

Caracterización geofísica y mineralógica de las formaciones superficiales de la Cuenca del río Loa (desierto de Atacama, Chile)

Geophysical and mineralogical characterization of near surface formations of the Loa river Basin (Atacama Desert, Chile)

N. Sanjuán¹, S. López-Andrés² y A. Muñoz-Martín^{3,4}

1 GEOINTEC, Geotecnia e ingeniería del terreno, S.L. Pozuelo de Alarcón (Madrid). nsanjuan@geointec.com.

2 Dpto. de Cristalografía y Mineralogía. Fac. Ciencias Geológicas. Univ. Complutense de Madrid. 28040-Madrid, España.

3 Grupo de Tectonofísica Aplicada. Dpto. Geodinámica. Univ. Complutense de Madrid. 28040-Madrid, España.

4 Instituto de Geociencias (UCM, CSIC). C/ José Antonio Novais, 12, 28040-Madrid, España.

Resumen: Durante 2015 tuvo lugar una exploración geotécnica y geofísica en el desierto de Atacama (Chile) para el diseño de una planta solar fotovoltaica. Los datos de resistividad obtenidos en la Fm. El Batea resultaron extremadamente elevados ($10^7 \Omega \cdot m$), por lo que se llevó a cabo un muestreo de las unidades geológicas presentes para su estudio mineralógico mediante difracción de rayos X (DRX). La composición mineral de la Fm. El Batea muestra una casi total ausencia de humedad y una muy baja porosidad. Estos factores producen que la componente electrolítica en esta formación sea casi despreciable, y su comportamiento eléctrico coincide con la conductividad de sus fases minerales casi en estado puro. Estas características se deben a las extremas condiciones ambientales en el desierto de Atacama. La formación El Batea ha supuesto una barrera a la evapotranspiración, siendo los valores de resistividad de la formación infrayacente prácticamente normales (10^3 - $10^4 \Omega \cdot m$).

Palabras clave: Desierto de Atacama, cuenca del río Loa, resistividad extrema, DRX, Fm. El Batea

Abstract: During 2015 it took place a geotechnical and geophysical exploration in the Atacama Desert (Chile) for the design of a power solar plant. Resistivity data obtained in El Batea Fm. were extremely high ($10^7 \Omega \cdot m$). For this reason, sampling of near surface geological units were made in order to study its mineralogical composition with X-Ray Diffraction (XRD). Mineral composition of El Batea Fm. shows an almost total absence of water and a very low porosity. These factors cause that the electrolytic component in this formation is almost negligible, and its electrical conductivity matches with the conductivity of the pure mineral phases. These characteristics are probably due to the extreme environmental conditions. El Batea Fm. has a barrier to evapotranspiration, because the resistivity values of the lower formation are practically normal (10^3 - $10^4 \Omega \cdot m$).

Key words: Atacama Desert, Loa river basin, extreme resistivity, XRD, El Batea Fm.

INTRODUCCIÓN

Durante febrero de 2015 tuvo lugar una campaña de exploración geotécnica y geofísica en la localidad de María Elena, provincia de Tocopilla, región de Antofagasta (Chile) (Fig. 1). El objetivo era el diseño de las tomas a tierra para una planta solar fotovoltaica. En dicha campaña se realizaron 10 sondeos eléctricos verticales (SEV) y cuatro calicatas, en las que se obtuvieron muestras a diferentes cotas. Los datos de resistividad obtenidos resultaron extraordinariamente altos, con valores de resistividad superiores a $10^7 \Omega \cdot m$. Aunque dicha campaña tenía un carácter aplicado, se procedió a un estudio mineralógico mediante DRX para estudiar la causa de esos valores de resistividad, de los más altos existentes en la bibliografía.

La zona de estudio se sitúa en el desierto árido de Atacama, en la cuenca del río Loa a una altura de unos 1250 m sobre el nivel del mar (Fig. 1). El clima en la zona es extremadamente seco (pluviometría de 0,00 mm/año) y con una evaporación potencial de 2.000-3.500 mm/año. La oscilación diaria de temperatura es

superior a 20°C, con vientos constantes de dirección E-W y W-E con una velocidad media de 15km/h (Información Oficial Hidro-meteorológica y de Calidad

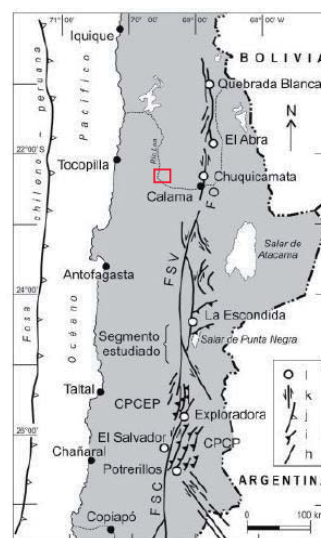


FIGURA 1. Mapa tectónico regional (Niemeyer y Urrutia, 2009), con la ubicación de la zona de estudio señalada.

de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile). Existen también avenidas torrenciales interdecenales (Vargas *et al.*, 2000), cuyas evidencias han podido verse en la zona de estudio.

La secuencia lito-estratigráfica presente en la zona de estudio se corresponde con los depósitos cenozoicos de la Cuenca sedimentaria del río Loa, los cuales describen unas condiciones de aridez creciente hasta la hiperaridez actual. De muro a techo se pueden definir las siguientes unidades (Fig. 2):

*Fm. Calama (MPa): Mioceno inferior – medio. Aparece en la base de todos los puntos de investigación a partir de los 0,60-1,30 m de profundidad. Son depósitos torrenciales típicos de piedemonte en un medio climático árido (Naranjo y Paskoff, 1982). Se relaciona genéticamente con la Fm. Gravas de Atacama (Riquelme *et al.*, 2003).

*Fm. El Batea (Mmeb): Mioceno medio – Plioceno. Se localiza entre 0,35-0,70 m hasta los 0,60-1,40 m de profundidad. Hacia techo son arenas gruesas y gravas con cementación media y hacia la base pasan a areniscas fuertemente cementadas. Se trata de una secuencia continental con abundante cemento evaporítico (Medina *et al.*, 2012). Presentan un contenido en sales creciente hacia la base, que conlleva una reducción de la porosidad y un aumento de la competencia.

*Fm. Terrazas del río Loa (QPla): Pleistoceno superior. Formadas por depósitos detríticos superficiales de 0,70-0,35 m de espesor de arenas gruesas y gravas.

*Aluvial actual (QHa): Holoceno. Representa los depósitos aluviales actuales propios del clima desértico, cuyas lluvias torrenciales forman valles erosivos. Se producen únicamente en los cursos de mayor entidad.

CARACTERIZACIÓN GEO-ELÉCTRICA

En la campaña se realizaron 10 SEV dispuestos en pares en forma de cruz con direcciones ortogonales NS y EW, con objeto de disponer de valores de resistividad

(ρ) en cinco puntos de investigación diferentes (Tabla I). Se utilizó un Resistímetro Syscal Kid Switch fabricado por Iris-Instruments con un dispositivo electrónico de tipo Schlumberger.

	Coordenadas UTM WGS89 Uso 19K		Altitud m.s.n.m.
	X	Y	
SEV1&2	445683	7530312	1221
SEV3&4	445617	7529641	1232
SEV5&6	446577	7529156	1250
SEV7&8	446510	7528432	1259
SEV9&10	447338	7528110	1266

TABLA I. Coordenadas UTM y orientación de los SEV.

Tras la adquisición y procesado de datos, calibrando los espesores en las calicatas realizadas, se obtuvieron para cada material los valores de resistividad (Tabla II). Estos valores resultaron más altos de lo esperado ya que en la naturaleza las arenas y gravas, presentan unas resistividades de $1-6 \times 10^3 \Omega \cdot m$ y $2 \times 10^3 - 10^4 \Omega \cdot m$, respectivamente (Telford *et al.*, 1990).

Material	Resistividad media ($\Omega \cdot m$)	Log Resistividad ($\Omega \cdot m$)
QHa	$1.296 \cdot 10^6$	6
QPla	174.000-748.000	5
Mmeb	$35.2 \cdot 10^6 - 3.05 \cdot 10^8$	7-8
MPa	1100-13500	3-4

TABLA II. Valores de resistividad de las formaciones analizadas.

Calicata	Coordenadas UTM WGS84 Uso 19K		Altitud m.s.n.m.
	X	Y	
CM-1	447415	7527954	1267
CM-6	446034	7529333	1244
CM-10	445686	7530118	1224
CM-21	446612	7528645	1259

TABLA III. Localización de las calicatas realizadas.

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

En febrero de 2015 se realizaron también cuatro calicatas mecánicas de las cuales se obtuvieron un total



FIGURA 2. Imagen del escarpe de 1,20 m. Donde se aprecia la Fm. El Batea (Mmeb) cubierta por la Fm. Terrazas del Río Loa (QPla) y la erosión posterior de un valle en el que se ha depositado el material aluvial actual (QHa). Se aprecian las costras salinas-yesíferas de la Fm. El Batea debido a erosión lateral de los cursos fluviales efímeros actuales.

de nueve muestras a diferentes profundidades (Tablas III y IV) correspondientes a las tres formaciones más superficiales (QHa, QPla, Mmeh), no siendo posible la toma de muestras de la formación MPa.

Calicata	Muestras					
	Profundidad (m)			Material		
CM-1	0,00	1,00	1,70	QHa	Mmeh	Mmeh
CM-6	0,00	1,00		QPla		Mmeh
CM-10	0,00	0,99		QPla		Mmeh
CM-21	0,00	0,50		QPla		Mmeh

TABLA IV. Muestras y profundidades de muestreo en las calicatas.

Para preservar las condiciones extremas del emplazamiento las muestras fueron transportadas en ausencia de humedad ambiental hasta el Centro de Asistencia a la Investigación (CAI) de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en menos de 48 horas y mantenidas primero en un desecador de vidrio Pyrex con gel de sílice durante 24 horas y después en una estufa a 40°C. Las muestras fueron analizadas DRX por el método del polvo cristalino, utilizando un difractor de rayos X BRUKER D8 ADVANCE, con radiación de Cu, un intervalo angular de 2 a 65° 2θ, un tamaño de paso de 0,02° 2θ y un tiempo por paso de 0,7 s. Se ha empleado el software EVA de Bruker para la identificación y el análisis semicuantitativo, siguiendo el método de Chung (Chung, 1974).

Los datos obtenidos de la identificación mediante DRX se han analizado según la calicata de obtención, los materiales geológicos y la profundidad de obtención de las muestras (Fig. 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los minerales identificados en todas las muestras en proporciones que varían entre el 30 y el 95% han sido los siguientes silicatos: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y filosilicatos. Además se han identificado carbonatos tipo calcita (CM-6, CM-10 y CM-21), sulfatos como yeso (solo en muestras superficiales), basanita, anhidrita (en muestras superficiales y profundas) y glauberita (Na₂Ca(SO₄)₂), hidroxisulfatos como humberstonita (Na₇K₃Mg₂(SO₄)₆(NO₃)₂·6H₂O), cloruros como halita y en una única muestra (CM-10 en superficie) magnetita (Fe₃O₄).

El análisis de los valores de resistividad y de la caracterización mineralógica ha permitido diferenciar tres niveles que se corresponden con las tres formaciones geológicas presentes en la zona. La Tabla V resume los valores de resistividad y de composición mineralógica expresada en % de silicatos, sulfatos, carbonatos y otras sales para cada capa muestreada.

La capa más superficial (0,0) engloba los materiales QHa y QPla. Es en la única capa donde se ha encontrado yeso, lo que indica un cierto grado de hidratación superficial. Los valores de resistividad obtenidos son algo superiores a los valores propios de su composición. Esto puede explicarse atendiendo a las condiciones ambientales como son la alta temperatura

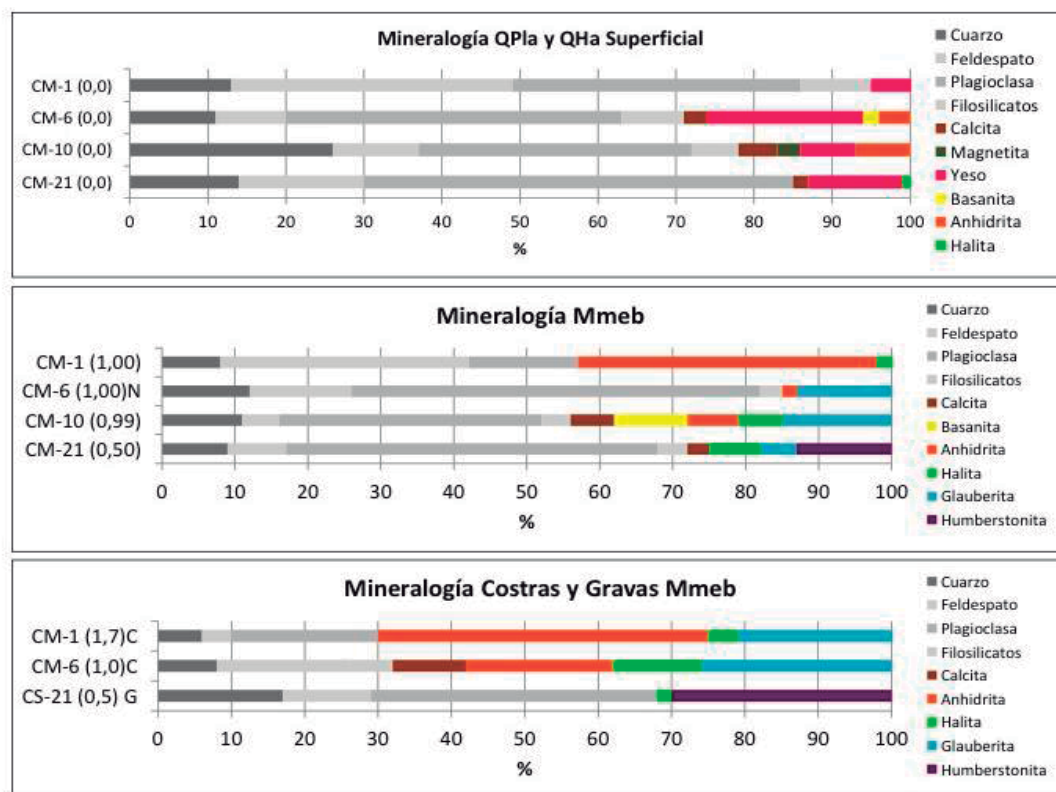


FIGURA 3. Identificación mineralógica en función de la formación geológica de procedencia de las muestras.

y la casi nula humedad que aumenta la resistividad al disminuir la componente electrolítica en la roca.

La capa intermedia se corresponde con la Fm. El Batea (Mmeb). Esta capa contiene principalmente silicatos y sales, con una porosidad decreciente a base debido a la formación de un cemento compuesto fundamentalmente por anhidrita, glauberita y halita. Todas las fases minerales son deshidratadas a excepción del sulfato-nitrato, humberstonita, que presenta 6 moléculas de agua. La génesis de dicho mineral según Pueyo *et al.*, (1998) se debe a la deposición de salmueras en la porosidad primaria durante el Oligoceno-Mioceno según diferentes secuencias de precipitación como son: (Glauberita-bloedita)-humberstonita-halita o halita-humberstonita-nitrato-(halita). La resistividad de esta formación es del orden de 10^7 - $10^8 \Omega \cdot m$. La ausencia casi total de humedad, la reducida porosidad y la composición son

Material	Capa			
	Superficial	Intermedia	Base	
Prof. Techo (m)	0.00	0.00	0.36-0.85	0.60-1.40
Prof. Base(m)	0.85	0.36-0.7	0.60-1.40	>0.60-1.40
Log ρ ($\Omega \cdot m$)	6	5	7-8	3-4
Silicatos %	94	71-85	56-85	-
Carbonatos %	-	2-5	0-6	-
Sulfatos cálcicos %	6	0-26	0-41	-
Resto de sales %	-	0-2	3-25	-

TABLA V. Valores de resistividad y composicionales por capas.

los principales responsables de la extrema resistividad ya que se mide la resistividad de sus minerales casi en estado puro (Telford *et al.*, 1990).

Los valores de resistividad obtenidos para la Fm Calama (MPa) concuerdan con los valores propios de las gravas en condiciones normales. Esto implica la presencia de cierta humedad y un cierto aislamiento de las condiciones atmosféricas extremas, que debe estar producido por los niveles cementados de la Fm El Batea. Estos datos no han podido ser contrastados con la mineralogía por la ausencia de muestreo.

CONCLUSIONES

Los datos extremos de resistividad encontrados en la Fm. El Batea (Mmeb), pueden explicarse debido a los siguientes factores:

- Ausencia total de humedad en las muestras analizadas. Este hecho reduce la componente electrolítica del comportamiento eléctrico de esta formación, siendo los valores obtenidos casi los de las fases minerales puras (resistividad conductiva).
- Reducida porosidad de las formaciones superiores (QHa, QPla y Mmeb).
- Composición silicatada y salina de los minerales de esta formación.

Estos factores se deben, sin duda, a las extremas condiciones ambientales de la zona de estudio. Los valores de resistividad de la formación infrayacente (Fm. Calama), se corresponden con los propios de sus litologías. Estos valores más normales se deben al efecto de aislamiento a la evapotranspiración que ha supuesto la formación suprayacente (El Batea), aislándola de las condiciones ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un resumen del TFM del Máster en Ingeniería Geológica de la Facultad de CC Geológicas (UCM) de Nieves Sanjuán titulado "Caracterización geofísica y mineralógica para el diseño de tomas a tierra en una planta solar fotovoltaica en el desierto de Atacama (Chile)". Los autores agradecen a la empresa GEOINTEC, Geotecnia e Ingeniería del Terreno S.L., en especial a Francisco Parra Idreos, la adquisición de datos geofísicos así como la toma de muestras.

REFERENCIAS

- Chung, F.H. (1974): Quantitative interpretation of X-Ray diffraction patterns of mixtures I. Matrix-Flushing method for quantitative multicomponent analysis. *Journal of Applied Crystallography*, 7: 519-531.
- Medina, E., Jensen, A., Niemeyer, H., Wilke, H-G., Cembrano, J., García, M., Riquelme, R., Espinoza, S. y Chong, D. (2012): *Carta Geológica de Chile, serie geología básica escala 1:100.000*. N°1 141-142 Cartas Tocopilla y María Elena, Región de Antofagasta, Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Naranjo, J. y Paskoff, R. (1982): Estratigrafía de las unidades cenozoicas de la cuenca del río Loa en la pampa del Tamarugal, región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 15: 49-57.
- Niemeyer, H. y Urrutia, C. (2009): Transcurrencia a lo largo de la Falla Sierra de Varas (Sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko), norte de Chile. *Andean Geology*, 36: 37-49.
- Pueyo, J.J., Chong, G. y Vega, M. (1998): Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 25(1): 3-15.
- Riquelme, R., Martinod, J., Hérial, G., Darrozes, J. y Charrier, R. (2003): A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics*, 361: 255-275.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. (1990): *Applied Geophysics* (2nd Ed.) Cambridge Univ. Press, 770 p.
- Vargas, G., Ortlieb, L. y Rutllant, J. (2000): Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile*, 27: 157-176.