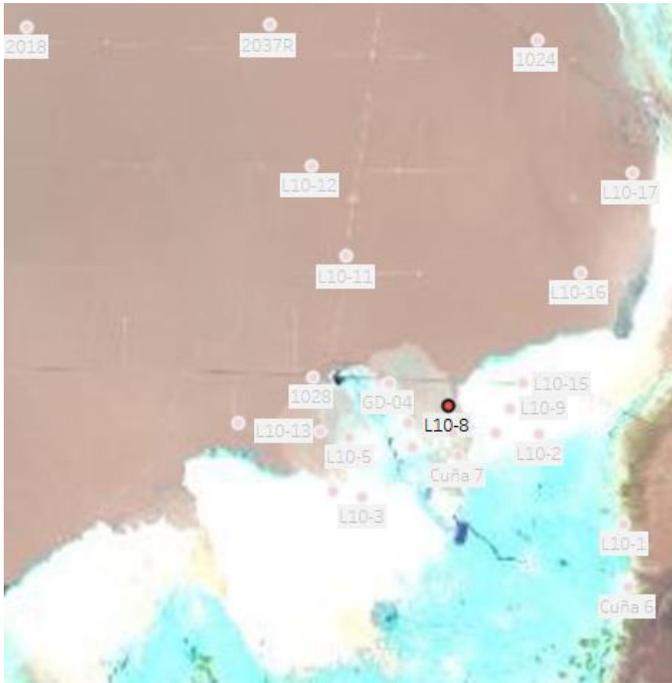
8





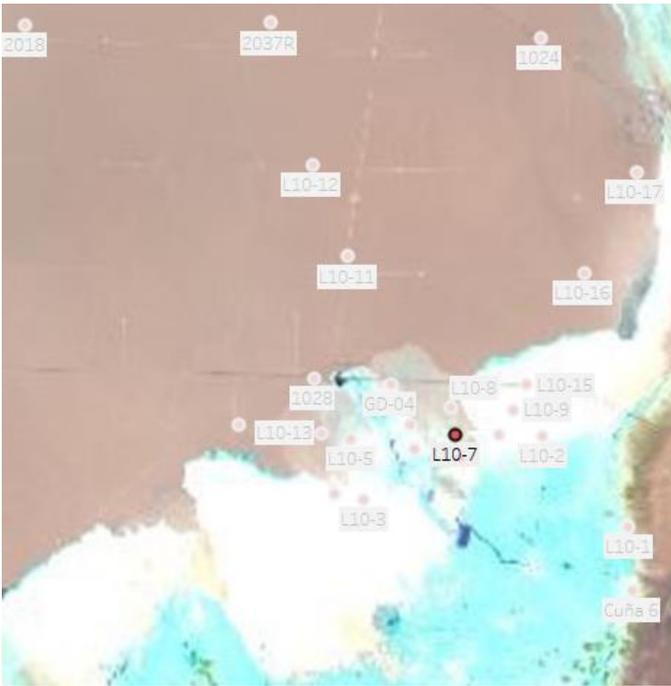
Datos de Nivel (msnm) para Cuña 7



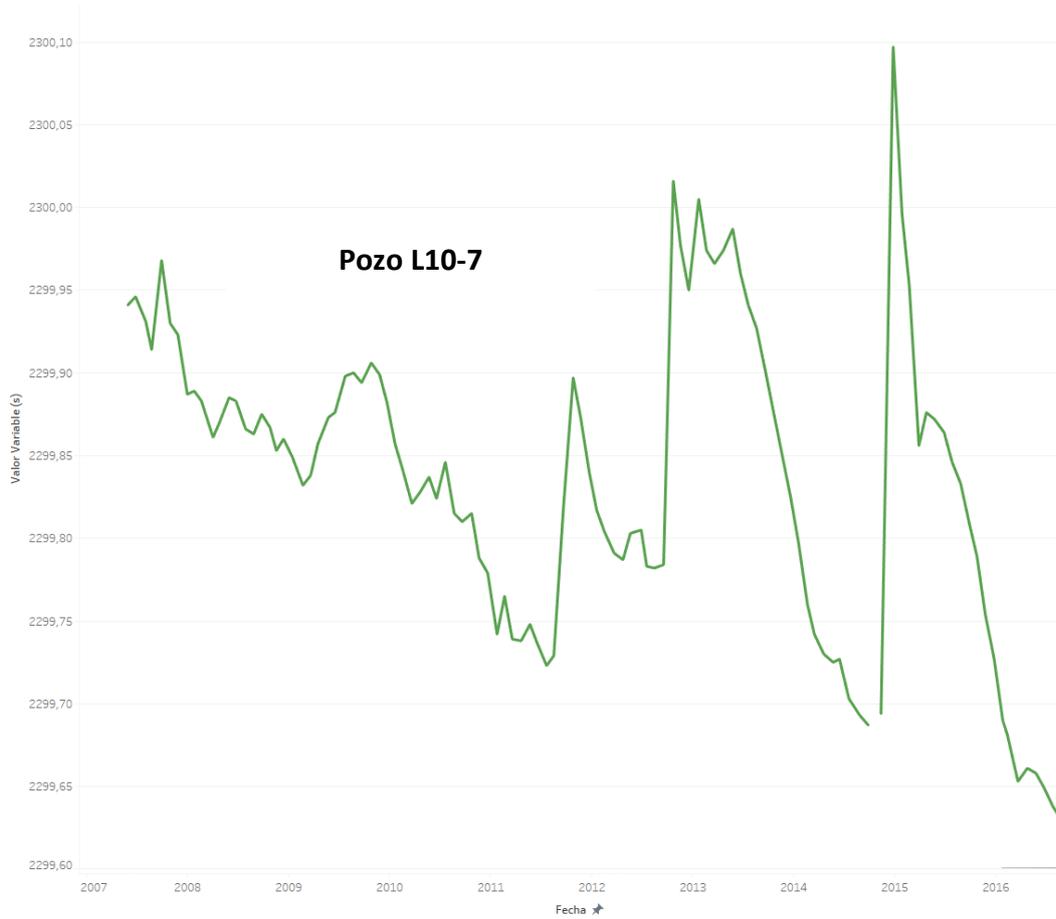


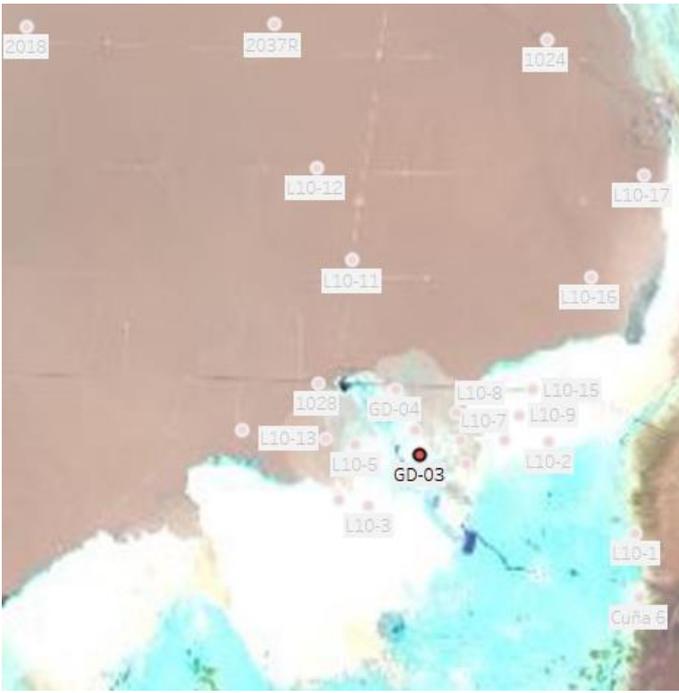
Datos de Nivel (msnm) para L10-8





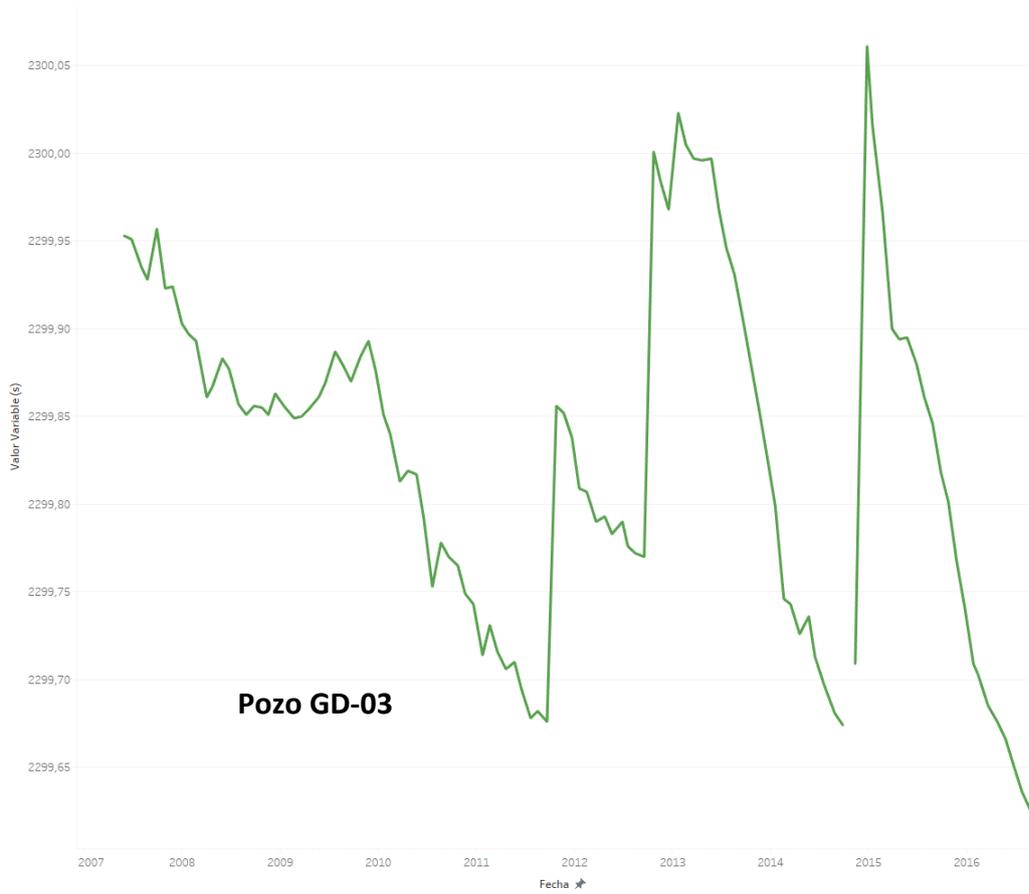
Datos de Nivel (msnm) para L10-7

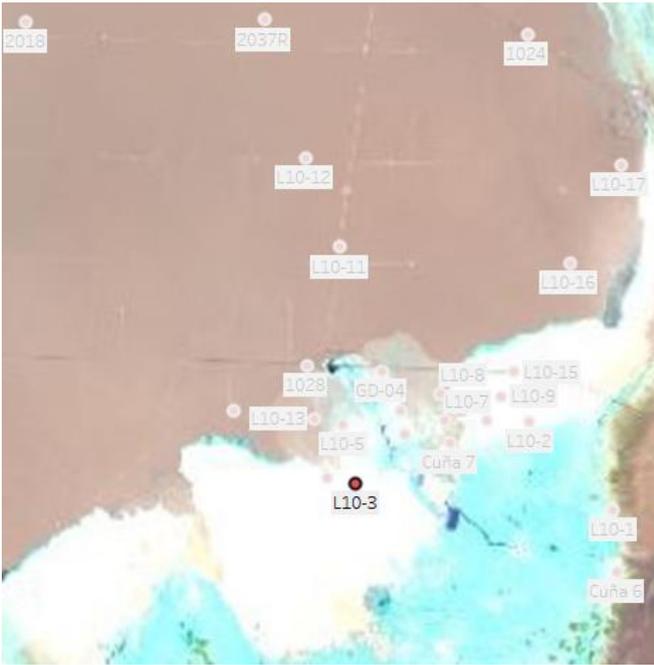




Datos de Nivel (msnm) para GD-03

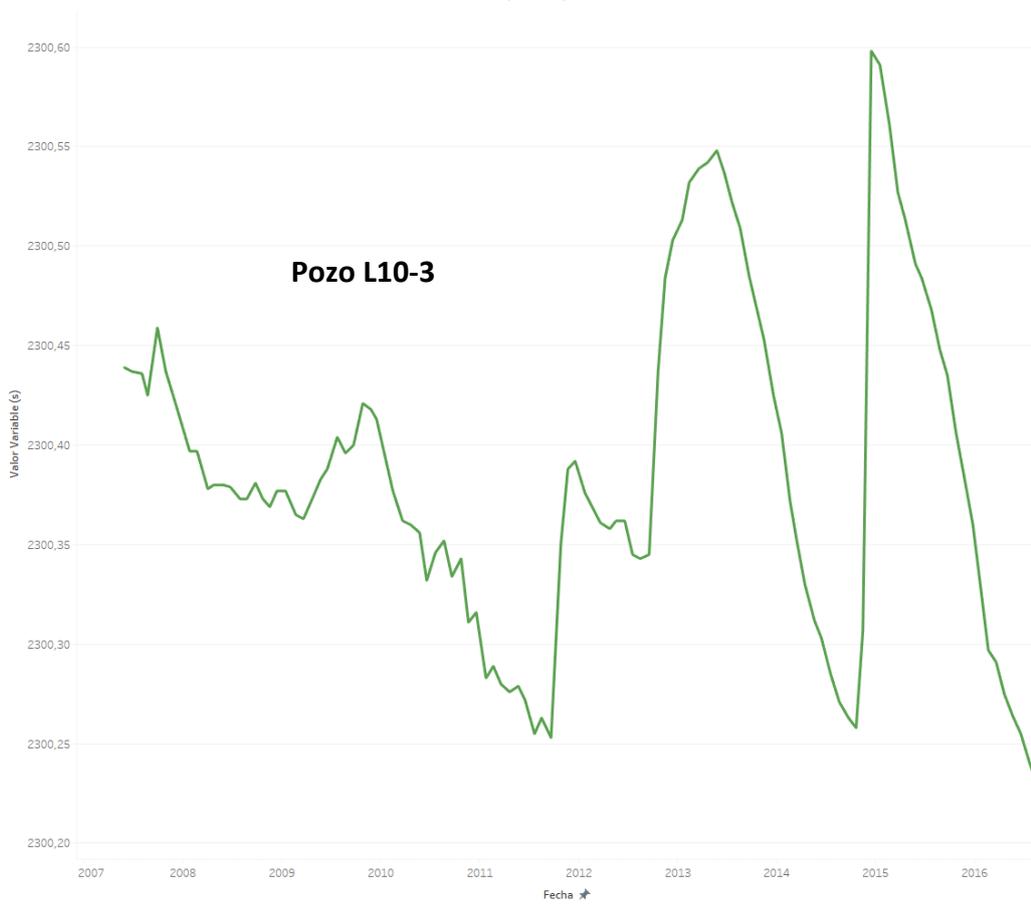
☰

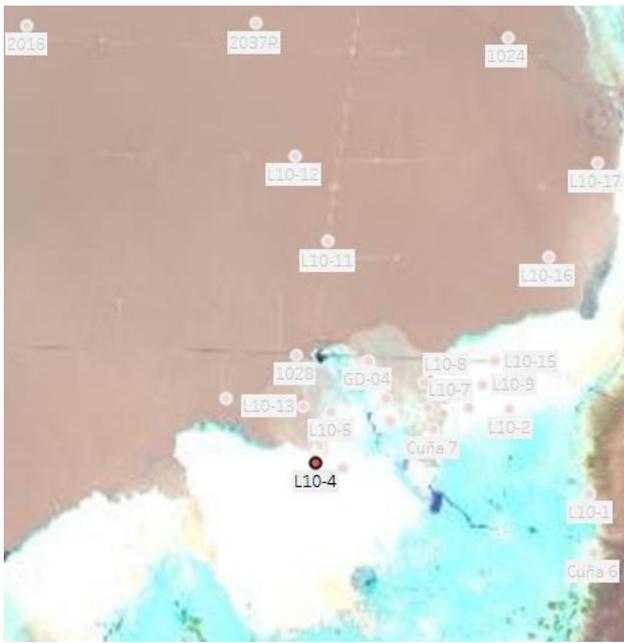




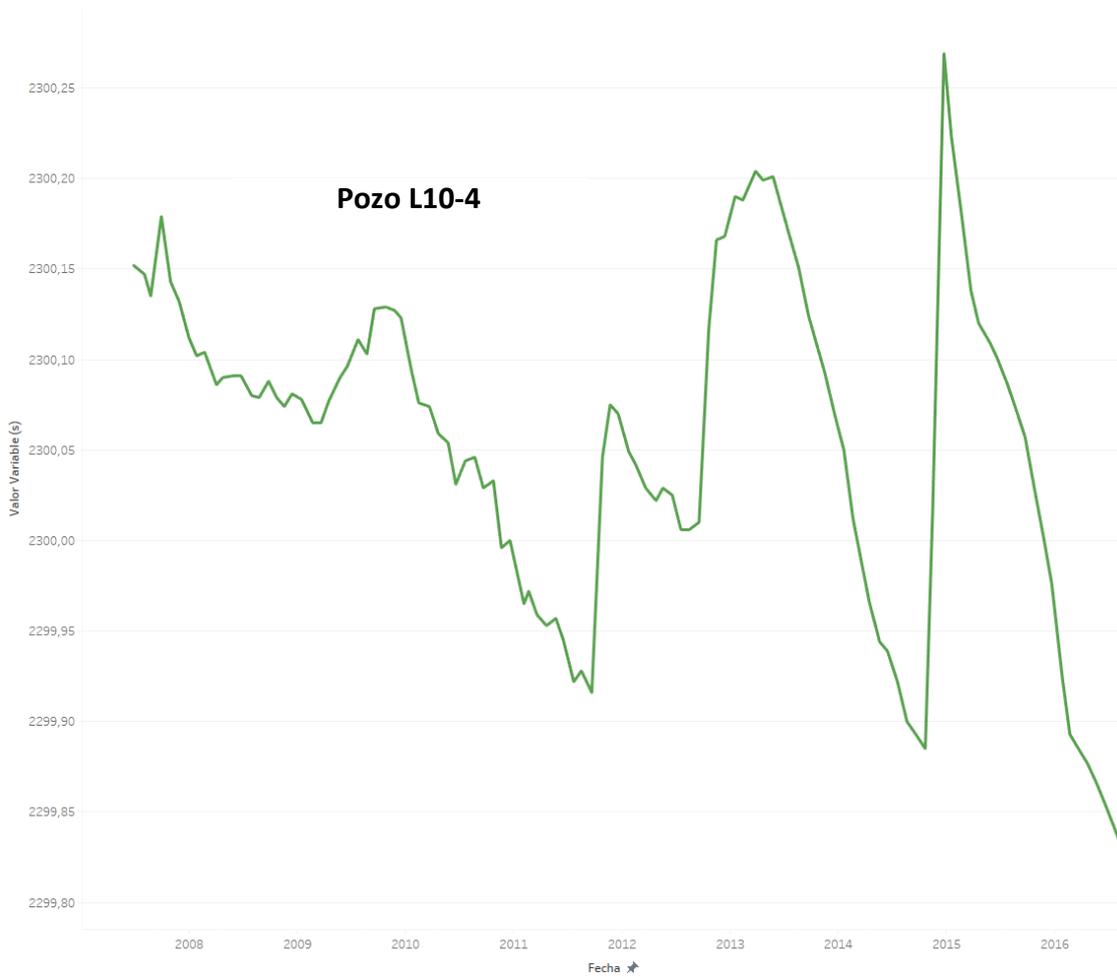
Datos de Nivel (msnm) para L10-3

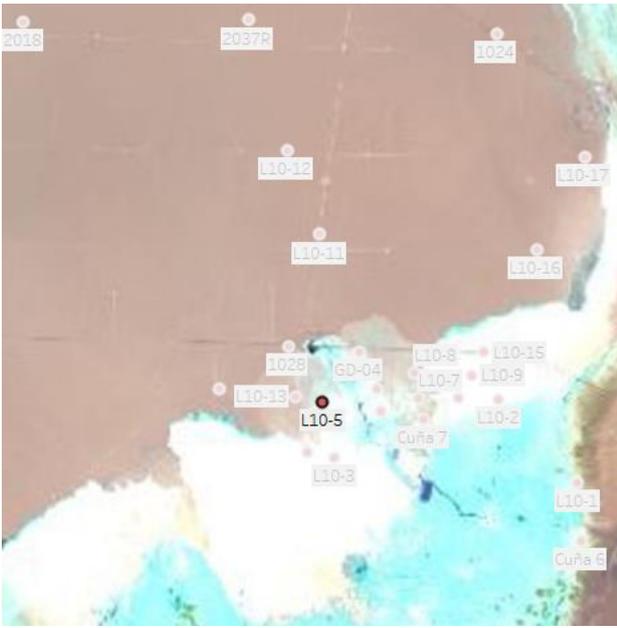
8





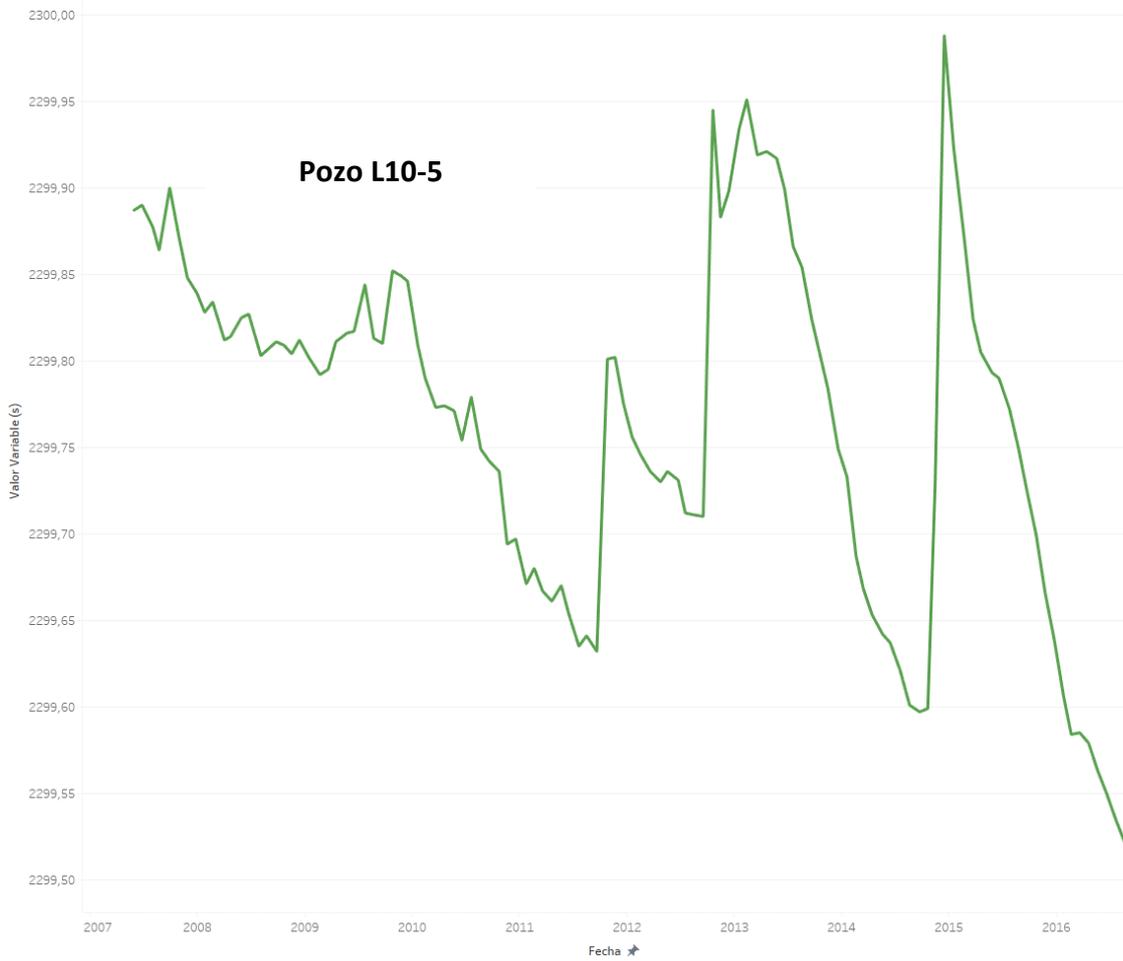
Datos de Nivel (msnm) para L10-4

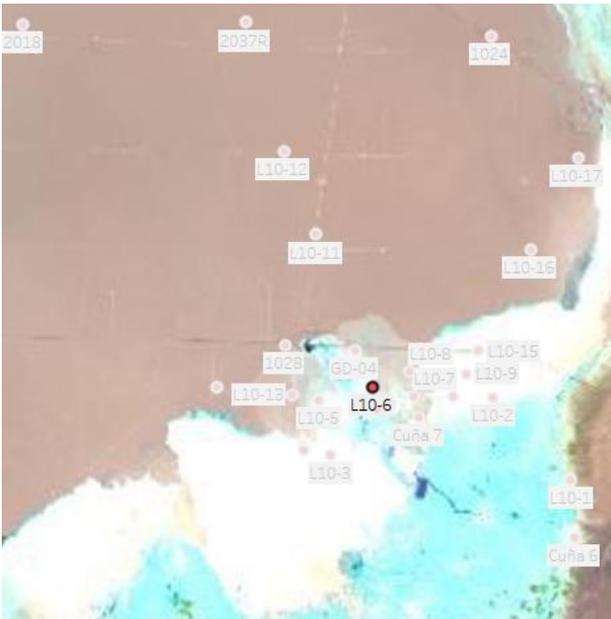




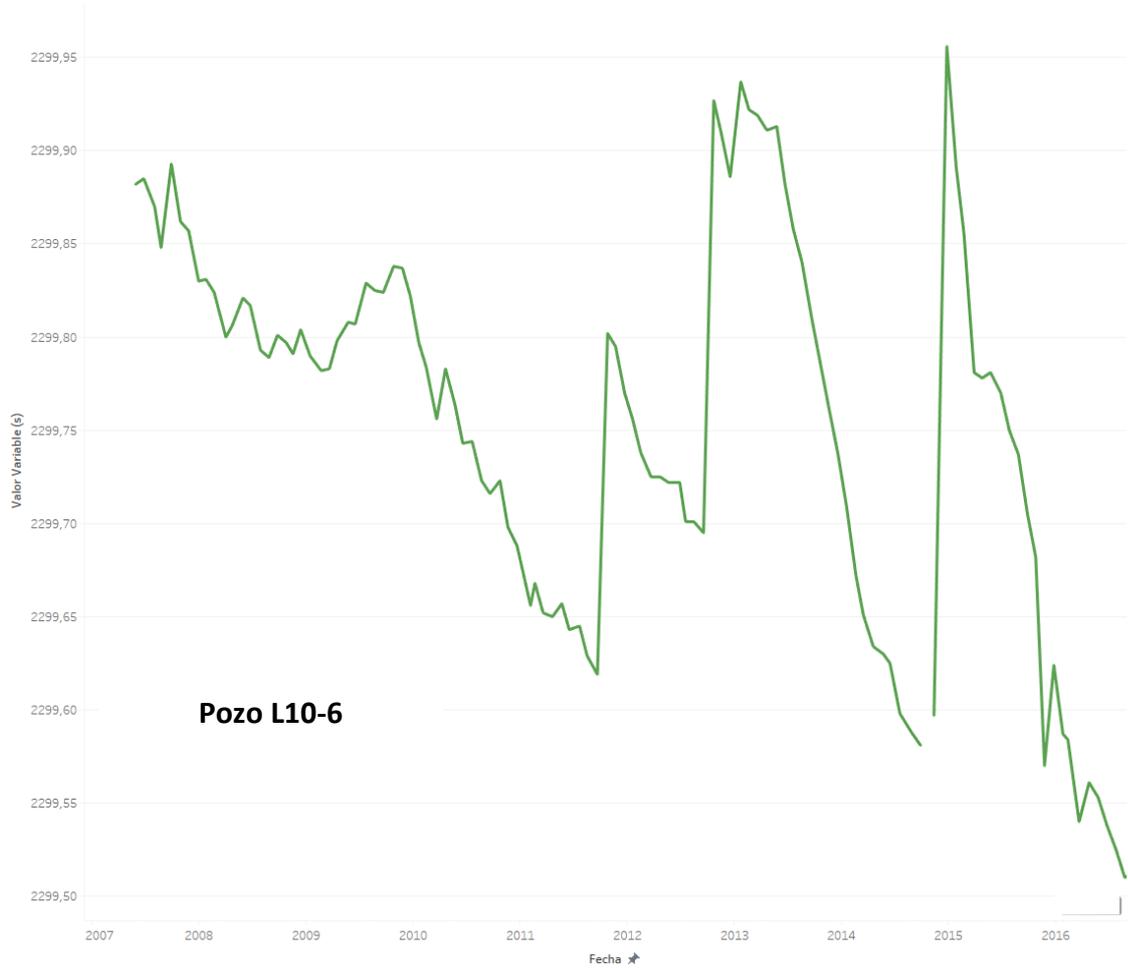
Datos de Nivel (msnm) para L10-5

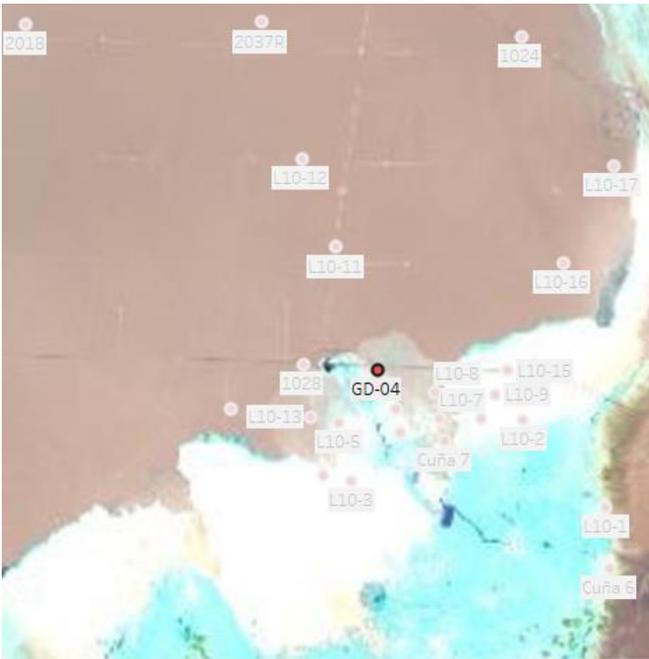
☰





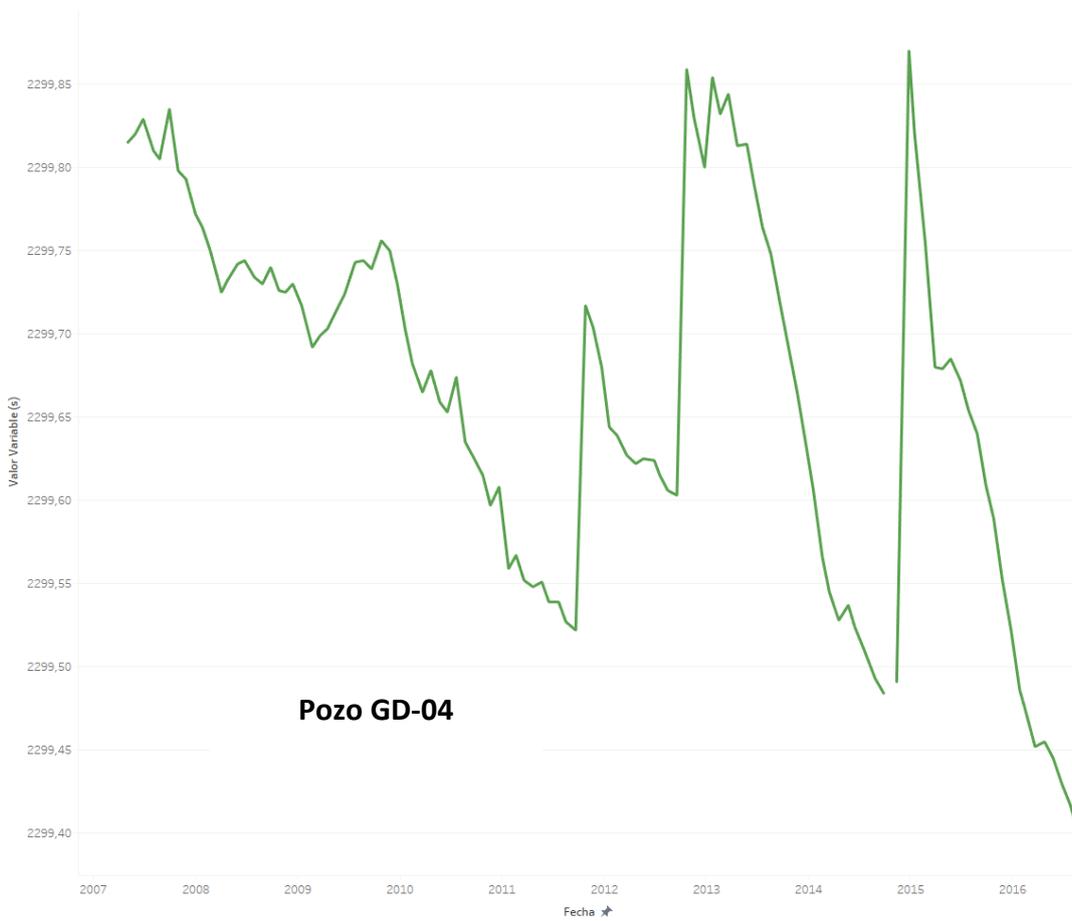
Datos de Nivel (msnm) para L10-6

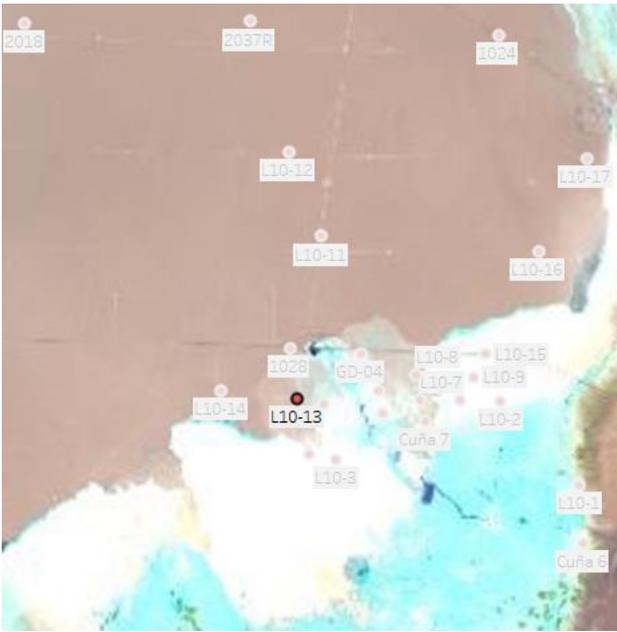




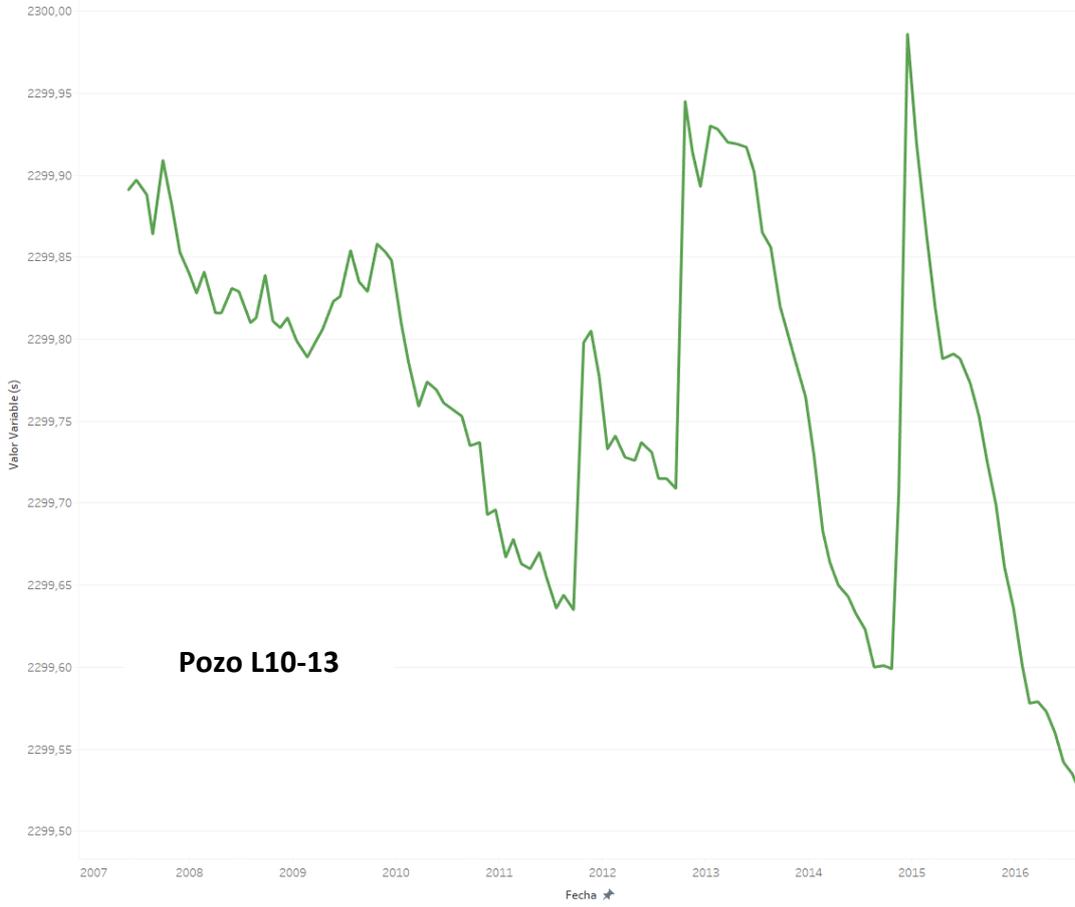
Datos de Nivel (msnm) para GD-04

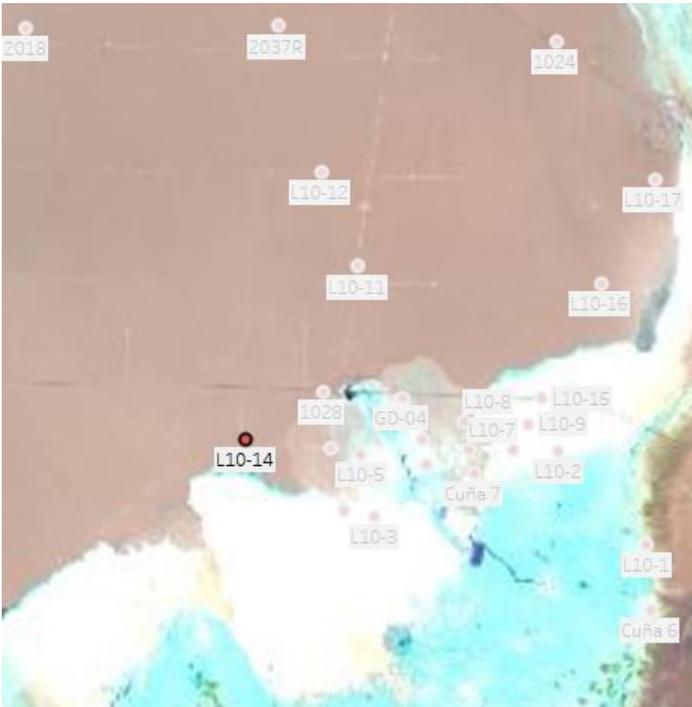
☐





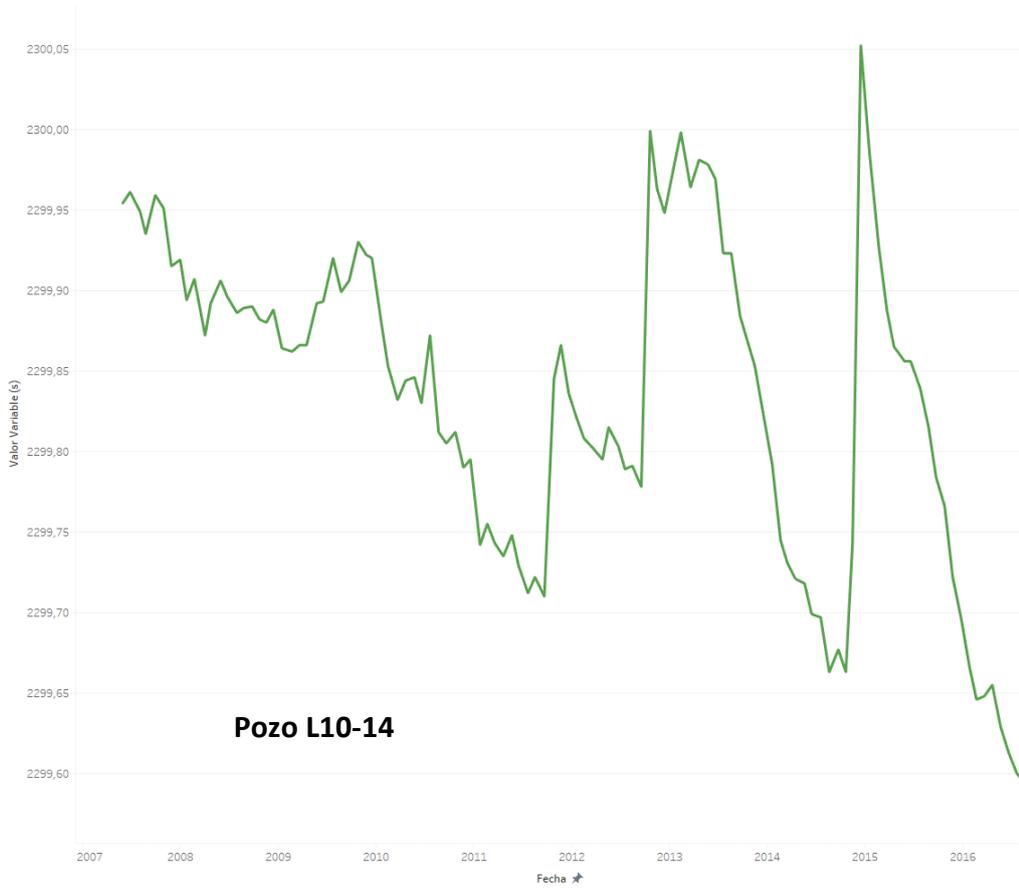
Datos de Nivel (msnm) para L10-13

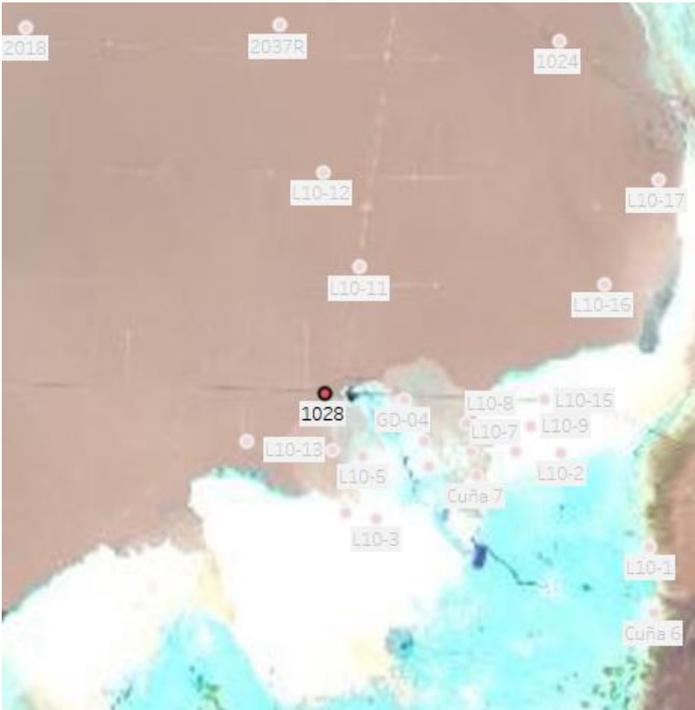




Datos de Nivel (msnm) para L10-14

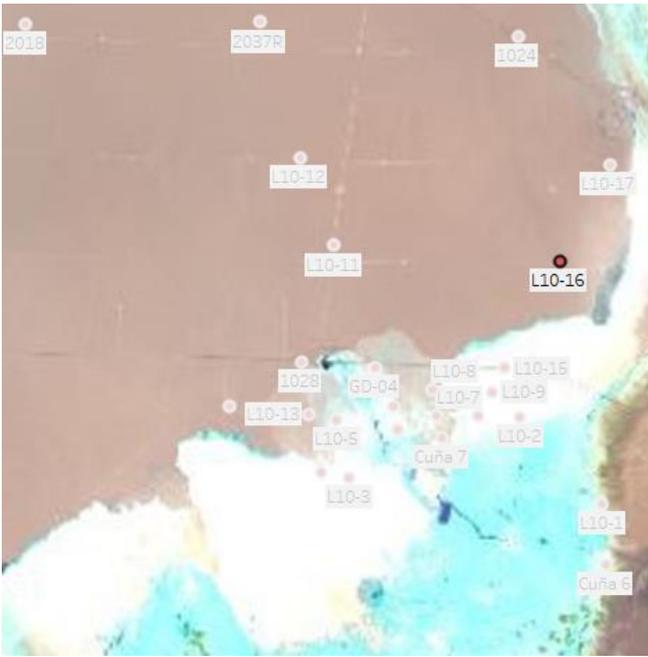
8



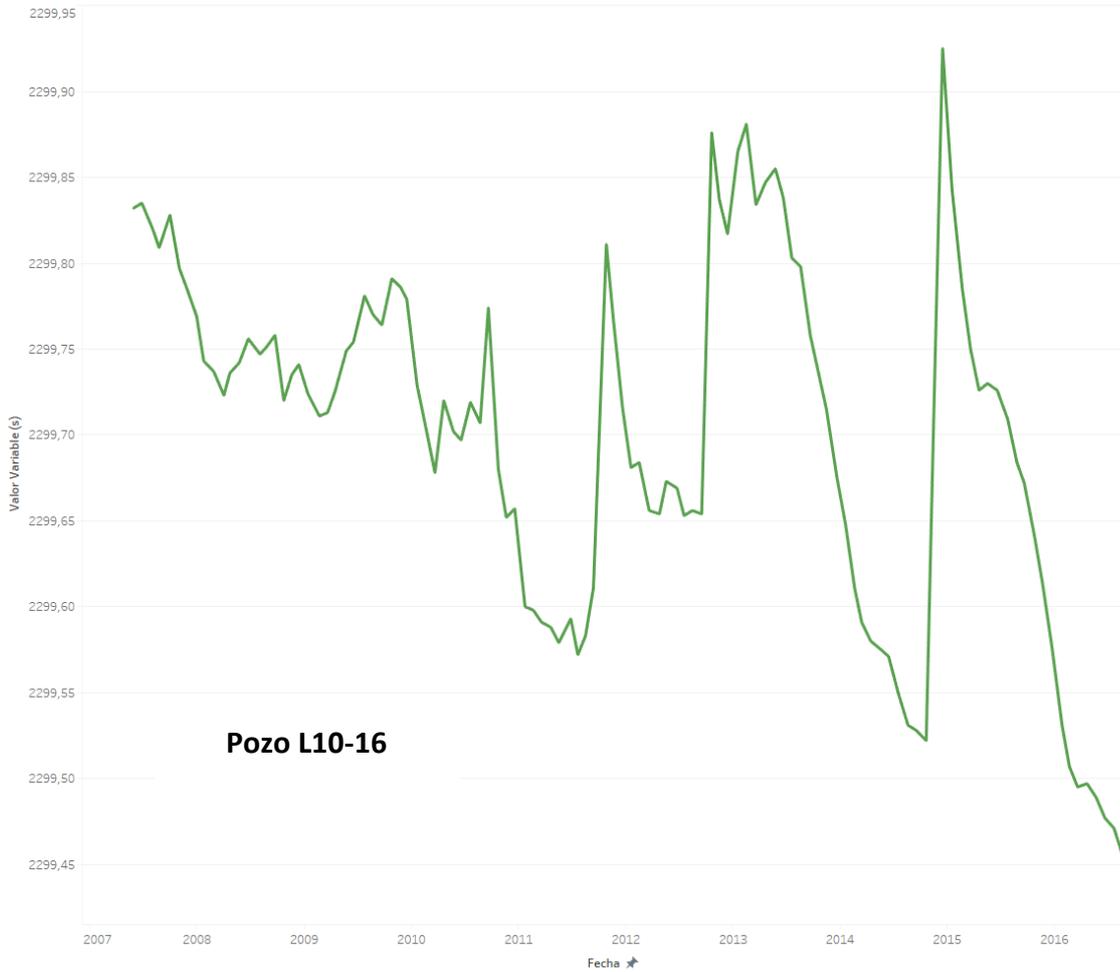


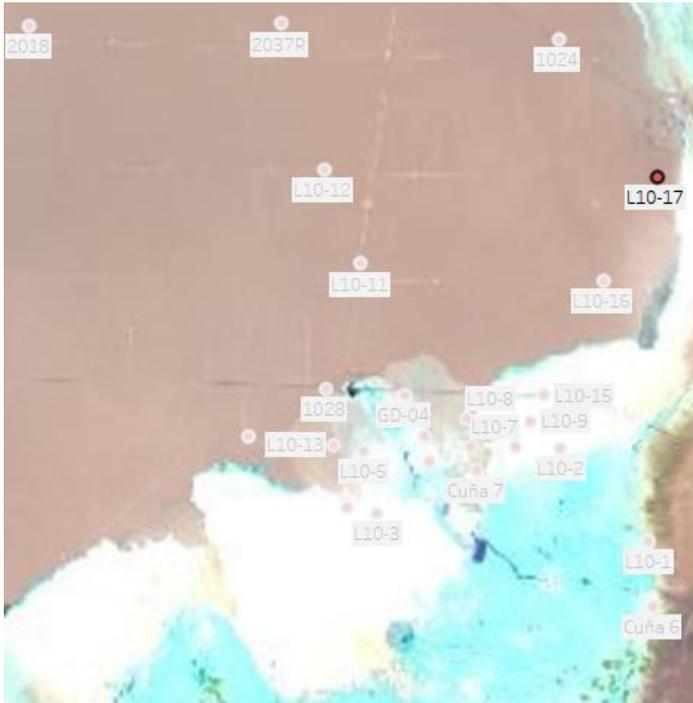
Datos de Nivel (msnm) para 1028



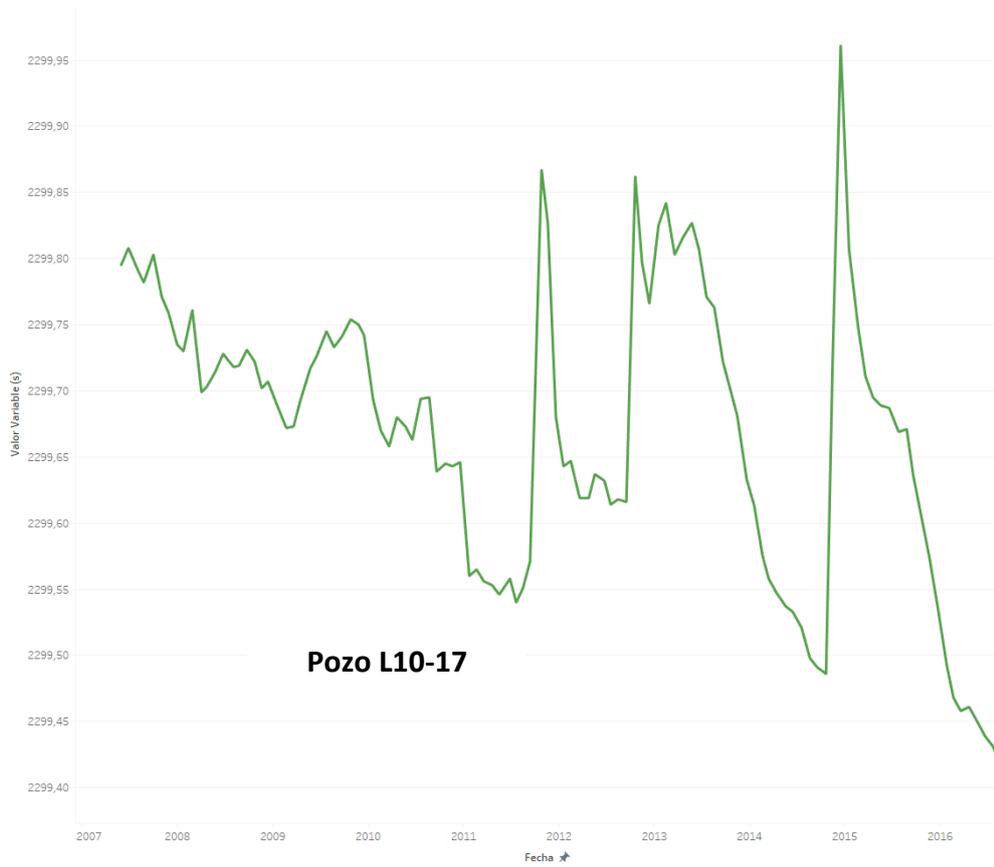


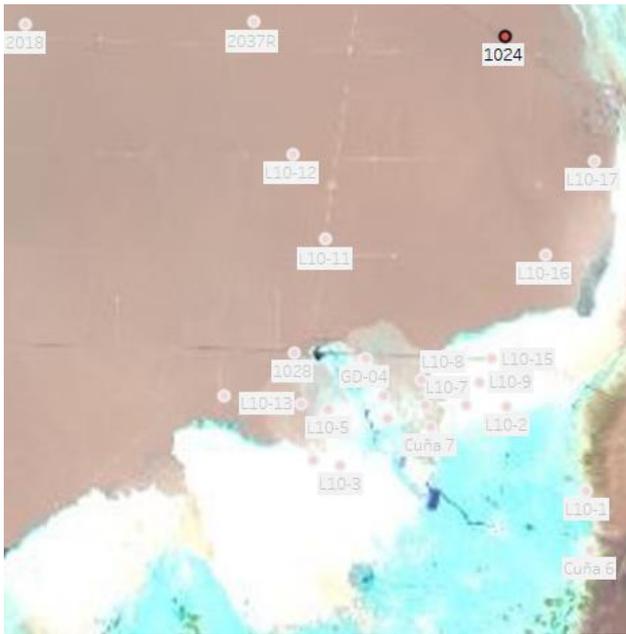
Datos de Nivel (msnm) para L10-16





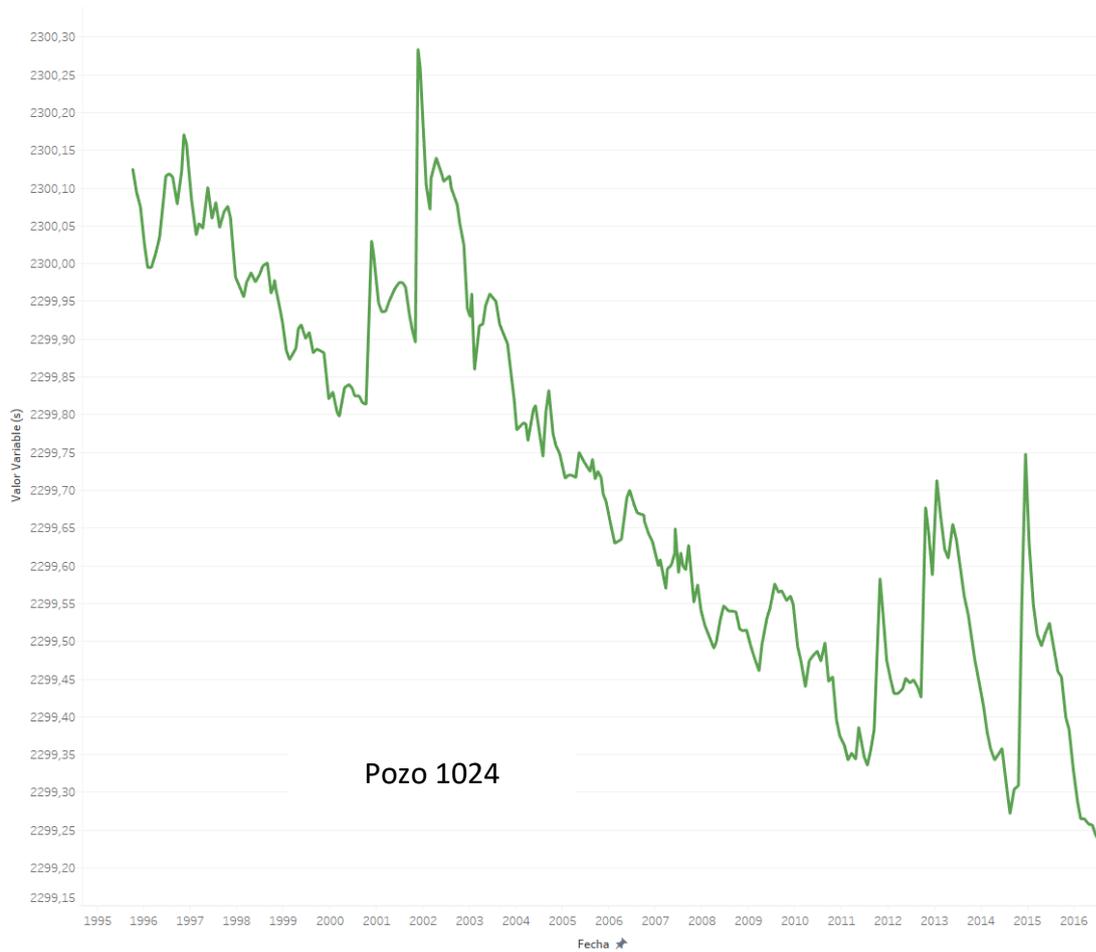
Datos de Nivel (msnm) para L10-17



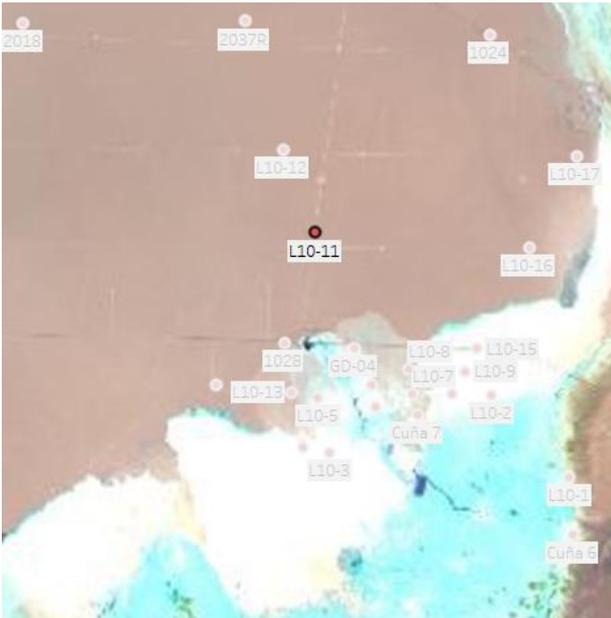


Datos de Nivel (msnm) para 1024

☞

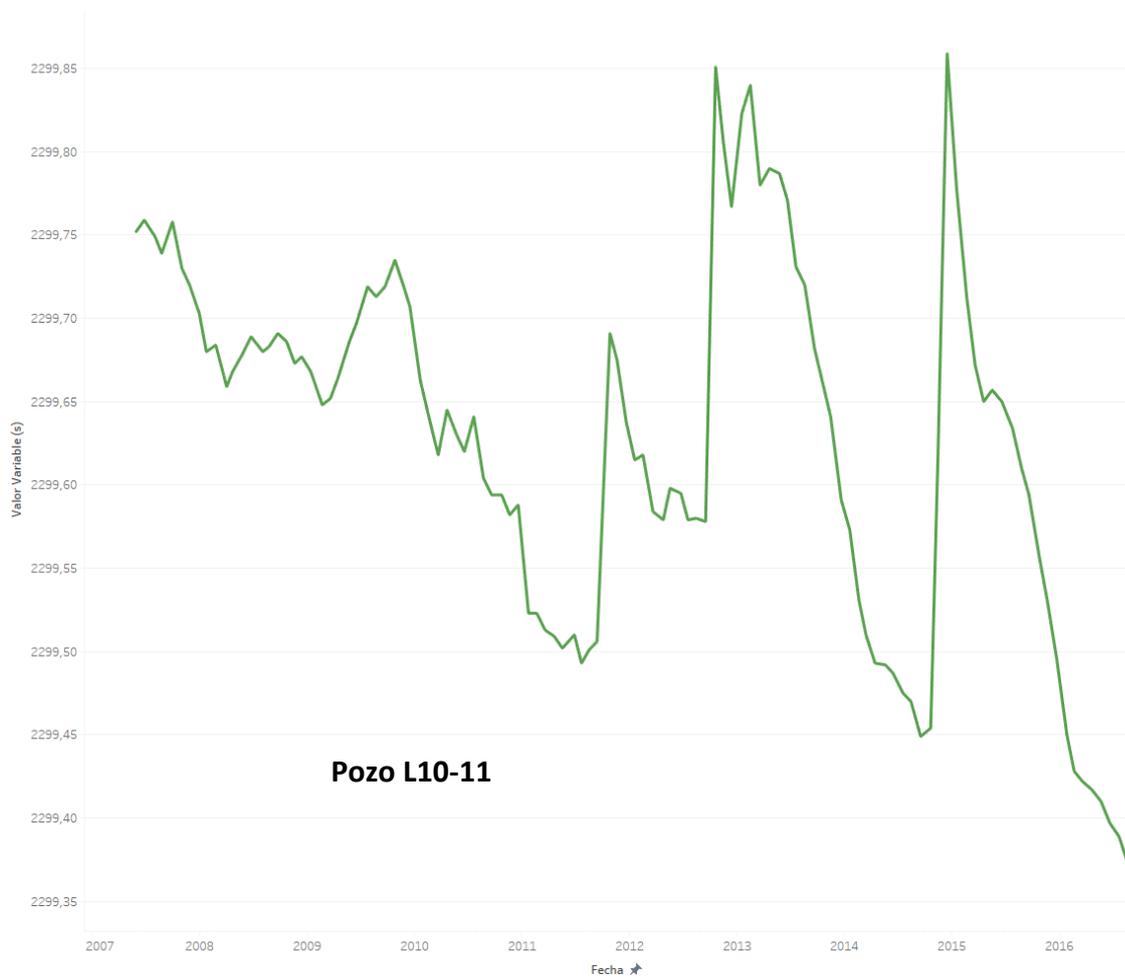


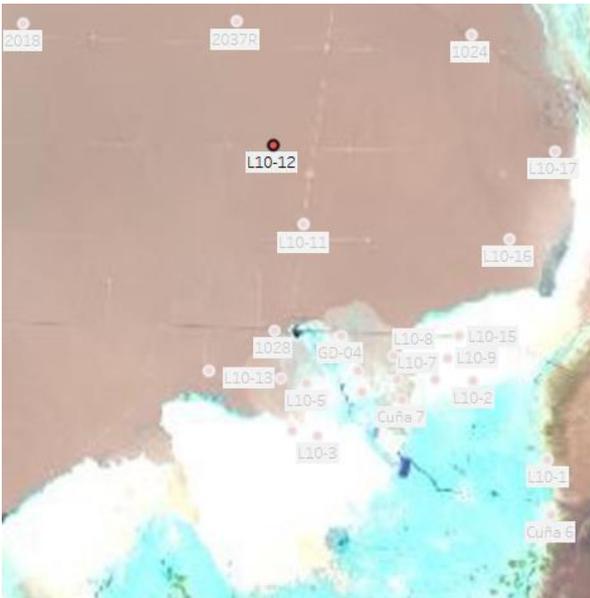
Pozo 1024



Datos de Nivel (msnm) para L10-11

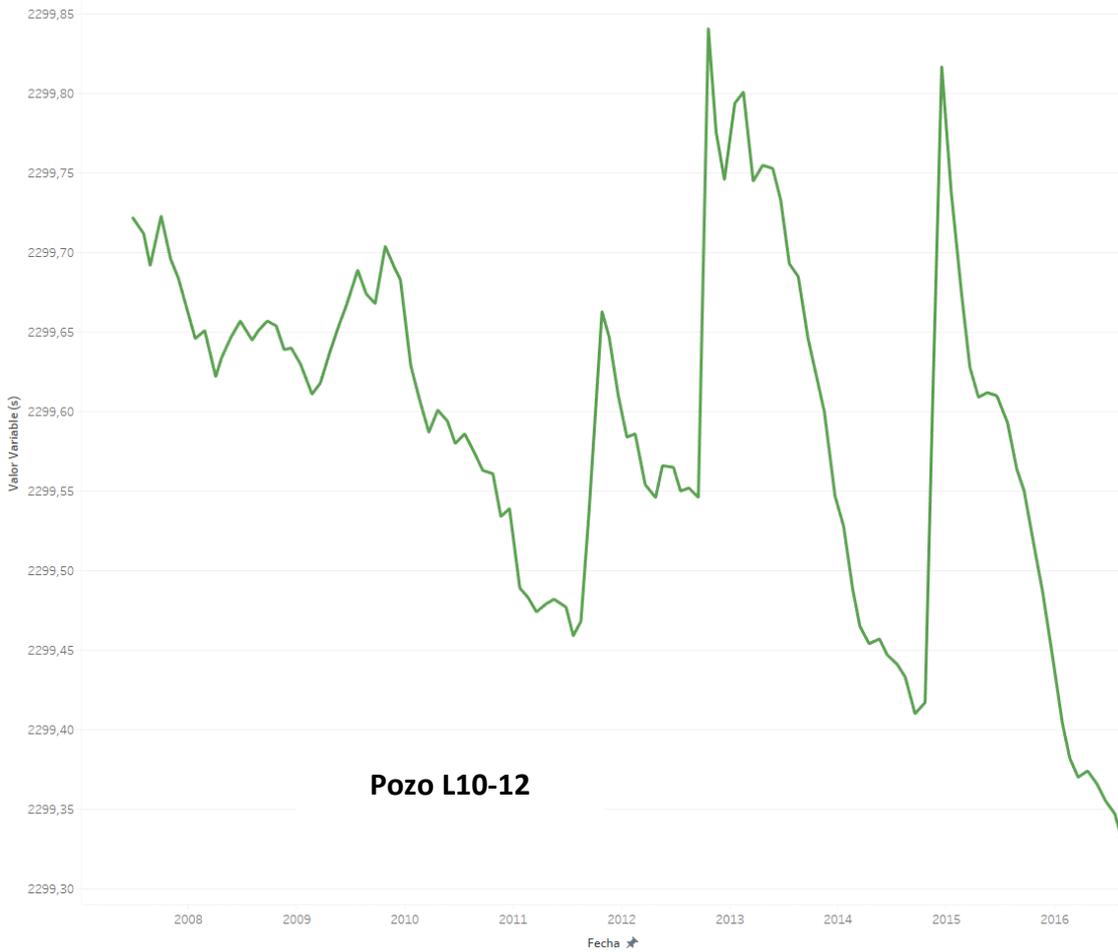
☰

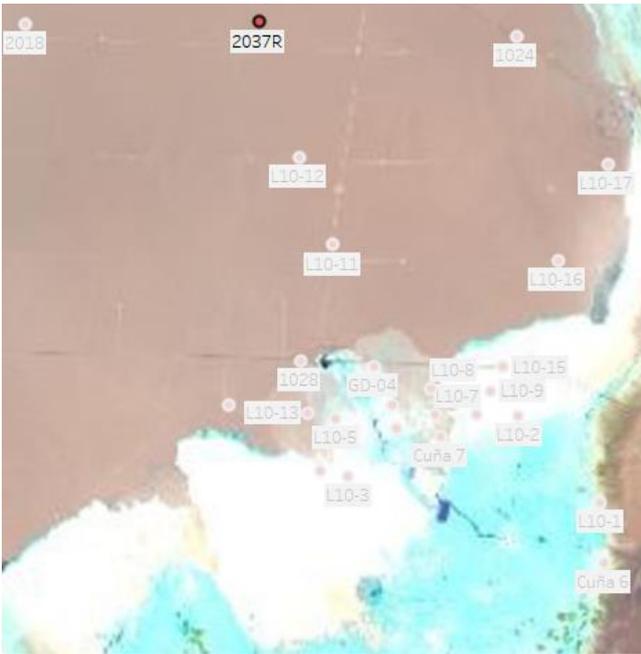




Datos de Nivel (msnm) para L10-12

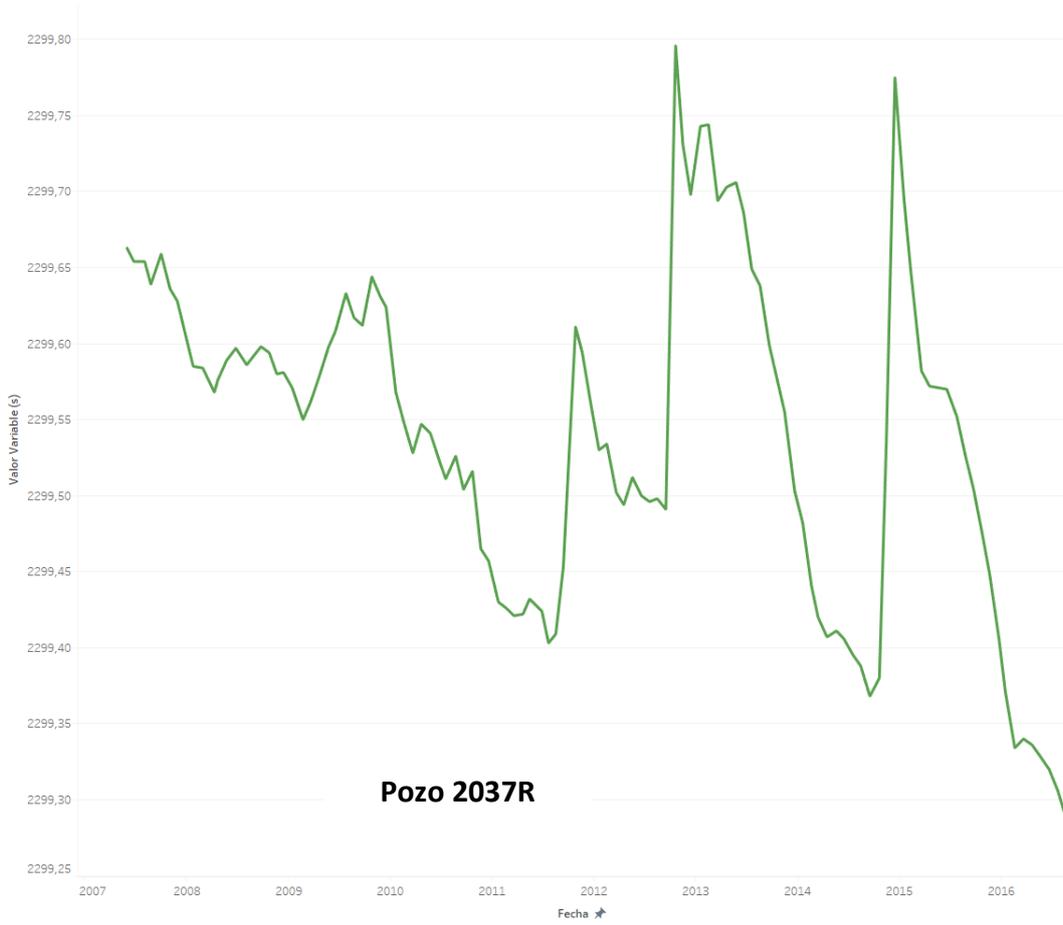
☰

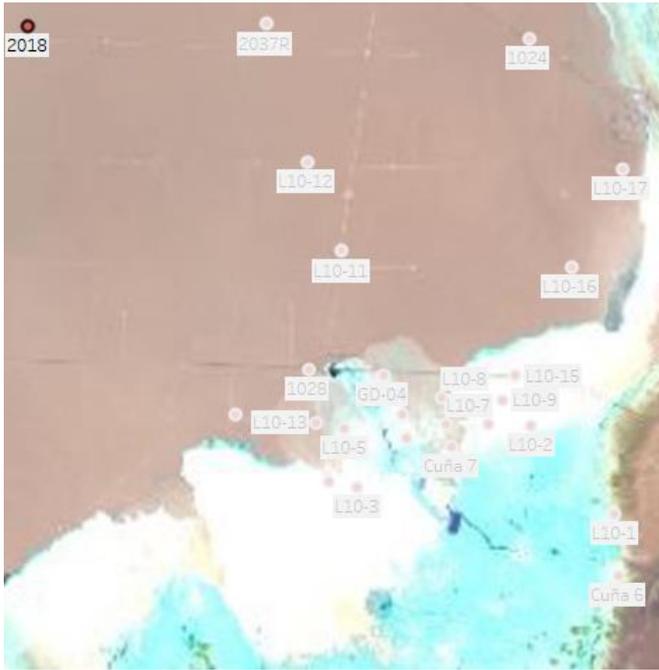




Datos de Nivel (msnm) para 2037R

☒





Datos de Nivel (msnm) para 2018

☰

