

Servicios ecosistémicos asociados al salar de Llamara, Pozo Almonte, Tarapacá, Chile

Ecosystem services associated with the Llamara salt flat, Pozo Almonte, Tarapacá, Chile

Omar Vicencio-Campos^{1, 2, 3*}, Luis Chirino-Gálvez^{2, 3}, Héctor Silva-Bobadilla³

RESUMEN

El salar de Llamara es un sistema salino ubicado en la región de Tarapacá, desierto de Atacama, en el cual existe una biodiversidad dominada por diatomeas, cianobacterias, bacteroides y proteobacterias, además de una gran gama de especies vertebradas como zorros, aves y roedores. Considerando los efectos asociados al cambio climático y la alta susceptibilidad de este ecosistema, se evaluó cuáles son los servicios ecosistémicos prestados a la comunidad en las categorías de Provisión, Regulación, Soporte y Cultural, y cómo estos mejoran el ámbito social, económico y ambiental en la comuna de Pozo Almonte.

Palabras clave: salar de Llamara, puquios, servicios ecosistémicos, Pampa del Tamarugal.

ABSTRACT

Llamara Salt flat is a saline system located in the region of Tarapacá, Atacama Desert, where biodiversity is dominated by Diatoms, Cyanobacteria, Bacteroides, and Proteobacteria, as well as many vertebrate species, such as foxes, birds, and rodents. Considering the effects associated with climate change and the high susceptibility of this ecosystem, the ecosystem services provided to the community in the following categories were evaluated: Provision, Regulation, Support, and Cultural to improve the social, economic, and environmental environment in the commune of Pozo Almonte.

Keywords: Llamara Salt flat, puquios, ecosystem services, Pampa del Tamarugal.

Introducción

El salar de Llamara corresponde a un sistema salino que se ubica en la comuna de Pozo Almonte (21°16'6" latitud sur y los 69°37'3" longitud oeste), región de Tarapacá (Figura 1). Este sector es parte del desierto de Atacama, un área donde se presenta el anticiclón del Pacífico en forma permanente, lo cual ocasiona que se generen escasas precipitaciones y una fuerte oscilación térmica (Conaf, 1997). El salar de Llamara se caracteriza por la presencia de dos ecosistemas sumamente valiosos: uno de ellos corresponde a un bosque natural de tamarugos, mientras que el otro son pequeños cuerpos de agua salinos permanentes en un área de 5 km² donde se destacan 4 cuerpos lagunares mayores llamados "puquios" y poco más de 400 charcos

heterogéneos menores que acusan alguna presencia de tapetes microbianos (R.P Reid *et al.*, 2021; Hepp *et al.*, 2014). El salar es considerado una zona transicional que no tiene una delimitación precisada (Niemeyer y Cereceda, 1982, p. 74), ubicado a 10 km al norte de Quillagua y a cerca de 850 m de altitud sobre el nivel del mar. En los sistemas lagunares se pueden observar domos de yeso habitados por EME endolíticos, conocidos común y erróneamente como estromatolitos. También se encuentran algunas pozas, con gran desarrollo de tapetes microbianos de varios centímetros de espesor (Farías *et al.*, 2019). Los estudios de biodiversidad microbiana han demostrado que los domos evaporíticos presentan una estratificación de las comunidades, caracterizables por las típicas bandas verde superior y púrpura inferior. Dicha

¹ Museo Regional de Atacama. Copiapó, Chile.

² Museo Seminario Valparaíso (MSV), Seminario San Rafael. Valparaíso, Chile.

³ Escuela de Ingeniería y Negocios, Universidad Viña del Mar. Viña del Mar, Chile.

* Autor por correspondencia: omar.vicencio@gmail.com

distribución se mantendría durante todo el año, con una biodiversidad dominada por diatomeas, cianobacterias, bacteroides y proteobacterias (Rasuk *et al.*, 2020).

La historia geológica del salar de Llamara asociada a la totalidad de la cuenca se inicia en el Neógeno (Chong, 1984), mientras que durante el Pleistoceno Superior esta área correspondía a un lago (entre los 17,6 y los 14,2 ka, y entre los 13,08 y los 11,4 ka. Gayo *et al.*, 2012; Quezada *et al.*, 2018), el cual contaba con una fauna de gastrópodos *Heleobia* sp., *Planorbis* sp. y *Biomphalaria* sp.; bivalvos: *Pisidium* sp.; y carófitas: Characeae indet. (Rubilar, 2017). Sin embargo, en la actualidad solo se registran cuencas menores (espejos de agua), emplazadas sobre depósitos salinos más antiguos que incluyen una evolución lacustre, cuyos aportes hídricos al salar son indirectos y proceden de espesas nieblas costeras llamadas ‘camanchacas’ (que pueden penetrar hasta 100 km tierra adentro desde la costa pacífica), y también, pero sólo en determinados años, de las lluvias torrenciales asociadas a lluvias estivales “también llamado invierno boliviano” (López *et al.*, 1999). Estos fenómenos rara vez llegan a afectar directamente al salar, pero participan de un modo indirecto al aportar agua en las zonas marginales de la depresión central (López *et al.*, 1999). En la actualidad el salar de Llamara forma parte de la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal y posee un gran interés ecológico y científico, ya que es

posible observar afloramientos superficiales de agua salina que oscilan en ciclos anuales regulados por aportes de un mínimo asociado con el llamado invierno altiplánico, hasta máximos de 34% en julio (Demergasso *et al.*, 2003). Esto permite el establecimiento de una amplia variedad de organismos asociados a ecosistemas limícolas similares a los estromatolitos y diatomeas como *Artemia franciscana* (Zúñiga *et al.*, 1999), además de una gran gama de especies vertebradas como zorros, aves y roedores (Demergasso *et al.*, 2003; Carevic *et al.*, 2012). Considerando estos antecedentes se hace necesario conocer cuáles son los principales servicios ecosistémicos prestados por ese ecosistema.

El área del salar con estas dos subáreas descritas se encuentra delimitada por un polígono correspondiente a los límites de la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal establecida en 1987, y que cubre una superficie de 134.000 ha fraccionada por CONAF en 4 zonas, dos de ellas arqueológicas y dos naturales (tamarugal y puquios). El límite oriental del área asociada a los puquios de Llamara coincide parcialmente con un tramo de la ruta 5 Norte, 126 km al sur de Pozo Almonte (Figura 1).

Producto de la degradación ambiental que existe actualmente a nivel nacional y mundial, es sumamente necesario comprender el funcionamiento de los diversos ecosistemas y sus interacciones (MMA, 2014). Por esta razón, la OECD por medio del programa Millenium Ecosystem Assessment

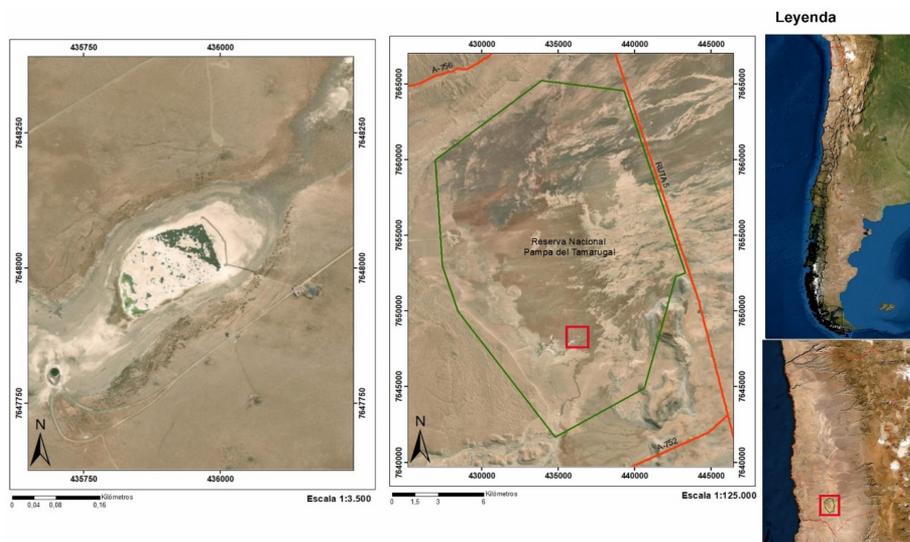


Figura 1. Mapa de área Reserva Nacional Pampa del Tamarugal y espejo de agua nororiente.

Fuente: Elaboración propia.

(MEA, 2005; 2012) ha definido el concepto de servicios ecosistémicos (SS EE). De acuerdo con esta breve definición, los servicios ecosistémicos son aquellos beneficios que obtiene la gente de los diversos ecosistemas (MEA, 2012). Estos beneficios pueden ser directos, los cuales dependen directamente de las funciones del ecosistema, o indirectos, que no dependen directamente de este (Díaz *et al.*, 2007).

Según la clasificación utilizada por MEA (2005) y Carpenter *et al.* (2009), es posible distinguir cuatro grupos de servicios ecosistémicos (Tabla 1). Estos servicios son Provisión (nutrición o agua), Regulación (control de inundaciones), Culturales (recreación) y Soporte (ciclo de nutrientes).

Materiales y métodos

Para la realización del estudio se tomaron fotografías con cámaras Canon EOS Rebel XS en distintos puntos de los espejos de agua en el sector del salar de Llamara. Estos espejos de agua se ubican en las coordenadas 21°16'6" sur y los 69°37'3" oeste, aproximadamente a 9 km al oeste de la Ruta 5. (Figura 1). Los datos obtenidos mediante el monitoreo visual y registro fotográfico fueron comparados con lo descrito por MEA (2005) y MMA (2014), y se logró establecer cuáles son los servicios ecosistémicos brindados por los espejos de agua, así como la importancia de mantener este ecosistema. Además, se pudo identificar la presencia de flora, la cual se comparó con registros descritos en la literatura. Para la medición de los espejos de agua se utilizaron imágenes satelitales

provenientes de Google Earth. Por último, para el desarrollo de la cartografía se usó el software ArcGis, 10.4.1 en la elaboración del mapa general.

Resultados

Entre los servicios ecosistémicos que ofrecen los espejos de agua en el salar de Llamara destacan los de Provisión, abastecimiento de agua, "Reserva de agua", Regulación, Entorno biofísico "Purificación del aire", Flujos de agua "Regulación de erosión, infiltración de agua", Regulación del ambiente "Secuestro de carbono", Regulación del entorno biótico, "Descomposición orgánica, Polinización", Intelectual y vivencial "Patrimonio natural, Recreación y turismo, Belleza escénica" y Soporte "Formación de suelo, Fotosíntesis y Ciclo del agua". Estos servicios pueden encontrarse entre los propuestos por MEA (2005) y MMA (2014).

En cuanto a los servicios de Provisión (Reserva de agua), Regulación (regulación de erosión, infiltración de agua, Secuestro de carbono, Descomposición orgánica, Polinización) y Soporte (Formación de suelo, Fotosíntesis y Ciclo del agua) (Tabla 2), se pudo evidenciar la importancia de los cuerpos de agua (puquios) presentes en el área del salar. Si bien estos espejos de agua son hipersalinos (Figura 2), pueden ser considerados un reservorio hídrico para la región, donde la precipitación, según sus registros, varía entre 0 mm y un máximo de 2,6 a 3 mm anuales (Conaf, 1997). Sin embargo, la fragilidad de esos espejos queda en evidencia al evaluar imágenes satelitales, donde es posible observar una disminución de los puquios en los

Tabla 1. Clasificación de servicios ecosistémicos.

Servicios Ecosistémicos	
Provisión	Nutrición Abastecimiento de agua Materiales Energía
Regulación	Regulación del entorno biofísico Regulación de flujos de agua Regulación del ambiente fisicoquímica Regulación del entorno biótico
Cultural	Simbólico Intelectual y vivencial
Soporte	Formación de suelo, Fotosíntesis y Ciclo del agua

Fuente: Modificado de MEA 2005 y MMA 2014.

Tabla 2. Servicios ecosistémicos entregados por puquios de Llamara.

Servicios ecosistémicos proporcionados por espejos de agua, reserva Pampa del Tamarugal.		
Provisión	Abastecimiento de agua	Reserva de agua
Regulación	Regulación del entorno biofísico	Purificación del aire
	Regulación de flujos de agua	Regulación de erosión, infiltración de agua
	Regulación del ambiente fisicoquímica	Secuestro de carbono
	Regulación del entorno biótico	Descomposición orgánica, Polinización
Cultural	Intelectual y vivencial	Patrimonio natural, Recreación y turismo, Belleza escénica
Soporte	Formación de suelo, Fotosíntesis y Ciclo del agua	

Fuente: Modificado de MEA 2005 y MMA 2014.



Figura 2. Laguna hipersalina con evidencia de precipitaciones químicas salinas.

Fuente: Elaboración propia.

últimos 15 años (Tabla 3), mientras que al comparar con la cartografía del IGM (1965), la pérdida es aún mayor, al reconocer un área inexistente en la actualidad al Este de los puquios (Figura 3).

Respecto a los servicios de Regulación, existen pequeños parches vegetales en el sector de los cuerpos de agua, los cuales corresponden a la especie grama salada (*Distichlis spicata*) (Figura 4). Por otra parte, al norte de los espejos de agua se ubica el bosque de tamarugos (*Prosopis tamarugo*) (Figura 5). Este tipo de vegetación ayuda a regular la erosión del suelo o sustrato, y de esta manera se incrementa su protección, frenando o disminuyendo la escorrentía y facilitando la infiltración. Además aumenta la resistencia mecánica del suelo y se

genera estabilidad, rugosidad y porosidad gracias a la presencia de materia orgánica, lo que provoca un incremento en la capacidad de infiltración

Tabla 3. Variación de área asociada a los puquios (espejos de agua) en los últimos 15 años.

Área asociada a los espejos de agua durante el año 2007 y el año 2022		
2007	1,682 ha	100%
2022	1,176 ha	70%
Disminución en 15 años	0,506 ha	30%

Fuente: Elaboración propia.

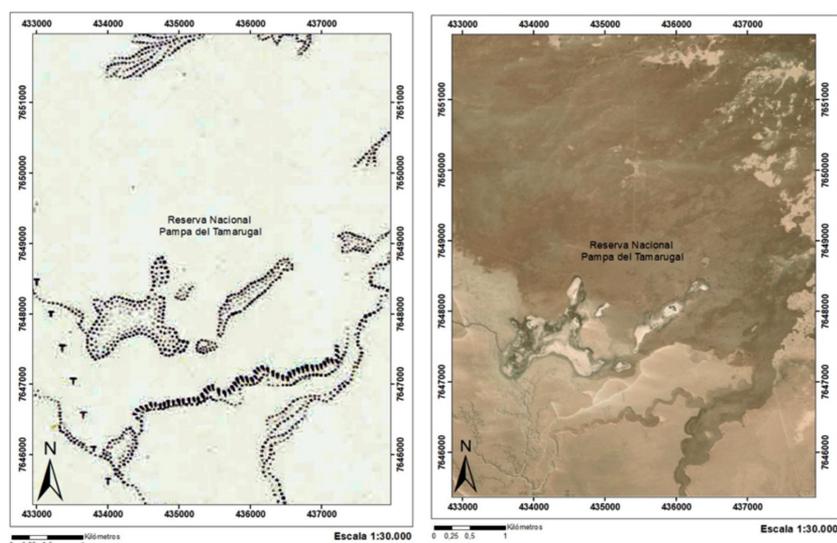


Figura 3. Variación de los puquios desde 1965 a 2022. En el borde central derecho se observa un área inexistente en la actualidad. Fuente: Modificado de IGM, 1965 y Arcmap 2022.



Figura 4. Laguna con precipitación salina y vegetación del tipo grama salada (*Distichlis spicata*). Fuente: Elaboración propia.

(Laporte y Porras, 2002; Bochet y García, 2004; Alvarado, 2016) y la captura de carbono mediante el proceso de fotosíntesis. Es oportuno mencionar que el carbono es un gas asociado directamente al cambio climático.

Otro servicio ecosistémico de gran relevancia que ofrece la reserva del salar de Llamara es el Cultural (Patrimonio natural, Recreación y

turismo, Belleza escénica) (Tabla 2). Esta es un área donde el cuerpo de agua y la vegetación se unen para crear un entorno de extraordinaria belleza intrínseca (Figura 6), la cual se podría definir como un valor paisajístico en comparación con las zonas circundantes del desierto de Atacama (Figura 7), por esta razón, el salar de Llamara es reconocido como un lugar de mucha importancia



Figura 5. Bosque de tamarugos (*Prosopis tamarugo*).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. a) Espejo de agua en sector nororiental de la cuenca. b) Evidencia de precipitaciones salinas en espejo de agua.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Desierto de Atacama con tamarugos (*Prosopis tamarugo*), en el horizonte..
Fuente: Elaboración propia.

ecológica, y regulación, que es sumamente sensible a los efectos del cambio climático.

Discusión

Esta investigación busca determinar cuáles son los servicios ecosistémicos y su importancia asociada al salar de Llamara, Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, queda claro que existen diversos servicios ecosistémicos asociados, tanto de Provisión como de Regulación y Soporte. Sin embargo, según los antecedentes geológicos, en el sector donde se encuentran los espejos de agua existió un lago de considerables proporciones durante el Pleistoceno Superior, el cual poseía gran cantidad de flora y fauna asociada (Gayo *et al.*, 2012; Rubilar, 2017; Quezada *et al.*, 2018).

Una puesta en valor reciente para dar a conocer a los visitantes los valores ecosistémicos que presenta el salar se evidencia con la instalación de un Centro de Educación Ambiental (CONAF, 2022). El incremento de visitantes asociado con una mayor accesibilidad a servicios e infraestructura demandará que se establezcan senderos con infografía *ad hoc* y se defina a partir de estudios la capacidad de carga de acceso a estos puquios. Así se podrá validar el valor de Patrimonio natural, Belleza escénica, Recreación y turismo que presenta el salar de Llamara como sistema ecosistémico Intelectual y vivencial.

Por otra parte, producto de la fragilidad de este ecosistema, se debe tener en consideración la realización de un monitoreo constante a los cuerpos de agua, principalmente por los efectos del

cambio climático y factores como la alta radiación solar y escasez de precipitaciones (CNE, 2009), evaluando así cuál es la mejor manera de mantener los servicios que ofrece esta reserva.

Conclusión

El análisis de la información compilada y las imágenes obtenidas del sector permiten concluir que los servicios ecosistémicos entregados por el salar de Llamara corresponden a Provisión, generando un abastecimiento de agua; Regulación en el entorno biofísico, biótico, fisicoquímico y de flujos; Soporte para formar suelos, participar en el ciclo del agua y la fotosíntesis por parte de la vegetación asociada. En cuanto al servicio Cultural, se reconoce por ser un espacio recreacional y representar el patrimonio natural, generando una belleza escénica en medio del desierto de Atacama.

Para finalizar, se observó mediante imágenes satelitales y mapas del IGM que los puquios se han visto reducidos notablemente en los últimos 15 años, pasando de 1,682 ha a 1,176 ha, lo que representa una pérdida del 30,1% de los espejos de agua. Teniendo en cuenta la fragilidad de este ecosistema, sumado a los efectos del cambio climático, se debería seguir estudiando y monitoreando la reserva Salar de Llamara. El objetivo es evitar un efecto negativo sobre este ecosistema, el cual entrega una gran variedad de servicios y ayuda a mejorar el ámbito social, económico y ambiental no sólo de Pozo Almonte, sino también de la región y el país.

Literatura citada

- Alvarado, V.
2016. La vegetación como factor de control de la erosión. *Repertorio Científico*, 19: 13-17.
- Bochet, E.; García, P.
2004. Factors controlling vegetation establishment and water erosion on Motorway Slopes in Valencia, Spain. *Restoration Ecology*, 12(2): 166-174.
- Carpenter, S.R.; Mooney, H.A.; Agard, D.; Capistrano, R.S.; DeFries, S. Díaz.
2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009; 106(5): 1305-1312.
- Carevic, F.; Carevic, A.; Delatorre, J.
2012. Historia natural del género *Prosopis* en la Región de Tarapacá. *Idesia (Arica)*, 30(3): 113-117.
- Chong, G.
1984. Die Salare in Nordchiles-Geologie, Struktur und Geochemie. *Geotektonische Forschungen*, 67: 146.
- Comisión Nacional de Energía.
2009. Modelación del Recurso Solar y Eólico en el Norte de Chile. CNE. Santiago, Chile. 21 p.
- CONAF.
1997. Plan de Manejo Reserva Nacional Pampa del Tamarugal. Iquique, Chile. 110 p.
- CONAF.
2022. Inauguran Centro de Educación Ambiental en salar de Llamara. Disponible en: <https://www.parquesnacionales.cl/inauguran-centro-de-educacion-ambiental-en-salar-de-llamara/>
- Demergasso, C.; Chong, G.; Galleguillos, P.; Escudero, L.; Esteve, I.; Martínez-Alonso, M.
2003. Tapetes microbianos del Salar de Llamara, Norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76: 485-499.
- Díaz, S.; Lavorel, F., S.; Chapin, P.A. Tecco, PA; Gurvich, D.; Grigulist, K.

2007. Functional Diversity - at the Crossroads between Ecosystem Functioning and Environmental Filters. In: J.Canadell, D. Pataki,; L. Pitelka). *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Springer-Verlag, Nueva York, US. pp. 81-91.
- Farías, M.; Hayashida, G.; Díaz Palma, P.
2018. Ecosistemas microbianos extremófilos en el Altiplano (Ministerio del Medio Ambiente, Ed.) En: Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos. Tercera Edición. tomo II. p. 87-92.
- Gayo, E.M.; Latorre, C.; Jordan, T.E.; Nester, P.L.; Estay, S.A; Ojeda, K.F.; Santoro, C.M.
2012. Late Quaternary hydrological and ecological changes in the hyperarid core of the northern Atacama Desert (21°S). *Earth-Science Reviews*, 113: 120-140
- Hepp, J.; Machuca, J.; Zanetta, N.; Zumaeta, C.
2014. Horacio y los tesoros del Tamarugal: un viaje de descubrimiento y exploración en el Desierto de Atacama. Corporación Nacional Forestal. .Chile. 55 p.
- Instituto Geográfico Militar.
1965. Salar de Llamara, 2100-6930. Escala 1:100.000.IGM. Santiago, Chile.
- LaPorte, G.; Porras, G.
2002. Uso de la vegetación para la estabilización de taludes. En: VIII Seminario Nacional de Geotecnia, III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas. Costa Rica. 18 p.
- López, P.L.; Auqué, L.F.; Garcés, I.; Chong, G.
1999. Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile. *Revista geológica de Chile*, 26(1): 89-108.
- MMA.
2014. Propuesta sobre Marco Conceptual, Definición y Clasificación se Servicios Ecosistémicos para el Ministerio del Medio Ambiente. División de Información y Economía Ambiental.
- MEA.
2005. Ecosystems and human well-being. Millennium Ecosystem Assessment.
- MEA- OECD.
2012. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. Millennium Ecosystem Assessment. The Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Niemeyer, H.; Cereceda, P.
1982. Hidrografía. Tomo VIII. Serie Geografía de Chile. IGM, Santiago. 320 p.
- Quezada, A.; Varas, L.; Vásquez, P.; Sepúlveda, F.; Cifuentes, J.L.
2018. Evidencias de un paleolago durante el Pleistoceno Tardío en el salar de Llamara, Desierto de Atacama, Región de Tarapacá, Chile. 15° Congreso Geológico Chileno. Geociencias hacia la comunidad. Universidad de Concepción. Chile.
- Rasuk, M.C.; Contreras Leiva, M.; Kurth, D.; Farías, M.E.
2020. Complete Characterization of Stratified Ecosystems of the Salar de Llamara (Atacama Desert). In: Farías, M. (eds) *Microbial Ecosystems in Central Andes Extreme Environments*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-36192-1_11
- Reid, R.P.; Oehlert, A.; Suosaari, E.; Demergasso, C.; Chong, G.; Escudero, L.; Piggot, A.; Lascu, I.; Palma, A.
2021. A Multidisciplinary Evaluation of Spatial Heterogeneity in the Puquios of the Salar de Llamara, Atacama Desert, Northern Chile. DOI: 10.21203/rs.3.rs-153999/v1
- Rubilar, A.
2017. Estudio de muestras paleontológicas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, obtenidas durante el desarrollo de las cartas Guanillos del Norte - Salar de Llamara (escala 1: 100.000), sur-sureste de Iquique. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico. 10 p.
- Zúñiga, O.; Wilson, R.; Amat, F; Hontoria, F.
1999. Distribution and characterization of Chilean populations of the brine shrimp *Artemia* (Crustacea, Branchiopoda, Anostraca). *Int. J. Salt Lake Res.*, 8(1): 23-40.