

El salar de Uyuni

Fausto A. Balderrama F.

Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Universidad Técnica de Oruro
faustoabf@gmail.com

Resumen

El Salar de Uyuni es la costra de sal más grande del mundo. Tiene una extensión aproximada de 10,000 km². Esta costra de sal está formada básicamente por halita porosa llena de una salmuera intersticial rica en litio, potasio, boro y magnesio.

Perforaciones realizadas en el Salar de Uyuni, indican que está formada por capas intercaladas de costras de sal porosas y de sedimentos lacustres. La perforación más profunda realizada hasta la fecha en el Salar de Uyuni es de 220.6 m. Aún no se conoce la profundidad total del Salar.

En base a 40 perforaciones realizadas en la primera costra de sal, que tiene un espesor promedio de 4.7 m, se estimó una reserva de 8.9 millones de toneladas de litio y 194 millones de toneladas de potasio disueltos en la salmuera intersticial. A la fecha no se han realizado suficientes perforaciones en el resto de las costras salinas como para cuantificar las reservas totales en litio y potasio; sin embargo, se presume que son inmensas.

Palabras clave: Salar de Uyuni, reservas, litio, potasio.

The Uyuni salt lake

Abstract

The Uyuni salt lake is the biggest salt crust around the world. Its length is approximately 10,000 km². This salt crust is formed of porous halite, filled of a interstitial brine rich in lithium, potassium, magnesium and boron.

Perforations made in the Uyuni salt lake show that it's formed by interstitial layers of porous halite filled of a brine rich in lithium, potassium, boron and magnesium. The deepest perforation made until now in the Uyuni salt lake has 220.6 meters. It's still unknown the total depth of the salt lake.

Based on 40 perforations made in the first crust, which has a average thickness of 4.7 m, a estimation of a reserve composed by 8.9 millions of lithium tons and 194 millions of potassium tons was made. There aren't enough perforations in the rest of the saline crusts to quantify the total lithium and potassium reserves, but it's supposed that they are huge.

Key words: Uyuni salt lake, reserve, lithium, potassium.

O salar de Uyuni

Resumo

O salar de Uyuni é a maior crosta de sal do mundo. O seu comprimento é aproximadamente 10,000 km². A crosta de sal está composta principalmente de halita porosa, cheia duma salmoura intersticial rica em lítio, potássio, magnésio e boro.

As furações feitas no salar de Uyuni mostram que está composta por camadas alternadas de crostas de sal porosas e de sedimentos lacustres. As crostas de sal estão formadas pela halita porosa cheias de salmoura rica em lítio, potássio, boro e magnésio. A furação mais profunda até agora feita no salar de Uyuni tem uma profundidade de 220.6 m. Ainda a profundidade total do salar não é conhecida.

Baseando-se nas 40 furações feitas na primeira crosta de sal, que tem uma espessura média de 4.7 m, pode se estimar uma reserva de 9.9 milhões de lítio e 194 milhões de potássio dissolvido na salmoura intersticial. Até agora não foram feitas furações suficientes nas demais crostas salinas para quantificar as reservas totais de lítio e potássio, embora se pense que são imensas.

Palavras chave: Salar de Uyuni, reserva, lítio, potássio.

1. Introducción

El Salar de Uyuni se encuentra en el Altiplano Boliviano, en la parte Sud Oeste del País, a una altura de 3,653 m sobre el nivel del mar (figura 1). El Altiplano Boliviano, es una cuenca cerrada de aproximadamente 200,000 km². Se encuentra entre las Cordilleras Oriental y Occidental de los Andes.

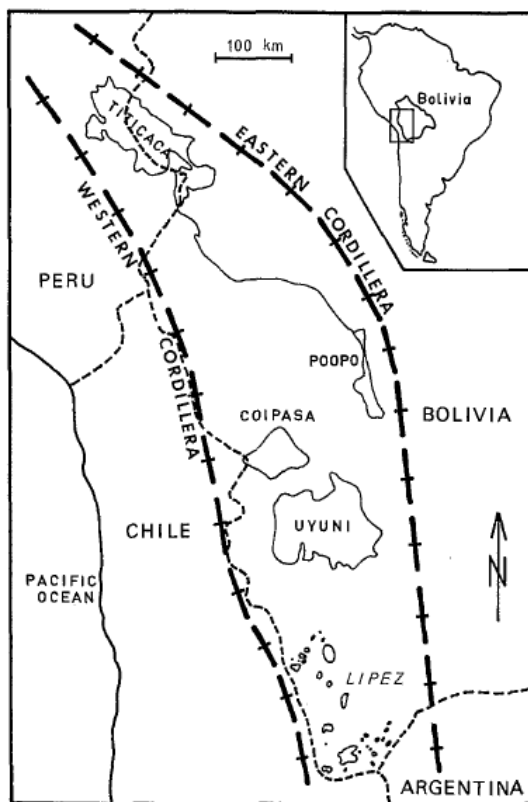


Figura 1. Ubicación del Salar de Uyuni [1].

El Salar de Uyuni tiene una extensión aproximada de 10,000 km², de superficie y es la costra de sal más grande del mundo. Esta costra de sal está formada, básicamente por halita porosa llena de una salmuera intersticial muy rica en litio, potasio, boro y magnesio. El salar proviene de la sequía del extenso Lago Salado Tauca (figura 2), que existió aproximadamente hace 10,000 a 13,000 años [2].

En 1985, la ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación, dentro del marco del convenio UMSA-ORSTOM-CIRESU, utilizando una perforadora rotativa saca-testigo realizó perforaciones en el Salar de Uyuni. La perforación más profunda llegó hasta 121

metros en la zona central del Salar y atravesó 12 costras de sal. Encontraron que las costras de sal están separadas entre ellas por sedimentos lacustres impermeables.

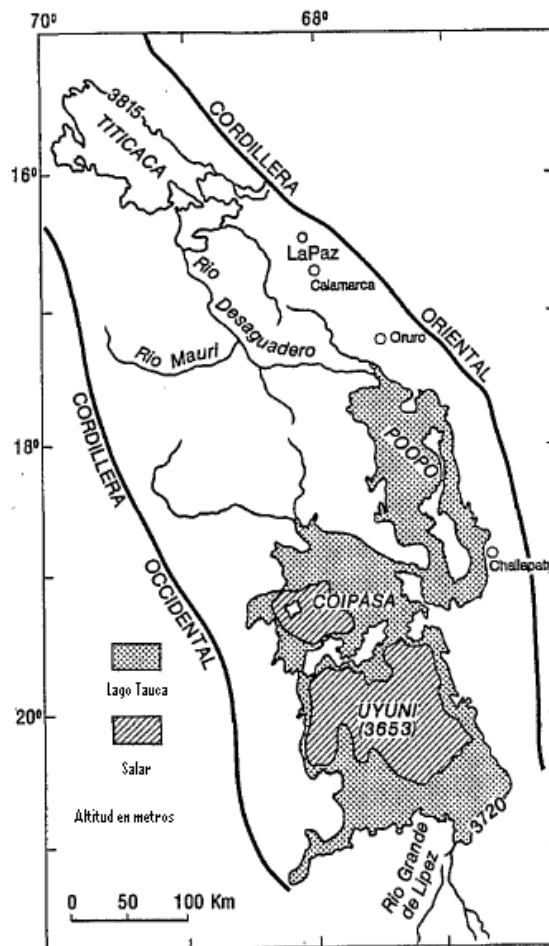


Figura 2. Lago Tauca [2].

Debido a que la salmuera de la costra superficial (primera costra salina), es la que posee las concentraciones más altas en litio, potasio y boro y decidieron explorarla detalladamente. Perforaron 40 pozos en la costra superficial y solamente un pozo profundo en la zona central del Salar; además realizaron 26 pozos manuales (con pala, picota y taladro) en los sedimentos deltaicos de la desembocadura del río Grande. La figura 3, muestra la ubicación de las perforaciones realizadas. En total analizaron 194 salmueras de todos los niveles del salar. Todos estos datos permitieron tener una descripción precisa del Salar de Uyuni [3].

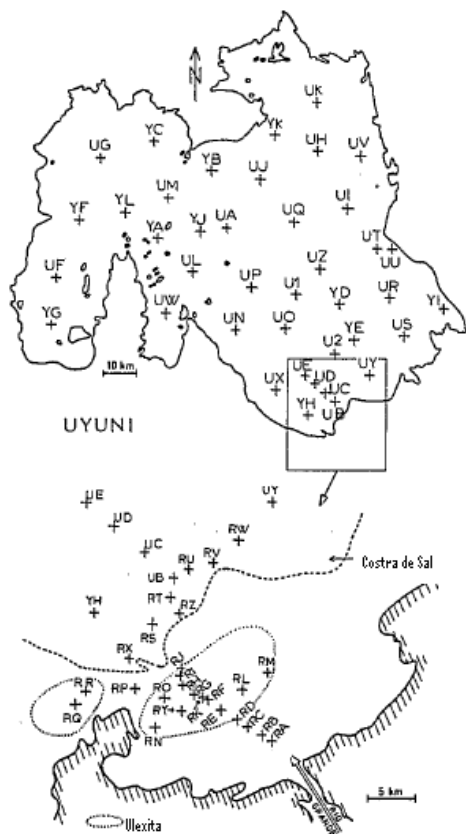


Figura 3. Mapa de ubicación de los pozos perforados en el Salar de Uyuni [4].

2. La costra superficial

La costra superficial tiene un espesor variable. El espesor máximo es de 10 metros. La figura 4, muestra las curvas de espesores de la costra superficial.

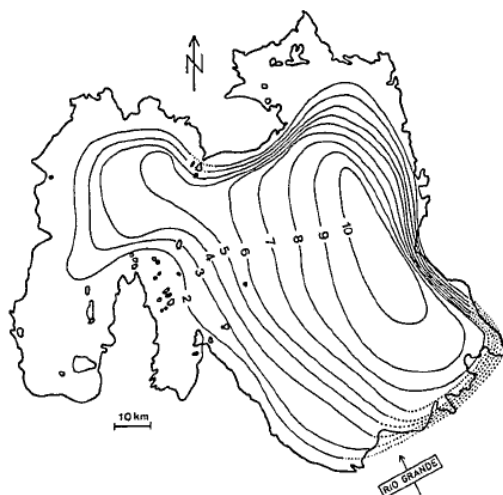


Figura 4. Curvas de isoespesores de la costra superficial en metros [4].

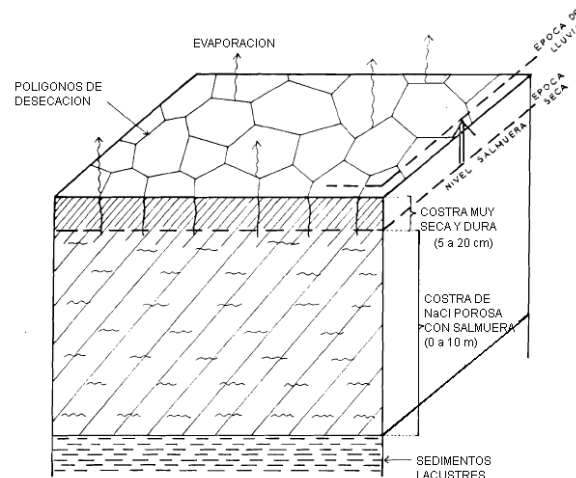


Figura 5. Estructura de la costra superficial [3].

La costra está formada principalmente por capas de halita porosa (88-99%), pequeñas cantidades de yeso en grano fino (1-10%), detritus (0-2%) y salmuera intersticial. La halita es de alta pureza, 98.5 a 99.8%. Debajo de la costra salina existen sedimentos lacustres impermeables. La figura 5, muestra un esquema de la estructura de la costra superficial.

Durante la temporada de lluvias, diciembre a marzo, el Salar está completamente inundado, y durante el resto del año está seco en casi toda su superficie.

En la estación seca, la salmuera se evapora del subsuelo por capilaridad a través de la parte superior de la costra, consolidando un pavimento compacto y duro, que reduce drásticamente la evaporación de salmuera. En esta época el nivel de salmuera se encuentra, por lo general, 5 a 20 cm, por debajo de la superficie. Solamente en la costa sureste del salar, existe salmuera expuesta, unos pocos centímetros por encima de la costra, en pequeñas piscinas irregulares. En la época de lluvias la parte superficial compacta se disuelve parcialmente y el nivel de la salmuera sube por encima de la superficie de unos 10 a 30 centímetros. El Salar se vuelve lago [3].

3. Química de la salmuera

Los componentes mayoritarios de la salmuera son: sodio, magnesio, potasio, litio, boro, calcio, cloruro y sulfato disueltos. En la mayor parte del salar, las salmueras son del tipo Na-Cl con altos contenidos de boro y litio. En la parte sureste del salar, las salmueras están más concentradas y pertenecen al grupo Mg-Cl. Sus contenidos de boro y litio están entre las más altas del mundo y han sido originados a partir de la alteración de las rocas volcánicas de los alrededores [4].

La zona más concentrada en litio, potasio, boro y otros se encuentra al sureste del Salar, cerca de la desembocadura del Río Grande. Esta zona es una anomalía geoquímica producida por los aportes del Río Grande desde hace 10,000 años. En las figuras 6, 7, 8 y 9 se presentan las curvas de isoconcentraciones de Li, K, Mg y B en las salmueras del salar respectivamente [3].

La Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos de Bolivia de la COMIBOL, entidad estatal encargada de la industria-lización de los recursos evaporíticos del país, ha iniciado operaciones, para la producción de cloruro de potasio y carbonato de litio, en la zona más rica del Salar. En la tabla 1, se presenta el análisis químico de una muestra de la salmuera, actualmente bombeada a la planta piloto de la GNREB, y de una muestra del agua del Río Grande de Lipez principal afluente del Salar de Uyuni.

Tabla 1. Análisis Químico de Salmuera Típica Alimentada a la Planta Piloto de la GNREB y del Agua del Río Grande de Lipez.

Elemento	Planta Piloto GNREB[*] (g/l)	Río Grande de Lipez[2] (g/l)
Li	1.75	0.0031
Na	63.29	0.515
K	22.98	0.027
Mg	27.36	0.045
Ca	0.23	0.161
B	1.57	0.010
Cl	187.88	0.875
SO ₄	29.23	0.300
pH	6.57	8.07
Densidad	1.235	1.000

*Análisis realizado en el laboratorio químico de la GNREB.

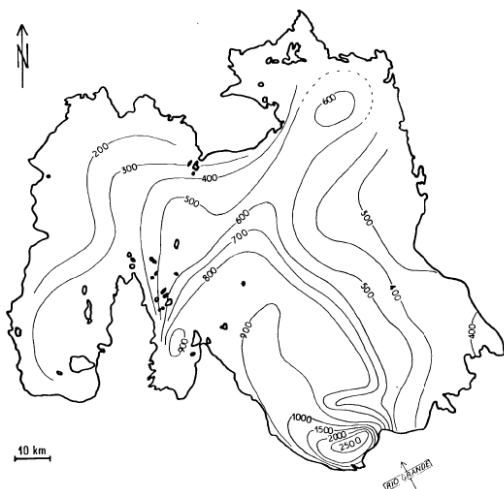


Figura 6. Curva de isoconcentraciones para el litio, en mg/L [3]

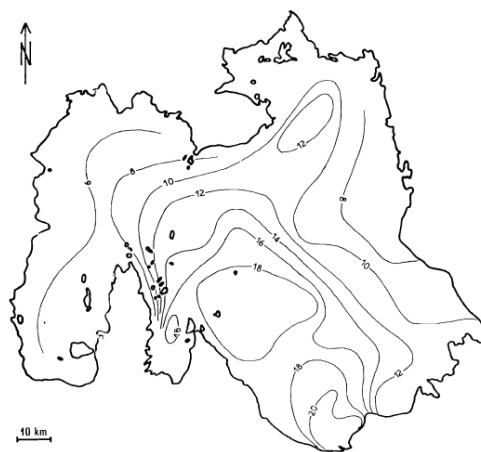


Figura 7. Curva de isoconcentraciones para el potasio, en g/L [3].

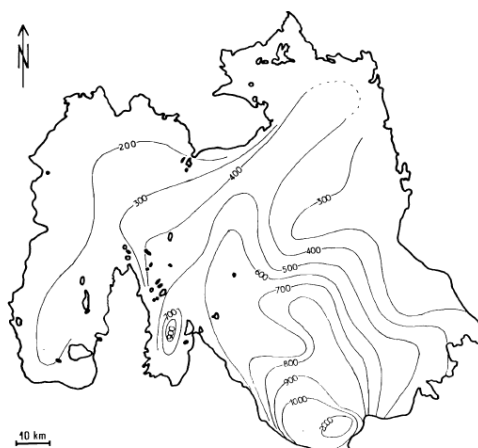


Figura 8. Curva de isoconcentraciones para el boro, en mg/L [3].

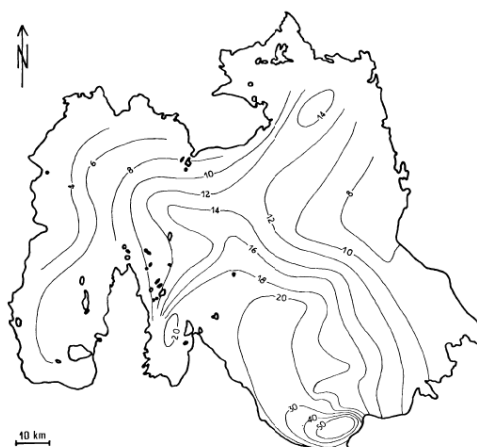


Figura 9. Curva de isoconcentraciones para el magnesio, en g/L [3].

4. Reservas en la salmuera de la costra superficial

Las tablas 2 y 3 muestran los resultados de las estimaciones realizadas por Risacher [3] para el total de las reservas de la costra superficial.

Tabla 2. Medidas y volúmenes de la costra superficial del Salar de Uyuni.

Superficie	10,000 km ²
Espesor promedio	4.7 m
Volumen total	47 x 10 ⁹ m ³
Porosidad	35 %
Volumen de sal	31 x 10 ⁹ m ³
Volumen de salmuera	16.5 x 10 ⁹ m ³

Tabla 3. Reserva total de la costra superficial del Salar de Uyuni.

Elemento	Concentración Promedio (g/l)	Reservas (Millones de toneladas)	Precisión
Li	0.542	8.9	± 1.2
Na	97.3	1600	± 230
K	11.8	194	± 28
Mg	12.8	211	± 30
Ca	0.468	7.7	± 1.1
B	0.466	7.7	± 1.1
Cl	191	3140	± 450
SO ₄	16.9	278	± 40

5. Reservas en la salmuera de la zona más rica de la costra superficial

Las tablas 4 y 5 muestran los resultados de las estimaciones realizadas por Risacher [3] para las reservas que se encuentran

en la zona más rica del salar, es decir, la zona limitada por la curva de isoconcentración media del litio de 1,000 mg/l.

Tabla 4. Medidas y volúmenes de la zona más rica del Salar.

Superficie	276 km ²
Espesor promedio	2.5 m
Volumen total	690 x 10 ⁶ m ³
Porosidad	35 %
Volumen de sal	450 x 10 ⁶ m ³
Volumen de salmuera	240 x 10 ⁶ m ³

Tabla 5. Reserva de la zona más rica del Salar.

Elemento	Concentración Promedio (g/L)	Reservas (Millones de Toneladas)	Precisión
Li	1.80	0.43	± 0.06
Na	50.0	12	± 1.7
K	20.0	4.8	± 0.7
Mg	40.0	9.6	± 1.4
Ca	0.150	0.036	± 0.005
B	1.50	0.36	± 0.05
Cl	200	48	± 7
SO ₄	30.0	7.2	± 1

6. Clima

En el Salar de Uyuni hay dos estaciones climáticas:

- Una época fría y seca de abril a noviembre (invierno).
- Una época menos fría y húmeda de diciembre a marzo (verano, época de lluvia).

En época de lluvia el salar se inunda. La tabla 6 da un resumen de los datos climáticos en la zona de Uyuni.

Tabla 6. Parámetros climáticos del Salar de Uyuni.

	INVIERNO	VERANO
	Época seca y fría Abril-Noviembre	Época tibia y húmeda Diciembre-Marzo
Temperatura mínima	-20 °C	-5 °C
Temperatura máxima	+10 °C	+25 °C
Vientos dominantes	OESTE	ESTE-NORTE
Lluvias	Nevadas excepcionales	200 mm/año
Evaporación potencial	1000 a 1500 mm/año	

7. Sedimentos Lacustres

Debajo de la costra de sal, se encuentran sedimentos lacustres finos, laminados e impermeables, formados de material detrítico, yeso microcristalino, calcita, materia orgánica y pequeñas cantidades de minerales de arcilla (esmeclita e illita). En promedio la porosidad de los sedimentos lacustres es de 50%. Están llenos de salmuera intersticial [4].

8. Sedimentos Fluviodeltaicos

El principal afluente permanente del Salar de Uyuni es el Río Grande. Este río drena las formaciones volcánicas del sur, y ha formado un delta de 300 km² que se interpenetra con la costra de sal (figura 3). El delta es un complejo sistema de capas de arcilla que contiene lentes de limo y arena. Predominan ampliamente minerales arcillosos, principalmente meclita con

algo de illita y poca caolinita. En general, los sedimentos del delta tienen una porosidad y permeabilidad bajas.

Sedimentos lacustres, similares a las que se encuentran por debajo de la costra de sal, están en la base de las formaciones fluviodeltaicas. En general, el nivel freático se encuentra cerca del contacto entre los sedimentos lacustres y deltaicos. Calcita (CaCO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y ulexita ($\text{NaCaBO}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) se precipitan en los sedimentos del delta. Aquí está el mayor depósito de boratos de Bolivia (figura 3) [4].

9. Profundidad del Salar de Uyuni

La figura 10, muestra el perfil estratigráfico y de contenido de Li, K, Mg y B del pozo perforado en la parte central del salar [3]. Ese sondeo llegó a 121 metros de profundidad y atravesó 12 costras de sal separadas por 11 niveles lacustres que corresponden a igual número de fases lacustres. Se encontró que todo el perfil está saturado por salmueras intersticiales al igual que en la costra superficial. Las sales y los sedimentos lacustres son muy similares a los que se han descrito en la costra superficial. No parece haber una reducción de la

porosidad con la profundidad. Se puede notar que el espesor de las costras aumenta con la profundidad y que, al contrario, el espesor de los niveles lacustres disminuye.

En el verano de 1999 un grupo de investigadores encabezados por Paul A. Baker [5] de la Universidad de Duke (USA), con el propósito de coleccionar muestras de sedimentos y estudiar la historia del clima de Sud América, perforaron 220.6 m debajo de la superficie en el centro del Salar ($20^\circ 14.97' \text{S}$, $67^\circ 30.03' \text{O}$). Encontraron la misma secuencia de costras de sal porosas y sedimentos lacustres que encontró Risacher.

Hasta la fecha no se conoce la profundidad del Salar de Uyuni pero se sabe que en la parte central es de al menos de 220.6 metros.

Solamente se han cuantificado las reservas en las salmueras de la costra superficial. No se han cuantificado las reservas en las más de 12 costras salinas que hay bajo la superficie del salar. Para este propósito se necesitarían perforar varios pozos profundos para determinar la estratigrafía y el contenido de Li, K, Mg y B. Sin embargo la reserva es enorme.

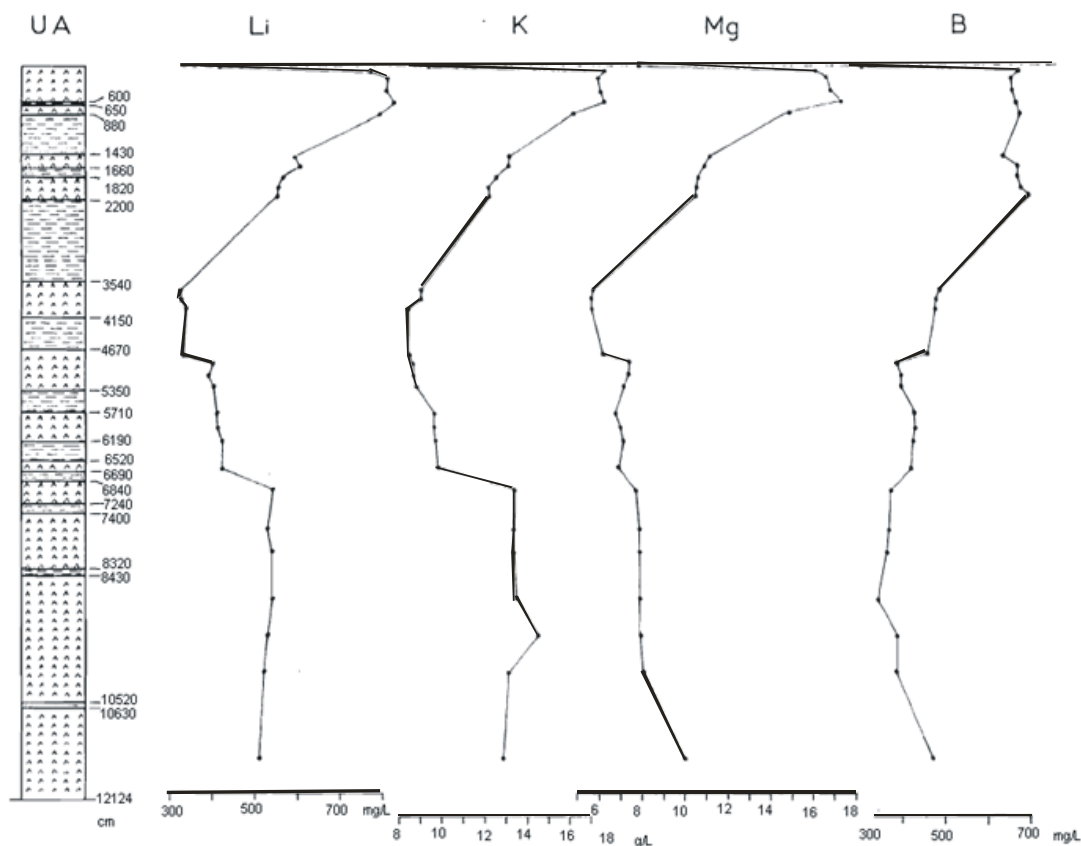


Figura 10. Perfil estratigráfico y de contenido de Li, K, Mg y B del pozo de 121 m, perforado en la parte central del Salar de Uyuni [3].

10. Conclusiones

- El Salar de Uyuni es el Salar más grande del mundo, tiene una extensión aproximada de 10,000 km².
- Perforaciones realizadas en el Salar de Uyuni indican que está formada por capas intercaladas de costras de sal porosas y de sedimentos lacustres. Las costras de sal están formadas, básicamente por halita porosa llena de una salmuera intersticial rica en litio, potasio, boro y magnesio.
- La perforación más profunda realizada hasta la fecha en el Salar de Uyuni es de 220.6 m. Aún no se conoce la profundidad del Salar.
- El espesor promedio de la primera costra de sal es de 4.7 m y tiene una reserva de 8.9 millones de toneladas de litio y 194 millones de toneladas de potasio disueltos en la salmuera intersticial.
- Aún no se han cuantificado las reservas que existen en las salmueras del resto de las más de 12 costras de sal.

11. Referencias bibliográficas

1. RISACHER F. and FRITZ B. "Geochemistry of Bolivian salars, Lipez, southern Altiplano: Origin of solutes and brine evolution". *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 55, pp. 687-705. 1991.
2. RETTIG S., JONES B., y RISACHER F. "Geochemical Evolution of Brines in The Salar of Uyuni, Bolivia". *Chemical Geology*, 30 pp. 57-79. 1980.
3. RISACHER F. *Estudio Economico del Salar de Uyuni*. 1989. ORSTOM. Informe N° 17.
4. RISACHER F. and FRITZ B. "Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia". *Chemical Geology*, Vol. 90 pp. 211-231. 1991.
5. BAKER, et al. "Tropical Climate Changes at Millennial and Orbital Timescales on the Bolivian Altiplano". *Nature*. 409, pp. 698-701. February 8, 2001.