



EVALUACIÓN GEOLÓGICA DE LA CONTRACCIÓN DE LA LAGUNA SANTA ROSA EN LA REGIÓN DE ATACAMA DE CHILE GEOLOGICAL ASSESSMENT OF THE SHRINKING OF THE LAGUNA SANTA ROSA IN THE ATACAMA REGION OF CHILE

Rosa Sepúlveda, Mohammad Ayaz Alam*

Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Avenida Copayapu 485, Copiapó, Región de Atacama, Chile

*Autor de correspondencia

Correo electrónico: ayaz.alam@uda.cl Teléfono: (56 9) 57 39 1631

RESUMEN

Desde hace algunos años, ha habido una disminución considerable en el nivel del agua de la laguna Santa Rosa, ubicado en el extremo sur del Salar de Maricunga en la Región de Atacama, que afecta directamente la flora y fauna del sector, ya que este humedal es un ecosistema para las especies que habitan esta parte del altiplano. Para analizar el estado histórico y actual de la laguna, con el fin de evaluar su variabilidad a lo largo del tiempo, se realizó (i) su caracterización física y los principales elementos naturales y antrópicos que podrían tener un impacto potencial al humedal y ii) la variación en la extensión del lago se estableció mediante la aplicación de la colección de imágenes por satélite LANDSAT-5 TM tanto para el año hidrológico 2016-2017 como para un período de 1993-2014 para delimitar la transgresión y regresión de este humedales y proyectar las tendencias futuras.

Palabras claves: Laguna Santa Rosa, Salar de Maricunga, agua, humedal, ecosistema

ABSTRACT

For some years, there has been a considerable decrease in the water level of the Laguna Santa Rosa, a hypersaline lake located at the southern tip of the Maricunga salt flat in the Atacama Region of Chile, which directly affects the flora and fauna of the sector, since this wetland is an ecosystem for the species inhabiting this highland sector. To analyze the historic and current status of the Laguna Santa Rosa, in order to assess its variability over time, (i) its physical characterization was done and the principal natural and anthropic elements that could have potential impact on the wetland were identified and (ii) the variation in the extent of the lake were established through the application of LANDSAT-5 TM satellite image collection both for the hydrological year 2016-2017 and for a period of 1993-2014 to delimit the transgression and regression of this wetland and project the future trends.

Keywords: Laguna Santa Rosa, Salar de Maricunga, water, wetland, ecosystem

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cuidado y protección del medio ambiente es un tema importante de muchos países a nivel mundial, no siendo Chile la excepción y es así, que a partir del año 2002 el Estado de Chile ha llevado a cabo una política asociada a la protección del medio ambiente y recursos naturales. En este contexto, el año 2003 fue aprobada la Estrategia Nacional de Biodiversidad, luego en el año 2005 es aprobada la Estrategia Nacional de Humedales de Chile, la política de especies y la política de Áreas Protegidas Terrestres y Acuáticas (Acuerdo N°285/2005 del Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA). Además, un estudio de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) indica que la región de América Latina y el Caribe tiene dos características que hacen que el estudio de los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad resulte particularmente relevante: (i) es una de las regiones más vulnerables frente al cambio climático (CEPAL, 2010) y; (ii) es una de las regiones con mayor concentración de biodiversidad del planeta (Uribe-Botero, 2015). A la fecha se encuentra en proceso de implementación el Plan de Acción de la Estrategia de Humedales, bajo el cuidado del Comité Nacional de Humedales, este organismo se encuentra conformado por diversas instituciones públicas como CONAMA (a partir del 1 de octubre de 2010, Servicio de Evaluación Ambiental, SEA), Corporación Nacional Forestal (CONAF), entre otras. Chile además está cumpliendo un compromiso internacional, donde el país aprobó por ley de la República, en 1980, la Convención Ramsar, la cual promueve el cuidado y uso sustentable de los humedales (Grimberg, 2011).

Existe una gran necesidad de estudios que generen mayores y nuevos conocimientos en áreas ambientales importantes, como es el caso de los humedales, estos son de gran importancia para lograr que dichos lugares sean utilizados de forma sustentable y asegurar su conservación a través del tiempo. Para manejar adecuadamente estas zonas, se requiere conocer su comportamiento. Como, por ejemplo, poseer información de años pasados, además de

información del presente año, para así, poder proyectar su futuro comportamiento. En la Región de Atacama, existen diversos ambientes que poseen gran importancia a nivel ecológico, geológico, educacional y recreativo-turístico. Uno de estos es el Parque Nacional Nevado de Tres Cruces, ubicado en la cordillera andina de la Región de Atacama. Es relevante mencionar que, para fines prácticos de esta investigación, sólo se estudiará la laguna Santa Rosa, perteneciente al Parque Nacional Nevado de Tres Cruces, cuyas cumbres conforman una barrera natural que limita el cuerpo de agua, dejando de lado las lagunas y áreas ribereñas asociadas a éstas. Esto debido a que el cuerpo de agua en un humedal puede considerarse como su núcleo.

De acuerdo con lo señalado por Gajardo (1993) en su Sistema básico de clasificación de la vegetación natural de Chile, el parque nacional se encuentra inserto en la sub-región del Altiplano y la Puna, la que pertenece a la Región Ecológica de la stepa Alto-Andina. Dentro de los límites del parque, se encontraron las formaciones vegetales: Estepa Desértica de los Salares Andinos y Desierto Alto - Andino del Ojos del Salado. Se ha demostrado a través de modelos globales de cambio climático, que la temperatura de la región ha tenido un aumento de alrededor de 2 a 3°C, y de 5°C en sectores de la alta cordillera, acompañado además de una baja en las precipitaciones (Julía et al., 2008). Este cambio ha afectado de diferente manera a los escasos cuerpos de agua existentes en la región, donde la laguna Santa Rosa no se excluye. Todos estos factores tienen potencial de afectar tanto a la laguna como a otros fenómenos que se relacionan estrechamente con ella, es por ello la importancia de generar la información necesaria acerca de su comportamiento y luego comparar con los comportamientos que tuvo en el pasado.

1.2 Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo corresponde a la laguna Santa Rosa, la cual se ubica a 152,6 km hacia el este de la ciudad de Copiapó. Se sitúa, en la depresión de los salares de la Región de Atacama. Esta laguna se encuentra acoplada con el salar de Maricunga a su extremo sur (Figura 1).

Geográficamente la laguna se encuentra en las coordenadas E 482.925 / N 7.004.361, posee una altura de 3.762 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y una extensión de 2,0 km por 1,2 km aproximadamente. El acceso a este lugar es recomendado hacerlo a través de vehículos 4x4, utilizando desde Copiapó la ruta internacional CH-31, hacia el

paso San Francisco a Argentina. La laguna Santa Rosa es parte del Parque Nacional Nevado de Tres Cruces, siendo este la primera unidad del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), donde se vela por la protección y conservación de la formación vegetal de la estepa de los salares andinos.

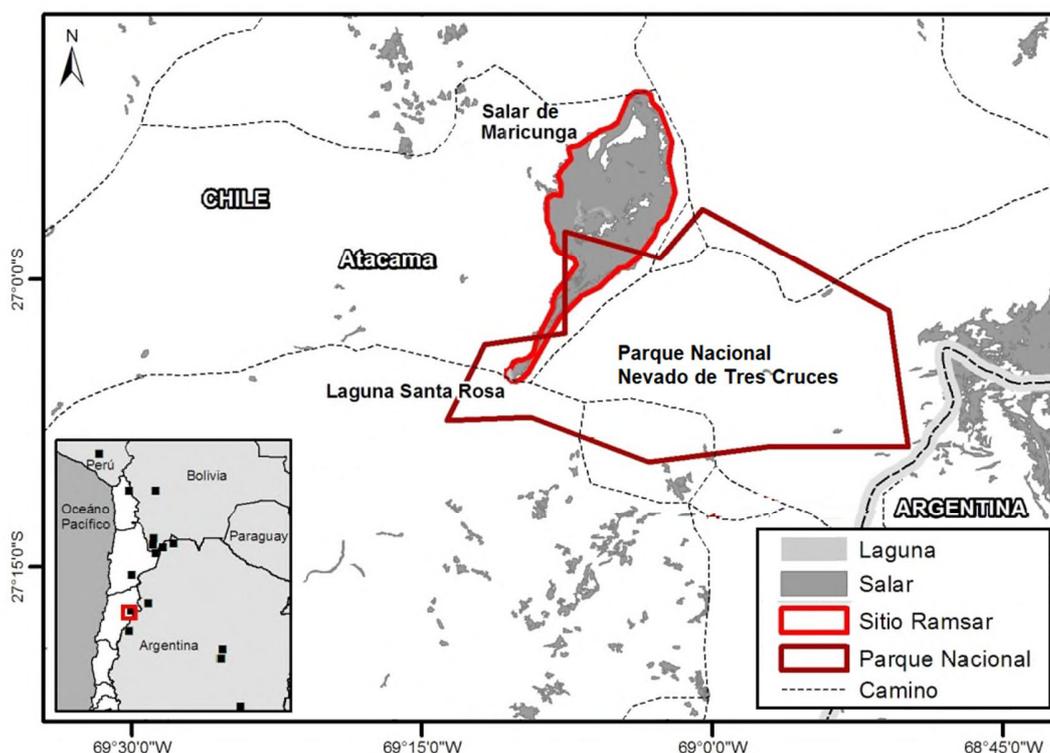


Figura 1. Ubicación de la laguna Santa Rosa, y del Parque Nacional Nevado de Tres Cruces

1.3 Alcance del trabajo

El objetivo general del trabajo fue evaluar la disminución del nivel de agua de la laguna Santa Rosa, causando la contracción de la laguna y sus condiciones, considerando su variabilidad del nivel hídrico en el tiempo, para determinar su causa y mecanismo. Para cumplir este objetivo, las siguientes tareas han sido cumplidas:

Análisis de la laguna Santa Rosa desde el punto de vista físico-natural.

Delineación de los posibles factores antrópicos que afecten el nivel de agua de la laguna Santa Rosa y sus condiciones.

Análisis de la baja en el nivel hídrico de la laguna durante un año hidrológico reciente y a través de una serie de periodos.

Definición de las áreas de retroceso del nivel de agua de la laguna a través de los años estudiados

Proyección de las futuras tendencias según la información analizada durante la investigación.

1.4 Hipótesis del trabajo

La laguna Santa Rosa, ubicada en el Parque Nacional Nevado de Tres Cruces, ha estado experimentando una progresiva disminución en su cantidad de agua, en estos últimos años, la cual es más notoria en los meses de verano. Este descenso puede ser causado

tanto de forma natural o antrópica. Es importante señalar que resultados de modelos globales de cambio climático hacen ver un aumento de temperatura alrededor de 2 a 3°C, y de 5°C en sectores altos de la cordillera, con disminución de las precipitaciones, lo que ha afectado de diferente manera los escasos cuerpos de agua de la región, donde la laguna Santa Rosa no es la excepción. Lo anterior se incrementa considerando que las características climáticas del sector, determinadas principalmente por la presencia de: (i) el anticiclón subtropical del Pacífico Sur; (ii) la fría corriente de Humboldt, y (iii) una compleja topografía; establecen bajas tasas de precipitación, concentradas en unos pocos días durante el invierno, incrementando la evaporación en una alta tasa en los meses de verano, además, podría existir una estructura geológica causados por tectónica, lo que filtraría grandes cantidades de agua, por otro lado, existen evidencias de pozos mineros de extracción ubicados en líneas de flujo de agua subterránea que alimenta la laguna, lo que también puede ser la causa del descenso hídrico de la laguna o una mezcla de todo lo anterior.

2. METODOLOGÍA

Las imágenes satelitales Landsat-5 fueron utilizadas para el análisis de las áreas ocupadas por el agua de la laguna Santa Rosa en determinados periodos de tiempo. Se usó la composición de bandas para poder generar una imagen en color real y 3 diferentes imágenes de falso color mediante la utilización del software ArcGIS (ArcMap versión 10.3). Gracias a estas combinaciones con diferentes bandas se pudo resaltar las distintas variaciones de color, textura, tonalidad y diferenciar la superficie de agua de la laguna y sus alrededores. Se interpretaron las imágenes para cada uno de los periodos seleccionados (año 2016-2017 y periodo comprendido entre 1993-2014), como también la visualización de las zonas más relevantes de éstas en cuanto a los objetivos de esta investigación.

Para delimitar el cuerpo de agua de la laguna en cada uno de los periodos en cuestión se consideraron todos los píxeles que se

visualizaron dentro del margen para ser considerados con presencia de agua. De esta forma se pudo establecer un área para la laguna en cada uno de los periodos trabajados. Con cada uno de los límites establecidos se procedió a establecer las áreas de cada una de las superficies de la laguna, el área se estableció utilizando el software ArcGIS 10.3, el cual mediante un simple algoritmo calcula automáticamente las áreas de todos los polígonos generados.

Se generó una serie de mapas mediante la utilización del software ArcGIS (ArcMap versión 10.3) para expresar gráficamente los resultados obtenidos. En lo que se refiere a niveles de agua, se realizó un análisis de pozos del sector lo que ayudo a estudiarlos a través de algunos años, la información fue brindada por DGA. El balance de agua realizado por Aquaterra (2013), fue modificado utilizando el valor de evaporación de la cuenca del Negro Francisco por ser la más similar a la cuenca en estudio.

Para proyectar tendencias del comportamiento probable de la laguna en el futuro se analizaron los resultados obtenidos en cuanto a su superficie de agua, tanto en el año hidrológico 2016-2017, como en los periodos dentro del intervalo 1993-2014, mediante la utilización de análisis estadísticos básicos, debido a que por la presencia de las mineras una tendencia futura es incierta. El método estadístico a utilizar fue el análisis de las medidas o valores de tendencia central, es decir la máxima, mínima, media, mediana y la moda. Además se confecciono un histograma, en el cual se agruparon los datos del área del cuerpo de agua, con ayuda del programa Microsoft Excel.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de las variaciones en la extensión de la laguna

3.1.1 Periodo 1993-2014

Los datos de la extensión de la laguna durante el periodo de 1993-2014 se obtuvieron mediante mapeo manual utilizando imagentes satelitales de alta resolución, todas extraídas en los meses con menor recarga de la cuenca por

precipitaciones, desde octubre a febrero consecuentemente, en la Tabla 1 se puede observar un resumen de las áreas superficiales de la laguna por cada año analizado, y en Figura 3 se puede observar una clara baja a través de los años, encontrando el valor máximo de 746.253 m² durante el año 1997 en el mes de noviembre y un valor crítico de 601.993 m² en 2014 en el mes de enero.

En la Figura 2, se ve claramente las 4 alzas más importantes del área de la laguna las que se encuentran en los años 1997 en el mes de noviembre, 2001 en el mes de diciembre, 2009 en el mes de diciembre y 2011 en el mes de noviembre. Por otro lado las bajas del área de la laguna se ven marcadas en 4 años, correspondientes al 2000 en el mes de febrero, 2004 en el mes de febrero, 2006 en febrero y 2014 en el mes de enero.

Tabla 1. Variación en la extensión de la laguna durante 1993-2014

Año	Área superficial (m ²)
1993	740053,2
1994	740826,5
1995	708763,6
1996	744296,7
1997	746253,2
1998	684872,8
1999	665370,9
2000	644021,6
2001	715743,0
2002	660675,0
2003	655733,7
2004	636555,5
2005	682301,3
2006	629790,2
2007	679605,1
2008	690215,9
2009	707403,8
2010	669428,2
2011	718799,7
2012	660099,0
2013	670915,0
2014	601993,0

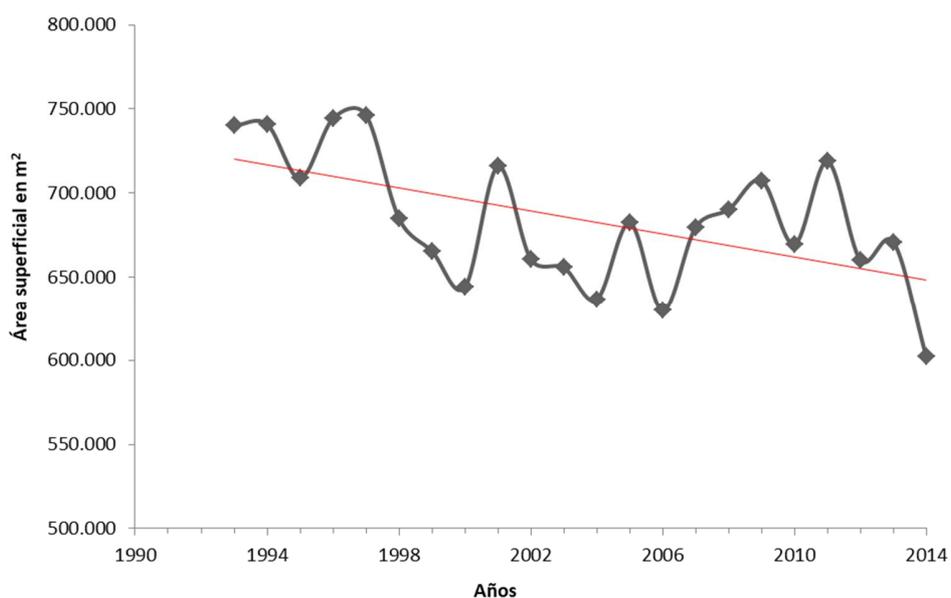


Figura 2. Variación en la extensión de la laguna durante 1993-2014

3.2 Analisis año hidrogeologico 2016-2017

Con el análisis del año hidrológico 2016-2017 se puede ver en la figura 4 una clara recuperación de la laguna, alcanzando áreas aún más grandes que el año 1997, teniendo un incremento de 3.7% desde 1997 con un área de 746.253 m² a 2017 con un área de 774.594 m² y un incremento del 22.3 %

desde 2014 con un área de 601.993 m² a 2017 con un área de 774.594 m².

En la Tabla 2 y la Figura 3, se pueden ver las áreas de la laguna durante el año hidrológico de 2016-2017; además, en la Figura 4 se ve la comparación de las áreas de estos dos años.

Tabla 2. Áreas laguna año hidrologico 2016-2017

Año	Área Laguna (m ²)
Mar 2016	702.908
Dic 2017	774.594

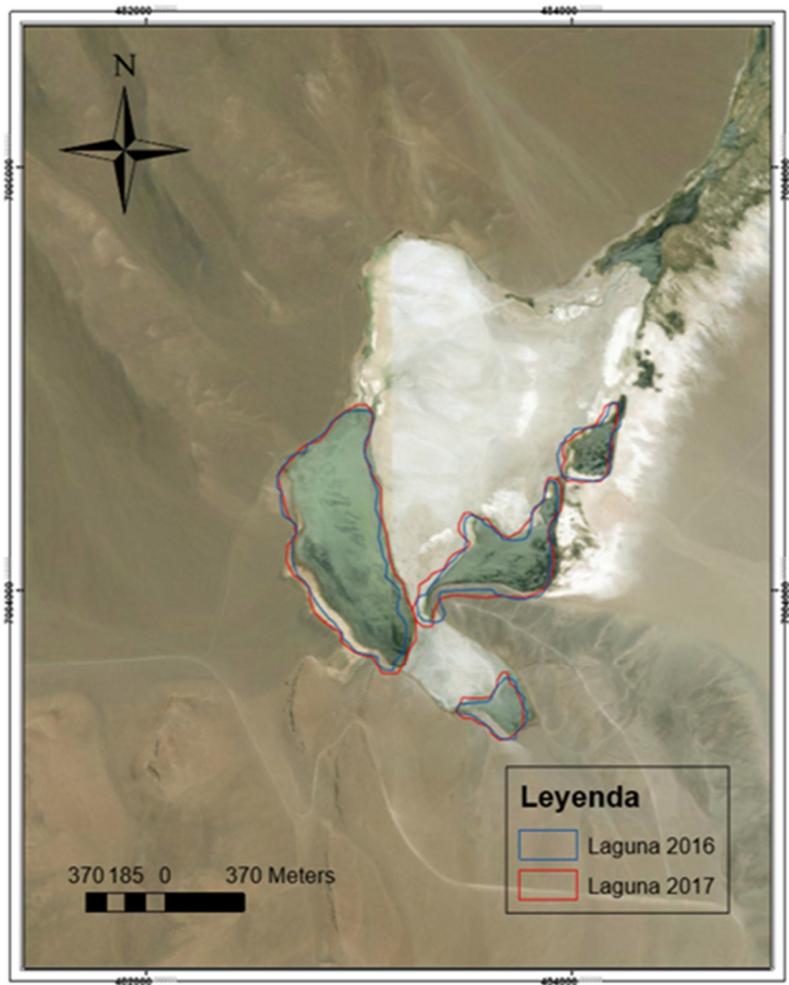


Figura 3. Comparación áreas 2016 y 2017

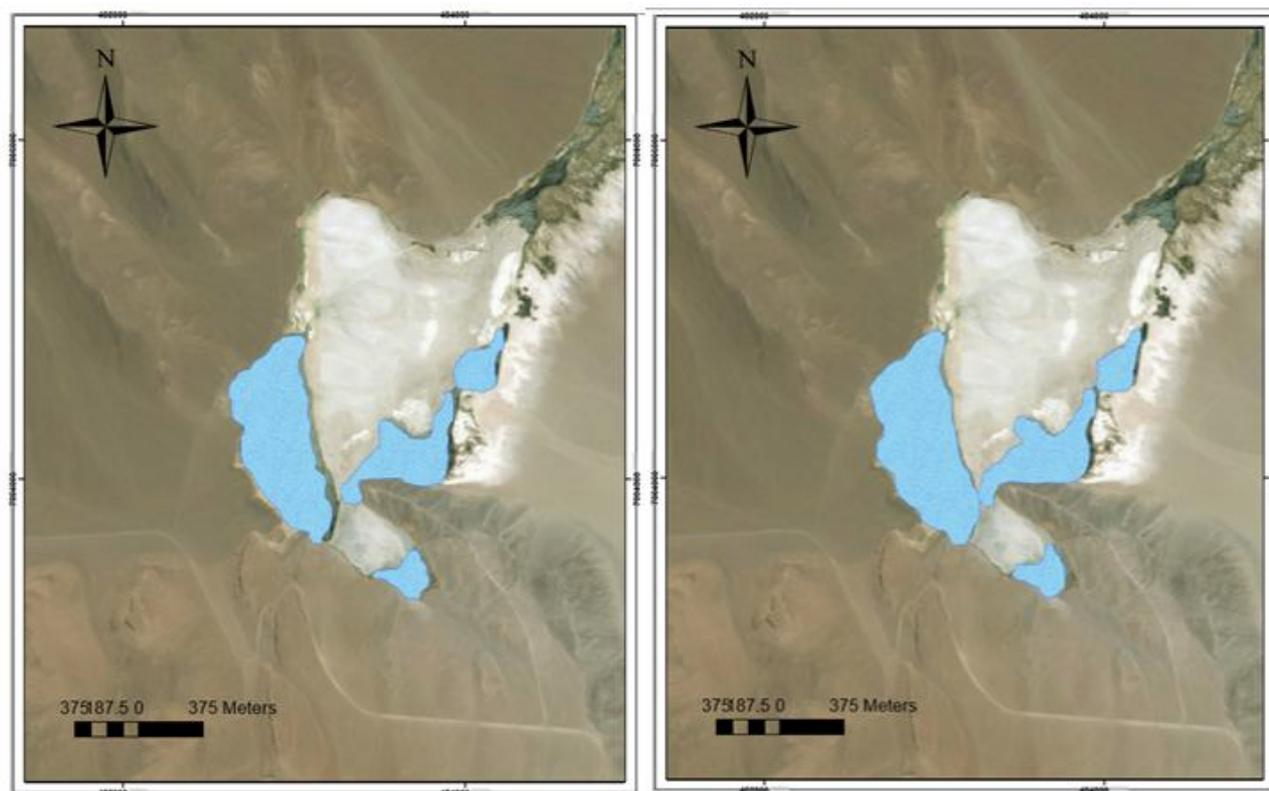


Figura 4. Áreas año hidrológico 2016-2017

4. DISCUSIÓN

La cuenca Salar de Maricunga, donde se encuentra inserta la laguna Santa Rosa, posee gran interés para la minería. Por lo mismo, existe una gran cantidad de derechos de aguas otorgados y en solicitud, donde se desconoce el porcentaje real que está siendo extraído, sin mencionar las malas prácticas de algunas empresas que extraen más de lo permitido o no monitorean el entorno, generando grandes extensiones de terreno con desecación. Es por lo anterior, que es imposible realizar un análisis estadístico de

futuras tendencias, ya que estas extracciones corresponderían a puntos disruptivos, que generarían valores extremistas que alejarían el resultado de la realidad. Por ello, solo se ha podido calcular la estadística básica del humedal, considerando el año hidrológico 2016-2017 y los periodos entre 1993-2014.

En términos estadísticos, el área total de todos los años trabajados (Tabla 3) proyecta lo siguiente: máxima de 774.594 m², mínima de 601.993 m², media de 688.801 m², mediana de 683.587 m² y moda o valor dominante no reflejado.

Tabla 3. Áreas superficiales de la laguna entre 1993-2014 y 2016-2017

Año	Área superficial (m ²)	Año	Área superficial (m ²)
1993	740.053	2004	636.556
1994	740.827	2005	682.301
1995	708.764	2006	629.790
1996	744.297	2007	679.605
1997	746.253	2008	690.216
1998	684.873	2009	707.404
1999	665.371	2010	669.428
2000	644.022	2011	718.800
2001	715.743	2012	660.099
2002	660.675	2013	670.915
2003	655.734	2014	601.993
Año	Área superficial (m ²)	Año	Área superficial (m ²)
2016	702.908	2017	774.594

La moda es considerada como un valor central, debido a que esta indica el valor con mayor frecuencia relativa; pero puede ser que esta este cercana a los extremos de la distribución. En este caso no se puede calcular el valor de la moda debido a que se está ante una variable continua, siendo una muestra discreta, más adelante con ayuda del histograma se podrá calcular la moda de los rangos.

La mediana, resultado de 683.587 m², es el valor que se aproxima a todos los demás y entrega 2 sub-conjuntos de valores, el primer 50% que desde 601.993 a 682.301 m² y el otro que va desde 684.873 a 774.594 m², siendo el 50% superior. La mediana muestra 683.587 m² de superficie de agua como un valor medio respecto a lo que puede acontecer en el área de la laguna, debido a que esta no considera los mínimos y máximos, los que distorsionan la realidad. En cuanto a la media, que corresponde al promedio de todos los años estudiados,

muestra que la laguna en términos generales posee 688.800 m² de superficie de agua. Este pese a que casi siempre resulta necesaria tenerla en cuenta, no presenta significado concreto en geografía (Chadule, 1980).

Un histograma, es otra forma de analizar los valores. Un histograma corresponde a una representación gráfica de una variable en forma de barras en donde se representan los datos agrupados por rangos, en este caso en intervalos de 25.000 m² de superficie de agua, y la superficie de cada una de las barras es proporcional a la frecuencia de los valores presentados (Chadule, 1980).

En la Figura 5, se presenta un histograma para los períodos totales. En este es posible observar un comportamiento bimodal en la serie donde resaltan los rangos de entre 650.000-675.000 y 725.000-750.000 m² con un 86 % y un 71% de la muestra total, respectivamente.

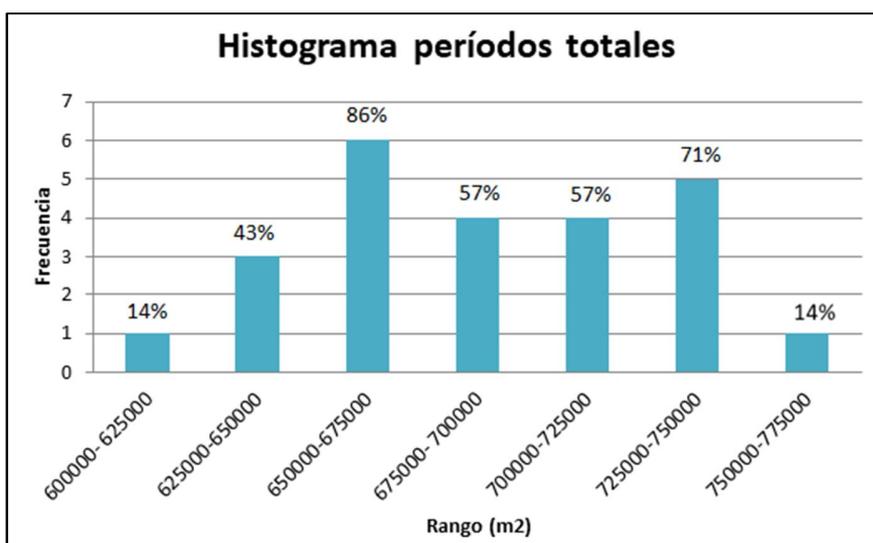


Figura 5. Histograma períodos totales

Con ayuda del histograma, se puede calcular la moda, en este caso existen dos modas en los rangos 600.000- 625.000 m² y 750.000-775.000 m² con 14% de frecuencia y los rangos 675.000-700.000 m² y 700.000-725.000 m² con un 57% de frecuencia. En geografía, la moda tiene significado físico real, corresponde a la expresión de una estructura, que caracteriza a una región, como lo es un clima dominante, el paisaje o las actividades dominantes (Chadule, 1980).

A partir de los resultados arrojados anteriormente, es complejo observar una conducta clara de la laguna Santa Rosa respecto a una disminución o aumento progresivo y constante de su cantidad de agua a través de los años, debido a las múltiples captaciones de agua de mineras tanto en los pozos estudiados (SR-1; SR-2; SP-1; SP-3; SP-4), como en muchas otras captaciones que la rodean y afectan en su recarga, como es el caso de los pozos (RA- 1 y RA- 2) del Proyecto Minero Refugio, ubicados en la cabecera de la subcuenca Quebrada Ciénaga Redonda y dentro del Corredor Biológico Pantanillo-Ciénaga Redonda, donde la entidad recibió una sanción por la disminución del nivel freático en esta cuenca el consecuente desecamiento de, al menos, 70 ha. de humedales ubicados en el Complejo Lacustre laguna del Negro Francisco y laguna Santa Rosa, y el riesgo inminente de expansión del área afectada a aproximadamente 73 ha. adicionales de

humedales, lo que afecta de manera directa a la laguna debido a que estos pozos se encuentran en uno de los tributarios más importantes de esta laguna.

En los análisis de los pozos estudiados (Nota: La información completa de todos los pozos estudiados puede ser solicitado a los autores), se encuentran dos con captaciones de agua (SP-3 y SP-4), de los cuales se tiene y analizó información desde enero de 2007 a junio de 2017, donde en ambos ocurrió una paralización temporal de la faena desde noviembre de 2013 hasta el final de los datos recopilados. Los otros tres pozos (SP-1; SR-1 y SR-2), de monitoreo, donde solo entregan los niveles cada mes y se cuenta con información desde noviembre de 2011 a junio de 2017.

En cuanto a mínimos y máximos respecto a niveles, en la Tabla 4 se observa el detalle, donde se ve de forma clara que los máximos se concentran en meses cálidos principalmente en febrero, donde las temperaturas llegan a 8,9°C y los mínimos en meses más fríos donde las temperaturas mínimas se concentran principalmente en junio y julio con un promedio de -5,2°C. Estas alzas y bajas en los niveles de cada pozo, guardan estrecha relación con las temperaturas, debido a que en los meses fríos el agua o parte de ella se congela y los niveles bajan. A pesar de que las máximas de precipitaciones se concentran en estos

meses (desde mayo a agosto), esto se debe a que no toda precipitación generada durante este periodo es líquida, si no que gran parte es en forma de nieve y espera el periodo

estival para fundirse y poder contribuir a la recarga del acuífero, motivo por el cual en los meses de verano se ve un incremento en los niveles de agua.

Tabla 4. Niveles máximos y mínimos de los pozos estudiados

Pozo	Fecha nivel máximo	Nivel máximo	Fecha nivel mínimo	Nivel mínimo
SP-1	Feb-2013	9,84 m	Ene-2012	8,22 m
SP-3	Feb- 2013	45,8 m	Abr-2008	38,43 m
SP-4	Ene-2009	44,56 m	Jul-2009	9,44 m
SR-1	Nov-2011	9,76 m	May-2015	7,54 m
SR-2	Feb-2012	48,8 m	Dic-2013	46,98 m

Con respecto a los máximos y mínimos del volumen de extracción en el mes, se cuenta con solo dos pozos de extracción, los pozos SP-3 y SP-4, en la Tabla 5 un detalle de esto:

Los resultados de la Tabla 5 no guardan relación con los valores de máximos y mínimos en los niveles de agua.

Tabla 5. Volumen de extracción en el mes, máximos y mínimos

Pozo	Fecha Volumen extraído en el mes (máximo)	Volumen extraído en el mes (máximo)	Fecha Volumen extraído en el mes (mínimo)	Volumen extraído en el mes (máximo)
SP-3	Mar- 2009	155.671 m ³	Oct-2008	1.836 m ³
SP-4	Dic-2010	144.848 m ³	Jun- 2013	4.984 m ³

Por otra parte, es importante volver a mencionar y hacer notar que los derechos de agua que actualmente están dados en la cuenca del Salar de Maricunga es un total mayor a la recarga natural de esta (Tabla 5), donde se genera un balance negativo con un valor de -344 l/s, demostrando un déficit de la cuenca, estos derechos no son explotados al 100% de lo contrario se observaría una decadencia del paisaje catastrófica, que afectaría de manera gravísima a la laguna Santa Rosa y a la cuenca en general, y así consigo a la vegetación y fauna autóctona, donde la gran mayoría de esta se encuentran con vulnerabilidad alta. Además, existen derechos que aún están en trámite como es el caso del proyecto producción de Sales Maricunga, el que se encuentra en proceso de que sea aprobado el Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Este proyecto tendría lugar en el Salar de Maricunga tal como hace referencia su nombre, con una vida útil de 24 años, en la cual extraerá salmueras desde el sector norte de la cuenca de Maricunga, bajo una regla de extracción de 125 l/s el primer año, para luego subir a 275 l/s desde el año

2 al 17. Durante la fase de operación, el proyecto contempla como salida de la planta de procesamiento salmueras remanentes denominadas salmueras de retorno, las que serán reinyectadas al acuífero mediante una batería de 10 pozos a 140 l/s. Este proyecto posee un alto impacto ambiental, ya que el nivel hídrico del acuífero descendería con el paso de los años, debido a que se extraerá más de lo que se reinyectara y esta última alterara el equilibrio químico de las aguas puesto que estarán cargadas de las sales que el proyecto desechara, todo lo anterior en conjunto tendría un grave efecto sobre el entorno del Salar de Maricunga, afectando a laguna Santa Rosa que como ya se explicó pertenece a un sitio protegido y en conservación.

Los análisis mediante imágenes satelitales Landsat para el cálculo de las áreas desde los años 1993 a 2014 y del año hidrológico 2016-2017, arrojaron los valores tabulados en la Tabla 1 y Tabla 2, registrados en el 3, donde se ve claramente los aumentos y los retrocesos, donde la menor área se registra

en los años 2014-2015 con 601.993 m², lo que concuerda con un nivel mínimo del pozo SR-1 en mayo de 2015 con 7,54 m y un máximo en diciembre de 2017 con 774594 m², con lo que se ve una marcada recuperación de la laguna.

En lo que respecta a los factores naturales que afectan la laguna, se realizó un análisis de un balance hídrico ejecutado por Aquaterra (2013), donde se consideraron todas las variables que afectan su nivel, tanto entradas como salidas, donde la variable con mayor énfasis es a la evaporación, puesto que está incluida en la hipótesis como uno de los tres posibles factores del descenso hídrico de la laguna en estudio, con esto se hace notar el exagerado dato con 1882.9 l/s de la cuenca, este valor es elevado debido a que se tomó en cuenta la evaporación del Salar de Maricunga, no siendo válido para el cuerpo de agua que respecta a la laguna, es por ello que se modificó y recalculó, utilizando el valor de evaporación de la laguna del Negro Francisco, debido a que esta posee condiciones y característica similares a la laguna Santa Rosa, obteniendo un balance de 1383,8 l/s a comparación de los 493 l/s.

El comportamiento de la laguna Santa Rosa durante los años considerados en el estudio no manifiesta de manera clara las consecuencias del importante fenómeno del cambio climático a nivel planetario, el cual puede llegar a ser crítico para este tipo de ambientes, como son los humedales. Este está reconocido como uno de los más complejos problemas ambientales que presenta hoy en día la sociedad. Considerando la perspectiva chilena, en lo que respecta a modificaciones de temperatura y otras medidas debido al cambio climático en el país, para el año 2040 se estima que se incremente la temperatura de superficie en poco menos de 2°C en la zona norte (hasta la Región de Coquimbo), y aproximadamente 3°C en la zona central y la región austral, cambiando variables decisivas para los ecosistemas.

En lo que se refiere a la precipitación anual, en el mismo año 2040 se pronostican cambios mayores al 30% en algunos sectores del país. El altiplano, incrementarán las

precipitaciones, pero disminuirían hasta un 25% desde Antofagasta a Puerto Montt, y aumentarían nuevamente desde Chiloé al sur (Searle et al., 2008). Como resultado, tendría una acentuación de la aridez en el norte y centro del país.

Como ya se mencionó, la laguna Santa Rosa se localiza en una zona semiárida. Los humedales situados en este tipo de sectores reciben un valor único debido a su exclusiva contribución a la multiplicidad del paisaje, alta productividad y producción de microclimas de alto contraste con la aridez de alrededor. Asimismo, en las regiones semiáridas se encuentra la mayor cantidad de tipos de humedales (Figueroa et al., 2009). Es substancial recalcar que los humedales que se hallan en sectores semiáridos se ven expuestos a condiciones volubles a través del tiempo, y con mayor razón si se encuentran en las proximidades de sectores de interés minero, como es el caso de la laguna Santa Rosa.

A pesar de su importancia, los humedales son por hoy los ambientes más amenazados por la intervención antrópica, que rellena, drena, seca, devasta su vegetación y contamina sus aguas y sedimentos (Ramírez et al., 2002). Esto se refleja en las cifras otorgadas por la Convención RAMSAR (2006), demostrando que en el último siglo más de la mitad de la extensión de humedales en todo el mundo ha muerto, permaneciendo aproximadamente de 600 a 900 millones de hectáreas, donde solo 60 o 70 millones (menos del 10%) están protegidas.

Para terminar, la última variable expuesta en la hipótesis sobre el descenso de la laguna Santa Rosa, corresponde a una posible falla geológica que podría estar drenando parte del agua del humedal, lo que se descarta debido a que en los análisis geofísicos realizados por Aquaterra (2013) no queda en manifiesto, además, la laguna no se hubiese recuperado en estos últimos años, si no que su descenso hubiese sido continuo hasta su completa extinción.

5. CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado en la presente investigación, queda en evidencia que el humedal de la laguna Santa Rosa no ha experimentado una disminución progresiva en su cantidad de agua en los años analizados, sino que demuestra un comportamiento variable en cuanto a su superficie y nivel de agua con aumentos y descensos, donde no se puede observar un patrón claro, tanto en la pérdida como en la ganancia de agua. Lo anterior debido a la gran cantidad de mineras que poseen derechos de agua sobre la cuenca y hacen que los valores de altas y bajas del agua se comporten como puntos disruptivos, según una alta o baja extracción del agua. En cuanto a los meses de invierno, los niveles y áreas se ven disminuidas por el congelamiento del acuífero y agua superficial, debido a las bajas temperaturas de la cordillera durante esta época, no así en los meses de verano, el agua se funde y del mismo modo las precipitaciones solidas dejadas durante el invierno y contribuyen en la recarga positiva del acuífero.

Por otro lado la intervención antrópica, tanto dentro de la laguna como en las zonas colindantes, se comprueba que el grado de intervención es muy significativo para el funcionamiento de la laguna, debido a que limita en gran parte la cantidad de agua disponible en su interior, así también la dinámica y distribución de ésta. En cuanto a la cantidad de agua disponible al interior de la laguna, se tiene que las entradas son de origen natural y las salidas una mezcla entre naturales, como también antrópicas (captaciones de agua). La dinámica y distribución de sus aguas, se puede decir que es un sistema discontinuo que se encuentra acotado por pretilos de suelo salino, los que dan origen a sub lagunas, definiendo el comportamiento de la laguna en conjunto.

Con respecto a la conservación de la biodiversidad al interior del área de estudio, las actividades más peligrosas corresponden a las empresas mineras del sector como Kinross La Coipa, Kinross El Refugio y en futuro si se aprueba el EIA del proyecto de producción de Sales Maricunga con un gran impacto negativo en el sector.

El análisis del año hidrológico 2016-2017, arroja como resultado una recuperación de la laguna en cuanto a su superficie de agua con respecto a los años anteriores, donde el estudio de estos arroja una variación a través de ellos, con una mínima en el año 2014 con un área de solo 601.993 m². Además, se observa un evidente aumento de las áreas y niveles de agua en los meses de verano, principalmente de febrero, debido a que la laguna en esta época del año se encuentra descongelada y recibe recargas de las precipitaciones del llamado Invierno Boliviano y de los descongelamientos de las nieves depositadas durante el invierno.

En resumen, el presente trabajo de investigación deja en manifiesto, en parte, del comportamiento estacional de la laguna, debido a que esta durante los meses de invierno se encuentra congelada. Esto último, es de real importancia para conocer la dinámica de la laguna Santa Rosa.

De cierta manera, los resultados obtenidos muestran que la laguna Santa Rosa ha experimentado un aumento, por ende una recuperación en cuanto a su superficie total de agua desde 2016 a la fecha. Sin embargo, este estado podría cambiar de forma brusca y drástica debido a la importancia de la intervención antrópica en el sector de estudio.

Aunque ciertamente estos resultados no muestran de forma clara una relación entre los descensos y los pozos estudiados, el análisis de los demás pozos ubicados en los alrededores hubiese permitido entregar una fuerte correlación, como es el caso ya mencionado del estudio realizado por la DGA sobre Kinross el Refugio, los cuales resultaron culpables y sancionados por la desecación de varias hectáreas de terreno, donde está incluido el deterioro de la laguna.

Finalmente, este estudio no sólo aporta antecedentes sobre el humedal más importante de la Región de Atacama y el único en ella como sitio RAMSAR, sino que también discute sobre cómo estos lugares, en la actualidad, se hallan sometidos a una gran presión, tanto natural como antrópica. En el caso particular del humedal de la

laguna Santa Rosa, esto viene dado por el carácter progresivo de la aridez en la región y la gran influencia que ejercen las actividades mineras.

6. REFERENCIAS

- [1] AquaTerra, 2013. Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto - Andinas de la Región de Atacama. Informe Final. AquaTerra Ingenieros Ltda., S.I.T. N° 329, Santiago, 640 p.
- [2] CEPAL, 2010. La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Síntesis 2010, Naciones Unidas, Santiago de Chile, 113 p.
- [3] EDRA, 1998. Estudio hidrológico del Salar de Maricunga. Documento de trabajo. Santiago, Chile, 4p.
- [4] Figueroa, R., Suarez, M., Andreu, A., Ruiz, V. y Vidal-Abarca, M. 2009. Caracterización Ecológica de Humedales de la Zona Semiárida en Chile Central. *Cayana* 73(1), 76-94.
- [5] Gajardo, R. 1993, La vegetación natural de Chile, clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 165 p.
- [6] Chadule, G., 1980. Iniciación a los Métodos Estadísticos en Geografía. Editorial Ariel, Barcelona. Colección ELCANO la Geografía y sus Problemas, 296 p.
- [7] Juliá, C., Montecinos, S. y Maldonado, A., 2008. Capítulo 3: Características Climáticas de la Región de Atacama, en: F.A. Squeo, G. Arancio y J. R. Gutiérrez (Eds.), Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama, Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile, 25-42P.
- [8] Ramírez, C., San Martín, C., Rubilar, H. 2002. Una Propuesta para la Clasificación de los Humedales Chilenos. *Revista Geográfica de Valparaíso*. N°32-33 (2001-2002), 265-273.
- [9] Ramsar, 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6ª ed., Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- [10] Ramsar, 2012. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Ficha Informativa. Chile, 17 p.
- [11] Searle, J., Rovira J. 2008. Cambio Climático y Efectos en la Biodiversidad: El Caso Chileno. *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos*. Capítulo IV: El Hombre y la Biodiversidad, 4 p.
- [12] Uribe-Botero, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 86 p.