

**UNIVERSIDAD MAYOR
DE
SAN ANDRES**

**OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE - MER**

LOS SALARES DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

**METODOS DE ESTUDIO
Y
ESTIMACION ECONOMICA**

O. BALLIVIAN

F. RISACHER

UNIVERSIDAD MAYOR
DE
SAN ANDRES

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE - MER

LOS SALARES DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

METODOS DE ESTUDIO
Y
ESTIMACION ECONOMICA

O. BALLIVIAN
F. RISACHER

O. R. S. T. O. M.
PARIS
1981

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, « que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées « à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but « d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le « consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une « contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal».

**UNIVERSIDAD MAYOR
DE
SAN ANDRES**

**OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE - MER**

**LES BASSINS À ÉVAPORITES DE
L'ALTIPLANO BOLIVIEN (LES SALARS)**

**METHODES D'ÉTUDE
ET
ÉVALUATION ÉCONOMIQUE**

**O. BALLIVIAN
F. RISACHER**

**O.R.S.T.O.M.
PARIS
1981**

RÉSUMÉ

I. PRESENTATION GENERALE DE L'ALTIPLANO (fig. 2 et 16)

L'Altiplano est un vaste bassin fermé plio-quaternaire d'altitude élevée (3700-4500 m) compris entre les Cordillères Orientales et Occidentales des Andes. Sa géologie est celle d'un bassin sédimentaire affecté d'un intense volcanisme récent (rhyodacites), surtout au Sud où les volcans ont sondé les deux Cordillères entre elles, définissant ainsi des petits bassins fermés intravolcaniques.

Le climat est froid et sec. Les précipitations diminuent de 800 mm au Nord à 50 mm au Sud (fig. 1). Les températures minimales passent de -10°C au Nord à -30°C au Sud. L'évaporation peut être estimée entre 1 m et 1,5 m par an pour tout l'Altiplano.

Un climat évaporant et des bassins fermés sont les deux conditions essentielles pour l'établissement de bassins à évaporites (fig. 4). Le centre de l'Altiplano est occupé par le salar de Uyuni, le plus grand lac salé asséché du monde (10 000 km²). Au Sud les bassins intravolcaniques renferment de nombreux salars aux chimismes très variés (halite, gypse, carbonates de sodium, sulfates de sodium, borates).

II. DONNEES ELEMENTAIRES SUR LES SALARS

Trois facteurs essentiels contrôlent la formation d'un salar: un bassin fermé, l'évaporation supérieure à la pluviosité et des infiltrations réduites. Les eaux douces qui alimentent le bassin vont ainsi pouvoir se concentrer par évaporation et précipiter des sels soit par évaporation directe d'une nappe d'eau libre, soit par évaporation de la frange capillaire au-dessus d'une nappe souterraine (fig. 6). Le premier mécanisme concentre la nappe libre; le deuxième laisse la nappe inchangée puisque celle-ci élimine aussi bien de l'eau que des sels.

On peut distinguer 4 types morphologiques de salars :

- le lac salé au fond plus ou moins imperméable;
- la croûte de sel, provenant de l'assèchement d'un lac salé;
- une nappe sub-affleurante dans un sédiment perméable (sables ou gravats. Les mares superficielles sont des affleurements de la nappe;

- une nappe captive sous des sédiments imperméables. En surface un petit lac est indépendant de la nappe. Ce cas est le plus fréquent en Bolivie.

. Origine des eaux et des éléments en solution

Bien que le climat soit très aride l'eau est abondante. Les sources sont nombreuses et proviennent surtout de nappes qui se déchargent, et accessoirement de remontées thermales. L'origine de ces nappes est à rechercher dans l'histoire lacustre récente de ces bassins. Les éléments dissous dans les eaux proviennent essentiellement de l'altération des roches des bassins versants. L'apport par les pluies est difficile à estimer.

. Evolution des eaux par évaporation

Une eau douce qui se concentre par évaporation va précipiter les sels depuis les moins solubles jusqu'aux plus solubles (fig. 9). Le premier sel qui précipite est la calcite : CaCO_3 . Sa précipitation induit deux voies évolutives distinctes: l'une où l'eau s'enrichit en Ca et s'appauvrit en CO_3 (voie calcique, neutre) et l'autre qui fait l'inverse (voie carbonatée, alcaline), ceci afin de maintenir le produit $(\text{Ca}) \times (\text{CO}_3)$ constant tout au long de la précipitation. La formation de silicates de magnésium (argiles) en produisant des ions H^+ , qui neutralisent les carbonates, peut faire dévier la voie carbonatée vers la voie calcique. La précipitation du gypse, dans la voie calcique, induit de nouveau deux voies évolutives: l'une qui s'enrichit en SO_4 et s'appauvrit en Ca, et l'autre qui fait l'inverse. On en arrive donc à distinguer les 3 saumures fondamentales: Na - CO_3 - Cl, Na - SO_4 - Cl et Na - Ca - Cl.

Le type d'évolution va tout d'abord dépendre de la litologie du bassin de drainage, laquelle détermine la composition des eaux douces, donc des rapports initiaux entre les éléments en solution (rapports Ca/CO_3 , Ca/SO_4 etc...). Par la suite l'interaction de ces eaux avec les sédiments des bassins peut faire dévier l'évolution par évaporation de ces eaux. (Néofonnations argileuses, action de la matière

organique). Ainsi de nombreux salars boliviens devraient être carbonates sodiques ($\text{Na} - \text{SO}_4 - \text{Cl}$). Une méthode simple de calcul permet de prévoir le type général de saumure que l'on obtient à partir d'une eau douce, lorsqu'il n'y a aucune interaction avec des sédiments. Une classification sommaire des salars en fonction de la litologie du bassin de drainage et du type d'interaction eaux-sédiments a pu être ébauchée (fig. 10).

III. METHODES D'ETUDES DES SALARS

La première phase de reconnaissance d'un salar doit permettre de définir rapidement son chimisme général. Une première estimation très grossière de ses réserves peut être donnée (sels dissous et sels cristallisés). La méthode dépend du type de salar envisagé. Il est très difficile d'estimer la profondeur d'une nappe souterraine. Un lac ou une croûte de sel sont plus faciles à étudier. Leur géométrie est facilement déterminable.

La deuxième phase d'estimation quantitative, plus précise, demande des moyens plus substantiels. On distingue les gisements de précipitation directe (syngénétiques) : ce sont les croûtes superficielles, les gisements diagénétiques : ce sont les croûtes de dépôts capillaires dans les sédiments, et enfin les gisements de saumures, où les sels sont dissous. Les gisements diagénétiques capillaires sont très discontinus et demandent de nombreux sondages. Les gisements syngénétiques et de saumures sont beaucoup plus homogènes.

Quelques conseils sont donnés sur l'échantillonnage (éviter la déshydratation rapide des sel prélevés). Quelques mesures spéciales, très simples à réaliser sont indiquées: la détermination du débit d'un cours d'eau, la détermination des vitesses d'infiltration superficielles et l'estimation de l'évaporation d'une nappe souterraine.

IV. ETUDE DE LA RENOVABILITE DES GISEMENTS DE SELS

Ce chapitre est à la fois le plus ardu et le plus important de ce travail, car il a des conséquences non seulement économiques, mais

également fondamentales. Chaque année il entre une certaine quantité de sels dans le salar, mais il en part aussi par infiltration et par déflation éolienne. Il s'agit d'estimer ces valeurs afin d'avoir une idée sur la durée d'exploitation de ces gisements. Mais ces résultats permettent également d'établir les mouvements d'eaux et de sels dans ces bassins.

Le premier cas étudié est celui des lacs salés (fig. 11 et 12). Deux hypothèses fondamentales doivent être faites: (1) aucun lac ne se trouve actuellement dans une phase de dilution et (2) les niveaux de ces lacs sont stables. Connaissant les valeurs des précipitations et de l'évaporation annuelles, ainsi que les concentrations moyennes en sels dissous des eaux douces et du lac, on calcule aisément les limites inférieures et supérieures des quantités de sels qui entrent et restent chaque année dans le lac. Souvent ces deux valeurs sont fort proche l'une de l'autre, donnant ainsi une idée assez précise non seulement des apports en sels, mais également des infiltrations par le fond du lac. En divisant la quantité totale de sels présents dans le lac par la quantité de sels qui entrent dans le lac et y restent, on obtient une valeur, en années, représentant un événement particulier dans l'histoire du bassin. (Il ne représente son âge que très exceptionnellement, et pour les salars les plus jeunes).

On étudie ensuite le cas beaucoup plus délicat des nappes souterraines et dépôts capillaires associés (fig. 13, 14a, 14b). Si l'on arrive à estimer l'évaporation de la nappe (fig. 15) on peut calculer la quantité de sels déposés chaque année par capillarité au-dessus de celle-ci. Le calcul théorique montre qu'une nappe souterraine soumise à des départs de sels par capillarité peut fort bien se diluer lentement si les apports en sels depuis le bassin sont inférieurs aux pertes par dépôts capillaires. Il y a transfert des sels depuis la nappe jusqu'aux sédiments. Les conséquences sont surtout importantes pour l'histoire géochimique de ces bassins.

Toutes ces estimations mettent facilement en évidence une relation globale entre la surface du salar et la quantité de sels qui entre chaque année, ce qui est logique. On en conclut qu'il est illu-

soire de compter sur la renouvelabilité de gisements dont la surface est inférieure à 100 km². Leur renouvelabilité est négligeable.

V. ETUDE DU SALAR DE UYUNI (fig. 18 à 22)

Le salar de Uyuni est la plus grande croûte de sel du monde (10 000 km²). Il provient de l'assèchement du lac Tauca (12 000 - 10 000 ans BP) et occupe la dépression centrale de l'Altiplano. Son épaisseur atteint 12-13 mètres. Cette croûte de halite (NaCl) est très poreuse (30-40 %) et renferme une saumure résiduelle. Sous la croûte deux sondages ont atteint le niveau lacustre imperméable. On peut donc quantifier les réserves en tous les sels et éléments présents dans le salar. Il y a 5 millions de tonnes de lithium (autant que toutes les réserves mondiales connues jusqu'à présent), 3 millions de tonnes de bore, 100 millions de tonnes de potassium.

On a pris le problème par l'autre bout, c'est à dire par l'ancien lac Tauca. On connaît son extension et son volume (800 km³). Il a été possible d'estimer sa composition chimique. On suppose que la composition des principaux apports n'a pas changé depuis 10 000 ans ce qui est raisonnable: la géologie des bassins versants n'ayant pas changé. On calcule ensuite ce que deviennent ces apports au cours d'une concentration par évaporation jusqu'à obtenir la concentration en NaCl du lac Tauca estimée à 80 g/l à partir du NaCl effectivement présent dans la croûte de sel. On devrait donc retrouver, dissous dans le lac Tauca les mêmes quantités de Li, B, K... que celles présentes aujourd'hui dans le salar de Uyuni. Or il n'en est rien. Il manque 90 à 95 % du Li, B, K, Mg... On suppose donc une infiltration très lente de la saumure (1 mm/an) par le fond du bassin, la saumure d'assèchement originelle du lac Tauca ayant été remplacée progressivement par une saumure plus diluée. On peut donc espérer rencontrer des saumures plus concentrées en profondeur, sous le salar de Uyuni. Ceci peut avoir un grand intérêt économique, mais seuls des sondages profonds, délicats à réaliser, pourraient apporter une réponse définitive.

VI. ETUDE DES AUTRES SALARS (fig. 23 à 30)

Une vingtaine de salars ont été étudiés d'un point de vue économique, certains avec une bonne précision pour les calculs de réserves et de renouvelabilité. Pour la plupart, cependant, seuls des ordres de grandeurs ont pu être donnés.

. Les salars carbonatés sodiques

On en connaît 5 Callpa Laguna, Hedionda Sur, Honda Sur, Cachi Laguna et Khara Laguna. Ils totalisent environ 100 000 à 150 000 tonnes de Na_2CO_3 , et ne sont pas renouvelables à l'échelle humaine.

. Les salars sulfatés sodiques

Canapa, Laguna Colorada. Il s'agit surtout de gisements de sels capillaires ou en saumures souterraines. Les réserves sont très délicates à estimer. Elles sont en tout cas faibles, sans doute moins de 100 000 tonnes récupérables de Na_2SO_4 .

. Les salars boratés

On connaît 5 grands gisements d'ulexite ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) : Rio Grande (en bordure du Salar de Uyuni), Challviri, Capina, Pastos Grandes et Laguari. Rio Grande est le plus grand gisement bolivien : 1 600 000 tonnes de bore exprimé sous forme d'ulexite. Les autres gisements sont nettement moins riches. La saumure du salar de Uyuni contient 3 millions de tonnes de bore dissout, mais sa récupération n'est pas simple.

. Les réserves en lithium

Le lithium est presque toujours associé au bore (fig. 3). C'est donc dans les boratières que l'on trouvera les plus fortes concentrations en Li (4 g/l à Rio Grande). La saumure du salar de Uyuni constitue la principale réserve en Li (5M de tonnes).

Beaucoup d'autres salars ont été étudiés: leur intérêt économique est nul. Les calculs de réserves et de renouvelabilité ont cependant été réalisés, afin d'éliminer une fois pour toutes les "rumeurs" sur leur intérêt économique et sur la présence imaginaire de certains sels (boratés notamment). De tels résultats sont néanmoins fort utiles pour une étude plus scientifique (estimation des infiltrations, importance de celles-ci en fonction de l'âge des salars).

. Conclusion

Seul le salar de Uyuni présente un intérêt économique à l'échelle industrielle. Ses réserves en Li, B, K sont énormes. En outre la présence de quantités presque illimitées de NaCl et l'abondance des calcaires sur son pourtour (algues Minchin) pourraient servir à la fabrication de carbonates de sodium par le procédé Solvay.

A LA MEMORIA DEL ING. ANTONIO
ECHENIQUE, QUIEN EN CIERTO MO-
DO FUE EL INSPIRADOR DEL PRE-
SENTE TRABAJO.

CON SU ESPIRITU ALEGRE DE BUEN
COMPAÑERO SE CONSTITUYO EN ES-
PECIAL COMPAÑIA EN ALGUNOS DE
LOS VIAJES POR LAS ARIDAS Y A-
GRESTES REGIONES ALTIPLANICAS.

PRESENTACION

El programa general de Geodinámica externa fue impulsado por el Dr. Luis Alberto RODRIGO G., profesor a la Universidad Mayor de San Andrés, miembro de la Academia de Ciencias, y por el Dr. Michel SERVANT de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

Tres temas han sido desarrollados: la Geología del Cuaternario, la Limnología de los Lagos Titicaca y Poopo, y la Geoquímica de las Evaporitas. Este trabajo presenta el aspecto económico de los estudios de las cuencas evaporíticas del Altiplano.

El estudio de los salares del Altiplano boliviano, se inició en Marzo de 1975, y constituye uno de los tres programas del Convenio existente entre la Universidad Mayor de San Andrés y el Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer de Francia, en el que participan investigadores franceses y bolivianos de la U.M.S.A.

El objetivo de este programa en el campo científico general, consiste en estudiar las cuencas evaporíticas de gran importancia por su extensión (más de 13 000 km² en total), por una diversidad de faciés geoquímicas y por su génesis ligada a la desecación de los grandes lagos antiguos (Pleistocenos). En el campo de la aplicación práctica, se trata de evidenciar las sales útiles y las concentraciones de elementos susceptibles de ser explotados económicamente (Litio, Potasio, Boro, etc).

Este último punto es el que se vá a desarrollar en forma preferencial.

Este trabajo se divide en dos partes : una primera parte teórica, donde se dan los lineamientos generales del estudio de cualquier salar o laguna; y una segunda parte, que describe cada salar o laguna individualmente, tomando en cuenta su aspecto económico.

Los cálculos de reserva, pocas veces son precisos, más bien se ha tratado de dar un orden de magnitud de las reservas, así como de su renovabilidad.

Este trabajo no está concluído, representa un primer paso para el conocimiento integral de los salares, falta mucho por hacer. Varios salares y lagunas del Altiplano no han sido reconocidos y en otros, la investigación ha sido muy elemental. Este estudio se limita a presentar el estado actual de nuestros conocimientos de los salares bolivianos.

AGRADECIMIENTOS. Nuestro gran deseo es manifestar el agradecimiento más sincero a las personas que directa e indirectamente colaboraron, para que este modesto estudio sea una realidad.

GEOBOL en la persona de su Director, Ing. José Ponce, que nos facilitó el acceso a la biblioteca. El profesor J-Ch. Fontes corrigió cuidadosamente el manuscrito, dando observaciones interesantes. Con el profesor H. Faure, dieron su visto bueno para la publicación. Ministerio de Minas por intermedio del Lic. Sotomayor, también colaboró para el ingreso a la biblioteca, del mismo modo es una obligación agradecer a este Ministerio por habernos permitido alojarnos en su campamento de Laguna Colorada.

QUIMBABOL, bajo la Dirección del Mayor Alfredo Ampuero, impulsó los estudios de reserva de carbonatos de sodio, en el Sud-Lípez. El Inq. Antonio Echenique, profesional de COSSMIL, siempre estuvo presente con comunicaciones verbales y bibliografía especializada. La mayor parte de los análisis químicos de aguas del Sud-Lípez, fueron realizados en los laboratorios de ORSTOM, en Bondy-Francia, por el Dr. Pinta y su equipo. Los análisis de salmueras del Salar de Uyuni, fueron realizados por la Dra. S.L. Rettig del Servicio Geológico de Estados Unidos.

En el mismo escenario de trabajo, colaboró con dedicación y eficiencia mucha gente.

Primeramente queremos agradecer a la familia Barrero de Laguna Verde por su siempre gentil acogida, en su establecimiento minero. Varios lugareños proporcionaron una colaboración, sin la cual no se hubiera podido llevar a cabo este trabajo. Entre otros, los principales fueron los hermanos Olegario y Felipe Mamani de Mina Corina, los hermanos Tomás y Santos Saire de Quetena Grande; Carlos Ali de Río Grande y los mineros de la cooperativa minera Abra de Napa.

A todas las personas anteriormente nombradas les agradecemos muy sinceramente.

P R I M E R A P A R T E

LOS SALARES EN GENERAL
PRESENTACION Y METODOS DE ESTUDIOS

Capítulo I

CUADRO GENERAL DEL AREA DE INVESTIGACION

A. INTRODUCCION

Al empezar el presente capítulo, sería normal precisar la ubicación de la zona de estudio, haciendo referencia a las distintas vías de comunicación, que permiten su acceso. No hacemos así, en virtud de que el área es por demás extendida, por lo tanto venos necesario para mayor comprensión, que tales detalles deban transmitirse en un capítulo próximo, donde se describiran las cuencas evaporíticas en forma individual.

De todas manera se adelanta que la totalidad de lagunas y salares estudiados, se encuentran en la cuenca altiplánica Sud, extensa depresión sin desague, ubicada entre las cordilleras Oriental y Occidental. Específicamente el área se circunscribe a los departamentos de Oruro y Potosí y dentro de estos a las provincias Ladislao Cabrera, Daniel Campos, Quijarro, Norte y Sur Lípez.

B. CLIMA

El clima de la región es de altura, seco y frío, precipitación baja, radiación solar intensa y fuertes vientos.

La región occidental del Altiplano Sur, está caracterizada por su bajísimo nivel de precipitación pluvial, la que se presenta generalmente en los meses de diciembre, enero y febrero, el resto del año la precipitación es nula.

Algunas estaciones meteorológicas han realizado medidas promedio, que varían sensiblemente de Norte a Sur del Altiplano, los valores más altos al Norte, entre 500 a 600 mm anuales, disminuyen paulatinamente al Sur llegando a medidas inferiores a los 100 mm anuales (Fig. 1).

Las temperaturas registradas en la zona son las más bajas de Bolivia, las mínimas de invierno (mayo a agosto) descienden en la noche a valores extremos de hasta -25° a -30° , subiendo en el día hasta los 15° con normalidad (Fig. 1).

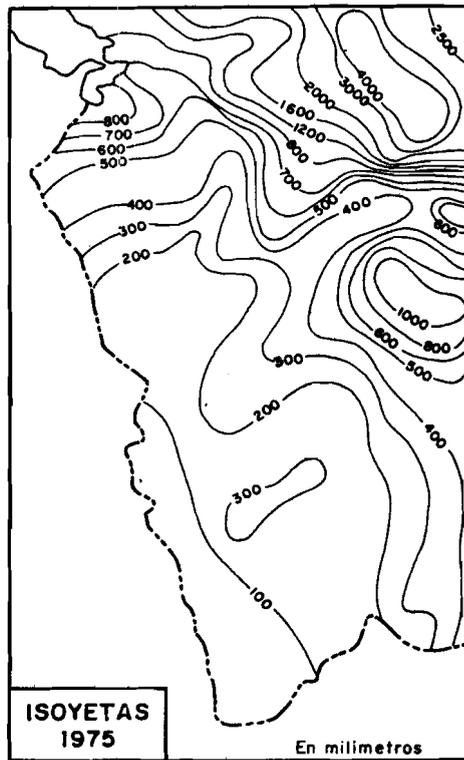
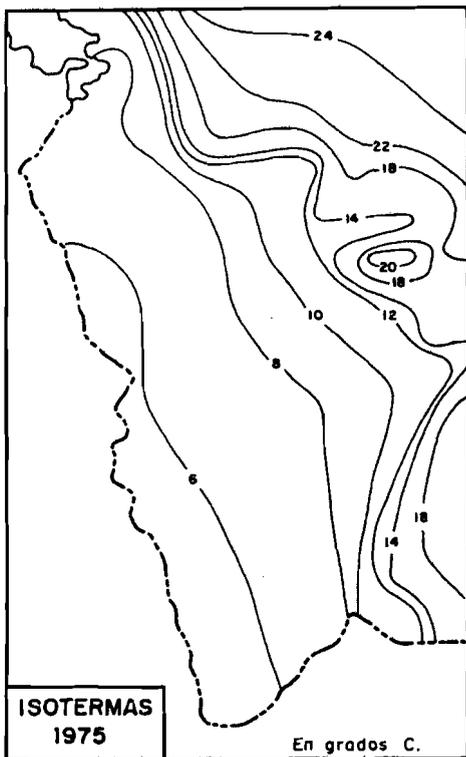


Fig.1

Los meses de verano son más moderados, pero de todas maneras las heladas pueden sucederse con facilidad y el clima sigue siendo frío, presentándose diferencias térmicas entre -3° a 20° .

El fenómeno climático de incidencia especial en la zona, es sin duda el viento, especialmente en los meses invernales donde las proporciones se elevan a niveles peligrosos de hasta 60 km/h de velocidad. Los vientos tienen una dirección predominante Noreste-Sudoeste, siendo una característica muy especial los cambios de intensidad y dirección según la hora del día, pasada las 16 horas este problema se acentúa.

Otro aspecto digno de mencionarse es el de insolación e irradiación solar, según las apreciaciones hechas por el programa ERTS, esta zona posee uno de los niveles de radiación solar más alto del planeta. "Por la altura en que se encuentra el Altiplano, se supone que este soporta sólo las 2/3 partes de la masa atmosférica, que toleran las regiones a nivel del mar, por lo tanto permiten una mayor insolación y también una mayor irradiación del suelo".

Por tal motivo, existen oscilaciones diarias, que en promedio están dentro del orden de los 20°C . (Estudio socio-económico integral del Altiplano Sur. Ministerio de Minería y Metalurgia - Bolivia).

Con respecto a la evaporación podemos decir que es intensa, debido en gran parte a la radiación solar, los productos generados por la escasa precipitación se ven disminuidos por la evaporación, que presenta valores extremos de hasta 6 mm diarios. Es de acotar que estos valores se ven incrementados, por la existencia casi continua de fuertes vientos.

En realidad no hay una altura de evaporación anual definida y constante para toda la zona. Cada lago se evapora de manera particular debido a dos factores que controlan esta evaporación: la temperatura mínima de la zona y la salinidad del lago. Mientras más salada es una agua, menos se evapora. Por cada 10 g/l de NaCl la evaporación se reduce en 1% en relación a la de una agua dulce. Por ejemplo una salmuera de 350 g/l tiene una evaporación reducida de 35%. Esta proporción

de l% puede aumentar con el contenido en magnesio (TURK, 1970). Siempre se hará la corrección para cada laguna tomando como altura de evaporación de una agua dulce 1500 mm/año. Pero otro factor fundamental es la temperatura de la atmósfera. Mientras más frío hace, más tiempo se congela el agua y menos se evapora. Pero mientras más salada es una agua, más baja es su temperatura de congelamiento y menos tiempo quedará congelada. No se discutirá más estos mecanismos, pero será evidente que la evaporación no presenta un valor constante y que depende mucho de las características químicas de los lagos.

El análisis del clima realizado era de gran importancia efectuarlo, por cuanto su influencia debido a la interacción de sus variables como ser : altitud, frío, precipitaciones mínimas pero localizadas, como también la radiación, insolación, etc, se constituyen en efectos vitales para comprender la meteorización y erosión de las rocas, cuyos productos posteriormente serán los que definan la calidad de los depósitos evaporíticos formados.

Tomando en cuenta los factores climáticos antes señalados, consideramos al intemperismo mecánico como el más importante por lo menos al principio del ciclo geoquímico.

Por ejemplo, cuando las gotas de agua se congelan en el interior de una fractura de roca, la presión debida a la expansión del agua congelada, genera suficiente energía para desarrollar fragmentos en esa roca, o bien esta, por efecto de la gravedad desciende sobre la pendiente. No hay que despreciar los cambios de temperatura debido a las oscilaciones térmicas diurnas y nocturnas, que si son suficientemente rápidos y elevados pueden provocar la desintegración de los cuerpos rocosos.

Los resultados resaltan a la vista, grandes pendientes revestidas en superficie por innumerables fragmentos que constituyen un regolito, que proporcionan una mayor superficie de alteración, estos fragmentos inconsolidados ruedan pendiente abajo, ayudados por la gravedad y las lluvias estacionales, hasta las depresiones más bajas, donde en contacto con el agua, actúa la alteración y descomposición.

El viento no sólo colabora en el transporte de los materiales generados por la desintegración, sino también es un claro modelador del paisaje de la región. Las rocas volcánicas que presentan resistencias diferenciales a la deflación, van logrando formas esculpidas, semejantes a pilares, hongos, agujas, edificios, etc. Es fácil observar orificios, raspaduras y distintas clases de cavidades que son resultado de estos efectos.

C) RECURSOS NATURALES

Lógicamente el clima también es determinante en cuanto el asentamiento humano y los recursos naturales. La única población importante en el área de estudio es Uyuni (6000 habitantes), centro ferroviario donde existen todo tipo de servicios públicos, como ser : Hospital, correo, telégrafo, farmacias, estaciones de servicio vehicular y atención de expendio de combustibles, se constituye en un lugar de posta para aprovisionamientos varios. Fuera de esta población las restantes son sin ninguna importancia y sólo sirven de campamento temporal de operaciones, entre ellas tenemos : Soniquera, Alota, Quetena, Chiguana, Río Grande, Julaca y establecimientos mineros varios como ser : Mina Corina, Laguna Verde, Río Blanco, Laguna Colorada, etc.

La agricultura y ganadería son pobres, de todas maneras peleando un poco con la naturaleza, y contando con sectores de suelos vírgenes, se pueden producir ciertos cereales y legumbres. La ganadería está constituida por rebaños de ovinos y llamas.

El abastecimiento de agua es casi normal, pues aunque es un clima árido y seco, existe un río importante de curso permanente que nace en las alturas de Quetena Grande y corre hacia el N, atravesando casi toda la llanura Sur, para insumirse en el majestuoso salar de Uyuni, este río es el Río Grande de Lipez; existe otro curso de menos importancia en el centro vital de las operaciones de investigación, es el Río Tapaquilcha que se origina en manantiales a la altura del cerro "Jachulluncani" y se infiltra después de poco recorrido en la Laguna Cañapa; existen otros pequeños que no vale la pena enumerar, solamente acotar que el agua no es sólo superficial, si no más bien existen in- finidad de manantiales, alimentados por aguas subterráneas, producto

de infiltraciones de agua de lluvias, también es clara y notoria la presencia de fuentes termales, que le dan al paisaje una característica particular. Debido a la existencia de agua en cantidades normales, la fauna salvaje es importante.

Lagos y Lagunas se encuentran poblados por infinidad de aves a cuales más vistosas, la pariguanas, patos, huallatas, son algunos de los ejemplos, las pampas se ven recorridas por perdices y ñandus. Tropas de vicuñas no son raras, sectores de rocas amontonadas, son territorios adecuados para la vida de viscachas y distintos roedores. La vegetación es pobre debido a la inclemencia del clima, pero existen superficies planas tapizadas por paja brava y thola, las laderas de sector en sector presentan la apreciada planta llamada Yareta, estas dos últimas, sirven como combustibles precioso que alimenta, hornos, cocinas y estufas de los pocos pobladores.

D) GEOMORFOLOGIA Y GEOLOGIA EN GENERAL

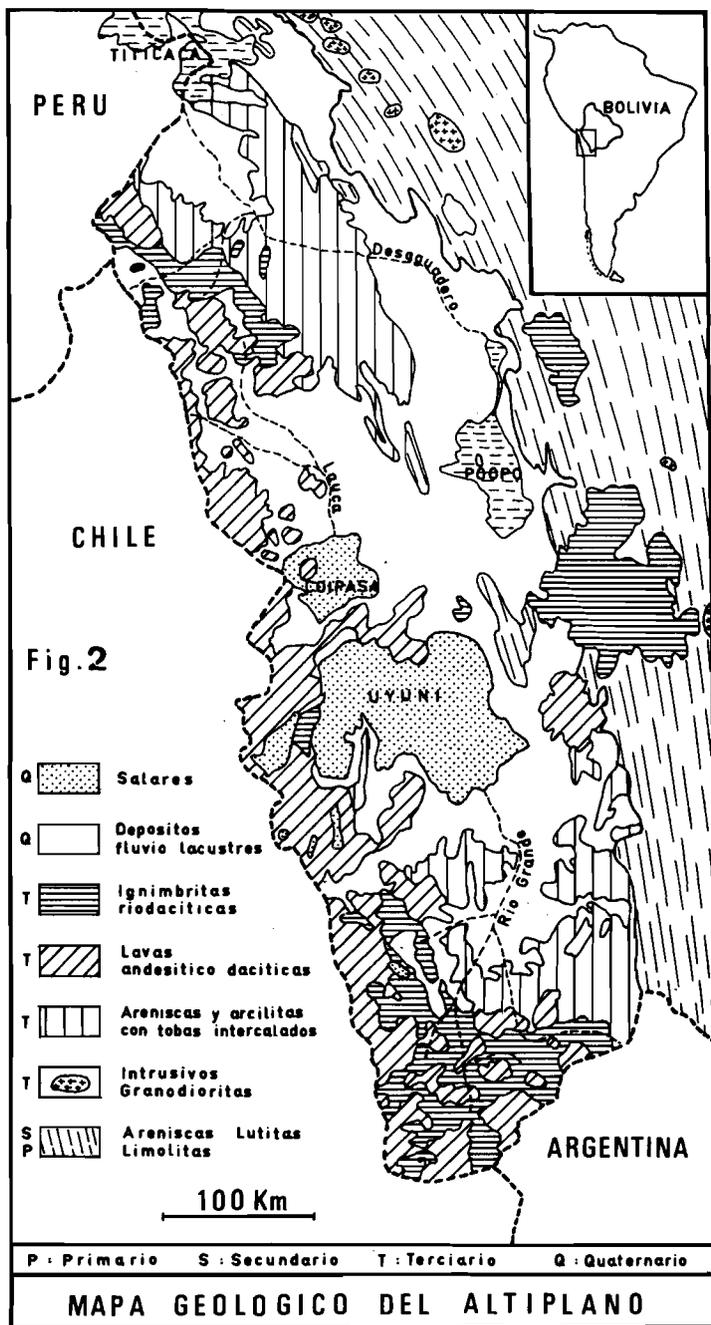
1. Geología general del Altiplano (Fig. 2)

Al dar comienzo a este párrafo, es necesario aclarar que aunque el área estudiada con más detalle es la correspondiente al Altiplano Sur, se hace imposible para una mejor comprensión, dejar de referirnos en forma general a toda la unidad morfoestructural llamada Altiplano.

El motivo es muy claro, y es debido a que este trabajo está dirigido a un conocimiento de los terrenos aflorantes, que han tenido influencia, a través de sus cuencas de drenaje, con los depósitos evaporíticos de los salares.

De esta manera, podemos adelantar, que en distintos sectores de una misma cuenca, en relación con aportes de áreas diferentes, las sales formadas en cantidad y calidad pueden variar.

El Altiplano presenta una estratigrafía distinta según los sectores (Mapa Geológico de Bolivia, 1978, YFPB-GEOBOL) por ejemplo, el Altiplano Norte, está caracterizado por presentar diferentes tipos



de rocas devónicas, constituidas por areniscas y lutitas. En los alrededores del lago Titicaca es fácil encontrar rocas del carbonífero, constituidas por una intercalación de areniscas blanquecinas y limos gris verdosos. También por el Lago Titicaca se han identificado calizas fosilíferas de color gris claro, en alternancia con lutitas gris oscuras correspondientes al Pérmico.

El Terciario se encuentra ampliamente difundido en el Altiplano Norte, rocas sedimentarias de la Fm. Umala son características en el área del río Desaguadero, areniscas, arcillas y conglomerados son los sedimentos más típicos. En el sector NO, las ignimbritas de composición riódacítica de la Fm. Pérez, se encuentran cubriendo superficies muy amplias.

El sistema Cuaternario también se encuentra ampliamente difundido en el Altiplano Norte, capas subhorizontales de tobas, ignimbritas, coladas de lava, etc., son de amplia difusión. Sedimentos lacustres de la Fm. Ulloma con fósiles de vertebrados, han sido descritos por numerosos autores.

Además fuera de la litología anteriormente indicada, en este sector de la altiplanicie, se identificaron sedimentos finos compuestos de calizas, margas, arenas finas, arcillas y limos, correspondientes a las hoyas lacustres conocidos como Ballivián, Minchin y Taucá.

Es de acotar que también se han identificado cuerpos de naturaleza magmática de edad mesozoica y cenozoica, que se encuentran flanqueando el Altiplano, flanco oriental, pero con gran influencia sobre este, son rocas que corresponden petrográficamente a granitos, granodioritas, monzonitas, fonolitas y otras.

En el Altiplano medio, en la zona de Sevaruyo y alrededores se han reconocido calizas cretácicas y cuerpos yesíferos masivos, que juntamente con las rocas paleozoicas aflorantes al Este del lago Poopó, tienen una gran influencia sobre la cuenca mencionada.

Antes de empezar una descripción más completa del Altiplano Sur, nos referiremos en forma muy general al sector SE del Altiplano.

Esta región tiene una geología que contrasta efectivamente con el W, mientras que este sector es eminentemente volcánico. El E presenta afloramientos de rocas sedimentarias correspondientes al Paleozoico bajo y especialmente areniscas, conglomerados, arcillas, yeso con intercalaciones de tobas y lavas correspondientes al Terciario que cubren grandes áreas (Mapa Geológico de Bolivia, 1978).

Nos referiremos ahora en forma especial al sector SE del Altiplano por considerar a esta área, la más relacionada con las numerosas cuencas estudiadas.

2. Geología de la zona de Los Lípez

Haciendo un análisis fisiográfico de la región investigada, es claro determinar tres tipos morfológicos característicos, que son los siguientes :

- a) Grandes planicies ignimbríticas.
- b) Cadena volcánica.
- c) Cuencas cerradas de lagos y salares.

La primera corresponde al manto ignimbrítico que a manera de un plateau cubre gran parte de la extensa región de los Lípez, la presencia de estas rocas está relacionada a la primera etapa de actividad volcánica, se trata de los conocidos productos de efusiones de fisuras, se supone que el material ha sido expulsado aprovechando las fracturas de rumbo N-S y otras, para luego recorrer grandes distancias rellenando el paleorelieve.

El segundo relieve característico, está constituido por la presencia de cadenas montañosas volcánicas, que en gran parte hacen de límite fronterizo con Chile, tienen una alineación preferencia N-S, y sus picos se elevan a altitudes importantes que oscilan entre 5000 a 6000 metros (como ejemplos, Cañapa, Tapaquilcha, Cachi Laguna, Cañata, Caquella, Araral y otros).

No es raro encontrar conos volcánicos aislados, que sobresalen en las extensas planicies, como testigos mudos de un época volcá-

nica intensa.

Es posible encontrar otras manifestaciones volcánicas, que parecen reflejar una edad más reciente de formación, pero con características geomórficas aproximadamente similares.

Estas cadenas volcánicas contrastan claramente en su morfología con las ignimbritas subyacentes, que las han precedido en su formación.

El tercer tipo de morfología que caracteriza al Altiplano son las pequeñas y grandes cuencas endorreicas que forman lagunas y salares.

En la zona específica de investigación se presentan las tres unidades fisiográficas; ellas observan diferente reacción ante los agentes mecánicos del intemperismo. Por ejemplo, los grandes campos ignimbríticos, por acción de los vientos y lluvias de estación presentan diferentes tipos de figuras esculpidas, dando la apariencia de ser las rocas más expuestas a los fenómenos erosivos.

Las lavas muestran un paisaje caracterizado por formas lobuladas de superficies muy ásperas y redondeadas, lógicamente según el tipo de rocas y posición, estas son afectadas en mayor o menor proporción por los agentes erosivos.

Luego es necesario acotar que existen aparatos volcánicos que presentan mayor conservación, seguramente debido a que corresponden a la tercera y última etapa volcánica.

E) ESTRATIGRAFIA

El conocimiento actual de la estratigrafía del SE, todavía es insuficiente, si bien se conocen numerosos trabajos geológicos en la zona, la estratigrafía detallada de las vulcanitas aflorantes, todavía puede ser tema de nuevas investigaciones.

Consideraciones generales de geología y especializadas de

petrografía, han sido emitadas por diversos autores en distintas épocas : entre ellos, AHLFELD y BRANISA, 1960; AHLFELD, 1972; GONZALES, 1969; JORDAN y RIVAS, 1973; KUSSMAUL et al., 1972; MEAVE, 1972; RISACHER, 1976; FERNANDEZ et al., 1972; ECHENIQUE, BALLIVIAN y RISACHER, 1977; ERICKSEN et al., 1977 y uno de los trabajos actualizados sobre estratigrafía es el realizado por CARRASCO, 1978. El describe aunque en forma muy general el vulcanismo de la región Sud occidental de Bolivia; siendo que el presente trabajo no es estratigráfico, nuestras observaciones fueron al respecto, muy superficiales, motivo por el que nos servimos de la mencionada publicación para hacer una apretada síntesis de la Geología de la región Sud occidental de Bolivia.

Los afloramientos más antiguos en la región corresponden a estratos plegados asignados al Ordovícico, Cretácico y Terciario.

Las manifestaciones más antiguas de actividad volcánica en los Lípez, se encuentran dentro la formación Quehua.

Exposiciones de la Formación Quehua, se presentan en ventanas de poca extensión. Los afloramientos entre Laguna Cañapa y Laguna Hedionda constituyen los más Occidentales; litológicamente la Formación Quehua esta constituida por estratos areniscosos y arcillosos de coloración rojiza, con intercalaciones de tobas y aglomerados piroclásticos, situados en posición discordante subyacente al manto ignimbrítico. VILLARROEL (1978) mediante evaluación de datos paleontológicos con edades radiométricas, asigna a esta formación una edad Miocena Superior. Esta edad inicia la actividad volcánica Cenozoica, en territorio boliviano.

El complejo volcánico de los Lípez agrupa a todas las rocas de origen volcánico que reposan en discordancia sobre estratos plegados terciarios y cuya difusión es amplia en los Lípez. Este complejo está constituido por las siguientes unidades litoestratigráficas de origen volcánico.

Terciario : lavas Terciarias (posiblemente lavas de Julaca) parecen corresponder a la fase inicial de las erupciones de tipo central de la región, infrayacen a estos los mantos ignimbríticos.

Petrográficamente corresponden a lavas microporfíricas, de composición Riodacítica biotítica.

Terciario Cuaternario : Formación Alota : Mantos ignimbriticos subhorizontales de composición riolítica a riodacítica. Petrográficamente las ignimbritas corresponden a rocas de composición riolítica a riodacítica de color blanco a rosado claro con variaciones de dureza y compactación. El espesor de esta formación fluctúa entre 100 a 500 metros, su origen está asociado a una acción efusiva de tipo fisural y por tal razón deben existir varios ejes de flujo de las ignimbritas. Tentativamente en base a criterios petrológicos se correlaciona esta unidad a la formación Pérez (EVERDEN, 1966), dió una edad entre 1,9 a 10,2 MA.

Cuaternario : Formación estrato volcanes : capas de lavas dacíticas-andesítica intercaladas con piroclastos, son estructuras volcánicas que están constituidas generalmente por una sucesión de capas lávicas y piroclásticas. Composición entre dacitas y latíandesitas, generalmente, de coloración gris oscura. La denominación estratovolcan, corresponde a sus características morfológicas similares a estratos sedimentarios.

Cuaternario más moderno : Flujos de lavas, domos, conos volcánicos y otros productos volcánicos, se encuentran en los flancos de numerosas estructuras volcánicas cónicas. Los criterios de diferenciación con fines de mapeo regional son principalmente morfológicos. Composición que varia entre riodacitas y dacitas, textura porfírica de grano grueso. Según dataciones radiométricas realizadas por Geobol, en lavas dacíticas, determinó una edad de 0,6 M.A.

En las cuencas de drenaje, de influencia de las lagunas y salares específicos de la investigación, se han realizado observaciones de los cuerpos rocosos aflorantes. De ellos se pudo extraer conclusiones petrográficas y estratigráficas, que vienen a coincidir en gran parte con las de CARRASCO (1978), y son las siguientes : rocas correspondiente a la formación Quehua podemos asociar "con duda" a un afloramiento pequeño, situado entre Laguna Cañapa y Honda. Luego se puede afirmar que las ignimbritas de la Formación Alota se encuentran

formando superficies subhorizontales amplias en diversos sectores del área (Lagunas Cachi, Ramaditas, Pastos Grandes, Collpa Laguna, Hedionda Sur, Khara, Capina, Cañapa, Hedionda Norte y otras).

Por ejemplo en Cachi Laguna se observa claramente al Este y Sur de la laguna, relieves bajos de colores que varían entre el rosado al rosado grisáceo, se reconoce fácilmente en ellos el grado intenso de intemperismo sufrido por las rocas. Extrayendo muestras frescas de los afloramientos rocosos se identifica el cambio de color a gris blanquecino, con motas de minerales más oscuros que son posiblemente de alteración, presentando colores que varían de rojizo a un verde limón. La roca es granuda de superficie rugosa.

Tanto de las observaciones de la forma del relieve como de la macroscópica de detalle, en la superficie fresca de una muestra, se identifica el grado de alteración de las ignimbritas, se sospecha que estas son las rocas que sufren los procesos mecánicos de meteorización más intensos.

Por otro lado es de suponer que también estos relieves ignimbríticos son los más afectados por la erosión, constituyéndose en el sedimento de aporte, más importante para las pequeñas cuencas endorreicas.

En contraste, se observa el sector Este de Laguna Cachi, donde la morfología corresponde a las típicas vulcanitas que forman aparatos volcánicos de altitud considerable. A simple vista se identifica que los relieves abruptos presentan colores más oscuros (rojo negrusco), cambiando, por sectores a tintes más claros. La meteorización en las superficie de las rocas, es menos intensa en comparación con las anteriores.

Resalta a primera vista que la superficie rocosa por su naturaleza masiva y compacta está menos afectada por el intemperismo.

Lógicamente que por presentar los relieves volcánicos pendientes empinadas y por efecto de congelación, e insolación, numerosos fragmentos rocosos ruedan pendiente abajo, formando, escombros de

talud de potencias variables. Al analizar estos fragmentos se observa que la alteración es menos profunda, en comparación con las correspondientes a las ignimbritas. Este análisis que parece elemental, resulta importante para emitir hipótesis sobre los aportes más importantes a las cuencas, que por lo menos en este sector corresponden a las rocas intemperizadas de las mesetas ignimbríticas.

Otro aspecto que parece de importancia y no siempre la bibliografía especializada lo manifiesta, es lo relacionado con los niveles ignimbríticos; al respecto se ha podido observar en lugares donde la localización de las ignimbritas está relacionada a pendientes suaves, que existen dos niveles y hasta tres de estos, perfectamente identificados (no se observa en Cachi Laguna, sí en las inmediaciones de Collpa Laguna y Quetena Grande).

Singular importancia reviste el hecho del cambio petrográfico de las rocas, ya sean estas del tipo estrato volcanes, lavas, o ignimbritas. Se ha visto por análisis microscópicos y químicos de especímenes obtenidos en el área de investigación, que en distancias cortas pueden existir diferentes tipos petrográficos y químicos de rocas, aunque estas variaciones no presentan grandes contrastes, sí, varían entre rocas riolíticas, hasta latíandesitas como extremo básico.

Para mayor visualización del problema damos un resumen de las características que presentan las muestras que fueron analizadas en laboratorio.

Microscópicamente se puede afirmar que, el stock de ejemplares pueden agruparse con pequeñas diferencias en dos grupos grandes.

El primero que comprende las rocas más ácidas, seguramente Riolitas que presentan cuarzo, feldespato K, plagioclasas y biotita, se nota claramente que el porcentaje de feldespatos K supera en forma clara al de las plagioclasas. El porcentaje de cuarzo es relativamente importante (25 al 30%) y la biotita es de contenidos insignificantes.

Un segundo grupo, seguramente andesitas, donde se identifican contenidos importantes de plagioclasas (65 a 70%), los feldespatos K

resultan ser de importancia secundaria. Se observaron minerales accesorios como ser : biotita, piroxenos, hornblenda en cantidades variables.

Entre estos dos grupos extremos, se identifican rocas que petrográficamente se ubicarían como intermedios a las anteriores, posiblemente riodacitas.

Las muestras de rocas fueron analizadas también por Rayos X, técnica que permitió confirmar especialmente la presencia de algunos minerales característicos de rocas volcánicas ácidas, quedando una pequeña duda, sobre los porcentajes entre los distintos tipos de feldspatos. Por tal motivo se procedió a realizar un análisis químico total de cada muestra, con lo que se resolvió perfectamente el anterior problema, llegándose a la conclusión final de que las rocas del área, se las puede clasificar en tres grupos, riolitas, riodacitas, hasta andesitas.

Siguiendo con una exposición de los sedimentos encontrados en el área de investigación, no podemos dejar de nombrar muchos que corresponden al período cuaternario.

Pensando en los más antiguos, no es difícil observar las costas calcáreas que se encuentran distribuidas desde las inmediaciones del Poopó, en mayor proporción en los alrededores de Uyuni y disminuyendo pero todavía presentes sobre los niveles de los actuales lagos del Sur-Lípez, nos referimos a las antiguas deposiciones del Lago Minchin (27 500 años B.P.) (SERVANT et FONTES, 1978).

En el área específica no se observan depósitos importantes de origen glacial, sin embargo en las laderas de algunos volcanes de Sur Lípez, se encuentran testigos de morrenas laterales y otros rasgos que demuestran que la actividad glacial no estuvo ausente.

En el área de estudio, algo que le da una especial característica es el relleno de las cuencas endorreicas por sedimentos lacustres y depósitos importantes de evaporitas continentales, cuya composición química y relaciones geoquímicas con su cuenca de drenaje, es motivo principal de nuestra investigación, su formación está relacio-

nada con el cuaternario más joven.

Los depósitos coluviales, producto de la acción de la gravedad presentan acumulaciones variadas.

En las partes más bajas de las serranías se detectan acumulaciones de gravas, arenas, limos y otros materiales que constituyen los depósitos aluviales, juntamente con las terrazas más antiguas y las holocenas.

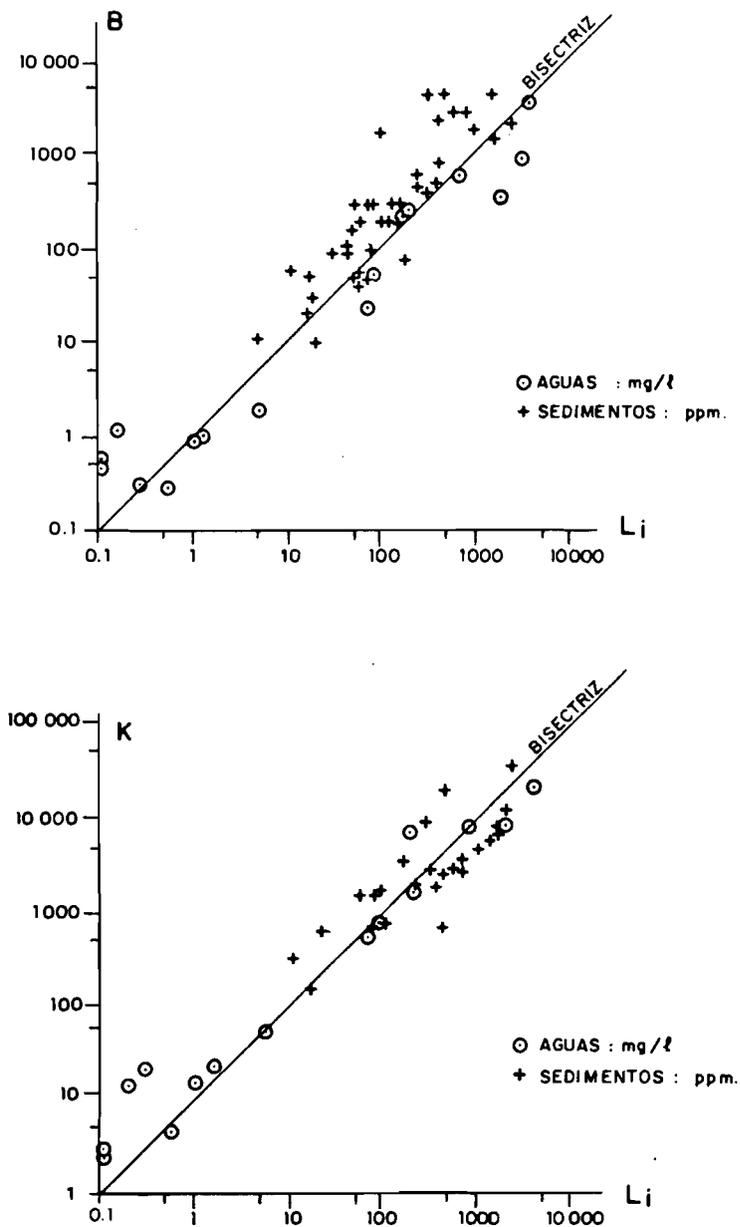
F) RELACION DE LAS ROCAS DE LAS CUENCAS CON CONCENTRACIONES DE SALES Y ELEMENTOS DE INTERES, COMO Li, B, K.

Al terminar el estudio general de la estratigrafía del Altiplano, surgen ideas interesantes que nos parece importante mencionarlas. Se ha visto después de los exámenes de laboratorio, que los valores correspondientes a las concentraciones de algunos elementos, varían sensiblemente sin causa aparente. La respuesta la tenemos justamente en la estrecha vinculación existente entre los depósitos y sus cuencas de drenaje.

Por ejemplo, los tenores interesantes de Li, K, B, coinciden perfectamente en su ubicación con aquellas áreas que reciben la influencia directa de las rocas ignimbríticas, de composición riódacítica y que se encuentran sugestivamente, más afectadas por los fenómenos del intemperismo.

Análisis inéditos cuidadosamente realizados sobre muestras obtenidas en los campos ignimbríticos, dieron valores anormales en contenidos de Li, K y B, clara aserveración de que el origen de estos elementos nace en las rocas volcánicas antes mencionadas, que por procesos mecánicos y químicos de la meteorización se desintegran y conducen a formar depósitos interesantes de estos elementos. Otro aspecto importante es el de la clara asociación de los elementos Li, B y Li, K en las aguas de las zonas volcánicas (RISACHER y MIRANDA, 1976) (ver Fig. 3).

Por otro lado se ha visto en contraposición que en aquellos



RELACION ENTRE Li y B - Li y K

Fig.3

salares que no tienen vinculación con las ignimbritas, más bien sí, una relación con rocas sedimentarias, los contenidos de los elementos antes mencionados son insignificantes o desaparecen.

También ha sido fácil identificar que en ciertas áreas, la evolución de las aguas sufre alteraciones, cuyo origen sólo puede estar en relación con la cuenca de drenaje. Por ejemplo contenidos elevados de Ca^{++} , Mg^{++} , generalmente están vinculados a cuencas de drenaje que presentan rocas volcánicas con fuerte contenido en Plagioclasas.

Otro factor importante que produce cambios en la evolución de la aguas, es la presencia de afloramientos de azufre, en la cuenca de drenaje. Para terminar volvemos a recalcar que la geología de las cuencas de aporte, es fundamental para definir luego, la calidad y cantidad de los depósitos evaporíticos.

G) CUENCAS ANTIGUAS

Se presentará un resumen del trabajo SERVANT et FONTES, 1978.

En el Altiplano se observan un conjunto de cuencas cuaternarias, actualmente ocupadas por los lagos Titicaca y Poopó, o por salares como el Salar de Uyuni, Coipasa y los pequeños del Sud-Lípez. Estos lagos y depresiones que representan los acontecimientos del Holoceno, ha sido precedidos por lacustres más antiguos cuaternarios que ocupaban las depresiones del Altiplano.

Entre ellos podemos considerar en el Norte, el lacustre Ballivián, uno de los más antiguos y conocidos desde mucho tiempo atrás, se localizan sus testigos alrededor del lago Titicaca y ambos lados del Río Desaguadero, hasta la localidad de Ulloma, que marca su límite más austral. Sus sedimentos son esencialmente formados por arenas con intercalaciones de limos y arcillas. Su edad ha sido determinada aproximadamente como fin del Pleistoceno medio, por argumentos geomórficos. En época distinta (27 500 \pm 800 BP y 26 000 \pm 600 años BP) las cuencas de Uyuni, Coipasa y Poopó fueron sumergidas por un espejo de agua del orden de 60 000 km^2 , con un nivel lacustre de 3 760 de altitud, correspondiente al período lacustre Minchin, cuyos depósitos actuales se pre-

sentan bajo dos facies distintas. Sedimentos limo arcillosos y areniscos, algunas veces con diatomitas y arrecifes de algas calcáreas. Los arrecifes de algas calcáreas son espectaculares, encontrándose muy bien desarrolladas en la zona de abrasión litoral. Estos antiguos testigos calcáreos lacustres, se siguen de manera continua sobre grandes distancias, encontrándose los últimos afloramientos sobre los actuales niveles de lagunas y salares del Sur-Lípez.

Por último nos referimos al lacustre TAUCA (10 380 \pm 180 BP a 12 360 \pm 120 BP), que ha interesado a todas las depresiones del Altiplano, pero en el Norte sus testigos son inseguros. Presentan una superficie de 43 000 km² y abarcó Poopó, Uyuni, Coipasa, con testigos en el Sur-Lípez, alrededor de los lagos y salares actuales. Sus sedimentos se componen de diatomitas, sedimentos calcáreos y arcillosos de 2 a 5 m de espesor. Las huellas más altas se encuentran a los 3 720 m.

Se ha tratado con especial atención los lagos antiguos, por la estrecha vinculación de estos con los actuales; además se sabe que la mayoría de los salares actuales, provienen de la sequía de un antiguo. Por otro lado es significativo acotar que los lugares de localización de los lagos y lagunas Holocenas, coinciden con sectores donde se ubicaban los lacustres más antiguos.

Capítulo II

ELEMENTOS BASICOS SOBRE LOS SALARES

A) INTRODUCCION

En este capítulo se presenta la formación de los sales y de los salares y se dan los elementos de comprensión necesarios para su estudio, ya sea desde un punto de vista económico o científico. El conocimiento de estos mecanismos es indispensable para cualquier tipo de exploración y prospección. Para saber donde buscar hay que saber como, donde y porque se han depositado las diferentes sales.

Un lago salado o un salar se forma cuando las aguas dulces pueden concentrarse por evaporación hasta precipitar sus sales disueltas. Primero se verá cuales son los factores que permiten que una agua se puede concentrar, es decir que es lo que controla la existencia de un lago salado o de un salar. Después hablaremos del origen de los elementos disueltos en las aguas dulces que se concentran, y finalmente cuales son las diferentes vías de concentración de esas aguas, y los productos de su deposición.

B) FACTORES QUE CONTROLAN LA FORMACION DE UN SALAR

Hay 3 factores que controlan la existencia de un lago salado o de un salar (EUGSTER and HARDIE, 1979) :

- una cuenca cerrada,
- infiltraciones reducidas,
- evaporación superior a las lluvias.

1. Las cuencas cerradas : pueden tener varios orígenes. Podemos citar como los más comunes :

- la tectónica : Graben, rift. Es el caso de la cuenca altiplánica, tomada globalmente.
- La actividad volcánica. Los flujos de lavas pueden cerrar pequeñas cuencas entre los volcanes (Lípez).
- La acción del viento : la deflación. Puede ser la causa de algunos salares pequeños del Sur-Lípez (Collpa Laguna ?).
- La acción de los glaciares.

Pero puede haber algunas excepciones. Las aguas pueden concentrarse notablemente en su tránsito en una cuenca abierta, cuando el escurrimiento de las aguas es suficientemente lento para que la evaporación tenga un efecto marcado. Es el caso de los pequeños salares en la orilla Oeste del Lago Poopó (Jayu Khota, ver RISACHER, 1978). Se escurren lentamente hacia el Poopó, pero la fuerte evaporación los puede concentrar hasta precipitar la halita.

2. Infiltraciones reducidas : la colmatación de una cuenca es una etapa importante en la formación de un salar. Los sedimentos finos detríticos traídos por las aguas a una cuenca cerrada, poco a poco colmatan el fondo de esa cuenca y reducen progresivamente las infiltraciones de aguas y sales disueltas. Entonces la concentración de las aguas aumenta con la colmatación. Al principio de su historia lacustre el lago de Uyuni era un lago de agua dulce; su colmatación progresiva ha hecho que las concentraciones de los varios lagos que se han sucedido han aumentado (SERVANT-VILDARY, 1978). No hubo uno, sino varios lagos con períodos secos intermedios. Cada lago se volvía más salado que el anterior.

Pero aquí también puede haber excepciones. Si la evaporación es intensa y las infiltraciones importantes, pero lentas, las aguas pueden concentrarse mucho. Es el caso del lago Poopó (CARMOUZE et al., 1978). Es una cuenca cerrada pero las aguas se infiltran en la parte Sur del lago después de haberse concentrado más de 10 veces desde la desembocadura del Desaguadero al Norte del mismo lago.

3. Evaporación superior a las lluvias : si no es el caso, tendremos un factor de dilución permanente debido a las lluvias. El clima y la tectónica son los dos factores que controlan la intensidad de la evaporación en relación con las lluvias.

- El control climático : las principales zonas climáticas en las que la evaporación es superior a las lluvias son las zonas subtropicales y las zonas polares.

- El control Tectónico : altos relieves pueden proteger ciertos terrenos de las lluvias, y almacenar las aguas que caen en las cumbres para después redistribuirlas en cuencas áridas con fuerte evapora-

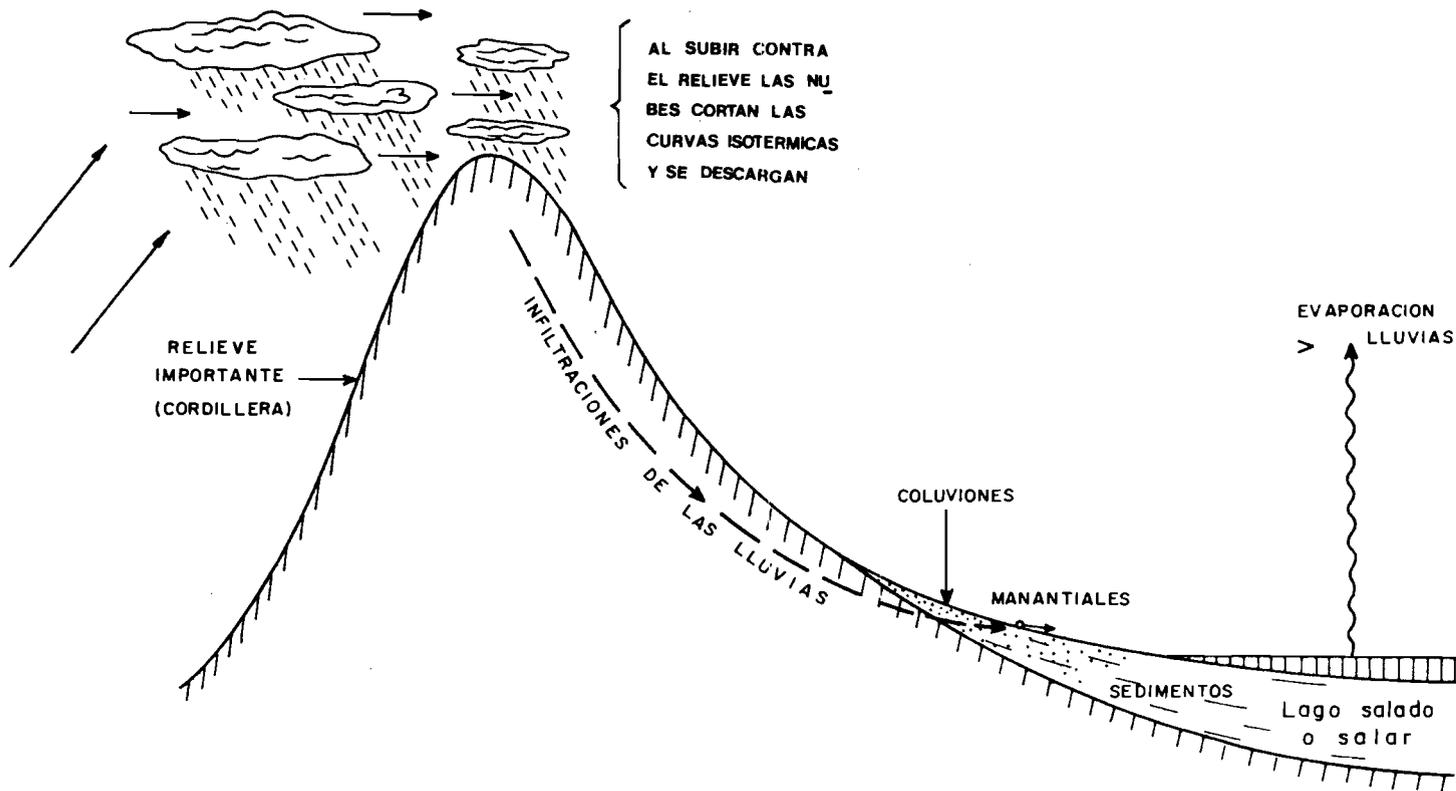


Fig.4 Representación esquemática del control morfoclimático en la formación de los lagos salados y salares.

ción (Fig. 4). Es probablemente el caso del Altiplano Boliviano.

Una vez reunidos esos factores las aguas se van a concentrar por evaporación hasta precipitar las sales según el orden de sus solubilidades crecientes.

C) MECANISMOS FUNDAMENTALES DE LA PRECIPITACION DE LAS SALES

1. Evaporación directa de una capa de agua libre

Todo va a depender de los valores relativos entre el volumen V_o de las aguas que entran en la cuenca y el volumen V_s de las aguas que salen de la cuenca.

$$V_o = v_p + VOR$$

v_p : volumen de aguas que caen directamente encima del lago.

VOR: volumen de aguas que entran por las orillas (Ríos y manantiales).

$$V_s = V_E + V_I$$

V_E : volumen de aguas que se evaporan.

V_I : volumen de aguas que se infiltran

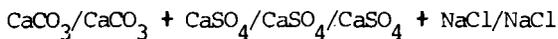
- Si $V_o > V_s$, el nivel del lago va a subir, las concentraciones van a disminuir, y es muy posible que el nivel del agua llegue al punto en que se van a escurrir afuera de la cuenca. La cuenca cerrada se vuelve abierta.

- Si $V_o = V_s$, el nivel del lago es estable. Las aguas se pueden concentrar con los aportes de sales disueltas de las orillas, si las infiltraciones no son mayores (ver cálculo detallado en capítulo IV) VOR trae agua y sales, pero V_E solamente elimina agua del lago, las sales traídas por los ríos y manantiales se quedan en el lago concentrándolo poco a poco.

- Si $V_o < V_s$, el lago se va a secar y va a producir una costra salina. Generalmente esto ocurre a consecuencia de un cambio en las condiciones climáticas. Se forma una costra con doble zonación de

las sales (horizontal y vertical), las menos solubles precipitando las primeras y las más solubles al final (Fig. 5).

En este caso se dice que las sales son singenéticas. En el ejemplo de la Fig. 5 tenemos una zonación $\text{CaCO}_3/\text{CaSO}_4/\text{NaCl}$. En realidad los límites entre las sales no son tan nítidos como en el dibujo. Las precipitaciones se sobreponen. Podemos tener zonaciones (horizontales y verticales) del tipo :



o : $\text{CaCO}_3/\text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4/\text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4 + \text{NaCl}/\text{CaSO}_4 + \text{NaCl}/\text{NaCl}$

Es aproximadamente el caso de los salares de Uyuni, Coipasa y Empexa.

Este tipo de depósitos se presentan como niveles continuos de espesor uniforme o variando lentamente y regularmente en su extensión. Son niveles de sedimentos químicos. Estas costras de sales, justo después de su deposición son muy porosas y contienen generalmente una salmuera residual.

2. Evaporación a partir de una napa subterránea

La evaporación directa puede alcanzar el nivel del agua subterránea hasta cierta profundidad (ver Fig. 9 en el capítulo 2). Pero el fenómeno fundamental es la ascensión capilar. RUSSEL (1885) dió la mejor definición : "Cuando el calor del verano se lleva todas las gotas de humedad de esos desiertos, una eflorescencia salina aparece, la cual es formada por la cristalización de varias sales llevadas en solución a la superficie por acción de la atracción capilar y depositadas cuando se evapora el agua que las disolvía".

Encima de la capa de agua tenemos un sedimento casi impermeable. Por el fenómeno de capilaridad el agua sube en micro-canales hacia arriba y mientras esas gotas se aproximan a la superficie se evaporan por acción directa de la atmósfera y depositan sus sales disueltas

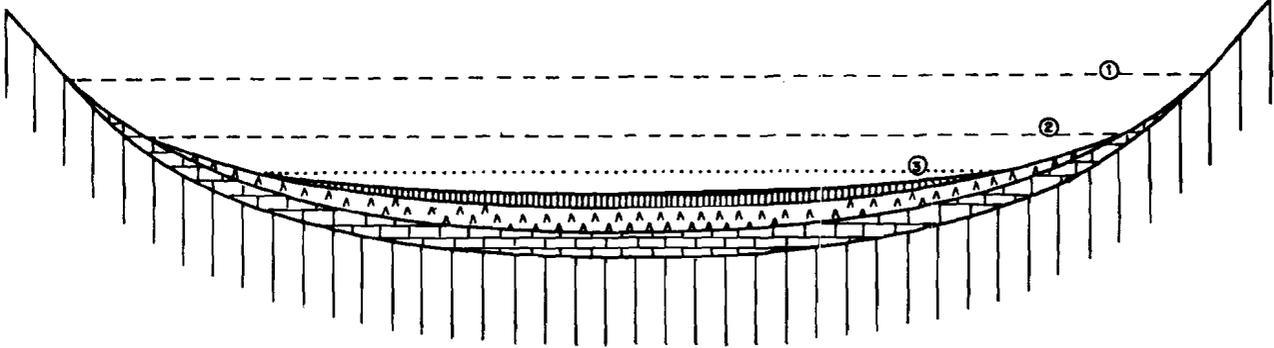
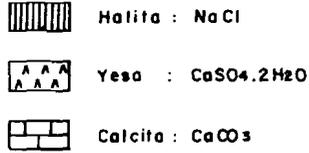


Fig. 5 Aspecto esquemático de un salar formado por sequía de un lago salado. (Tipo II; ver I-D).

Se nota la doble zonación de las sales, horizontal y vertical.

- ① Nivel del lago a partir del cual la calcita a empezado a precipitar
- ② Nivel del lago a partir del cual el yeso a empezado a precipitar
- ③ Nivel del lago a partir del cual la halita a empezado a precipitar

La sequencia calcita / yeso / halita es ilustrativa. Pueden existir varias otras sequencias

encima de la capa de agua (Fig. 6). La importancia de la ascensión capilar depende del diámetro de los canales. Las arenas tienen un espacio inter-granular ancho, el agua no subirá mucho. Los limos y arenas limosas tienen canales densos y de diámetro muy pequeño la capilaridad tendrá ahí su acción mayor.

Lo que se va de la napa, son el agua y las sales, al contrario de la evaporación directa que extrae solamente agua concentrando así la capa subterránea. La ascensión capilar no tiene efecto sobre la concentración del agua subterránea porque se van a la vez el agua y las sales. Es la evaporación directa sobre la gota que sube por capilaridad que la evapora y que hace depositar las sales. Este mecanismo produce comúnmente costras compactas de calcita y yeso, pero excepcionalmente de halita porque las lluvias, aunque muy escasas son suficientes para redisolverlas.

El aspecto característico de los depósitos así formados es muy irregular. Se presentan como nódulos, lentes y capas onduladas de espesores muy variables dentro del sedimento cuya estructura desaparece o es cortada por esas formaciones. Es muy probable que los boratos se formen así en los yacimientos bolivianos.

En realidad hay siempre una combinación de la evaporación directa de la capa y de la ascensión capilar, lo que puede producir una mezcla importante de las sales en los sedimentos. Las zonaciones no son muy nítidas. Este tipo de depósitos de sales, por evaporación de una capa de agua dentro de los sedimentos y por evaporación de las gotas capilares, son calificadas de sales diagenéticas, porque su génesis no es contemporánea con la de los sedimentos. Los espesores de esos depósitos no son tan importantes como los de las sales depositadas por sequía de un lago, pero pueden sobrepasar el metro. El espesor de los sedimentos encima de la capa de agua raras veces sobrepasa 2-3 metros.

D) TIPOS MORFOLOGICOS DE SALARES (FIG. 7)

Tomando solamente en cuenta los salares bolivianos se puede distinguir 4 tipos principales de ellos :

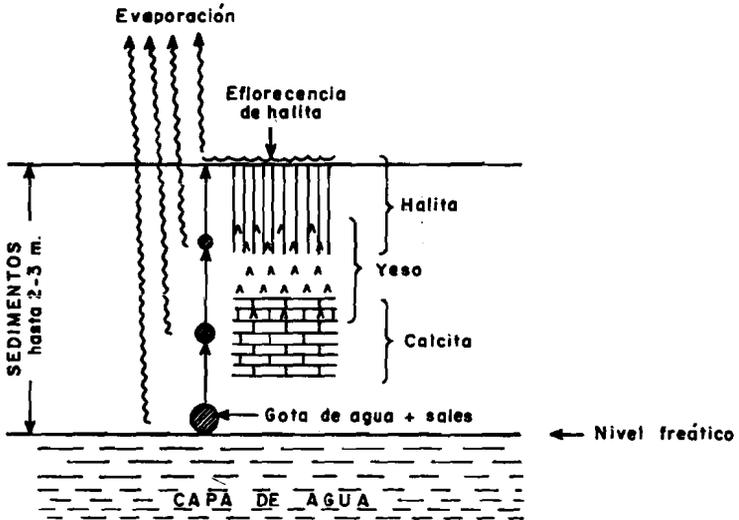
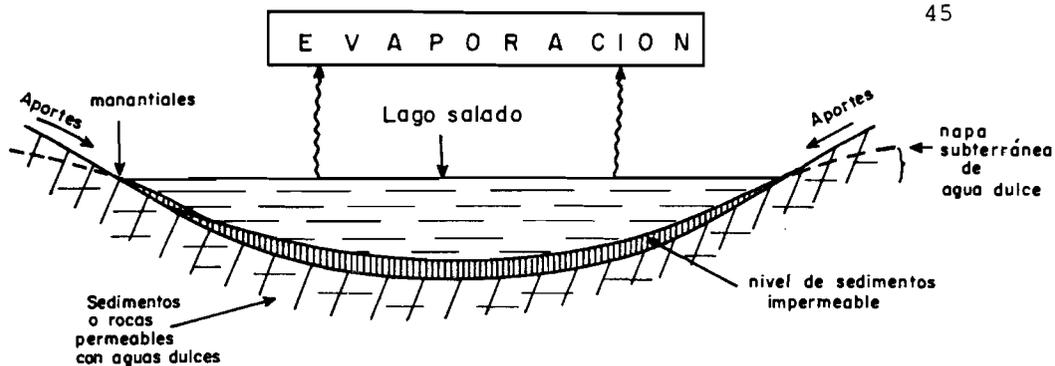
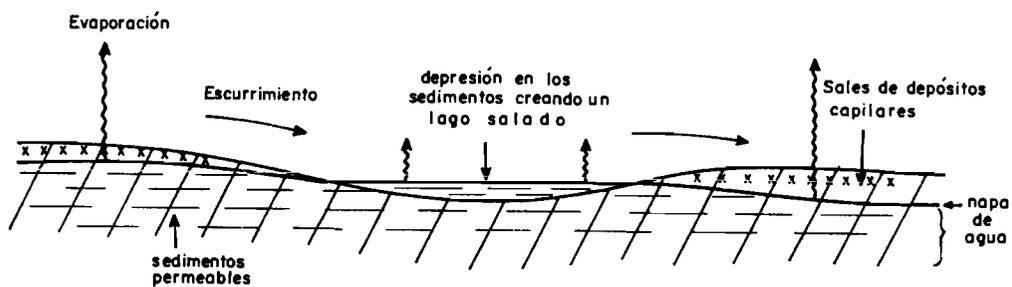


Fig. 6 Depositos de las sales por ascensión capilar.
 La zonación indicada no es tan nítida en la realidad.
 Depende mucho de la salinidad de la capa de agua. Si el agua es dulce, las sales se depositaran sobre todo en la parte superior del perfil.



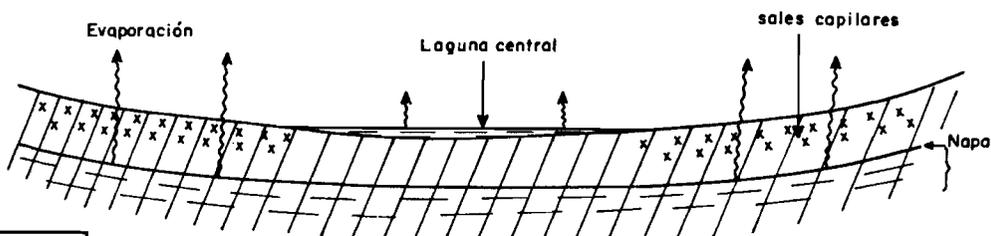
TIPO I

En fondo impermeable del lago separa una agua salada de una napa mas extensas de agua dulce la cual alimenta el lago por las orillas.
 En este ejemplo la interacción agua-sedimento es reducida en el lago



TIPO III

Napa subterránea de agua que forma un lago gracias a una depresión en los sedimentos.
 Aquí la interacción aguas-sedimentos es mayor.
 Hemos puesto sales capilares, así que direcciones de escurrimiento.



TIPO IV

Napa subterránea independiente de la laguna central. Fuertes interacciones agua-sedimentos.

Fig. 7 3 Tipos morfológicos principales de salares explicando la noción de "interacción aguas sedimentos" (ver I-F-6)
 El tipo II esta representado en la figura

TIPO I : Es el lago o laguna, salado. Es un lago verdadero con fondo impermeable. Su profundidad máxima puede ser de varios metros. Ejemplos : Collpa Laguna, Laguna Verde.

TIPO II : Es la costra de sal espesa formada por la sequía de un lago del tipo I. Son sales singenéticas que contienen una salmuera residual constituyendo un verdadero lago subterráneo (ver Fig. 5). Ejemplo : los salares de Uyuni y de Coipasa (NaCl) y el salar de Empexa (yeso + NaCl).

TIPO III : Está constituido por una napa subaflorente en los sedimentos detríticos finos (arenas, limos, arcillas, amorfos). Cuando hay una depresión en estos sedimentos la napa puede aparecer en la superficie y formar una laguna poco profunda. Generalmente estas lagunas superficiales tienen una forma muy irregular que responden a la topografía también irregular de los sedimentos. Ejemplo : Cachi Laguna.

TIPO IV : Está formado por una napa debajo de los sedimentos detríticos, pero independiente de la laguna superficial (si hay una). Generalmente la napa es cautiva. Es el caso más frecuente en Bolivia. Ejemplo : Pastos Grandes, Capina. El caso II es muy similar a este tipo, solamente los sedimentos están reemplazados por una costra de sal (que también es un sedimento químico).

Por supuesto muchos salares corresponden a tipos intermedios. Por ejemplo si la laguna superficial del tipo IV es suficientemente extensa, llegamos a un caso intermedio entre el tipo I y el tipo IV. Ejemplo : Hedionda Norte.

También hay que precisar en los casos III y IV que no hay una sinó varias napas subterráneas sobrepuestas, separadas por niveles más impermeables. Solamente se tienen datos sobre la napa más superficial, y además, solamente sobre su franja superior. La base de la costra de sal del tipo II puede estar constituida por un nivel impermeable, separando otra costra con otra salmuera, más profunda. En realidad todo es cuestión de escala. Un lago muy extenso al secarse depositará una costra de sal muy gruesa (10 m en Uyuni); pero un lago pequeño solamente dejará unos centímetros de sales singenéticas encima de los se-

dimentos lacustres. El aspecto de estos dos tipos de salares parece muy distinto, cuando en realidad son muy similares, pero a una escala muy diferente.

E) ORIGEN DE LAS AGUAS Y DE LOS ELEMENTOS DISUELTOS EN LAS AGUAS

Las aguas que entran en las cuencas tienen varios orígenes :

1) Las lluvias. Ellas alimentan los salares de 3 maneras :

- Por precipitación directa en el salar.
- Por torrentes y ríos temporales. Una parte de las aguas de lluvia corre en superficie hasta el salar.
- Por manantiales y ríos permanentes. Una parte de las aguas de lluvias al infiltrarse alimenta capas de aguas subterráneas, que se descargan continuamente alimentando así directamente el salar por los manantiales o alimentando ríos cuando los manantiales están lejos de las orillas.

Las napas subterráneas pueden ser muy antiguas, y haberse establecido en una época en que los niveles de los lagos eran más altos. Pero también son las lluvias que las alimentaron. Hay dos tipos principales de manantiales :

- los manantiales francos, cuyas aguas se escurren visiblemente. Sus salidas son bien determinadas.
- Los manantiales difusos : el agua sale muy lentamente a todo lo largo de una orilla produciendo una zona pantanosa con vegetación. No se nota el escurrimiento del agua. Esas aguas son generalmente más concentradas que las aguas de los manantiales francos, porque ya se han evaporado antes de salir a la superficie.

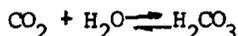
2) Las aguas termales. No discutiremos su origen si son aguas "juveniles" o aguas superficiales que se han calentado durante su tránsito en zonas profundas, con alto gradiente geotérmico. La importancia de esos aportes en los salares de Bolivia es casi siempre secundaria en rela-

ción con los aportes debido a las lluvias.

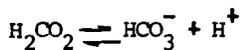
Notamos entonces que los elementos disueltos en las aguas dulces que alimentan los salares tienen dos orígenes distintos :

- los elementos disueltos en las lluvias mismas;
- la alteración de las rocas de las cuencas de drenaje.

3) Elementos disueltos en el agua de lluvia. El aporte más constante de las lluvias es el ácido carbónico que proviene de la disolución del gas carbónico del aire.

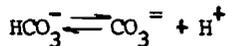


Este ácido carbónico se disocia en bicarbonatos y protones :



Esas reacciones son fundamentales por dos razones :

- La disolución del CO_2 produce ácido carbónico que ataca las rocas de las vertientes facilitando así su alteración y la solubilización de todos los otros elementos.
- Esta reacción provee bicarbonatos en las aguas de alimentación. Al concentrarse, esos bicarbonatos pueden, bajo ciertas condiciones que veremos después, pasar a carbonatos.



Todos los salares de carbonatos de sodio que hay en Bolivia tienen como origen de los carbonatos el CO_2 de la atmósfera.

También traen las lluvias otros elementos (Na^+ , Ca^{++} , $\text{SO}_4^{=}$, Cl^- , etc.). Las concentraciones en esos elementos depende principalmente de :

- la distancia al mar;

- la polución industrial y urbana.

No tenemos datos de composición química de las lluvias que caen en el Sur de l'Altiplano, pero hay poca posibilidad para que tengan una fuerte importancia en el Altiplano. Por eso pensamos que otros aportes por las lluvias que nos sean HCO_3^- , son mínimos.

4) La alteración de las rocas. Es facilitada por la acidez de las aguas de lluvia debido al ácido carbónico.

- El cuarzo es muy poco soluble (6 mg/l) y no interviene en la composición de las aguas.
- Los feldspatos potásicos proveen K^+ y SiO_2
- Las plagioclasas proveen Ca^{++} , Na^+ , SiO_2
- La biotita : K^+ , Mg^{++} , SiO_2
- Los piroxenos y minerales de rocas básicas : Mg^{++} , Ca^{++} , SiO_2
- La calcita y la dolomita : Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^-
- El yeso : Ca^{++} , SO_4^- , Cl^- (Cl^- generalmente como inclusiones)

De esto podemos inferir que :

- La rocas cristalinas y volcánicas ácidas aportan a las aguas sobre todo :

- Como cationes mayores : Na^+ , K^+
- Como cationes menores : Ca^{++} , Mg^{++}
- Como anión mayor HCO_3^- (en realidad viene de la atmósfera)
- SiO_2 mayor.

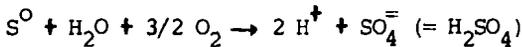
- La rocas cristalinas y volcánicas básicas aportan a las aguas :

- Como cationes mayores Mg^{++} , Ca^{++}
- Como cationes menores : Na^+ , K^+
- Como anión mayor : HCO_3^- (atmósfera)
- SiO_2 mayor.

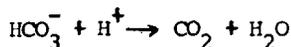
- Las rocas sedimentarias aportan :
- Como cationes mayores : Ca^{++} , Mg^{++}
- Como cationes menores : Na^+ , K^+
- Como aniones : HCO_3^- (atmósfera y rocas), $\text{SO}_4^{=}$, Cl^-
- SiO_2 menor.

Hay que precisar que esas reparticiones no tienen nada de absoluto. Por ejemplo, siempre hay Cl^- en todas las aguas (en zonas sedimentarias como en zonas cristalinas). Su origen es dudoso. Puede provenir de las lluvias o de las rocas mismas. Todas las rocas cristalinas contienen una cierta cantidad de cloruros.

La presencia de ciertos elementos mezclados en las rocas sedimentarias y cristalinas puede tener gran importancia, por ejemplo : el azufre. Este al contacto con aguas dulces oxigenadas (lluvias) se oxida y produce ácido sulfúrico.



Estos protones H^+ pueden neutralizar una parte de los bicarbonatos.



Esas reacciones tienen una doble importancia :

- Acidifican las aguas.
- Las enriquecen en sulfatos.

Este fenómeno es común en las zonas volcánicas de los Lípez, donde hay muchos yacimientos de azufre.

5) Caso de los manantiales salados. Tenemos que señalar el caso especial de los manantiales salados que son frecuentes en Bolivia. Esos pueden tener más de 10 g/l de sales disueltas. Sus orígenes son varios :

- En terrenos sedimentarios las capas de aguas subterráneas pueden lixiviar antiguos niveles salíferos. Eso es común.
- En terrenos cristalinos o volcánicos, como en los Lípez, el origen de esas aguas es más dudoso. Es posible que flujos de lavas recientes hayan recubierto antiguos salares o brazos de salares, que ahora están redisueltos. También puede ser que las aguas que se descargan ahora en esos manantiales, hayan sido alimentados antes por un lago salado de nivel más alto, cuyas aguas saladas se han infiltrado en las rocas de las vertientes.

Se encuentran tales manantiales en el Salar de Empexa, como también en el Río Salado que nace en la inmensa zona ignimbrítica entre Soniquera y Capina, y que alimenta el Río Grande de Lípez.

F) EVOLUCION DE LAS AGUAS POR EVAPORACION

1. Consideraciones preliminares

Las concentraciones en sales disueltas en las aguas dulces de aportes están generalmente dentro de un rango de 0,1 a 1 g/l. Por evaporación esas aguas llegarán a concentraciones tan altas como 300 g/l, es decir se concentran hasta 3 000 veces.

Se va a describir de manera un poco teórica la química de esas aguas que se concentran por evaporación, y después se utilizarán esos conceptos con fines más prácticos. En efecto, si podemos preveer cuales son las sales que se depositarán después de concentrarse 2 000 a 3 000 veces, las aguas dulces que entran en los salares, tendremos la posibilidad :

- PRIMERO : de verificar si las sales que están en el salar corresponden bien a la evolución de las aguas que entran actualmente, lo que nos permitirá estimar la renovabilidad del yacimiento.

- SEGUNDO : si por motivo de interacciones con los sedimentos, la composición de las aguas que entran no corresponden a las sales que hay en los salares, podríamos determinar que sales se depositarán a

partir de esas aguas dulces, por evaporación en piletas exteriores.

Al concentrarse, una agua dulce van a precipitar varias sales, desde la menos soluble hasta la más soluble.

Se dá un diagrama (Fig. 8), recopilado de LANGBEIN (1961), que indica las solubilidades respectivas de las sales más comunes. No hay que confundir la solubilidad, que es la cantidad de sal que se puede disolver en un litro de agua pura, con el producto de solubilidad que es una constante termodinámica dependiente solamente de la temperatura y de la presión. La solubilidad de una sal varía si el agua contiene otras sales.

2. Precipitación de la calcita

Cuando una agua se concentra, el primer material que se precipita es el carbonato de calcio (calcita o aragonita). Al precipitar, el producto de solubilidad (Ca^{++}) x (CO_3^{--}) debe quedar constante. Rigurosamente se debería considerar las actividades a Ca^{++} y a CO_3^{--} , es decir las concentraciones termodinámicas, activas, de los iones, y no las concentraciones de los iones. Pero en las aguas dulces, como de las que precipita la calcita, las actividades son muy similares a las concentraciones, y las actividades varían de manera paralela (pero no proporcional) con las concentraciones. Entonces vemos que los dos iones Ca^{++} y CO_3^{--} no pueden concentrarse en forma conjunta. Si (Ca^{++}) aumenta (CO_3^{--}) tiene que disminuir, y recíprocamente para respetar la constancia del producto (Ca^{++}) x (CO_3^{--}). Mientras el agua se concentra y precipita CaCO_3 , las concentraciones en Ca^{++} y CO_3^{--} varían de manera opuesta. Vemos entonces que la precipitación de la calcita, al principio de la concentración de una agua, vá a inducir a que esta agua se enriquezca ya sea en Ca^{++} o en CO_3^{--} .

Tenemos dos trayectos de evolución :

- Una vía neutra, $\text{pH} \sim 7$, enriquecida en Ca^{++} y empobrecida en CO_3^{--}
- Una vía alcalina ($\text{pH} > 10$) enriquecida en CO_3^{--} y empobrecida en Ca^{++} (soluciones básicas).

Na	Natron (10H ₂ O) 215 g/l	Mirabilita (10H ₂ O) 110 g/l	Halita 357 g/l
	Termonatrita (1.H ₂ O) 330 g/l	Tenardita 48 g/l	
Mg	Magnesita 0,106 g/l	Epsomita (7H ₂ O) 710 g/l	Bischofita (6H ₂ O) 1670 g/l
Ca	Calcita 0,014 g/l	Yeso (2H ₂ O) 2,41 g/l	Antarcticita (6H ₂ O) 2790 g/l
	CO ₃	SO ₄	Cl

Fig. 8 .- Diagrama de solubilidades de varias sales
(segun LANGBEIN, 1961)

El número de moléculas de agua de cada mineral está indicado entre paréntesis.

Las zonas rayadas indican los minerales muy solubles.

El factor que controla el camino de la evolución es la relación inicial entre las concentraciones en calcio y en carbonato. Si en la solución inicial hay mucho más calcio que carbonato, la solución evolucionará hacia una facies neutra, pero si hay más carbonatos que calcio, entonces el agua evolucionará hacia una facies alcalina (carbonatos de sodio). Indicaremos más abajo como hacer el cálculo exacto, porque no se utiliza la relación $(Ca^{++})/(CO_3^-)$, sino una relación un poco más complicada, debido a que en las aguas hay a la vez CO_3^- y HCO_3^- que después pueden pasar a CO_3^- .

3. Precipitación de los Silicatos-Mg

Después de la precipitación de la calcita, o casi simultáneamente, pueden formarse silicatos de magnesio. Esta precipitación libera iones H^+ que pueden neutralizar parte de los carbonatos y bicarbonatos, lo que puede hacer cambiar la vía de evolución alcalina en una vía neutra. Si la vía de evolución ya es neutra antes de la precipitación de los silicatos-Mg, entonces no cambiará nada.

4. Precipitación del Yeso

$(CaSO_4 \cdot 2 H_2O)$. En la vía de concentración alcalina, todo el calcio está consumido por la calcita. Entonces el yeso no puede formarse por falta de Ca^{++} . En la vía de concentración neutra, el siguiente mineral que precipita es el yeso. Como para la calcita, tenemos dos vías de evolución que van a depender de la relación $(Ca^{++})/(SO_4^{--})$, al principio de la precipitación del yeso (y no al principio de la evolución del agua, porque ha cambiado la concentración en calcio).

- Una vía de enriquecimiento en Ca^{++} y de empobrecimiento en SO_4^{--} .
- Una vía de enriquecimiento en SO_4^{--} y de empobrecimiento en Ca^{++} .

Se vé al final que se obtiene 3 facies fundamentales para las aguas saladas (Fig. 9). Se han indicado las concentraciones totales aproximadas, para las cuales precipitan los distintos minerales. No se ha tomado en cuenta el ion K^+ , porque no tiene efecto importante en la

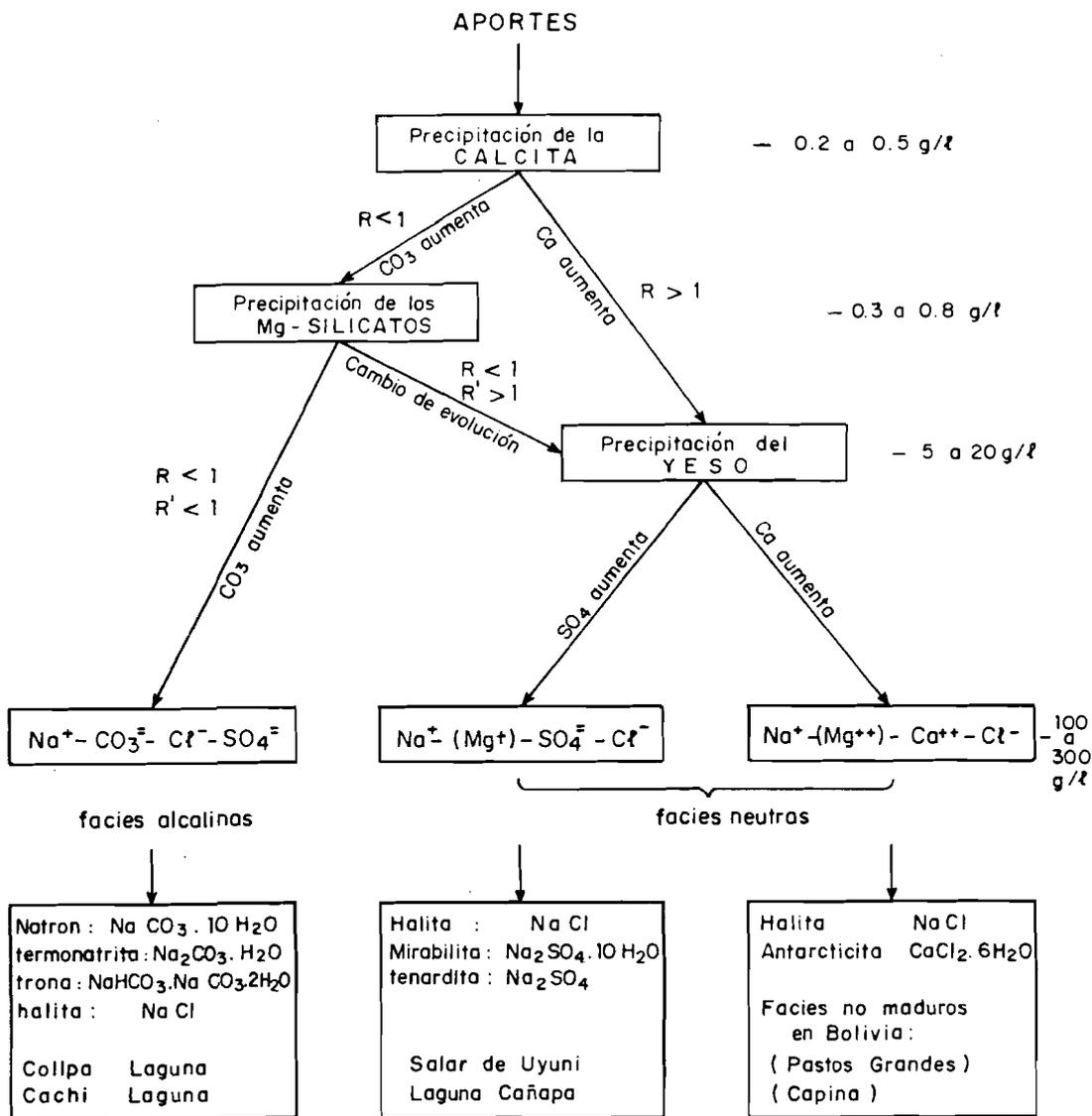


Fig. 9 .- Diagrama de evolución de las aguas cuando se concentran por evaporación. (Según HARDIE and EUGSTER, 1971)

Se indica las concentraciones aproximadas de las aguas en cada paso importante
 Para mayores detalles, referirse al texto.

Hay muchos otros minerales que pueden precipitar. Hemos indicado los más característicos para cada facies.

caracterización de las salmueras (aunque puede estar presente en grandes cantidades). En realidad hay muchos sub-tipos de salmueras según las concentraciones relativas de los iones. Pero esas tres asociaciones cubren el 90% de las composiciones químicas de los lagos salados. Las sales mayores que precipitan a partir de esas salmueras están indicadas en la Fig. 9, así como también ejemplos escogidos dentro de los salares bolivianos.

5. Control litológico de la cuenca de drenaje

Se ha visto que lo que vá a controlar el quimismo de las aguas dulces que entran en un salar es la litología de la cuenca de drenaje.

LAS ROCAS CRISTALINAS Y VOLCANICAS ACIDAS, proveen Na^+ , en K^+ , en menor cantidad Ca^{++} y Mg^{++} , y como anión sobre todo HCO_3^- (que después pasará a CO_3^{--} . Entonces las aguas de esas cuencas evolucionaran preferiblemente hacia facies de carbonatos de sodio (vía alcalina).

LAS ROCAS CRISTALINAS Y VOLCANICAS BASICAS, dan más Mg^{++} y Ca^{++} que Na^+ ; entonces las aguas de esas cuencas podrán ser afectadas por un cambio de evolución debido a la precipitación de Silicatos de Mg, y evolucionarán hacia facies neutras.

LAS ROCAS SEDIMENTARIAS, proveen más Ca^{++} que Na^+ y relativamente menos HCO_3^- , por la existencia de otros aniones Cl^- y SO_4^{--} . Entonces esas aguas evolucionarán hacia facies neutras.

LA EXISTENCIA DE AZUFRE en las cuencas de drenaje, por la formación de ácido sulfúrico y la consecuente neutralización de los bicarbonatos impide generalmente la evolución hacia facies carbonatadas-sódicas, de las aguas originadas en los vertientes emplazados en rocas cristalinas o volcánicas ácidas.

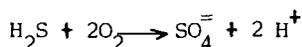
6. Interacción con los sedimentos

Las consideraciones expuestas hasta ahora, corresponden a aguas que se concentran libremente como si fuera en una pileta. En la

realidad eso puede corresponder a lagos verdaderos, con cierta profundidad de agua y fondo impermeable. Pero hemos visto (II-D) que existen también salares formados por una napa de salmuera, dentro de los sedimentos (tipos III y IV, Fig. 7).

En estos casos tenemos una fuerte interacción entre las soluciones y los sedimentos, y varios fenómenos pueden ocurrir que cambien la libre evolución de las aguas, como ser :

- La neoformación de las arcillas, en los sedimentos liberan iones H^+ que pueden neutralizar los bicarbonatos y carbonatos de las aguas que entran, y cambiar la evolución alcalina, hacia una evolución neutra.
- La reoxidación de los sulfuros de los sedimentos en sulfatos, por las aguas dulces que entran en el salar, también producen el mismo efecto al formar iones H^+



Esto también enriquece las aguas en sulfatos.

Vemos que los factores que van a controlar el quimismo final de las salmueras, y en consecuencia las sales que van a precipitar, son dobles y ellos son :

- La litología de la cuenca de drenaje.
- La interacción de los sedimentos que depende en gran parte de la morfología del salar.

Damos un cuadro resumido de esto con ejemplos dentro de los salares bolivianos (Fig. 10).

7. Métodos de cálculo

Vamos a indicar de manera un poco mecánica como se puede prever la evolución de una agua dulce que se concentra, por lo menos en su primera etapa, la que decidirá si el agua evolucionará hacia facies alcalinas (carbonatos de sodio)

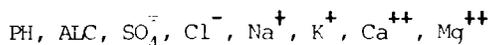
Rocas volcánicas	sin azufre	<p>Alcalino</p> <p>$Na^+ - CO_3^{=2} - Cl^-$</p> <p>Collpa Laguna</p>	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Ca^{++} - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Ramaditas</p>	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Ca^{++} - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Pastos Grandes (en parte)</p>
	con azufre	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Ca^{++} - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Laguna Verde</p>	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Ca^{++} - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Empexa</p>	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Cañapa</p>
Rocas sedimentarias		<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Ca^{++} - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>No conocemos este caso de sales en Bolivia [Lago Titicaca se aproxima]</p>	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Ca^{++} - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Lago Poopo</p>	<p>Neutro</p> <p>$Na^+ - Cl^- - SO_4^{=2}$</p> <p>Lag. Hedionda Norte</p>
		Sin interacción con los sedimentos	<p>Sedimentos sin sulfuros (oxidados)</p> <p>Sedimentos con sulfuros (reducidos)</p> <p>Con interacción con los sedimentos</p>	

Fig.10 Clasificación de los salares y lagos salados de Bolivia en función de la litología de la cuenca de drenaje y del tipo de interacciones con los sedimentos.

Hay en realidad muchos casos intermedios. Hemos escogido los ejemplos mas característicos.

Para mayores detalles teóricos, referirse a los trabajos de GARRELS and MACKENZIE (1967), HARDIE and EUGSTER (1971) y RISACHER (1978-1979). Se dará una versión simplificada de los cálculos. No serán totalmente rigurosos, se harán algunas aproximaciones, legítimas a este nivel.

Se tiene un análisis de agua con los iones mayores :



Primero hay que fijarse en las unidades. Esas tienen que estar en moles (o milimoles) por litro (o kilo) de agua, (y no en mg/l o en ppm). La alcalinidad (ALC) debe ser presentada en equivalente de H^+ por litro (o kilo) de agua, (o mili-equivalente). Si en vez de la alcalinidad se da la concentración en HCO_3^- , hay que transformar esto en $\text{eq.}(\text{H}^+)/\text{l}$. Si HCO_3^- es dado en mg/l (o en ppm) hay que dividir este valor por 61 000 (1 000 x peso molar de HCO_3^-) para obtener moles de HCO_3^- , lo que representa también el valor de ALC en $\text{eq.}(\text{H}^+)/\text{l}$. Se calcula después la fuerza iónica de la solución.

$$I = \frac{1}{2} \sum (i) Z_i^2 \quad (i) = \text{concentración del ión en moles/l (o eq.}(\text{H}^+)/\text{l para la alcalinidad.}$$

$$Z_i = 1 \text{ para } \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{ALC} \quad Z_i = \text{es la carga eléctrica del ión.}$$

$$Z_i = 2 \text{ para } \text{Ca}^{++}, \text{Mg}^{++}, \text{SO}_4^-$$

Hay que tener cuidado con las unidades : moles (y no milimoles). Se calculan después los coeficientes de las actividades siguientes :

$$-\log f_{\text{CO}_3^-} = \frac{0,5 \sqrt{I}}{1 + 1,28 \sqrt{I}}$$

$$-\log f_{\text{CO}_3^=} = \frac{2 \sqrt{I}}{1 + 1,44 \sqrt{I}}$$

Se calcula el pH de equilibrio con la atmósfera. (No se uti-

liza el pH dado en los análisis), con la ecuación de segundo grado.

$$ALC \cdot X^2 - \frac{10^{-11.64}}{f_{\text{HCO}_3^-}} \cdot X - \frac{10^{-21.76}}{f_{\text{CO}_3^{2-}}} = 0$$

Hay solamente una solución lógica positiva. Una vez obtenida se puede calcular $\text{pH}(\text{equi } 1) = -\log X$ (no es indispensable). Se calcula después la concentración en CO_3^{2-} del agua al pH determinado anteriormente.

$$(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{ALC}{2 + 10^{10.42} \frac{f_{\text{CO}_3^{2-}}}{f_{\text{HCO}_3^-}} \cdot X}$$

Si ALC es en $\text{eq}(\text{H})/1$, (CO_3^{2-}) se obtiene en moles/litro. Ahora podemos extraer las relaciones fundamentales que nos indicarán como evolucionará esta agua al evaporarse. Se determinan las dos relaciones (concentraciones en moles/l) :

$$R = (\text{Ca}^{++}) / ((\text{CO}_3^{2-}) + 10^{-0.91} \sqrt{(\text{CO}_3^{2-})})$$

$$R' = ((\text{Ca}^{++}) + (\text{Mg}^{++})) / ((\text{CO}_3^{2-}) + 10^{-0.91} \sqrt{(\text{CO}_3^{2-})})$$

Si $R < 1$, $R' < 1$, el agua evolucionará hacia una facies alcalina.
 Si $R < 1$, $R' > 1$, el agua empieza su evolución hacia una facie alcalina, pero la precipitación de los silicatos de Mg, hacen cambiar su evolución hacia una facie neutra.

Si $R > 1$ (y obligatoriamente $R' > 1$) entonces el agua evolucionará desde el principio hacia una facie neutra.

Hemos indicado en la figura 9, esos valores R y R'. Si R o $R' \sim 1$ entonces no se puede concluir porque siempre hay errores en los análisis, además, el muestreo es siempre puntual. La composición de las aguas puede cambiar en el curso del año.

Esos cálculos solamente permiten definir los rasgos generales

de la evolución de un aqua. Existen métodos, mucho más sofisticados usando computadoras, que calculan las composiciones exactas de la solución a lo largo de su concentración, hasta la precipitación de las sales más solubles (FRITZ, 1975; AL-DROUBI, 1976).

Capítulo III

MÉTODOS DE ESTUDIO

A) INTRODUCCION

Se trata de un estudio de los salares con fines económicos. El estudio científico tiene otras características, como el interés, no solamente en las sales, sino también en todos los demás sedimentos y el poco interés en cuantificar los diversos elementos del salar. Empero, el buen conocimiento del salar y de los mecanismos geológicos, geoquímicos e hidrogeológicos que lo caracterizan son casi indispensables para llevar a cabo un estudio económico óptimo.

B) MATERIAL NECESARIO

Se indicará cual es el material esencial mínimo necesario para estudiar un lago salado o un salar. Es un "límite inferior". Por supuesto en función de los medios invertidos se podrá utilizar muchos otros aparatos y herramientas, especialmente perforadoras pesadas.

EL CONDUCTIVIMETRO.- Mide la conductividad eléctrica de una agua, la cual es más o menos proporcional a la concentración de las aguas. Las unidades de medidas son el milimho (mmho) y el micromho (µmho). La relación entre las medidas y las concentraciones en sales de las aguas dependen del tipo de aparato utilizado. No son estrictamente reproducibles de un aparato al otro. En primera aproximación se puede considerar que : $1 \mu\text{mho} \sim 1 \text{mg/l}$. Pero el error puede ser de 20 a 30%, los valores corresponden solamente a un orden de magnitud.

EL pH-METRO.- Mide el $\text{pH} = -\log a \text{H}^+$ (a H^+ = actividad de H^+). Eso indica el grado de acidez o basicidad del agua.

$\text{pH} = 7$: Agua neutra
 $\text{pH} < 7$: Agua ácida
 $\text{pH} > 7$: Agua alcalina

El pH de las aguas naturales están comprendidas entre 6 y 9. Especialmente aguas ácidas drenando niveles de azufre pueden tener pH inferior a 2, y las aguas de las lagunas carbonatadas sódicas llegan a valores entre 10 y 11. Nunca se encuentran aguas naturales con $\text{pH} > 11$.

EL TERMOMETRO.- Sirve para medir la temperatura de las aguas y hacer las correcciones de temperatura para las medidas de conductividad y pH.

Para las características técnicas, el manejo correcto, y las correcciones necesarias, es menester referirse a las instrucciones de empleo de cada aparato. Queremos sin embargo, llamar la atención sobre las baterías de alimentación que son sensibles al frío, por consiguiente no hay que dejarlas fuera durante la noche (en el Altiplano boliviano por lo menos).

LA PERFORADORA MANUAL.- Permite perforar rápidamente en los sedimentos blandos y debajo del nivel del agua. Una pequeña bomba eléctrica, puede ser muy útil para muestrear aguas a varias profundidades debajo de la superficie.

PEQUEÑO MATERIAL.- Palas, picotas, bolsas plásticas, botellas, etc...

C) LA FASE DE RECONOCIMIENTO

1. Quimismo general del salar

Primero hay que determinar el quimismo general del salar, para eso se busca la salmuera más concentrada (superficial o subterránea) con el conductivímetro. Generalmente hay que ir al centro del salar. Después se mide el pH de esta salmuera. Generalmente se encuentran valores alrededor de 7-8 (facies neutra), o superior a 10 (facies alcalina); este dato simple de obtener, indica inmediatamente si tenemos carbonatos de sodio en este salar. Después todo depende si se trata de un lago salado o de un salar con poca agua superficial.

2. Lago salado (Tipo 1)

Para una fase de reconocimiento puede bastar, sacar muestras de los bordes, alrededor de todo el lago; se debe reconocer los aportes y sacar muestras de esas aguas dulces. También es conveniente, si se puede, tratar de determinar la profundidad aproximada del lago.

3. Salar seco en superficie y zonas secas alrededor de los lagos (Tipos III y IV)

Se hacen perfiles transversales de pozos del borde hasta el centro, con pala hasta la capa de agua, con perforadora para ir más abajo; se muestrean todas las sales encontradas, como también las aguas subterráneas. La cantidad de pozos y perfiles, como así también su ubicación dependen de la forma del salar; aquí no se aplica ninguna malla, solamente el sentido común debe guiar al prospector (y el tiempo disponible). Una buena regla consiste en seguir intervalos progresivos de concentración de las aguas desde el borde (manantiales, ríos) hasta el centro (con el conductivímetro). Se aconseja, por ejemplo, puntos cuando aumentan las concentraciones con los valores siguientes (en g/l) : 0.1 - 0.5 - 1 - 5 - 10 - 25 - 50 - 100 - 200 - 300 g/l.

Así se está seguro de encontrar todas las sales que han precipitado, también hay que extraer muestras de todas las aguas dulces que entran en el salar. Por supuesto para cada pozo se debe hacer su perfil litológico.

En la superficie se nota muy a menudo eflorescencias salinas blancas de unos milímetros de espesor. Estas corresponden al depósito final de las sales al evaporarse el agua que llega a la superficie. Se encuentran también alrededor de los manantiales y de los ríos de aguas dulces. A continuación se explica de manera aproximada como determinar la naturaleza de las sales en el campo.

Se tiene que observar primero si se trata de una sal hidratada, eso se vé claramente en el aspecto de la sal in situ : algunas partes son de aspecto grasoso húmedo, blanco opaco, y otras partes son secas blancas claras por deshidratación. Después se observa si la sal hace efervescencia con HCl (a 5-10%), y luego, si hace efervescencia, se solubiliza esta sal en un poco de agua destilada hasta su saturación y se mide el pH de la solución. Se compara después con el cuadro siguiente :

	Sal sin aspecto hidratado	Sal con aspecto hidratado		
sin efervescencia con HCl	Na Cl	Sulfatos de sodio (+ NaCl)		
con efervescencia con HCl	Na Cl + Calcita	$7 < \text{pH} < 9$	$9 < \text{pH} < 10$	Ph > 10
		Sulfatos de sodio + Calcita	Indeterminado (hacer RX)	Carbonatos de sodio (+ NaCl)

Este procedimiento no es definitivo, puede haber varias otras sales, pero de todas maneras sirve para dar indicaciones rápidas en el campo. Para seguridad del trabajo hay que hacer siempre una difracción por Rayos X. Estas sales, empero, son las más comunes y cubren 90% de los que se pueden encontrar.

Alrededor de los manantiales, en las orillas, de los salares, se forman eflorescencias salinas encima de niveles de arenas o de gravas. Se puede considerar estas sales como representativas de la evolución final por evaporación libre de las aguas de esos manantiales. Estas aguas solamente atraviesan, al subir por capilaridad niveles poco espesos (algunos cm o algunas decenas de cm), y detríticos sin arcillas ni materia orgánica, limitando así las interacciones aguas-sedimentos. Por otro lado es común observar en las orillas, eflorescencias de carbonatos de sodio mientras las sales depositadas en el centro del salar con sulfatos y cloruros de sodio, lo que indica que las aguas de alimentación han cambiado su evolución al entrar en el salar por interacciones con los sedimentos.

4. Costras de sales singenéticas (Tipo II)

No hemos hablado de las costras superficiales depositadas por

sequía de un lago salado. No presentan ninguna dificultad para determinar su existencia, ni para su muestreo.

En resumen el reconocimiento preliminar debe permitir definir :

- el quimismo general del salar y la naturaleza de las sales;
- la extensión aproximada y el espesor promedio de los niveles de sales;
- los aportes.

También se debe dar algunos datos sobre la geología general de la zona, su accesibilidad, la posibilidad de encontrar gente del lugar para ayudar en los trabajos, etc...

D) EVALUACIONES CUANTITATIVAS

1. Generalidades

Después de la fase de reconocimiento y si esta es positiva, se puede pasar a evaluar las reservas presentes y su renovabilidad. En forma clásica se distinguen las reservas en seguras, probables y posibles. No seguiremos mucho esta terminología, pero precisaremos la idea de renovabilidad (Capítulo IV).

En la evaluación cuantitativa de un yacimiento salino, se debe considerar dos partes distintas :

- la determinación de la geometría del yacimiento y su volumen;
- la determinación de las leyes y de sus variaciones dentro del volumen del yacimiento.

Todo el volumen no es aprovechable porque puede haber :

- variaciones de las leyes del mineral o del elemento. Nunca una capa salina está constituida por un mineral perfectamente puro.

- variaciones en los espesores, los métodos de explotación pueden imponer espesores mínimos, para las capas útiles.

2. Los yacimientos singeneticos

Hemos visto que estos yacimientos son continuos, uniformes y con espesores que varían regularmente. Entonces no necesitaremos hacer una red muy densa de pozos y muestreo. Para la determinación de la geometría y del volumen del yacimiento, se puede, en primera aproximación considerar esos niveles como segmentos esféricos, muy delgados. Conociendo la superficie total S y el espesor máximo H de la capa, se puede tener una idea del volumen con la fórmula :

$$V = \frac{S \times H}{2}$$

Si la capa tiene una forma irregular se la puede dividir en varias porciones más homogéneas. Pero de todas maneras hay que muestrear la capa para determinar las leyes, conjuntamente se puede medir el espesor en cada punto y calcular así en forma más precisa el volumen.

El tamaño de la malla depende de la superficie del yacimiento. El sentido común es la mejor guía para escogerla. El problema tiene un aspecto particular en Bolivia. El aislamiento y la dificultad de acceso a esos salares hace imperativo aprovechar al máximo el tiempo de campo y es mejor extraer más muestra que menos, aunque se compruebe después que no fueron todas necesarias. Podemos sugerir una regla simple para el tamaño de la malla. Esto puede ayudar a planificar la misión y el tiempo necesario.

$$\text{Aconsejamos : } m = \frac{\sqrt{S}}{\log S} \quad \begin{array}{l} S \text{ en m}^2 \\ m \text{ en metros} \end{array}$$

Eso dá un número de pozos : $n = (\log S)^2$.

Ejemplo : Salar de Uyuni : superficie : 10 000 km² (S = 1 x 10¹⁰ m²)

m = 10 km (para cualquier investigación : NaCl, Li, K, etc.).

Número de pozos : n = 100.

NUMERO DE MUESTRA POR POZOS.- Depende del espesor de la capa. Por una capa de menos de 1 m de espesor, una muestra puede bastar, y en algunos sectores se pueden extraer dos muestras. Para capas de espesores entre 1 y 5 metros se podrá tomar dos muestras y en algunos puntos tres muestras. Para espesores superiores a 5 m : tres muestras. Por supuesto eso depende también del aspecto de la capa. Si no es uniforme y con variaciones en su espesor, hay que sacar muestras de cada nivel definido.

Estas reglas se aplican también para los yacimientos de sales disueltas en lagos y lagunas, cuidando más las profundidades. El fondo de un lago puede ser irregular. Para muestrear aguas profundas se puede utilizar una bomba o en su defecto se puede sugerir la utilización de una botella de boca estrecha atada a un palo. Cuando se llega a la profundidad deseada se estira la tapa con un hilo, al recuperar la botella hay que tener cuidado de eliminar la parte superior del agua que ha podido ser contaminada al subir.

3. Los yacimientos diagenéticos

Estos yacimientos son muy irregulares en extensión y espesor, además casi siempre están a cierta profundidad y sus extensiones globales son muy difíciles de determinar; normalmente la primera fase de reconocimiento debe dar una idea de la superficie total del yacimiento. En este caso no se puede tener seguridad de la geometría y del volumen del nivel sin hacer numerosos pozos. Estos tienen igual importancia para precisar la geometría y para determinar las leyes. Debido a la gran irregularidad de esos yacimientos la malla debe ser más estrecha que para una capa singenética. Aconsejamos una malla, cinco veces más pequeña que para los niveles regulares singenéticos.

$$m = \frac{\sqrt{S}}{5 \log S} \quad \begin{array}{l} S \text{ en m}^2 \\ m \text{ en metros} \end{array}$$

Esto puede llevar a un número muy elevado de pozos.

$$n = 25 (\log S)^2$$

Ejemplo : Yacimiento de boratos de Río Grande : $S = 50 \text{ km}^2 = 5 \times 10^7 \text{ m}^2$

$m = 180 \text{ m}$ y $n = 1\ 500$ pozos.

Esta cifra aparenta ser muy grande, pero solamente constituye un límite inferior. Al principio del siglo una compañía inglesa hizo en Río Grande una evaluación de la boratera. Todavía se nota la posición de los pozos : la malla era de 50 m y la superficie estudiada por lo menos 10 km^2 . Dejamos al lector determinar cuantos pozos se cavaron... Visto este gran número de pozos lo más importante es delinear las zonas más favorables. Se puede reducir esta cantidad haciendo una prospección geofísica, con equipo ligero, para determinar la geometría de los niveles más importantes; pero aquí también insistimos en que la reflexión del prospector debe jugar un papel decisivo. Aunque es imposible determinar las reservas de tales yacimientos con una decena de pozos, siempre hay manera de reducir el número de perforaciones en función de consideraciones geológicas, sedimentológicas e hidroquímicas.

4. Yacimientos de salmueras

Como lo hemos visto los yacimientos diagenéticos se forman por ascensión capilar a partir de una capa de agua subterránea. Puede que este fenómeno haya ocurrido en tiempos geológicos remotos y que no haya permanecido la salmuera madre; pero puede también que las sales se depositen actualmente a partir de la capa de la salmuera subterránea. Este es el caso general en los salares bolivianos, entonces se puede, en vez, o además, de sacar las sales depositadas, sacar las salmueras, hacerlas evaporar en piletas y recuperar las sales así precipitadas; este método también puede servir para la extracción de las sales disueltas en lagos y lagunas.

En este caso la evaluación de tales yacimientos no necesita tantas perforaciones, como para evaluar las sales diagenéticas. Se puede aplicar una malla del mismo tamaño que para un yacimiento singenético ($m = \sqrt{S/\log S}$). Se debe establecer las curvas de isoconcentración. El uso del conductivímetro es imprescindible, también aquí el juicio del investigador es decisivo, si nota que las concentraciones son bien uniformes, entonces podrá espaciar más los puntos de muestreo. El problema más delicado es estimar el espesor de la capa de salmuera, se necesita absolutamente una perfodara manual o, si es posible, una per-

foradora más grande con motor. Es indispensable sacar las muestras sólidas del pozo, aunque sea en cuttings, con el fin de determinar la permeabilidad, y la porosidad, de los sedimentos que contienen la salmuera. Se establece para cada pozo el perfil litológico poniendo bien en evidencia los niveles impermeables. Muchas veces la perforación no llega hasta un nivel impermeable y el espesor de la capa de salmuera queda hipotética, pero se tiene que determinar un límite inferior para su espesor.

Una vez perforado el pozo hay que esperar cierto tiempo (12 a 24 horas) en general para que las aguas se redispongan normalmente, porque su estratificación ha sido perturbada en el curso de la perforación. Hay que determinar el nivel freático (donde está el agua en el sedimento) y el nivel piezométrico (nivel hasta donde sube el agua después de haber hecho la perforación).

Después hay que muestrear las salmueras a varias profundidades, lo mejor es utilizar una pequeña bomba con la manguera atada a un palo, si no se tiene este artefacto se puede proceder como se indicó en el párrafo anterior (evaluación de lagos), con botellitas atadas a un palo. Siempre hay que sacar las muestras empezando por arriba y bajando progresivamente en el pozo.

Por supuesto los problemas técnicos nunca faltan. Dentro de los más comunes, citamos :

- la presencia de arenas que colmatan los pozos inmediatamente después de perforados. Es muy difícil encontrar una solución simple, una manera consiste en revestir el pozo. Esos trabajos corresponden a la compañía perforadora.
- Llegar al punto de perforación. Si el terreno es blando (caso frecuente), para llevar maquinaria un poco pesada hay que hacer terraplenes; puede durar y costar mucho. Aconsejamos, en este caso, trabajar en los meses más fríos : junio y julio, cuando todo está congelado.

Todos los problemas técnicos bien conocidos de los perforistas son de esperar aquí. Hay que escoger, si es posible, una compañía

con experiencia en este sector, o en un sector similar.

Se debe tener mucho cuidado con que el volumen de la salmuera sea el volumen del sedimento que la contiene multiplicado por la porosidad. Esto se puede medir en el laboratorio. Si no se tienen medidas, se puede tomar en primer aproximación (SCHOELLER, 1962) :

- para las arenas : 30-40%;
- para los limos y arcillas limosas: 35 - 45 %

Se aconseja tomar como nivel superior de la capa de agua su nivel freático, y no su nivel piezométrico, para cualquier cálculo (aunque se puede discutir esto).

También es conveniente sacar algunas muestras de salmueras de 20 a 50 litros a fin de hacerlas evaporar experimentalmente en piletas. Eso permitirá conocer la ley de la sal que se depositará y de definir los diferentes pasos de la concentración, como también el momento adecuado para la extracción de las distintas sales.

Este método de evaporación en piletas funciona bien con sales muy solubles (NaCl, sulfatos y carbonatos de sodio). Para las sales menos solubles, como los boratos, no dá resultados porque las sales que se depositan están constituídas en un 90-95% por sales solubles (NaCl) y muy pocos boratos. La precipitación en los sedimentos es muy lenta y corresponde a un fraccionamiento de las sales disueltas.

Debemos también señalar la posibilidad de utilizar los métodos de la hidrogeología como pruebas de bombeo, medidas de la transmisibilidad de los sedimentos, etc... Pero hay que tener cuidado pues, no se busca una alimentación en agua, sino aguas con cierto contenido en sales disueltas. Puede que las aguas, así bombeadas, no sean muy representativas de las salmueras deseadas (mezclas de aguas). Estos métodos están descritos en cualquier manual de hidrogeología, así que no insistiremos más sobre el particular.

E) EL MUESTREO

Las muestras a tomarse no deben ser muy pesadas. Para una muestra sólida : 50 a 100 g. bastan. Para una muestra líquida 10 a 500 ml, son suficientes de acuerdo con su concentración total : mientras más concentradas, menos volumen se necesita.

Muchas sales están hidratadas, y puestas al aire pierden rápidamente su agua, transformándose en otro mineral (ulexita-probertita; natron-termonatrita; mirabilita-tenardita). La ulexita ($\text{NaCa B}_5\text{O}_9 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$), no solamente tiene agua de cristalización, sino también agua intersticial. Es muy importante llevar la muestra, tal como está en el yacimiento, sin que se pierda nada del agua contenida en ella. Por eso no se debe dejar las muestras expuestas al aire después de haberlas sacado, inmediatamente hay que empaquetarla herméticamente en una bolsa plástica. Al llegar al laboratorio se debe medir la cantidad de agua contenida en las muestras. Se las pesa con su humedad, se las seca todas a la misma temperatura (estufa) y se las pesa de nuevo. La diferencia de peso dará en realidad no el contenido en agua de la muestra, sino la pérdida de agua a la temperatura escogida.

Los análisis químicos se efectuarán después a partir de la muestra seca, y los resultados deberán ser corregidos para dar la ley de la muestra húmeda. Si no se respeta este procedimiento, los resultados finales pueden tener errores superiores a los 50% (para los boratos especialmente).

F) MEDIDAS PARTICULARES

1. Determinación del caudal de un río

Se escoge una porción del lecho de forma regular o también, se puede moldear una porción de tal manera que su sección sea uniforme en una cierta longitud. Se mide la superficie de la sección $S \text{ cm}^2$ transversal, perpendicularmente a la corriente y se mide el tiempo t (segundo) para que un pequeño flotador (fósforo) recorra una distancia $l \text{ cm}$. conocida. El caudal es :

$$k \times \frac{S \times l}{t} \text{ cm}^3/\text{s}.$$

k es un factor correctivo que se introduce porque el agua no se escurre con la misma velocidad en toda la sección de un río. La velocidad es reducida cerca de los bordes y del fondo, pero el flotador estará llevado por la parte más veloz del agua. Aconsejamos (SCHOE-LLER, 1962) : $0,4 < k < 0,6$ según la forma de la sección del río.

- Con sección ancha y poco profunda : $k = 0,4$
- Con sección estrecha y profunda : $k = 0,6$

2. Determinación de las infiltraciones superficiales

El método es muy simple (método de Muntz; ROCHE, 1963). Se utiliza un cilindro de metal o de plástico de unos 20-25 cm de alto y de unos 10 cm de diámetro. Se lo introduce 5 cm en el suelo, cuidando bien de no perturbar la superficie. Se lo llena con agua hasta cierto nivel y se mide el descenso del agua en función del tiempo. Si este descenso es lento, entonces, hay que dejar tapado el cilindro para evitar la evaporación, pero dejando un agujero para que el aire pueda entrar. Se puede hacer numerosas medidas al mismo tiempo, utilizando varios cilindros; el costo de este aparato es muy bajo (si no se ha previsto nada antes de salir al campo, se puede utilizar latas de conservas). Existe otro método que consiste en cavar un hueco en el suelo y llenarlo de agua. No aconsejamos este procedimiento porque las infiltraciones laterales pueden ser mucho más importantes que las infiltraciones verticales, sobre todo en los sedimentos bandeados de los salares.

3. Determinación de la evaporación capilar

Este método está inspirado en FETH and BROWN (1962). Estos autores recogían todas las sales depositadas por capilaridad en un área definida en la superficie, y las pesaban. Conociendo la concentración de la napa, calculaban así el volumen de agua que había sido necesario para depositar estas sales. Este volumen es, por supuesto, el volumen de agua capilar evaporada y no el volumen eliminado por evaporación.

directa que no lleva ninguna sal. Hay una crítica importante que hacer para este procedimiento : puede que una parte muy pequeña de las sales precipitan dentro del sedimento, entonces el volumen calculado es inferior al volumen real evaporado. Para evitar este problema, aconsejamos utilizar un elemento inerte, es decir que precipita solamente a partir de salmueras extremadamente concentradas. Este elemento precipitará entonces al último momento y se encontrará casi en su totalidad en la costra superficial. El más apropiado es el ión bromuro (Br^-).

Si hay algún problema para dosificar este elemento se puede utilizar el ión cloruro (Cl^-), pero este puede ya precipitar como halita dentro de los sedimentos, sobre todo si la salmuera es bien concentrada. Se procede así : se mide la concentración del ión escogido en la salmuera : C (agua) y en la sal superficial C (sal). Se mide también el peso total Q de las sales superficiales deshidratadas en un área conocida : s. A partir de estos valores se determina el volumen de agua evaporada Vec por capilaridad y la altura de evaporación H'e de la napa en este lugar. P es la porosidad del acuífero ($0 < P < 1$).

$$\text{Vec} = Q \frac{C \text{ sal}}{C \text{ agua}}$$

$$H'e = \frac{\text{Vec}}{P.s} = \frac{Q}{P.s} \frac{C \text{ sal}}{C \text{ agua}}$$

Q en kg	C sal en ppm (= mg/kg)	Vec en litro
s en m ²	C agua en mg/litro	H'e en milímetro

4. Otras medidas

Puede ser necesario también medir la pluviosidad, la evaporación, la porosidad y la permeabilidad de los sedimentos, etc. Todas estas técnicas están descritas con sumo detalle en cualquier libro de hidrología o de hidrogeología (SCHOELLER, 1962; ROCHE, 1963; GRAY, 1973).

G) RECOMENDACIONES PARA LOS TRABAJOS DE LABORATORIO Y GABINETE

Solamente queremos dar algunos consejos, y no enfocar los

problemas analíticos. Ya hemos indicado el procedimiento que hay que seguir para el muestreo de las sales. Generalmente se mandan las muestras a un laboratorio para analizarlas. Siempre hay que exigir del laboratorio que indique claramente y minuciosamente como se ha procedido para los análisis. Es imprescindible saber si el laboratorio da los resultados de las sales desecadas y si es así a que temperatura se han desecado las muestras y que cantidad de agua se ha perdido, o si han corregido los resultados en función de la cantidad de agua perdida.

Los resultados químicos deben siempre estar presentados en su forma inicial, es decir como el laboratorio los entregó. Por ejemplo, si un laboratorio da los resultados del análisis de una sal en % iónicos, se puede transformar esos datos en % de sales, pero hay que presentar también los % iónicos dados por el laboratorio.

La identificación de una sal, no se hace por medio de los análisis químicos, sino por medio de los rayos X. Estos dan la lista cualitativa de los minerales que hay en la muestra. El análisis químico permite cuantificar los porcentajes relativos de cada sal.

En lo que concierne a la redacción de los informes hay muchos buenos consejos en MCKINSTRY (1970). Insistimos especialmente en que los informes deben ser cortos, y también hay que evitar en lo posible los planos-sábanas. Es muy excepcional que no se pueda reducir los dibujos al tamaño del informe.

Capítulo IV

RENOVABILIDAD DE LOS YACIMIENTOS SALINOS

A) DEFINICION DE LA RENOVABILIDAD

Todos los salares bolivianos, están alimentados por aguas y sales, pero las cantidades que entran así, pueden ser insuficientes para una explotación continua. Sea T cantidad de sales totales (precipitadas y disueltas) en el yacimiento, y t la cantidad de sales que entran y que se quedan en el yacimiento cada año (las sales que se infiltran no cuentan). Q es la cantidad de sales que se desean explotar cada año.

- Si $Q \leq t$ el yacimiento es indefinidamente renovable.
- Si $Q > t$ se podrá explotar el yacimiento durante $T / (Q-t)$ años.
- Si t es muy pequeño relativamente a Q ($Q/t > 10$) el yacimiento no es renovable.
- Si t no es muy pequeño, comparativamente a Q ($Q/t < 10$) entonces el yacimiento es parcialmente renovable.

El problema es de tener una idea del valor de t, cantidad de sales que entran y se quedan cada año en el yacimiento. No es un problema simple, y en algunos casos puede ser indeterminado. Tenemos que hacer muchas suposiciones, debido sobre todo a la inaccesibilidad de esos lugares. No se pueden hacer medidas regulares todo el año.

B) LAGO Y LAGUNA SALADA

1. Introducción. Símbolos utilizados

Es necesario recordar un poco de teoría para la mejor comprensión del fenómeno. Para hacer un estudio más amplio, se puede leer CARMOUZE (1976), CARMOUZE y PEDRO (1977), DEBENEDETTI (1976). Se utilizarán los símbolos siguientes (ver Fig. 11) :

Vor : volumen de agua que entra en el lago por las orillas en un año (ríos y manantiales).

Vi : volumen de agua que se infiltra en un año a partir del fondo del lago.

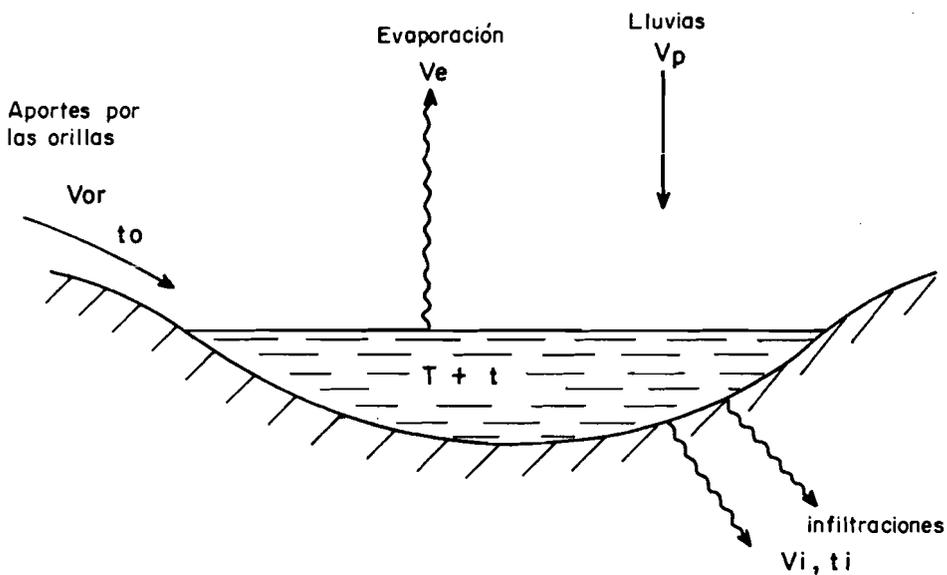


Fig. 11 Regulación hidroquímica de un lago salado

V = volúmen de agua

t = cantidad de sales disueltas

T = cantidad de sal que hay en el lugar antes de haber recibido los to de las orillas

- Vp : volumen de agua que entra directamente en la superficie del lago por las lluvias, en un año.
- Ve : volumen de agua que se evapora del lago en un año.
- tor : cantidad de elementos o de sales disueltas que entran en un año.
- ti : cantidad de elementos o de sales disueltas que se infiltran en un año.
- t : cantidad de elementos o de sales que entran y se quedan en el lago en un año.
- Cor : concentración promedio de los aportes (ríos y manantiales).
- CL : concentración del lago al nivel promedio de estabilidad
- He : altura de evaporación.
- Hp : pluviosidad : altura de las precipitaciones.
- S : superficie de la laguna.

Las cantidades t y las concentraciones C se refieren indistintamente a elementos (Li, B, etc...), a sales disueltas (Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , etc...) o a las sales totales disueltas (STD).

Solamente se consideran elementos correspondientes a sales disueltas muy solubles, que son las que nos interesan económicamente.

Unidades : los volúmenes : V se expresan en m^3 ;
 las superficies : S son expresadas en m^2 ;
 las cantidades : t son expresadas en toneladas;
 las concentraciones : para los análisis se expresarán en mg/l, pero para los cálculos de reservas y renovabilidad se utilizará las toneladas/ m^3 ($1 \text{ mg/l} = 10^{-6} \text{ ton/m}^3$)

Para determinar las concentraciones promedios, es necesario ponderar en lo posible, los valores individuales en función de los caudales de los ríos y manantiales.

2. Hipótesis básicas

-Ningún lago del Altiplano boliviano se encuentra actualmente

en una fase de dilución, es decir que no están en un período de crecimiento de sus niveles de aguas. No se puede probar esta afirmación, pero la historia lacustre de todos esos lagos indica que están en una fase de sequía. Esas lagunas se encuentran casi todas a un nivel considerablemente inferior a sus antiguos niveles, respresentados por las capas lacustres de sus bordes. Sus alimentaciones se deben sobre todo a la descarga de napas subterráneas durante todo el año, más que a los aportes actuales por las lluvias. Además, las nevadas son mínimas en los cerros, que podrían alimentar y diluir esos salares, como ha podido ocurrir antes (SERVANT, 1978).

- Los niveles de los lagos y lagunas son estables. Puede haber pequeñas variaciones en el curso del año, o de un año al otro, pero si se toma un periodo de tiempo más largo, se puede considerar que los niveles oscilan alrededor de un nivel promedio, estable. En realidad todos los lugareños de cierta edad que viven en esos lugares coinciden en afirmar que los niveles de los lagos eran algo más altos hace unos 50 años (lo que nos dá otro argumento para la primera hipótesis). Pero a la escala de 10-30 años (que corresponden al tiempo de amortización de cualquier tipo de inversión económica), podemos considerar a los niveles estables.

3. Cálculo de la renovabilidad

A partir de las hipótesis básicas, se puede escribir la ecuación fundamental :

$$V_{or} + V_p = V_e + V_i$$

que indica que todos los aportes líquidos que entran son iguales a las pérdidas líquidas del lago, lo que mantiene estable el nivel del lago : la ecuación que controla la cantidad de elementos o de sales presentes es :

$$t_{or} = t + t_i$$

Hay dos partes distintas en los aportes : el agua y las sales disuel-

tas. Las dos no tienen el mismo comportamiento, el agua se evapora, las sales no. Pero las dos entran conjuntamente en el lago y se pueden infiltrar por el fondo (pérdidas) (ver figura 8) Vor y Vi contienen sales disueltas a las respectivas concentraciones Cor y CL. Vp y Ve están consideradas como aguas puras, sin sales (hay HCO_3^- en Vp pero es ínfimo comparativamente con lo que entra por las orillas).

Se ha visto que t es la cantidad de elementos o de sales que entran y se quedan en la laguna. Pueden quedarse en solución o precipitar químicamente en el fondo (también pueden ser eliminados bioquímicamente: SiO_2 en las diatomeas, CaCO_3 en las algas calcáreas). No tomaremos en cuenta las sales que precipitan (química o bioquímicamente) porque los elementos que nos interesan económicamente forman sobre todo sales solubles que no precipitan fácilmente, o si precipitan en cierto momento del año, se redisuelven en otra época del año (ejemplo: el natron cristaliza en el invierno).

Entonces consideramos que todo lo que entra se queda en solución. Sería falso si se consideraría sales poco solubles como la calcita, la sílice o el yeso. También la cantidad de estos tipos de sales que precipitan es muy pequeña en comparación al stock de STD que hay en la laguna (porque es salada), pero de manera rigurosa, no son observables en comparación con el stock de STD que entra cada año en la laguna (tor). No se entrará en consideración de detalles, porque, por una parte complicarían considerablemente los cálculos, y por otra la mayor precisión que se obtendría no sería significativa en relación con los demás errores e imprecisiones. También se hace abstracción de otros tipos de aportes, como los eólicos.

Entonces se puede escribir :

$$\text{Vor} \cdot \text{Cor} = t + \text{Vi} \cdot \text{CL}$$

$$t = \text{Vor} \cdot \text{Cor} - \text{Vi} \cdot \text{CL}$$

Reemplazando :

$$\text{Vor} = \text{Ve} + \text{Vi} - \text{Vp}, \text{ por una parte}$$

$$\text{Vi} = \text{Vp} + \text{Vor} - \text{Ve}, \text{ por otra parte}$$

se obtiene las dos relaciones básicas :

$$t = (Ve - Vp) Cor - Vi (CL - Cor)$$

$$t = (Ve - Vp) CL - Vor (CL - Cor)$$

Ve , Vp , Cor , CL son determinables con una buena aproximación Ve y Vp se obtienen multiplicando la superficie del lago (S) respectivamente con la altura de evaporación (He) y con la pluviosidad (Hp); CL y Cor se miden gráficamente. Las incógnitas son Vi y Vor .

Es muy difícil medir esos valores directamente, sobre todo Vi . Se puede determinar Vor haciendo medidas todo el año, particularmente en épocas de lluvia, lo que es problemático por la inaccesibilidad de esos lugares. Además una gran parte de los aportes se hace de manera difusa a lo largo de las orillas, como también es posible el ingreso de aguas por debajo de la superficie del lago, lo que imposibilita cualquier tipo de medidas (por lo menos medidas simples). Empero, cada vez que se pueda estimar un valor para Vor , por ejemplo : cuando el lago está alimentado principalmente por un río o algunos manantiales importantes, habrá que comparar este valor con los valores límites de Vor calculados por las fórmulas dadas a continuación. Siempre la medida directa deberá ser inferior al valor límite superior calculado para Vor , de otra manera hay una contradicción, probablemente debida a algún error. En cuanto a Vi , su medida directa es casi imposible. El único caso en que se podría dar un valor es cuando el fondo de la laguna se muestra en toda su extensión, perfectamente impermeable, lo que es excepcional, entonces $Vi = 0$. Pero si el fondo es permeable (arenas, gravas) eso no quiere decir que las aguas se infiltran. Ellas pueden saturar el nivel permeable hasta una impermeable más profunda.

Se vá a representar las dos ecuaciones de t gráficamente en un diagrama (t , Vor , Vi) (ver Fig. 12).

$t = f(Vi)$ es un segmento de derecha cuyas extremidades tienen las siguientes coordenadas :

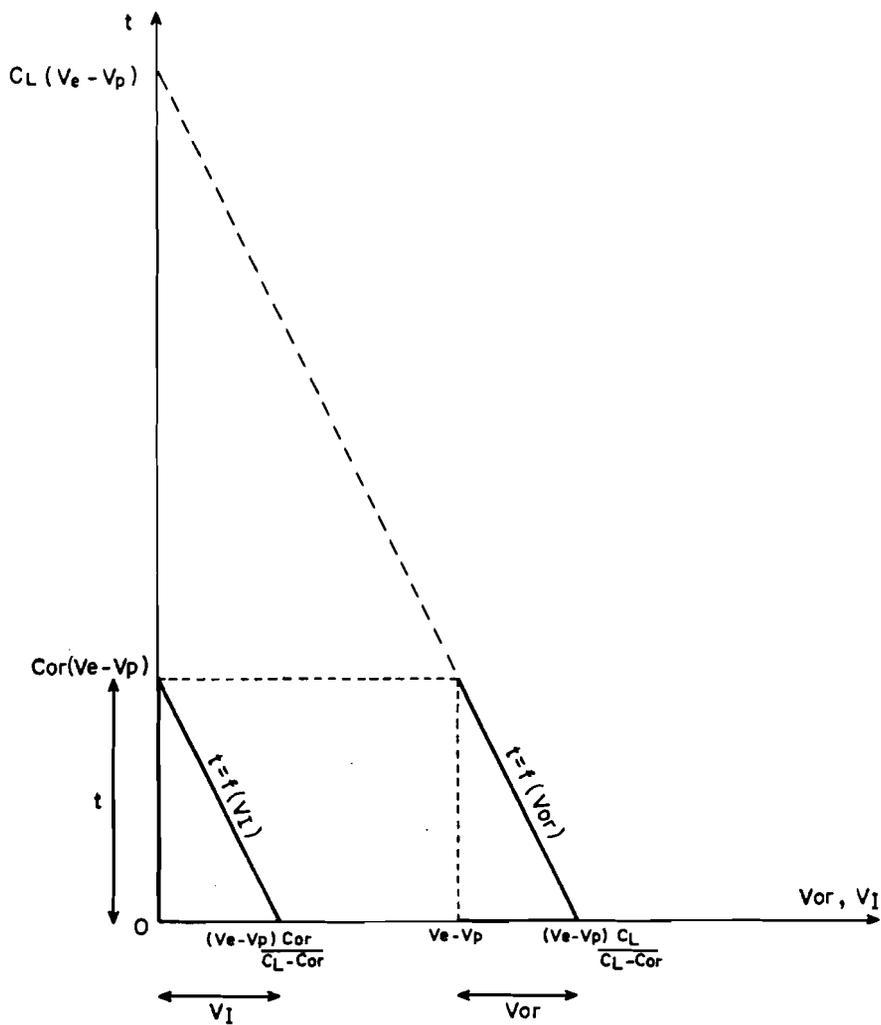


Fig.12.- Representación gráfica de las variaciones de t en función de V_{or} y V_I en un lago salado.

$$\left[\begin{array}{l} t = 0 \\ Vi = \frac{(Ve-Vp) \text{ Cor}}{CL - \text{Cor}} \end{array} \right. \quad \text{Y} \quad \left[\begin{array}{l} t = (Ve-Vp) \text{ Cor} \\ Vi = 0 \end{array} \right.$$

$t = f$ (Vor) es un segmento de derecha paralelo al anterior cuyas extremidades tienen las siguientes coordenadas :

$$\left[\begin{array}{l} t = 0 \\ Vor = \frac{(Ve-Vp) CL}{CL - \text{Cor}} \end{array} \right. \quad \text{Y} \quad \left[\begin{array}{l} t = (Ve-Vp) \text{ Cor} \\ Vor = Ve - Vp \end{array} \right.$$

El límite inferior $t = 0$ proviene de la primera hipótesis (no hay dilución, es decir $t > 0$). No se conocen los valores exactos de Vor, Vi y t, pero esos segmentos definen los límites inferiores y superiores de estas incógnitas. Se han representado puntos arbitrarios para t, Vor y Vi con objeto de mostrar como están relacionados. Se tienen entonces las relaciones :

$$\begin{aligned} Ve - Vp &\leq Vor \leq \frac{(Ve-Vp) CL}{CL - \text{Cor}} \\ 0 &\leq Vi \leq \frac{(Ve-Vp) \text{ Cor}}{CL - \text{Cor}} \\ 0 &\leq t \leq (Ve-Vp) \text{ Cor} \\ (Ve-Vp) \text{ Cor} &\leq \text{tor} \leq \frac{(Ve-Vp) CL \text{ Cor}}{CL - \text{Cor}} \\ 0 &\leq ti \leq \frac{(Ve-Vp) CL \text{ Cor}}{CL - \text{Cor}} \end{aligned}$$

Lo más importante es el límite superior de t que puede ser una información muy valiosa. Por ejemplo si este límite se calcula en 100 toneladas/año y si las necesidades son de 10 000 ton/año, no es necesario insistir más, se descarta el yacimiento. Pero si este límite es del orden de magnitud de los requerimientos, entonces se puede programar trabajos complementarios para tratar de estimar más precisamente este valor de t.

Estas relaciones son muy prácticas porque todos los factores que las componen son fáciles de determinar : Ve y Vp dependen del clima

(y V_e de la concentración de la salmuera), Cor y CL se determinan químicamente.

4. Observaciones complementarias

a) Muy frecuentemente el lago es salado y los aportes muy dulces. El factor de concentración CL/Cor es comunmente de 100 hasta 1000. Entonces Cor es 100 a 1000 veces más pequeño que CL , y :

$$CL - Cor \sim CL$$

Entonces :

$$\frac{(Ve-Vp)CL}{CL-Cor} \sim Ve-Vp \quad \text{y} \quad \frac{(Ve-Vp)Cor}{CL-Cor} \sim (Ve-Vp) \frac{Cor}{CL}$$

y $Ve-Vp \ll Vor \ll Ve-Vp$, es decir $Vor \sim Ve-Vp$

$$0 \leq Vi \leq (Ve-Vp) \frac{Cor}{CL} \quad \text{con} \quad \frac{Cor}{CL} \rightarrow 0, \text{ cuando aumenta la concentración del lago.}$$

Cuando más alto es el factor de concentración de las aguas de una laguna, más reducidas son las infiltraciones (por supuesto recordamos una vez más que se trata del factor de concentración de los elementos y sales muy solubles y de las STD). Se puede entonces calcular con buena precisión la cantidad $Vor = Ve-Vp$; eso es muy lógico, para que un lago se concentre, tienen que reducirse las infiltraciones.

b) Los puntos correspondientes a $t = 0$, $Vor = \frac{(Ve-Vp)CL}{CL-Cor}$ y $Vi = \frac{(Ve-Vp)Cor}{CL-Cor}$ corresponden a un lago en equilibrio dinámico : todas las sales solubles que entran se infiltran. Teóricamente eso podría ocurrir con un lago muy concentrado : un volumen reducido de salmuera que se infiltra puede llevar una alta cantidad de sales disueltas que puede ser igual a las cantidades de sales que entran en la laguna. Pero eso es poco probable porque el lago no se hubiera podido concentrar tanto, si hubiera habido muchas infiltraciones y la colmatación por los aportes sólidos siempre aumenta con el tiempo. Entonces los lagos en equilibrio dinámico son más frecuentemente lagos con concentraciones

bajas; el factor CL/Cor no es muy alto. Se pueden encontrar casos de lagos muy salados con fuertes infiltraciones; basta que los aportes también sean concentrados; en este caso CL/Cor tampoco es muy grande.

c) Podemos considerar la recíproca a los puntos a y b : un factor de concentración alto (100 a 1000) sugiere infiltraciones reducidas y un factor de concentración bajo (1 a 20) sugiere infiltraciones importantes, es decir una colmatación todavía imperfecta.

d) Se debe siempre calcular la relación : T/tor :

$$\frac{T(CL-Cor)}{(Ve-Vp)CLCor} \leq T/tor \leq \frac{T}{(Ve-Vp)Cor}$$

T es el stock del elemento o de la sal en solución; tor la cantidad de este elemento, o sal, que entra cada año en la laguna; T/tor tiene la dimensión de un tiempo. Para hacer entender el interés de esta relación, vamos a considerar un caso límite; suponemos que T/tor = 1 (es decir que los dos valores límites están cada uno cerca de 1). Eso quiere decir que en un año ha entrado la misma cantidad de sales que la que hay en la laguna. Si además suponemos que las infiltraciones son reducidas, esto implica que la concentración en este elemento (o sal) debe doblar de un año al otro. Muy rápidamente se llegaría a la saturación para todas las sales. En realidad nunca se observa esto. Las cosas van más lentamente. Las concentraciones en elementos o sales son siempre muy uniformes a la escala humana.

Las variaciones de concentración son indetectables de un año al otro. Entonces para que se mantengan constantes esas concentraciones se debe considerar que hay muchas infiltraciones que eliminan esta sal, o elemento, del lago (sales solubles y STD). Este razonamiento es válido cada vez que se encuentra un valor pequeño de T/tor (unos años o unas decenas de años), si este valor es alto (varios cientos o miles de años) es un argumento (pero no una prueba) para considerar las infiltraciones mínimas. Se puede notar a partir de los ejemplos precisos que las dos relaciones CL/Cor (factor de concentración) y T/tor varían casi siempre en el mismo sentido, confirmando que un aumento de cualquiera de esos dos valores indica una reducción de las infiltraciones.

Esta relación T/t_{or} , para un elemento disuelto, se llama "tiempo de residencia" de este elemento; pero algunos autores (STUMM and MORGAN, 1970) llaman tiempo de residencia la relación T/t , lo que ha introducido cierta confusión (LI, 1977). Solamente mencionamos esta definición, porque es muy corriente, y porque el lector la puede encontrar en varios otros trabajos, pero no se la utilizará.

Es muy tentador considerar este valor T/t_{or} como el tiempo durante el cual se ha concentrado el lago para llegar a la concentración que tiene ahora, y después concluir que la laguna tiene alrededor de T/t_{or} años de existencia. Eso es muy peligroso (muy a menudo falso). Si se aplica este cálculo a los mares y océanos, se encontraría una edad de 40 000 años (MACKENZIE and GARRELS, 1966), por supuesto no tiene sentido. Primero se debería considerar T/t y no T/t_{or} , por las infiltraciones, pero t casi nunca se conoce con precisión; la incertidumbre sobre su valor, aunque pequeña, puede dar una gran dispersión para el valor T/t . En realidad este valor, muy impreciso, sugiere algún evento en la historia del lago, probablemente un desequilibrio en su hidrología y su quimismo, pero no corresponde a su edad.

La mayoría de los fenómenos hidrológicos están controlados en última instancia por el clima y sus cambios. El último cambio importante en el Altiplano ocurrió hace cuatro siglos en que hubo un período más frío inmediatamente seguido por una extensión lacustre menor debido al descongelamiento de los nevados (Pequeña Edad Glacial). Se puede estimar que las actuales condiciones hidrológicas no han cambiado fundamentalmente desde hace cuatro siglos. Si se encuentra un valor de T/t_{or} inferior a cuatro siglos, eso sugiere que probablemente las infiltraciones son notables. Pero si se obtiene un valor superior a cuatro siglos, no se puede concluir. Por supuesto se admite que la morfología general de estas zonas no ha cambiado, es decir que no se han individualizado cuencas recientemente. Eso es muy probable en el caso de cuenca de origen volcánico y tectónica, pero no es seguro en el caso de cuencas formadas por deflación que pueden ser mucho más recientes.

La interpretación de T/t_{or} como la edad del yacimiento es más utilizable (pero siempre con cuidado) en el caso de yacimientos sólidos

como las sales capilares.

C) NAPA SUBTERRANEA Y LOS DEPOSITOS CAPILARES ASOCIADOS

1. Presentación del problema

El problema es muy complejo porque todos los elementos de un salar están relacionados. Damos en la Figura 13, los diagramas de los movimientos de las aguas y sales en un salar de tipo III, que es el más corriente (salmuera subterránea independiente de la laguna central: Fig. 7). Todos los valores están ponderados a un año. Puede haber varias napas sobrepuestas y separadas por niveles impermeables, solamente consideramos la napa más superficial.

MOVIMIENTO DE LAS AGUAS.- Los aportes provenientes de la cuenca de drenaje son Vol en la laguna superficial y Von en la napa subterránea. Las lluvias proveen Vpl directamente en la laguna superficial y Vps en el resto del salar. Una parte de Vps que es Vrs se escurre en la superficie y otra parte se infiltra en el salar. Una parte de la que se infiltra se evapora antes de llegar a la napa, Vep; Vis es lo que llega hasta la napa. Una parte de lo que se escurre en la superficie Vrs se evapora : Vre y lo que queda entra en la laguna superficial como Vrl. Las aguas de esta laguna se infiltran (Vil) alimentando la napa y también se pueden infiltrar las aguas de la napa : Vin. El volumen de agua de la napa (Vec) es la que se evapora a partir del agua capilar por encima de la napa, y Ven es el agua que se evapora directamente a partir de la napa. Como lo hemos visto en la definición de las sales capilares (capítulo II, Fig. 6) Vec no tiene efecto sobre la composición ni sobre las concentraciones de la napa, pero Ven concentra la napa. Consideramos que la napa se encuentra en equilibrio y que su nivel piezométrico oscila alrededor de un nivel de estabilidad promedio.

MOVIMIENTOS DE LAS SALES.- Los símbolos (t) se refieren indistintamente a los STD o cualquier sal soluble, o elemento relacionado a una sal soluble, ton y tol son las sales traídas desde las orillas por Von y Vol. Estas constituyen la alimentación total en sales del salar. La cantidad de sales capilares que se depositan encima de la

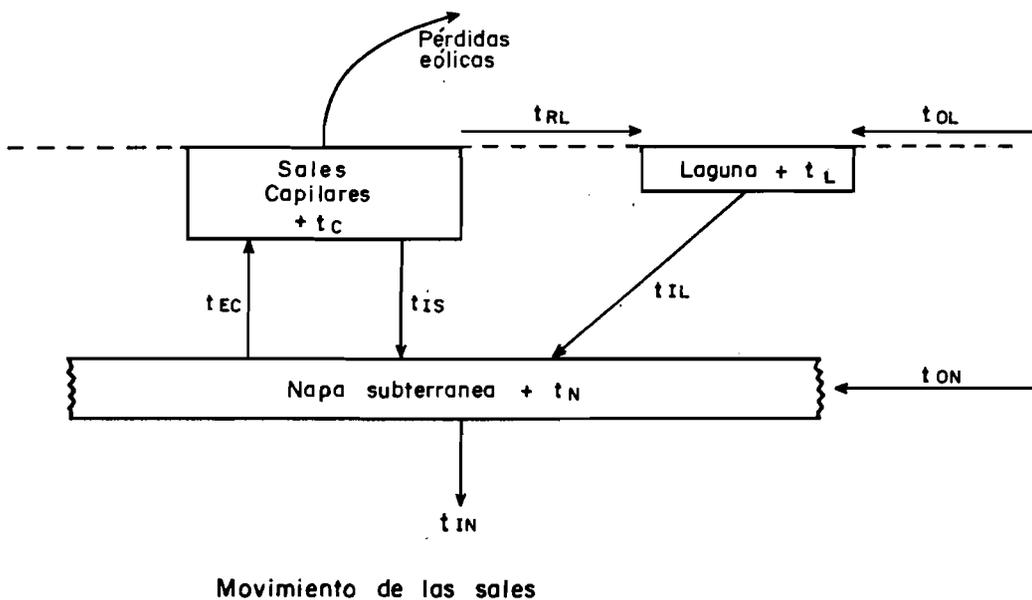
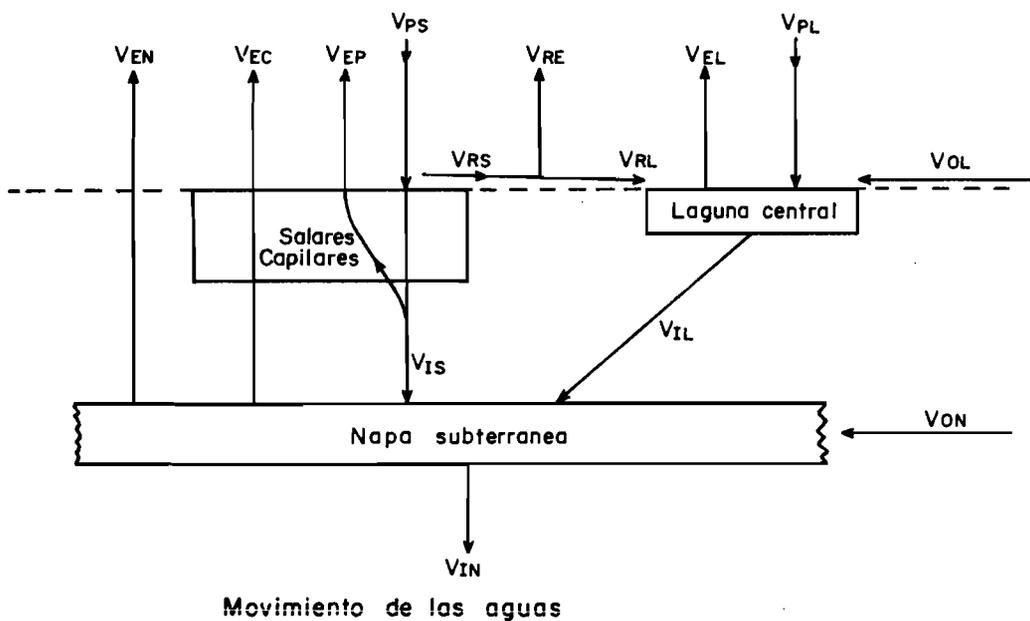


Fig.13- Movimientos de las aguas y de las sales en un salar del tip IV.

napa se expresa por t_{ec} y son traídas por V_{ec} , siendo t_{is} la cantidad de sales que entran de nuevo por redisolución de sales capilares por efecto de las lluvias.

En épocas de lluvias, por escurrimiento superficial, son llevadas sales hasta la laguna cuya cantidad es expresada por t_{rl} , también t_{il} representa a las sales que se infiltran desde la laguna hasta la napa y t_{in} son las sales que se infiltran desde la napa perdiéndose.

En la Figura 13, también son representadas las pérdidas eólicas y t_n , t_c y t_l son los aumentos anuales en sales de cada unidad, es decir la napa, los depósitos capilares y la laguna.

Las relaciones entre los V y los t se hacen por intermedio de las concentraciones C mediante la siguiente fórmula : $t = C \times V$. Por supuesto estas concentraciones no son uniformes, ni en los aportes, ni en la napa, ni siquiera en la laguna, pudiendo variar en el curso de un mismo trayecto. Las aguas que se infiltran o que se escurren pueden concentrarse (o talvés diluirse) en el curso de sus movimientos. Entonces solamente se puede utilizar concentraciones promedios de otra manera los problemas se vuelven irresolutos.

Estas dos relaciones están presentadas primero para dar al lector una idea de la complejidad de los fenómenos y después para permitir hacer cálculos más completos, cuando se disponen de datos más precisos. En el estado actual del estudio de los salares bolivianos es imposible cuantificar cada uno de esos valores, hay demasiadas incógnitas; pero se puede simplificar el problema y llevarlo al nivel de los datos disponibles.

2. Estudio del caso elemental

Se considera un caso elemental muy simple una napa subterránea que solamente recibe las aguas (V_{on} , t_{on}) y que pierde agua por ascensión capilar V_{ec} y por evaporación directa V_{en} . Las sales solamente pasan a un depósito capilar t_{ec} (Fig. 14a). No se toma en cuenta una laguna superficial, ni tampoco las infiltraciones : t_{is} , t_{il} y t_{in} . Este caso representa el nudo del problema. Todos los demás

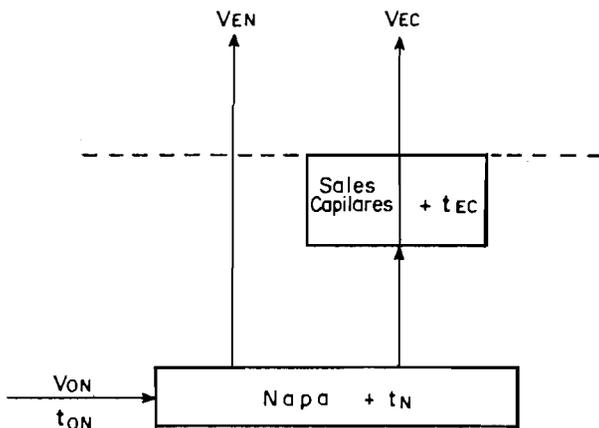
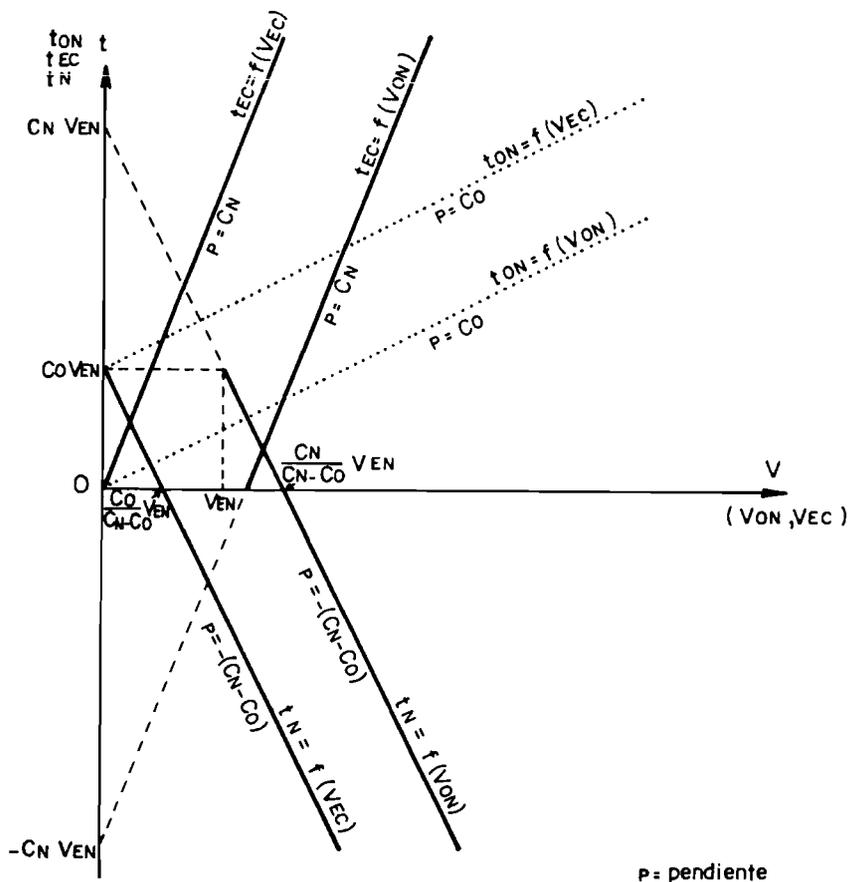


Fig.14a. Caso elemental de la evaporación de una napa subterránea.



p = pendiente

Fig.14b Representación gráfica de las variaciones de t_N , t_{EC} , t_{ON} en función de los volúmenes de aguas V_{ON} y V_{EC}

factores que se desestiman lo complican, pero no lo cambian fundamentalmente. Siendo C_0 la concentración promedio de las aguas que entran y C_N la concentración promedio de la napa. Entonces :

$$t_{0N} = C_0 V_{0N} \text{ y } t_{ec} = C_N V_{ec}$$

En este caso $t_{ec} = t_c$ porque se supone $t_{is} = 0$ (no tomándose en cuenta las pérdidas eólicas). Tenemos entonces las relaciones :

$$V_{0N} = V_{ec} + V_{en}$$

$$t_{0N} = t_{ec} + t_N$$

t_N es la renovabilidad anual de la napa y t_{ec} la de las sales capilares. Tenemos :

$$C_0 V_{0N} = t_N + C_N V_{ec}$$

$$t_N = C_0 V_{0N} - C_N V_{ec}$$

Reemplazando $V_{0N} = V_{en} + V_{ec}$ de una parte y $V_{ec} = V_{0N} - V_{en}$ por otra parte, se obtiene :

$$t_N = C_0 V_{en} - (C_N - C_0) V_{ec}$$

$$t_N = C_N V_{en} - (C_N - C_0) V_{0N}$$

y también se tiene :

$$t_{ec} = C_N V_{ec}$$

$$t_{ec} = C_N (V_{0N} - V_{en}) = C_N V_{0N} - C_N V_{en}$$

Esto nos dá cuatro funciones :

$$t_N = f(V_{ec}), t_N = f(V_{0N}), t_{ec} = f(V_{ec})$$

$$\text{y } t_{ec} = f(V_{0N})$$

que se vá a representar en un diagrama (t, V) (Fig. 14b). Cada una de esas funciones está representada por una media derecha; t_{ec} es siempre positivo, pero t_N es preferentemente negativo. El valor límite superior positivo es :

$$tN \leq CoVen$$

Pero Co es la concentración promedio de las aguas que alimentan la napa. Es un valor generalmente pequeño. Entonces se ve que tN tiende a ser negativo, salvo cuando Vec es muy pequeño en comparación a Ven . En efecto los valores positivos de tN corresponden a valores muy pequeños para Vec , como se vé en el diagrama.

Esto no está en contradicción con la primera hipótesis desarrollada al principio de este párrafo que dice que ningún salar está diluyéndose, porque esta suposición se debe aplicar al conjunto, es decir : napa + sales capilares. La renovabilidad total, o la cantidad total que entra cada año en este conjunto es $ton = f(Von)$, o $ton = f(Vec)$, que también está representado en el diagrama. Son dos media derechas con pendiente positiva, pero muchos menos acentuada que la pendiente de tec . Hay una redistribución de las sales de la napa al nivel capilar, la napa puede diluirse, pero la cantidad de sales capilares tiene que aumentar y la suma de esas dos variaciones (ton) es positiva.

Entonces se ve que no se puede considerar la renovabilidad de la napa, porque es muy posible que esta sea negativa. Solamente se puede considerar la renovabilidad de las sales capilares o del conjunto, sales capilares y napa. La renovabilidad positiva de la napa depende de los valores relativos entre Ven y Vec . Una napa que elimina su agua sobre todo por evaporación directa, podrá concentrarse. Esto va a depender entonces de la profundidad de la napa y de la naturaleza de los sedimentos situados encima de ella.

Una napa profunda (más de 1 m) con sedimentos poco permeables (arcilla limosa) estará sobre todo afectada por pérdidas capilares, y una agua poco profunda (menos de 50 cm) con sedimentos muy permeables y porosos encima (gravas, arenas) eliminará más su agua por evaporación directa. Esta posibilidad de dilución para una napa subterránea plantea problemas en cuanto a su origen. No se discutirá este punto, por ser demasiado científico y sin utilidad para consideraciones económicas. Digamos solamente que lo más probable es que las altas concentraciones adquiridas por esas aguas podrían estar en rela-

ción con la fase de sequía de los antiguos lagos.

3. Generalización a casos más complejos

Se ha visto el caso más simple, pero pueden ocurrir muchas complicaciones. Primero, los depósitos capilares no se forman de manera uniforme en los sedimentos, muchas veces están controlados por casi indetectables cambios de litología en esos sedimentos; la relación entre Vec y Ven puede cambiar totalmente en unos metros. Esto se nota claramente en la superficie de los salares. Muchas veces se observan manchas de unos metros a unas decenas o centenares de metros de diámetros de NaCl eflorescente, depositado por ascensión capilar de las aguas subterráneas (esta sal más soluble se deposita al último, preferencialmente en la superficie). Esas manchas están separadas por zonas sin NaCl, y aparecen en esos lugares y no en otros. Después la precipitación capilar dentro de los sedimentos puede progresivamente colmatar los intersticios lo que puede reducir y suprimir la evaporación. Esto, empero, ocurre más con las sales menos solubles (calci-ta, yeso) que con las sales solubles que son más móviles y pueden ser redisueltas parcialmente.

Las otras transferencias de sales que no se han tomado en cuenta tienen efectos variables. Las infiltraciones tin a partir de la napa aumentan la no renovabilidad de la napa; las infiltraciones a partir del lago superficial til, pueden limitar las pérdidas en la napa, o en caso extremo pueden hacer que tN se vuelva positivo. Pero, para eso se necesitará un lago muy extenso, cubriendo una gran parte de la superficie del salar y se volvería al caso de los lagos verdaderos, vistos anteriormente. Se puede estimar la importancia de estas infiltraciones (ver parágrafo anterior). Las infiltraciones tis a partir de las sales capilares hacia la napa no son un factor importante, porque tec es siempre superior a tis. Eso puede, sin embargo, tener un papel en la composición química de la napa, porque las sales que se redisuelven no son las mismas que las sales que se depositan por capilaridad. Las sales mas solubles depositadas se redisuelven rápidamente y la napa puede enriquecerse relativamente en sales solu-

bles. Las sales que alimentan la laguna por escurrimiento superficial (trl) también corresponden a las sales más solubles, porque son las últimas en haber precipitado, entonces las lagunas superficiales pueden ser también más ricas en sales solubles.

4. Cálculo práctico

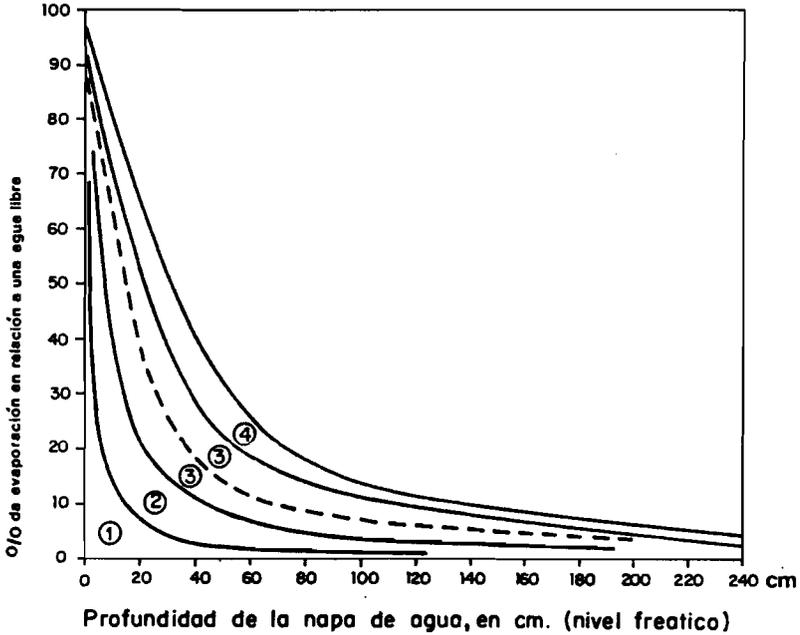
Ahora el problema es : cómo hacer con los pocos datos disponibles, para estimar un orden de magnitud de la renovabilidad de esos yacimientos subterráneos. La única manera de acercarse al resultado al nivel de reconocimiento en que estamos, es utilizando la relación :

$$\text{ton} = \text{CoVon} = \text{Co} (\text{Ven} + \text{Vec}).$$

El problema es de estimar Ven + Vec. Se dá un diagrama inspirado en varias medidas publicadas en la literatura (especialmente WHITE, 1932) (Figura 15), que dá el porcentaje de la evaporación superficial en función de la profundidad de la napa y del tipo de sedimentos encima de ella; no se distingue Von y Vec. También se representa en la figura una idea de como varía la intensidad de la evaporación en función de la granulometría de los sedimentos (independientemente de la profundidad). La evaporación es máxima para un limo, pero baja cuando el sedimento se vuelve más grueso (arena) o más fino (arcilla).

Una vez estimada la intensidad de la evaporación H_e a la profundidad considerada y en función de los sedimentos, se calcula el volumen de agua evaporada (en un año). Hay que tener cuidado de considerar la superficie S de la napa que efectivamente se evapora, es decir, eliminar las superficies por debajo de las lagunas superficiales que impiden la evaporación, eso dá el volumen del acuífero. Para tener el volumen de agua hay que multiplicar este por la porosidad P. Este volumen se multiplica finalmente por la concentración promedio Co de las aguas que entran en el salar : $\text{Ton} = S \times H_e \times P \times \text{Co}$.

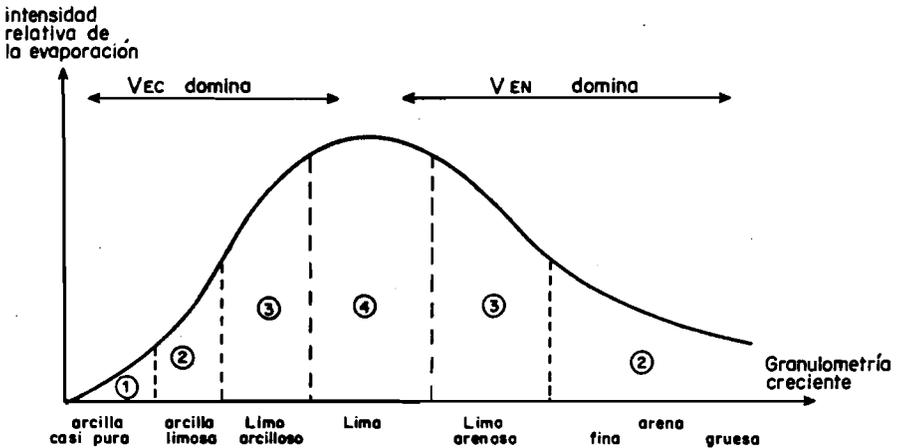
Esto nos dá una idea muy aproximada de la cantidad de sal (o del elemento que nos interesa), que entra cada año en el salar. No se han considerado las infiltraciones; se puede tener una idea de ellas, comparando la cantidad que entra cada año y que acabamos de esti-



- ① arcilla casi pura
- ② arcilla limosa y arena
- ③ limo arcilloso y arenoso
- ④ limo casi puro

En punteada: la curva promedio, según WHITE (1932)

Los sectores así definidos provienen de la extrapolación de medidas de varios autores (HELLWIG, 1974 y otros en SCHÖLLER, 1962)



Curva esquemática hipotética (cualitativa) de las variaciones de la evaporación en función de la granulometría.

Fig.15 Variación de la evaporación de una napa de agua subterránea en función de su profundidad y de la granulometría de los sedimentos encima de ella.

mar groseramente (ton). No se debe considerar solamente la cantidad de sales disueltas en la napa, sino también las sales capilares. Pero aquí hay una incertidumbre importante que es el espesor de la napa, su volumen y la cantidad total de sales disueltas. Tampoco se han considerado los aportes por las lluvias. Estos son notables solamente en el caso de un nivel de arena o de gravas con una napa poco profunda (menos de 50 cm). Pero en este caso la pluviosidad es todavía pequeña en comparación con la evaporación y se desestimarán siempre esos aportes a este nivel de las apreciaciones. Se puede también dar una estimación de la cantidad de sales que precipitan en los depósitos capilares, cada año :

$$tec = CnVec$$

Cn es la concentración promedio de la napa, Vec el volumen de salmuera que se evapora después de haber subido por capilaridad. El diagrama de la Figura 15 representa Vec + Ven. Como se consideran sales capilares es probable que Vec sea muy superior a Ven. Por eso y como no se tiene otro medio, se utilizará otra vez este diagrama para estimar Vec, se puede disminuir el volumen obtenido así de 10 a 20% para tomar en cuenta Ven. Pero esta corrección debe ser muy inferior a los demás errores. El volumen Vec se calcula en base a la superficie Sc de la extensión de las sales capilares (muy difícil de estimar con precisión porque no son continuos). También no hay que olvidar de multiplicar por la porosidad.

$$tec = Sc \times He' \times P \times CN$$

Este valor tec puede ser muy superior a ton que entra en el salar, eso quiere decir que probablemente la napa se diluye lentamente

Hay un caso particular que no se toma en cuenta y es cuando se nota una alimentación dominante (río), se puede calcular en base a lo que entra por el río, la cantidad de sales que ingresan en la napa. Pero generalmente no se sabe como el río se infiltra; probablemente una parte de sus aguas se pierden más profundamente. Esto daría un límite superior para la renovabilidad. Un estudio hidrogeológico de

la desembocadura puede dar una idea de las pérdidas por infiltración.

D) YACIMIENTOS DE SALES SINGENÉTICAS

Como son capas depositadas al secarse un lago salado, su renovabilidad por el mismo mecanismo es nula a la escala humana. Pero las aguas que alimentan el lago salado pueden seguir entrando en la cuenca, aunque con menor caudal y pueden alimentar una napa dentro de la costra de sal. El caso del salar de Uyuni es un ejemplo particular de las salmueras subterráneas; el sedimento está constituido por la misma sal disuelta en la salmuera, o aproximadamente, porque siempre hay un fraccionamiento de los elementos entre la salmuera y la sal. para tener una idea de la renovabilidad de estos yacimientos se hace referencia al párrafo sobre las salmueras subterráneas, pero los mecanismos no son absolutamente similares. Se debe considerar cada caso individualmente, en función de la naturaleza (hidrológica sobre todo) del acuífero salino y del elemento interesante (fraccionamiento).

E) CONCLUSIÓN SOBRE LA RENOVABILIDAD DE LOS SALARES BOLIVIANOS

Se puede observar que para los salares bolivianos hay una relación entre la superficie del salar y su renovabilidad. Mientras más grande es un salar, más extensas son sus orillas y más aguas dulces podrán alimentarlo. De manera muy aproximada se puede considerar que para un salar de $S \text{ km}^2$ de superficie, entran cada año entre $50 \times S$ y $500 \times S$ toneladas de sales totales disueltas. Por supuesto solamente una fracción de estas pueden tener algún interés económico. Por ejemplo : si fijamos un límite inferior arbitrario de 10 000 toneladas/año para la explotación industrial de un elemento o sal, eso nos indica que la superficie mínima de un salar renovable debe ser superior a 100 km^2 .

Podemos concluir, a pesar de que estos cálculos son muy aproximados, que los pequeños salares tienen poca posibilidad de renovabilidad, estos pueden ser útiles para una explotación doméstica por parte de las poblaciones vecinas. Para cualquier intento de industrialización hay que buscar los salares más extensos.

S E G U N D A P A R T E

LOS SALARES EN PARTICULAR
SU ESTUDIO ECONOMICO

INTRODUCCION

Nos hemos preguntado que clasificación seguir : ya sea por facies química, o por la posición geográfica, etc... No se ha encontrado ninguna solución buena; así que hemos preferido no seguir ningún orden definitivo en la descripción de los salares. Cada uno constituye un párrafo totalmente independiente de los demás, y se puede cambiar el orden sin perjuicio. Este método permitirá completar o cambiar sin ningún problema las descripciones de los salares cuando se tengan más datos disponibles.

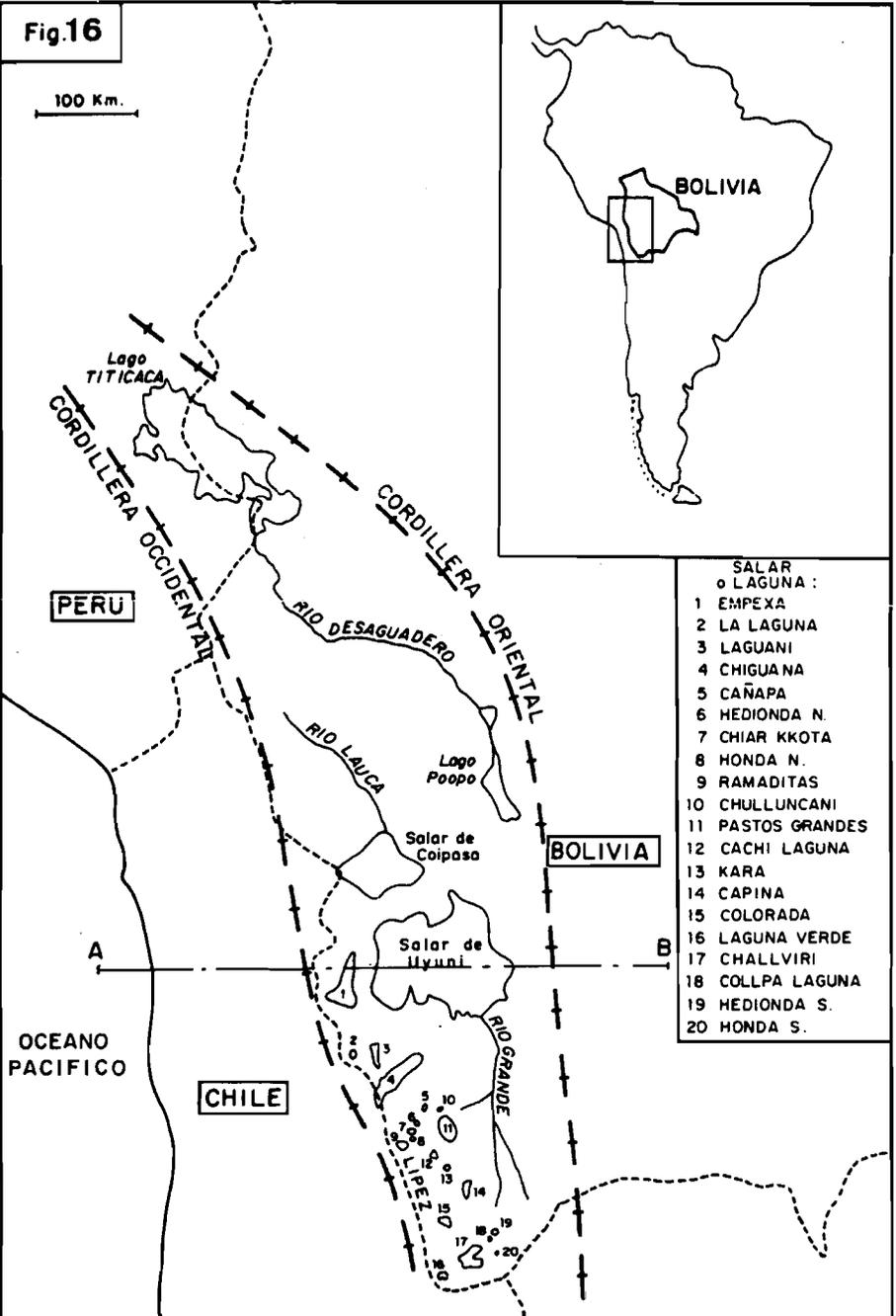
El salar de Uyuni es el primero que se describe por ser el más importante. Los salares poco estudiados han sido ubicados al final. Entre estos dos extremos hemos reunido los salares ya sea por su facies química (carbonatos de sodio, boratos), o por su posición geográfica (serie Chulluncani-Ramaditas).

El símbolo STD significa "sales totales disueltas", es decir la cantidad total de sales que hay en un litro de agua (representa la "salinidad").

La ubicación de los salares estudiados se representan en las figuras 16-17.

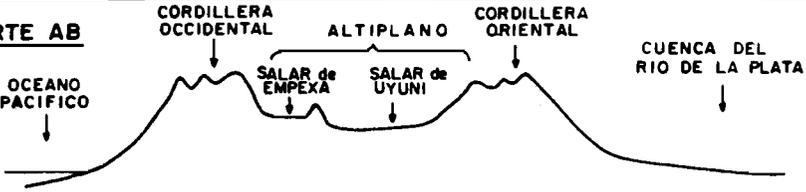
Fig.16

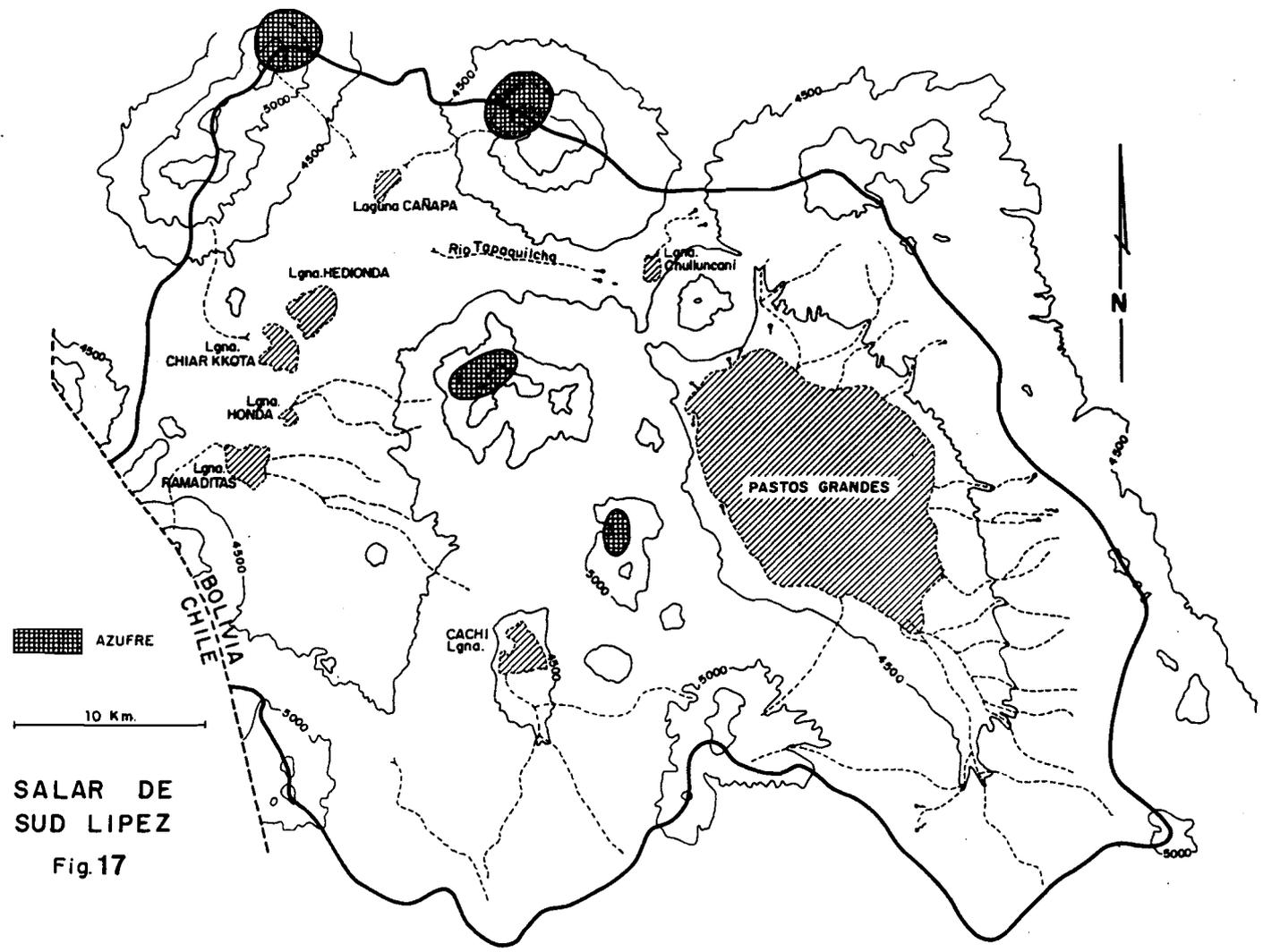
100 Km.



- SALAR o LAGUNA :
- 1 EMPEXA
 - 2 LA LAGUNA
 - 3 LAGUANI
 - 4 CHIGUANA
 - 5 CAÑAPA
 - 6 HEDIONDA N.
 - 7 CHIAR KKOTA
 - 8 HONDA N.
 - 9 RAMADITAS
 - 10 CHULLUNCANI
 - 11 PASTOS GRANDES
 - 12 CACHI LAGUNA
 - 13 KARA
 - 14 CAPINA
 - 15 COLORADA
 - 16 LAGUNA VERDE
 - 17 CHALLVIRI
 - 18 COLLPA LAGUNA
 - 19 HEDIONDA S.
 - 20 HONDA S.

CORTE AB





SALAR DE
SUD LIPEZ

Fig.17

EL SALAR DE UYUNI

El salar de Uyuni ocupa la parte central del Altiplano con una altitud de 3 653 m. Su superficie es de 9 000 km², lo que lo ubica como el salar más grande del mundo. La mayor parte del salar se encuentra en el departamento de Potosí.

ESTUDIOS ANTERIORES

- ERICKSEN and VINE, 1976.
- ERICKSEN, VINE and BALLON, 1978.
- RISACHER y MIRANDA, 1976.
- RISACHER, MIRANDA y CARLO, 1976.
- RETTIG, JONES and RISACHER, 1980.

HISTORIA CUATERNARIA DEL SALAR DE UYUNI (SERVANT et FONTES, 1978)

El Altiplano ha sido cubierto sucesivamente por varios lagos extensos que al secarse, depositaron capas de sales en la depresión central. Los dos últimos lagos eran :

- El lago Minchin (40 000 - 25 000 años BP)
- El lago Tauca (11 000 - 10 000 años BP).

Según lo que indica el estudio de las diatomeas de los niveles lacustres (SERVANT-VILDARY, 1978) cada lago era más concentrado que el anterior, tal vez debido a una redisolución parcial de la capa de sal depositada anteriormente, o quizás debido a una colmatación creciente de la cuenca (reducción de las infiltraciones). Los períodos de estabilidad de los lagos Minchin y Tauca están marcados por niveles muy bien desarrollados de algas calcáreas : las algas "Minchin". Estas permiten definir la altura del espejo de agua, así como también la edad de estos lagos (datación con ¹⁴C). El lago Minchin llegaba hasta 3 760 m y el lago Tauca hasta 3 720 m.

El origen de las aguas se debe probablemente más al derreti-

miento de los glaciares de las cordilleras que a un aumento de la pluviosidad. SERVANT y FONTES (1978) han correlacionado las fases lacustres con períodos glaciares, pero en el detalle no se sabe si los lagos han sido contemporáneos o inmediatamente posteriores a las fases glaciares.

Como lo veremos posteriormente el lago Tauca presenta un interés fundamental, no solamente en el aspecto científico, sino también en el aspecto económico. Este lago estaba formado por tres sub-lagos (Fig. 18) :

- El sub-lago Poopó (12 400 km²).
- El sub-lago de Coipasa (11 000 km²).
- El sub-lago de Uyuni (20 000 km²).

Los tres sub-lagos estaban conectados por estrechos y constituían tres unidades bien distintas. El salar de Uyuni corresponde entonces a la sequía, hace 10 000 años del sub-lago de Uyuni, del período lacustre Tauca. El sub-lago de Coipasa dejó el salar de Coipasa y el sub-lago Poopó, que estaba menos concentrado que los otros dos sub-lagos, dejó el lago Poopó, aunque parece que estas aguas han debido infiltrarse interiormente hacia Coipasa.

LA CUENCA DE DRENAJE

Hay que distinguir la cuenca de drenaje del salar actual, de la cuenca de drenaje de los antiguos lagos.

1. La cuenca de drenaje de los lagos antiguos

Ella comprende casi todo el Altiplano. No pertenecía, a la cuenca, la zona Sud-Oeste de los Lípez, constituida por cuencas cerradas, y la cuenca del Salar de Empexa, aunque podía haber habido conexión (rebalse) durante el período lacustre Minchin entre los lagos de Empexa y de Uyuni. No es nuestro propósito describir la geología del Altiplano (ver capítulo I). Solamente presentaremos brevemente los rasgos mayores.

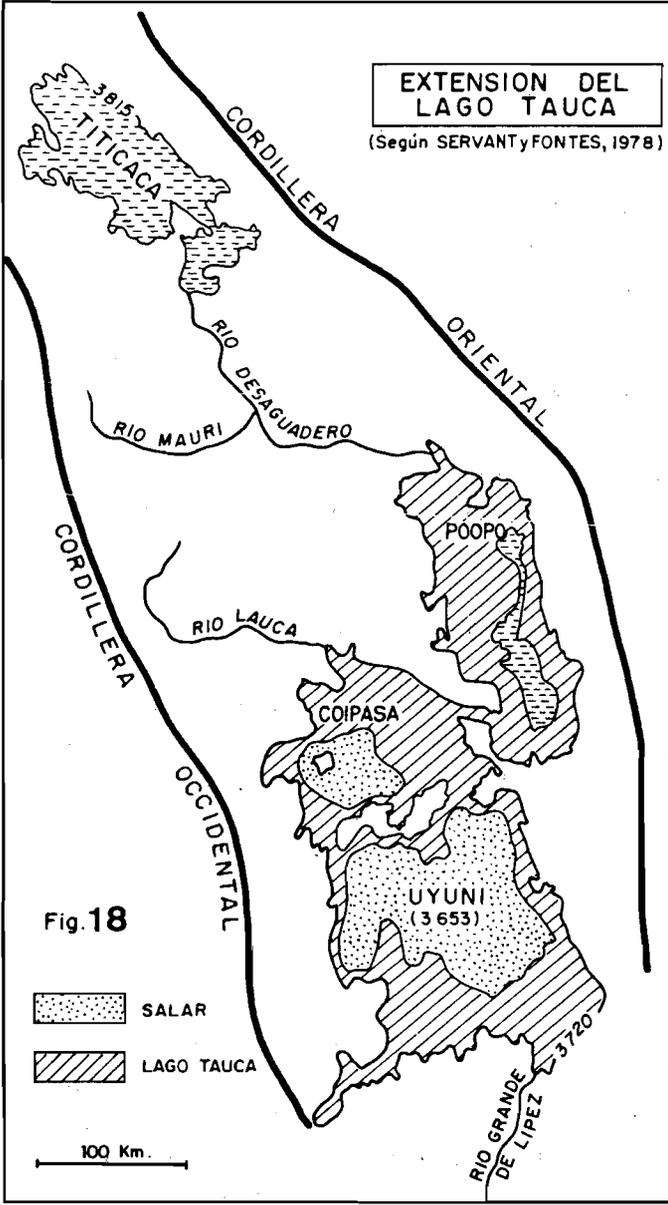


Fig.18

- La alimentación por el Norte drenaba mayormente terrenos sedimentarios : cuenca del Titicaca y el Altiplano Norte. Presentando dos zonas con litología diferente :

- . las serranías cristalinas de la Cordillera Real (Illampu, Illimani...).
- . Las zonas volcánicas de la Cordillera Occidental (Sajama).

Pero como se lo puede comprobar en el mapa geológico las superficies de estas dos zonas son reducidas en comparación con los terrenos sedimentarios.

- La alimentación por el Sur drenaba mayormente terrenos volcánicos ácidos : Cordillera Occidental, bordes Sur-Oeste de los Lípez, ignimbritas de Los Frailes al Este. Aquí también una excepción notable estaba constituida por toda la zona Sur-Este (Lípez Orientales) sedimentaria, que comprende una gran parte de la cuenca del Río Grande de Lípez.

2. La cuenca de drenaje del salar propiamente dicho

La cuenca actual del salar está muy reducida en el Norte, por estar limitada por las cuencas del Poopó y de Coipasa. Pero la parte Sur no ha sido modificada. La cuenca es sobre todo volcánica ácida (riodacitas) al Norte, Oeste y Sur del salar, y sobre todo sedimentaria al Este y al Sur-Este. Las ignimbritas de los Frailes recubren terrenos sedimentarios al Este del salar.

APORTES DE AGUA

Los principales aportes actuales vienen del Sur y del Sur-Este del salar. El Río Grande de Lípez constituye el mayor aporte. Es un río permanente que desemboca en el Sur-Este del salar, infiltrándose en los sedimentos deltaico-lacustres de este borde. Damos dos análisis de su agua.

	pH	ALC	CL	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg	STD
1	8.07	3.69	875	300	10.0	47.0	515	27	3.6	161	45.0	2269
2	8.25	4.69	1580	313	12.5	56.9	908	41.9	4.0	202	56.0	3460

ALC en meq(H⁺)/l

1 : S. RETTIG et al., 1980

otros en mg/l

2 : F. RISACHER, inédito

El análisis dos corresponde a una agua enriquecida en sales solubles (NaCl) probablemente debido a una redisolución de estas sales en los bordes durante la crecida de las aguas. El caudal de este río es difícil de estimar a todo lo largo del año, sobre todo en época de lluvia. Observaciones esporádicas muestran que el caudal varía de 1 m³/s en aguas bajas, hasta 4 m³/s en aguas altas. Ponderando estos valores con la duración promedio de cada período, obtenemos un promedio anual de 2 m³/s; o sea que cada año el Río Grande trae un volumen de más o menos 60 000 000 m³. De esta manera, podemos tener una idea de la cantidad de sales traídas cada año al salar por el Río Grande.

	Concentración (ton/m ³)	Toneladas anuales
Li	3.8 x 10 ⁻⁵	230
B	11 x 10 ⁵	660
K	35 x 10 ⁵	2 100
STD	2 800 x 10 ⁵	168 000

El segundo aporte en orden de magnitud proviene de un conjunto de pequeños ríos al Sur-Este del salar que desembocan al Sur de la ciudad de Uyuni (Río Pucó Mayu en la Pampa Colorada). Estos ríos drenan sobre todo los terrenos sedimentarios de la Cordillera Oriental. Estos aportes son notables solamente en época de lluvia. En época seca casi no se notan. Por eso se piensa que no son tan importantes co-

mo los aportes del Río Grande. No se tienen análisis de estas aguas.

En fin hay que señalar la existencia de numerosos pequeños ríos efímeros alrededor del salar. Sólo pueden tener alguna importancia en época de lluvia.

INTERPRETACION DEL QUIMISMO DE LOS APORTES

El cálculo de R (ver II-F-7) para las aguas del Río Grande da $R > 1$, lo que quiere decir que evolucionarán hacia facies neutras Na-(Ca)-Cl-(SO₄). No podrán dar carbonatos de sodio. Esto se debe a que el Río Grande drena una gran superficie de terrenos sedimentarios, en los Lípez Orientales. La influencia de las zonas volcánicas drenadas se nota en las altas concentraciones (para una agua dulce) en Li y B que se originan en la alteración de estas rocas volcánicas.

En lo que concierne a los aportes del SE se puede solamente suponer con bastante seguridad que estas aguas deben también tener un valor de $R > 1$ por drenar terrenos sedimentarios, pero que, al contrario del Río Grande deben presentar concentraciones más pequeñas en Li y B, por no tener rocas volcánicas en sus zonas de drenaje.

Los aportes temporales de los demás ríos son demasiado pequeños para ser tomados en cuenta a este nivel del estudio.

DESCRIPCION DE LA COSTRA DE SAL (ver Fig. 19)

Al andar por el salar, en época seca, uno se lleva la impresión de una costra muy compacta, dura y seca. Es exactamente lo contrario : se puede dar la definición siguiente del salar de Uyuni : es un lago subterráneo de salmuera dentro de una capa de cloruro de sodio muy porosa. El nivel de la salmuera esta, en época seca entre 20 y 40 cm por debajo de la superficie. Al evaporarse esta salmuera se colmatan los 20-40 cm superficiales dando este aspecto compacto superficial. El espesor máximo de la costra de sal parece ser de unos 10 m. El fondo del salar está constituido por un barro impermeable (observado gracias a dos sondeos del Servicio Geológico de Estados Unidos). Entonces el lago de salmuera tiene un volumen bien definido. No se sabe,

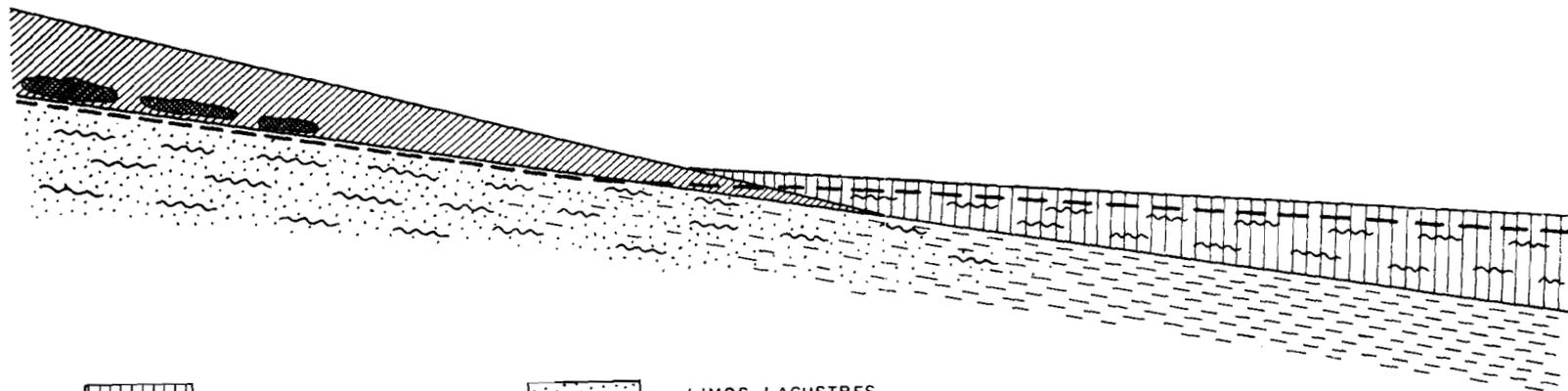
YACIMIENTO DE
ULEXITA DE RIO GRANDE

ZONA MAS CONCENTRADA
EN Li, K y B

HACIA EL CENTRO
DEL SALAR →

SE

NO



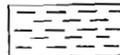
COSTRA DE NaCl



LIMOS LACUSTRES
PERMEABLES



NIVELES DELTAICOS
ARCILLAS CON LENTES
ARENOSAS



ARCILLAS LACUSTRES
IMPERMEABLES



ULEXITA



CAPA DE AGUA

Fig.19

SALAR DE UYUNI

CORTE MUY SIMPLIFICADO
Y TEORICO EN LA ZONA DE
RIO GRANDE

sin embargo, lo que ocurre en los bordes del salar. Se conoce que YPFB, al perforar en el salar ha encontrado otras costras de sales más profundas, por debajo del nivel arcilloso impermeable. Pero no se tiene ningún dato preciso al respecto. Es posible que estas capas de sales profundas también contengan salmueras, y que estas salmueras se mezclan con el lago superficial en los bordes.

NATURALEZA DE LA SAL

Se trata sobre todo de halita (NaCl). Todos los diagramas de Rayos X hechos hasta ahora muestran también la presencia de silvita (KCl). Pero hay aquí un problema de interpretación. Solamente se han estudiado muestras superficiales sacadas por encima de la napa. La evaporación total de esta salmuera ha debido depositar en los 20-40 cm superficiales todas las sales que estaban disueltas, especialmente KCl .

Pero consideraciones termodinámicas hechas a partir de los análisis de salmueras muestran que estas aguas están muy por debajo de la saturación en silvita y que no pueden depositar este mineral, sin ser sometidas a una fuerte evaporación, como en la superficie. Entonces si hay silvita en la costra por debajo del nivel de la napa este mineral no estaría en equilibrio con la salmuera, y tendría que disolverse. Por esta incertidumbre solamente consideramos el potasio disuelto en la salmuera en los cálculos de reservas. Falta hacer muchos pozos y sacar muchas muestras sólidas profundas para poder dar conclusiones en lo que concierne al potasio.

Los dos sondeos hechos por el Servicio Geológico de Estados Unidos han mostrado también la presencia, a partir de 1-2 metros de profundidades, de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) que rellena parte de los intersticios de la halita. Pero su cantidad total debe ser insignificante en comparación con la halita.

La costra de halita presenta una estructura estratificada con capas de espesor muy variable: (unos milímetros a un centímetro), y sobre todo con una porosidad variable. Esto impide medir fácilmente el valor real promedio de la porosidad de la costra para todo el salar. Tomando en cuenta los sondeos y también una pequeña prueba de

bombeo de la salmuera del salar nos indica una alta transmisividad del acuífero salino, se estimará la porosidad global de la costra como en un 30%.

DATOS GENERALES DE VOLUMENES

La superficie del salar es de $9\ 000\ \text{km}^2$, su espesor medio de 5 m entonces su volumen total es de $45 \times 10^9\ \text{m}^3$ ($45\ \text{km}^3$).

Volumen de la sal cristalizada (Halita) : $45 \times 0.7 = 31.5\ \text{km}^3$
 Volumen de la salmuera : $45 \times 0.3 = 13.5\ \text{km}^3$.

Redondearemos estos valores a $32\ \text{km}^3$ para el volumen de la costra y $13\ \text{km}^3$ para el volumen de la salmuera (hay que corregir del volumen superficial seco del salar).

Se puede inmediatamente calcular la cantidad de halita que hay en la costra de sal del salar de Uyuni (densidad de la halita = 2)

$$32 \times 10^9 \times 2 = 64 \times 10^9 \text{ toneladas NaCl.}$$

LAS SALMUERAS DEL SALAR DE UYUNI

Numerosos análisis de las salmueras de Uyuni ya han sido publicadas (ERICKSEN et al., 1978; RETTIG et al., 1980). Entonces no daremos detalle de estos análisis, pero los interpretaremos.

Se puede considerar dos zonas distintas en el salar de Uyuni: la costra de sal propiamente dicha con su salmuera intersticial y la desembocadura del Río Grande en el salar. Esta última es una zona de sedimentos deltaico-lacustres muy rica en boro y litio, cuyas salmueras tienen un quimismo distinto de las del salar de Uyuni.

No se sabe a que profundidad llega la napa de salmuera. la figura 19, muestra la estructura esquemática de esta zona. El Río Grande se infiltra y alimenta las napas subterráneas en los sedimentos deltaico-lacustres.

El análisis nº 3 corresponde al promedio de los análisis de las muestras sacadas en una sección transversal Este-Oeste del salar de Uyuni. El análisis nº 4 corresponde a la salmuera más concentrada en Li y B en la zona de Río Grande.

	pH	Densidad	ALC	Cl	SO ₄	B
3	7.25	1.211	6.61	190	10.3	0.247
4	5.43	1.273	109	230	31.3	3.46

	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg	STD
3	0.009	106	8.7	0.423	0.561	7.86	325
4	0.021	12.5	17.6	4.22	0.052	68.9	375

ALC en meq(H⁺)/l

otros en : gramos/litro

3) S. RETTIG et al. 1980

(promedio de 15 análisis)

4) F. RISACHER - inedito.

Casi todos los análisis corresponden a la parte superficial de la napa. Solamente se tiene un análisis completo de una salmuera profunda, y algunos datos parciales para otras aguas profundas. Estos pocos datos no presentan variación notable con las aguas superficiales, salvo en el contenido en H₂S, estando las aguas muy reducidas en el fondo. Como no se tiene otro medio asumiremos que las concentraciones en profundidad son similares a las de la superficie. El quimismo del salar es del tipo Na-Cl-SO₄ (ver II-F-4 y Fig. 9).

El quimismo de la zona de Río Grande es distinto al del resto del salar. Es aquí que se encuentran las concentraciones más altas en Li, K, Mg y B (análisis 4).

Esta salmuera se encuentra en el límite SE de la costra de sal, en el eje de la desembocadura del Río Grande. Su quimismo es del tipo $Mg-(Li)-(K)-(Na)-Cl-SO_4$. Una discusión más científica se puede encontrar en RETTIG, JONES and RISACHER, 1980.

El quimismo del salar de Uyuni corresponde bien a las aguas de alimentación actuales y antiguas (ver II-F-7).

RESERVAS EN Li, K Y B DE LA SALMUERA

Es en la salmuera del salar de Uyuni que el Servicio Geológico de Estados Unidos descubrió por primera vez el litio. La presencia del Litio en concentraciones muy altas, en las borateras, fué puesto en evidencia, especialmente en la zona de Río Grande, por el Convenio UMSA-ORSTOM.

El litio y el boro no se encuentran (teóricamente) en la costra de sal. En cuanto al potasio ya se ha discutido el problema. Se presentan, en las figuras 20, 21 y 22 los mapas de curvas de isoconcentración en Li, K y B en el salar de Uyuni. Estas curvas corresponden a la parte superficial de la salmuera. Como ya se ha dicho se supondrá que los valores de las concentraciones se mantienen en profundidad. Se nota, en estos mapas que el Li, K y B tienen un comportamiento similar. Las zonas más concentradas se encuentran en el límite Sur del Salar en la prolongación inmediata de la desembocadura del Río Grande de Lipez. Las concentraciones en Li, K y B llegan a valores muy altos (más de 4 g/l para Li). Entrando en el salar estas concentraciones bajan hacia el Norte. Es como si las salmueras de tipo $Mg-(Li)-(K)-(Na)-Cl-SO_4$ de Río Grande se diluyeran en las salmueras de tipo $Na-Cl-SO_4$ de Uyuni. Cabe hacer notar también la influencia de los aportes menos concentrados en Li, K y B al Sur-Este del salar (Río Puca Mayu). Es aquí que se encuentran una de las zonas menos concentradas en Li del salar.

Para el cálculo de reservas utilizaremos los valores promedios del análisis 3. Se podría afinar más, utilizando las curvas de isoconcentración, pero como hay algo de incertidumbre en cuanto a las

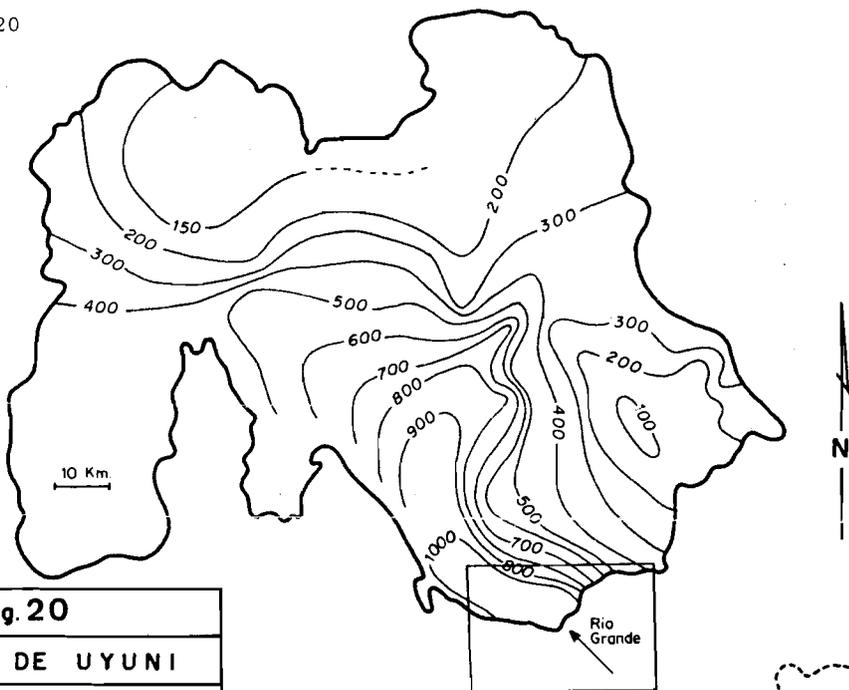
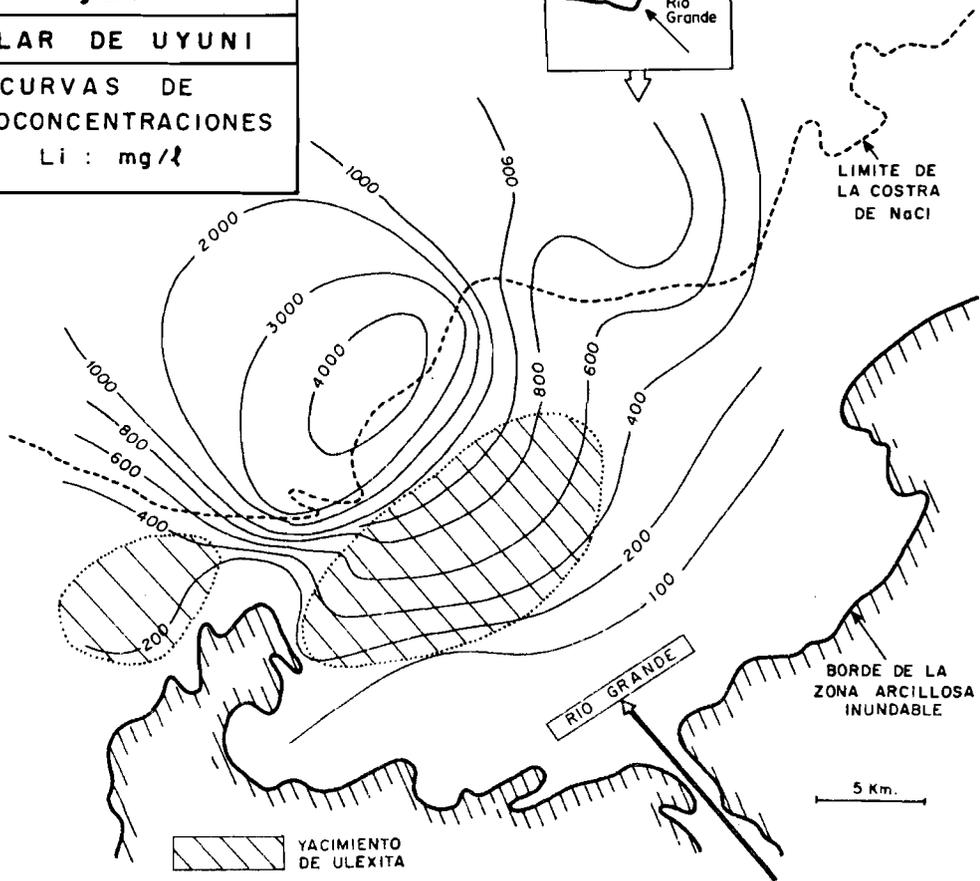


Fig. 20
SALAR DE UYUNI
CURVAS DE
ISOCONCENTRACIONES
Li : mg / l



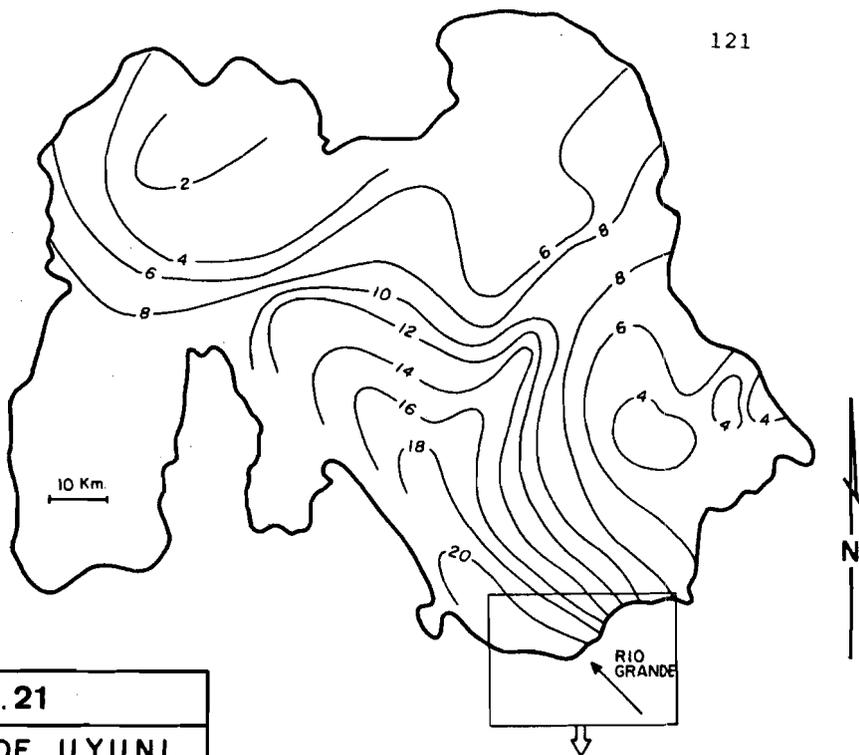
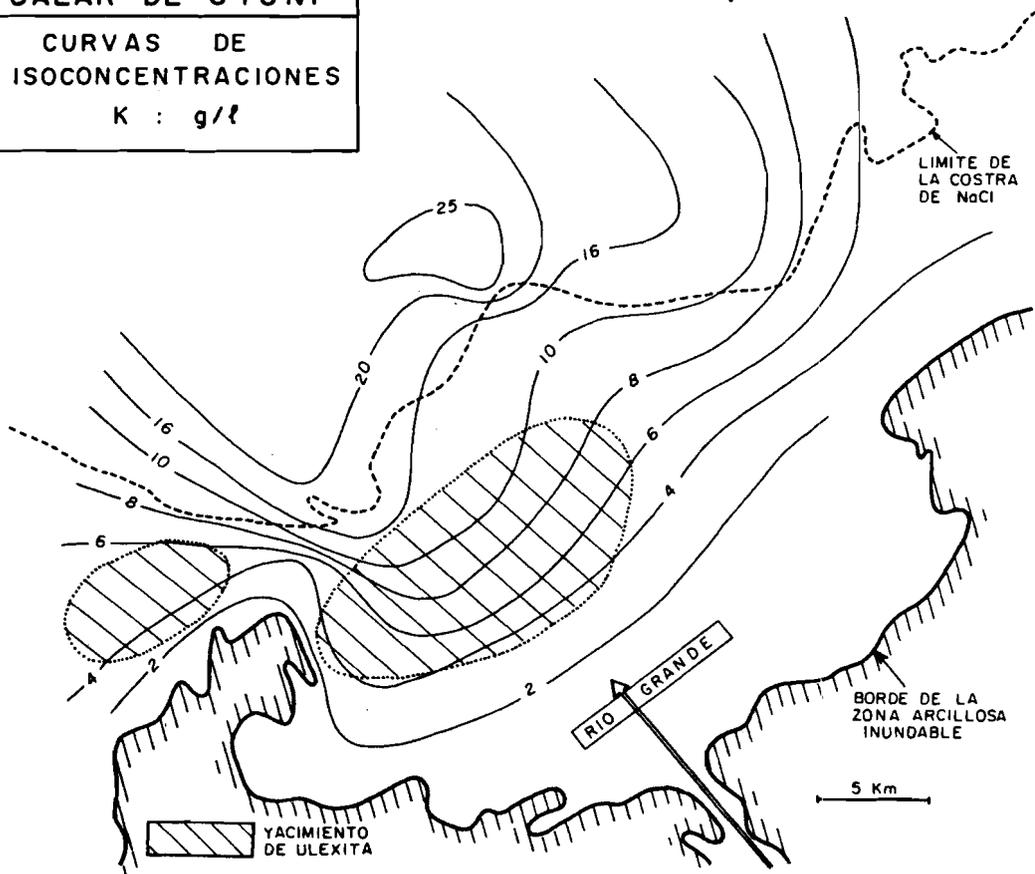


Fig. 21
SALAR DE UYUNI
CURVAS DE ISOCONCENTRACIONES
K : g/l



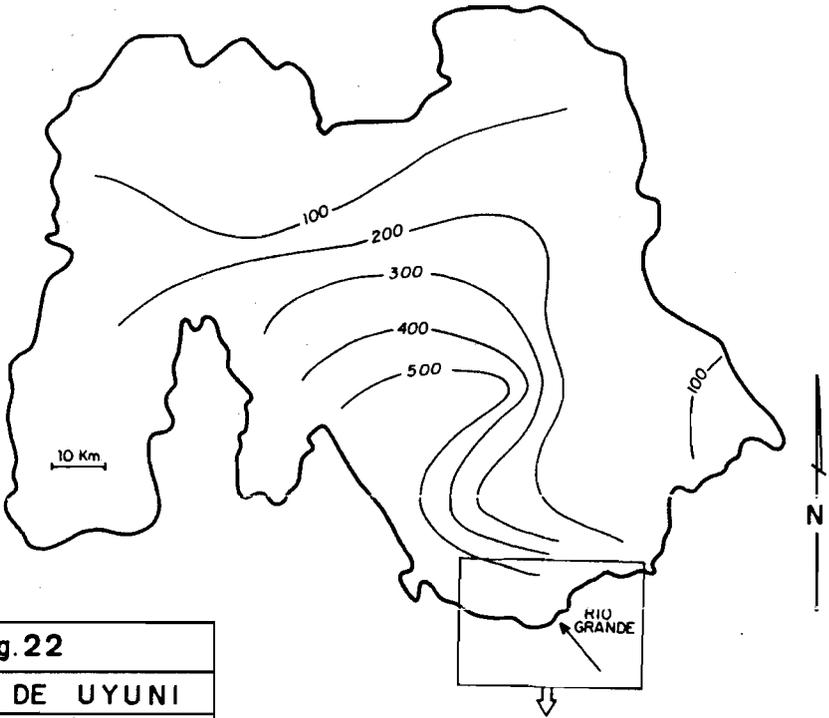
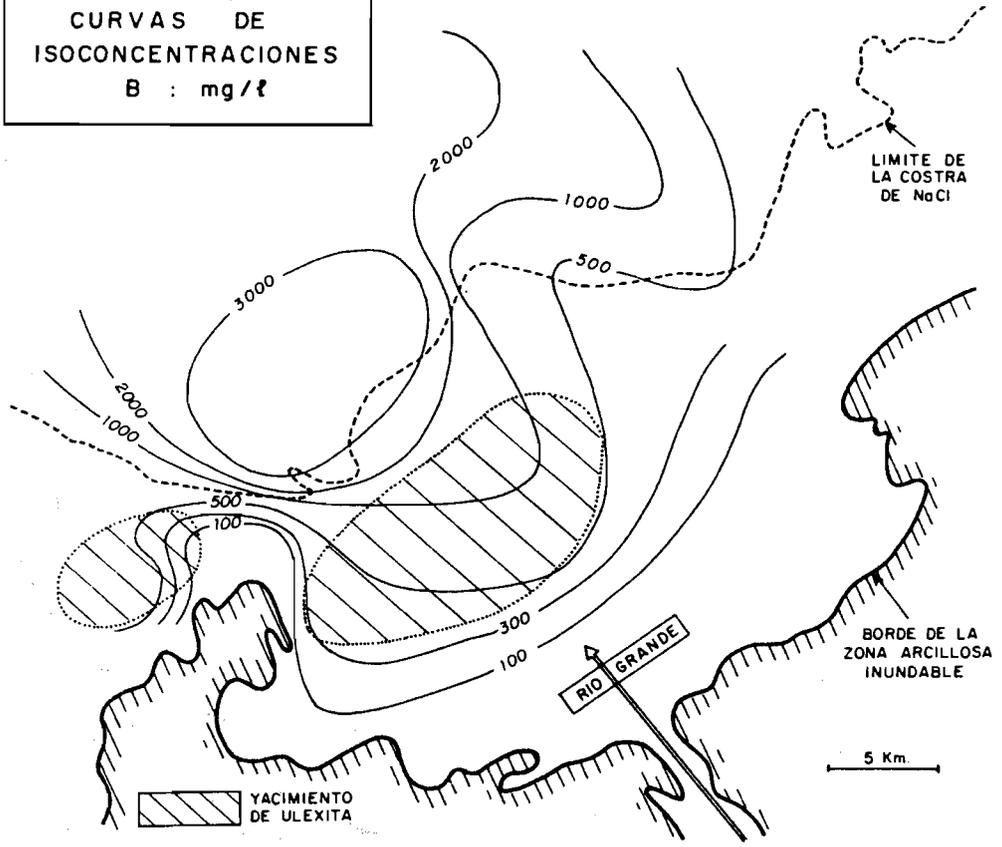


Fig. 22
SALAR DE UYUNI
 CURVAS DE
 ISOCONCENTRACIONES
 B : mg/l



concentraciones en profundidad, es preferible no tratar de precisar un valor que de todas maneras se quedaría sólo, como un orden de magnitud.

1. Reservas de la salmuera de la costra de sal (volumen = 13 km^3)

	Concentración en ton/m^3	Reservas toneladas
Li	0.423×10^{-3}	5 500 000
K	8.7×10^{-3}	110 000 000
B	0.247×10^{-3}	3 200 000
STD	325×10^{-3}	4 225 000 000

Se puede calcular la cantidad de NaCl disuelto en esta salmuera : 3×10^9 toneladas. Entonces la cantidad total de cloruro de sodio cristalizado y en solución en el salar de Uyuni es de $(64 + 3) \times 10^9 = 67 \times 10^9$ toneladas.

Cabe hacer notar que de todas las reservas mundiales de litio reconocidas hasta hoy (menos Uyuni) totalizan 4 000 000 toneladas. Hay más Li en Uyuni (las reservas en B y K son, empero, pequeñas en comparación con las reservas mundiales).

2. Reservas en la salmuera de Río Grande

El problema es que no se conoce la profundidad de la salmuera, estando en niveles deltaico-lacustres, tampoco se conoce como varían las concentraciones de los elementos con la profundidad. Vamos a dar una idea muy aproximada de estas reservas. El interés de esta zona reside en que las concentraciones son mucho más altas que en el salar mismo, lo que, para una explotación industrial, puede tener muchas ventajas. Además es en esta zona que se encuentra el yacimiento más grande de borato de Bolivia.

Se dividirá la zona en tres sub-zonas :

- una sub-zona de 50 km^2 con promedios de 2 g/l Li, 15 g/l K y 1.5 g/l B.
- una sub-zona de 50 km^2 con promedios de 1 g/l Li, 10 g/l K y 0.8 g/l B.
- una sub-zona de 100 km^2 con promedios de 0.5 g/l Li, 5 g/l K y 0.3 g/l B.

Como ya se ha hecho para otras lagunas, se darán cuadros de valores de reservas en función de una profundidad variable de la napa. Se tomará una porosidad media de 30%. Se obtienen así los cuadros siguientes :

Espesor hipotético de la salmuera		1m	2m	5m	10m
Reservas Li	Zona de 2 g/l	30 000	60 000	150 000	300 000
	Toneladas Zona de 1 g/l	15 000	30 000	75 000	150 000
	Zona de 0.5 g/l	15 000	30 000	75 000	150 000
Total Río Grande		60 000	120 000	300 000	600 000

Espesor hipotético de la salmuera		1m	2m	5m	10m
Reservas K	Zona de 15 g/l	225 000	450 000	1 125 000	2 250 000
	Toneladas Zona de 10 g/l	150 000	300 000	750 000	1 500 000
	Zona de 5 g/l	75 000	150 000	375 000	7 500 000
Total Río Grande		450 000	900 000	2 250 000	4 500 000

Espesor hipotético de la salmuera		1m	2m	5m	10m
Reservas B	Zona de 1.5 g/l	22 500	45 000	112 500	225 000
	Zona de 0.8 g/l	12 000	24 000	60 000	120 000
Toneladas	Zona de 0.3 g/l	4 500	9 000	22 500	45 000
Total Río Grande		39 000	78 000	195 000	390 000

Entonces se puede concluir diciendo que los valores de reservas en Li, K y B en la salmuera de Río Grande están probablemente comprendidas entre los siguientes valores extremos (en toneladas) :

60 000 < Li < 600 000	5 500 000	(1-10%)
450 000 < K < 4 500 000	110 000 000	(0.4-4%)
40 000 < B < 400 000	3 200 000	(1-10%)

Los valores a la derecha son los correspondientes a las reservas calculadas en la salmuera de la costra de sal, y el porcentaje de las reservas de Río Grande en comparación con las de la salmuera del salar mismo

EL YACIMIENTO DE BORATO DE RIO GRANDE (ver Fig. 19)

Se encuentra exactamente en el eje del Río Grande, dentro de los sedimentos deltaico-lacustres, justo antes de donde empieza la costra de sal del salar.

Se trata de ulexita ($\text{Na Ca B}_5 \text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) diagenética, precipitada por ascensión capilar de la napa subterránea. El nivel de ulexita no es uniforme. Como todos los niveles de sales diagenéticas, son lentes adyacentes de 50-300 m de diámetro y de 5 a 50 cm de espe-

sor. Su profundidad es variable. En la parte Oeste del yacimiento los lentes son aflorantes y constituyen pequeños relieves de unos centímetros de alto. En la parte Este del yacimiento el nivel de ulexita puede estar hasta dos metros de profundidad por debajo de un nivel arcilloso (deltaico) compacto. Cabe hacer notar que el yacimiento no se encuentra exactamente en la zona de más altas concentraciones en Li, K y B, pero si un poco más al Sur. La precipitación de la ulexita está controlada por las concentraciones en Na, Ca y B de la salmuera. En la zona más concentrada en Li y B hay muy poco Ca y la concentración de Na ha bajado considerablemente (ver análisis 4), impidiendo la precipitación de la ulexita. Los boratos que podrían precipitar en esta zona serían los de magnesio, pero no han sido detectados.

Los datos de reservas de B en las salmueras de Río Grande comprenden también el boro disuelto en las salmueras que originan la ulexita.

Este yacimiento ha sido estudiado con sumo detalle al principio de este siglo por una compañía probablemente inglesa (International Borax C.). Varios miles de pozos han sido cavados para determinar las reservas (malla de 50 m). No se ha encontrado, aquí en Bolivia ni el más pequeño dato escrito al respecto. El único testigo útil que queda es el que dan los pozos que todavía se notan y que así permiten tener una idea de la extensión del yacimiento.

CADIMA y LAFUENTE (1967) hicieron una evaluación de una concesión minera bien delimitada de 5.8 km^2 de superficie, lo que corresponde al 10% de la superficie útil del yacimiento. Evaluaron en 3 700 000 toneladas las reservas de ulexita bruta. Empero utilizando sus datos brutos (ver las observaciones en la descripción del salar de Challviri) se encuentra solamente un valor de 2 750 000 toneladas de ulexita o sea 370 000 toneladas B en esta concesión de 5.8 km^2 .

El estudio más reciente que se ha hecho (1976-1978) es muy pequeño (unas decenas de pozos), en consecuencia hay mucha incertidumbre en los valores de reservas, pero abarca todo el yacimiento. Si consideramos una superficie útil de 50 km^2 , un espesor medio de 20 cm

y una ley de 60% (40% de agua intersticial). La densidad de la ulexita será tomada igual a 2. Se obtiene así una orden de magnitud de :

12 000 000 toneladas ulexita

o sea 1 600 000 toneladas B.

Este valor corresponde a la mitad de todo el boro disuelto en la salmuera del salar de Uyuni.

RENOVABILIDAD DEL YACIMIENTO DE ULEXITA

Tomando una profundidad media de la salmuera entre 1 y 2 metros debajo del nivel arcilloso, ligeramente limoso, la figura 15 (ver IV-C-4) dá una valor de la evaporación de 2% en relacion a la evaporación en superficie.

Tomando 1 m/año de evaporación libre anual para una salmuera de este tipo (200 g/l) se obtiene una evaporación de la napa de unos 2 cm/año. Se considera una concentración promedio de 0.7 g/l B, y la misma superficie que la del yacimiento : 50 km². La porosidad es de 30%. Entonces en un año se depositará :

$$50 \times 10^5 \times 0.02 \times 0.3 \times 10^3 \times 0.7 \times 10^{-6} \\ = 210 \text{ toneladas B/año.}$$

valor insignificante a la escala humana. Si se divide las reservas de 1 500 000 toneladas por este valor, se obtiene un valor de 7 500 años. Aunque se trate solamente de un orden de magnitud muy grosero se puede considerar que demoraría entre 5 000 y 10 000 años para reconstituír el yacimiento si se lo vaciara completamente.

Este valor de 7 500 años hace pensar que el yacimiento de ulexita empezóa formarse poco tiempo después de la sequía del lago Tauca (10 000 año BP) lo que es bastante lógico porque la ulexita es diagenética en sedimentos deltaicos post-Tauca, justo por encima de los últimos niveles lacustres donde esta cautiva la napa. Entonces este valor de 7 500 años está talvéz ligeramente por debajo de la realidad. El error más probable que se ha cometido en este cálculo debe

ser en relación con la altura de evaporación de 2 cm/año. En realidad se hubiera debido hacer el cálculo al revés : sabiendo por las observaciones de campo que la ulexita no tiene más de 10 000 años, determinan la altura de evaporación promedio. El hecho es que el resultado obtenido por el cálculo directo, es del mismo orden de magnitud que lo que se ha determinado por observación directa, prueba que las estimaciones de evaporación de las napas subterráneas no son tan malas.

Las algas "Minchin". Estas algas carbonatadas se llaman algas "Minchin" porque están relacionadas sobre todo al lago Minchin. Pero parece que también se desarrollaron en el episodio lacustre Tauca. Se puede notar varias terrazas de estas algas, indicando varios niveles de estabilidad del espejo de agua.

Se han hecho varios análisis químicos de estas algas. FLORES (1970) hizo una evaluación de las reservas de estas algas. El análisis (1) corresponde al promedio de sus 30 análisis químicos de estas algas. El análisis (2) corresponde a una determinación citada en AHLFELD y BRANISA, 1960 (p. 162).

	(1) %	(2) %
CaCO ₃	88.20	92.40
MgCO ₃	2.00	0.98
SiO ₂	3.99	4.64
Al ₂ O ₃	0.76	0.36
Fe ₂ O ₃	0.52	0.46
P ₂ O ₅	0.86	--
M.O.	--	0.15
SO ₃	2.35	--
H ₂ O	--	0.85
Total	98.68	99.84

M.O. = Materia Orgánica. Corresponde probablemente al P_2O_5 del análisis 2.

Entonces la ley en $CaCO_3$ de estas calizas es cerca de 90%. Estas algas sirven para la producción doméstica de la cal.

RESERVAS

Es muy difícil cuantificar las reservas, presentar su espesor, su porosidad (variable debido a una fuerte recristalización), su extensión vertical y horizontal pues son muy irregulares. FLORES (1970) da un valor de reservas positivas (es decir seguras) de 1 650 000 toneladas y reservas probables de 3 300 000 toneladas. Estos valores son muy razonables. Pero es posible que las reservas sean mucho más altas. No se puede dar un orden de magnitud sino un límite inferior seguro del orden de 1 000 000 de toneladas.

CONSIDERACIONES SOBRE EL ORIGEN DE LAS SALES CRISTALIZADAS Y DISUELTAS EN EL SALAR DE UYUNI

Se ha visto al principio, que el salar de Uyuni provenía de la sequía de un antiguo lago: el lago Tauca. Se vá a tratar de reconstituir el quimismo de este lago, suponiendo razonablemente, que el quimismo de los principales aportes no ha cambiado desde la época del lago Tauca (12 000-10 000 años BP). Entonces se puede calcular cual habría sido el quimismo del lago concentrando sus aportes. A partir de esta composición se podrá calcular que cantidades de sales o elementos debería haber en el salar hoy día.

CONCENTRACION PROMEDIO EN NaCl DEL LAGO TAUCA

La mejor manera de acercarse a este valor es considerar las cantidades de sales que hay en el salar, disminuyéndolas de los aportes desde hace 10 000 años. El sub-lago Tauca, que corresponde al

salar de Uyuni tenía una superficie de $20\ 000\ \text{km}^2$ y una profundidad máxima de 80 metros (espejo de agua a 3 720 m; fondo a 3 640 m = 3 653, altura actual menos el espesor de la costra). Su volumen era entonces de $800\ \text{km}^3$. La cantidad total de NaCl en el salar ha sido determinada en 67×10^9 toneladas. Por el Río Grande ha entrado alrededor de 170 000 toneladas anuales, es decir 1.7×10^9 toneladas en 10 000 años. Se obtiene entonces una concentración en NaCl del lago Tauca-Uyuni de 65×10^9 toneladas en $800\ \text{km}^3$, o sea, más o menos 80 g/l. Este valor supone, por supuesto que no se han perdido sales por infiltración. Si no es así, el valor real es todavía superior. Esta cifra solamente corresponde a la concentración en NaCl, faltando los demás elementos.

RECONSTITUCION DEL QUIMISMO DEL SUB-LAGO TAUCA-UYUNI

Había que tener una idea antes, de la concentración en NaCl, sino solamente se hubieran podido dar valores relativos entre las concentraciones de los diferentes iones disueltos y no su valor absoluto. Por eso se ha estimado esta concentración en NaCl en unos 80 g/l.

El gran lago Tauca tenía tres aportes mayores :

- El Desaguadero en el sub-lago Poopó.
- El Río Lauca en el sub-lago de Coipasa.
- El Río Grande de Lípez en el sub-lago de Uyuni.

Solamente se tienen análisis del Desaguadero (CARMOUZE et al., 1978) y del Río Grande. No se conoce el quimismo del Río Lauca. Se puede hacer cálculos muy precisos utilizando computadoras. A este nivel del estudio no se buscará tanta precisión. Del estudio cuidadoso de los análisis del Desaguadero, de las aguas del lago Poopó, y del Río Grande, se puede decir, en una primera aproximación que la composición química del lago Tauca era parecida a la del lago Poopó, algo más concentrado, pero con menos CaSO_4 y más Li, K y B por la influencia del Río Grande. Para cuantificar estas concentraciones se ha calculado la composición teórica de las aguas del lago Poopó y del Río Grande si se las concentraría hasta llegar a 80 g/l NaCl, y se ha determinado el promedio de los dos análisis. Se obtiene así la siguiente composición química teórica para el sub-lago Tauca-Uyuni :

pH	ALC	Cl	SO ₄	B	Na
8.0	10	54 000	8 500	60	32 000
-8.5					

pH	K	Li	Ca	Mg	STD
8.0	2 200	80	1 100	3 000	100 000
-8.5					

ALC en meq(H⁺)/l; otros en mg/l

Esta composición teórica corresponde a una concentración total en STD de 100 g/l y en NaCl de 80 g/l. Los 20 g/l restantes corresponden a las otras sales disueltas. Por supuesto estos valores solamente constituyen un orden de magnitud posible. El único constituyente que no se ha podido estimar es la sílice; su concentración está controlada sobre todo por la actividad biológica (diatomeas).

Un lago de 80 metros de profundidad y de 100 g/l de concentración promedio es casi siempre un lago estratificado, es decir que las salmueras del fondo eran probablemente mucho más concentradas que las aguas superficiales. Había quizá un gradiente de densidad de la superficie hacia el fondo (por ejemplo de 50 g/l en superficie hasta 150 g/l en el fondo).

A partir de estos valores de concentración en el lago Tauca se puede calcular las cantidades en Li, B, K, Mg, SO₄..... que tendría que haber en el salar. El sub-lago tenía un volumen de 800 km³. El cuadro siguiente da las cantidades teóricas para cada elemento que debería haber en el salar.

	Concentr. en g/l del Tauca	Toneladas en el Tauca	Toneladas en la salmuera-Uyuni	Toneladas en la costra de sal
Na	32	26×10^9	1.3×10^9	25×10^9
K	2.2	1.8×10^9	1.1×10^8	?
Li	0.08	6.4×10^9	5.5×10^5	?
Ca	1	8×10^8	7.3×10^5	?
Mg	3	2.4×10^8	1.0×10^8	?
Cl	54	43×10^9	2.5×10^9	40×10^9
SO ₄	8.5	6.8×10^9	1.3×10^8	?
B	0.06	4.8×10^7	3.2×10^5	?

Por supuesto los valores de Na y Cl corresponden bien a lo que hay hoy día en el salar, puesto que hemos utilizado el NaCl efectivamente presente en el salar, para determinar la concentración total del lago Tauca. Para los demás elementos hay un problema mayor. Los valores de reservas en la salmuera para Li, K, B, Mg son mucho más bajos que los que había en el sub-lago Tauca-Uyuni. De lo que, teóricamente había en el lago Tauca, queda en la salmuera solamente :

8.6% Li, 6.1% K, 6.4% B y 4.2% Mg.

Es decir, por ejemplo, que faltan más de 50 000 000 de toneladas de Li, lo que es impresionante. En lo que concierne Ca y SO₄ no se puede emitir conclusión, porque hay yeso en la costra de sal.

Desde un punto de vista termodinámico no puede cristalizar sales de Li, K, B o Mg a partir de las salmueras del salar de Uyuni (BRAITSCHE, 1971; WOOD, 1975). Solamente en la zona de Río Grande puede empezar la cristalización de la silvita : KCl. En los 95% restantes del salar, solamente la halita (NaCl), está en equilibrio con la sal-

muera. Cabe una pregunta entonces : ¿ donde han ido estos elementos interesantes ?

Además cabe hacer notar que no se han tomado en cuenta los aportes desde hace 10 000 años. Son en realidad difíciles de estimar, porque no solamente el Río Grande ha podido en parte infiltrarse más profundamente, sino también hay que tomar en cuenta los aportes temporales. De todos modos estas correcciones agravarían todavía más el problema, porque se debería disminuir las reservas actualmente presentes en la salmuera, es decir amplificar todavía más la diferencia entre las cantidades que había en el lago Tauca y las que hay hoy día en el salar.

Para tratar de comprender mejor los problemas anteriores se puede considerar cuatro hipótesis principales :

- Como primera hipótesis podemos considerar que los elementos que faltan podrían estar como pequeñas inclusiones fluídas dentro de la halita. Esta hipótesis puede ser válida para Li y B porque concentraciones del orden de 0.1% en la halita serían suficientes para contener la totalidad de estos elementos. Además no se detectarían por difracción X una vez cristalizados por sequía total de la muestra. Pero esta hipótesis no es válida para Mg : la costra de halita debería contener 4% Mg para absorber todo lo que había en el lago Tauca. Una concentración tal en Mg (40 000 ppm) se notaría en los diagramas de rayos X porque las sales de magnesio tendrían que cristalizar al secarse la muestra, pero nunca se ha detectado algo semejante. Además el mecanismo cristalo-químico de esta captura, no se explicaría fácilmente.

- Una segunda hipótesis sería la consideración de la neoformación de arcillas en la base de la costra de sal por interacción entre los sedimentos lacustres y la salmuera. Esta hipótesis esta sostenida por la observación de la completa ausencia de diatomeas en los sedimentos por debajo de la costra (SERVANT-VILDARY, comunicación personal), (los mismos sedimentos en los bordes de las cuencas contienen muchas diatomeas). Esto podría explicar la eliminación de Mg y Li, pero no del boro. En este caso sería concebible la neoformación de una arcilla

litífera, tipo hectorita, muy interesante desde el punto de vista económico.

- Por otro lado, la infiltración de la salmuera residual por el fondo de la cuenca podría cambiar su quimismo. Bastaría una velocidad de infiltración de 1 mm/año a través de los sedimentos por debajo de la costra de sal para eliminar todas las sales disueltas residuales de la sequía del lago Tauca, y reemplazarlos por sales traídas por los aportes recientes y actuales. La costra de sal sería residual del lago Tauca, pero no la salmuera. Esta salmuera primaria, del tipo Mg-(K)-(Li)-(Na)-Cl-SO₄ habría sido reemplazada por una salmuera menos evolucionada del tipo Na-Cl-SO₄. Es posible, entonces, encontrar salmueras más ricas en litio y boro en niveles profundos. Por eso sería conveniente hacer perforaciones bien por debajo de la costra de sal. Señalamos que en el salar de Atacama las concentraciones más fuertes en Li (6.4 g/l) se encuentran efectivamente en salmueras profundas (MORAGA et al., 1974).

Los dos mecanismos hipotéticos ya descritos : la neoformación de arcillas y la infiltración de la salmuera no son incompatibles. Una infiltración lenta y continua de una salmuera a través de un sedimento muy silíceo (diatomeas) puede inducir neoformaciones y acumular algunos elementos en estos niveles.

La salmuera del tipo Mg-(Li)-(K)-(Na)-Cl-SO₄ de Río Grande corresponde bien al quimismo de la salmuera residual del lago Tauca. Se podría suponer que se trata de un testigo de esta salmuera que no se ha infiltrado completamente todavía. Pero otras consideraciones que no desarrollaremos aquí invitan a la prudencia.

- Finalmente hay que señalar la hipótesis de que el lago Tauca no tenía la composición química determinada anteriormente, más bien valores muy altos en Na y Cl y muy poco Li, K, Mg, B. Efectivamente si se disolviera hoy día el salar de Uyuni, se obtendría una salmuera semejante. Pero esto no haría más que complicar el problema : ¿porque la costra de sal Minchin, al disolverse en el agua del lago Tauca no tenía Li, K, Mg y B ? En realidad es poco probable que se hayan disuelto muchas sales del antiguo lago Minchin en el lago Tauca. La costra.

de sal Minchin ha debido taparse rápidamente con los sedimentos del lago Tauca. Además la velocidad de disolución de la sal está controlada por fenómenos de difusión de los iones en el agua; se forma una capa de salmuera justo por encima de la costra que la separa de las aguas más dulces por encima, lo que impide una rápida disolución de la costra. Es más probable que la mayor parte de las sales del lago hayan sido traídas con las aguas de alimentación.

La proporción de sales redisueltas debe ser secundaria. En cuanto al aumento de salinidad de los lagos sucesivos es también más probable un aumento de la colmatación de la cuenca. Si el lago Minchin se encontraba más diluído que el lago Tauca, es por que sus aguas debían infiltrarse más.

Todas estas consideraciones muestran claramente que la noción de renovabilidad no tiene mucho sentido para el salar de Uyuni. Es el heredero de una larga historia químico-lacustre, de varias decenas de miles de años. Se ha visto que solamente entran 230 toneladas Li, 660 toneladas B y 2 100 toneladas K cada año por el Río Grande. La cantidad real que entra debe ser un poco superior por los demás aportes, pero estos valores son bien pequeños a la escala del Salar de Uyuni.

En conclusión hay que aceptar el hecho de que falta, aparentemente, mucho litio, boro y tal vez potasio en el salar de Uyuni, y que sería conveniente buscarlos en los sedimentos por debajo de la costra de sal, y en las salmueras más profundas. Cabe la pregunta si valdría la pena hacer esta investigación en vista de las enormes cantidades ya presentes en la salmuera del salar. No hay que olvidar que no solamente la cantidad es un factor decisivo, sino también la concentración. Tal vez sería más fácil bombear salmueras profundas con 5-10 g/l Li que enriquecer las salmueras del salar de Uyuni con 0.5 g/l Li.

COLLPA LAGUNA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud-Lípez
 Coordenadas : Long : 67° 25'

Lat : 22° 28'S

Altura : 4 510 m

ACCESO : Uyuni - Culpina - Soniquera - Quetena - Collpa Laguna -
(306 km - 8-10 horas).

Alojamiento en Quetena Grande, o en el campamento al borde de la laguna.

ESTUDIOS

ANTERIORES : AHLFELD, 1956; SORUCO, 1974; ECHENIQUE, 1976; ECHENIQUE, BALLIVIAN y RISACHER, 1978.

GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Las rocas que componen la cuenca de drenaje son vulcanitas de composición ácida a mesosilfíca, posiblemente riocita a latian-desita. Es claro observar que la depresión lagunar está rodeada en el sector Norte por un relieve positivo (cerro Collpa Laguna) conformado por rocas de un color marrón oscuro a claro, luego el relieve hacia el Sur Este y Oeste se suaviza dando lugar a pendientes de inclinación relativa hacia la laguna y conformadas por rocas de colores sensiblemente más claras y diaclasadas con estructura ignimbrítica. Las lomas se halla recubiertas por un material inconsolidado volcánico. No se nota nada de azufre en la cuenca.

APORTES DE AGUA

Cinco manantiales importantes entran en la laguna. Además se notan en la orilla NW manantiales que salen por drenaje de la laguna. Se sospecha que a todo lo largo de la orilla Este, se descarga una capa de agua subterránea (manantial difuso), debido a que en toda la extensión de esta orilla, la laguna tiene una concentración menor que en el resto de ella. Además algunos pozos cabados cerca a la laguna (1 a 2 m del borde) confirmaron la presencia del nivel freático, de aguas dulces (0.1 a 0.5 g/l) muy cerca a la superficie, entre -10 y -20 cm. lo que permite también suponer que las entradas subterráneas son notables. Se dan los análisis de agua de los dos manantiales principales al Norte y al Sur, cada uno representativo de las respectivas zonas de aportes : COL-2 y COL-9 (ver cuadro).

El cálculo de R y R' da : $R < 1$, $R' < 1$ (ver II-F-7), lo que indica que por evaporación directa (sin interacción con los sedimentos) esas aguas deben evolucionar hacia facies alcalinas ($\text{Na} - \text{CO}_3 - \text{Cl}$). Esto corresponde bien a la litología de la cuenca.

DESCRIPCION Y QUIMISMO DE LA LAGUNA

Es un lago de 0.9 km^2 de superficie y de 1.5 m de profundidad media con fondo casi impermeable, cuya salmuera no tiene gran interacción con los sedimentos. Entonces las aguas dulces que entran en esta laguna deben evolucionar normalmente hacia facies alcalinas, lo que efectivamente se observa. Collpa Laguna es un lago típicamente de carbonato de sodio, sin sales cristalizadas permanentes; en las orillas se notan eflorescencias de carbonatos de sodio que se forman por ascenso capilar de las aguas subterráneas, pero no se pueden acumular por la acción del viento, y por las lluvias que redisuelven esta película salina cada año. En época fría la laguna se congela (20-30 cm de hielo) y encima del hielo cristaliza una capa de unos milímetros de carbonatos de sodio. Por supuesto, cuando la capa de hielo se derrite, el carbonato de sodio se redisuelve en el lago.

El fondo de la laguna está constituido por un barro negro compacto, con fuerte olor a amoníaco. Por rayos X se han determinado illita y calcita en una matriz esencialmente amorfa.

Para determinar el quimismo de la laguna se han sacado 28 muestras, de las cuales tres en profundidad. Las medidas de los carbonatos y bicarbonatos se realizaron por titulación en el campo, conjuntamente con las medidas de pH y conductividad que pusieron en evidencia la gran uniformidad de la composición química de la laguna, tanto en extensión superficial, como en profundidad. Una franja al Este de la laguna presenta una disminución ligera de la concentración total. Cabe hacer notar que las aguas dulces desembocan en la laguna sin mostrar concentraciones intermedias entre las aguas dulces y la salmuera de la laguna (como la desembocadura de un río en el mar). Damos dos análisis químicos : uno de la salmuera representativa de la zona central de la laguna (C3) , y la otra de la salmuera representativa de la zona Este , menos concentrada (B7).. (Ver cuadro) . Notamos

	t°	densidad	pH	ALC	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
COL-2	2.0	1	7.67	0.530	-	32.4	6.51	2.03
COL-9	4.5	1	7.53	0.775	-	47.3	8.43	11.2
C 3	-	1 037	10.84	564	16 000	616	6 670	466
B 7	-	1 032	10.83	484	14 200	615	5 470	438

	SiO ₂	B	P	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
COL-2	34.5	0.4	0.05	6.7	3.0	nd	4.56	2.1
COL-9	29.6	0.5	0.2	17.5	2.8	nd	4.11	1.8
C 3	153	96	4.9	17 100	1 270	0.5	6.8	3.1
B 7	132	75	2.2	15 000	1 050	0.5	7.8	3.1

ALC en meq (H⁺)/l

Otros en mg/l

nd = no detectado

Análisis de aguas de Collpa Laguna

los valores muy bajos de Li, que en esta laguna es una traza.

RESERVAS DE SALES DISUELTAS EN LA LAGUNA

De los análisis químicos podemos sacar el cuadro siguiente (superficie - 900 000 m², profundidad media = 1.5 m) :

Zona	Superf. m ²	Volumen de agua (m ³)	STD g/l	Na ₂ CO ₃ g/l	STD ton.	Na ₂ CO ₃ ton.
Oeste	765 000	1 147 500	43	29	49 300	33 200
Este	135 000	202 000	39	26	7 900	5 300
(STD = sales totales disueltas)				<u>TOTAL</u>	57 200	38 500

En las sales disueltas tenemos : 66% Na₂CO₃

34% impurezas que se dividen en :

28% de cloruros Na y K (impurezas mayores)

6% de sulfatos, bicarbonatos, boratos de Na y K.

Sales que cristalizan : existen tres vías de cristalización :

- por evaporación capilar en los bordes,
- por cristalización encima del hielo cuando se congela la laguna,
- por evaporación de la salmuera en pileta.

En todos los casos la sal principal que se forma es el natron : Na₂CO₃ · 10 H₂O, el cual se deshidrata rápidamente en termonatrita = Na₂CO₃ - H₂O. Hay muy poco HCO₃⁻ para que se tome en cuenta la trona : Na₂CO₃ - NaHCO₃ - 2H₂O. Por supuesto cristalizan también las impurezas siendo la mayor la halita, NaCl.

La sal que cristaliza encima del hielo debe contener menos impurezas, pero hay muy poco; solamente se puede hacer una cosecha al año. Se ha estimado a 1 400 toneladas al año, la cantidad de sal (na-

tron + impurezas) que se puede recuperar así (ECHENIQUE, 1976).

RENOVABILIDAD DE LAS SALES (ver IV-B-3,4)

$$\begin{aligned} \text{Tenemos : } C_{or} &= 0.1 \text{ g/l} = 0.1 \times 10^3 \text{ ton/m}^3 \\ C_L &= 43 \text{ g/l} = 43 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3 \\ H_e &= 1.5 \text{ m} \\ H_p &= 0.15 \text{ m} \\ S &= 900 \text{ 000 m}^2. \end{aligned}$$

Se calcula los límites superiores e inferiores de cada incógnita.

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq 121.5 \text{ ton/año STD} \\ 1 \text{ 215 000} &\leq V_{or} \leq 1 \text{ 218 000 m}^3 \\ 121.5 &\leq t_{or} \leq 121.7 \text{ ton/año STD} \\ 0 &\leq V_i \leq 2 \text{ 830 m}^3 \\ 0 &\leq t_i \leq 121.7 \text{ ton/año STD} \end{aligned}$$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Factor de concentración = $\frac{C_L}{C_{or}} = \frac{43}{0.1} = 430$, lo que es relativamente alto.

- Cálculo de $T/t_{or} = 57 \text{ 200}/121.6 = 470$ años, lo que es un valor alto también.

Entonces podemos estimar a la vista de esos valores que las infiltraciones son mínimas, y que probablemente tenemos :

$$t = t_{or} = 120 \text{ ton/año STD}$$

o sea 80 toneladas Na_2CO_3 (= 66% STD) entran y se quedan cada año en la laguna, eso es muy poco, para una explotación industrial, la laguna no es renovable. Si se la vaciara completamente de una sola vez demoraría alrededor de cinco siglos para que se concentre al nivel actual.

El volumen de los aportes es $V_{or} = 1 \text{ 216 000 m}^3$. Se midió en el campo el volumen de agua que entra por los cinco principales

manantiales. En un año se calculó un volumen de 638 000 m³, lo que es bien lógico, tomando en cuenta todos los aportes que se han desestimado (los aportes de lluvias y los manantiales difusos).

OBSERVACIONES

- 1) No hay que almacenar esta salmuera mucho tiempo, porque hay una fuerte actividad orgánica (algas) que puede cambiar el quimismo de la salmuera.
- 2) Actualmente una cooperativa de campesinos de Quetena, explota el carbonato de sodio por recuperación encima del hielo.

LAGUNA HEDIONDA SUR

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur Lípez
 Coordenadas : Long. : 67°23'
 Lat. : 22°27'S

ACCESO : Esta laguna se encuentra a 2 km de Collpa Laguna. Uyuni-Culpina - Soniquera - Quetena - Collpa Laguna (306 km : 8-10 h).
 Alojamiento en Quetena Grande o en el campamento al borde de Collpa Laguna.

ESTUDIOS

ANTERIORES : ECHENIQUE, 1976; ECHENIQUE, BALLIVIAN y RISACHER, 1978.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Es muy similar a la de Collpa Laguna; vulcanitas ácidas a mesosilícicas, posiblemente riodacitas a latiandesitas. No hay nada de azufre en la cuenca de drenaje.

APORTES DE AGUA

No se nota ningún manantial en los bordes. Todos los apor-

	d	pH	ALC	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
H 1	1 017	10.71	205	5 990	348	3 830	372
H 3	1 028	10.46	362	10 700	336	6 710	1 350

	SiO ₄	B	P	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
H 1	92	59	1.1	7 200	930	0.3	10.2	3.0
H 3	110	114	2.1	12 500	1 650	0.5	9.0	2.8

ALC en meq(H⁺)/l

otros en mg/l

d = densidad

Composicion quimica de las aguas de la laguna Hedionda Sur.

tes deben ser difusos a lo largo de las orillas. Como esta laguna está muy cerca de Collpa Laguna, consideraremos que la composición química de las aguas que la alimentan es muy parecida a la composición de las aguas dulces de Collpa Laguna.

DESCRIPCION Y QUIMISMO DE LA LAGUNA

Como Collpa Laguna, Hedionda Sur es un lago bien definido con fondo casi impermeable. Su superficie es 2 820 000 m² y su profundidad media 0.75 m (ECHENIQUE, 1976). La salmuera es también carbonatada sódica, pero con concentración menor a la de Collpa Laguna. Damos a continuación dos análisis de salmueras de esta laguna, cada una representativa de una zona de la laguna. La salmuera más concentrada (H3) parece corresponder al quimismo general de la laguna, mientras la salmuera menos concentrada (H1) parece corresponder a una dilución por aportes difusos de aguas dulces por la orilla Este. Los puntos H₂ y H₄ tienen casi la misma composición que H3.

RESERVAS DE SALES DISUELTAS EN LA LAGUNA

Volumen de la laguna : 2 115 000 m³

Tenemos el cuadro :

	STD	Na ₂ CO ₃
concentración g/l	33.5	18.9
cantidades (toneladas)	70 000	39 000

En las sales disueltas tenemos :

56% Na₂CO₃ 32% cloruros Na y K
 44% impurezas → 12% sulfatos, bicarbonatos y boratos Na y K.

Sales que cristalizan : Aparte de una salpicadura de sales eflorescentes en los bordes, no se notan sales cristalizadas en esta laguna. Cuando se congela, debe precipitar el natron : $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ encima del hielo. También precipitará este mineral por evaporación en piletas. Rápidamente se deshidrata en termonatrita : $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. La mayor impureza es la halita NaCl .

Esta laguna contiene más materia orgánica que Collpa Laguna, siendo este factor una molestia importante para su explotación.

RENOVABILIDAD DE LAS SALES (ver IV-B-3,4)

No se observa ninguna alimentación superficial. Se toma la misma concentración C_{or} de los aportes que para Collpa Laguna.

$$C_{or} = 0.1 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3; C_L = 33.5 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$$

$$HE = 1.5; H_p = 0.15 \text{ m};$$

$$S = 2\,820\,000 \text{ m}^2.$$

Tenemos entonces los límites :

$$0 \leq t \leq 381 \text{ ton/año STD.}$$

$$3\,810\,000 \leq V_{or} \leq 3\,820\,000 \text{ m}^3$$

$$381 \leq t_{or} \leq 382 \text{ ton/año STD}$$

$$0 \leq V_i \leq 11\,400 \text{ m}^3$$

$$0 \leq t_i \leq 382 \text{ ton/año STD}$$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Factor de concentración : $\frac{C_L}{C_{or}} = \frac{33.5}{0.1} = 335$, lo que es regularmente alto.

- Cálculo de $T/t_{or} = 70\,000/381 = 184$ años, lo que no es tan alto.

Estos valores son demasiados generales para poder emitir conclusiones seguras. T/tor es más bajo que para Collpa Laguna (470 años). Solamente se puede decir que debe haber algo de infiltraciones, pero no muchas. Entonces el valor de $t \leq 381$ toneladas STD es un valor superior límite, esto nos dá un máximo de 210 toneladas Na_2CO_3 (= 56% STD) que entran y se quedan cada año en la laguna. El valor real debe ser algo inferior. También es una cantidad muy baja que no permite una explotación industrial.

CACHI LAGUNA

- UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur Lípez
 Coordenadas : Long. : $67^{\circ}57'$
 lat. : $21^{\circ}43's$
 Altura : 4 495 m
- ACCESO : Uyuni - Alota (Mina Corina) - Cachi Laguna (220 km; 6-8 h). Se puede desviar antes de llegar a Mina Corina, pero este lugar es el alojamiento habitual para toda la zona. También se puede acampar en el campamento abandonado de Cachi Laguna.
- ESTUDIOS ANTERIORES : En los años 1958-1960 la empresa QUIMICA BOLIVIANA (Gerente Sr. Alejandro Barrero) realizó una explotación, con refinación, de los carbonatos de sodio. Pero no se ha publicado ningún dato técnico al respecto.
 Datos preliminares en : AHLFELD, 1956; ECHENIQUE, 1976; ECHENIQUE, BALLIVIAN y RISACHER, 1978.

GEOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Es una cuenca volcánica ácida (Riodacitas). Los bordes Oeste (Cachi Laguna Lomas) y Sur (Cerro Chascón) de la cuenca no contienen nada de azufre, pero los bordes Norte (Cerro Tapaquilcha) y Este (Cerro Cachi Laguna y Pabellón Cachi Laguna) contienen algo de azufre. Empero

este azufre no parece tener mucha influencia sobre el quimismo de la laguna. Se encuentra muy alto en los volcanes y solamente en época de lluvia las aguas que entran en la laguna pueden tener una concentración más alta en $\text{SO}_4^{=}$ por disolución de este azufre. Los aportes permanentes dominantes vienen de la orilla Oeste, libre de azufre.

APORTES DE AGUA

El principal aporte viene del flanco Oeste (sin azufre) de la laguna. Se nota a todo lo largo de la orilla un manantial difuso, con algunos aportes francos al Norte, con caudales notables. También la orilla Oeste muestra un largo manantial difuso pero de mucho menos importancia. Podemos considerar que el 90 % de la alimentación proviene del Oeste, y el 10 % del Este de la laguna. No se nota nada apreciable proveniente del Norte o del Sur de la laguna. Damos dos análisis de aguas dulces de las orillas Oeste (Nº 1) y Este (Nº 2) (ver cuadro).

El cálculo de R y R' da para las aguas (ver II-F-7) :

$R < 1$ y $R' < 1$, pero el agua nº 2, saliendo de un relieve donde hay algo de azufre tiene valores mucho más cercanos a 1 que el agua nº 1, lo que está en relación con la diferencia de litología de las dos partes de la cuenca.

DESCRIPCION Y QUIMISMO DE LA LAGUNA

Es una capa de agua sub-aflorante que corresponde a la figura 7 del capítulo II. Eso diferencia esta laguna de las demás carbonatadas sódicas como Collpa Laguna, Hedionda Sur y Khara Laguna. A esto se debe la forma muy irregular de la laguna, donde el agua aflora en las depresiones. El acuífero está constituido por gravas y arenas, lo que limita la interacción salmuera-sedimentos (pocas arcillas y materia orgánica). La sedimentación actual deposita sedimentos arcillosos en el fondo de las depresiones, y también existen lentes arcillosas que corresponden a antiguos brazos de la laguna, ahora secos. La superficie total del salar es aproximadamente de 3 km^2 (suma de aguas libres y zonas secas en superficie), la superficie de las aguas libres es de 1 km^2

	tº	densidad	pH	ALC	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
1	14º	1	7.53	2.08	-	127	3.69
2	16º	1	7.72	2.46	-	150	49.0
3	-	1.044	10.60	822			12 000

	SO ₄ ⁼	B	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
1	11.5	0.32	96.0	38.4	11.2	0.30	6.30	2.70
2	65.0	1.45	70.0	75.0	17.0	0.45	20.0	13.0
3	787	216	90.0	20 900	7 290	177	10.0	0.4

ALC en meq(H⁺)/l

Otros en mg/l

Análisis de aguas de Cachi Laguna

La salmuera es bien carbonatada sódica.

Damos el análisis de una salmuera de la superficie (ver cuadro).

Se ha medido el pH en varios puntos de la laguna. La uniformidad de esos valores hace pensar que la salmuera debe tener una composición relativamente uniforme. Pero es más difícil sacar un valor para las reservas, porque no se trata de un cuerpo de salmuera bien individualizado, sino de una napa subaflorente, cuya profundidad se desconoce. En primera aproximación podemos considerar que la superficie efectivamente útil es de 1.5 km^2 (sobre una superficie total de 3 km^2). Esta se divide en 1 km^2 de salmuera libre de 0.2 de profundidad media y 0.5 km^2 de salmuera subterránea a 10 cm. de profundidad media, dentro de las gravas (porosidad : 40%).

Se tomará una profundidad media de 0.5 m con la misma concentración que en la superficie, a la vez en las gravas y en las lagunas (lo que nos dá 0.3 m de salmuera por debajo del fondo de las lagunas, que hay que tomar en cuenta).

Se tiene entonces el cuadro siguiente :

	STD	Na_2CO_3
concentración g/l	66.7	42.4
Cantidades (toneladas)	28 000	18 000

Volumen de la salmuera : $420\,000 \text{ m}^3$

En las sales disueltas tenemos :

63.6 Na_2CO_3

36.4% impurezas : 30.3% de cloruros Na y K

6.1% otros (sulfatos, boratos, bicarbonatos de Na, K, Li).

Por supuesto, debajo de 0.5 m todavía hay agua, pero no se conoce su concentración. Es posible que sea inferior a la de la salmuera superficial. Es muy difícil cavar pozos porque las gravas y las arenas se derrumban. Si se proyecta un trabajo de perforación habrá que tener mucho cuidado con esto. Entonces los valores calculados constituyen un límite inferior.

Las sales cristalizan encima del hielo, o por capilaridad en los bordes de la laguna. Se trata de natron $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ que se deshidrata en termonatrita $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, con la halita, NaCl como mayor impureza.

RENOVABILIDAD DE LAS SALES (ver IV-8-3,4 y IV-C-4)

Se trata de una napa subaflorente. Hay evaporación directa de las salmueras libres, pero también evaporación de las aguas dentro de las gravas. Como el nivel de la napa es muy superficial (-10 cm) y los sedimentos son muy permeables (gravas) consideramos que todas las aguas de lluvia se infiltran hasta la napa. Tenemos :

$$\begin{aligned} & 1 \text{ km}^2 \text{ de salmuera libre} \\ & 0.5 \text{ km}^2 \text{ de salmuera subterránea.} \end{aligned}$$

He = 1.5 m.; Hp = 0.2 m (zona al norte)

Cor = 0.3 g/l = $0.3 \times 10^{-7} \text{ ton/m}^3$ y $C_L = 66.7 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$.

A -10 cm de profundidad se estima : He = $0.7 \times 1.5 \approx 1 \text{ m}$ (Fig. 15).

Se obtiene entonces :

Para la laguna : $0 \leq t_1 \leq 390 \text{ toneladas STD/año}$
 $390 \leq \text{tor}_{(1)} \leq 392 \text{ toneladas STD/año}$

Para la napa : $0 \leq t_2 \leq 120 \text{ toneladas STD/año}$
 $120 \leq \text{tor}_{(2)} \leq 121 \text{ toneladas/año.}$

Entonces el valor límite de la renovabilidad de las STD es $t_1 + t_2 = 510 \text{ toneladas/año}$ o sea como máximo 320 ton. Na_2CO_3 cada año (= 63.6% STD). También tenemos $510 \leq \text{tor} \leq 513 \text{ ton.}$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- factor de concentración : $\frac{C_L}{C_{or}} = \frac{66.7}{0.3} = 222$, lo que es un valor medio, no muy alto.
- cálculo de T/tor = $28\ 000/512 = 55$ años, lo que es bajo.

Pero aquí se tiene una incertidumbre importante : el valor de T. Se ha tomado 0.5 m de profundidad media para la salmuera. Pero esta puede ser más profunda y tener varios metros, pero aunque suponiendo que la salmuera tenga la misma concentración hasta 5 m de profundidad (10 veces más) lo que es mucho, entonces se tendría T/tor = 550 años. Podemos tomar como valor límite razonable :

$$55 < T/tor < 550 \text{ años.}$$

Asociando este resultado con el factor de concentración : 222, se puede concluir que hay algo de infiltraciones, pero que no son excesivas. Deben ser del mismo orden de magnitud que las de Hedionda Sur, pero superior a las de Collpa Laguna. Entonces el valor de 320 toneladas Na_2CO_3 es un valor límite superior : el valor real debe ser más bajo, lo que es también poco.

LAGUNA KHARA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur-Lípez
 Coordenadas : Long. : $67^{\circ}52'$
 Lat. : $21^{\circ}58'S$
 Altura : 4 509 m

ACCFSO : Uyuni - Alota - Mina Corina - Camino a Laguna Verde - Pampa Sílole. A partir de este punto no hay camino, se desvía por las lomas, terreno medianamente difícil.
 Alojamiento : Campamento de Mina Corina o el de Laguna Colorada. Desde cada lugar es necesario pensar en por lo menos dos horas de camino para llegar a la laguna. Otra

posibilidad es acampar.

ESTUDIOS ANTERIORES : Nota breve en : ECHENIQUE, BALLIVIAN y RISACHER, 1978.

GEOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Es una cuenca volcánica, probablemente con riódacitas. Se nota la presencia de ignimbritas y estratovolcanes que rodean la depresión. No se observa nada de azufre en la cuenca.

APORTES DE AGUA

Dos ríos importantes al Sur alimentan la laguna. No se tiene idea de la magnitud de aportes difusos; pero algunos pozos cavados en la orilla Sur-Este muestran aguas muy dulces, lo que parece indicar que en esta laguna también dominan los aportes difusos subterráneos. No se conoce nada de las demás orillas.

Se dá el análisis (nº 1) del principal río que alimenta la laguna (ver cuadro).

El cálculo de R y R' da $R < 1$ y $R' < 1$ (II-F-7), lo que indica que esta agua debe evolucionar hacia facies de carbonatos de sodio, lo que corresponde bien con la litología de la cuenca.

DESCRIPCION Y QUIMISMO DE LA LAGUNA

Es un lago bien definido (Fig. 7), de forma aproximadamente cuadrangular y de 12 km² de superficie, lastimosamente no se tiene idea de la profundidad de este lago. A 1 km y 3 km al Noroeste existen otras dos pequeñas lagunas de 1 km² a 0.25 km² respectivamente. Solamente se han reconocido las dos lagunas mayores.

Una serie de medidas de pH y conductividad a lo largo de la orilla SE de la laguna ha mostrado una uniformidad en la composición química de la laguna grande en este sector. También se han encontrado

	pH	ALC	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	B	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
1	8.50	4.88	-	298	7.5	14.0	0.5	82.0	75.0	18.0	0.19	13.0	21.4
2	9.40	37.2	516	1 220	3 160	208	85	68	2 500	208	36	3.6	110

ALC en meq(H⁺)/l Otros en mg/l (M. Pinto, OPSTOM) inédito

Análisis de aguas de laguna Khara

valores similares para la laguna intermedia.

Se da un análisis químico de una muestra de agua de la laguna grande (orilla SE) (ver cuadro : análisis nº 2).

Se nota que se trata bien de una laguna de carbonatos de sodio, pero tres a seis veces menos concentrada que las otras lagunas de este tipo (Collpa Laguna, Hedionda Sur, Cachi Laguna).

Aquí se presenta un problema de metodología, calcular cuanto de carbonato de sodio disuelto hay efectivamente en la laguna, no tiene sentido, porque, si se concentra esta agua en piletas, casi todos los iones bicarbonatos HCO_3^- van a pasar a carbonatos (CO_3^{--}) y los carbonatos de sodio van a precipitar en cantidad bien superior a lo que hay actualmente en el lago, existen dos maneras de solucionar el problema.

- La primera sería el de simular con una computadora la evolución química de estas aguas al evaporarse. Eso permitiría conocer la composición y la cantidad de sales que precipitarán en una pileta. Pero no es posible disponer de una computadora y del programa de simulación, además puede también haber diferencias apreciables entre el resultado teórico calculado y el resultado real medio (hay incertidumbre en los valores de los productos de solubilidad de las sales muy solubles).
- La segunda manera sería haciendo el experimento de evaporar unos 10 a 20 litros de agua de Khara Laguna, para luego analizar las salmueras y las sales que se forman. Esto es lo más simple y lo más seguro.

Es posible hacer un cálculo preliminar aproximado para tener una idea de lo que se puede obtener de este salar. La concentración en STD de las aguas de la laguna es de 8 190 mg/l. Si se considera que esos cloruros corresponden esencialmente a NaCl disuelto, se puede estimar a 5 200 mg/l la cantidad de NaCl disuelto que constituye la ma-

por impureza, lo que representa un porcentaje de 63.6% de las STD. Evidentemente una vez evaporada hasta sequedad esta agua, se tendrá el mismo porcentaje de NaCl en las sales precipitadas, lo que nos indica que el límite superior de la concentración en Na_2CO_3 es de 36.4%.

Es de suponer la existencia de otras impurezas a más de NaCl, se puede estimar que la ley en Na_2CO_3 de la sal que precipitará por evaporación en piletas será de 30-35% STD lo que es bajo en comparación con las leyes de las otras lagunas de este tipo.

Para obtener Na_2CO_3 más puro, una solución sería la de hacer precipitación fraccionada de las sales en piletas sucesivas para recuperar un producto más puro.

Entonces para la estimación de las reservas se utilizará un porcentaje de 30% de las STD que hay en la laguna, pero, no hay que olvidar que estas reservas son potenciales y que corresponden solo a lo que se obtendrá al evaporar esta agua, y no a lo que realmente existe en el lago. Una incógnita es la profundidad media de la laguna. Se da una fórmula y un cuadro con las reservas correspondientes a varias profundidades hipotéticas. Una vez conocido este valor, bastará referirse al cuadro. Si H es la profundidad media en metros, tendremos :

$$T = 100\ 000 \times H \text{ toneladas STD}$$

$$T\text{Na}_2\text{CO}_3 = 32\ 000 \times H \text{ toneladas Na}_2\text{CO}_3$$

Profund. media H (metros)	Toneladas STD	Toneladas Na_2CO_3
0.5	50 000	16 000
1	100 000	32 000
2	200 000	64 000
3	300 000	96 000

Es poco probable que la profundidad media sea superior a 3 m porque de ser así la profundidad máxima sería de unos seis metros lo que es demasiado.

RENOVABILIDAD DE LAS SALES

Tenemos : $H_e = 1.5 \text{ m}$, $H_p = 0.2 \text{ m}$
 $S = 13 \times 10^5 \text{ m}^2$
 $Cor = 0.5 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$
 $C_L = 8.19 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$

Obtenemos los siguientes límites :

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq 8\,450 \text{ ton/año STD} \\ 8\,450 &\leq \text{tor} \leq 9\,000 \text{ ton/año STD} \\ 16\,900\,000 &\leq \text{Vor} \leq 18\,000\,000 \text{ m}^3/\text{año} \\ 0 &\leq \text{Vir} \leq 845\,000 \text{ m}^3/\text{año} \\ 0 &\leq \text{Ti} \leq 9\,000 \text{ ton/año STD} \end{aligned}$$

El valor límite superior para t es 8 450 toneladas STD, lo que nos dá un máximo de 2 500 toneladas Na_2CO_3 (= 30% STD).

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Factor de concentración $\frac{C_L}{Cor} = \frac{8.19}{0.5} = 16$, lo que es muy poco.
- Cálculo de T/tor . Se ha estimado $50\,000 \leq T \leq 300\,000 \text{ ton}$, entonces $6 \leq T/\text{tor} \leq 36 \text{ años}$.

En vista de estos valores muy pequeños se puede asumir que las infiltraciones son muy importantes. Al límite podemos suponer, razonablemente que Khara Laguna se encuentra casi en estado de equilibrio dinámico, es decir que se infiltra una cantidad apenas inferior, casi igual de sales que las que entran. Su renovabilidad es casi nula. Entonces tenemos :

$$t \sim 0 \quad \text{ti} \sim \text{tor} \sim 9000 \text{ toneladas/año.}$$

Por supuesto, con el tiempo (siglos) los aportes sólidos finos van a colmar progresivamente esta cuenca y el agua se va a concentrar lentamente. Se puede considerar esta laguna como muy joven.

LAGUNA HONDA SUR

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur Lípez
 Coordenadas : Long. : 67°27'
 Lat. : 22°35'S
 Altura : 4 450 m

ACCESO : Uyuni - Culpina - Soniquera - Quetena - Collpa Laguna - Camino a Laguna Verde. Al llegar al borde del Salar de Challviri, donde entra el río Guacha se desvía al Este. No hay camino. Alojamiento en el campamento de Collpa Laguna, de otro modo sólo acampar.

ESTUDIOS ANTERIORES : Ningun conocido.

GEOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

La laguna ocupa el fondo de un embudo cuyas paredes son muy abruptas. Tiene la apariencia de un antiguo cráter volcánico, aunque no hay seguridad de que sea esto. Las rocas son volcánicas ácidas (Riodacitas) sin que se note presencia de azufre.

APORTES DE AGUA

No se ha reconocido ningún aporte de aguas dulces. Empero, parece existir un pequeño río, alimentando la laguna desde el Norte (por lo menos temporalmente). No se tiene análisis de aguas dulces.

DESCRIPCION Y QUIMISMO DE LA LAGUNA

Debido al tiempo muy breve en que se ha reconocido esta la-

guna, no se sabe si se trata de una película de agua encima de un nivel impermeable, o si se trata de una capa de agua subaflorente. Esta segunda hipótesis parece más probable. El espesor de la salmuera poco profunda es de aproximadamente 10 cm, y esta no ocupa toda la superficie del fondo de la cuenca (muy parecido a Cachi Laguna).

Un análisis muy parcial de esta salmuera ha dado :

Densidad	STD g/l	pH	ALC	$\text{CO}_3^{=}$	HCO_3^{-}
1.024	36.8	9.88	82.9	2 290	409

ALC en meq(H^+)/l, $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^{-} en mg/l.

Es una agua carbonatada sódica, pero con una concentración en carbonatos muy baja.

$$\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^{-} = 7.33\% \text{ de las STD}$$

Una muestra de sal del borde de la laguna ha dado el siguiente resultado :

Humedad : 15.7% H_2O
 $\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^{-}$: 6.23% de la sal seca
 Na_2CO_3 : 9.27% de la sal húmeda

Se nota la ley muy baja de esta sal. La diferencia entre 7.33% de $\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^{-}$ de la salmuera y 6.23% de la sal seca se debe probablemente a la precipitación de carbonatos de Ca y Mg en los sedimentos del fondo. Se puede considerar este carbonato de sodio como una impureza en otra sal (NaCl y Na_2SO_4).

Damos un orden de magnitud de las reservas posibles de esta laguna.

Superficie : 300 000 m^2
 Profundidad media : 0.1 m

Volumen : 30 000 m³
 STD toneladas : 1 100 ton.
 Na₂CO₃ toneladas : 120 ton. (= 11% STD).

Se vé que, aunque este es un valor mínimo (no se conoce el espesor real de la salmuera) es totalmente inexplorable, no solamente por la calidad, sino también por la cantidad.

RENOVABILIDAD DE LAS SALES (IV-B-3,4)

No hay mucho interés en determinar este valor. De todas maneras se hará, con el fin de tener una idea general sobre todos los salares, y particularmente sobre las infiltraciones. No se conoce la concentración de las aguas de alimentación; pero se puede tomar como primera aproximación un valor de 0.1 g/l que es la concentración promedio de las aguas dulces de todo este sector. Tenemos entonces :

$$\begin{aligned} H_e &= 1.5 \text{ m}; H_p = 0.15 \text{ m} \\ C_{or} &= 0.1 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3; C_L = 36.8 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3 \\ S &= 300\,000 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

De aquí :

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq 40.5 \text{ toneladas STD/año} \\ 40.5 &\leq t_{or} \leq 40.6 \text{ toneladas STD/año} \\ 405\,000 &\leq V_{or} \leq 406\,000 \text{ m}^3/\text{año} \\ 0 &\leq V_i \leq 110 \text{ m}^3/\text{año} \\ 0 &\leq t_i \leq 40.6 \text{ ton STD/año.} \end{aligned}$$

El valor superior de t es 40.5 toneladas STD, o sea 4.5 toneladas Na₂CO₃ cada año (= 11% STD). Esto es perfectamente insignificante.

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Coeficiente de concentración : $\frac{C_L}{C_{or}} = \frac{36.8}{0.1} = 368$
- Cálculo de T/t_{or} = 1 100/40.5 = 27 años.

Aunque hay una fuerte incertidumbre sobre T, esos resultados sugieren fuertes infiltraciones. Entonces el valor real de t es todavía inferior al valor ya mínimo, determinado antes.

PASTOS GRANDES

UBICACION : Departamento : Potosí

Provincia : Sur Lípez

Coordenadas : Long. : $67^{\circ}47'$

Lat. : $21^{\circ}39'S$

Altura : 4 400 m

ACCESO : Uyuni - Alota - Mina Corina (desvío antes de llegar a Mina Corina), 7-8 horas.

ESTUDIOS ANTERIORES : RISACHER, 1976-1978; RISACHER and EUGSTER, 1979.

GEOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

La parte Oeste de la cuenca está constituida por altas cumbres volcánicas con rocas de composición riódacíticas (5 000-5 800 m) sin azufre en cantidades apreciables. En las zonas altas de los cerros Cachi Laguna y Aguas Calientes hay algo de azufre, pero sin importancia. No se nota a simple vista. La parte Este está constituida esencialmente por una capa ignimbrítica de altura menor (5 000 m). No se nota absolutamente nada de azufre.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Es un salar del tipo IV (ver II-D), es decir, presenta un gran espesor de sedimentos conteniendo napas subterráneas, y una laguna central alimentada por un río superficial. La napa superior está a una profundidad media de 1 m. El salar está rodeado de lagunas en las orillas que forman casi un anillo completo. La laguna central y una laguna en el Sur son las más importantes. Solamente se consideran

esas dos lagunas, las otras siendo demasiado pequeñas son de menor interés. Los aportes de aguas se hacen por medio de manantiales, ríos de agua fresca muy dulce y por fuentes termales que salen ya sea por los bordes o directamente por el salar mismo, lo que, hasta ahora representa una excepción en los salares bolivianos.

Pastos Grandes tiene una forma ovalada con el eje mayor de dirección SE-NO. Su superficie es aproximadamente de 100 km^2 . Su quimismo general es del tipo neutro : Na-Ca-(SO_4)-Cl (ver Fig. 6) con altas concentraciones en Li y B. Es una boratera.

DESCRIPCION DE LOS SEDIMENTOS. RESERVAS DE ULEXITA (Fig. 23 y 24)

La cuenca de Pastos Grandes ha sido rellenada durante el Cuaternario con sedimentos y sales cuyo espesor se desconoce, pero que deben alcanzar varios cientos de metros. Por supuesto solamente se tiene datos de la parte más superficial de estos sedimentos (2-3 metros).

ZONA OESTE

Es el sector mejor estudiado. El nivel más antiguo reconocido es un barro con calcita y arcilla, congelado en el invierno hasta por lo menos 1 metro de profundidad (en junio-julio) y plástico en período más caliente. Encima se observa una costra de carbonato de calcio rota y fragmentada por la acción del hielo (pingos). La fragmentación mayor probablemente ocurrió durante la Pequeña Edad Glacial, hace cinco siglos. Esta costra ha cementado todos los materiales que estaban presentes. Una pisolita, producto de una antigua fuente termal, cementada por la costra, ha dado una edad de 620 ± 220 años BP (FONTES et SERVANT, 1976) lo que representa una edad para la formación de la costra entre 500 y 600 años BP. Encima de esta costra se observan niveles testigos, hasta 1 metro de espesor, de material arcilloso-arenoso. Este material ha sido traído posiblemente por el derretimiento de los nevados acumulados en la cuenca durante la Pequeña Edad Glacial, hace cinco siglos, lo que ha producido una pequeña fase lacustre reciente. Las fuentes termales interiores forman actualmente pi-

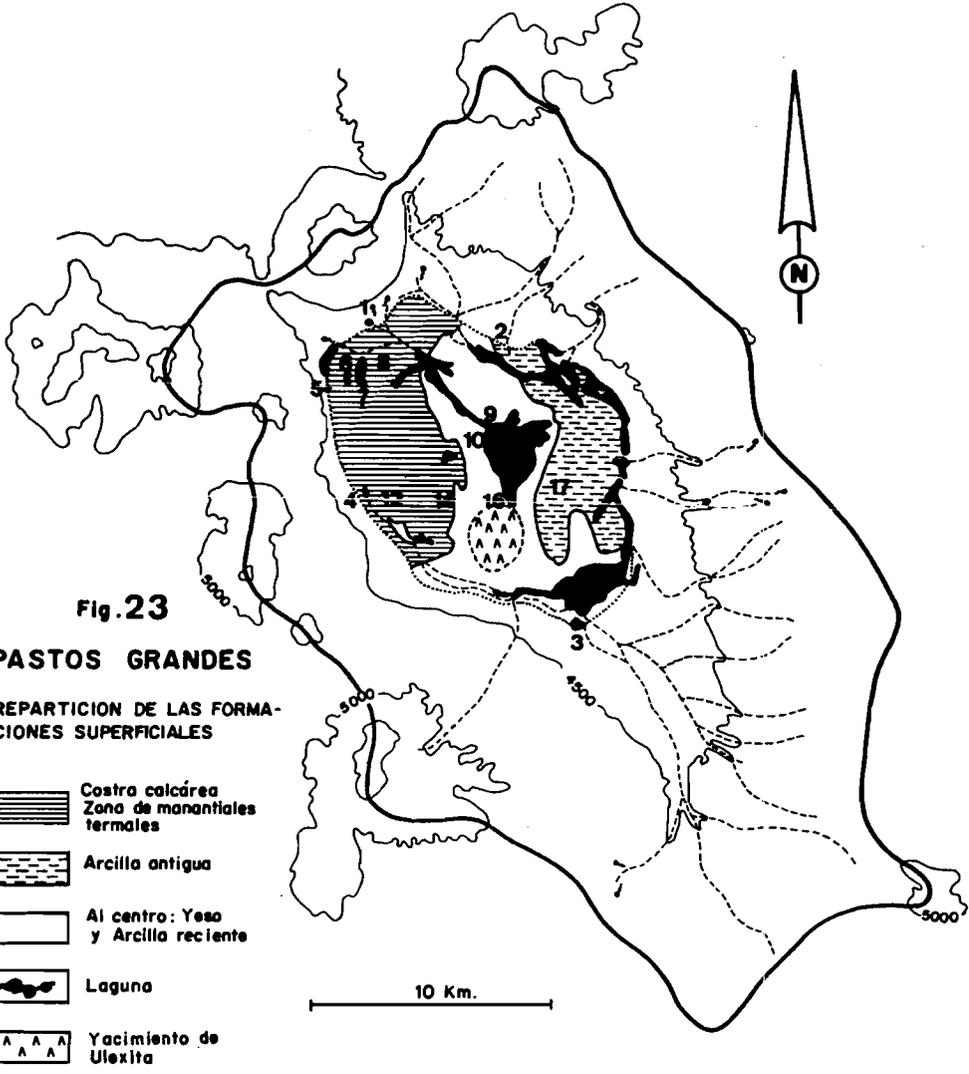


Fig.23

PASTOS GRANDES

REPARTICION DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES

-  Costra calcárea
Zona de manantiales
termales
-  Arcilla antigua
-  Al centro: Yeso
y Arcilla reciente
-  Laguna
-  Yacimiento de
Utexita

OESTE

ESTE

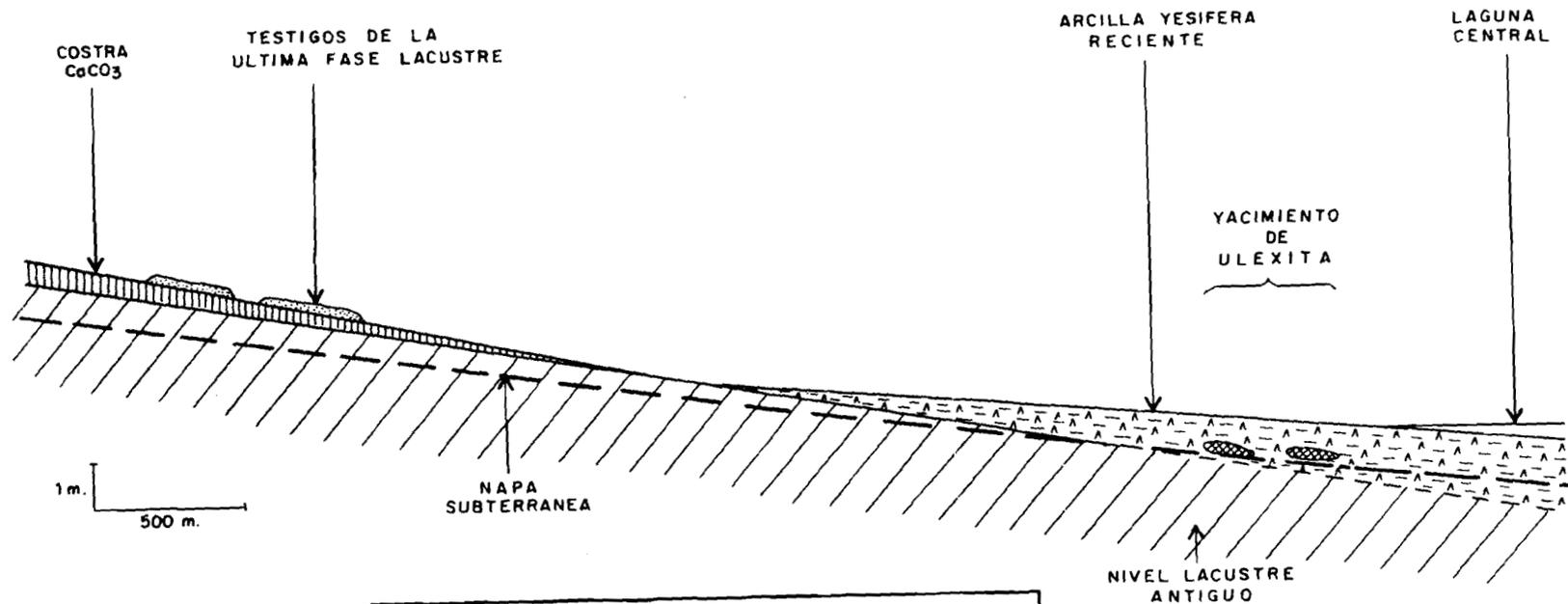


Fig. 24

PASTOS GRANDES
CORTE TEORICO EN LAS FORMACIONES SUPERFICIALES

solitas, nódulos y concreciones de calcita en sus alrededores (RISACHER and EUGSTER, 1979).

ZONA CENTRAL Y ESTE

No se conocen estas zonas con mucho detalle. Los sedimentos son esencialmente constituidos de yeso arcilloso y limoso. El yeso parece tener doble origen : primero, y sobre todo por la sequía de lagos anteriores (yeso singenético) y después por ascensión capilar (diagénético). Es muy difícil distinguir unidades sedimentológicas claras. En este sector se encuentra la ulexita, borato de sodio y calcio ($\text{NaCa B}_5\text{O}_9, 8 \text{H}_2\text{O}$). Este mineral forma nódulos y lentes dentro de los sedimentos, que pueden coalescer para constituir una capa de unos 10 cm de espesor promedio entre 1 y 2 metros de profundidad, sobre todo en la zona Sur del Salar.

RESERVAS DE ULEXITA (ver Fig. 23)

No se conoce la extensión exacta del nivel de ulexita : un reconocimiento muy superficial presenta un área útil de 6 km^2 ; tomando un espesor promedio de 10 cm; se obtiene un volumen de $600\,000 \text{ m}^3$ de ulexita bruta (orden de magnitud). Eso corresponde a 1 200 000 toneladas de ulexita bruta y a 95 000 toneladas de B (orden de magnitud).

Una determinación de Li en una muestra de ulexita bruta ha dado 730 ppm Li y 4 600 ppm K (M. PINTA, ORSTOM). Es muy probable que estos elementos se encuentren en el agua intersticial y no como impureza en la ulexita.

HIDROLOGIA

Los aportes de agua dulce : se dan los análisis de las aguas de los principales ríos y manantiales de agua dulce (ver cuadro; nº 1, 2, 3, 4).

Si calculamos R y R' (ver II-F-7) encontramos $R < 1$ y $R' < 1$, lo que quiere decir que esas aguas deberán normalmente evolucionar hacia facies carbonatadas sódicas. Pero, al entrar en los sedimentos del salar, esas aguas cambian de quimismo y no evolucionan hacia car-

bonatos de sodio. Una buena prueba de esto es que las sales eflorescentes en los alrededores de los manantiales y ríos, un poco por arriba de la orilla del salar, son carbonatos de sodio (ver III-C-3).

Las aguas termales : salen a la vez por las orillas y dentro del salar mismo; se han identificado alrededor de doce fuentes termales activas, todas ubicadas en la parte Oeste del Salar. Damos los análisis de algunas fuentes termales importantes (ver cuadro : nº 5, 6, 7, 8).

Las temperaturas de 7 y 8 han sido estimadas porque la surgente en el centro de una laguna no es accesible.

El agua 5 corresponde a una fuente de la orilla cuyas aguas corresponden probablemente a una mezcla de una agua termal y de aguas superficiales frías. Se nota que esas aguas son mucho más concentradas que los aportes de aguas dulces, y las que salen dentro del salar son francamente saladas. Las que surgen en los bordes son menos concentradas. Eso se debe a que las aguas que salen dentro del salar deben cruzar todo el espesor de los sedimentos salados, lo que puede concentrarlos notablemente. El agua termal 5 saliendo por la orilla es menos concentrada que las otras aguas termales, pero más que las aguas dulces.

Las aguas termales que salen por los bordes tienen $R < 1$ y $R' < 1$, pero con valores más cercanos a 1 que las aguas dulces. Las aguas termales saladas que salen del centro tienen ya su futuro químico bien definido a estas concentraciones. El cálculo de R y R' da $R > 1$ y $R' > 1$. Entonces estas aguas evolucionarían hacia facies cloruro sulfatado sódicas, lo que representa el quimismo general del salar. Como estas aguas cruzan todo el espesor de los sedimentos, de los cuales toman sus sales, se puede considerar como poco probable la existencia de carbonatos de sodio en niveles profundos, porque eso se notaría en el quimismo de estas aguas.

La laguna superficial central : está alimentada por un verdadero río superficial. Damos el análisis de este río (9) a su desembocadura en la laguna, y un análisis de la salmuera de la laguna (10) (ver cuadro).

Análisis de aguas de Pastos Grandes (ver la ubicación en la Fig. 23)

	t ^o	densidad	pH	ALC	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	B
1	-	1	7.12	0.88	5.60	5.50	0.33
2	-	1	8.91	0.92	10.4	9.50	0.44
3	-	1	8.00	0.61	3.9	12.0	0.31
4	-	1	7.82	0.61	59.2	7.20	0.32
5	31 ^o	-	6.55	1.73	560	73	2.0
6	37 ^o	-	6.30	8.81	8720	275	26
7	50 ^o	-	7.40	7.37	10 000	350	40
8	40 ^o	-	6.60	7.58	9 700	340	36
9	-	1.020	8.52	4.25	16 700	465	60
10	-	1.211	7.20	22.9	194 000	2 460	945
11	-	1.147	7.46	9.70	134 000	3 370	405
12	-	1.059	7.00	5.17	51 000	1 120	145
13	-	1 085	7.02	5.24	77 000	1 500	270
14	-	1 143	7.08	7.36	128 000	3 600	575

Análisis de aguas de Pastos Grandes (ver la ubicación en la Fig. 23) (continuación)

	t ^o	densidad	pH	ALC	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	B
15	-	-	7.14	9.54	150 000	1 780	360
16	-	1.167	6.95	7.68	154 000	3 240	545
17		1.152	7.05	7.08	141 000	3 620	445

	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
1	46.3	6.60	1.63	nd	9.0	3.2
2	29.2	16.3	2.55	0.1	6.8	2.8
3	29.2	6.60	1.63	nd	6.8	3.0
4	19.2	46.7	4.30	0.52	3.3	1.6
5	92.0	318	42.6	5.2	20.4	8.88
6	87.0	4 490	510	69.7	425	133
7	118	5 700	520	64	340	168
8	124	5 700	520	70	300	160
9	68	9 100	1 020	117	360	264

Análisis de aguas de Pastos Grandes (ver la ubicación en la Fig. 23) (continuación)

	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
10	67	101 000	14 200	1 640	3 100	3 480
11	71.5	6 440	81 000	675	1 650	1 250
12	84	28 000	3 600	350	900	550
13	47.5	39 000	5 800	710	1 150	1 460
14	55	71 000	7 100	940	2 230	2 600
15	16	74 000	8 520	1 720	2 750	3 330
16	36	80 000	9 800	1 160	2 380	2 560
17	30	70 000	8 000	880	1 730	1 500

ALC en meq(H⁺)/l

Otros en mg/l

nd = no detectado

1- 6 : F. RISACHER, 1978 y RISACHER and EUGSTER, 1979.

7-17 : M. PINTA - ORSTOM, inédito.

La laguna tiene una superficie de $4\,650\,000\text{ m}^2$, una profundidad media de 0.15 m , lo que le dá un volumen de $700\,000\text{ m}^3$. Otros análisis han dado valores más altos par Li, K y B. Pero es probable que corresponden a un volumen más bajo de la salmuera, después de una fuerte evaporación al fin de la época seca. A partir de estos análisis, se calculan las reservas de la laguna central.

	Concentración en ton/m^3	Cantidad total T en toneladas
Li	1.6×10^{-3}	1 100
K	14×10^{-3}	9 800
B	0.9×10^{-3}	630
STD	322×10^{-3}	225 000

Estas cantidades son pequeñas.

RENOVABILIDAD DE LA LAGUNA CENTRAL (Cálculo a partir de las STD)

Se tiene :

$$H_e : 1\text{ m}, H_p = 0.2\text{ m}$$

$$S : 4\,650\,000\text{ m}^2$$

$$\text{Cor} : 28.4 \times 10^{-3}\text{ ton}/\text{m}^3; C_L = 322 \times 10^{-3}\text{ ton}/\text{m}^3.$$

Se calcula (ver IV-B-3,4) :

$$0 \leq t \leq 106\,000$$

$$3\,720\,000 \leq \text{Vor} \leq 4\,080\,000$$

$$0 \leq V_i \leq 360\,000$$

$$106\,000 \leq \text{tor} \leq 116\,000$$

$$0 \leq t_i \leq 116\,000$$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Coeficiente de concentración : $\frac{C_L}{\text{Cor}} = 11.3$, lo que es muy poco.

- Cálculo de : $1.94 \leq T/tor \leq 2.13$, lo que también es muy poco.

Se obtienen valores muy similares utilizando las concentraciones en Li, K, B en vez de las STD. Entonces se puede considerar que esta laguna se encuentra, casi en estado de equilibrio dinámico, la cantidad de sales que entran es casi igual a la cantidad de sales que se infiltran. Es decir que tenemos :

$$\begin{aligned}
 t &\sim 0 \\
 tor &= ti = 116\ 000 \text{ toneladas STD} \\
 Vor &= 4\ 000\ 000 \text{ m}^3 \\
 Vi &= 360\ 000 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Se puede calcular los valores que entran cada año en Li, K y B (tor) a partir de este valor de tor :

- para Li : 470 ton/año
- para K : 4 000 ton/año
- para B : 240 ton/año.

Pero estas cantidades se infiltran casi completamente. Entonces esta laguna no es renovable en un sentido estricto, pero el agua que la alimenta (en la desembocadura) es ya bastante concentrada, por lo que se puede considerar la posibilidad de evaporar esta agua en piletas y recuperar la totalidad de las sales que ingresan (470 ton Li, 4 000 ton K y 240 ton B). Estos valores son pequeñas cifras, pero si pensamos que 470 ton Li constituye el 10% de la producción occidental de este elemento en 1975, nuestro análisis se torna distinto.

Estas infiltraciones alimentan la napa subterránea. Las sales disueltas en el río provienen sobre todo de redisolución de sales superficiales capilares (TRL de la figura 13; ver IV-C-1) y también de las fuentes termales que nacen en el salar).

La laguna superficial Sur : se dará a continuación un análisis de la salmuera (11). Esta laguna está esencialmente alimentada por un río

de agua muy dulce, cuyo análisis corresponde al número 3. Su superficie es de $3\,200\,000\text{ m}^2$; su profundidad media de 0.2 m , lo que dá un volumen de $640\,000\text{ m}^3$.

Reservas de la Laguna Sur :

	Concentración en ton/m^3	Cantidad total T toneladas
Li	0.67×10^{-3}	420
K	6.4×10^{-3}	4 000
B	0.4×10^{-3}	250
STD	230×10^{-3}	147 000

Estas cantidades son pequeñas.

RENOVABILIDAD DE LA LAGUNA SUR (calculada a partir de las STD)

Se tiene :

$$\begin{aligned} H_e &= 1.1\text{ m}; H_p = 0.2\text{ m} \\ S &= 3\,200\,000\text{ m}^2 \\ C_{or} &= 0.1 \times 10^{-3}\text{ ton/m}^3 \text{ (ver análisis 3)} \\ C_L &= 230 \times 10^{-3}\text{ ton/m}^3. \end{aligned}$$

Se calcula (ver IV-B-3,4) :

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq 288 \\ 2\,880\,000 &\leq V_{or} \leq 2\,881\,000 \\ 0 &\leq V_i \leq 1\,250 \\ 288 &\leq t_{or} \leq 288.1 \\ 0 &\leq t_i \leq 288.1 \end{aligned}$$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

$$\text{- Coeficiente de concentración : } \frac{C_L}{C_{or}} = 2\,300$$

Cálculo de $510.2 \leq T/\text{tor} \leq 510.4$.

Estos dos valores son altos : sugieren que las infiltraciones son mínimas, lo que distingue esta laguna de la laguna central.

Entonces : $t \sim 280$ ton/año. Tomando un volumen $V_{or} = 2\ 880\ 000\ \text{m}^3/\text{año}$, y las concentraciones del análisis nº3, se obtiene un aporte tor anual en K de 4.7 ton y en B de 0.9 ton, lo que es significativo (Li no ha sido detectado en el agua dulce del río).

La napa subterránea : se tiene un perfil transversal Oeste-Este de seis pozos a través del salar (análisis 12, 13, 14, 15, 16 y 17).

Se observa que las concentraciones crecen desde las orillas hasta el centro. Se puede considerar que esta salmuera constituye un lago subterráneo con una superficie un poco menor que la del salar, pero cuyas concentraciones aumentan desde los bordes hasta el centro, y cuya profundidad también varía. Se tomarán los siguientes valores para estimar las reservas :

	Concentración en las orillas (mg/l)	Concentración en el centro (mg/l)	Concentración promedio (mg/l)
STD	10 000	250 000	130 000
Li	100	1 500	800
K	1 000	9 000	5 000
B	50	500	300

Se considera una superficie de $80\ \text{km}^2$, un poco inferior a la superficie del salar de $100\ \text{km}^2$, para eliminar así las zonas cercanas a los orillas, cuyo quimismo puede ser algo diferente del resto del salar. Aquí, como para todas las capas subterráneas no se conoce el espesor de este nivel, y solamente se puede dar una fórmula en función de esta profundidad que es una incógnita. La porosidad se estima en un 40% (0.4). Entonces, si "c" es la concentración del elemento con-

siderado (o también de las STD), y "h" el espesor, de la napa, se tiene : $T = 32\ 000\ 000 \times h \times c$ toneladas disueltas.

	Concentración en ton/m ³	Reservas T toneladas en función de h (en metros)
Li	0.8×10^{-3}	25 600 h
K	5×10^{-3}	160 000 h
B	0.3×10^{-3}	9 600 h
STD	130×10^{-3}	4 160 000 h

Estas cantidades son muy superiores a las que hay en las lagunas superficiales; cualquiera que sea el valor de h. Es posible que la capa superficial, que estamos considerando, tenga varios metros de profundidad antes de llegar a un nivel impermeable que separe esta napa de otra más profunda.

RENOVABILIDAD GLOBAL (Ver IV-C)

Se ha visto que no se puede considerar la renovabilidad de la napa sola, sino la del conjunto : napa + sales capilares. Es posible que tengamos para los elementos más inertes (que no precipitan) un ciclo que es el siguiente :

napa \longrightarrow sales eflorescentes \longrightarrow laguna central \longrightarrow napa

porque hemos visto que casi todo lo que entra en la laguna central se infiltra (ver Fig. 13), con excepción quizá del boro como ulexita en los sedimentos.

Se utilizará la fórmula simplificada : $t = V'_E = Co.$

La napa está a una profundidad media de un metro. Los sedimentos son variables, pero con proporciones mayores de limo y limo arcilloso (limo yesífero), así que se leerá el porcentaje de evaporación a partir de la curva intermedia 3-4 de la figura 15 : $H'E = 0.12 HE.$

Además hay que tomar en cuenta la salinidad promedio de la salmuera (130 g/l) lo que disminuye la evaporación en 13%, en relación con una agua dulce. Entonces, si se toma 1.5 m de evaporación para una agua dulce :

$$H'E = 0.12 (1.5 - 0.13 \times 1.5) = 0.15 \text{ m/año.}$$

Se considerará una porosidad de 40% (0.4). La superficie útil es la superficie del salar, menos la superficie de las lagunas que impiden la evaporación. Tomaremos una superficie útil de 80 km². Esto nos dá el volumen de salmuera evaporada :

$$V'E = 80 \text{ 000 000} \times 0.16 \times 0.4 = 5 \text{ 120 000 m}^3$$

El problema es de estimar la concentración ponderada de los aportes Co, por la existencia de las fuentes termales que salen dentro del salar. Es probable que el volumen de las aguas termales sea inferior al volumen de las aguas dulces que salen por las orillas, porque estas últimas, además de alimentar manantiales corrientes y ríos se distribuyen a todo lo largo del perímetro del salar. Otra incertidumbre proviene de la alimentación de la napa por estas fuentes termales antes de que ellas salgan a la superficie. Debe haber mucha difusión de estas aguas incluso dentro del sedimento, donde está la napa. Se calculará entonces los valores límites mínimos y máximos de t, considerando aportes exclusivamente dulces, y exclusivamente salados (fuentes termales).

$$t = V'E \times Co = 5 \text{ 120 000} \times Co$$

	Co(ton/m ³)		t (toneladas)	
	aguas dulces	fuentes termales	aguas dulces	fuentes termales
Li	0.15 x 10 ⁻⁶	50 x 10 ⁻⁶	0.8	260
K	2.5 x 10 ⁻⁶	400 x 10 ⁻⁶	13	2 000
B	0.35 x 10 ⁻⁶	25 x 10 ⁻⁶	1.8	130
STD	100 x 10 ⁻⁶	13 000 x 10 ⁻⁶	500	67 000

Entonces se nota que a pesar de la enorme incertidumbre el yacimiento de salmuera + sales capilares, no puede ser considerado como renovable, puesto que los valores límites superiores son mínimos. Son inferiores a las cantidades que se infiltran a partir de la laguna central. Pero no hay que olvidar que la mayoría de las sales que provienen de esta laguna, en última instancia tienen su origen en la napa misma (recorren un ciclo hidrológico cerrado).

RENOVABILIDAD DEL YACIMIENTO DE ULEXITA

Este yacimiento se encuentra asociado con las salmueras más concentradas. Entonces se tomará una concentración de 0.5 g/l B y un valor de STD = 250 g/l. La evaporación se reduce entonces a : $H'E = 0.12 (1.5 - 0.25 \times 1.5) = 0.14$ m.

La superficie considerada del yacimiento es de 6 km^2 y la porosidad 40%. Entonces el volumen de salmuera que se evapora cada año es : $V'E = 6\ 000\ 000 \times 0.14 \times 0.4 = 336\ 000 \text{ m}^3$. Suponiendo que esta agua corresponde sobre todo a las pérdidas capilares Vec, se puede estimar la cantidad de B que entra en el yacimiento de ulexita cada año : $(C = 0.5 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3)$.

$$t = 0.5 \times 10^{-3} \times 336\ 000 = 170 \text{ toneladas B/año.}$$

Este valor no es muy grande, por lo que también se considera a este yacimiento como no renovable.

Calculamos el valor de T/t ($T = 95\ 000$ ton B de reservas).
Obtenemos : $T/t = 95\ 000/168 = 565$ años.

Si consideramos este valor como la edad de la formación de la ulexita en Pastos Grandes (con todas las reservas expresadas en IV-B-4), se nota que la ulexita parece haber empezado a formarse a partir de la última fase lacustre correspondiente al derretimiento de los nevados de Pequeña Edad Glacial (600-500 años BP). Esto es muy lógico, pero implica una velocidad de sedimentación en el centro de Pastos Grandes de unos 2 mm/año (1 metro dividido por 500 años). Este valor muy alto

puede ser correcto tomando en cuenta la naturaleza de los sedimentos de esta zona que son sobre todo constituidos de yeso limonoso y arcilloso. Cada año, Pastos Grandes se inunda con aguas saladas que, al secarse, pueden depositar fácilmente este espesor de yeso (en la zona central). El aspecto bandeado milimétrico del yeso, notable sobre todo al Este del Salar, apoya esta hipótesis.

Otra conclusión, es que es muy probable que hayan otros niveles de ulexita más profundos en los sedimentos. Cada vez que hubo en la historia lacustre de Pastos Grandes una fase seca o relativamente seca (inundación solamente en época de lluvia) deben haberse depositado niveles de borato.

CONCLUSION GENERAL SOBRE PASTOS GRANDES

Las reservas existentes en Li, K y B en la parte muy superficial del salar son notables. No se sabe lo que ocurre más profundamente, pero es muy probable que existan más reservas dentro de los sedimentos. La renovabilidad de la parte superficial del salar (hasta 3 metros de profundidad) es pequeña. No se la puede tomar en cuenta para una explotación intensa. A continuación se presenta un esquema del movimiento de las sales (o elementos) más solubles en Pastos Grandes (no aplicable a la calcita, ni al yeso); varios de los trayectos han podido ser cuantificados, pero otros permanecen desconocidos. Con más tiempo de estudio se podría cuantificar todo el ciclo (Fig. 25).

CAPINA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur Lípez
 Coordenadas : Long. : 67°35'
 Lat. : 21°58'S
 Altura : 4 480 m

ACCESO : Dificil. Primero se llega a Laguna Colorada por cualquiera de los caminos principales (a partir de Quetena, de

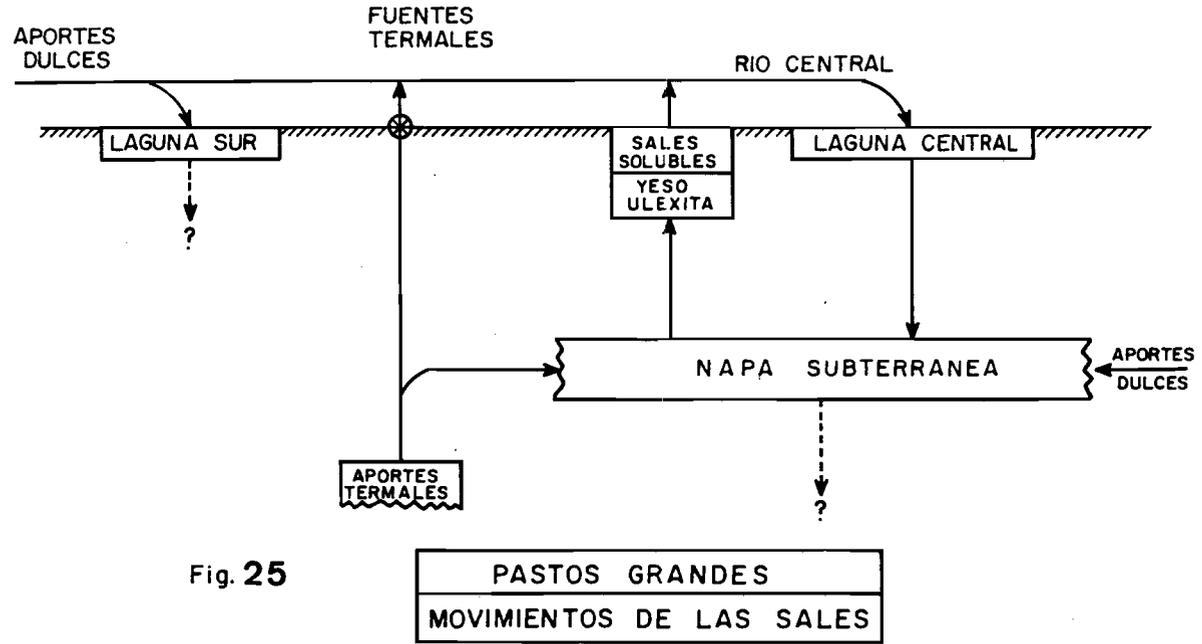


Fig. 25

PASTOS GRANDES
MOVIMIENTOS DE LAS SALES

Chiguana, o de Alota-Corina). En el Noreste de Laguna Colorada, la ruta procedente de Quetena cruza el río Sulor. En este punto hay que desviarse hacia el Noreste, sin camino. A unos kilómetros de este desvío se baja por una quebrada que es necesario seguir. Es muy difícil encontrar esta entrada sin tener un guía local. Si no se conoce el camino, por las pampas, hay que prever un día entero a partir de Quetena o de Mina Corina para arribar. Se encuentra refugio en el campamento abandonado situado a la orilla Este del salar.

ESTUDIOS ANTERIORES : RISACHER, 1976, 1978.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Es muy parecida a la de Pastos Grandes : al Oeste y al Norte altos volcanes riódacíticos, y al Este extensas capas ignimbríticas que separan esta cuenca del valle del Río Grande. No se observan vestigios de azufre en ninguna parte de la cuenca.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Es típicamente un salar del tipo IV (ver II-D y Fig. 7), un gran espesor de sedimentos salinos conteniendo una napa subterránea independiente de la laguna superficial. El quimismo general del salar es de tipo neutro : Na - (Ca) - Cl - SO₄ (Fig. 9), con fuertes leyes en B y Li. Es una boratera. La superficie total del salar es de 40 km².

APORTES DE AGUA

Hay dos ríos importantes permanentes que alimentan el salar por el Norte y por el Sur. El río del Norte (análisis 1) alimenta sobre todo la laguna superficial. El río del Sur (análisis 2) parece sobre todo infiltrarse y alimentar la napa subterránea. El análisis 3 corresponde a la laguna superficial.

	PH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	7.88	0.54	2.0	5.3	0.56	37.9	4.2	2.96	0.1	4.4	1.97
2	8.28	2.05	26.6	20.6	1.28	56.3	37.0	10.4	0.2	18.4	6.50
3	8.60	12.4	17 300	192	280	73	8 500	1 460	193	800	260

ALC en meq(H⁺)/l

otros en mg/l

ANALISIS DE LAS AGUAS DE CAPINA

El cálculo de R y R' da $R < 1$ y $R' < 1$ (ver II-F-7), lo que indica que estas aguas deberían evolucionar hacia facies carbonatadas sódicas, lo que corresponde bien a la litología de la cuenca de drenaje, pero al entrar en contacto con los sedimentos cambia su evolución. De todas maneras estas aguas son demasiado diluídas (sobre todo la nº 1), para considerar una evaporación en piletas con el fin de obtener carbonatos de sodio.

DESCRIPCION DE LOS SEDIMENTOS. RESERVAS DE ULEXITA (Fig. 26 y 27)

Solamente se conoce algo del sector Sud-Este. Es muy parecido a Pastos Grandes. Se tiene de abajo hacia arriba :

- un nivel arcilloso-limonoso antiguo;
 - una costra carbonatada fracturada por el hielo (pingos);
 - un nivel de material arcilloso-arenoso, encima de la costra, frecuentemente erodado;
 - un relleno reciente en las depresiones del nivel anterior.
- Este nivel toma más importancia hacia el centro del salar.

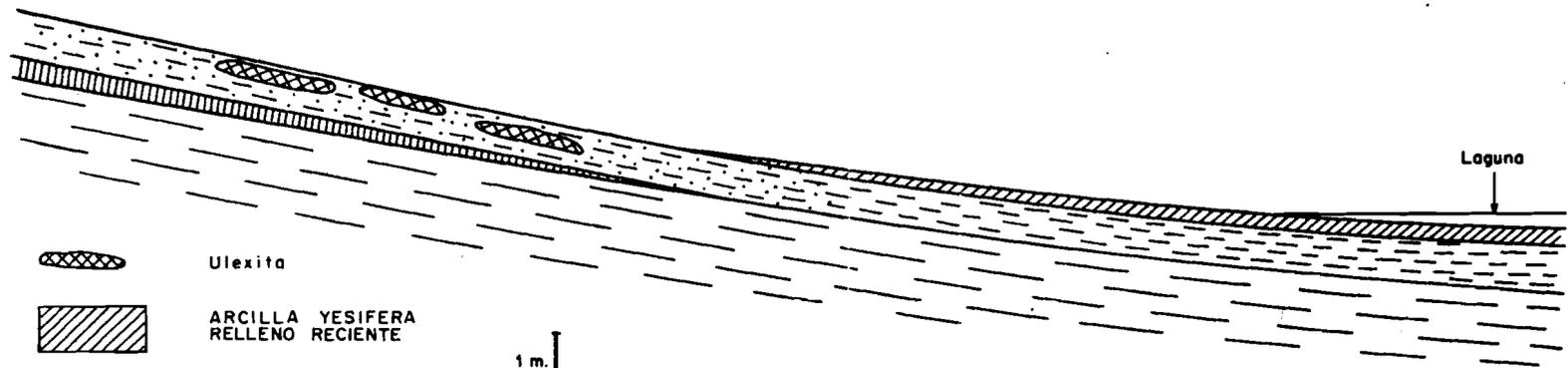
La ulexita ($\text{NaCa B}_5 \text{O}_9 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$), está presente en la mayor parte del salar, pero solamente forma una capa superficial uniforme y extensa en la zona central, ligeramente hacia el Sur-Este. Se encuentra también en los dos niveles superiores descritos anteriormente encima de las costras de carbonato de calcio. Su deposición está relacionada con la ascensión capilar de la napa subterránea. La extensión exacta de este nivel, que puede llegar hasta 30 cm de espesor es desconocida. Se puede, sin embargo, estimar en unos 5 km² la extensión útil de este nivel, con un espesor promedio de 15 cm. En todo el resto del salar, los sedimentos contienen muchos lentes y nódulos de ulexita pero muy discontinuos, impuros, y de tamaño reducido, por consiguiente inexplotables.

RESERVAS DE ULEXITA Y DE BORO

El volumen de la capa útil es 750 000 m³ de ulexita bruta, o sea 900 000 toneladas de ulexita pura (40% e agua y densidad de 2)

S

N



Ulexita



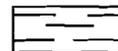
ARCILLA YESIFERA
RELLENO RECIENTE



ARCILLA ARENOSA



Costra CaCO₃



ANTIGUO NIVEL LACUSTRE

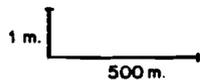


Fig.27

SALAR DE CAPINA
CORTE A TRAVES DE LAS
FORMACIONES SUPERFICIALES

lo que corresponde a 120 000 toneladas de boro.

LA LAGUNA SUPERFICIAL

Solamente se tiene un análisis de esta laguna (nº 3). Su superficie es muy variable. Se encuentra en las orillas Norte y Oeste del salar. Al momento del muestreo medía unos 8 km² y tenía una profundidad media de unos 20 cm. Su volumen era entonces de 1 600 000 m³. Se pudo establecer las reservas de la laguna :

	Concentración en ton/m ³	Reservas disueltas toneladas
Li	0.193×10^{-3}	300
K	1.45×10^{-3}	2 300
B	0.28×10^{-3}	450
STD	29.8×10^{-3}	48 000

Estos valores son muy pequeños.

ESTIMACION DE LA RENOVABILIDAD

Se hará el cálculo a partir de la concentración de K, y no a partir de las STD, por el alto contenido de SiO₂ del agua dulce (I). Esta laguna está sobre todo alimentada por el río Norte (I). Entonces :

$$HE = 1.5 \text{ m} \quad H_p = 0.2 \text{ m} \quad S = 9 \times 10^6 \text{ m}^2$$

$$Cor = 2.96 \times 10^{-6} \text{ ton/m}^3 \text{ K}; \quad C_L = 1.46 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$$

Se tiene (ver IV-B-3,4) :

$$0 \leq t \leq 30.8$$

$$30.8 \leq tor \leq 30.85$$

$$10\,400\,000 \leq Vor \leq 10\,420\,000$$

$$0 \leq Vi \leq 20\,000$$

$$0 \leq t_i \leq 30.8$$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Coeficiente de concentración : $C_T/Cor = 493$
- Cálculo de : $1\ 167 \leq T/tor \leq 1\ 169$ años.

Estos dos resultados permiten suponer que las infiltraciones son mínimas. Debe haber un pequeño error al desestimar los demás aportes, difusos sobre todo, que pueden tener una concentración más alta que la del río Norte.

Entonces : $t = 30$ ton/año K, lo que es perfectamente insignificante por lo tanto la laguna no es renovable.

LA NAPA SUBTERRANEA

No se ha podido llegar a la napa subterránea. Un pozo cavado cerca de la laguna permanecía seco a más de 3 metros de profundidad. Solamente refiriéndose a Pastos Grandes, salar muy parecido a Capina, se puede inferir que puede haber fuertes reservas de Li y K en la salmuera subterránea, pero que la renovabilidad total de la salmuera y las sales capilares debe ser insignificante.

Tres análisis por Li y K en la ulexita bruta ha dado : (M. PINTA-ORSTOM) :

$$\begin{aligned} \text{Li} &= 750 - 1\ 250 - 560 \text{ ppm} \\ \text{K} &= 4\ 560 - 7\ 500 - 2\ 700 \text{ ppm} \end{aligned}$$

lo que permite suponer fuertes concentraciones en Li y K en la salmuera subterránea (Li y K están en la salmuera intersticial de la ulexita). Sería preciso contar con perforadas a motor para poder llegar hasta la napa, sobre todo en el centro del salar.

LAGUNA CHULLUNCANI

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur Lípez
 Coordenadas : Long. : 67°53'
 Lat. : 21°32'S
 Altura : 4 430 m

ACCESO : Al borde del camino de Alota a Mina Corina, a unos 10 km antes de llegar a Mina Corina.

ESTUDIOS ANTERIORES : Ninguno conocido.

CUENCA DE DRENAJE

Es volcánica ácida (riodacitas). Al Nor-Oeste el cerro Caquella contiene azufre; los demás de la cuenca están aparentemente, sin azufre.

APORTES DE AGUA

El único aporte superficial es un río de aguas muy dulces (análisis nº 1). El cálculo de R y R' (ver II-F-7) dá $R < 1$, $R' < 1$, lo que quiere decir que esta agua debería evolucionar hacia una salmuera carbonatada sódica. Las eflorescencias que cristalizan en las orillas del río son efectivamente carbonatos de sodio.

DESCRIPCION DEL SALAR

Es una laguna superficial independiente de la napa subterránea, por lo menos en las orillas. Su quimismo es neutro. Na-Cl-SO₄ (ver fig. 9) (análisis nº 2).

Generalmente se seca al fin de la época de sequía (noviembre). Hay pocas sales cristalizadas en los bordes; eflorescencias de sulfatos de sodio (tenardita). El hecho de que el quimismo de la laguna no corresponde al del río de alimentación hace suponer que debe

	pH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	8.10	0.35	4.5	13	0.45	37	7	2.8	--	4.5	1.6
2	8.80	35.0	44 000	26 000	960	47	31 000	12 000	22.5	730	1 900

Composicion quimica de las aguas de la lagune Chulluncani.

haber fuertes interacciones entre los sedimentos y las aguas. La superficie total del salar es de 1 km^2 . La superficie de la laguna al momento del muestreo era de 0.8 km^2 .

RESERVAS EN LA LAGUNA

El único mineral interesante es el sulfato de sodio : Na_2SO_4 . La superficie de la laguna es de $800\,000 \text{ m}^2$, su profundidad media 15 cm. Su volumen es entonces de $120\,000 \text{ m}^3$. Hay alrededor de 40 g/l de Na_2SO_4 disuelto, lo que dá 4 800 toneladas de Na_2SO_4 disueltos. Por evaporación total de la salmuera la sal precipitada tendría una ley de 33% Na_2SO_4 .

Hay menos de tres toneladas Li, alrededor de 100 ton B y 1 500 ton K, disueltas en la salmuera, lo que es insignificante.

El hecho de que esta laguna se seca regularmente plantea un problema para el cálculo de la renovabilidad. Pero, de todas maneras, este salar es demasiado pequeño para presentar interés económico.

CAÑAPA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sur Lípez
 Coordenadas : Long. : $68^{\circ}01'$
 Lat. : $21^{\circ}30'S$
 Altura : 4 140 m

ACCESO : Uyuni - Alota - Mina Corina - Cañapa (6-7 horas). Alojamiento en el campamento de Mina Corina.

ESTUDIOS ANTERIORES : RISACHER, 1976, 1978.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Este salar está rodeado por tres importantes volcanes rioda-

cíticos, llegando casi a 6 000 metros de altura : los volcanes Caque-
lla, Tapaquillcha y Cañapa. En los tres hay importantes yacimientos
de azufre. Los volcanes Tapaquillcha y Cañapa han sido explotados por
este mineral. La parte Sur de la cuenca se encuentra cerrada por la
presencia de un flujo de lavas riódacíticas, tipo ignimbrita, de baja
altura.

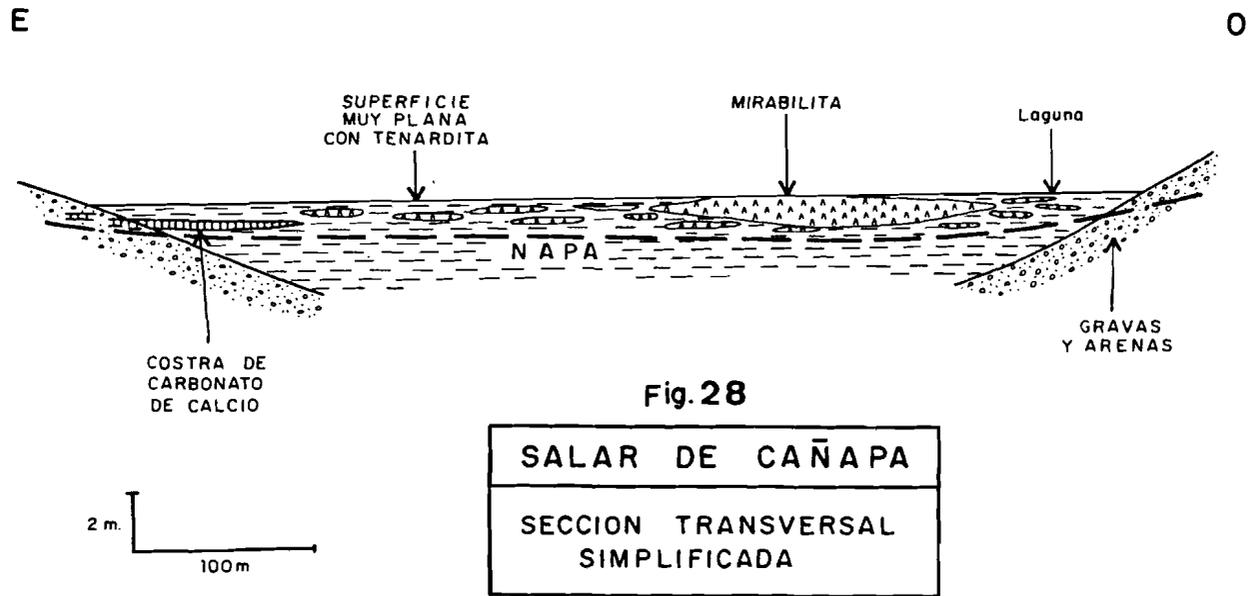
DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Cañapa es un salar muy pequeño, 1.25 km^2 , intermedio entre
el tipo III y el tipo IV (ver II-D y Fig. 7) : un fuerte espesor de se-
dimentos salinos conteniendo una napa subterránea profunda, indepen-
diente de las lagunas superficiales; pero estas lagunas se infiltran
notablemente en los sedimentos, alimentando una pequeña napa superfi-
cial de salmuera por encima de una napa principal. El quimismo del
salar es típicamente neutro : cloro-sulfatado sódico : Na-Cl-SO_4 (ver
Fig. 9), lo que es lógico tomando en cuenta la gran cantidad de azufre
en la cuenca. También hay fuertes concentraciones en Li, K y B. Su
alimentación se hace por dos manantiales difusos al Norte y al Sur, y
también por napas subterráneas al Oeste y al Este. La napa subterrá-
nea al Este está alimentada por el río Tapaquillcha que se infiltra en
los coluvios que bordean el salar al Este. Es uno de los pocos ríos
permanentes existentes en esta zona occidental de los Lípez.

LOS SEDIMENTOS. RESERVAS EN SULFATO DE SODIO (Fig. 28)

Los sedimentos de Cañapa están sobre todo constituidos de
material amorfo, arcilloso y limoso. Arcillas y sales poco solubles
como la calcita y el yeso son abundantes. Las napas se evaporan a
través de estos sedimentos y depositan sales capilares.

La dificultad es de distinguir las sales singenéticas, es
decir puramente sedimentarias de las sales diagenéticas, sobre todo en
lo que concierne al yeso y la calcita. La sal capilar más notable es
la mirabilita : $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Ella forma primero cristales aislados
centimétricos, muy transparentes (parecido al hielo) que se aglomeran
en lentes de unos centímetros de espesor y de unos metros de diámetro.
Estos lentes se unen a su vez para constituir una costra dura, super-



ficial y continua en la zona NE del salar, donde puede tener hasta 30 cm de espesor. La superficie útil, es decir explotable es de 200 000 m² y el espesor promedio de la costra de mirabilita 10 cm. Esto dá un volumen de 20 000 m³ de mirabilita, lo que corresponde a 30 000 toneladas del mineral, o a 13 000 toneladas de sulfato de sodio anhidro (tenardita).

Esta mirabilita contiene muy poco litio : 80 ppm en la sal deshidrata (M. PINTA, ORSTOM). Esto se debe a que la mirabilita no tiene casi nada de agua intersticial y también a que el litio no forma una sal cristalizada asociada a la mirabilita. Este elemento se encuentra casi exclusivamente en la salmuera. Se ha encontrado también 1 480 ppm K en la misma mirabilita deshidratada, lo que significa poco.

APORTES DE AGUA

Se dan los análisis de los dos manantiales difusos al Norte (1), al Sur (2), y también los análisis de las napas de aguas dulces en el borde Este (3) y Oeste (4) del salar (ver cuadro).

El cálculo de R y R' da $R > 1$ y $R' > 1$ (ver II-F-7), lo que indica que estas aguas evolucionarán hacia facies neutras, lo que efectivamente se observa. Esto corresponde bien a la litología de la cuenca de drenaje rica en azufre (ver II-F-5).

LA LAGUNA SUPERFICIAL NORTE

Es la única que consideramos, puesto que la laguna Sur es muy pequeña. La laguna Norte está alimentada sobre todo por el manantial difuso nº 1. El análisis químico de la laguna se lo dá en el cuadro de análisis nº 5. Su superficie es de 300 000 m². Su profundidad media de 15 cm. Entonces su volumen es de 45 000 m³, valor muy pequeño. Las reservas disueltas en la laguna se pueden estimar :

	Concentración ton/m ³	Reservas Toneladas
Na ₂ SO ₄	7 x 10 ⁻³	300
Li	0.02 x 10 ⁻³	1
K	0.2 x 10 ⁻³	10
STD	11.4 x 10 ⁻³	500

Estas cantidades son por demás pequeñas. El sulfato de sodio tendría una ley de 60% por evaporación total en piletas.

RENOVABILIDAD (cálculo en base a las STD)

$$He = 1.5 \quad Hp = 0.2 \quad Cor = 0.8 \text{ g/l (}=STD \text{ del análisis 1)}$$

$$S = 300 \text{ 000 m}^2 \quad C_L = 11.4 \text{ g/l (}=STD \text{ del análisis 5)}.$$

Se calculan (ver IV-B-3,4) :

$$0 \leq t \leq 312$$

$$390 \text{ 000} \leq Vor \leq 419 \text{ 500}$$

$$0 \leq Vi \leq 29 \text{ 500}$$

$$312 \leq tor \leq 336$$

$$0 \leq ti \leq 336$$

ESTIMACION DE LAS INFILTRACIONES

- Coeficiente de concentración : $C_L/Cor = 6$
- Cálculo de $1.5 \leq T/tor \leq 1.6$

Estos dos valores indican claramente que la laguna se encuentra en equilibrio dinámico. Todo lo que entra se infiltra y su renovabilidad es nula : $t = 0$. Esto corresponde bien con las observaciones de campo.

Observación : se notan las altas concentraciones relativas en SO₄⁻ y Na⁺ de esta laguna en comparación a las concentraciones

	pH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	6.50	1.70	271	125	1.1	63	145	20.4	1.3	60.0	18.0
2	7.18	1.39	228	90.2	0.97	68.6	106	16.1	1.0	43.2	16.4
3	6.92	1.22	67.5	122	1.6	58.5	80	12.8	0.38	24	8.8
4	7.72	2.44	136	130	2.1	52	125	46	0.92	35	13.4
5	8.34	2.15	2250	5070	13	67	3590	212	19.5	65	34
6	7.40	11.9	126 000	17 900	625	27	68 900	12 000	712	600	1670

ALC en meq (H⁺)/l

Otros en mg/l

1 - 2 - 6 : RISACHER (1978)

3 - 4 - 5 : M. PINTA (ORSTOM)

Analisis de las aguas del salar de Cañapa

de los aportes y las de la napa (análisis nº6). La relación Cl/Na se invierte, por ejemplo. Esto se debe a la redisolución de las sales capilares alrededor de la laguna en época de lluvia. Estas sales son sobre todo sulfato de sodio, lo que explica esta aparente inhomogeneidad entre las composiciones químicas de la laguna, de la napa y de los aportes. Esto plantea también problemas en los cálculos de renovabilidad, pero no los tomaremos en cuenta a este nivel.

LA NAPA SUBTERRANEA

No se considerará la pequeña napa superficial a unos 50 cm de profundidad alimentada por la laguna-Norte. A cierta distancia de la laguna esta desaparece, totalmente agotada por la ascensión capilar y las infiltraciones. Es necesario subrayar, sin embargo, que lo esencial de los sulfatos de sodio capilares, cuya cantidad se ha estimado en 13 000 toneladas Na_2SO_4 , parece provenir en gran parte de la ascensión capilar de esta pequeña napa alimentada por la laguna.

La napa subterránea principal está entre 1 y 2 metros de profundidad, salvo en el centro del salar donde parece profundizarse más. Su composición química es relativamente homogénea en gran parte del salar; está más disuelta en los bordes. El análisis 6 corresponde a esta salmuera.

Como siempre no se conoce el espesor de esta salmuera, solamente se puede dar valores en función de una profundidad h (en metros) desconocida. La superficie útil de esta salmuera se estima en unos 0.7 km^2 , la porosidad se tomará igual a 40%. Entonces, si C es la concentración del elemento o de la sal en la salmuera, las reservas son de :

$$T = 700\ 000 \times 0.4 \times h \times c$$

$$T = 280\ 000 \ h \ c \quad (h : \text{metros}; c = \text{ton/m}^3).$$

Se dá el siguiente cuadro relativo a los principales componentes útiles :

	Concentración en ton/m ³	Reservas toneladas h en metros
Na ₂ SO ₄	26 x 10 ⁻³	7 300 h
Li	0.7 x 10 ⁻³	200 h
K	12 x 10 ⁻³	3 300 h
STD	230 x 10 ⁻³	64 000 h

La sal precipitada por evaporación completa de la salmuera tendría una ley de 11%, lo que es poco.

RENOVABILIDAD GLOBAL

Los movimientos de aguas y de sales son complicados, debido a la existencia de dos napas sobrepuestas. Se podría determinar cuantitativamente con cierta precisión estos movimientos. Pero a este nivel, sobre todo económico, no es necesario profundizar tanto en este punto. Calculamos de manera muy aproximada la renovabilidad total : aguas-sales capilares, como está indicado en IV-C-4.

El salar tiene una superficie de 1 250 000 m²; restando la superficie de las lagunas, quedan alrededor de 1 000 000 m². La napa está a una profundidad media de 1.5 m. A esta profundidad, en arcillas limosas y limos la altura de evaporación se reduce en un 5% en relación a la evaporación en la superficie. Además con una concentración promedio de unos 200 g/l, la evaporación se reduce en 20%. Se tiene entonces :

$$H'E = 0.05 (1.5 - 0.30)$$

$$H'E = 0.06 \text{ m}$$

El volumen evaporado es de :

$$\begin{aligned} V'E &= 1\,000\,000 \times 0.4 \times 0.06 \\ &= 24\,000 \text{ m}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

La concentración promedio en STD de los aportes es de 650 mg/l.

$$\begin{aligned} \text{Se tiene entonces : } t &= V'e \times C = 24\ 000 \times 0,65 \times 10^{-3} \\ &= 15 \text{ toneladas STD/año.} \end{aligned}$$

Esto dá una idea de la renovabilidad total de la salmuera y de las sales capilares : es casi nula.

RENOVABILIDAD DE LOS SULFATOS DE SODIO

La superficie útil del yacimiento es de 200 000 m². El volumen de agua evaporada cad año a través de esta superficie es de :

$$V'E = 200\ 000 \times 0,4 \times 0,06 = 4\ 800 \text{ m}^3.$$

La concentración en Na₂SO₄ de la salmuera es de 26 x 10⁻³ ton/m³. Entonces cada año se forma alrededor de :

$$4\ 800 \times 26 \times 10^{-3} = 125 \text{ toneladas Na}_2\text{SO}_4$$

Es un valor muy pequeño. Si se divide las reservas estimadas en 13 000 toneladas Na₂SO₄ por este resultado se obtiene :

$$13000/125 \approx 100 \text{ años}$$

Eso quiere decir que la mirabilita se ha depositado en más o menos un siglo en Cañapa. Es un tiempo muy breve. Por supuesto hay muchos errores en estas estimaciones, pero los órdenes de magnitud han sido respetados. Una explicación podría ser que Cañapa se presenta como un salar preferentemente seco desde hace un siglo, y que antes fué un lago permanente que recién se ha secado; momento en que la precipitación de la mirabilita habría podido empezar.

Cañapa se presentaba, talvés, como Hedionda, hoy día. La mirabilita no se forma debajo de la laguna de Hedionda, pero sí en los bordes, superficialmente secos, y en Hedionda la mirabilita solamente forma cristales aislados y lentes pequeños. Es posible que Cañapa estaba alimentada sobre todo por el río Tapaquillcha, que se infiltra ahora en los coluvios que bordean a Cañapa por el Este. Se nota cla-

ramente, en el terreno, que este río era mucho más importante en épocas anteriores, y puede ser que su caudal este en disminución constante por agotamiento progresivo de las napas subterráneas fósiles que los alimentan río arriba.

Una conclusión importante es que es muy posible que existan otros niveles de sulfato de sodio en niveles más profundos correspondientes a antiguos períodos secos de Cañapa.

Una última observación concierne al boro. Se nota que su concentración en la napa subterránea es muy importante, pero que la ulexita es rara : forma solamente nódulos centimétricos aislados, poco frecuentes.

Si la ulexita no precipita intensamente, esto se debe a que el calcio no está en concentraciones suficientes. Las altas concentraciones en sulfatos reducen la concentración en calcio. Entonces solamente podrían precipitar boratos de sodio, pero no se han detectado hasta ahora.

CONCLUSION SOBRE CAÑAPA

Como era de esperar, antes de cualquier cálculo, por la superficie muy reducida de este salar, era poco probable que pueda tener un interés económico industrial. Podría ser de alguna utilidad para una explotación doméstica del sulfato de sodio, pero sin olvidar que no tiene ninguna renovabilidad a la escala humana.

HEDIONDA NORTE

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud Lípez
 Coordenadas : Long. : 68°03'
 Lat. : 21°34S

ACCESO : Ver a Cañapa.

ESTUDIOS ANTERIORES : RISACHER, 1976, 1978a.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

En el NO y el SE de la cuenca se encuentran los volcanes riodacíticos de Cañapa y Tapaquillcha, ricos en azufre. El Norte está cerrado por niveles sedimentarios (mioceno) de arcillas yesíferas y por lavas ignimbríticas. En los niveles sedimentarios se encuentran concentraciones de cobre. Al Sur, Hedionda está separada de Chiar Khota por un relieve de lavas ácidas.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Es un lago (tipo I, ver II-D). Sus orillas están constituidas por estrechas playas superficialmente secas. Hay aguas subterráneas y sales capilares (mirabilita, ulexita) en estas orillas, pero las cantidades son tan pequeñas que solamente se considerará la laguna. Su superficie es de 3.5 km².

APORTES DE AGUA

Se dan los análisis de los tres principales aportes : al NO (nº 1), al NE (nº 2) y al SE (nº 3) (ver cuadro). Las aguas que entran por el NO y el NE son dulces. (1) es un manantial de aguas corrientes y (2) un manantial difuso, mientras que (3) es un manantial difuso de agua ya bien concentrada. En cuanto a su origen la hipótesis más probable es que se trate de una napa antigua que estaba alimentada por las infiltraciones de un lago anterior más alto. Las aguas presentes ahora corresponderían a las aguas de la última fase lacustre notable en Hedionda.

El cálculo de R da $R > 1$ (ver II-F-7) lo que quiere decir que estas aguas evolucionaran hacia facies neutras, lo que efectivamente se observa : el agua de la laguna es del tipo Na-Cl-SO₄ (ver Fig. 9) muy parecida a la facies química de Cañapa. Esto es normal tomando en cuenta las altas concentraciones en azufre de la cuenca de drenaje (II-F-5).

RESERVAS DE LA LAGUNA

Su composición química varía algo, cerca de las orillas, pero es relativamente uniforme en toda la laguna. Se dá el análisis de la salmuera (nº 4 en el cuadro). La profundidad media de la laguna es de 20 cm. Su volumen es de 700 000 m³. Los elementos y sales interesantes son Li, K y Na₂SO₄.

	Concentración ton m ³	Reservas Toneladas
Na ₂ SO ₄	27 x 10 ⁻³	19 000
Li	0.12 x 10 ⁻³	84
K	2.1 x 10 ⁻³	1 470
STD	69.4 x 10 ⁻³	48 600

Las reservas en Li y K son insignificantes. Las correspondientes a Na₂SO₄ podrían ser consideradas para una explotación doméstica. La ley en sulfato de sodio anhidro que se obtendría por evaporación total en una pileta sería, como máximo de 40%. Se podría mejorar esta ley haciendo evaporación controlada.

RENOVABILIDAD DE LAS SALES DE LA LAGUNA

$$\begin{aligned} \text{Se tiene : } H_e &= 1.4 \text{ m, } H_p = 0.2 \text{ m} \\ S &= 3\,500\,000 \text{ m}^2, C_L = 70 \text{ g/l} \end{aligned}$$

El problema reside en el manantial difuso muy concentrado que alimenta la laguna por la orilla SE. No se sabe como ponderar los diversos aportes. Por esto se hará un cálculo doble : utilizando los dos casos límites, considerando por una parte solamente aportes dulces (Cor = 0.4 g/l) y por otra parte solamente aportes salados (Cor = 7.3 g/l). Se obtiene entonces (ver IV-B-3,4) :

	Densidad	pH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	1.001	7.00	1.00	105	77	1.40	73	90	10	0.42	18	8.6
2	1.001	6.68	0.93	79	79	1.45	61	70	9	0.48	18	8.8
3	1.006	7.28	3.65	3 750	455	20.5	123	2 100	200	15	300	114
4	1.050	8.50	10.0	24 600	18 500	235	59	22 000	2 100	122	520	650

ALC en meq(H⁺)/l
 otros en mg/l

(M. PINTA - ORSTOM) inedito

Análisis de las aguas de laguna HEDIONDA

$Cor = 0.4 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$	$Cor = 7.3 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$
$0 \leq t \leq 1\ 680$	$0 \leq t \leq 30\ 000$
$1\ 680 \leq \text{tor} \leq 1\ 690$	$30\ 000 \leq \text{tor} \leq 34\ 000$
$28.8 \leq T/\text{tor} \leq 29$	$1.4 \leq T/\text{tor} \leq 1.6$

Entonces se ve, a partir de los valores de T/tor que con cualquier hipótesis, las infiltraciones son altas. El valor real de T/tor está comprendido entre : $1.4 < T/\text{tor} < 29$ años.

Entonces la renovabilidad está considerablemente limitada por las infiltraciones. Se puede considerar que la laguna no es renovable.

CHIAR KKOTA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud LÍpez
 Coordenadas : Long. : $68^{\circ}04'$
 Lat. : $21^{\circ}35'S$
 Altura : 4 110 m

ACCESO : Ver a Cañapa. Se encuentra al borde del camino a Laguna Verde.

ESTUDIOS ANTERIORES : Ninguno conocido.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Chiar Kkota es un caso particular dentro de la serie de salares que van desde Cañapa hasta Ramaditas. Su cuenca está protegida de los altos volcanes ricos en azufre por pequeños valles intermedios. Su cuenca es muy pequeña y no contiene nada de azufre. Son flujos de lavas ácidas.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Es un salar intermedio entre el tipo IV y el tipo I : un fuerte espesor de sedimentos conteniendo una napa subterránea independiente de la laguna superficial pero esta laguna cubre el 80% de la superficie del salar, constituyendo un verdadero lago. Su quimismo es del tipo neutro $\text{Na}^{\text{-}}(\text{Ca})\text{-Cl-SO}_4$ (ver Fig. 9).

APORTES DE AGUA (ver el cuadro)

Las aguas (1) y (2) corresponden a manantiales difusos al Sur y al Este respectivamente. El análisis (3) corresponde a un manantial de aguas corrientes al Norte del Salar. Se puede ver que las concentraciones de las aguas (1) y (2) son ya altas, lo que permite suponer que se originan en la descarga de una napa subterránea, relicto de la última fase lacustre importante (ver en Hedionda Norte un fenómeno similar). Las relaciones R y R' dan $R > 1$ y $R' > 1$ (II-F-7), lo que corresponde bien a la facies química neutra del salar, pero no a la cuenca de drenaje que no contiene azufre. Talvés habría que buscar el origen de esta anomalía en el hecho que el salar es un testigo de un lago mucho más antiguo que abarcaba todos los salares desde Hedionda hasta Ramaditas.

LOS SEDIMENTOS

Están sobre todo constituidos de yeso bien bandeado singenético. Parece depositarse cuando la laguna disminuye de volumen después de cada época de lluvia. En este yeso, singenético precipitan diagenéticamente nódulos centimétricos de ulexita. Hay trazas de sulfatos de sodio diagenéticos en la superficie del salar muy cerca de las orillas. Por sus cantidades muy reducidas ninguno de estos minerales presenta un interés económico. El yeso sedimentario está afectado por una intensa actividad bacteriana que lo reduce a S^{O} (azufre). Pero tampoco esto último presenta un interés económico.

LA LAGUNA (Análisis nº 4 - ver el cuadro)

Se nota las concentraciones relativamente altas en Li y B. La superficie de la laguna es de 2 km^2 . Su profundidad media es de 20 cm. Entonces su volumen es de $400\,000 \text{ m}^3$. El único elemento que tal vez presentaría algún interés es el litio. Las reservas en Li de la laguna son de 70 toneladas lo que parece muy poco. Veamos su renovabilidad (cálculo en base al Li : ver IV-B-3,4) :

$$\begin{aligned} \text{He} &= 1.4 \text{ m}; & \text{Hp} &= 0.2 \text{ m}; & \text{Cor} &= 4.5 \times 10^{-5} \text{ ton/m}^3 \\ \text{S} &= 2 \times 10^5 \text{ m}^2 & & & \text{C}_L &= 74 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3 \end{aligned}$$

Se obtiene :

$$\begin{aligned} 0 &\leq t \leq 10 \text{ ton/año} \\ 10 &\leq \text{tor} \leq 11 \text{ ton/año} \end{aligned}$$

Estas cantidades son muy pequeñas. Aprovechamos de estos resultados para tener una idea de las infiltraciones.

- Coeficiente de concentración (base : Li) $C_L/\text{Cor} = 39$
- Cálculo de $6.4 < T/\text{tor} < 7.0$

Esto implica que las infiltraciones son muy importantes y alimentan la napa subterránea.

LA NAPA SUBTERRANEA

No se tiene análisis de esta napa hasta el momento. Pero parece ser que hay pocas posibilidades de interés económico en ella. El salar es demasiado pequeño para que el lito, el boro, o el potasio puedan tener un interés económico.

CONCLUSION

Chiar Kkota no parece presentar ningún interés en relación con los elementos y sales que nos interesan, ni siquiera para una ex-

	Densidad	pH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	1.002	7.50	1.83	970	107	6.15	90	500	60	4.1	113	30
2	1.003	6.72	3.58	1 890	750	15.5	83	1 250	130	9.3	140	75
3	1.000	7.31	0.812	53	75	0.95	64	50	6.4	0.49	17	7.4
4	1 050	8.28	8.05	38 500	4 080	250	82	25 000	2 500	176	1 340	1 140

ALC en meq(H⁺)/l
 otros en mg/l

(M. PINTA - ORSTOM) indedito

Análisis de las aguas de la laguna CHIAR KKOTA

plotación deméstica. Pero no hay que descartar definitivamente su estudio, porque es posible que puedan existir otros elementos interesantes, todavía no detectado.

LAGUNA HONDA NORTE

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud Lípez
 Coordenadas : Long. : 68°04'
 Lat. : 21°37'S
 Altura : 4 110 m

ACCESO : Ver a Cañapa. Se encuentra al borde del camino a Laguna Verde.

ESTUDIOS ANTERIORES : Ninguno conocido.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Al Oeste hay un flujo de lavas ácidas que parece muy reciente, las mismas que constituyen la parte Sur y Oeste de la cuenca de Chiar Kkota. Estas lavas no tienen azufre. Alrededor de la laguna, al Norte, al Este y al Sur, hay muchos niveles lacustres antiguos apoyándose sobre las lavas ácidas del cerro Tapaquillcha. Es difícil decidir si esta parte de la cuenca es sedimentaria o volcánica. En época de lluvia la influencia de los niveles sedimentarios deben predominar; porque las aguas se escurren sobre todo superficialmente, pero en época seca los manantiales deben estar influenciados a la vez por las rocas volcánicas y por los niveles sedimentarios.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Es un salar muy pequeño : 0.5 km². Entonces, de cualquier modo, no puede tener interés económico. Lo describiremos brevemente. Es un salar típicamente intermedio entre los tipos I y IV (ver II-D) : un lago extenso, superficial, encima de un gran espesor de sedimentos impermeables conteniendo una napa subterránea particularmente profunda.

Un pozo, en el límite de la laguna ha llegado a 4.5 m sin haber tocado todavía a la napa. El quimismo de este salar es del tipo neutro Na-Cl-SO₄ (ver Fig. 9).

SEDIMENTOS

Son muy monótonos; están constituidos por un material arcilloso-limoso (arcillas, diatomeas, yeso, amorfos). Cerca de las orillas se observan dentro de los 50 cm superficiales algunos cristales de mirabilita aislados. No tienen ninguna importancia económica. Las sales superficiales capilares de los bordes están constituidas sobre todo por una mezcla de halita, de tenardita (Na₂SO₄) y algo de calcita, todo sin interés económico. No se ha encontrado ulexita.

APORTES DE AGUA

Un manantial de agua corriente entra por el Oeste de la laguna (análisis 1) y un manantial difuso por el lado Este (análisis 2). En los dos casos la relación : $R > 1$ (ver II-F-7), lo que puede ser normal para el manantial difuso por la influencia de los sedimentos lacustres, por un lado, y del azufre del volcán Tapaquillcha por otro, pero esto plantea un problema para el manantial 1, que sale de lavas ácidas sin azufre. Puede ser que la composición química de esta lava reciente sea más rica en calcio, pero también puede ser que esta lava haya recubierto antiguos salares que ahora modifican la composición de las aguas que salen por debajo de estas lavas. El problema queda planteado. De todas maneras el quimismo de la laguna corresponde bien al de los manantiales.

LA LAGUNA (Análisis nº 3 - ver el cuadro)

La superficie de la laguna es de alrededor de 0.4 km², su profundidad media 20 cm. Su volumen es de 80 000 m³. Los únicos elementos interesantes son el sulfato de sodio y el litio pero las cantidades son muy pequeñas.

Na₂SO₄ : 300 toneladas (ley de la sal cristalizada por evaporación : 14%)

	pH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	7.60	1.32	127	37.5	1.1	65	80	10	0.33	30	7.4
2	7.63	2.17	255	75	1.8	91.5	150	21.4	0.85	52	15.4
3	9.05	4.40	13 500	2 500	57	67.5	9 000	1 000	47	200	140

ALC en meq(H⁺)/l

Otros en mg/l

(M. PINTA - ORSTOM) inedito

Composicion quimica de las aguas de la lagune Honda Norte.

Li : 4 toneladas.

CONCLUSION

Honda no tiene ningún interés económico en relación a los elementos y sales que nos interesan. Su tamaño es demasiado reducido.

RAMADITAS

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud Lípez
 Coordenadas : Long. : 68°05'
 Lat. : 21°38'S
 Altura : 4 120 m

ACCESO : Ver a Cañapa. Está al borde del camino a Laguna Verde.

ESTUDIOS ANTERIORES : Ninguno conocido.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Al Norte hay el flujo de lavas ácidas recientes sin azufre. Al Oeste y al Este, altos volcanes riodacíticos aparentemente sin azufre. Al Oeste extensos niveles lacustres permiten considerar esta orilla como sedimentaria (FERNANDEZ, 1980). Se puede, empero hacer las mismas observaciones que para laguna Honda Norte sobre la importancia relativa de las rocas volcánicas y de los niveles sedimentarios en relación a la composición de las aguas dulces.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

Es un tipo intermedio entre los casos I y IV (ver II-D). Un fuerte espesor de sedimentos conteniendo una napa relativamente independiente de la extensa laguna superficial. Sin embargo esta laguna alimenta de manera notable la napa. La superficie del salar es de 4 km² y de la laguna : 2 km² (variable según la época del año). Su

quimismo es neutro : $\text{Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ (ver Fig. 9).

APORTES DE AGUA

Se dan los análisis de tres aportes de agua. (1) es un manantial de agua corriente al Sur que alimenta la laguna, (2) y (3) son manantiales difusos al NO y al Este respectivamente. El cálculo de R (ver II-F-7) dá $R > 1$, lo que indica que estas aguas evolucionarán hacia una facies neutra, lo que se observa efectivamente. Pero esto no esta en correspondencia con la litología de la cuenca de drenaje, por lo menos en los que concierne las aguas (1) y (3) que salen de rocas volcánicas ácidas aparentemente sin azufre. El agua (2) sale después de haber pasado a través de importantes niveles sedimentarios lacustres, lo que puede explicar su composición química.

Se realizaron análisis químicos totales sobre muestras extraídas del maciso volcánico Ascotan Ramaditas, que se ubica al SO de la Laguna Ramaditas y dentro de su cuenca de drenaje. Las determinaciones sobre estas muestras dieron valores muy subidos en Ca y Mg, en relación a otras muestras de la zona, con lo que queda demostrado el porqué del alto contenido de Ca. De esta manera se explica el $R > 1$.

SEDIMENTOS

Se podría decir esquemáticamente que se trata de un "salar de yeso". Es el mineral dominante, Forma cristales milimétricos en la superficie que pasan progresivamente a un nivel limoso conteniendo una napa superficial. Este yeso no es lo suficientemente puro para poder considerarse su explotación para estuco. Sin embargo, para otros usos podría, talvéz, convenir.

Al Norte del salar se observan relieves de 1 a 3 metros de alto. Parece que son testigos de un antiguo nivel lacustre, erosionado por el viento (deflación). Pero hay algunas divergencias en cuanto a su origen. Los sedimentos muy blancos y pulverulentos de estas lomas están constituídos sobre todo de calcita, arcillas y yeso fino; una morfología similar se encuentra al borde de la Laguna Colorada.

	Densidad	pH	ALC	Cl	SO ₄	B	SiO ₂	Na	K	Li	Ca	Mg
1	1.001	8.00	0.79	198	176	1.6	72	140	14.8	0.23	70	5.0
2	1.002	8.55	1.62	475	233	2.9	48	400	55	0.64	30	3.0
3	1.002	8.28	2.54	260	620	1.8	60	150	22.2	0.34	298	28
4	1.020	8.15	2.93	15 000	3 070	77	109	9000	1 030	11.7	1 375	325

ALC en meq(H⁺)/l
 otros en mg/l

(M. PINTA - ORSTOM) inedito

Análisis químicos de las aguas de la laguna RAMADITAS

No se ha encontrado nada de sulfatos de sodio, ni tampoco de ulexita en este salar.

LA LAGUNA SUPERFICIAL

El análisis 4 (ver cuadro) corresponde a esta laguna. Su composición parece bastante uniforme. Se notan concentraciones muy bajas en Li y B en esta laguna. La profundidad media de la laguna es de 30 cm. Su superficie es de 2 km^2 lo que le dá un volumen de $600\,000 \text{ m}^3$. Las reservas totales en litio no pasan de las 7 toneladas, lo que no representa ningún interés. Lo mismo que ocurre en lo referente a B y K. En cuanto al sulfato de sodio las concentraciones en SO_4 no son suficientemente altas.

NAPA SUBTERRANEA

No se ha analizado la napa subterránea de Ramaditas. Pero como casi siempre el quimismo de las napas es parecido al de las lagunas superficiales (aunque con concentraciones distintas) es poco probable que presenten un interés económico en relación con los elementos y sales que nos preocupan.

CONCLUSION SOBRE RAMADITAS

A pesar de ser, con Hedionda Norte, el salar más extenso de la serie Cañapa-Ramaditas, no presenta ningún interés económico. Pero no es nada imposible que pueda ser interesante para un elemento todavía no detectado.

EL LAGO POOPO

Este lago ha sido estudiado con sumo detalle por CARMOUZE, ARZE y QUINTANILLA, 1978. No parece tener interés económico desde el punto de vista de las sales. Empero, se señalará que toda su orilla Sur-Oeste, entre Huari y Sevaruyo, contiene efloroscencias de carbonatos de sodio. Se había realizado un estudio (MURILLO y BUSTILLOS, 1968), pero hubo talvz algo de exageración en los resultados (confu-

sión entre los carbonatos de sodio y los de calcio en los análisis). Sin embargo es perfectamente exacto que toda la facies química de la zona Sur-Oeste del lago Poopó es carbonatada sódica. Las napas (a 2 m de profundidad) se evaporan por capilaridad y dejan eflorescencias de natrón en la superficie. El problema es que estas aguas son muy diluidas (1 g/l) y no se puede considerar fácilmente una evaporación en pilletas. Sin embargo se recomienda hacer un estudio hidrogeológico de este sector : piezometría, espesor de la napa, pruebas de bombeo, análisis del agua en función de la profundidad. Este quimismo del SO del lago Poopó se debe a la influencia de las capas ignimbríticas de los Frailes, rocas volcánicas ácidas. También el quimismo del río Marquez está afectado por estas ignimbritas.

EL SALAR DE COIPASA

Es el segundo salar más grande de Bolivia : 2 000 km², a 3 653 m de altura. Proviene de la sequía del sublago Tauca-Coipasa (ver la historia de este lago en el capítulo sobre Uyuni).

Se tiene muy pocos datos sobre este salar. Su accesibilidad es mala, y no es tan fácilmente transitable como el salar de Uyuni.

Su cuenca de drenaje corresponde a la parte Nor-Oeste de la cuenca de los lagos grandes (ver a Uyuni). Es volcánica al Norte y al Sur, y sedimentaria al Este y Nor-Este.

Actualmente está alimentada casi exclusivamente por el río Lauca que desemboca en un lago al Norte del salar. No se tiene ningún dato relativo al quimismo de estas aguas.

La costra de sal depositada cuando se secó el lago Tauca es similar a la del salar de Uyuni, pero no se conoce su espesor. Por analogía con Uyuni, suponiendo una misma pendiente para el fondo de las cuencas, se obtendría una profundidad máxima entre 4 y 5 metros. Se podría también suponer la porosidad y la composición de las salmueras similares y hacer los mismos cálculos que los que se han hecho para Uyuni. No nos meteremos en estas especulaciones, pero el lector inte-

ESTUDIOS ANTERIORES : RISACHER, 1976.
ERICKSEN, VINE and BALLON, 1978.

LITOLOGIA DE LA CUENCA DE DRENAJE

Es una cuenca volcánica : estrato volcanes al Oeste, al Sur (andesita-dacita) y al Norte (dacitas-latiandesitas), ignimbritas al extremo Oeste y al Sur-Este.

Toda la zona Sur es muy rica en azufre. Varias minas siguen siendo explotadas.

DESCRIPCION GENERAL DEL SALAR

A pesar de su ubicación justo al Oeste del salar de Uyuni, no es un apéndice de este. Por su altura de 3 717 m se encuentra a 64 m por encima del salar de Uyuni. Es posible que se formó como rebalse del lago Minchin (los mapas son lo suficientemente precisos para determinar la altura del paso entre las cuencas de Uyuni y Empexa). Pero no habría posibilidad de rebalse en la época del lago Tauca.

Es un salar del tipo III (ver Fig. 7) : un fuerte espesor de sedimentos salinos con una napa subterránea sub-aflorente. No hay un lago central en época seca, pero si en época de lluvia : es la napa que sube por encima de los sedimentos.

LOS APORTES DE AGUA

No se tiene todavía ningún análisis completo de las aguas del salar de Empexa, que sean de los aportes o de las salmueras. Solamente se puede prever que estas aguas de alimentación, sobre todo las que vienen del Sur, ricas en azufre, no pueden evolucionar hacia facies carbonatadas sódicas ($R > 1$ - ver II-F-7). Muchas veces los manantiales son salados (1-10 g/l), tal vez porque las napas que se descargan ahora han sido alimentadas por un antiguo lago salado.

Hay que señalar la presencia de una fuente termal al Sur-Este

con $\text{pH} = 1.7$, es decir sumamente ácida. Es totalmente imposible encontrar carbonatos de sodio en estos ambientes.

LOS SEDIMENTOS (ver Fig. 29 y 30)

Es un salar muy rico en yeso. Varias secuencias arcillas/calcita/yeso/halita se suceden, correspondiente a varias fases lacustres. Tres fases recientes se distinguen claramente en las orillas. El último lago dejó un nivel de yeso de 20-50 cm, granuloso, impuro, que recubre en el Sur del Salar una costra carbonatada rota (pingos) muy parecida a las de Pastos Grandes y de Capina. Esta misma capa de yeso está recubierta en el centro del salar por una delgada costra de halita (4 cm máximo de espesor). Pozos cavados en la zona central han revelado la existencia de otros niveles de cloruro de sodio en profundidad, testigos de la sequía de antiguos lagos. En los niveles finos arcillosos y limosos de la base de las secuencias se ven capas laminadas blancas, onduladas e irregulares: están constituidas por una mezcla de yeso y de sulfato de sodio diagenéticos.

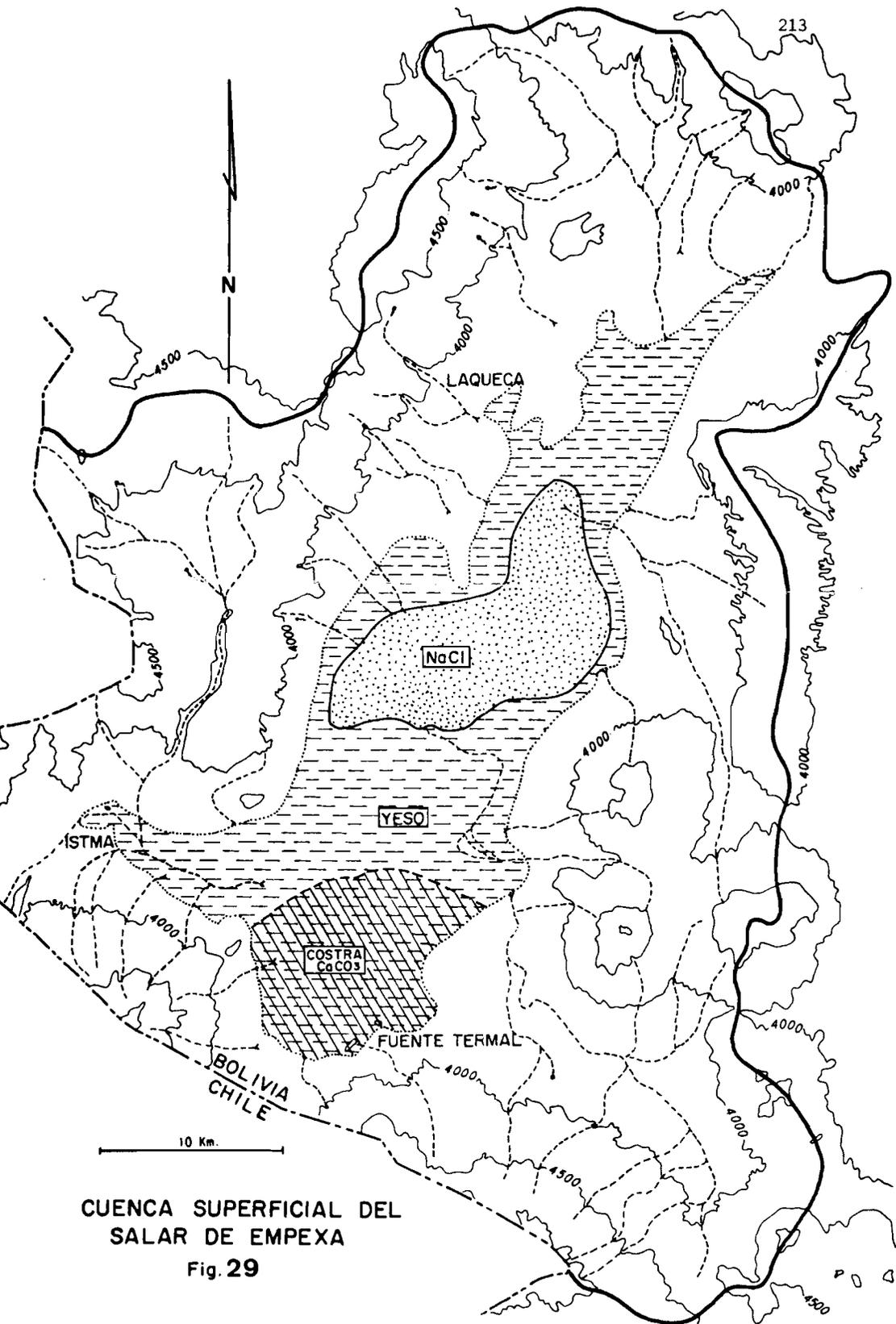
Se ha señalado varias veces la presencia de borato en este salar. Un estudio ulterior (CADIMA y LAFUENTE, 1967) no ha comprobado esta ocurrencia, y nosotros confirmamos la ausencia de boratos en Empexa. Se han cavado unos setenta pozos de reconocimiento en todo el salar, incluyendo las zonas de Laqueca e Istma. Nunca se ha observado ni los más pequeños indicios de borato.

DETERMINACIONES DE Li, K Y B EN LOS SEDIMENTOS

Varios análisis por espectrografía de arco (semi-cuantitativo) han sido hechos en los sedimentos de Empexa (M. PINTA - ORSTOM) (ver el cuadro).

LA NAPA SUBTERRANEA

Es una napa sub-aflorante (5-20 cm de profundidad). No se han hecho análisis de esta salmuera, pero es evidente, en vista de las sales depositadas que su quimismo es del tipo: $\text{Na}-(\text{Ca})-\text{Cl}-(\text{SO}_4)$, lo



CUENCA SUPERFICIAL DEL
SALAR DE EMPEXA

Fig. 29

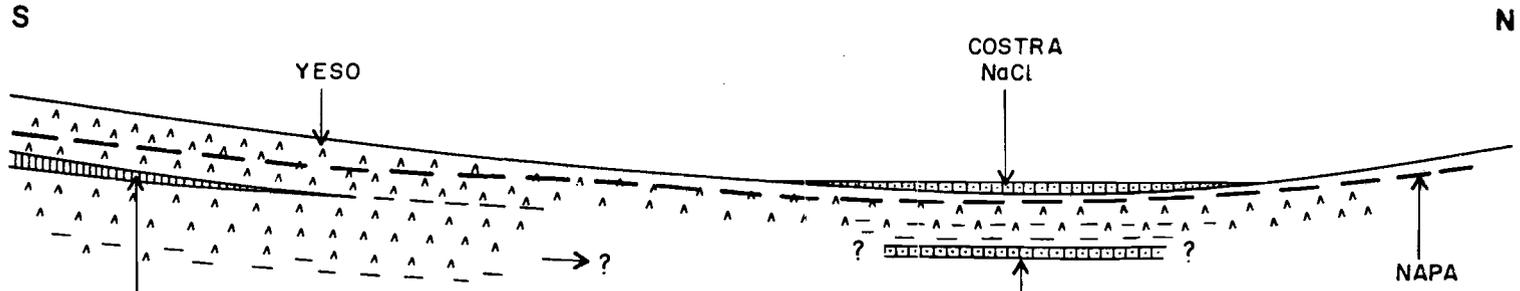
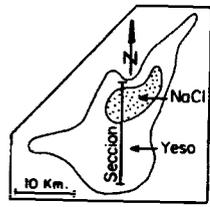
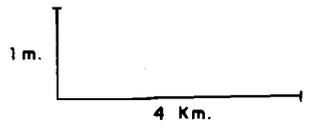


Fig. 30

SALAR DE EMPEXA
CORTE SIMPLIFICADO A TRAVES DE LOS SEDIMENTOS



Número	Naturaleza del sedimento	Li	K	B	Ubicación
133	Dolomita - yeso	40	820	120	Laqueca
440	Calcita	-	-	80	Costra Sur (centro)
446	Yeso	40	630	100	Encima de la Costra Sur (centro)
451	Calcita	75	750	60	Costra Sur (centro)
458	Arcilla	160	2 100	200	Orilla Sur-Oeste
463	Yeso	180	690	80	Orilla Sur-Oeste
482	Calcita	185	1 300	300	Orilla Sur-Este
505	Yeso-halita	60	1 400	60	Orilla Sur-Oeste
521	Yeso	15	150	30	Istma
538	Yeso-halita	75	720	50	Istma
553	Halita	20	720	10	Costra central
556	Arcilla	80	1 430	300	Debajo de la costra central
557	Yeso	85	1 530	200	Debajo de la costra central
559	Halita	10	380	60	Costra debajo de la costra central
612	Arcilla	160	4 000	300	Laqueca

Concentración en boro, litio y potasio de algunas sales y sedimentos de Empexa. En ppm.

que corresponde bien a la litología de la cuenca de drenaje, rica en azufre.

Los únicos datos relativos a las salmueras provienen de los análisis del Geological Survey. Han encontrado hasta 370 pp, Li y 10 000 ppm K en las salmueras de la orilla Oeste, lo que permite suponer reservas importantes en este salar.

CONCLUSION SOBRE EMPEXA

Queda por hacer toda la hidroquímica. Los estudios anteriores se enfocaron sobre todo sobre los sedimentos. Parece que hay buenas posibilidades de reservas interesantes en Li y K.

EL SALAR DE LA LAGUNA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Nor-Lípez
 Coordenadas : Long. : 68°28'
 Lat. : 20°50'S
 Altura : 3 950 m

Ningún estudio se ha hecho de este salar, y no ha sido explorado por los autores.

Lo único que se sabe con seguridad es que se trata de un salar rico en sulfato de sodio, a veces explotado por los campesinos de San Pedro Quemez. Una muestra del mineral analizado por F. RISACHER ha dado más de 90% de pureza.

Lastimosamente no se puede estimar las reservas por falta de datos indispensables.

EL SALAR DE LAGUANI

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Nor-Lípez
 Coordenadas : Long. : 68°17'
 Lat. : 20°57'S
 Altura : 3 750 m

ACCESO : A partir de Chiguana.

ESTUDIOS ANTERIORES : CADIMA y LAFUENTE, 1967.

DATOS CONOCIDOS SOBRE EL SALAR

Los autores no han reconocido este salar. Se sabe muy poca cosa. Es una boratera (ulexita) similar a las demás descritas (Río Grande - Capina - Pastos Grandes) : lentes muy discontinuos de ulexita diagenética en un sedimento por encima de la napa de salmuera. El ingeniero A. ECHENIQUE (COSSMIL) nos ha comunicado, verbalmente, varios datos respecto a este salar. CADIMA y LAFUENTE, 1967, también hicieron una evaluación de una concesión minera, y no de todo el yacimiento (pero parece que fué en la zona más rica).

La parte estudiada por CADIMA y LAFUENTE abarca 2 km². Estimaron la potencia media de la capa a 20 cm (se hace aquí las mismas observaciones en lo que concierne a la ley en boro que las hechas a propósito de Challviri). Utilizando estos datos brutos se obtiene una reserva en ulexita de 480 000 toneladas, lo que corresponde a 64 000 toneladas de boro.

Según los datos comunicados por A. ECHENIQUE el yacimiento tendría una superficie total de unos 5 km² (orden de magnitud) y una potencia media de 5 cm, lo que daría como reservas de ulexita 300 000 toneladas, es decir 40 000 toneladas de boro.

Las dos estimaciones, aunque basadas sobre datos diferentes, dan el mismo orden de magnitud para el yacimiento de borato de Lagua-

ni : alrededor de 50 000 toneladas B.

EL SALAR DE CHIGUANA

No se estudió este salar, es muy extenso e inhomogéneo. En el sentido del término no es realmente un salar, posee muy pocas sales. Son sobre todo eflorescencias salinas ("salitrales").

Solamente se señalará la existencia de una pequeña boratera a 15 km al Sur-Oeste de Chiguana, cerca de la vía férrea, llamada "la Carrillana". Los únicos datos encontrados están en el informe de CADIMA y LAFUENTE (1967).

La capa de borato es muy delgada y el yacimiento no parece presentar mucho interés económico. De todas maneras sería conveniente buscar en otras zonas del salar de Chiguana, esta boratera representa más un indicio favorable que un yacimiento.

No se sabe con absoluta seguridad si se trata de ulexita. No se ha hecho determinación con rayos X.

LAGUNA COLORADA

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud-Lípez
 Coordenadas : Long. : $67^{\circ}47'$
 Lat. : $22^{\circ}11'S$
 Altura : 4 278 m

ACCESO Y ALOJAMIENTO : Se encuentra al borde del camino de Chiguana a Laguna Verde. También hay un camino Quetena - Laguna Colorada. Alojamiento en el campamento del Ministerio de Minas al borde Nor-Oeste de la laguna.

ESTUDIOS ANTERIORES : Ningún estudio geoquímico o geológico ha

sido hecho, pero es una laguna conocida y estudiada desde hace mucho tiempo por su interés biológico.

DATOS CONOCIDOS SOBRE LA LAGUNA

Se señalarán solamente los puntos siguientes :

- en la orilla Oeste hay relieves muy blancos. Se trata de antiguos niveles lacustres erodados por el viento y constituidos sobre todo de diatomeas, arcillas y sulfato de sodio.

- La laguna tiene alrededor de 100 g/l de sales disueltas, y un pH de 8.5. Su facies química es neutra : Na-(Ca)-Cl-(SO₄). Varios manantiales salen por todo el borde de la laguna y depositan eflorescencias salinas en las orillas, sobre todo de carbonato de sodio (especialmente alrededor del río Sulor al Nor-Este). Entonces el quimismo de la laguna no corresponde al de las aguas de alimentación.

- Hay aparentemente cierta cantidad de sulfato de sodio (mirabilita) en varios lugares de las orillas. Se ha visto una capa extensa superficial de unos 15 cm de espesor al Oeste de la laguna. Es posible que haya más sulfato de sodio, en esta laguna que en Cañapa. Pero todo el estudio de reservas queda por hacer.

- Se ha escuchado decir, algunas veces, que había boratos en esta laguna. En cinco días de estudio no se ha visto ni el más pequeño indicio de boratos.

EL SALAR DE CHALLVIRI

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud-Lípez
 Coordenadas : Long. : 67°35'
 Lat. : 22°32'S
 Altura : 4 400 m

ACCESO : A partir del camino de Chiguana a Laguna Verde (zona Oeste del salar) o a partir del camino de Quetena a Laguna Verde (Zona Este del salar).

ESTUDIOS ANTERIORES : CADIMA y LAFUENTE, 1967.

CUENCA DE DRENAJE

No se conoce muy bien : es muy extensa. Es una cuenca volcánica ácida (riodacitas) con varias concentraciones de azufre al Sur y al Sud-Oeste (zonas de Río Blanco y Mina Suzana).

DESCRIPCION DEL SALAR

Los autores no han reconocido seriamente este salar. Solamente se puede utilizar los datos de CADIMA y LAFUENTE, 1967. El salar tiene una forma muy irregular, lo que complica su estudio. No se tiene ningún análisis químico completo de sus aguas. Lo único que se sabe con seguridad es que se trata de una boratera importante (ulexita). Ha sido explotado por chilenos, pero no se sabe cuando. Queda un campamento abandonado. Parece que es un salar del tipo IV : un fuerte espesor de sedimentos conteniendo una napa independiente de las lagunas superficiales. Se señala la presencia en la orilla Oeste de la fuente termal de Polques que alimenta la laguna mayor.

EL YACIMIENTO DE BORATO

Parece que la prospección hecha por CADIMA y LAFUENTE abarcaba solamente una concesión minera bien delimitada y no todo el yacimiento. Esta concesión medía un poco menos de 10 km².

El modo de yacer de la ulexita es muy similar a los demás depósitos bolivianos, nódulos y lentes netamente diagenéticos, dentro de sedimentos arcillosos-arenosos más antiguos, justo por encima de una napa de salmuera a 1-1.5 m de profundidad. Asociada a la ulexita ha sido detectada por rayos X (W. AVILA, GEOBOL), también indicios de borax (borato de sodio) y de colemanita (borato de calcio).

Varios análisis de concentración en boro de la ulexita fueron llevados a cabo. Pero hay un problema en lo que concierne a la interpretación de estos resultados. La ulexita, perfectamente pura, tiene una ley máxima en boro de 13.34%. Hasta ahora todas las muestras que nosotros mismos hemos encontrado tenían por lo menos 40% de agua intersticial (Río Grande - Capina - Pastos Grandes).

Yá que el modo de yacer de la ulexita de Challviri es muy similar a las demás, es muy improbable que el mineral presente características muy distintas. Es decir que la ley máxima en B para el mineral bruto en las borateras bolivianas difícilmente puede sobrepasar los 8%, debido al agua intersticial. Sin embargo, muchos valores de la ley en boro de las muestras dan más de 8%, hasta 10% lo que puede provenir de una deshidratación parcial de la muestra entre su muestreo y su análisis.

Entonces se calculará un valor corregido de las reservas en boro, considerando 40% de agua intersticial.

- Volumen de la capa : $10 \times 10^5 \text{ m}^2 \times 0.2 = 2 \text{ 000 000 m}^3$.
- Volumen de ulexita : $2 \text{ 000 000} \times 0.6 = 1 \text{ 200 000 m}^3$.
- Toneladas de ulexita (densidad = 2) : 2 400 000 toneladas.
- Toneladas de boro (13.34%) : 320 000 toneladas.

Estos valores no corresponden a todo el salar, y entonces constituyen un límite inferior para las reservas de Challviri.

LAGUNA VERDE

UBICACION : Departamento : Potosí
 Provincia : Sud-Lípez
 Coordenadas : Long. : $67^{\circ}48'$
 Lat. : $22^{\circ}48'S$
 Altura : 4 350 m

Es una verdadera laguna salada. Casi no hay sales cristalizadas en los bordes. No se sabe casi nada acerca de esta laguna. Pe-

ro no parece tener gran interés económico. Su cuenca de drenaje, volcánica ácida, es muy rica en azufre (varias minas). Su facies química es neutra : Na-(Ca)-Cl(SO₄), lo que es normal considerando la riqueza en azufre de la cuenca. Su concentración ha sido estimada entre 20 y 40 g/l.

El único punto interesante encontrado hasta ahora concierne a las muy abundantes costras de carbonato de calcio alrededor de la laguna. Se presentan a veces como lozas muy regulares que podrían tener alguna utilidad doméstica. También se nota la presencia de algas carbonatadas.

CONCLUSION

Se ha visto con algún detalle los salares del Altiplano Boliviano. Del estudio de estos se desprenden algunas ideas, que consideramos importante transmitir las.

Por una parte es notoria la existencia de numerosos salares pequeños. por otra parte resalta la presencia de un salar gigante en relación a los otros.

Los cálculos de reservas de las sales y elementos de interés económico, nos demuestran que en las cuencas pequeñas las reservas son mínimas hasta insignificantes, contrastando en forma clara con las inmensas reservas del salar de Uyuni, que permiten forjar verdaderas esperanzas de implementación de una gran industria química.

Las sales diversas encontradas en los salares pequeños, pueden servir para una explotación a nivel muy reducido, es decir para la explotación dirigida por los pobladores inmediatos a las cuencas, o por cooperativas campesinas. Por otro lado las extraordinarias reservas de Li y las notables acumulaciones de K y B nos permiten pensar que el salar de Uyuni, perfectamente puede constituirse como el único polo de desarrollo del Altiplano Sur, además considerando su ubicación geográfica interesante a todas luces. Uyuni es un lugar clave, donde se cruzan los ferrocarriles internacionales, que salen de la capital boli-

viana y que se unen con los países limítrofes de Chile y Argentina.

También se ha visto que las cantidades de Na_2CO_3 existentes en los salares del Sur LÍpez, no representan de ninguna manera reservas a nivel industrial, por el contrario volviendo la vista a Uyuni identificamos reservas inmensas de NaCl , que juntamente con las reservas importantes de calizas Minchin, completamos las necesidades de materia prima necesarias para producir Na_2CO_3 , por el método SOLVAY.

Otro aspecto que nos parece importante considerarlo, es el referente a la posibilidad de encontrar salmueras mucho más ricas en Li y B, en niveles más profundos por debajo del salar de Uyuni, por lo que la realización de perforaciones profundas nos pueden deparar generosas sorpresas.

ANEXOS

ANEXO I

ALGUNOS DATOS SOBRE ELEMENTOS Y SALES DE
INTERES ECONOMICO

I. El Potasio : K

Se encuentra en los salares como iones K^+ en solución.

Las sales principales que pueden precipitar son :

- La silvita : KCl
- La carnalita : $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$
- La polihalita : $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Una mezcla muy íntima de silvita y de halita ($NaCl$) se llama a veces silvinita.

En los salares bolivianos se ha detectado solamente la silvita : KCl asociada con la halita en las costras de sales superficiales.

Las reservas mundiales identificadas son : de 114×10^9 toneladas K (SINGLETON, 1978), correspondiente sobre todo a antiguas evaporitas marinas.

Los principales productores son : la Unión Soviética, Canadá, Alemania del Este, Estados Unidos, Alemania del Oeste y Francia. El potasio sirve sobre todo para los abonos.

II. El Litio : Li

Es el metal más ligero que existe. Se encuentra generalmente en pegmatitas (en los silicatos) y en las salmueras. En Bolivia se encuentra en solución como iones Li^+ . Sus sales casi nunca cristalizan a partir de las salmueras de manera permanente en la naturaleza, por ser estos extremadamente solubles. Uno de los únicos minerales estables de litio que se puede formar en la superficie de la tierra (a presión y temperatura normal) en la hectorita, arcilla litífera. Na 0.33 (Mg,

$\text{Li}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$. Aunque no ha sido detectado este mineral hasta ahora, es muy posible que este presente en los salares bolivianos. Es probable que Li provenga de la alteración de las rocas volcánicas ácidas, especialmente de las ignimbritas.

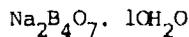
Las reservas mundiales han sido estimadas (excluyendo el salar de Uyuni) a 4.1 millones de toneladas (USGS, 1976) es decir probablemente menos de lo que hay en el salar de Uyuni.

Entre otros usos sirve para fabricar baterías eléctricas, y servirá en el futuro en las plantas termoneucleares. Estados Unidos es el principal productor (en el mundo occidental).

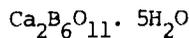
III. El Boro

Se encuentra en solución como aniones boratos que precipitan generalmente como sales de sodio y de calcio :

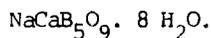
- borato de sodio : el borax (= tincal)



- borato de calcio : la colemanita (= borocalcita)



- borato de sodio y de calcio : la ulexita (boronatrocalcita)



Existen varios productos de deshidratación de estos minerales. En Bolivia el borato común es la ulexita y su producto de deshidratación : la probertita : $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. En el salar de Challviri han sido detectadas trazas de borax y colemanita (W. AVILA, in CADIMA y LA-FUENTE, 1967).

La ulexita se precipita en los salares bolivianos como un mineral blanco como nieve, un poco sedoso. Tiene una estructura fibrosa y contiene hasta 40% de agua intersticial, lo que complica los cálculos de reservas. Nunca se ha encontrado perfectamente puro en Bolivia. Su

consistencia es blanda. Puesto al aire se deshidrata rápidamente en probertita. Es un mineral diagenético que precipita por evaporación de una salmuera subterránea rica en boro.

Las condiciones de estabilidad de los boratos cristalizados ha sido estudiado por CHRIST, TRUESDELL and ERD, 1967, y el quimismo de los boratos en solución por INGRI (1963).

Las reservas mundiales en boro han sido estimadas en 90 millones de toneladas B (orden de magnitud) (ABSALOM, 1979). Estado Unidos y Turquía son los principales productores. El boro tiene numerosos usos. Solamente se recordará su empleo en los vidrios (borosilicatos) y en la metalurgia (fundentes).

IV) Los carbonatos de sodio

Se trata de toda una familia de minerales evaporíticos, cuyos tres principales son :

- el natron : $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- la termonatrita : $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- la trona : $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.

En Bolivia solamente se ha encontrado hasta ahora el natron y su producto de deshidratación : la termonatrita. No se ha detectado la trona, lo que es normal tomando en cuenta las condiciones de estabilidad de estos minerales. Hace demasiado frío para que cristalice la trona. Numerosos estudios de estos minerales han sido realizados (EUGSTER, 1970; EUGSTER and MAGLIONE, 1979; MAGLIONE, 1976).

Africa es un gran productor de estos minerales, puesto que allá hay numerosos y extensos lagos carbonatados sódicos. Estados Unidos también tiene importantes recursos en carbonatos de sodio. Hay 67×10^9 toneladas de trona en la Green River Formation (CULBERSTON, 1966), es decir la misma cantidad que las reservas de halita de Uyuni. También hay enormes reservas en Searles Lake (SMITH, 1979).

En Europa la falta de estos minerales ha impulsado una técnica de fabricación a partir de carbonato de calcio (CaCO_3) y del cloruro de sodio (NaCl). Es el procedimiento SOLVAY.

El carbonato de sodio es un producto de base de toda la industria química.

V. Los sulfatos de sodio

Se trata de :

- la mirabilita : $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- la tenardita : Na_2SO_4

La mirabilita cristaliza primero en cristales transparentes como el hielo. Se encuentra fácilmente en las arcillas (Cañapa, Hedionda Norte) cristales centimétricos con todas sus facetas perfectamente desarrolladas. Se deshidrata muy rápidamente (algunas horas) en un polvo blanco : la tenardita.

Canadá parece ser un importante productor gracias a sus lagos salados de Saskatchewan (HAMMER, 1978). Allá la producción fué de 446 000 toneladas en 1975. Hay que comparar este valor con los órdenes de magnitud de las reservas bolivianas para ver que estas últimas son muy reducidas.

El sulfato de sodio sirve en las industrias del papel, de los detergentes, y de los vidrios.

ANEXO IIINVENTARIO DE LOS SALARES EN FUNCION DE
SU INTERES ECONOMICOI) Litio

- Uyuni
- Coipasa
- todas las borateras

II) Potasio

- Uyuni
- Coipasa

III) Boro. Principalmente borateras

- Río Grande (Uyuni)
- Challviri
- Capina
- Pastos Grandes
- Laguari

IV) Carbonatos de sodio

- Collpa Laguna
- Hedionda Sur
- Cachi Laguna
- Khara Laguna
- Honda Sur

V) Sulfatos de sodio

- Cañapa
- Salar de la Laguna
- Laguna Colorada
- Hedionda Norte
- Chulluncani

REFERENCIAS

- ABSALOM , S.T.-1979. Boron. Mineral Commodity Profiles. Bureau of Mines. US Depart. of the Interior, 17 p.
- AHLFELD, F.-1956. Sodaseen in LÍpez (Bolivia). Neues Jb. Mineral., Mh. 617, p. 128-136.
- AHLFELD, F. y BRANISA L.-1960. Geología de Bolivia. Instituto Boliviano Petrolero. 245 p.
- AHLFELD F.-1972. Geología de Bolivia. Ed. Los Amigos del Libro.
- AL-DROUBI, A.-1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Sciences Géologiques (Strasbourg), *Mém.*, 46, 177 p.
- BRAITSCH, O.-1971. Salt Deposits. Their origin and composition. Springer-Verlag. 297 p.
- CADIMA, J. y LAFUENTE F.-1969. Prospección general de algunas borateras particulares. Informe GEOBOL GB-M-647 (Bolivia).
- CARMOUZE, J.P.-1976. La régulation hydrochimique du lac Tchad. Travaux et Documents ORSTOM, nº 58, 418 p.
- CARMOUZE, J.P., ARZE, C., MIRANDA, Y. y QUINTANILLA, J.- 1978. Circulación de materia (agua-sales disueltas) a través del sistema fluviolacustre del Altiplano : la regulación hídrica o hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó. Cah. ORSTOM, sér. géol., vol. X, nº 1, p. 49-68.
- CARMOUZE, J.P. and PEDRO, G.-1977. The contribution to the salt regulation of a lacustrine system by geographical and sedimentological factors. Proc. 2nd. Int. Symp. Water-Rock Interactions, Strasbourg, 1977, section 2, p. 73-84.

- CARRASCO, R.-1978. Vulcanismo en la región Sud-occidental de Bolivia. Servicio Geológico de Bolivia, Bol. Ser. A. Vol. II, nº 1, pp. 25-29.
- CHRIST, C.L., TRUESDELL, A.M. and ERD, R.C.-1967. Borate Mineral assemblages in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$. Geochim. Cosmochim Acta, 31, p. 313-337.
- CULBERSTON, W.C.- 1966. Trona in the Wilkins Peak Member of the Green River Formation, South western Wyoming. US Geol. Survey Prof. Paper 550-B, p. 159-164.
- DEBENEDETTI, A.-1976. Messinian salt deposits in the Mediterranean : Evaporites or Precipitates ? Bull,Soc.Geol.It., 95, p. 941-950.
- ECHENIQUE, A.-1976. Informe Mineralógico de las lagunas de los Lípez. Informe COSSMIL-QUIMBABOL inédito (Bolivia).
- ECHENIQUE, A., BALLIVIAN, O. y RISACHER, F.-1978. Informe geológico-económico de la laguna Collpa y de la laguna Hedionda. Informe QUIMBABOL-UMSA-ORSTOM, inédito (Bolivia).
- ERICKSEN, G.E. and VINE, J.D.-1976. Preliminary report on the lithium-rich brines at Salar de Uyuni and nearby salars in South western Bolivia. US Geol.Survey. Informe inédito.
- ERICKSEN, G.E., VINE, J.D. and BALLON, R.-1978. Chemical composition and distribution of lithium-rich brines in salar de Uyuni and nearby salars in Southwestern Bolivia. Energy, Vol. 3, p. 355-363.
- EUGSTER, H.P.-1970. Chemistry and origin of the brines of lake Magadi, Kenya. Mineral Soc.Amer.Spec.Pap. 3, p. 215-235.
- EUGSTER, H.P. and HARDIE, L.A.-1978. Saline Lakes. In : Lakes, Chemistry Geology, Physics. (a. Lerman, ed.). Springer Verlag, p. 237-293.

- EUGSTER, H.P. and MAGLIONE, G.-1979. Brines and evaporites of the lake Chad basin. Africa. *Geochim.Cosmochim.Acta*, 43, p. 973-981.
- EVERDERN, S., KRIS, S and CHERRONI, C.-1966. Correlaciones de las Formaciones terciarias de la cuenca altiplánica en base a edades absolutas determinadas por el método K/Ar. Hoja informativa nº 1. *GEOBOL*.
- FERNANDEZ, A., HORMANN, P.K., KUSSMAUL, S., MEAVE, J., PICHLER, H. and SUBIETA, T.-1973. Firts Petrologic Data on Young Volcanic Rocks of SW-Bolivia. *Tschermaks Min,Petr.Mitt.* 19, 149-172.
- FERNANDEZ, G.-1980. Evolución de los Lagos Cuaternarios del Sud-Lípez (región de Mina Corina). Tesis de Grado. *UMSA-La Paz, Bolivia*.
- FETH, J.H. and BROWN, R.J.-1962. Method for measuring upward leakage from artesian aquifers using rate of salt-crust accumulation. *US Geol. Survey Prof. Paper* 450-B, p. 100-101.
- FLORES, O.-1970. Estudio de los yacimientos de calizas del antiguo Lago Minchin. Informe interno *GEOBOL (Bolivia)*. Inédito.
- FONTES, J-Ch. y SERVANT, M.-1976. Dataciones radiométricas sobre el Cuaternario del Altiplano de Bolivia. *Convención Nacional de Geología, Potosí-Bolivia*. Inédito.
- FRITZ, B.-1975. Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Sciences Géologiques (Strasbourg), Mém.* 41, 152 p.
- GARRELS, R.M. and MACKENZIE, F.T.-1967. Origin of the chemical composition of some springs and lakes. In : *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*. *Am.Chem.Soc.*, p 222-242.

- GONZALES, O.-1969. Evolución del volcanismo y tectónica de los Andes Centrales de Sud-América durante el Cenozoico Superior. Informe preliminar inédito.
- GRAY, D.M.-1973. Handbook on the Principles of Hydrology. Water Information Center Inc. Port Washington.
- HAMMER, U.R.-1978. The saline lakes of Saskatchewan I. Background and rationale for saline lakes research. Int. Revue ges. Hydrobiolo. V. 63, 2, p. 173-177.
- HARDIE, L.A. and EUGSTER, H.P.-1970.- The evolution of closed-basin brines. Mineral.Soc.Amer.Spec.Pap., 3, p. 273-290.
- HELLWIG, D.H.R.-1973. Evaporation of water from sand. 4 : The influence of the depth of the water-table and the particle size distribution of the sand. J. Hydrol., 18, p. 317-327.
- HELLWIG, D.H.R.-1974. Evaporation of water from sand 5 : The effect of evaporation on the concentration of salts dissolved in water stored in sand. J. Hydrol., 21, p. 101-110.
- INGRI, N.-1963. Equilibrium studies of polyanions containing B (III), Si (IV) and V (V).
- JORDAN, L. y RIVAS, E.-1973. Mineralogía y Petrografía de Laguna Coloradas, Sud-Lípez, Potosí. Bol.Soc., Geol. Boliviana, nº 19, p. 125-132.
- KUSSMAUL, S., JORDAN, L. and PLOSKONKA, E.-1975. Isotopic Ages of Tertiary Volcanic Rocks of SW-Bolivia. Geol.Jb., B. 14, S. 111-120.
- LANGBEIN, W.B.-1961. Salinity and Hydrology of closed lakes. US Geol. Survey Prof. Paper 412, 20 p.
- LI, Y.H.-1977. Confusión ont he mathematical notation for defining

- the residence time. *Geochim.Cosmochim. Acta*, 41. p. 555-556.
- MACKENZIE, F.T. and GARRELS, R.M.-1966. Chemical mass balance between rivers and oceans. *Am.Jour.Sci.*, Vol. 264, p. 507-525.
- MAGLIONE, G.-1976. Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Les dépressions interdunaires du Tchad. *Travaux et Documents ORSTOM*, nº 50, 335p.
- McKINSTRY, H.E.-1948. *Mining Geology*. Printice Hall, New York.
- MEAVE, J.- 1972. Estratigrafía del Terciario en la región de los Lípez, Bolivia. *Bol.Soc.Geol. Boliviana*, nº 18, p. 76-83.
- MORAGA, A., CHONG, G., FORTT, M.A. y HENRIQUEZ, H.-1974. Estudio geológico del salar de Atacama, provincia de Antofagosta. *Instit. de Investig. Geológicas, Chile*. Bol. 29, 56 p.
- MURILLO, J. y BUSTILLOS, O.-1968. Valuación de yacimientos no metálicos de sales de sodio, potasio, sulfatos y carbonatos de sodio. Provincias Poopó-Abaroa. Departamento de Oruro. Informe GEOBOL (Bolivia) GB-M-591 (inédito).
- PARJEA, J., VARGAS, C., SUAREZ, R., BALLON, R., CARRASCO, R. y VILLARROEL, C.-1978. Mapa Geológico de Bolivia. Yacimientos Petrolíferos fiscales Bolivianos y Servicio Geológico de Bolivia.
- PEÑARANDA, J.-1976. Estudio Socio-económico del Sud-Oeste Boliviano. Min. de Minas y Metalurgia (inédito).
- RETTIG, S.L., JONES, B.F. and RISACHER, F.-1980. Geochemical evolution of brines in the salar of Uyuni, Bolivia. *Chem.Geology* (in press).
- RISACHER, F.-1976. Informe preliminar sobre los estudios realizados en algunos salares del Altiplano Meridional Boliviano. Convenio UMSA-ORSTOM-La Paz, Bolivia (inédito).

- RISACHER, F.-1978a. Le cadre géochimique des bassins à évaporites des Andes boliviennes. Cah. ORSTOM, sér. Géologie, vol. X, nº 1, p. 37-48.
- RISACHER, F.-1978b. Genèse d'une croûte de gypse dans un bassin de l'Altiplano bolivien. Cah. ORSTOM, sér. Géologie, vol. X, nº 1, p. 91-100.
- RISACHER, F.-1979. El cuadro geoquímico de las cuencas evaporíticas del Altiplano Boliviano. Anales de la VI Convención Nacional de Geología. Vol. VI, tomo 2, p. 427-447.
- RISACHER, F. and EUGSTER, H.P.-1979. Holocene pisoliths and encrustations associated with spring-fed surface pools, Pastos Grandes, Bolivia. Sedimentology, 26, p. 253-270.
- RISACHER, F. y MIRANDA, J.-1976. Indicios de interés económico en los salares del Sud-Lípez. Informe UMSA-ORSTOM, La Paz, Bolivia (inérito).
- RISACHER, F., MIRANDA, J. y CARLO, L.-1976. Litio y Potasio en las bo-rateras de Río Grande. Informe UMSA-ORSTOM, La Paz, Bolivia (inérito).
- ROCHE, M.-1963. Hydrologie de surface. Gauthier-Villars. Editeurs, Paris.
- RUSSEL, U.C.-1885. Playa lakes and playas. U.S. Geol. Survey Mon. 11, p. 81-86.
- SCHOELLER, H.-1962. Les Eaux Souterraines. Masson, Paris, 642 p.
- SERVANT, M. et FONTES, J-Ch.-1978. Les lacs quaternaires des hauts pla-teaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléo-climatiques. Cah. ORSTOM, sér. Géologie. Vol. X, nº 1, p. 9-23.

- SERVANT-VILDARY, S.-1978. Les diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. Cah. ORSTOM, sér. Géologie, vol. X, n° 1, p. 25-35.
- SINGLETON, R.H.-1978. Potash. Mineral Commodity Profiles. Bureau of Mines. Us. dept. of the Interior, 27 p.
- SMITH, G.I.-1979. Subsurface stratigraphy and geochemistry of late Quaternary evaporites, Searles Lake, California. Us. Geol. Survey Prof. Paper 1043, 130 p.
- SORUCO, C.-1974. Visita a los depósitos de sosa y trona de Kollpa Laguna. Informe interno COSSMIL, La Paz, Bolivia (inédito).
- STUMM, W. and MORGAN, J.J.-1970. Aquatic Chemistry. Wiley-Interscience, 583 p.
- TURK, L.J.-1970. Evaporation of brine : A field study on the Bonneville salt flats, Utah. Water Res. Research, Vol. 6, 4, p. 1209-1215.
- USGS.-1976. Lithium. Nature's lightest Metal. US Geological Survey INF-75-27.
- WHITE, W.N.-1932. A method of estimating ground water supplies based on discharge by plants and evaporation from soil. Results of investigation in Escalante Valley, Utah. W.S. P., n° 659, 105 p. (datos in Schoeller, 1962).
- WOOD, J.R.-1975. Thermodynamics of brine-salt equilibria. I. the systems $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{NaCl-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ at 25°C . Geochim. Cosmochim. Acta, 39, p. 1147-1163.

INDICE

	<u>Página</u>
<u>PRESENTACION</u>	7
<u>PRIMERA PARTE</u>	
Los salares en general. Presentación y Métodos de Estudio	11
<u>CAPITULO I : CUADRO GENERAL DEL AREA DE INVESTIGACION</u>	13
A) INTRODUCCION	15
B) CLIMA	15
C) RECURSOS NATURALES	19
D) GEOMORFOLOGIA Y GEOLOGIA EN GENERAL	20
1. Geología general del Altiplano	20
2. Geología de la zona de los Lípez	23
E) ESTRATIGRAFIA	24
F) RELACION DE LAS ROCAS DE LAS CUENCAS CON CONCENTRACION DE SALES Y ELEMENTOS DE INTERES COMO Li, B, K.	30
G) CUENCAS ANTIGUAS	32
<u>CAPITULO II : ELEMENTOS BASICOS SOBRE LOS SALARES</u>	35
A) INTRODUCCION	37
B) FACTORES QUE CONTROLAN LA FORMACION DE UN SALAR	37
1. Las cuencas cerradas	37
2. Infiltraciones reducidas	38
3. Evaporación superior a las lluvias	38
C) MECANISMOS FUNDAMENTALES DE LA PRECIPITACION DE LAS SALES	40
1. Evaporación directa de una capa de agua libre	40
2. Evaporación de una napa subterránea	41
D) TIPOS MORFOLOGICOS DE SALARES	43
E) ORIGEN DE LAS AGUAS Y DE LOS ELEMENTOS DISUELTOS EN LAS AGUAS	47
1. Las lluvias	47
2. Las aguas termales	47

	<u>Página</u>
3. Elementos disueltos en el agua de lluvias	48
4. La alteración de las rocas	49
5. Caso de los manantiales salados	50
F) EVOLUCION DE LAS AGUAS POR EVAPORACION	51
1. Consideraciones preliminares	51
2. Precipitación de la calcita	52
3. Precipitación de los silicatos-Mg	54
4. Precipitación del yeso	54
5. Control por la litología de la cuenca de drenaje	54
6. Interacción con los sedimentos	56
7. Métodos de cálculo	57
<u>CAPITULO III : METODOS DE ESTUDIO</u>	63
A) INTRODUCCION	65
B) MATERIAL NECESARIO	65
C) LA FASE DE RECONOCIMIENTO	66
1. Quimismo general del salar	66
2. Lago salado	66
3. Salar seco en superficie y zonas secas alrededor de los lagos	67
4. Costras de sales singenéticas	68
D) EVALUACIONES CUANTITATIVAS	69
1. Generalidades	69
2. Los yacimientos singenéticos	70
3. Los yacimientos diagenéticos	71
4. Los yacimientos de salmueras	72
E) EL MUESTREO	75
F) MEDIDAS PARTICULARES	75
1. Determinación del caudal de un río	75
2. Determinación de las infiltraciones superficiales	76
3. Determinación de la evaporación capilar	76
4. Otras medidas	77
G) RECOMENDACIONES PARA LOS TRABAJOS DE LABORATORIO Y GABINETE	77

Página

<u>CAPITULO IV : RENOVABILIDAD DE LOS YACIMIENTOS SALINOS</u>	79
A) DEFINICION DE LA RENOVABILIDAD	81
B) LAGO Y LAGUNA SALADA	81
1. Introducción. Símbolos utilizados	81
2. Hipótesis básicas	83
3. Cálculo de la renovabilidad	84
4. Observaciones complementarias	89
C) NAPA SUBTERRANEA Y LOS DEPOSITOS CAPILARES ASOCIADOS	92
1. Presentación general del problema	92
2. Estudio del caso elemental	94
3. Generalización a casos más complejos	98
4. Cálculo práctico	99
D) YACIMIENTO DE SALES SINGENETICAS	101
E) CONCLUSION SOBRE LA RENOVABILIDAD DE LOS SALARES BOLIVIANOS	101

SEGUNDA PARTE

Los salares en particular, su estudio económico	103
INTRODUCCION	105
EL SALAR DE UYUNI	109
COLLPA LAGUNA	135
HEDIONDA SUR	141
CACHI LAGUNA	145
LAGUNA KHARA	150
LAGUNA HONDA SUR	156
PASTOS GRANDES	159
CAPINA	175
LAGUNA CHULLUNCANI	184
CAÑAPA	186

	<u>Página</u>
HEDIONDA NORTE	194
CHIAR KKOTA	198
LAGUNA HONDA NORTE	202
RAMADITAS	205
EL LAGO POOPO	208
SALAR DE COIPASA	209
SALAR DE EMPEXA	210
EL SALAR DE LA LAGUNA	216
EL SALAR DE LAGUANI	217
EL SALAR DE CHIGUANA	218
LAGUNA COLORADA	218
EL SALAR DE CHALIVIRI	219
LAGUNA VERDE	221
CONCLUSION	222
	<u>ANEXOS</u>
	225
ANEXO I : ALGUNOS DATOS SOBRE ELEMENTOS Y SALES DE INTERES ECONOMICO	227
ANEXO II : INVENTARIO DE LOS SALARES EN FUNCION DE SU INTERES ECONOMICO	231
REFERENCIAS	233
INDICE	241