

HIDROGEOLOGIA Y DISTRIBUCION ZONAL DE LAS COSTRAS SALINAS EN EL SALAR DE BELLAVISTA - PINTADOS, NORTE GRANDE DE CHILE

Tomás Vila G. *

RESUMEN

La existencia de acuíferos libres someros, fuertemente salinos y el elevado coeficiente de evaporación en el extremo sur-occidental de la Pampa del Tamarugal ($20^{\circ}40'$ Lat. S - $69^{\circ}40'$ Long. W), ha permitido el desarrollo, principalmente por capilaridad en sedimentos arcillo-limosos, de las costras salinas que constituyen el salar de Bellavista Pintados.

La estrecha dependencia entre la profundidad, composición química y salinidad de los acuíferos y el desarrollo lateral y vertical de las costras salinas, determina que estas últimas muestren microrelieves característicos, como asimismo una zonación salina y mineralógica según franjas orientadas en sentido aproximado N - S. Las sales carbonatadas predominan en el sector oriental, las sulfatadas en el sector central y las cloruradas en el sector occidental. En este último, las sales potásicas tienen un desarrollo importante.

Se discute el origen de las sales disueltas en los acuíferos asignándolas principalmente a la lixiviación de rocas riolíticas distribuidas al oriente del salar.

INTRODUCCION

Con el objeto de actualizar el conocimiento acerca de la calidad y reservas de las sales potásicas en las costras salinas del Salar Bellavista-Pintados (Raimondi, 1878; Domeyko, I., 1897; Brüggén, J., 1918; von Arend, K., 1938; Ericksen, G., 1963; Gannat, E., y Schlund, J.E., 1970), durante 1974 se efectuó un estudio geológico del salar que incluyó la toma sistemática de muestras de sales y sedimentos en su sector [] y de aguas y salmueras en sondajes. El presente trabajo describe los aspectos geológicos, hidrogeológicos, mineralógicos y microestructurales del salar, proponiendo un mecanismo genético y el origen de las sales que lo constituyen.

FISIOGRAFIA

El salar Bellavista-Pintados se ubica en el Norte Grande de Chile, aproximadamente entre los $20^{\circ}20'$ y $20^{\circ}50'$ Lat. S. y los $69^{\circ}30'$ y $69^{\circ}50'$ Long. W., cubriendo un área de aproximadamente 850 km^2 (fig. 1). La depresión del salar se emplaza en el extremo SE de la Pampa del Tamarugal, cuenca tectónica de gran magnitud rellena por sedimentos lacustres y aluvionales modernos.

Hacia el W, el salar está limitado por la Cordillera de la Costa, unidad morfoestructural que se eleva abruptamente 1.000 m sobre su superficie; hacia el N y E sus límites desaparecen gradualmente en la Pampa del Tamarugal mientras que su extremo S lo constituye el cor-

* Instituto de Investigaciones Geológicas, Casilla 10465, Santiago CHILE.

dón de cerros que separan la depresión del salar Bellavista-Pintados con la de los salares de Lagunas, Sur Viejo y Lllamará. El salar mismo muestra un suave desnivel (0.002°/o) entre sus extremos norte (La Tirana) y sur (ex-oficina Salitrera Bellavista).

El clima imperante en esta región corresponde al denominado "Clima desértico normal" (Fuenzalida, 1965) caracterizado por una ausencia casi absoluta de precipitaciones (0 -10 mm anuales), nubosidad baja escasa (los días de sol en el año fluctúan entre 250 y 290 días), abundantes nieblas nocturnas (camanchacas), muy baja humedad relativa (40°/o en promedio anual con valores extremos de 4°/o) y una fuerte variación térmica diaria, que oscila, en promedio anual, entre 28° C durante el día y 6° C durante la noche. La temperatura media anual es de 17° C. Todas estas condiciones climáticas generan un alto índice de evaporación, que varía entre 1 a 3 lt/m²/día, es decir, aproximadamente 1 m³/m²/año. La vegetación, factor importante en la descarga de las aguas subterráneas por evapotranspiración, está representada exclusivamente por bosques relativamente densos (250 has.) de tamarugos (*Prosopis tamarugo*).

GEOLOGIA REGIONAL

En el área circundante al salar Bellavista-Pintados afloran rocas estratificadas volcánico-sedimentarias e intrusivas, que varían en edad entre el Triásico Superior (?) - Jurásico Inferior al Reciente (Cecioni, G., y García, F., 1960; García, F., 1967; Sayes, J., 1972; Vila, T., 1975).

Las rocas estratificadas se diferencian, en orden decreciente en edad, según las siguientes unidades (fig. 2):

Formación Pintados: Volcánico-sedimentaria continental, constituida por 2.000 m de lavas andesíticas grises, brechas y areniscas rojas intercalaciones delgadas de lutitas y limolitas gris verdes, asignadas al Triásico Superior (?) - Jurásico Inferior.

Formación La Negra: Volcánica continental, constituida principalmente por lavas andesíticas porfíricas verde oscuras con intercalaciones de brechas verdes y areniscas rojas asignadas al Jurásico Inferior a Medio.

Formación Caleta Ligate: Sedimentario - volcánica marina, constituida por una alternancia de 300 m de areniscas, lutitas y calizas fosilíferas con intercalaciones de lavas andesíticas submarinas, asignadas al Bajociano Medio a Superior.

Formación Las Lajas: Sedimentario-marina, constituida por 200 m de areniscas, lutitas, margas y calizas fosilíferas marrón rojizas, asignadas al Bajociano Superior a Caloviano Medio.

Relleno Aluvial Reciente: Sedimentos continentales lacustres, en parte aluvionales, constituidos por 300 m de arcillas y limos rojos, areniscas finas a medias con intercalaciones de niveles conglomerádicos, cenizas y diatomitas. Sondajes realizados en esta unidad revelan que en su parte basal se encuentran estratos calcáreos con intercalaciones yesíferas, correlacionables con la formación Calizas de El Loa (Wetzel, W., 1927) asignada al lapso Plio-Pleistoceno.

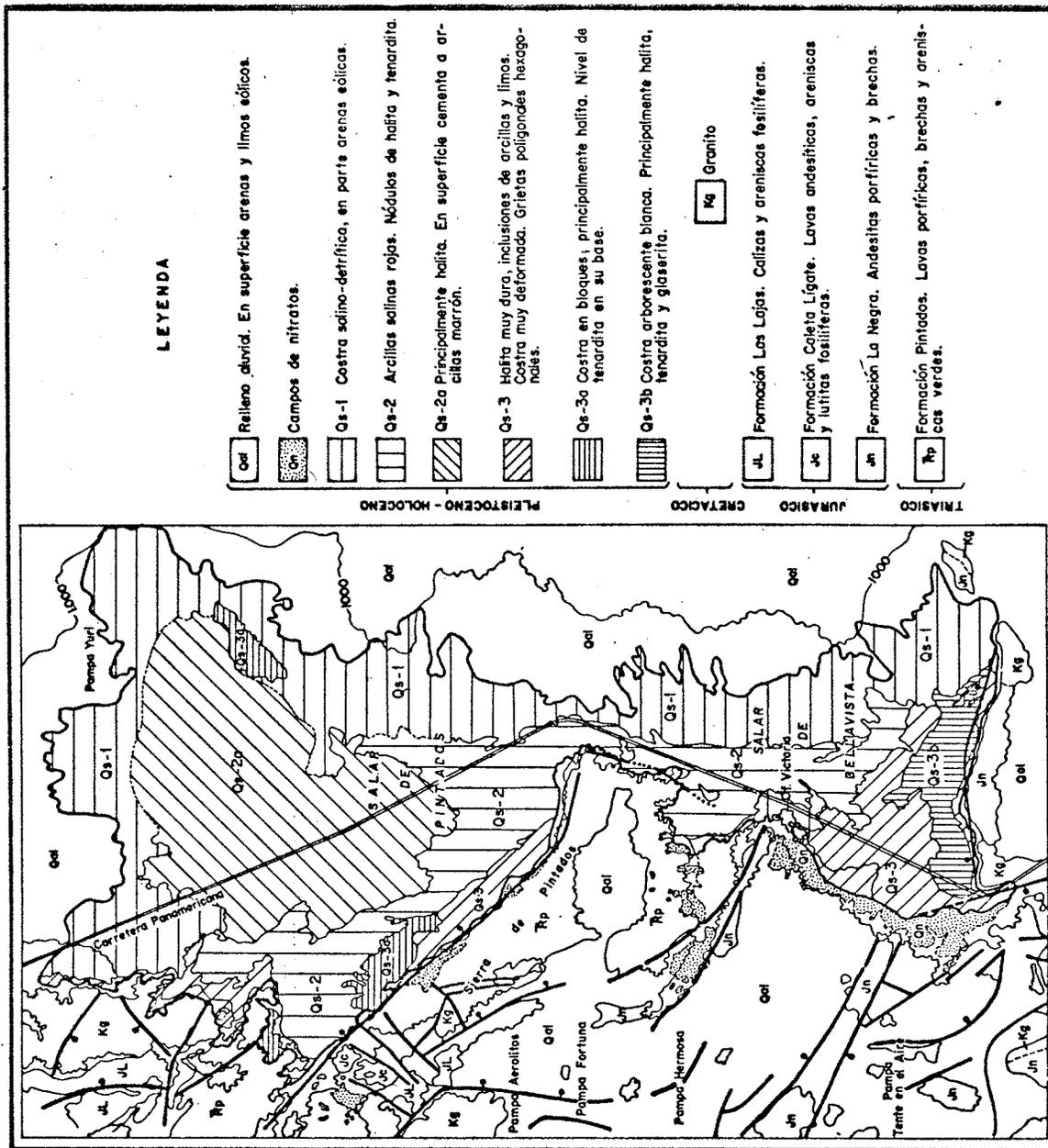


Figura 2. Marco Geológico (modificado de Sayes, J., 1972) y zonación de costras salinas. Salar Bellavista-Pintados.

Bajo estas rocas, aparecen tobas riolíticas con intercalaciones sedimentarias, correlacionables con la formación Altos de Pica, asignada al Terciario Superior, y cuyas rocas afloran 20 km al E del Salar conformando un extenso plateau (Galli, C., y Dingman, R., 1962). Intruyendo a toda la serie volcánico-sedimentaria jurásica recién descrita, se observa un granito claro, adamelítico, con diferenciaciones a granodiorita y diorita. Por relaciones estructurales, se asigna tentativamente al Cretácico Inferior.

Estructura General y Control Tectónico de la Cuenca del Salar.

En general, las secuencias jurásicas se presentan como monoclinales de rumbo N-S a N45° W e inclinaciones de 10° a 25° al W, con excepción de las secuencias triásicas que las subyacen discordantemente, presentando inclinaciones de 40°E.

Toda la secuencia estratigráfica se observa intensamente fracturada según dos sistemas de fallas: uno de orientación N-S, de probable edad jurásica, y otro de orientación E - W, de probable edad terciaria inferior. (Tobar, A., *et al.*, 1966; Silva, L., 1972). La reactivación durante el Terciario Superior de ambos sistemas de fallas determinaron una tectónica de bloques, generando en consecuencia depresiones tectónicas en las cuales se emplazan los numerosos depósitos evaporíticos y salitrales existentes en el área.

La cuenca del salar se observa controlada por dos fallas principales: una de orientación N-S, cuya mayor expresión morfológica se manifiesta en su extremo NW y otra de orientación E - W, que condiciona el solevantamiento del área que limita al salar por el S.

HIDROGEOLOGIA GENERAL

La cuenca de drenaje del salar de Bellavista-Pintados está constituida por las hoyas de las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca, Tambillos, Chacarilla, Chipana y por el plano inclinado de los Altos de Pica, áreas que en total representan aproximadamente 8.400 km². El ciclo hidrológico del salar se origina por una recarga subterránea discontinua según la época del año, proveniente de las precipitaciones que ocurren en el borde oriental de su cuenca de drenaje, principalmente de enero a marzo. En este mismo período se originan avenidas aluvionales torrenciales, que constituyen los únicos aportes superficiales de importancia. El volumen de las precipitaciones anuales totales en esta región se estima en aproximadamente 660.000.000 m³ (20 lt/seg), sin embargo, considerando que la tasa de infiltración es del orden de un 20%/o, la recarga real sería de 4 m³/seg. (Castillo, O., 1960).

Las aguas subterráneas, al llegar al plano de la Pampa, generan tres niveles freáticos principales a profundidades variables dentro de la cubierta aluvial: uno superficial que oscila entre 1 y 20 m de profundidad, uno intermedio a 150 m y otro a 240 m, variando algunos metros entre una localidad y otra. El techo del nivel freático superior, en relación al nivel del mar, varía entre 1.000 m al NE del salar (La Huaica), 974 m en el sector Pintados y 944 m en el sector Bellavista (fig. 3). La profundidad del techo de la napa freática en relación a la topografía es en todo el salar inferior a 20 m, observándose que en las áreas de Mosquitos, La Huaica y Bellavista varía entre 0.05 y 2 m.

La velocidad media de desplazamiento del agua subterránea en el área N del salar varía de

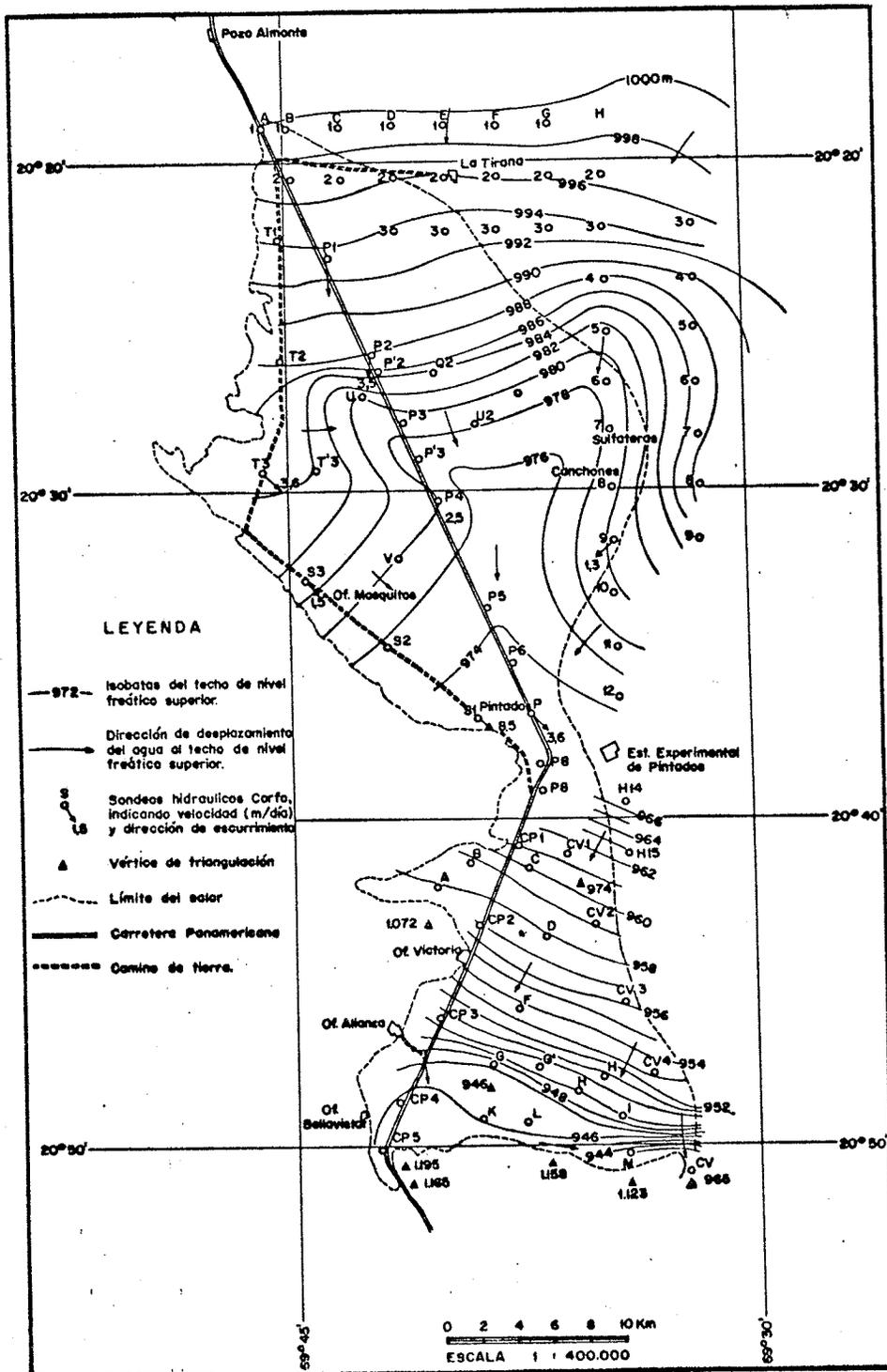


Figura 3. Isóbatas y dirección de escurrimiento del techo del nivel freático superior. (Modificado de Schiund y Gannat, 1969).

1 a 3 m/día, velocidad que aumenta hasta 8.5 m/día en las cercanías de la estación Pintados, debido a un fuerte declive en el nivel piezométrico. En este punto, se produce el desagüe hacia el sector S, en donde el desplazamiento de las aguas disminuye nuevamente a valores de 1 a 3 m/día (Falcón, E., 1966).

La descarga de las aguas subterráneas del salar Bellavista-Pintados y de su región circundante se produce en forma natural por cuatro mecanismos:

- a. Evaporación directa del acuífero superficial por ascenso capilar, estimada en 2.000 lt/seg. Este fenómeno es especialmente fuerte en las áreas en que el nivel freático está muy próximo a la superficie del terreno.
- b. Evapotranspiración de plantas freatófitas (principalmente tamarugos). Se ha estimado que en el área reforestada con tamarugos (8.000 has.), la evapotranspiración produce un gasto de 1.200 lt/seg. (Castillo, O., 1960).
- c. Escape parcial de aguas subterráneas a través de zonas de fractura en la Cordillera de la Costa. Este escape se manifiesta en forma de vertientes ubicadas en el flanco W de la Cordillera de la Costa en la latitud del Salar Bellavista-Pintados. Además de la descarga hacia el W, las aguas subterráneas del salar tienen un escape de pequeña magnitud hacia el S, entre los cerros Cachango y Gordo y entre los cerros Granja y Buena Ventura, vertiéndose en las cuencas del Salar de Lagunas, Sur Viejo y Lllamará.
- d. Descarga artificial. Esta se produce por extracción de agua de pozos, principalmente en las áreas de Canchones y Pintados, alcanzando en promedio unos 140 lt/seg. (Castillo, O., 1960).

Características Químicas de las Aguas.

Análisis de aguas del techo del nivel freático superior, demuestran que estas varían en composición y salinidad total según franjas orientadas en sentido general NE-SW (fig. 4). La calidad química de estas aguas está condicionada principalmente por los tipos de agua que constituyen la recarga inicial y por la intensidad de la evaporación a que están sometidas, factor que depende inversamente de su profundidad y velocidad de escurrimiento.

Calidad Química de la recarga. La recarga del Salar Bellavista-Pintados está constituida por aguas provenientes de las hoyas hidrográficas de las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca, Tambillos, Chacarilla, Chipana y del plano inclinado de los Altos de Pica; sin embargo, las aguas provenientes de Aroma y Tarapacá son poco representativas de la composición de la recarga debido a la distancia (40 - 50 km al N) a que afloran del salar. Las características químicas de la recarga se han obtenido de vertientes termales emplazadas en el límite oriental de la Pampa del Tamarugal (Tablas 1 y 2).

De ambas tablas se aprecia que la recarga corresponde a 2 tipos de aguas diluidas (> 1.000 p.p.m.): sódico bicarbonatadas y sódico sulfatadas. Considerando la proximidad al salar y el aumento en K^+ en relación al Mg^{++} en las aguas de las hoyas hidrográficas de Tambillos, Altos de Pica y Chacarilla, relación prevaeciente en las aguas del salar, se estima que éstas constituyen su recarga principal, produciéndose una mezcla de ellas en el sector de La Huaica - Canchones.

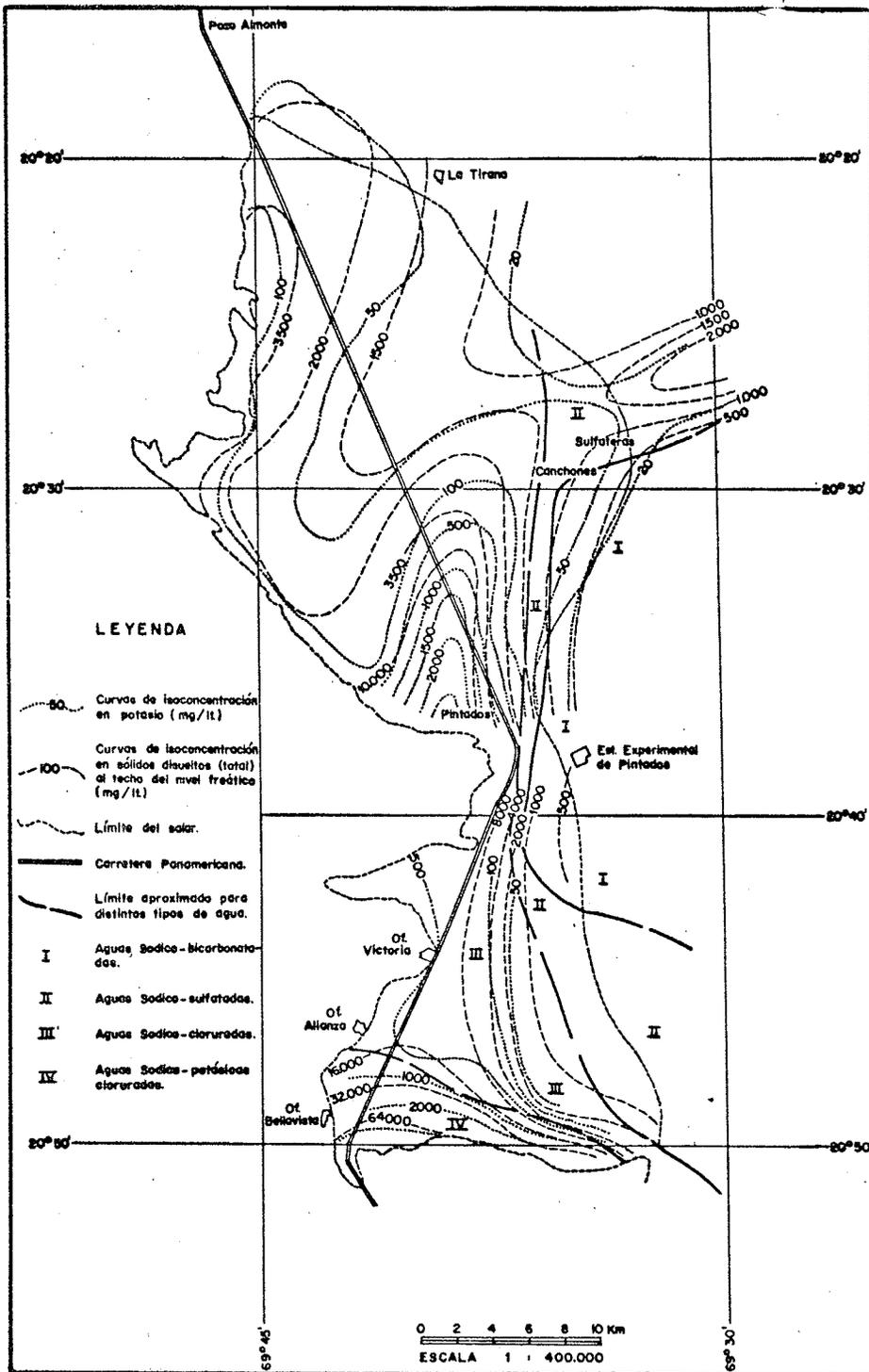


Figura 4. Zonación química de las aguas y salmueras del Salar. (Modificado de Schlund y Gannat, 1969).

TABLA 1. ANALISIS DE LA RECARGA (VERTIENTES) AL SALAR BELLAVISTA-PINTADOS (p.p.m.)

Cuenca	N°	Vertiente*	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	B	SiO ₂	Salinidad total	pH	T °C
Aroma	1	Chismiza	31	0.2	150	4.5	44	279	59	2.2	2.7	66	617	7.12	45°
	2	Chiapa	10	4.7	30	6.6	67	27	27	0.3	0.7	69	208	6.70	24°
	3	Sotoca	17	9.2	15	7.4	96	16	19	3.1	0.3	57	191	6.80	16°
	4	Pujio Cuevo	20	8.6	20	5.6	105	18	21	3.6	0.2	55	204	6.90	21°
	5	Janchima	30	8.3	32	3.4	95	46	36	7.8	0.8	62	273	7.50	19,5°
	6	Jañia	26	11	22	6.5	120	27	26	8.0	0.5	60	246	7.00	18,5°
Tarapacá	7	Pacumiña	19	4.5	21	4.1	77	32	19	0.1	0.6	46	184	6.50	---
	8	Sipisa	30	7.7	160	5.0	149	210	83	0.1	3.0	18	590	7.40	---
	9	Huasquiña	6.0	0.0	113	1.6	79	98	70	0.6	3.5	40	372	7.10	31°
	10	Chintuya	138	43	980	26	322	995	995	0.9	31	60	3.427	8.10	19°
Quipisca	11	Lagunilla	58	8.2	40	8.8	52	179	31	4.0	1.0	52	408	6.70	13°
	12	Parcas	72	15	168	9.0	330	209	95	3.1	2.0	37	772	7.20	10°
	13	Amirca	76	6.0	200	4.7	265	337	74	0.3	2.8	50	878	6.90	8°
	14	Munujna	569	41	326	14	128	1.896	162	1.4	---	31	3.103	7.6	---
	15	Munujna	557	30	504	24	151	2.114	194	2.4	---	32	3.531	7.2	---
	16	Duplisa	585	23	332	13	441	1.676	141	0	5.5	71	3.064	7.24	15°
Tambillo	17	Mamiña	41	3.8	154	4.3	50	321	61	0.7	2.1	---	677	6.20	38°
	18	Ipla	30	0.1	113	3.1	32	227	45	0.5	1.2	68	504	7.72	39°
	19	Macaya	12	0.3	100	2.9	85	123	48	0.4	1.3	57	387	6.68	36°
	20	Sagasca	210	13	312	14	132	911	150	8.1	4.6	73	1.761	6.8	26°
Altos de Pica	21	La Calera	115	7.8	530	5.7	126	991	216	50	6.8	52	2.037	6.60	28°
	22	Chintaguay	26	0.3	55	1.9	92	64	34	5.6	1.5	44	277	6.80	29°
	23	El Salto *	60	1.2	260	8.6	631	58	153	0.5	4.1	80	947	7.20	15°
	24	Miraflores *	19.6	0.1	45.9	0.4	95.3	35.4	25.8	4	---	33.2	211.6	8.05	---
	25	Jesús María	61.6	5	106.6	3.2	162.8	138.4	80.3	25	---	43.2	543.6	8.11	---
Chacarilla	26	Chacarilla	29.6	5.3	171.1	4.4	252.6	58.4	146	1.4	---	580.4	7.98	---	

* Ver Mapa Ubicación
 -- Indica no analizado
 * Castillo, O., 1960.

TABLA 2. ABUNDANCIA IONICA RELATIVA EN AGUAS DE VERTIENTE

HOYA HIDROGRAFICA	ABUNDANCIA RELATIVA	
	Cationes	Aniones
Aroma	Na > Ca > Mg > K	HCO ₃ > SO ₄ > Cl
Tarapacá	Na > Ca > Mg > K	SO ₄ > HCO ₃ > Cl
Quipisca	Na > Ca > Mg > K	SO ₄ > HCO ₃ > Cl
Tambillo	Na > Ca > K > Mg	SO ₄ > Cl > HCO ₃
Altos de Pica	Na > Ca > K > Mg	HCO ₃ > SO ₄ > Cl
Chacarilla	Na > Ca > Mg > K	HCO ₃ > Cl > SO ₄

Calidad Química de las Aguas y Salmueras del Salar. El lento escurrimiento sub-superficial hacia el W y SW de las aguas provenientes de Altos de Pica y Chacarilla y su paulatina concentración en sólidos disueltos por evaporación, origina una evolución hacia composiciones en que $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; $\text{Na}^+ \gg \text{Ca}^{2+} \sim \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ (Tabla 3). La precipitación de carbonatos de calcio y la mezcla con aguas provenientes de Tambillos enriquece relativamente las aguas en Na^+ y SO_4^{2-} , generándose aguas sódico-sulfatadas caracterizadas por $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. De estas aguas precipitan sulfatos de sodio y calcio, originando yacimientos de importancia (La Huaica - Canchones).

La precipitación de estas sales ocasiona un enriquecimiento relativo en Cl^- , con lo cual las aguas evolucionan hacia composiciones sódico-cloruradas caracterizadas por $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \gg \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, y de las cuales precipita principalmente halita. La elevada concentración salina que se alcanza en el extremo W y SW del salar (30.000 - 60.000 p.p.m) y la proximidad del nivel freático a su superficie en esta región, (0.05 m) determina la precipitación casi total del Ca^{2+} , y el desarrollo de salmueras cloruradas sódico - potásicas ($\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \gg \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ \gg \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$). En todas las salmueras del salar, como asimismo en las aguas de recarga, se observa una deficiencia generalizada en Mg^{2+} .

Distribución del Sodio y Potasio. Característica importante de las aguas de recarga directa al salar, es la predominancia del K^+ sobre el Mg^{2+} y valores bajos de la razón Na/K, situación que se invierte en aguas provenientes de las hoyas hidrográficas más septentrionales (Aroma, Tarapacá).

El valor de la razón Na/K, varía notablemente en las aguas y salmueras de todo el salar. En su sector N, desde La Huaica hacia Pintados, hay un fuerte incremento en Na^+ , situación que se repite en su sector S entre Pintados y Bellavista. Este fenómeno se aprecia al analizar la variación composicional de las salmueras en relación al aumento de la salinidad (fig. 5). Mientras los aniones muestran una evolución definida desde composiciones carbonatadas a sulfato-cloruradas, los cationes se empobrecen en Na^+ y K^+ hasta los 5.000 p.p.m. de salinidad, para enriquecerse en los mismos iones, aunque relativamente mucho más en Na^+ , al ser sobrepasado este valor. Este incremento en Na^+ hacia el S corrobora la adición de aguas sódico - sulfatadas en el extremo NE del salar, aunque es probable que parte del Na^+ provenga de una redisolución de sales sódicas (halita, tenardita, mirabilita, glauberita). Valores anormalmente altos de la razón Na/K (sondajes H6; H8 y G) corresponden a zonas en que el nivel freático se encuentra próximo a la superficie (0.05 - 0.5 m) y en donde la precipitación de sales sódicas es muy activa.

Alta concentración absoluta de K^+ y en relación a la salinidad total se detecta en las salmueras de las áreas de Mosquitos, Pintados y Bellavista, en donde además se produce la mayor concentración de sólidos disueltos y la menor velocidad de escurrimiento (fig. 4).

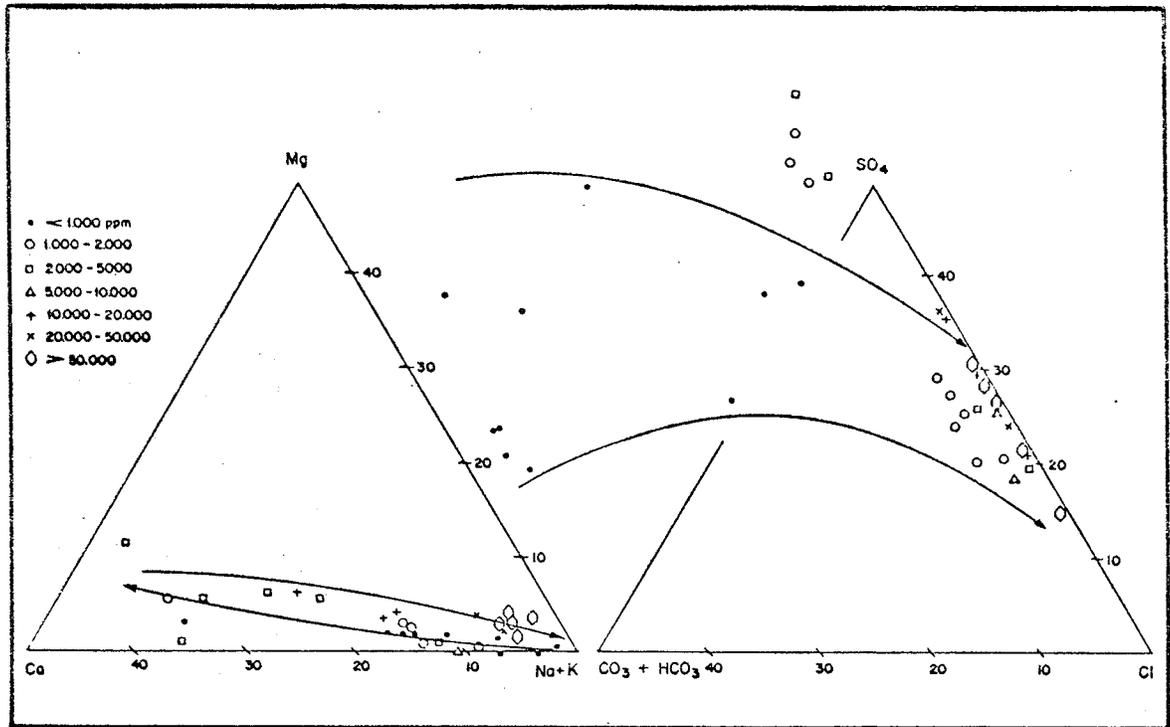


Figura 5. Evolución de la composición de las salmueras en relación a la salinidad.

LAS COSTRAS SALINAS

La dependencia que muestran las costras salinas de las características hidrológicas y climáticas imperantes en la región del salar Bellavista-Pintados, determina que éste sea una unidad geomorfológica dinámica, afecta a cambios mineralógicos y estructurales en ciclos diarios, y estacionales. Esta dependencia determina además la existencia de diversos tipos de costras, asociaciones mineralógicas y estructuras, aún dentro de un mismo sector del salar.

Génesis

La génesis de las costras salinas en el salar Bellavista-Pintados está directamente relacionada con sus características hidrogeológicas, especialmente con las fluctuaciones del techo del acuífero superior y su velocidad de escurrimiento. Efectivamente, las costras salinas se desarrollan de preferencia en aquellos sectores del salar en los cuales el nivel de las aguas subterráneas aparece más próximo a la superficie y, a su vez, en donde estas aguas presentan la menor velocidad de escurrimiento. Estas características se observan especialmente en los sectores de La Huaica, Mosquitos y Bellavista.

La proximidad del agua subterránea a la superficie de la Pampa y el lento escurrimiento subsuperficial de ellas, permite que a través de la intensa evaporación (11 a 34 mm/día) se genere una paulatina concentración de sólidos disueltos precipitando en los sedimentos limo-arcillosos basales del salar, durante el ascenso capilar de las soluciones. Esta continua depositación de sales, origina el crecimiento vertical de las costras salinas, las cuales alcanzan espesores que sobrepasan 1 m de potencia.

Morfología y Estratigrafía

Tentativamente, se diferencian seis tipos de costras salinas, las que en general muestran una zonación dirigida en sentido NE-SW, zonación condicionada por la oscilación del acuífero superior en el área del salar. Por tal motivo, los límites entre cada unidad diferenciada son de carácter transicional.

No obstante la extrema lenticularidad de los niveles salinos superficiales y sedimentos que los infrayacen, se pueden distinguir tres niveles estratigráficos generalizados que se repiten en cada uno de los diversos tipos de costras; un nivel superior (0.3 m) constituido por sales (principalmente halita) que cementan materiales detríticos, un nivel intermedio (0.2-0.4m) de limos arcillosos salinos, secos a débilmente húmedos, con lentes de tenardita y/o mirabilita en su base y un nivel inferior (0.4 a 3 m) de arcillas limosas húmedas con nódulos salinos, (principalmente tenardita). Cada uno de estos niveles varía notablemente en composición mineralógica, estructura y microestructura de una unidad a otra. Variaciones zonales en la composición química de las costras son difíciles de detectar, debido a lo errático de la cristalización dentro de cada zona y a que los análisis efectuados incluyen salmueras ocluidas en poros y oquedades de la costra salina. No obstante, se presentan análisis químicos para indicar la composición general de algunas costras. La diferencia más notable entre cada tipo de costra y que a su vez permite la diferenciación en diferentes unidades, es el microrelieve superficial. Los seis tipos de costras superficiales diferenciados son cronológicamente, del más antiguo al más moderno, los siguientes:

Qs - 1 Unidad salino-aluvial que rodea el salar por sus límites N y E, constituyendo una zona de transición entre la Pampa del Tamarugal y el salar propiamente tal. Se trata de una superficie lisa, suavemente ondulada, seca, constituida por limos arcillosos marrón claro, en parte eólicos, cementados por carbonatos. En su límite oriental se desarrollan localmente dunas de pequeña magnitud y campos de ondulitas.

Un perfil estratigráfico generalizado es el siguiente:

0.0 - 0.20 m	Costra salina-detrítica, seca, dura, relativamente porosa, a veces en bloques sueltos, constituida por arena eólica fina y limos arcillosos cementados principalmente por calcita. En conjunto la costra se observa marrón clara a oscura, surcada por venillas de halita blanca.
0.20 - 0.40 m	Limo arcilloso salino, finamente estratificado y mal consolidado, pardo rojizo, con impregnaciones salinas (calcita y ulexita) que aumentan en profundidad.
0.40 - 1.00 m	Arcilla limosa salina, débilmente consolidada, húmeda, porosa, marrón rojiza, con nódulos (5 mm) de tenardita y yeso.

La composición de sales solubles presentes en muestras representativas de esta unidad se muestran en la Tabla 4.

Qs - 2 Zona de transición entre la unidad Qs - 1 y las costras salinas propiamente tales que se desarrollan hacia el W. Está constituida por arcillas salinas rojas, secas, fuertemente cementadas en la superficie por halita (Tabla 5). En partes se observa anhídrita pulverulenta. El microrelieve es ligeramente áspero, discontinuo, fracturado en bloques poligonales (generalmente hexagonales) de aproximadamente 1 m². Un perfil estratigráfico generalizado es el siguiente:

- 0.0 - 0.30 m Costra salina dura, seca, constituida por halita gris clara que cementa elementos detríticos (10 % en volumen), principalmente granos de cuarzo anguloso, nódulos de arcilla marrón oscura y nódulos de halita blanca.
- 0.30 - 0.65 m Arcilla arenosa salina marrón rojiza, mal consolidada, con nódulos de ulexita, tenardita, glauberita y yeso. En algunos sectores se observan intercalaciones lenticulares de yeso blanco amarillento, bien consolidado.
- 0.65 - 1.35 m Arcilla limosa salina marrón oscura, húmeda, plástica, con nódulos de yeso.

TABLA 4. ANALISIS QUIMICOS DE SALES SOLUBLES (%).

COSTRAS SALINAS TIPO Qs. 1

Nivel de la costra	Ca	Mg	Na	K	CO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	B	H ₂ O
0.0 - 0.2 m	1.21	0.28	30.92	1.00	1.09	9.79	41.54	0.21	0.20	1.50
	1.39	0.15	30.29	0.10	0.99	1.56	49.19	0.04	—	0.80
	2.10	0.30	24.53	0.30	1.38	2.67	36.94	0.05	—	1.66
	3.04	0.50	26.04	0.88	3.56	3.04	39.88	0.18	0.01	1.58
0.2 - 0.4 m	1.81	0.08	30.76	3.11	—	33.32	28.72	0.04	0.02	1.04
	2.17	0.39	26.79	1.00	1.62	3.18	40.86	0.18	—	1.12
	5.96	0.58	9.30	0.50	6.48	4.48	12.65	0.09	0.01	2.92
	1.01	0.54	22.52	0.81	0.87	1.29	36.12	0.27	0.01	1.98
0.4 - 1.0 m	2.04	0.71	2.52	0.96	1.31	0.33	3.33	0.09	0.01	5.38

TABLA 5. ANALISIS QUIMICOS DE SALES SOLUBLES (%).

COSTRAS SALINAS TIPO Qs. 2

Nivel de la costra	Ca	Mg	Na	K	CO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	B	H ₂ O
0.0 - 0.3 m	2.48	0.15	19.56	0.16	2.13	1.68	29.56	0.11	0.01	0.78
	2.15	0.94	28.42	3.42	—	21.27	36.31	0.12	0.02	4.24
	0.40	0.32	34.19	2.75	0.16	9.58	49.34	0.04	0.02	0.88
	3.05	0.37	30.08	0.71	0.16	10.16	44.83	0.06	0.18	1.50
	11.97	0.76	17.40	3.62	4.08	24.74	23.34	0.20	0.08	2.00
	1.19	0.20	29.58	0.75	0.20	4.80	46.06	0.25	0.15	1.54
	4.05	0.03	24.99	2.25	1.14	11.15	35.12	0.09	0.27	1.52
	2.70	0.22	32.67	0.63	0.21	10.26	46.51	0.08	0.33	0.78
0.3 - 0.65 m	21.32	0.24	0.10	0.04	0.14	49.81	0.16	0.06	0.02	19.44
	27.67	0.16	0.40	0.07	0.09	65.00	0.66	0.01	0.01	19.34
	1.72	0.75	3.41	0.94	1.74	1.17	4.40	0.31	0.05	5.04
0.65 - 1.35 m	10.85	3.55	2.10	0.57	4.50	6.60	2.34	0.11	0.06	7.80

Qs - 2a . Equivalente estratigráficamente a la unidad Qs - 2, pero en donde la proximidad del techo acuífero superior determina cambios mineralógicos y estructurales de importancia.

Se desarrolla en el sector central del salar en donde se concentra además la vegetación de tamarugos. La costra superficial se observa áspera y muy fracturada en bloques (0.5 m²) originados por grietas poligonales no - orientadas de gran desarrollo longitudinal (15 - 20 m) y la-

teral (0.5 m). La continua depositación y crecimiento salino vertical de esta costra, condicionada por la proximidad del acuífero superior, determina que los bloques estén sollevantados y/o volcados.

Un perfil estratigráfico generalizado es el siguiente:

- 0.0 - 0.30 m Costra salina muy dura, seca, marrón claro, constituida superficialmente por arenas y limos eólicos cementados por halita. En su sector medio se desarrolla normalmente un nivel de halita consolidada, gris blanquecina con nódulos de tenardita, los que aumentan en proporción hacia su base. En partes hay cristalización de mirabilita la que por rápida deshidratación, se transforma en tenardita.
- 0.30 - 0.50 m Arena arcillosa salina, no consolidada, marrón oscura, húmeda.
- 0.30 - 0,80 m Arcilla limosa salina marrón amarillenta, débilmente consolidada, húmeda, algo plástica, con intercalaciones lenticulares de niveles arenosos gris oscuros.

Qs -3 .Se desarrolla con preferencia en el sector occidental del salar, adosada al límite oriental de la Cordillera de la Costa. En el sector más oriental de esta unidad, la costra aparece relativamente lisa, completamente seca, resquebrajada en bloques hexagonales (1 - 2 m²) por grietas poligonales a través de las cuales emergen generaciones posteriores de halita blanca arborescente.

Hacia su extremo W, los bloques hexagonales están deformados por lomos elongados paralelamente al borde del salar, originados por fuerzas de compresión laterales y verticales. Las fuerzas de compresión vertical son ocasionadas por el ascenso de núcleos de yeso de carácter diapírico, los cuales afloran con formas arborescentes al fracturar el límite superior de la estructura. La compresión lateral es originada por el aumento de volumen al hidratarse la anhídrita. Inversamente, el paso de yeso a anhídrita ocasiona las fracturas de la costra salina. En promedio estos lomos alcanzan una longitud de 5 m y una altura de 1 m con ancho variable en su base entre 1 a 3 m.

Un perfil estratigráfico generalizado es el siguiente:

- 0.0 - 0.35 m Costra salina muy dura, compacta, constituida por halita gris blanquecina con inclusiones de material detrítico fino. En su parte inferior se desarrolla un nivel delgado (1 - 5 cm) de tenardita blanca, friable, ligeramente húmeda, que en partes alcanza potencias de hasta 0.15 m.
- 0.35 - 0.60 m Limo arcilloso salino, marrón claro, débilmente húmedo, con nódulos de yeso y tenardita.
- 0.60 - 0.85 m Yeso blanco, amarillento homogéneo, compacto, con nódulos arcillosos que aumentan hacia su base.
- 0.85 - 1.10 m Arcilla limosa salina, marrón oscura, húmeda, con nódulos de yeso.

Análisis químicos de sales solubles presentes en el nivel superior de las costras salinas Qs- 2a y Qs - 3, se indican en la tabla 6.

TABLA 6. ANALISIS QUIMICOS DE SALES SOLUBLES (°/o) COSTRAS Qs-2a y Qs-3

Tipo de costra (nivel superior)	Ca	Mg	Na	K	CO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	B	H ₂ O
Qs - 2a	0.58	0.10	30.54	0.50	0.17	7.91	41.84	0.18	0.21	0.86
	1.28	0.39	24.60	0.48	0.09	4.36	35.83	0.28	0.01	2.84
Qs - 3	1.23	0.22	11.24	1.36	0.09	1.67	18.81	0.08	0.04	2.08
	1.54	0.90	28.08	2.00	0.23	24.15	31.55	0.05	0.04	3.48
	1.49	0.48	26.73	0.25	—	10.77	36.53	0.11	0.22	2.66

Qs - 3a. Corresponde estratigráficamente a la costra Qs - 3, pero en donde ésta ha sido solevantada y fracturada por el crecimiento rápido y continuo de nuevas generaciones salinas debido a la proximidad del nivel freático superior (0.5 - 1 m). El aspecto general de esta costra es muy rugoso y áspero, con grandes bloques sueltos (0.5 m³) de halita muy dura, gris oscura. La continua disolución y recristalización de ésta por efectos de la niebla nocturna, origina el desarrollo de cantos afilados y estalactitas salinas.

Un perfil estratigráfico generalizado es el siguiente:

- 0.0 - 0.50 m Costa salina en bloques sueltos, muy dura, constituida por halita blanca grisácea, con inclusiones de limos arcillosos marrón oscuros. Bajo la costra de bloques aparece un nivel húmedo de tenardita blanca (0.2 m), en cuya base cristaliza mirabilita que rápidamente se deshidrata, transformándose en tenardita.
- 0.50 - 1.00 m Arcilla limosa salina, marrón oscura, débilmente consolidada, húmeda.
- 1.00 - 1.20 m Yeso blanco amarillento, duro, homogéneo.

Qs - 3b. Corresponde a la unidad Qs - 3a, pero en donde la costra de bloques sueltos ha sido removida manualmente para la explotación de las sales potásicas de los niveles inferiores. Se trata de una unidad de microrelieve áspero y rugoso (0.15 m de desnivel), constituido por eflorescencias salinas nodulares y/o arborescentes de halita blanca con contenidos relativamente elevados en potasio (Tabla 7).

Estratigráficamente, está constituida por:

- 0.0 - 0.25 m Costra salina áspera, nodular y/o arborescente, constituida principalmente por halita blanca sacaroidal, en parte amarillenta.
- 0.25-0.35 m Sal blanca, sacaroidal, húmeda, principalmente tenardita y glauberita, con nódulos y lentes arcillosos.
- 0.35-0.60 m Arcillas limosas yesíferas, marrón oscuras, muy húmedas. (El nivel de agua aflora en partes).

TABLA 7. ANALISIS QUIMICOS DE SALES SOLUBLES (°/o) COSTRA Qs - 3b.

Nivel de la costra	Ca	Mg	Na	K	CO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	B	H ₂ O
0.0 - 0.25 m	0.70	1.70	26.88	4.83	0.09	21.90	35.59	--	0.13	--
	0.23	2.28	24.25	6.75	0	20.82	37.44	--	0.15	--
	1.98	0.38	25.25	0.95	0.05	9.56	38.18	--	0.0	--
	0.60	0.05	36.25	0.02	0	1.48	57.59	--	0.01	--
0.25 - 0.30	2.55	1.05	27.21	0.62	0.26	30.75	25.29	0.08	0.42	4.78
	5.29	0.34	27.64	0.07	0.07	26.52	35.79	0.02	0.09	1.64
0.30 - 0.50	23.19	0.90	0.92	0.24	2.91	50.68	0.72	0.06	0.01	6.60

Minerales Salinos y su Distribución en las Costras

Los minerales presentes en las costras salinas del salar Bellavista - Pintados (fig. 6) corresponden a carbonatos, sulfatos, cloruros, boratos y nitratos, simples, dobles y/o triples de sodio, calcio, potasio y magnesio; anhidros y/o hidratados.

Análisis efectuados por Rayos X de muestras tomadas en los distintos tipos de costras, detectaron los siguientes minerales:

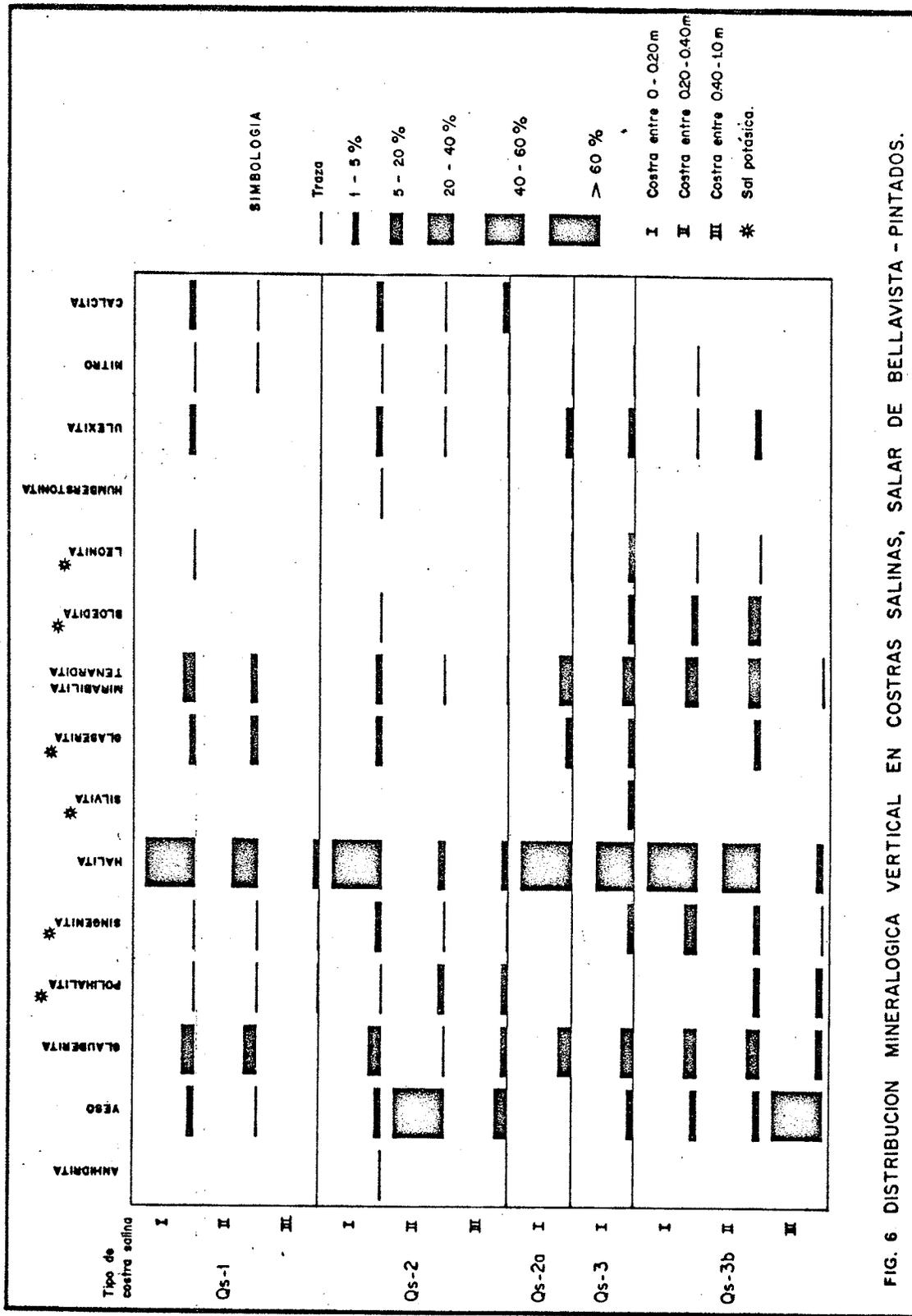


FIG. 6 DISTRIBUCION MINERALOGICA VERTICAL EN COSTRAS SALINAS, SALAR DE BELLAVISTA - PINTADOS.

Anhidrita	Ca_2SO_4	Glaserita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$
Yeso	$\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tenardita	Na_2SO_4
Glauberita	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$	Mirabilita	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Hidroglauberita (*)	$5\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Bloedita	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Polihalita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$	Leonita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Singenita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Humberstonita	$\text{K}_3\text{Na}_7\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_6(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Halita	NaCl	Ulexita	$(\text{Na}, \text{Ca}) \text{B}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Silvita	KCl	Nitratina	NaNO_3
		Calcita	CaCO_3

De esta lista, sólo la halita, yeso, glauberita, tenardita y mirabilita se presentan en proporciones sobre 5^o/o. El resto se presenta en trazas y escasamente sobre el 2^o/o.

El estudio mineralógico comparativo de la costra en las diferentes unidades salinas, revela que:

- La asociación salina principal del nivel superior de cada costra está representada por halita + tenardita + glauberita.
- El mineral potásico más abundante corresponde a glaserita. En general, la proporción de minerales potásicos aumenta en los niveles superiores de las costras salinas desarrolladas al W y S del salar.

c. El yeso predomina en los niveles inferiores y la halita y ulexita en los niveles superiores.

d. Los carbonatos sólo aparecen en los niveles superiores de las costras orientales del salar. Esta variación vertical y lateral en la composición mineralógica de las costras salinas del salar,

está condicionada por la solubilidad relativa de cada uno de los minerales constitutivos. El control de la solubilidad en la distribución mineralógica vertical de las costras, se aprecia en la región de La Huaica, en donde niveles de mirabilita y tenardita aparecen sobre arcillas y limos yesíferos (menos soluble que la mirabilita) y bajo costras de halita con trazas de glaserita de solubilidad más alta (Ericksen, G.E., 1970).

El control de la solubilidad relativa en la zonación mineralógica lateral de la costra, se aprecia por la presencia de carbonatos en su extremo NE, sulfatos y cloruros de sodio en la región central y por cloruro de sodio y sales potásicas en su límite W y SW.

Origen de los Elementos Presentes en las Costras Salinas del Salar

El origen de los elementos que constituyen los depósitos salinos del Norte Grande de Chile, ha sido extensamente discutido, principalmente en relación con los yacimientos de nitratos.

La fuente inicial de estos elementos puede corresponder a:

- Lixiviación de rocas volcánicas.** Este mecanismo fue propuesto por Ericksen (1963) a partir de las sales solubles presentes en las tobas e ignimbritas riolíticas de la formación Altos de Pica (0.012 a 0.027 ^o/o en peso), y que corresponden principalmente, en porcentaje en peso, a SO_3^- (0.0428 a 0.0660), Na^+ (0.0510); Cl^- (0.0213 - 0.0317) y K^+ (0.0005 a 0.0036). El origen y la variación de la composición química de la recarga, en las diferentes hoyas hidrográficas, está condicionada además por la lixiviación de áreas de alteración hidrotermal (fuen-

(*) Ericksen, G.E., 1970.

tes de anión $\text{SO}_4^{=}$), observándose una clara relación entre la presencia de éstas y aguas de vertiente de tipo sódico-sulfatadas.

b Lixiviación de rocas salinas solubles. La presencia de calizas paleozoicas y jurásicas en las quebradas de Aroma y Tarapacá, permiten suponer que parte del HCO_3^- provendría de la disolución parcial de estas rocas. Sin embargo, la escasa concentración en sólidos disueltos de las aguas de vertientes sugiere que este aporte es de pequeña magnitud.

c. Aportes atmosféricos de sales oceánicas. La composición química de las camanchacas nocturnas muestra cantidades relativamente importantes de sales en solución provenientes en gran parte del agua marina emulsionada en la zona de rompientes. Sin embargo, este aporte salino oceánico afecta sólo a la superficie de las costras salinas (redisolución y precipitación sucesiva) y sería cuantitativamente muy inferior a los aportes por lixiviación. La composición de una muestra de camanchaca, obtenida por condensación en fibras de nylon, dió el siguiente resultado (Ericksen, G., 1963):

Ca	.....	12 mg/lt.	CO_3	....	0	mg/lt	Salinidad total	....	154
Mg	.....	6.1	HCO_3	....	15		pH a 23°C	....	6.80
Na	....	30	SO_4	....	32				
K	.....	1.2	Cl	....	46				
			NO_3	....	19				
			SiO_2	....	1.1				

d. Aportes líquidos y gaseosos de origen volcánico, que en este caso corresponden principalmente a HCl, SO_3 y B.

CONCLUSIONES

1. El Salar Bellavista-Pintados corresponde a una cuenca semi-cerrada, controlada estructuralmente, cuya recarga, proveniente principalmente de precipitaciones en el extremo oriental de su cuenca de drenaje, está caracterizada por aguas del tipo sódico-bicarbonatadas y sódico-sulfatadas.
2. El lento escurrimiento sub-superficial hacia el W y SW y la intensa evaporación existente, generan en ellas un paulatino enriquecimiento iónico evolucionando hacia composiciones sódico-cloruradas y sódico-potásico-cloruradas.
3. El ascenso capilar de estas aguas a través de sedimentos limo-arcillosos y su inmediata evaporación, originó el crecimiento vertical de costras salinas arborescentes, las cuales muestran zonación mineralógica general en franjas orientadas en sentido NE - SW. La zonación mineralógica y los rasgos estructurales y microestructurales de las costras están controladas, respectivamente, por la composición química de las aguas de las cuales provienen y por las oscilaciones del nivel freático.
4. Las sales potásicas (principalmente glaserita) precipitan en las áreas en que se producen simultáneamente tres factores: mayor concentración salina (sobre 50.000 p.p.m.); nivel freático muy próximo a la superficie (0.05 m) y mínima velocidad de escurrimiento (1 m/día).

5. El origen de los elementos presentes en las costras salinas se estima proveniente principalmente de la lixiviación por aguas subterráneas de las series volcánicas riolíticas que afloran al oriente del salar. En menor proporción, se considera la redisolución de rocas calcáreas, los sólidos disueltos en las camanchacas y los aportes líquidos y gaseosos del vulcanismo actual.

REFERENCIAS

- Brüggen, J., 1918, El Salar de Pintados y sus yacimientos de potasa. Santiago, Min. Ind. Ob. Pub., Pub. Serv. Geol., N^o 2, 20 p.
- Castillo, O., 1966, El agua subterránea en el Norte de la Pampa del Tamarugal, Santiago, Inst. Invest. Geol., Bol. N^o 5, 107 p., 1 cuadro, 2 mapas.
- Cecioni, G., y García, F., 1960, Observaciones geológicas en la Cordillera de la Costa de Tarapacá. Santiago, Inst. Invest. Geol., Bol. N^o 6, 28 p., 2 gráficos.
- Domeyko, I., 1897, Mineralogía, Minerales no-metálicos, Santiago, vol. 3.
- Ericksen, G. E., 1961, Rhyolite tuff, a source of the salts of northern Chile. Washington, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 424, p. c224-c225.
- , 1963, Geology of the salt deposits and the salt industry of Northern Chile. Washington, U.S. Geol. Surv. Open File Report, N^o 698, 164 p.
- Ericksen, G. E., Mrose, M.E., Fahey, I.I., 1970, Ice clear mirabilite from Salar de Pintados, Northern Chile. The Mineralogical Record, vol. 1, N^o 1.
- Falcón, E., 1966, Determinación de dirección y velocidad de escurrimiento de agua subterránea mediante radioisótopo Yodo 131. Salar de Pintados, Pampa del Tamarugal. Santiago, Inst. Invest. Geol., Inf. Inédito, 2 p., 3 figs.
- Fuenzalida, H., 1965, Clima *in* Geografía Económica de Chile. Santiago, Corp. Fom. Producción. Texto refundido, p. 98 - 152.
- Galli, C., y Dingman, R., 1962, Cuadrángulos Alca, Pica, Matilla y Chacarilla, provincia de Tarapacá. Santiago, Inst. Invest. Geol., Carta Geol. de Chile, vol. III, N^{os} 2, 3, 4 y 5, 125 p., 11 tab., 12 figs., 11 láms., 4 mapas.
- Gannat, E., y Schlund, J.M., 1969, Informe de la misión de estudio de las posibilidades de Chile en minerales potásicos. Santiago, Corp. Fom. Producción y Bur. Rech. Geol. Min., Informe Inédito, 2 vol.
- García, F., 1967, Geología del Norte Grande de Chile. Soc. Geol. Chile; Symp., 1962, Santiago, 138 pp., 28 figs. 6 planos y perfiles.
- Raimondi, 1878, Los minerales del Perú, Lima.
- Sayes, J., 1972, Geología del Salar de Bellavista-Pintados, prov. de Tarapacá. Santiago, Inst. Invest. Geol., Informe Inédito, 35 pp.

- Silva, L I, 1972, Geología de las hojas Pisagua y Zapiga, prov. de Tarapacá. Memoria de Prueba, Depto. Geol., Univ. Chile. Santiago. 97 pp.
- Tobar, A., Salas, I., Kast, F.R., 1968, Cuadrángulos Camaraca y Azapa, provincia de Tarapacá. Santiago, Inst. Invest. Geol. Carta Geol. Chile N^o 19 - 20, 13 pp. 2 figs. 3 tablas.
- Vila, T., 1975, Estudio Geológico y evaluación de las reservas de sales potásicas y de sulfato de sodio en el Salar de Bellavista- Pintados, Santiago, Inst. Invest. Geol., Informe Inédito, 43 p.
- Von Arend, K., 1931, Sobre la existencia de potasa en la provincia de Tarapacá y sobre la posibilidad de la fabricación de nitratos de potasio en gran escala. Santiago, Bol. Soc. Nac. Min., pp. 784 - 790.
- Wetzel, W., 1927, Beiträge zur Erdgeschichte den mittleren Atacama. Neues Jahrbuch, Min. Geol. Pal., Beil. Bd. 58. Abt. 8., pp. 553 - 560.