



Análisis hidrológico del sistema lagunar endorreico en la ciudad de Río Grande (provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur - Argentina) para proponer medidas de mitigación a la ocurrencia de tormentas de polvo

Hydrological analysis of the endorheic lagoon system in the city of Rio Grande (Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur province - Argentina) to propose mitigation strategies for the occurrence of dust storms

Perdomo, Santiago ^{1,2} ✉ - Ruiz, María Soledad ¹ - Noir, Gerardo ³ - Kruse, Eduardo Emilio ²

Recibido: 26 de enero de 2021 • Aceptado: 30 de octubre de 2021

Resumen

En las últimas décadas la ciudad de Río Grande se ha visto afectada por la movilización de sedimentos provenientes del lecho de lagunas ubicadas hacia el oeste y norte de la zona urbana. La presencia de polvo en suspensión produce afecciones oculares y respiratorias a la población, y limita el tránsito terrestre y aéreo de la ciudad, además de la degradación de los recursos naturales. El objetivo de este trabajo es formular un modelo conceptual del sistema lagunar a partir de las características climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas para entender las condiciones en las que se produce la voladura de

sedimentos y proponer medidas de mitigación. Para cumplir con este objetivo se realizó una revisión de antecedentes de estudios geológicos y geomorfológicos, una recopilación y análisis de información hidrometeorológica con énfasis en la distribución temporal y frecuencia de precipitaciones y viento (magnitud y dirección). Las tareas de campo incluyeron el reconocimiento de las principales unidades sedimentarias, el relevamiento y muestreo de una red de monitoreo integrada por los cuerpos de agua superficial y pozos existentes. Complementariamente se realizó una nivelación topográfica y

1. Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires (UNNOBA). Monteagudo 2772, Pergamino, 2700, Argentina. Tel: +54 2477 409500

✉ perdomo.geofisica@gmail.com

2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Centro de investigación y transferencia del noroeste de la provincia de Buenos Aires (CITNOBA)

3. Ministerio de Producción y Ambiente - Secretaría de Ambiente. Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur. San Martín 1401, Ushuaia.

una prospección geoelectrica para contribuir al análisis geomorfológico e hidrogeológico de la zona de estudio. Los principales resultados de este trabajo permitieron definir el comportamiento efluente de los cuerpos de agua superficial respecto al acuífero freático y concluir que el sistema es regulado fundamentalmente por la componente agua subterránea con contribución de los parámetros climáticos. En este sentido, se proponen medidas de mitigación relacionadas con el manejo de los recursos hídricos superficial y subterráneo, el control de la actividad ganadera y el uso del suelo para contrarrestar en forma paulatina la presencia de sedimentos en suspensión.

Palabras clave: Relación agua superficial-subterránea, deflación, prospección geoelectrica, tormentas de polvo, Tierra del Fuego.

Abstract

In the last decades, the city of Río Grande has been affected by the mobilization of sediments from dry lagoons near the urban area. The presence of airborne dust produces eye and respiratory diseases in the population, and limits land and air traffic in the city, in addition to the degradation of natural resources. The aim of this work is to formulate a conceptual model of the lagoon system to understand the conditions in which sediment mobilization occurs and to propose mitigation actions. Climatic, hydrological and hydrogeological characteristics are then analyzed. To achieve this goal, a background review of geological and geomorphological studies was carried out, a compilation and analysis of hydrometeorological information with emphasis on the temporal distribution and frequency of rainfall and wind (magnitude and direction). Field work included the recognition of the main sedimentary units, and sampling of surface water bodies and existing wells. In addition, a topographic leveling and a geoelectric prospecting were carried out to contribute to the geomorphological and hydrogeological analysis of the study area. The main results of this work defined the effluent behavior of surface water bodies in relation to the phreatic aquifer. The system is mainly regulated by groundwater with the contribution of climatic parameters. Finally, mitigation measures are proposed related to the management of surface and underground water resources, the control of livestock activity and the use of the soil to gradually reduce the presence of suspended sediments.

Keywords: Relationship surface water - groundwater, deflation, geoelectric prospecting, climate, Tierra del Fuego.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En las últimas décadas se han registrado episodios de tormentas de polvo que afectan seriamente a la ciudad de Río Grande (Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur). Su ocurrencia se debe principalmente a la desecación de un sistema de lagunas próximo al ejido urbano y a determinadas condiciones climáticas que generan el transporte de los sedimentos hacia la ciudad. Las tormentas de polvo inciden directamente sobre las actividades de la población, produciendo un deterioro de la calidad ambiental y del hábitat urbano. Dan lugar a inconvenientes en el transporte aéreo y terrestre por la escasa visibilidad y el bloqueo de las vías de comunicación. Además, pueden provocar fuertes afecciones oculares y respiratorias en la población. El espesor de sedimentos acumulado es del orden de centímetros hasta más de 1 m y su permanencia provoca una paulatina degradación de suelos.

El área de estudio se localiza a aproximadamente 1 km al oeste de la ciudad de Río Grande, provincia de Tierra del Fuego. El sistema de lagunas de los Cisnes, del Peñón, Don Bosco, Redonda, Larga, Seca y Azul forman parte de una región endorreica de aproximadamente 90 km², que se emplaza al norte de la cuenca del Río Grande y distan entre 1 y 2 km de la costa del mar (Figura 1).

En la Figura 2 se visualizan los efectos de un evento de este tipo en la laguna de los Cisnes, registrado en enero del 2019, cuando la acumulación de sedimentos bloqueó los accesos a la ciudad.

A nivel internacional, los exponentes de mayor magnitud de este fenómeno meteorológico ocurren en el norte de África, donde las arenas del Sahara llegan incluso hasta las costas de

América y del Caribe (Prospero et al., 2003; Riemer et al., 2006; Ridley et al., 2014), y en los desiertos de Mongolia, China y Kazajistán (Zhang, 2006; Xi et al. 2015). En estos casos extremos se trata de fenómenos estacionales producidos por los fuertes vientos y los procesos de desertificación asociados a la actividad humana y al cambio climático. Igualmente, en las zonas desérticas de Australia (Speer, 2013; Cattle, 2016) y en el norte de Chile han ocurrido tormentas severas principalmente en las épocas de verano (UNEP, 2016). En la Patagonia Argentina son frecuentes las tormentas de polvo, pero posiblemente la baja densidad poblacional de esta región hace que sus causas y efectos sean poco estudiados.

En particular en Río Grande, el incremento de la actividad económica, el crecimiento poblacional y la consecuente expansión urbana se manifiesta en la transformación y cambio del uso del suelo, produciéndose la expansión de la zona urbanizada hacia el sudoeste y norte de la ciudad, en proximidad al sector de lagunas (Kruse et al., 2012).

La infraestructura asociada a este desarrollo (construcción de nuevas vías de comunicación, compactación, rellenado de zonas bajas, alteos, terraplenes, canalizaciones, pavimentación, obras hidráulicas y sistemas de desagüe) produjo una modificación de las condiciones naturales, de la dinámica hídrica superficial y subterránea, y una alteración de la topografía, el suelo y la vegetación.

En este trabajo, se analizan las condiciones climáticas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas con el objetivo de formular un modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas que permita realizar recomendaciones tendientes a predecir y mitigar la situación ambiental asociada a las tormentas de polvo que allí se generan.

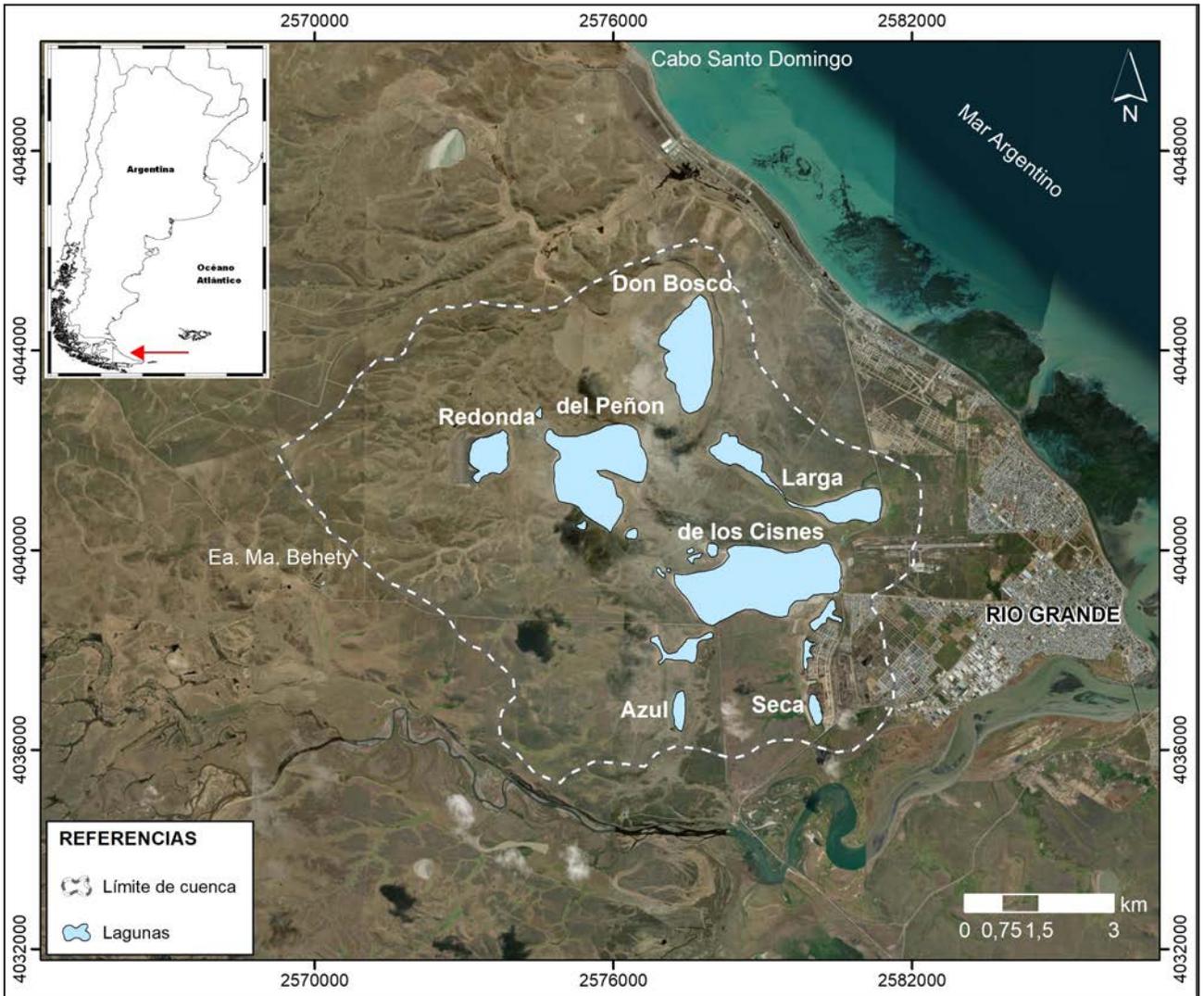


Figura 1. Ubicación del área de estudio al oeste de la ciudad de Río Grande, provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur.



Figura 2. Acumulación de sedimentos en los alrededores de la ciudad de Río Grande.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Clima

Se trata de una región semiárida, con una precipitación media anual ligeramente superior a 300 mm y una temperatura media anual de 5.5 °C, con temperaturas máximas en enero (cerca de los 10 °C) y mínimas en julio (-0,4 °C). La precipitación nival no resulta significativa, produciéndose en promedio 11 días al año.

Los vientos de mayor frecuencia e intensidad provienen preferencialmente del oeste y oeste sudoeste, siendo los de más intensidad los que se registran durante el verano, con ráfagas que superan los 140 km/h, mientras que hacia el invierno la intensidad disminuye (*Iturraspe y Urciuolo, 2002*).

Geología

El sector meridional de la Isla Grande de Tierra del Fuego está ubicado en el ambiente tectónico de la Cordillera de los Andes. Los Andes Fueguinos presentan una orientación oeste-este, resultante del movimiento transformante entre las placas Sudamericana, Antártica y de Scotia.

La costa atlántica nororiental se sitúa en un ambiente más estable, extrandino, desarrollado sobre una plataforma de rocas mesozoicas no deformadas de la Formación Springhill (Jurásico tardío-Cretácico temprano; *Thomas 1949*). Los sedimentos más antiguos expuestos son rocas continentales o marinas del Neógeno (*Codignotto and Malumián 1981*), sobre las que se disponen depósitos glaciares del Plio-Pleistoceno.

El sistema de lagunas estudiado se encuentra emplazado en un ambiente sedimentario compuesto por limoarcilitas, areniscas y conglomerados fosilíferos de coloración castaño claro a pardo verdoso, de origen deltaico marino y edad Mioceno medio (Neógeno) (*Codignotto y Malumian 1981*). Hacia el oeste de la cuenca, en proximidad a la Estancia María Behety, estos sedimentos se agrupan bajo la denominación de Formación Carmen Silva del Grupo Cabo Domingo, según *Olivero et al. 2006*.

Esta formación consta de dos miembros, uno inferior de arcillitas y limolitas arenosas y otro superior de conglomerados y tobos con abundantes invertebrados fósiles (*Malumián y Olivero 2006*). En general esta formación se presenta en afloramientos discontinuos, aunque constituyen la litología de mayor extensión en la isla, con espesores potentes de hasta 70 m en Cabo Domingo, que infrayacen a los depósitos marinos cuaternarios (*Codignotto y Malumián, 1981; Malumián, 1999*).

La región cercana a la costa se caracteriza por la presencia de secuencias sedimentarias correspondientes a dos eventos transgresivos de edad pleistocena, atribuidos al MIS 5e y MIS 1, limitadas al norte, sur y oeste por serranías de rocas neógenas; y al este, por la plataforma de abrasión de igual litología (*Bujalesky, 1998 y Bujalesky et al., 2001*).

El primero de ellos corresponde a los depósitos litorales que integran la Formación La Sara (MIS 5e), de edad Pleistoceno tardío, los cuales se ubican en cotas del orden de 13 y 17 msnm entre los depósitos de cobertura de edad holocena y las rocas neógenas descritas precedentemente. Están integrados por gravas finas clasto sostén, arenas y fangos, de color castaño, friables, finamente estratificadas con suave pendiente hacia el este (*Codignotto, 1969; Codignotto y Malumian 1981*). Ocasionalmente presentan depósitos de fango finamente laminados con estructuras ondúlitas, que podrían corresponder a lagunas costeras, infrayaciendo a los depósitos de playas. En la porción superior presentan abundantes moldes de cuñas de hielo que

estarían asociados con la última glaciación, observados por *Coronato, et al. (2004)* y *Pérez-Alberti, et al. (2008)*.

Suprayacente se disponen depósitos transgresivos, denominados Formación San Sebastián (MIS 1), que se ubican entre la línea de costa actual y el paleoacantilado, labrado sobre los depósitos anteriormente descritos. Estas secuencias están integradas por gravas clasto sostén y arenas con estratificación inclinada de bajo ángulo hacia el este, representando paleoplayas, de colores grises y castaños, y fangos, asociados a llanuras de mareas y lagunas. Se ubican a cotas máximas de 5-6 msnm, con un incipiente desarrollo pedogenético. Los afloramientos son escasos y se localizan en las canteras actualmente en desarrollo, fundamentalmente frente a la playa.

La zona urbana, ubicada en la cuenca del río Grande, se desarrolló fundamentalmente sobre la planicie litoral pleistocena y sobre la margen norte del Río Grande. Con el crecimiento demográfico fue ocupando la margen sur y la planicie litoral holocena, situada un escalón más abajo.

Hacia el este se extiende una extensa plataforma de abrasión de aproximadamente 3 km de ancho, labrada sobre areniscas neógenas.

A partir del análisis de información antecedente se reconoce que existe una amplia descripción de las características de los sedimentos de la zona litoral; sin embargo, en el área estudio no se han realizado hasta el momento estudios sedimentológicos y estratigráficos de detalle que incluyan a los depósitos de cobertura señalados regionalmente por *Olivero et al. (2006)*.

Geomorfología

Las lagunas se encuentran ubicadas en un ambiente de planicie continental deflacionada que fuera ocupado por transgresiones marinas del MIS 5e y MIS 1 (*Bujalesky, 1998; Bujalesky et al 2001; Iturraspe y Urciuolo 2002*).

La llanura costera más antigua, correspondiente al último interglacial, se presenta entre cotas del orden de 10 y 13 msnm; y se encuentra integrada por gravas que se apoyan gradualmente sobre rocas neógenas. La llanura litoral holocena se emplaza entre la línea de costa y el paleoacantilado que la separa de los depósitos transgresivos pleistocenos. Su mayor desarrollo se presenta al sur del río Grande conformado por una serie de cordones de playa compuestos por gravas. En general carecen de rasgos geomorfológicos claros como consecuencia de un nivel de suelo orgánico que cubre independientemente ambas geoformas (*Kruse et al., 2012*).

La planicie continental se extiende desde el límite de las llanuras costera y litoral hacia el interior de la región y se caracteriza por el desarrollo de cursos de agua permanentes y temporarios. Sobre esta planicie se desarrollan las cuencas de deflación o bajos, que contienen una red de drenaje con diseño centripeto, las cuales alojan a las lagunas carácter mayormente intermitente. El curso de agua más importante de la región lo constituye el río Grande, distante aproximadamente 5 km al sur del sistema lagunar.

En las depresiones se observan sectores de playa inferior que se disponen en las costas noroeste, sur y suroeste de las lagunas. En general están integradas por sedimentos limo-arcillosos, ocasionalmente se encuentran desprovistas de suelo y sometidas a erosión por pisoteo de ganado y procesos de deflación. Sobre las costas norte, noreste y este se observan sectores de playa superior conformados por depósitos de arenas, gravas y sedimentos limo-arcillosos.

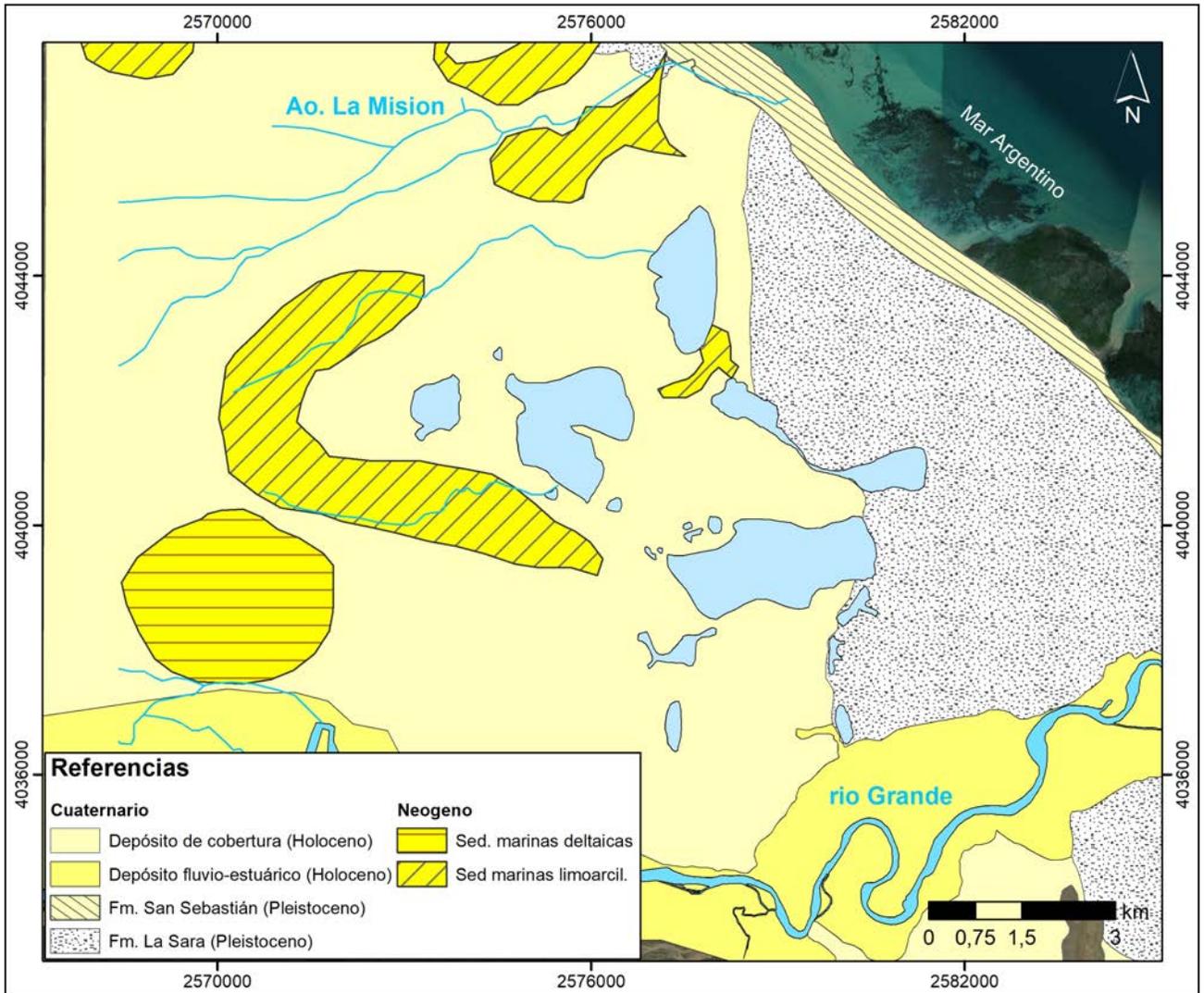


Figura 3. Geología del área de estudio. (Modificada de Olivero et al. 2006)

En correspondencia con lo observado por Coronato et al. (2017) para la laguna El Carmen, ubicada 40 km al noroeste, se sugiere un origen eólico en una zona de confluencia de paleo-líneas de drenaje que formaban la cuenca hídrica previa a la existencia de las lagunas.

Localmente se encuentran rodeadas al oeste y norte por cumbres y laderas con alturas que varían entre 60 y 95 msnm (Figura 4) que se encuentran cubiertas por depósitos de pendiente.

La superficie de las lagunas que queda parcialmente descubierta en la época de verano se seca y genera la voladura de sedimentos finos, que constituyen una pluma eólica donde se reconocieron dunas y "lunettes", y un manto eólico que cubre las geoformas preexistentes. La pluma eólica se extiende hacia el noreste, este y sureste de los bajos en coincidencia con la dirección de los vientos de mayor frecuencia e intensidad.

En general, los sedimentos se disponen a pocos kilómetros del cuerpo de agua; sin embargo, en los últimos años se observa que la dispersión se extiende más allá de límites de la cuenca, hasta alcanzar la ciudad de río Grande.

En el entorno de las lagunas se reconoce la acción de procesos periglaciales expuestos a través de moldes de cuñas de hielo y de montículos que se producen en condiciones de suelo saturado con agua que posteriormente se congela, aumentando el volumen y generando abombamientos.

Hidrología

El área de estudio forma parte de un sistema de lagunas someras, que integran una cuenca endorreica sin escurrimiento hacia el mar.

Los afluentes permanentes son escasos y el aporte superficial se limita a cursos de carácter intermitente; mientras que, en las terrazas se reconocen numerosas manifestaciones de agua subterránea y vertientes que tributan hacia los bajos.

Iturraspe y Urciolo (2000) indica que la economía de humedad de estos sistemas es regulada por el complejo suelo-vegetación. En general presentan elevados valores de salinidad, fósforo (3,8 mg/l) y manganeso (2 mg/l), baja transparencia y alta concentración de partículas en suspensión (Mariuzzi et al., 1987).

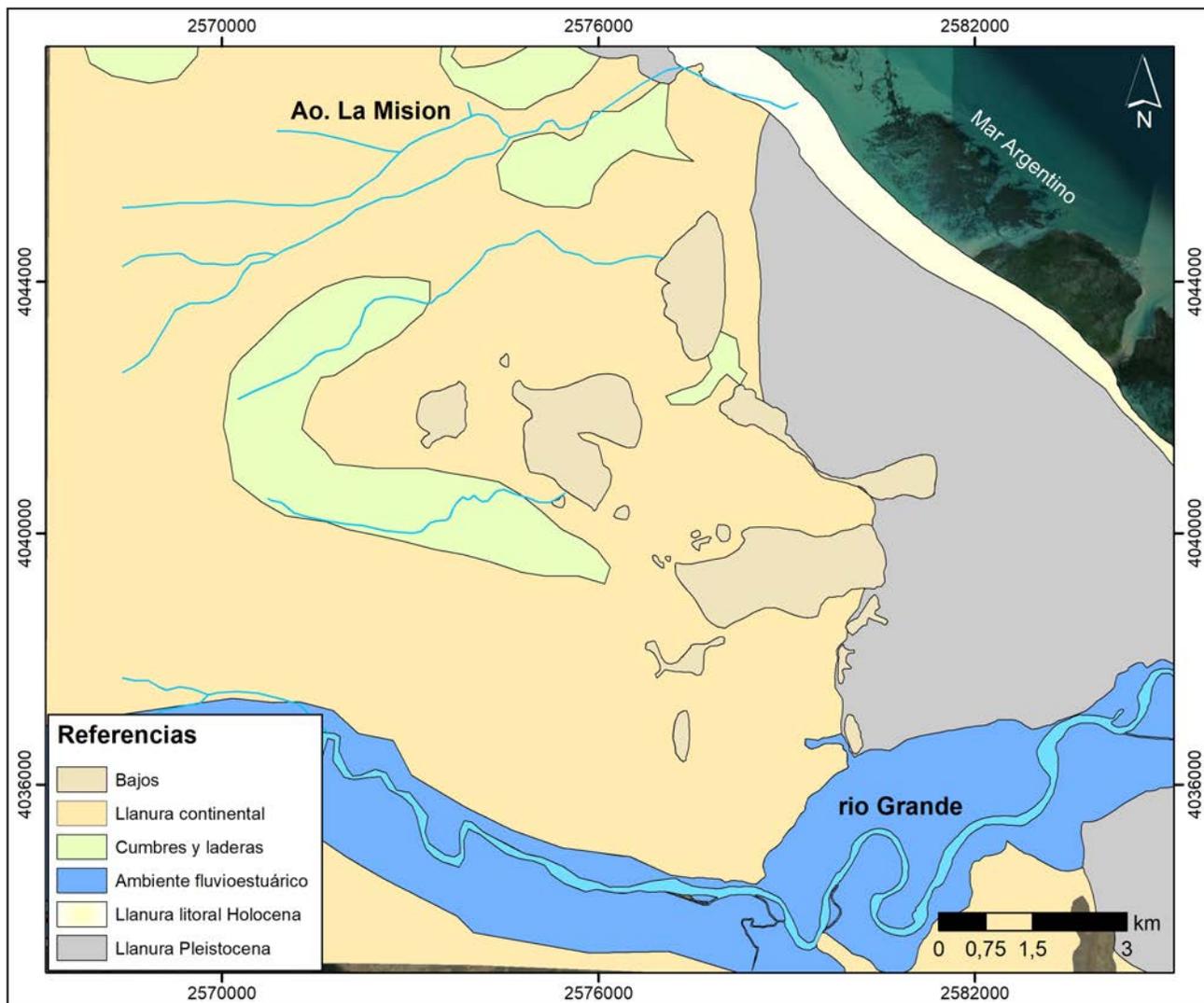


Figura 4. Geomorfología del área de estudio

Las cubetas que contienen a las lagunas son irregulares, debido a la escasa profundidad y extensa superficie se encuentran intensamente sometidas a evaporación.

La laguna de los Cisnes, de mayor significancia por su cercanía al área urbana, presenta una superficie aproximada de 3,5 km², con una mayor elongación en sentido oeste-este (aproximadamente 3,2 km).

La laguna del Peñón, ubicada al norte de la anterior presenta forma irregular, ocupa un área de 2,5 km² y se caracteriza por la existencia de una porción más elevada en el sector central que alcanza una altura aproximada de 3 m.

La laguna Redonda se ubica inmediatamente al oeste y adquiere una morfología concéntrica que ocupa una superficie reducida de 0,40 km².

La laguna Don Bosco se emplaza en el extremo norte de la cuenca endorreica. El área de influencia abarca un total de aproximadamente 7 km², sin embargo, el cuerpo de agua ocupa una superficie significativamente inferior (1,6 km²) que se restringe a la porción este del bajo. Presenta morfología elongada con mayor extensión en sentido norte-sur que alcanza los 4 km.

La laguna Larga se extiende a través de 7 km de largo en sentido noroeste-sureste, y un ancho aproximado de 2 km en los extremos que tiende a reducirse hacia el centro, donde

presenta pocos metros. Una disminución de la cantidad de agua acumulada en la época estival genera la desconexión de la laguna conformando dos cuerpos de menores dimensiones hacia los extremos oeste y sureste.

La laguna Seca se emplaza inmediatamente al oeste de la nueva urbanización denominada barrio Amadeo Vapor. Presenta una morfología elongada que ocupa 0,70 km², con mayor prolongación en dirección norte-sur donde se extiende por aproximadamente 5 km.

La laguna Azul es la más reducida del sistema lagunar con aproximadamente 0,25 km². Se emplaza en el extremo sur de la cuenca donde adquiere morfología elongada con sentido norte-sur.

METODOLOGÍA

Las actividades se llevaron a cabo siguiendo un orden secuencial que se basó en el análisis preliminar de información antecedente y un reconocimiento inicial del área de estudio a través de fotografías aéreas e imágenes satelitales. El relevamiento de campo incluyó la identificación y monitoreo de 55 puntos, de los cuales 43 son manifestaciones de agua subterránea en superficie (mallines, vegas, manantiales), 7 pozos de abastecimiento y 5 cuerpos de agua superficial (Figura 5).

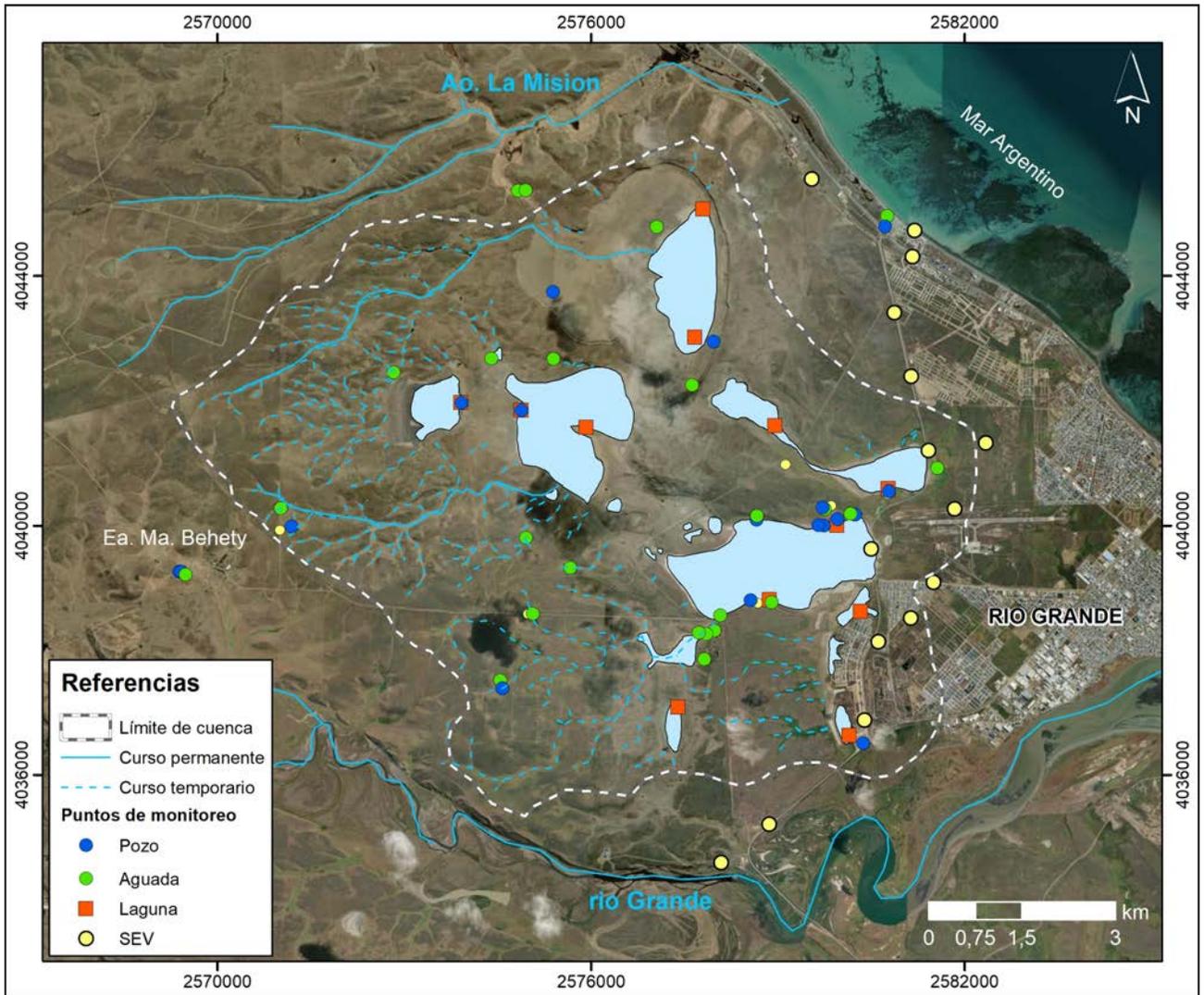


Figura 5. Ubicación de puntos de muestreo de agua superficial, subterránea y SEV.

En cada sitio se consignaron aspectos relacionados al tipo de fuente, características constructivas, profundidad de agua, condiciones topográficas, sedimentológicas y afloramientos rocosos. Los registros de profundidad de agua en los pozos de monitoreo fueron referidos a la boca de pozo, que fue acotada en los trabajos de nivelación topográfica.

Durante el monitoreo se llevó a cabo la determinación de parámetros físicoquímicos in situ (pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos). El instrumental empleado fue conductímetro y peachímetro marca Hanna, el cual fue calibrado con la finalidad de obtener registros confiables y representativos de la matriz analizada.

Complementariamente, se realizó un modelo digital de superficie (MDS) a partir de puntos georreferenciados mediante un equipo GPS SP60 en modo diferencial e imágenes de radar de apertura sintética banda C de los satélites Sentinel de la Agencia Espacial Europea, las cuales fueron procesadas con el software SNAP versión 7.0. Todos los puntos relevados fueron referidos al sistema POSGAR 07.

Para la prospección geoelectrica se midieron veintitrés (23) sondeos eléctricos verticales (SEV) con un arreglo Schlumberger de 200 m de longitud. El procesamiento de los datos se realizó con el programa SEVs (Perdomo et al 2015) que consiste

en la obtención de un modelo inicial con el algoritmo de *Zohdy (1989)* y una reducción del número de capas del modelo utilizando los parámetros de *Dar Zarrouk (Orellana, 1982)*. Para el cálculo de la resistividad aparente se utiliza el operador lineal de *Johansen (1975)*, que se considera suficiente para evaluar grandes contrastes en las resistividades.

Los modelos propuestos para cada SEV suponen que el subsuelo está formado por una sucesión de capas planas y paralelas, de espesor y resistividad constante. Cada modelo es atribuido al punto central del arreglo y los resultados se presentan a lo largo de un perfil para facilitar la interpretación.

Las condiciones climáticas se abordaron mediante la revisión de información antecedente y el análisis de las variables precipitación (1979-2019), temperatura y viento (2012-2019); a partir de registros meteorológicos de la Base Aérea Río Grande y de la EARG, distante 1,5 km del área de estudio.

A fin de comprender el comportamiento hidrodinámico a escala local se calcularon los valores de altura hidráulica en pozos y cuerpos de agua, a partir de los cuales se trazaron las curvas equipotenciales y filetes de flujo. En función de la morfología potenciométrica se establecieron las zonas de recarga y descarga local, la relación agua superficial-subterránea y el régimen influente-efluente de las lagunas.

RESULTADOS

Clima

Los registros de precipitaciones anuales para el período 1979-2018 muestran una gran variabilidad anual, con un valor mínimo de 112 mm (1994) hasta 550 mm (1987). A pesar de que se calcula un valor medio anual de precipitación de 325 mm, la curva de tendencia ajustada, muestra una variación estacional de las lluvias con periodos por encima y debajo de la media estimada (Figura 6A).

En la Figura 5B se expone el promedio mensual de la precipitación para el periodo 1979-2015 de la Base Aérea Río Grande y los valores mensuales medidos durante los años 2016 al 2019 de la EARG (Figura 5C). En general se observa una etapa húmeda en la época estival y una seca entre junio y octubre, sin embargo, esta condición no resultaría extrapolable al análisis particular de cada año debido a que los valores medios mensuales calculados para el periodo 1979-2015 presentan desvíos estándar significativos. A modo de ejemplo, se visualiza que los registros de precipitación acumulada de cada mes durante los últimos 4 años (2016 a 2019), presentan una marcada variabilidad que dificulta el establecimiento de un patrón de comportamiento estacional.

En relación a los vientos, la mayor frecuencia e intensidad provienen del oeste y oeste sudoeste durante la época de verano y decrece en los meses de agosto y septiembre. La velocidad media es de 25 km/h (Iturraspe et al 2002) con máximos entre octubre y febrero que disminuyen hacia el invierno.

Las condiciones climáticas imperantes en la región, representadas por una intensa frecuencia de los vientos y escasas precipitaciones generan condiciones de extrema evapotranspiración que afectan directamente al sistema de lagunas.

En la época estival la evaporación es intensa debido a la alta frecuencia de los vientos, a diferencia del invierno donde decrece significativamente. Iturraspe y Urciuolo (2002) estimaron para el periodo 1981-1984 valores máximos de evaporación mensual en superficie de agua libre ligeramente superiores a 140 mm y mínimos cercanos a 20 mm.

Prospección geoelectrica

A continuación, se describe el modelo de resistividad (expresada en unidades de Ωm) propuesto para el SEV S001 que

se midió próximo a una perforación existente. El error de ajuste de la respuesta de este modelo es de 2.42 %.

El modelo presenta dos electrocapas hasta los 7 metros bajo nivel de terreno (mbnt) con resistividades bajas (3,2 y 10 m). Por debajo y hasta 20 mbnt aproximadamente se presenta una capa con mayor resistividad (17 Ωm) que se corresponde con la presencia de una arena fina arcillosa. El modelo geoelectrico finaliza con una capa de baja resistividad que caracteriza la presencia de arcillas arenosas, posiblemente con agua de elevada conductividad (Figura 7).

Los resultados de la prospección geoelectrica permiten establecer una correspondencia entre los sedimentos descriptos en las perforaciones y los modelos geoelectricos. Se reconoce que los primeros 5 a 7 m del subsuelo presentan resistividad baja (inferior a 10 Ωm), caracterizando sedimentos de textura fina. Por debajo, se observa un leve aumento de la resistividad en el rango 10 a 20 Ωm , que se corresponde con una fracción más arenosa. En general esta secuencia se desarrolla hasta 20 m de profundidad, y por debajo las electrocapas presentan resistividades inferiores a 10 Ωm . Este descenso de la resistividad con la profundidad puede interpretarse como un aumento de la conductividad del agua subterránea (debido a una mayor salinidad) y también a la presencia de mayor contenido de arcillas. A partir de la correlación establecida se propone una interpretación de los rangos de resistividad y comportamiento hidrogeológico (Tabla 1).

Tabla 1. Correlación entre resistividad y comportamiento hidrogeológico.

Resistividad	Rango (Ωm)	Comportamiento hidrogeológico
Baja	0.1-10	Acuitardo Acuífero agua salobre
Media-Alta	10-50	Acuífero agua dulce
Alta	> 50	Zona no saturada

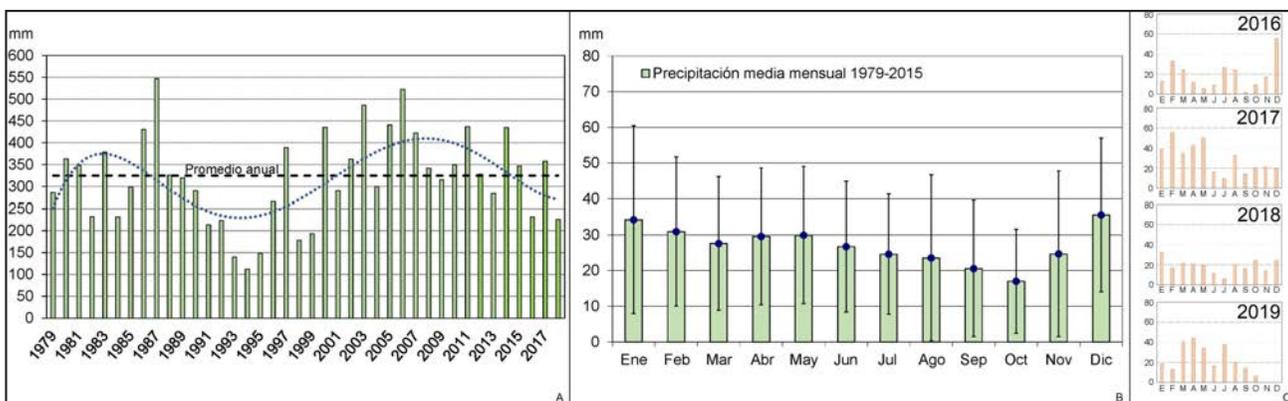


Figura 6. A) Precipitaciones anuales para el período 1979-2018. B) Promedio mensual de la precipitación. C) Precipitación mensual acumulada 2016-2019.

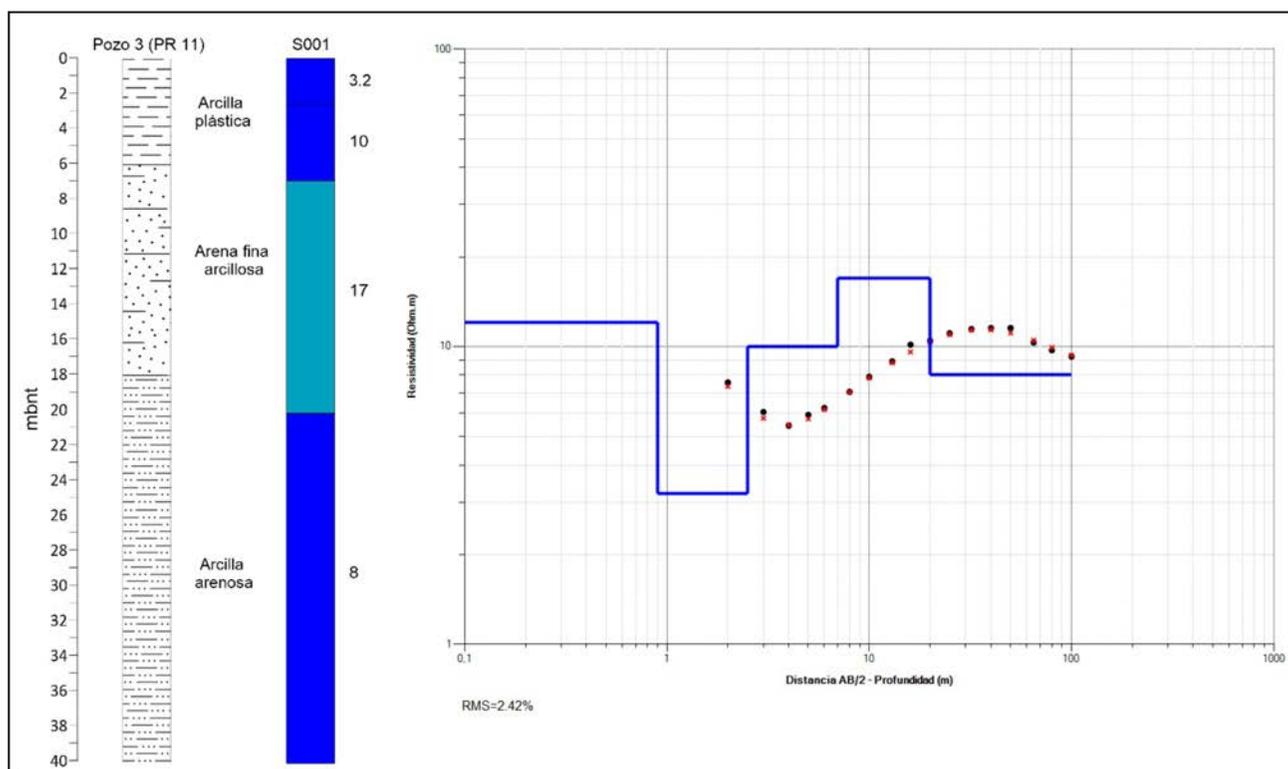


Figura 7. Descripción litológica pozo 3 y el modelo de resistividad del SEV S001. Se muestra la curva de resistividad aparente observada y calculada.

Hidrogeología

Las interpretaciones en relación a las características hidrogeológicas de los sedimentos se basan fundamentalmente en los resultados surgidos de la prospección geoelectrica, con base en la información recopilada de los pozos. Se asume la presencia de un sistema hidrogeológico integrado por una unidad acuífera somera (freática) y una unidad acuífera profunda (semiconfinada).

La unidad acuífera somera está conformada por sedimentos de textura fina tipo arcillas intercaladas con niveles de grava fina y arenas de color castaño grisáceo, que otorgan una manifiesta anisotropía y diferentes grados de permeabilidad. En proximidad a las lagunas se presentan depósitos de baja conductividad hidráulica, integrados por sedimentos de granulometría fina que alcanzan un espesor máximo de 6 m y suprayacen sobre arenas. Se asume que los niveles superiores son de edad cuaternaria; sin embargo, la escasez de información limita poder definir con exactitud la extensión de la cubierta sedimentaria moderna. En la laguna El Carmen, *Coronato et al. (2017)* informa un espesor entre 1 y 3 m para los sedimentos pleistocenos identificados en el entorno inmediato.

A diferencia de las zonas bajas en los sectores más elevados localizados al oeste de la cuenca, donde el nivel de agua subterránea se localiza a mayor profundidad, el acuífero freático se aloja en materiales de textura más gruesa, como limos y arenas de edad neógena.

La unidad hidrogeológica más profunda se encuentra integrada por una sucesión de areniscas, limolitas y arcillitas, frecuentemente fosilíferas y de origen marino que constituyen una sucesión de niveles acuíferos con intercalaciones acuitardas.

La presencia de un nivel con valores de resistividad eléctrica inferiores a $10 \Omega\text{m}$ permite diferenciarla, desde un punto de vista geoelectrico, de la unidad más somera.

Hidrodinámica

La zona no saturada, alojada en materiales muy heterogéneos como arcillas y gravas, presenta un espesor variable desde escasos centímetros en la zona de vega, hasta 12 mbnt en las serranías identificadas al oeste de la cuenca.

La morfología del flujo subterráneo, presenta un diseño concéntrico convergente con sentido de escurrimiento local hacia los bajos endorreicos (Figura 8), donde se emplazan las lagunas que funcionan como áreas de descarga local. En la zona central, entre las lagunas del Peñón, Don Bosco, Larga y de los Cisnes se reconoce un sector topográficamente elevado que se asume como posible área de recarga local, condición que se valida a partir de mayores valores de altura hidráulica en pozos emplazados sobre la margen de la laguna de los Cisnes.

Las lagunas Don Bosco y Larga se circunscriben a la curva potenciométrica de 10 msnm, mientras que las lagunas del Peñón y de los Cisnes se localizan a una menor altura hidráulica, del orden de 6 msnm, por lo que ocasionalmente y en eventos de precipitación extrema se encontrarían parcialmente vinculadas.

Las diferencias de potencial hidráulico permitieron definir el comportamiento efluente o ganador de los cuerpos de agua superficial respecto al acuífero freático. Los mayores registros de altura potenciométrica se presentan al oeste de la cuenca, con valores de 60 msnm, mientras que los menores resultan de 6 msnm y coinciden con las zonas más bajas topográficamente.

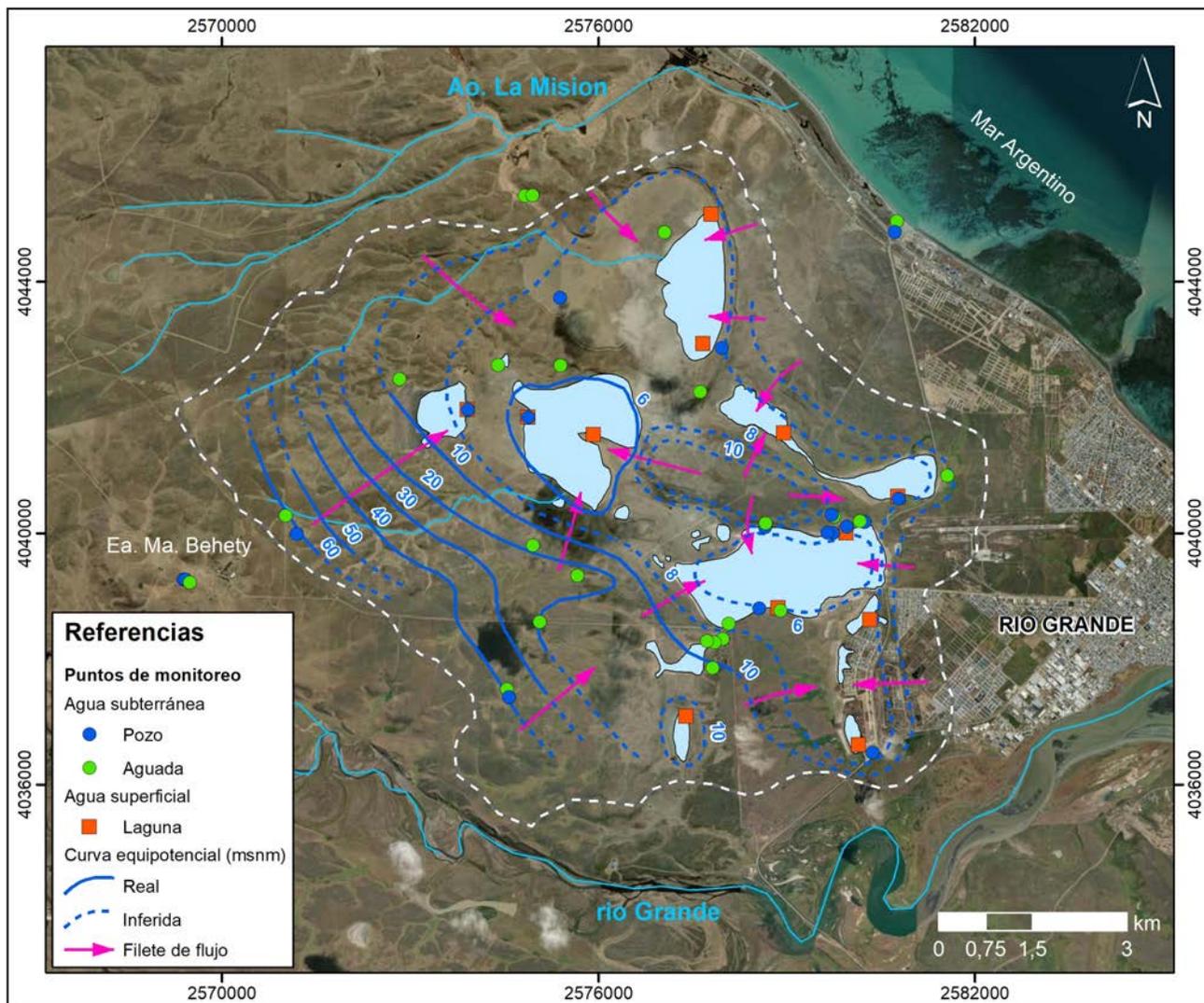


Figura 8. Mapa equipotencial del acuífero libre en el sistema lagunar endorreico en la ciudad de Río Grande.

Hidroquímica

La caracterización química del agua superficial y subterránea se basa en la interpretación de valores de parámetros físicos in situ en la totalidad de los puntos relevados.

El área de influencia de las lagunas se caracteriza por aguas de variada salinidad con valores extremos entre 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sector de vega, hasta cercanos a 47.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el cuerpo de agua superficial. En relación al agua superficial de las lagunas, los valores más bajos de conductividad eléctrica in situ se midieron en las lagunas Redonda (1.960 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Seca (2.030 y 2.790 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y Azul (5800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Los valores más altos se registraron en laguna Don Bosco (12.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Larga, de los Cisnes y Peñón (> 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

En correspondencia con la red de flujo subterránea las concentraciones aumentan desde la periferia de la cuenca hasta las lagunas, donde se reconocen contenidos superiores al agua de mar. Los elevados valores de conductividad eléctrica del agua superficial responden al funcionamiento de las lagunas como punto terminal de la descarga subterránea, donde se producen procesos de evaporación y concentración progresiva de solutos.

En relación al agua subterránea, registros inferiores a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspondientes con aguas dulces (Custodio y Llamas, 1983), se presentan mayormente en vertientes o manifestaciones del nivel freático en superficie y en pozos que interceptan agua hasta 40 metros bajo boca de pozo. Valores similares se determinaron en pozos que alcanzan una profundidad final de 60 mbnt, en la Estancia María Behety, al oeste del área de estudio y que forma parte de la cuenca del Río Grande.

Las mayores concentraciones en agua subterránea son del orden de 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en pozos ubicados en el margen de la laguna Larga y de los Cisnes, que interceptan agua de distintos niveles acuíferos hasta una profundidad de 45 mbnt. En estos sectores las características saladas del agua subterránea podrían relacionarse con un prolongado tiempo de residencia debido a una menor velocidad del flujo subterráneo; y a la presencia de sedimentos con contenido de sales como consecuencia de los procesos de evaporación.

CONCLUSIONES

El sistema de lagunas de los Cisnes, del Peñón, Don Bosco, Redonda, Larga, Seca y Azul ubicado al oeste de la ciudad de

Río Grande conforma una cuenca endorreica, que se encuentra regulada fundamentalmente por el aporte del acuífero freático con contribución de la componente climática.

La sucesión de ciclos deficitarios y de exceso tienen influencia directa sobre las variaciones del nivel freático y en consecuencia la morfología de las lagunas y su dinámica subterránea.

La desecación parcial de las lagunas genera la exposición de materiales de textura fina, tipo arcilla que conforman los sedimentos del lecho lacustre. El pastoreo ovino en las zonas proximales resulta una práctica habitual que ha producido una continua degradación generalizada potenciando los fenómenos de desertificación. En los meses de verano se observa un incremento en la frecuencia e intensidad de los vientos con una dirección oeste y oeste sudoeste. La acción eólica, mediante el proceso de deflación de carácter dinámico y eventual, genera la voladura de estos materiales disponibles produciendo serios problemas ambientales para la población y los recursos naturales.

El área de influencia de las lagunas se caracteriza por aguas de variada salinidad con valores extremos entre 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sector de vega, hasta cercanos a 47.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el cuerpo de agua superficial. Aguas de características dulces se presentan mayormente en vertientes o manifestaciones del nivel freático en superficie al igual que en pozos que interceptan niveles hasta 40 metros bajo boca de pozo; mientras que concentraciones más elevadas se presentan en pozos donde se reconoce un mayor tiempo de residencia y fenómenos de concentración de sales en los sedimentos.

Las mediciones de conductividad eléctrica in situ del agua superficial permitieron reconocer que en las lagunas Don Bosco, Larga, de los Cisnes y Peñón, los valores son un orden de magnitud superior que los obtenidos en las lagunas Redonda, Seca y Azul. En las zonas próximas a estas lagunas de mayor salinidad se observaron depósitos de acumulación (mantos eólicos y dunas) que constituyen la principal fuente de material movilizado durante las tormentas de polvo.

Los resultados de la prospección geoelectrica permitieron reconocer que el agua subterránea presentaría características dulces hasta una profundidad aproximada entre 15 y 20 mbnt;

en correspondencia con materiales arcillosos, o aguas de características salobres a partir de 20 mbnt. En este sentido, debido al comportamiento ganador de los cuerpos de agua superficial, el aporte de agua dulce del nivel freático contribuiría a disminuir la salinidad del agua superficial. Por este motivo, la relación agua superficial-subterránea juega un importante rol en la dinámica de movilización de sedimentos del lecho lacustre.

RECOMENDACIONES

Las posibles medidas de prevención y mitigación para controlar el fenómeno extremo se encuentran condicionadas por la extensión de las lagunas, el deterioro y mala calidad de los suelos marginales.

Como medidas de prevención se sugiere la implementación de un sistema de alerta temprana, donde se registren diversas variables hidrogeológicas y climáticas, con la finalidad de anticipar la ocurrencia de eventos extremos y ejecutar acciones inmediatas.

Una posible medida de acción ante situaciones de emergencia en meses extremos, podría ser la implementación de un sistema de recarga artificial de las lagunas con agua del Río Grande complementado con otras fuentes de agua adicional (subterránea o planta de tratamiento de residuos cloacales).

Por último, se recomienda una adecuada planificación en el uso del suelo, destinado a fines forrajeros o ganaderos, tendiente a fomentar el mejoramiento de las pasturas naturales en los sectores más vulnerables, y minimizando la presión del ganado. De manera complementaria se propone revegetar los márgenes de las lagunas con especies predominantes de la estepa que posibiliten la fijación del suelo.

Agradecimientos

Nuestro especial agradecimiento a Carmelo Sánchez y Rita Lofiego por la importante colaboración durante los relevamientos de campo, y también a José Luis Hormaechea, Gerardo Connon y Luis H. Barbero de la Estación Astronómica de Río Grande (UNLP).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AUER V. (1956).

The Pleistocene of Fuego-Patagonia. Part I: The Ice and Interglacial Ages. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae, A III Geologica-Geographica* 48: 1-226.

BONARELLI G. (1917).

Tierra del Fuego y sus turberas. *Anales del Ministerio de Agricultura de la Nación, Sección Geología, Mineralogía y Minería* 12 (3): 1-119.

BORRELLO A.V. (1969).

Los Geosinclinales de la Argentina. *Anales de la Dirección de Geología y Minería* 14: 1-188. Buenos Aires, Argentina.

BUATOIS L.A. Y CAMACHO H.H. (1993).

Geología del sector nororiental del lago Fagnano, Isla Grande de Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 48(2): 109-124.

BUJALESKY G.G., CORONATO A., ISLA F. (2001).

Ambientes glaciocfluviales y litorales cuaternarios de la región del río Chico, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(1) 2001: pp 73-90.

Bujalesky G.G. (1998).

Holocene coastal evolution of Tierra del Fuego, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula. AA BalkEMA- Rotterdam-Brookfield*: pp 247-281.

- CALDENIUS C.C. (1932).
Las glaciaciones cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego.
Geografiska Annaler 14:1-164. *Stockolm*.
- CAMINOS, R., HALLER, M., LAPIDO, O., LIZUAIN, A., PAGE, R., Y RAMOS, V. (1981).
Reconocimientos geológico de los Andes Fueguinos, Territorio Nacional de Tierra del Fuego.
VIII Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 759-786. San Luis. Argentina.
- CATTLE S. R. (2016).
The case for a southeastern Australian Dust Bowl, 1895-1945.
Aeolian Research 21, pp 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.02.001>
- CLAPPERTON C.H. (1993).
Quaternary Geology and Geomorphology of South America.
Elsevier Science Publishers, 779 pp.
- CODIGNOTTO J. (1969).
Nota acerca de algunos aspectos geológicos de la costa patagónica comprendida entre punta Loyola y el cabo Vírgenes.
Boletín del Servicio de Hidrografía Naval, 6(3): 257-263. Buenos Aires.
- CODIGNOTTO J. Y MALUMNIÁN N. (1981).
Geología de la Región al N del paralelo 54° L.S. de la Isla Grande de Tierra del Fuego.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 1:44-88.
- CORONATO A.M. (1990).
Definición y alcance de la última glaciación pleistocena (Glaciación Moat) en el Valle de Andorra, Tierra del Fuego.
XI Congreso Argentino, Actas 1: 286-289. San Juan.
- CORONATO A.M. (1993).
La Glaciación Moat (Pleistoceno superior) en los valles Pipo y Cañadón del Toro, Andes Fueguinos.
XII Congreso Geológico Argentino, Actas 6: 40-47. Mendoza.
- CORONATO A.M. (1995A).
Geomorfología glacial de valles de los Andes Fueguinos y condicionantes físicos para la ocupación humana.
Ph.D. Dissertation, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, 318 pp. Inédito.
- CORONATO A.M. (1995B).
The last Pleistocene Glaciation in tributary valleys of the Beagle Channel, Southernmost South America.
Quaternary of South America & Antarctic Peninsula, 9 (1993): 153-172. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.
- CORONATO, A, BUJALESKY, G., PÉREZ ALBERTI, A, Y RABASSA, J. (2004).
Evidencias criogénicas fósiles en depósitos marinos interglaciarios de Tierra del Fuego, Argentina.
X Reunión Argentina de Sedimentología. Acta 1:48-49. San Luis, Argentina.
- CORONATO A., PONCE J.F., QUIROGA D.R.A., Y GOGORZA C. (2017).
Caracterización geológica y geomorfológica de la cuenca de la laguna Carmen (Estepa fueguina, Argentina) y su registro sedimentario durante el Holoceno tardío.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 74(2): pp 263-273.
- CUSTODIO E. Y LLAMAS M. (1983).
Hidrología Subterránea.
Tomos I y II Ed. Omega. Barcelona.
- FERUGLIO E. (1950).
Descripción Geológica de la Patagonia. Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales 3: 1-431.
Ministerio de Industria y Comercio de La Nación. Buenos Aires.
- ITURRASPE R. Y URCIUOLO A. (2000).
Clasificación y Caracterización de las Cuencas Hídricas de Tierra del Fuego.
XVIII Congreso Nacional del Agua. Ed. UNSE; ISBN: 978-987-99083-4-1. pp 365-366.
- ITURRASPE R. Y URCIUOLO A. (2002).
Ciclos deficitarios en el régimen de sistemas lagunares de la estepa fueguina.
XIX Congreso Nacional del Agua. Córdoba, Argentina. CD-Rom, 10 pp.
- JOHANSEN H. (1975).
An interactive computer-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings.
Geophysical Prospecting, 23.
- KRANCK E. H. (1932).
Geological investigations in the Cordillera of Tierra del Fuego.
Acta Geographic 4, pp. 1-231.

- KRUSE E., GASPARI F., PERDOMO R., LAURENCENA P., FUCKS E., PERDOMO S., CARRETERO S., Y LOFIEGO R. (2012). Conflictos ambientales de la urbanización en Río Grande (Tierra del Fuego). *Estudio integral con énfasis en el recurso hídrico subterráneo. Proyectos de Investigación, Innovación y Transferencia en Áreas Prioritarias. UNLP-UNTdF. Informe inédito.*
- MALUMIAN N. Y OLIVERO E. (2006). El Grupo Cabo Domingo, Tierra del Fuego: Bioestratigrafía, Paleoambientes y Acontecimientos del Eoceno-Mioceno marino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 2: 139-160.*
- MALUMIAN N. (1999). La sedimentación en la Patagonia Extraandina. *En Caminos, R. (Ed.) Instituto de Geología y Recursos Minerales, Geología Argentina, Anales 29: 557-578.*
- MARIAZZI A., CONZONNO V., ULIBARRENA J., PAGGI J., Y DONADELLI J. (1987). Limnological investigation in Tierra del Fuego - Argentina. *Biología Acuática (10). La Plata.*
- MEGLIOLI A. (1992). Glacial geology and chronology of Southernmost Patagonia and Tierra del Fuego, Argentina and Chile. P h.D. *Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, U.S.A., 216 pp. Inedito.*
- MEGLIOLI A., EVENSON E., ZEITLER P., Y RABASSA J. (1990a). Cronología relativa absoluta de los depósitos glaciares de Tierra del Fuego, Argentina y Chile. *XI Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 457-460. San Juan.*
- MEGLIOLI A., EVENSON E., Y RABASSA J. (1990B). Multiple relative and absolute dating techniques applied to the glacial history of Tierra del Fuego. *Geological Society of America, Northeastern Section Meeting, Syracuse, Abstracts.*
- NORDENSKJÖLD O. (1898). Notes on Tierra del Fuego. An account of the Swedish Expedition of 1895-1897. *Scott. Geograph. Magaz. Edimburg 13: 393-399.*
- OLIVERO E. Y MARTINIONI D. (1998). A review of the Mesozoic-Paleogene geology of the Marginal-Austral Basin of Tierra del Fuego. *IGCP Project 381 South Atlantic Mesozoic Correlations Third Annual Conference, Comodoro Rivadavia, Argentina, Field Trip N° 3: 1-13.*
- OLIVERO E.B. Y MALUMIÁN N. (1999). Eocene stratigraphy of Southern Tierra del Fuego, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 83(2): 295-313.*
- OLIVERO E.B., MALUMIÁN N., Y MARTINIONI D.R. (2006). Mapa Geológico de la Isla Grande de Tierra del Fuego e Isla de los Estados; Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur; República Argentina (escala 1:500.000). *SEGEMAR, Buenos Aires.*
- ORELLANA, E. (1982). Prospección en corriente continua. Madrid. Paranainfo.
- PEREZ-ALBERTI A., VALCARCEL DÍAZ M., CORONATO A, RABASSA J., Y COSTA CASAS M. (2008). Wedge structures in southernmost Argentina (Río Grande, Tierra del Fuego). *IX International Conference on Permafrost, Fairbanks, University of Alaska, 1381-1385. Alaska*
- PORTER S.C. (1989). Character and ages of Pleistocene drifts in a transect across the Strait of Magellan. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula, 7: 35-49. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.*
- PROSPERO J. M., Y LAMB P. J. (2003) African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications. *Science 302, pp. 1024-1027.*
- RABASSA J., SERRAT D., MARTI C., Y CORONATO A. (1988). Estructura interna de drumlins, Isla Gable, Canal Beagle, Tierra del Fuego. *II Reunión Argentina de Sedimentología, 222-226. Buenos Aires.*
- RABASSA J., HEUSSER C.J., Y RUTTER N. (1989). Late Glacial and Holocene of Argentina, Tierra del Fuego. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula 7:327-351. Rotterdam: A.A. Balkema. Rotterdam.*
- RABASSA J., SERRAT D., MARTI C., Y CORONATO A. (1990). El Tardiglacial en el Canal Beagle, Tierra del Fuego, Argentina. *XI Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 290-293. San Juan.*

- RABASSA J., BUJALESKY G.G., MEGLIOLI A., CORONATO A., GORDILLO S., ROIG C., Y SALEMME M. (1992).
The Quaternary of Tierra del Fuego, Argentina: the status of our knowledge.
Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. Ca 81: 241-256. Sweden.
- RABASSA J. Y CLAPPERTON C.H. (1990).
Quaternary Glaciations of the Southern Andes.
Quaternary Science Reviews, 9: 153-174.
- RIDLEY D.A., HEALD C.L., Y PROSPERO J.M. (2014)
What controls the recent changes in African mineral dust aerosol across the Atlantic?,
Atmospheric Chemical Physics, (14), pp. 5735-5747.
- RIEMER N., DOHERTY O.M., Y HAMEED S. (2006)
On the variability of African dust transport across the Atlantic,
Geophysical Research Letters, 33 (13), L13814
- SPEER M.S. (2013).
Dust storm frequency and impact over Eastern Australia determined by state of Pacific climate system.
Weather and Climate Extremes (2), pp 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.10.004>
- THOMAS, E. R. (1949).
Manantiales Fieles. Magallanes Province, Chile.
Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 33 (9): 1579-1589.
- UNEP, WMO, UNCCD (2016).
Global Assessment of Sand and Dust Storms.
United Nations Environment Programme, Nairobi.
- URCIUOLO A., ITURRASPE R., LOFIEGO R., Y NOIR G. (2009).
Estrategias para el ordenamiento hidro-ambiental de la cuenca binacional del Río Grande de Tierra del Fuego.
XXII Congreso Nacional del Agua. Trelew.
- VILLARREAL M.L., CORONATO A., MAZZONI E., Y LÓPEZ R. (2014).
Mantos eólicos y lagunas semipermanentes de la estepa fueguina (53° S), Argentina.
Revista de la Sociedad Española de Geología 2: 81-96.
- XI X., Y SKOLIK I.N. (2015).
Dust interannual variability and trend in Central Asia from 2000 to 2014 and their climatic linkages.
Journal of Geophysical Research (120)
- ZHANG J.S., PENG G.B., HUANG M., Y ZHANG Z. H. (2006),
Are dust storm activities in North China related to Arctic ice-snow cover?,
Global Planetary Change, 52 (1-4), pp 225-230
- ZODHY, A. (1989).
A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curve.
Geophysics, 54(2), 245-253.