

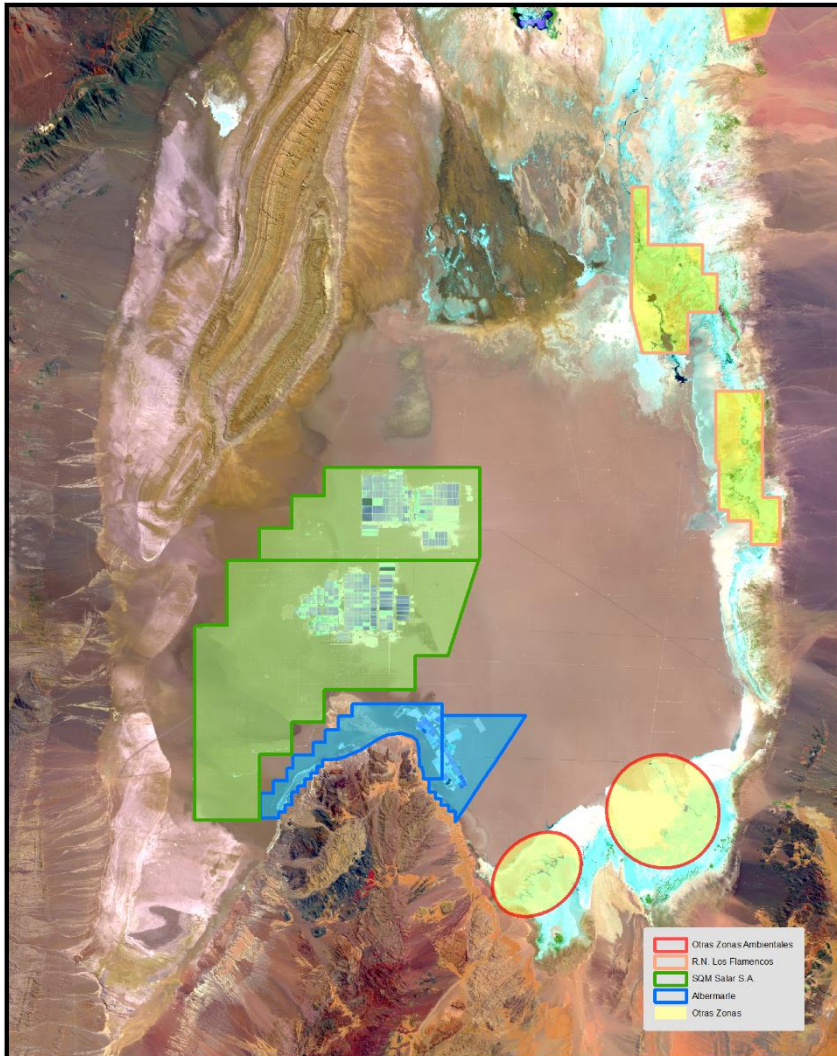
Salar de Atacama: La Modelación Hidrogeológica como Herramienta de Gestión Ambiental

Foro del Litio
Santiago de Chile, 8 de Agosto de 2017

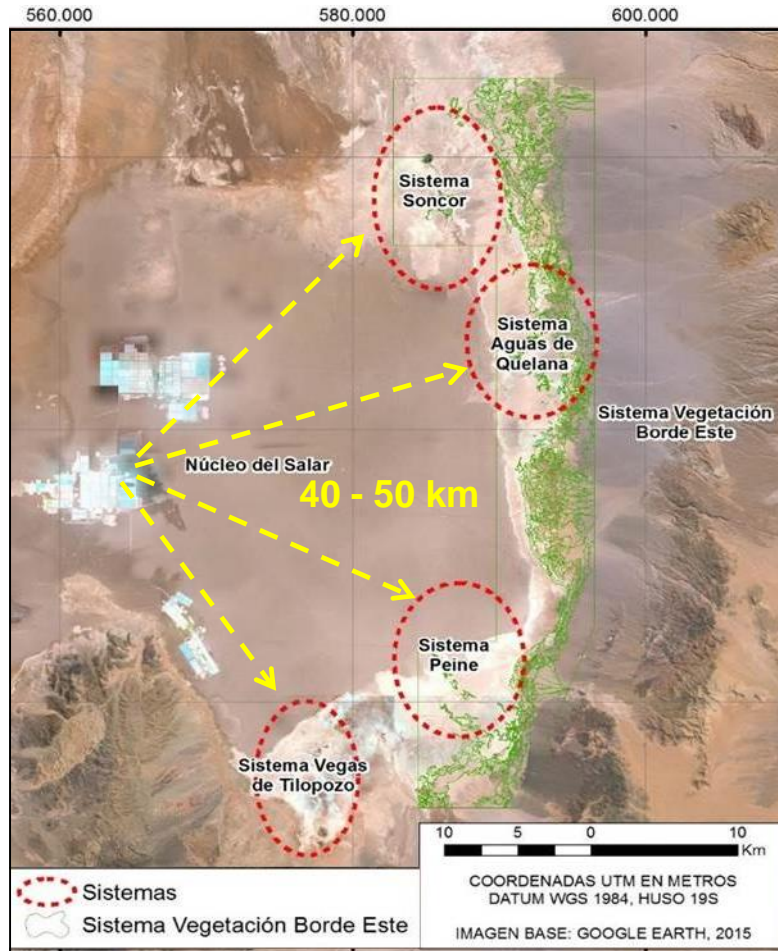
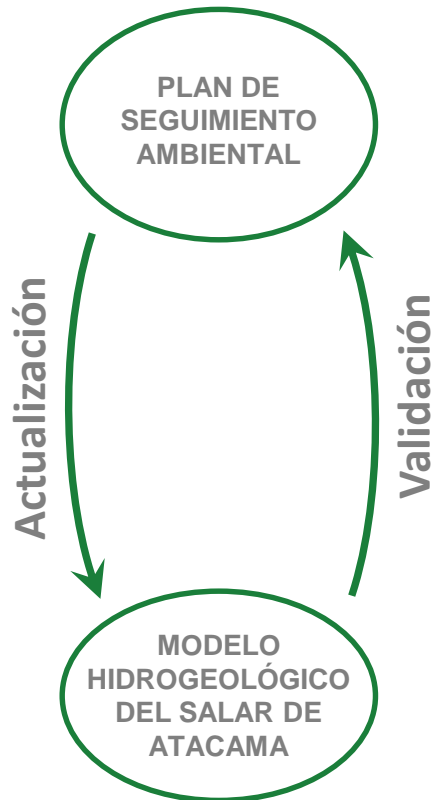


Cuenca del Salar de Atacama

- Cuenca endorreica con una superficie de 16.000 km², localizada al norte de Chile, en la Segunda Región, Provincias de Antofagasta y El Loa.
- En su núcleo posee importantes reservas de salmueras ricas en Potasio y Litio.
- En su Borde Este alberga sitios de protección ambiental por su valor eco-sistémico (Reserva Nacional Los Flamencos)
- SQM explota salmuera desde el núcleo del Salar y agua desde el acuífero del sector oriental de la cuenca para producir productos de Litio y Potasio
- Desde inicios de su operación, SQM genera continuamente herramientas de gestión que ayudan a compatibilizar la operación minera y la protección ambiental.



Gestión ambiental de los objetos de protección



Reglas de Extracción para Salmuera y Agua

- Caudales autorizados varían de acuerdo al avance del proyecto

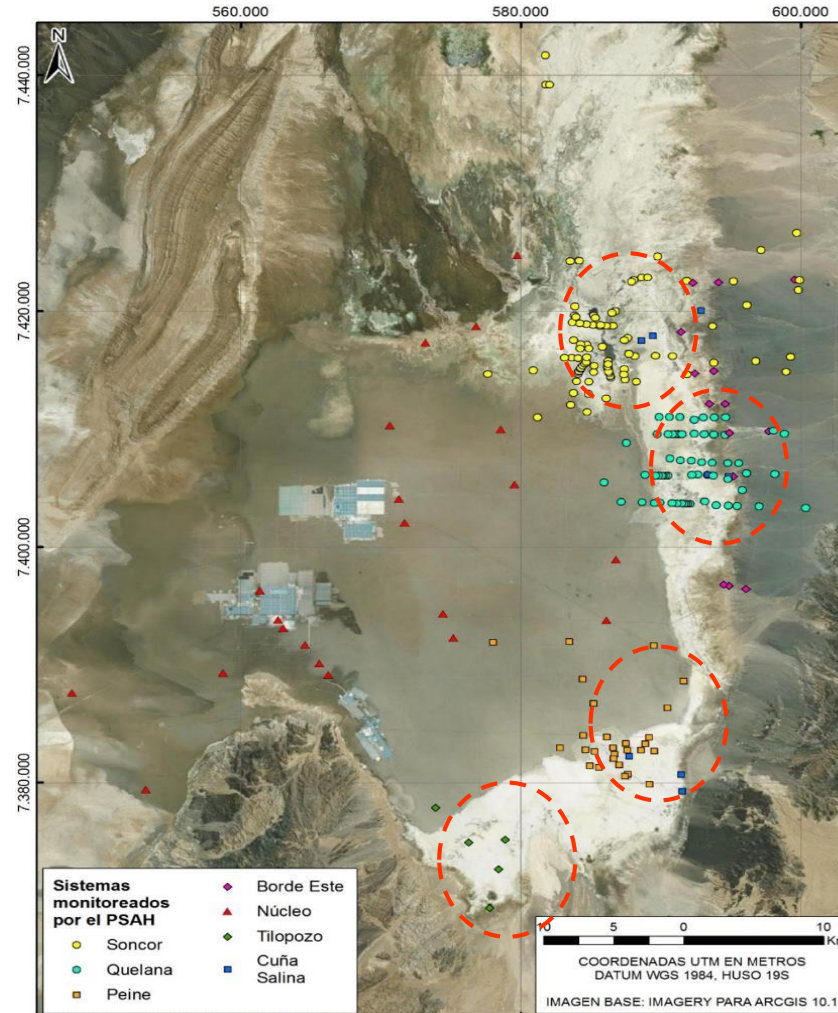
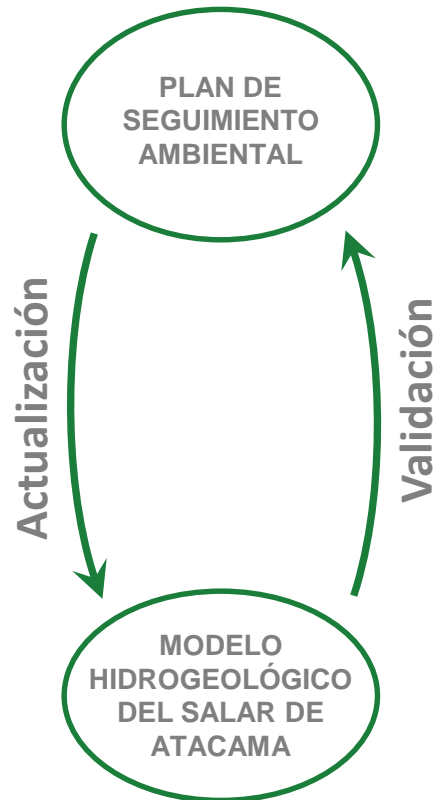
Plan de Seguimiento Ambiental (PSA)

- Objetivo: Mantener los sitios de protección de acuerdo a su estado inicial
- Información continua del funcionamiento del Salar
- Evaluación y Actualización del PSA
- Plan de Contingencia (PC)
 - Alerta Temprana
 - Medidas incluyen regulación de bombeo tanto en salmuera como agua dulce

Otros

- Trabajo con comunidades locales

Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico



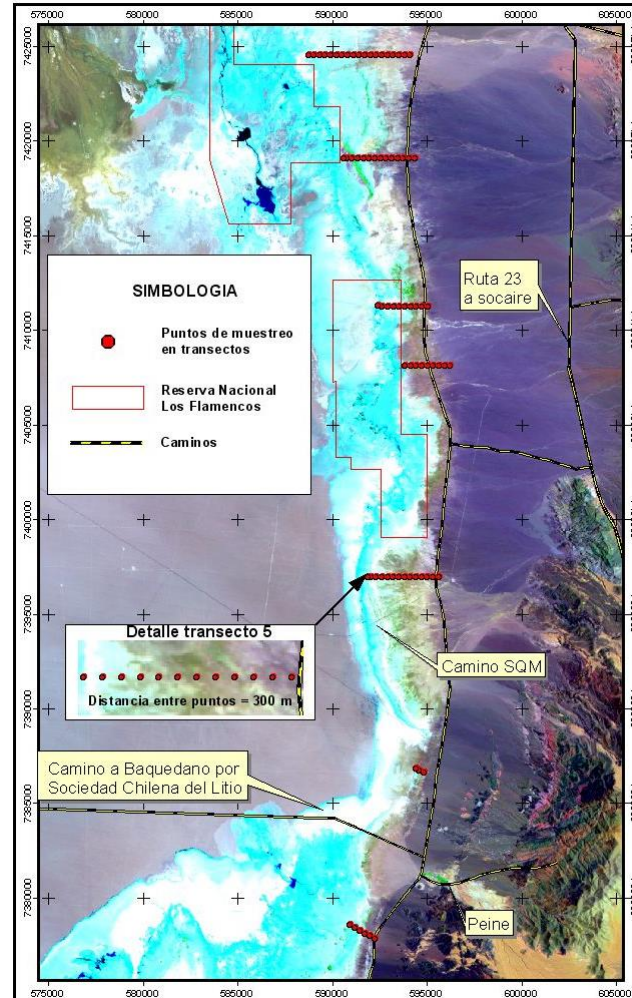
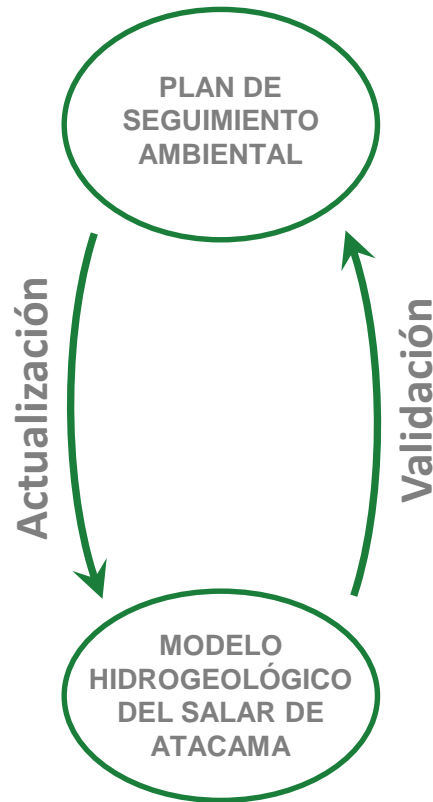
Amplia red de control:

225 puntos de monitoreo

- 7 calicatas
- 105 pozos someros
- 84 pozos profundos
- 5 pozos bombeo agua dulce
- 18 reglillas (agua superficial)
- 4 aflors agua superficial
- 2 estaciones meteorológicas

48 puntos de medición continua

Plan de Seguimiento Ambiental Biótico (PSAB)



Seguimiento de variables relevantes para verificar el estado de la vegetación, flora, fauna y vida acuática en los ecosistemas a proteger:

- Imagen satelital anual para cobertura de vegetación
- 99 parcelas de registro estado de vegetación
- 75 parcelas de registro de flora
- 18 puntos de muestreo de humedad del suelo
- Caracterización de suelos
- 18 estaciones de muestreo de fauna (avifauna, mamíferos, reptiles)
- 25 estaciones de muestreo vida acuática (Soncor, Peine y Aguas de Quelana)
- Censos de flamencos con Conaf
- Seguimiento ciclo reproductivo de flamencos

El conjunto de las herramientas de gestión

REDES DE MONITOREO



Plan de Seguimiento Ambiental
Plan de Contingencia
Monitoreo Operativo
Monitoreo Complementario

ESTUDIOS TÉCNICOS ESPECIALIZADOS



Generar/Actualizar el conocimiento del funcionamiento del Salar de Atacama, especialmente desde el punto de vista hidrogeológico y biótico.

NUEVAS TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS



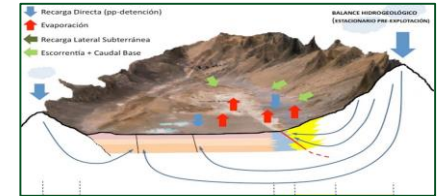
Estar a la vanguardia de los avances técnicos y tecnológicos que permitan optimizar las acciones como una opción de mejora continua para la compañía.

INCORPORACIÓN DE OTRAS FUENTES



Incluir los datos generados por otras fuentes públicas y privadas como parte de la integración del conocimiento del Salar de Atacama.

- Equipo e instrumentación propia.
- Personal/Consultor externo.
- Asesores nacionales e internacionales.
- Personal interno calificado



MODELO HIDROGEOLÓGICO SALAR DE ATACAMA



Oportunidad y Objetivos para la cuarta actualización del modelo

Oportunidad

1. Optimizar el conocimiento de los recursos hídricos del Salar.
2. Integrar la gestión de los aspectos productivos con diversos aspectos ambientales y socioeconómicos de la zona.
3. Conocer y cuantificar cómo funciona el balance hídrico general de la cuenca del Salar.
4. Disponer de una herramienta de gestión que contribuya a asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas del salar.

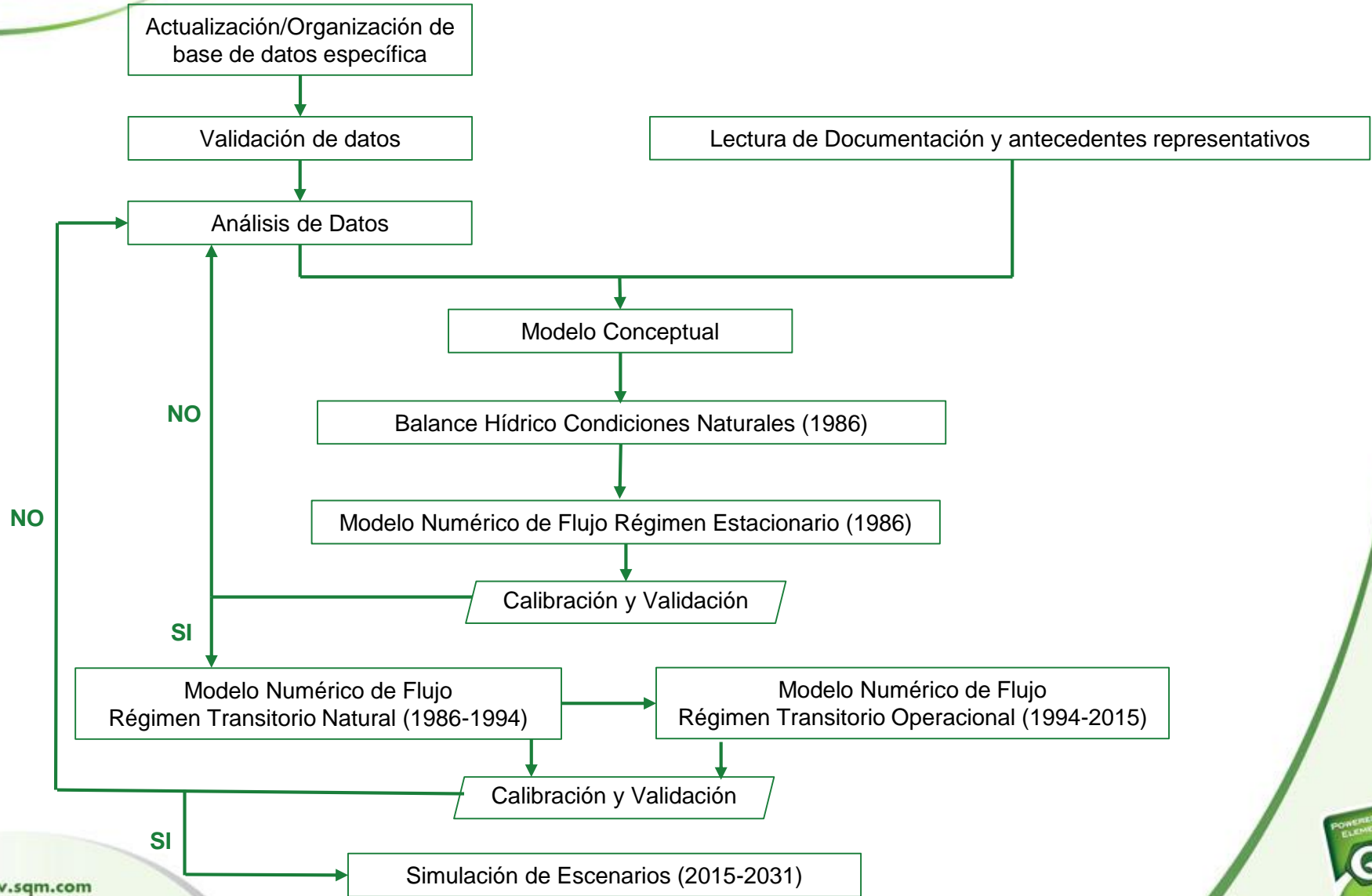
Existe numerosa información, con diversos enfoques y escalas de trabajo, se centra en aspectos específicos y en ocasiones los resultados no son coincidentes. → En consecuencia:

1. La integración es compleja y necesaria al mismo tiempo para poder dar respuestas unívocas a las interrogantes y contar con una nueva y más sólida base de partida

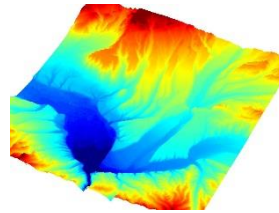
Objetivos

1. Abordar las incertidumbres antes mencionadas y definir un modelo conceptual sólido.
2. Integrar la información disponible.
3. Proporcionar un marco cuantitativo a la evaluación de riesgos o impactos ambientales y disponer de una herramienta de gestión.
4. Contextualizar y proporcionar un marco de referencia a otros estudios o modelos de mayor detalle.

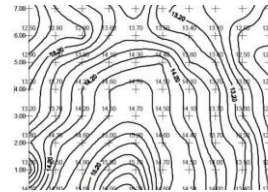
Metodología de modelación



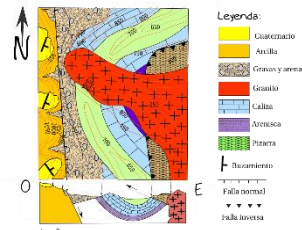
La hidrología



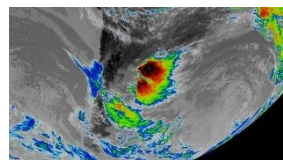
Modelos Digital de Elevación



Topografía e Hidrografía



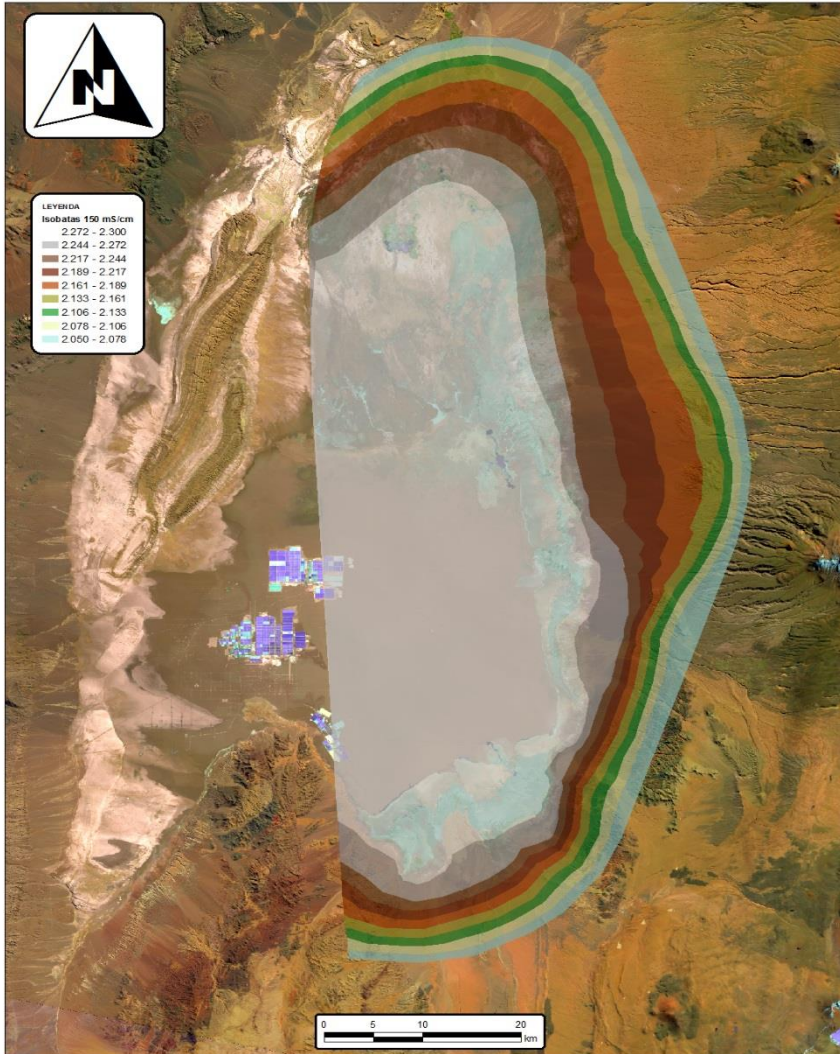
Geología



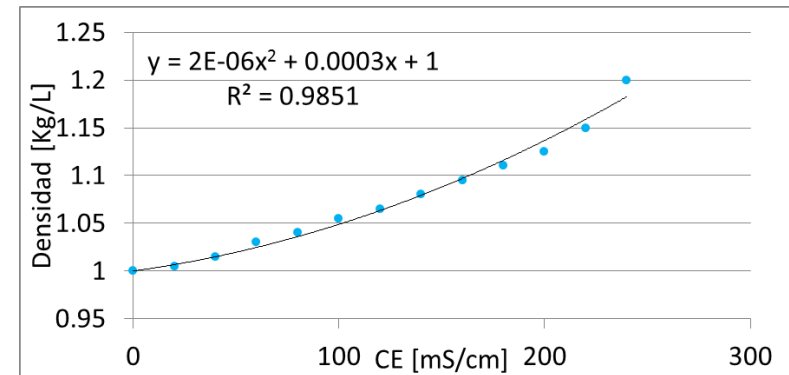
Imágenes Satelitales

UNIDADES HIDROLÓGICAS DE ANÁLISIS (UHA)

UNIDAD	SUPERFICIE (km ²)	Nº UNIDADES
Zona Núcleo	1328,1	1
Zona Marginal	1648,03	4
Zona Aluvial	2219,45	14
Zona de Subcuencas	11550,5	224
Zona Arréica	252,3	16

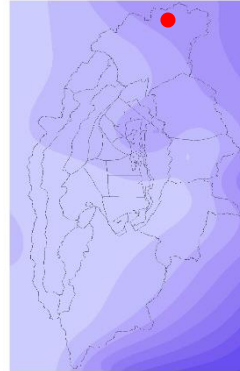
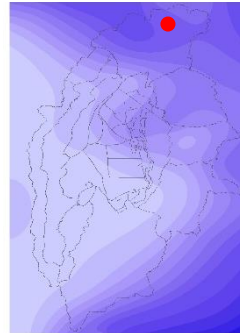
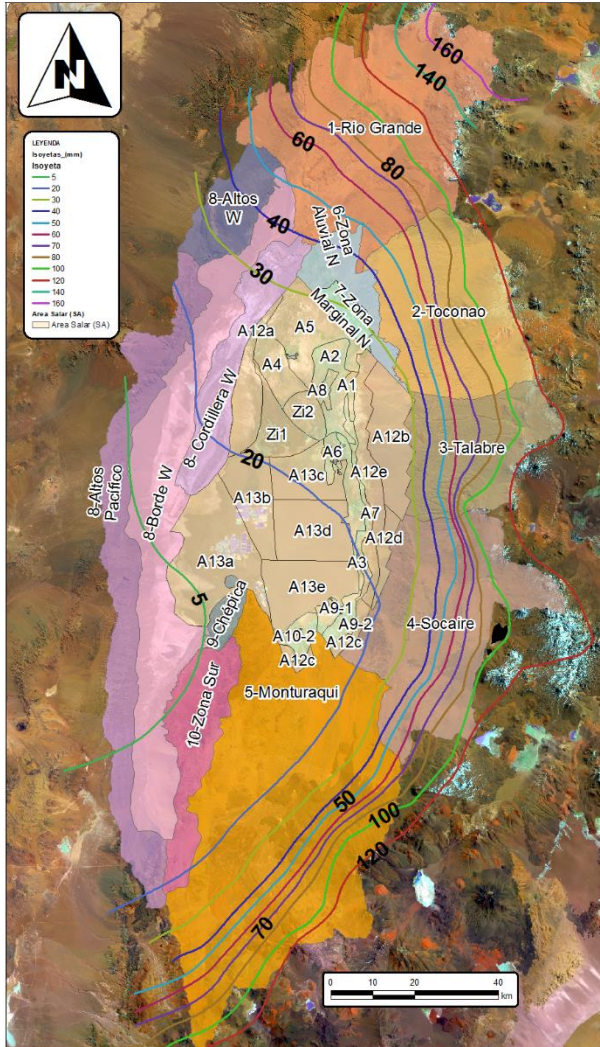


- Inventario, análisis y tratamiento de datos de nivel de más de 540 pozos. Corrección de niveles por densidad variable.

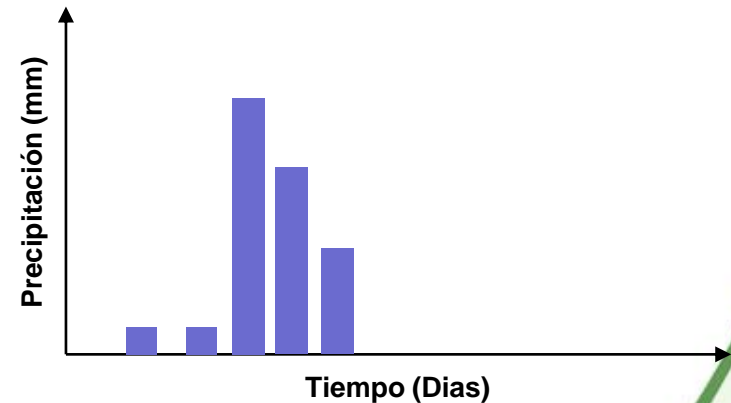


- Análisis de parámetros físico-químicos, isotópicos. Análisis de la interfaz salina.
- Análisis de pruebas de bombeo actuales e históricas, propias y de terceros.

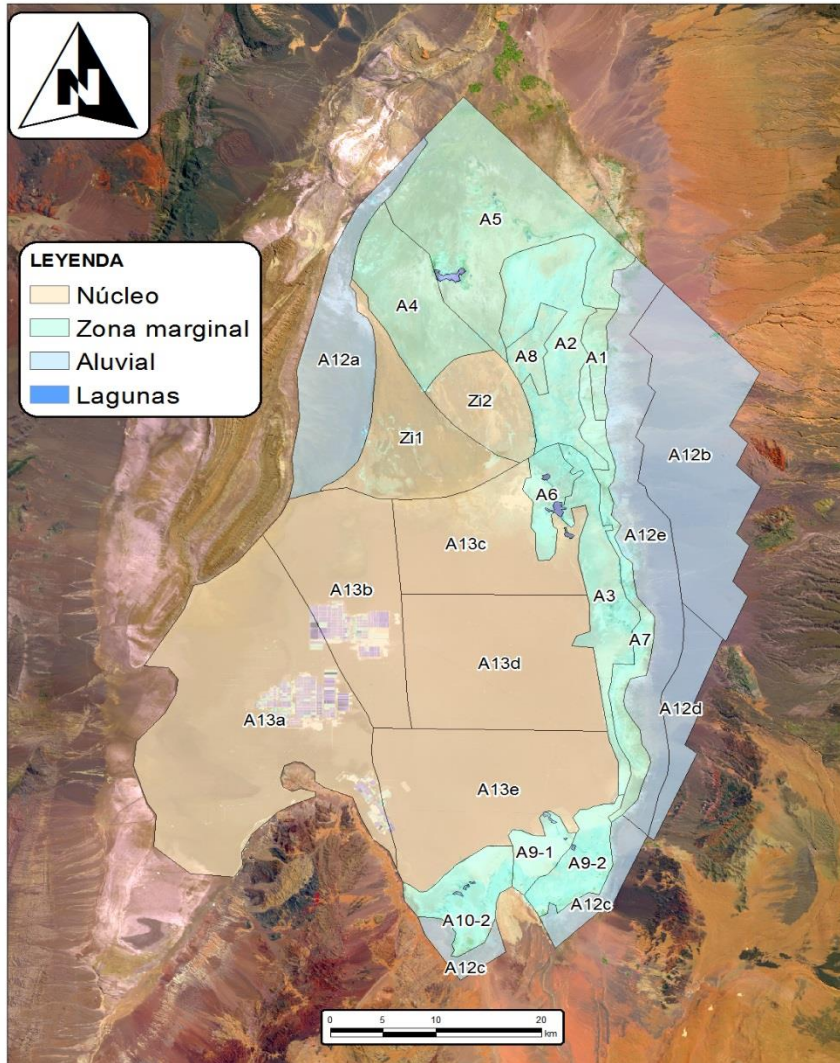
La recarga



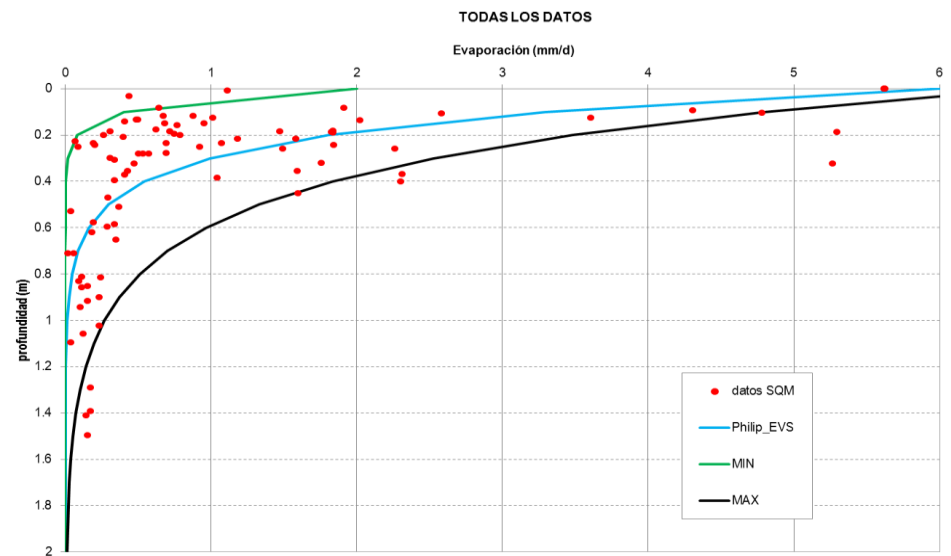
- Análisis estadístico de datos de caudales.
- Análisis estadístico de datos de precipitación.
- Generación de mapa de isoyeta promedio (1978-2015) y dominios de recarga por características morfométricas similares.
- Cálculo de la recarga a partir del análisis de los eventos diarios de precipitación. Generación de mapas de isoyetas por eventos desde 1978 al presente.



La evaporación

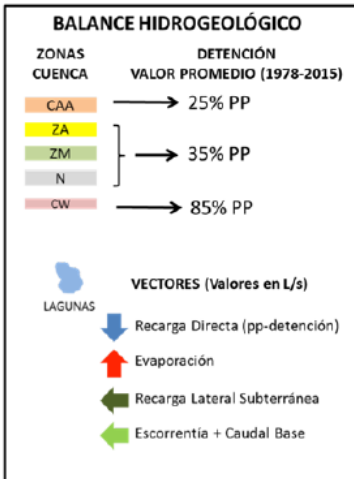
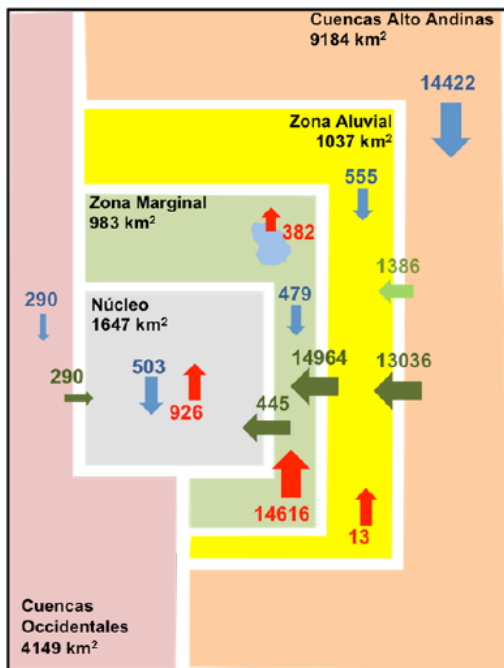


- Análisis crítico de antecedentes históricos y actuales: datos de evaporación medidos con domo, lisímetros, niveles históricos, isotopía, etc.
- Mediciones in situ con lisímetros y domo.
- Zonificación de la evaporación de acuerdo a las características litológicas y nivel.

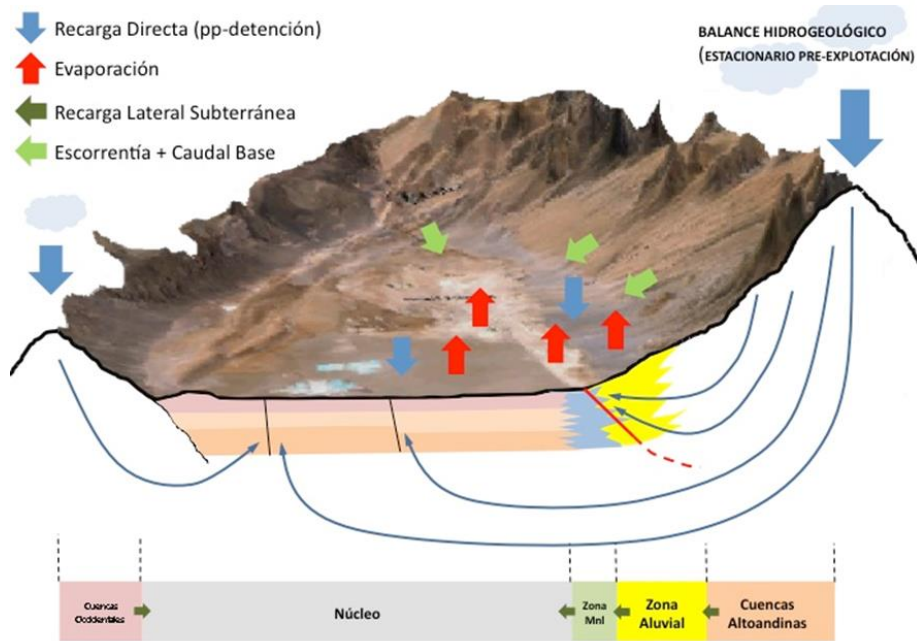


El balance hídrico en el modelo conceptual

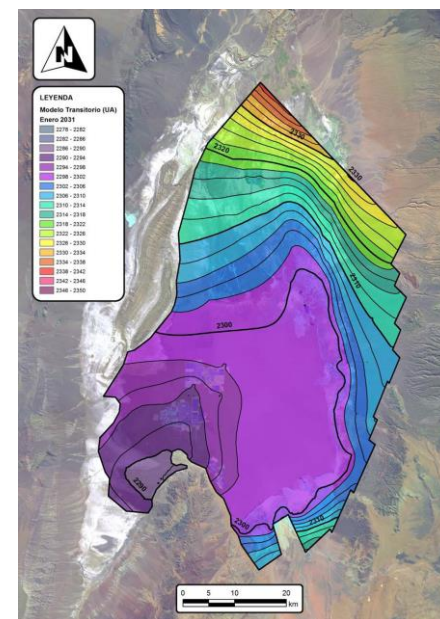
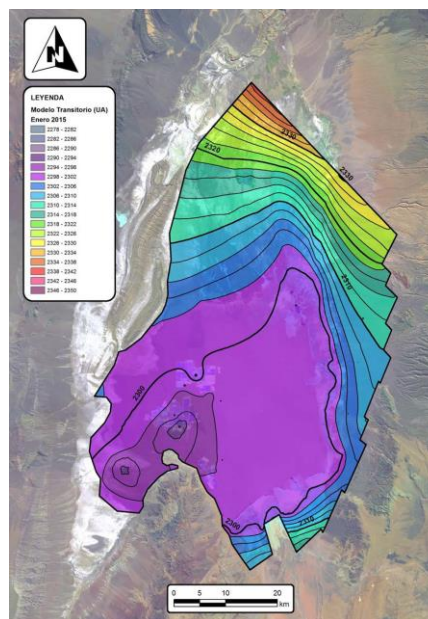
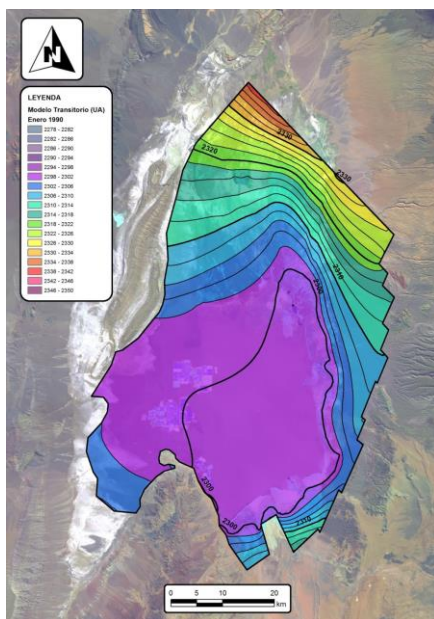
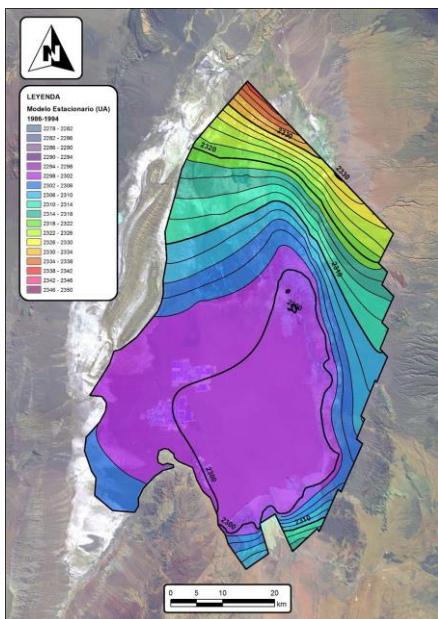
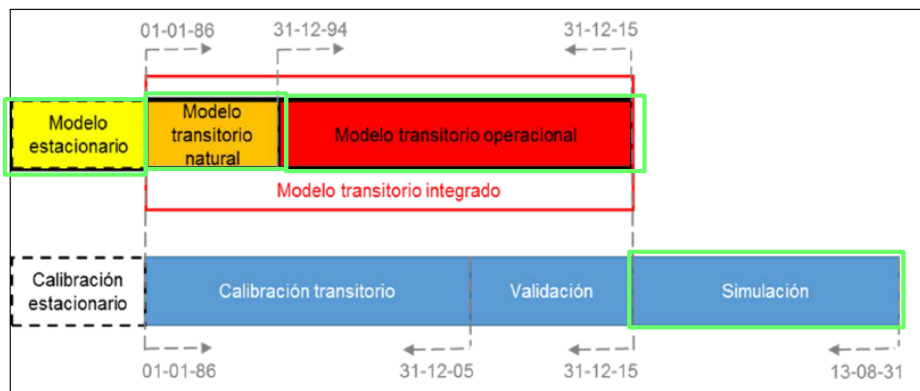
BALANCE HIDROGEOLOGICO (ESTACIONARIO PRE-EXPLOTACIÓN)



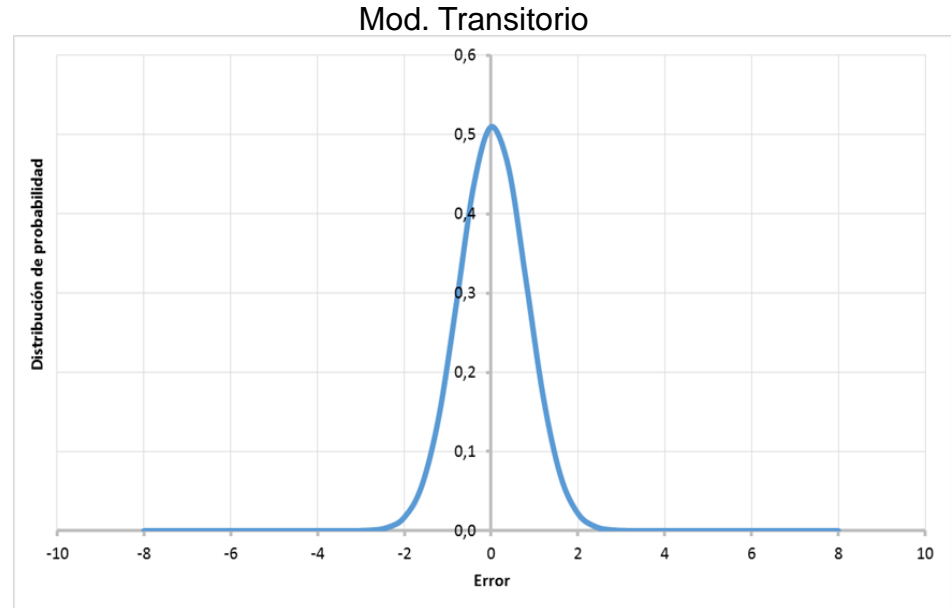
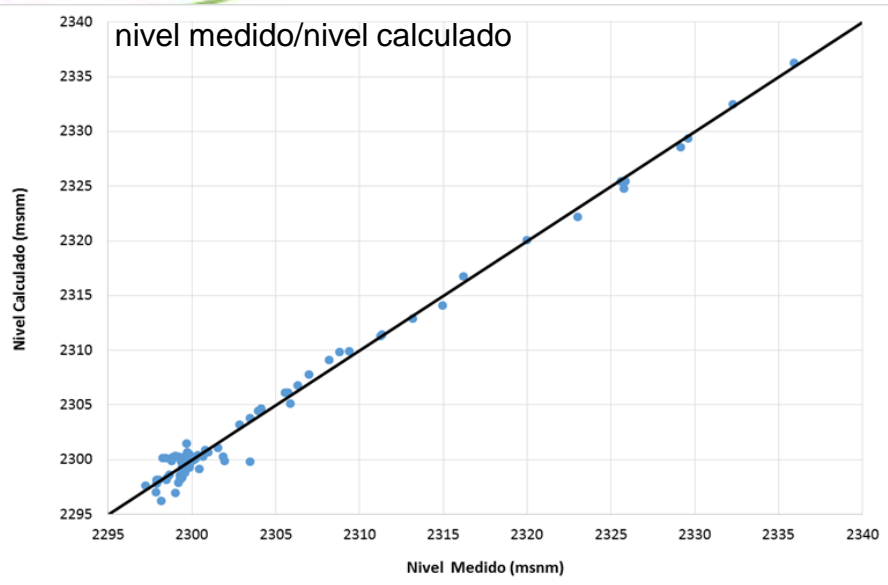
ZONA	ENTRADAS	SALIDAS
Alte NEy E	18915	
Alte S	3507	
Aluvial	555	13
Marginal	479	14616
lagunas		382
Núcleo	503	926
Deste	290	
	16247	15936



El marco temporal en el modelo numérico

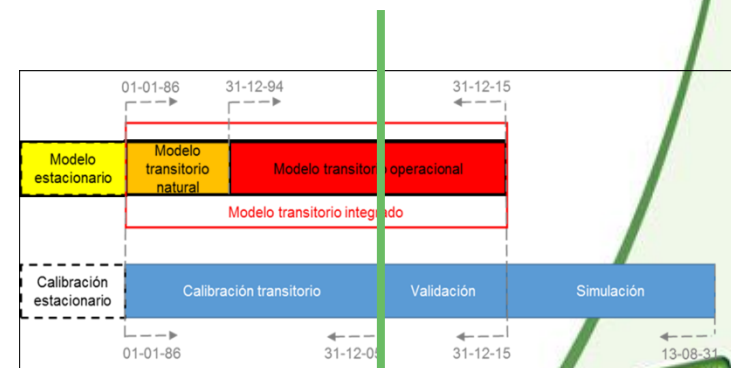


Los resultados del modelo numérico



ESTADISTICOS

- Número de pozos: 117
- Número de medidas: 127.671 (01-01-1986 a 31-12-2006)
- Promedio errores residuales (metros): 0,037
- Error medio absoluto (MAE)(metros): 0,54
- Desviación Estándar (metros): 0,78
- Raíz del error cuadrático medio (RMS)(metros): 0,61
- Error medio absoluto normalizado (MAE_N): 0,10 %
- Raíz del error cuadrático medio normalizado (RMS_N): 1,57 %



Conclusiones Generales

Respecto de la gestión ambiental

- La gestión ambiental sustentable de los objetos de protección debe hacerse mediante uso conjunto de todas las herramientas de gestión, destacando los planes de seguimiento ambiental y la modelación numérica como ejes centrales
- Las herramientas de gestión pueden y deben actualizarse continuamente para incorporar avances técnicos, metodológicos y la nueva información recopilada

Respecto de la actualización del modelo ambiental hidrogeológico

- La síntesis de todos los antecedentes y de la nueva información acumulada mediante las distintas herramientas de gestión, destacando el PSAH, permite revisar críticamente la validez del modelo conceptual sobre el cual se basa la modelación numérica
- El anterior ejercicio es clave para contar siempre con la visión más actualizada del funcionamiento de un sistema complejo y dinámico como el Salar de Atacama
- La visión actualizada y sin prejuicios del sistema bajo protección garantiza la mejor sostenibilidad medioambiental y económica
- Cada actualización del modelo es al mismo tiempo un punto de llegada (síntesis del conocimiento) y de partida, porque permite cuestionar críticamente la visión del sistema y adoptar siempre el mejor enfoque y optimizar los recursos de investigación y control

Conclusiones Generales

Respecto de los resultados alcanzados y más destacables

- La evaporación presenta una relación exponencial con la profundidad de la superficie freática, justificada previamente en distintos trabajos de campo y experimentales y sintetizada en el presente informe .
- Se ha integrado todo el análisis en un modelo conceptual que incluye el cálculo del balance hídrico en condiciones de pre-explotación, resultando valores de entradas – salidas del orden de 16.000 L/s.

Respecto del nuevo modelo numérico en Feflow, existen claras ventajas, entre las cuales

- Incorporación de estructuras geológicas mediante un mallado no estructurado.
- Refinar la malla adaptándose a los elementos o zonas de interés (pozos, fallas, lagunas, interfaz salina, entre otros).
- Optimizar el número de elementos en un modelo regional de grandes dimensiones, pero sin prescindir de la precisión de cálculo en el entorno de dichas zonas.
- Finalmente, el dominio ha quedado dividido en más de 250.000 elementos

Conclusiones Generales

Respecto de la modelación numérica en estado estacionario pre operacional

- Se realizó una corrección por densidad variable considerando la densidad de la salmuera del núcleo como valor de referencia. Esto es necesario para evaluar de forma integrada la respuesta del sistema hídrico a las principales intervenciones en el Salar.
- El sistema Sónkor recoge el agua proveniente de afloramientos ubicados en el sector NE del Salar, y reboses de la interfaz, que luego confluyen a lo largo del Canal del Burro Muerto y finalmente a las lagunas de Chaxa y Barros Negros.
- Los valores de recarga y evaporación (Balance) obtenidos por el modelo son coincidentes con los calculados en el balance hídrico previo (diferencia del 11%) lo que se considera un muy buen resultado.

Respecto de la modelación numérica en estado transitorio pre operacional (1986-1994), operacional (1995-2015)

- la recarga puede separarse en dos componentes:
 - a. la recarga producida en las zonas montañosas presenta efectos a muy largo plazo y quedan muy amortiguados a escala regional
 - b. la recarga directa sí muestra una clara influencia en la evolución de los niveles piezométricos del núcleo y zona marginal del Salar de Atacama.
- Durante el periodo operacional se han considerado los efectos de las explotaciones de salmuera y agua industrial llevadas a cabo por las empresas SQM y ALB desde el año 1994 hasta finales del año 2015

Conclusiones Generales

Respecto de la modelación numérica en estado transitorio pre operacional (1986-1994), operacional (1995-2015 (2)

- La calibración integrada de los modelos estacionario y transitorio (etapa natural y operacional) se considera muy satisfactoria:
 - a. Buen ajuste de parámetros previos. Se han obtenido valores de S_s y K coherentes con la información previa
 - b. Se reproduce el Balance hídrico calculado, se han tenido que modificar levemente los valores de recarga lateral y evaporación respecto a los cálculos previos, la desviación no supera más que el 11%
 - c. Muy buen ajuste entre niveles calculados y medidos. Los estadísticos revelan errores muy bajos.

Respecto de la modelación numérica a futuro (2031) según los planes de explotación previstos

- A través de la simulación a futuro se realiza una predicción de la evolución de la superficie piezométrica, donde:
 - a. Repetición de la serie climática entre los años 1988 y 2002, considerado ésta como un ciclo climático completo y representativo de las últimas décadas.
 - b. Previsiones de explotación de salmuera por parte de SQM y ALB hasta el año 2031.
- La zona central y especialmente, la zona oriental del núcleo, mantienen unos niveles relativamente estables durante todo el periodo simulado, siendo esperables descensos del orden decimétrico en la zona central, y del orden centimétrico o inapreciables en la zona oriental y marginal.
- Es un modelo regional que reproduce adecuadamente las tendencias generales del conjunto del sistema hidrogeológico del Salar de Atacama y por tanto constituye una herramienta eficaz de apoyo en la gestión de los recursos del Salar

Metodología y resultados para cálculo de reservas de litio y potasio en las pertenencias OMA en arriendo a SQM

Foro del Litio
Agosto 2017

OBJETIVOS DEL TRABAJO E ÍNDICE DE LA PRESENTACIÓN

Cuantificación de Recursos de Litio y Potasio

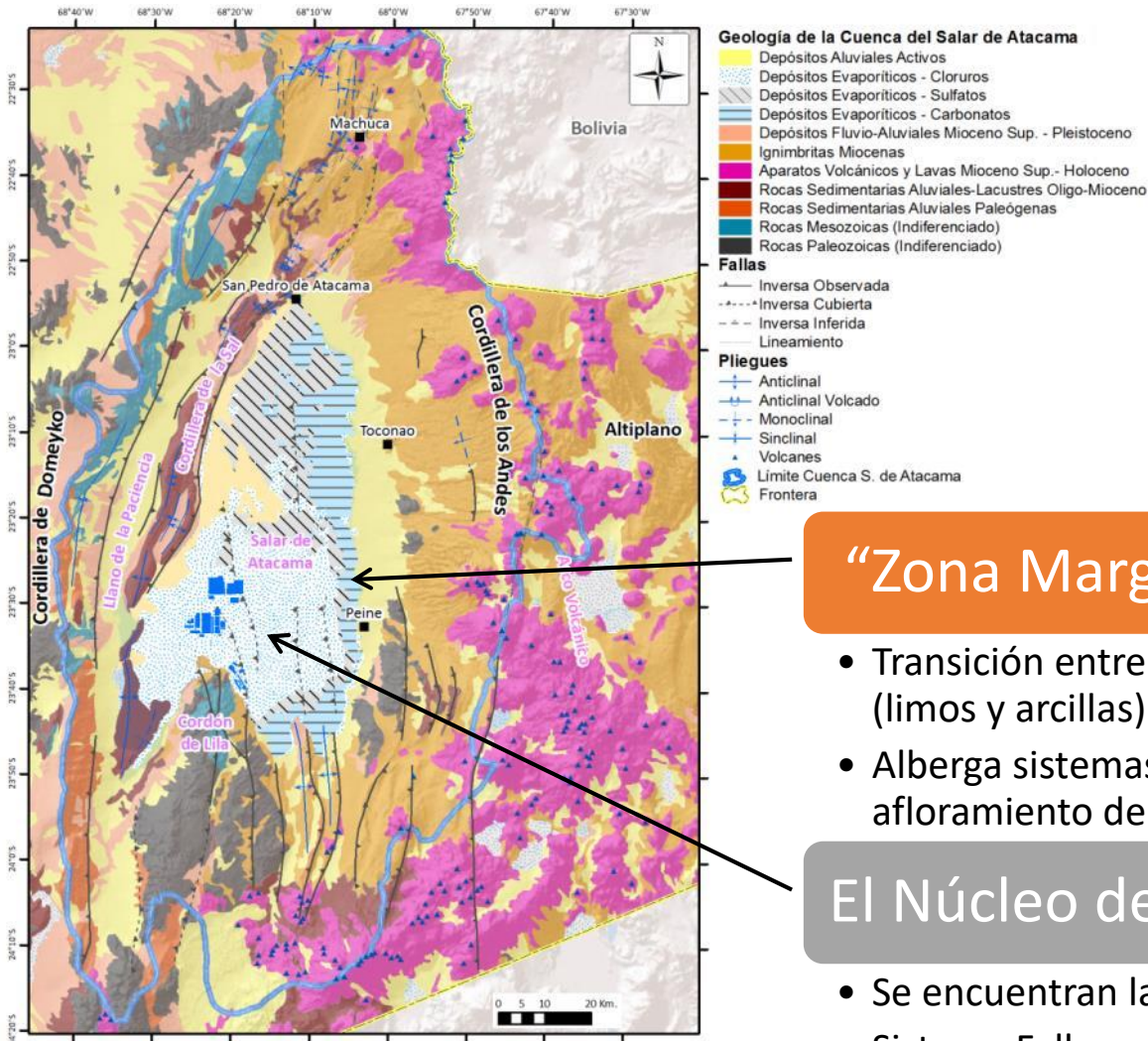
- Estimación de la porosidad y volumen de salmuera
- Distribución espacial y cuantificación de recursos (**Litio** y Potasio disuelto en salmuera)
- Clasificación de los recursos

Caracterización de la solución reinyectada (Existencia y factibilidad de extracción)

- Bitterns, Pozas y Acopios

Estimación del recurso/reserva remanente a 31/12/2030

SALAR DE ATACAMA: CONCEPTUALIZACIÓN GEOLÓGICA



“Zona Marginal” (1,480 Km²)

- Transición entre zonas de depósitos clásticos distales (limos y arcillas) y facies evaporíticas de CO₃, SO₄ y Cl
- Alberga sistemas lacustres producidos por el afloramiento de la cuña salina y flujos desde el norte.

El Núcleo de Halita (1,290 Km²)

- Se encuentran las salmueras enriquecidas en Li y K
- Sistema Fallas que controla la geometría en la vertical y el comportamiento hidrogeológico en subsuperficie

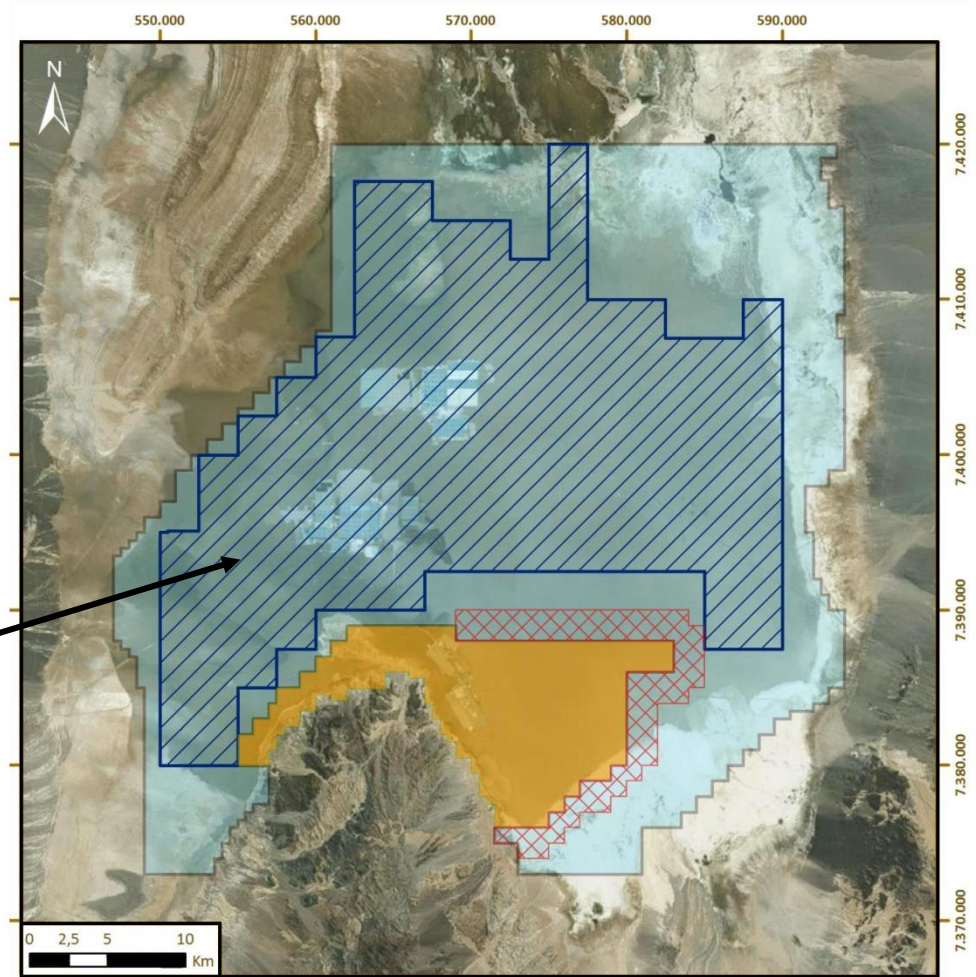
ÁREA EVALUACIÓN: SUBÁREA DENTRO DEL NÚCLEO

Contrato 1993

- 29.424 Pertenencias (147.120 Ha)
 - 16.384 Pertenencias para exploración y extracción (81.920 Ha)
 - 11.670 Pertenencias para exploración (65.200 Ha)
 - 1.370 Pertenencias Tierra de Nadie (6.850 Ha)

OMA en Arriendo (Exploración y Explotación) – Presente estudio

- **16.384 Pertenencias**
- **81.920 Ha**

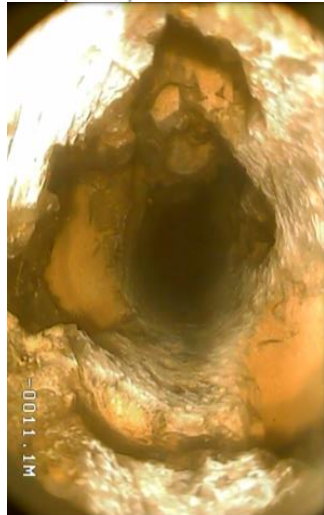
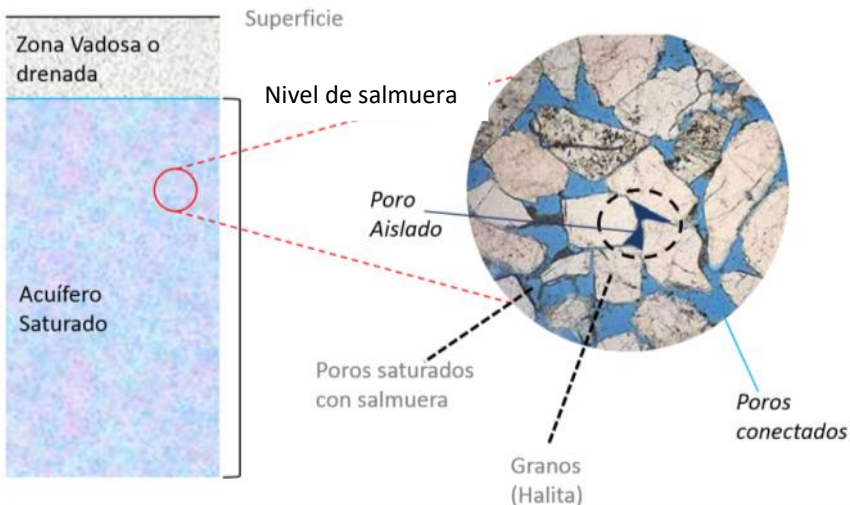


SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA

- 3.344 Pertenencias OMA (Sociedad Chilena del Litio)
- 1.370 Pertenencias OMA (Tierra de Nadie)
- 16.384 Pertenencias OMA para labores de explotación
- 29.424 Pertenencias para labores de exploración

LA SALMUERA

¿Dónde está presente?



Principales Unidades Geológicas

Unidad Geológica	Litología	Espesor (bloque Oeste – bloque Este Falla Salar)
Acuífero Superficial	Halita Superior	~ 20 - 30 m bajo la superficie
Acuífero Intermedio	Halita Intermedia	~ 25 - 350 m bajo Acuífero Superficial
Acuífero Profundo	Yesos y halitas	~ 50 - 100 m bajo Acuífero Intermedio

Porosidad Efectiva

(extraíble)

$$\phi_e = \frac{\text{Vol. salmuera en poros conectados}}{\text{Volumen total}}$$

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS

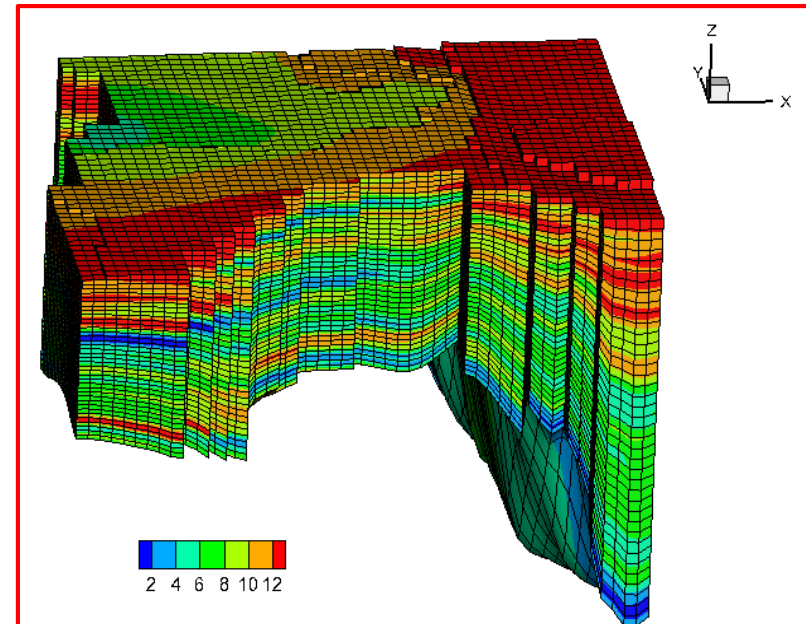
Recurso in situ: es el recurso evaluado a través del volumen potencialmente extraíble de salmuera considerando los valores de porosidad efectiva (*Houston et al., 2011*).

- ❑ **Distribución espacial de la porosidad (modelo de bloques, geometría 3D)** [$\phi_e(x)$]
- ❑ **Distribución espacial de la concentración de Litio y Potasio (modelo de bloques)** [$C(x)$]
- ❑ **Cálculo de la reserva por integración:**

$$R = \iiint_D \phi_e(x) C(x) dx$$

Donde D es el área de estudio (OMA extracción)

- Modelo tridimensional de bloques
- Número total de bloques: 4.920.000
- Dimensiones bloque: 200 m × 200 m × 2.5% espesor unidad
- Solamente se considera la zona saturada con salmuera



METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS

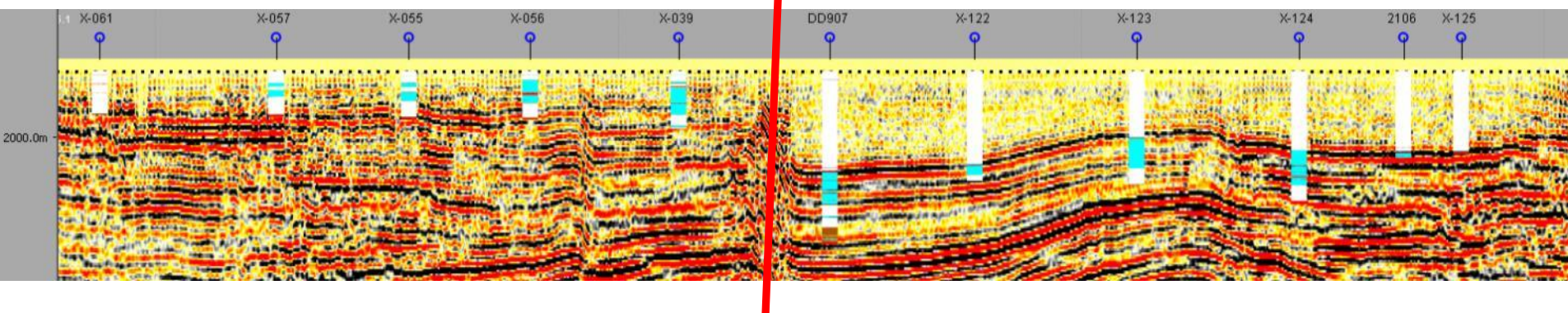
Distribución espacial de la porosidad y concentraciones mediante **técnicas geostatísticas** de krigiado

Obtención de variogramas y krigiado mediante el código SGeMS (Remy et al., 2009)

Metodología tradicional modificada para incluir **cuerpos curvilíneos pero que mantienen la continuidad espacial** (técnica novedosa a nivel mundial).

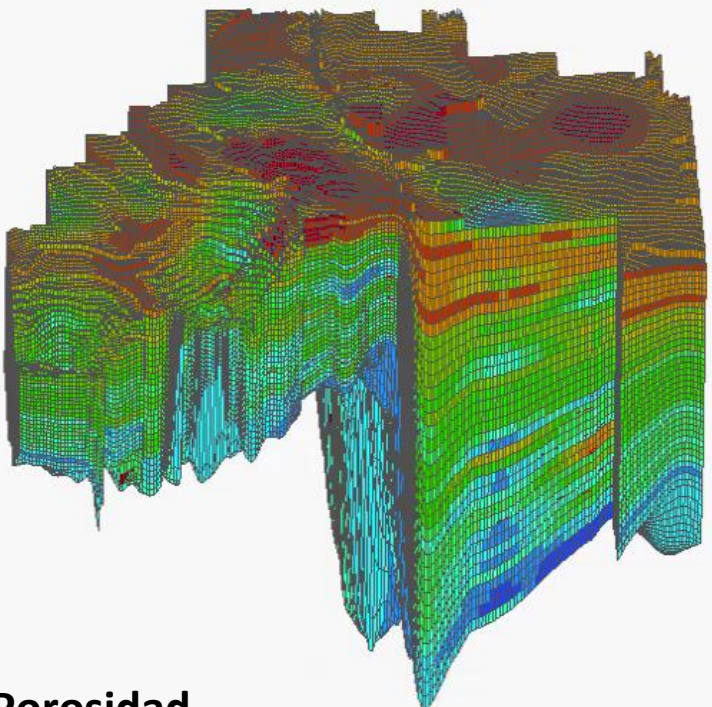
- Transformación de coordenadas UTM a coordenadas locales.
- Estimación de variogramas con el software de SGeMS.
- Krigiado del mapa de porosidades y concentraciones con SGeMS.
- Transformación inversa de coordenadas locales a UTM.

Registro de Sísmica: **Corte Oeste-Este**, contrastado con los datos de perforaciones



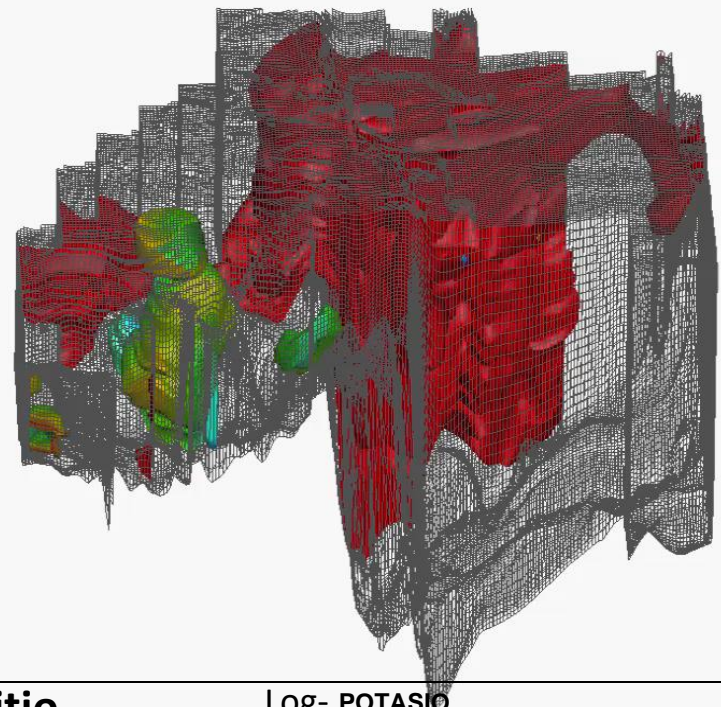
METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS

Modelo de bloques de la Unidad superficial con 1,640,000 bloques Escala vertical exagerada (x800)



Porosidad

	Valores medios porosidad (%)
Unidad Superficial	7.57
Unidad Intermedia	4.96
Unidad Profunda	4.53



Litio

Bolsa	Log- POTASIO			
	Promedio		Varianza	
	Datos	Krigeadó	Datos	Krigeadó
Unidad superficial	0.47	0.44	0.098	0.066
Unidad intermedia	0.81	0.79	0.137	0.014
Unidad profunda	0.86	0.59	0.134	0.400

	Log- LITIO			
	Promedio		Varianza	
	Datos	Krigeadó	Datos	Krigeadó
Unidad superficial	-2.15	-2.14	0.114	0.074
Unidad intermedia	-1.84	-1.86	0.189	0.029
Unidad profunda	-1.61	-1.97	0.148	0.155

ESTIMACIÓN DE RECURSOS: CLASIFICACIÓN

Se clasifica en recurso **medido**, **indicado** e **inferido** según fiabilidad de los datos y conocimiento geológico

Criterios de Clasificación

- Geoestadístico →
Coeficiente de Variación
Recurso medido < CV de 1/3
CV de 1/3 < **Recurso indicado** > CV de 1/2
Recurso inferido > CV de 1/2
- Hidrogeológico →
Conocimiento de la unidad hidrogeológica (N° Datos)

Si no hay suficientes sondajes se penaliza y reclasifica:

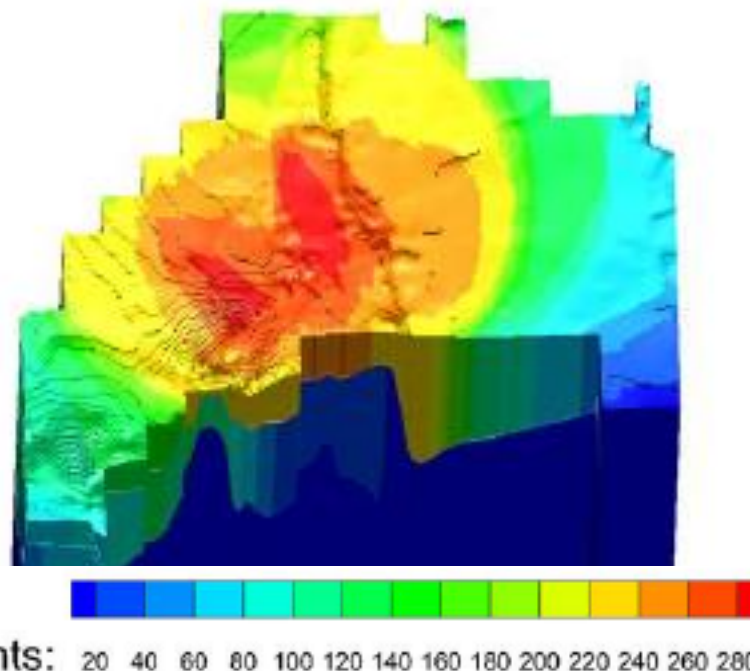
Medido → Indicado

Indicado → Inferido

Grado de incertidumbre en la estimación:

$$CV(\mathbf{x}) = \frac{\sigma_{Krigado}(\mathbf{x})}{\mu_{Krigado}(\mathbf{x})} \approx \frac{\text{error estimación}}{\text{valor estimado}}$$

Número de sondajes en un entorno (rango)



CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS Y ESTIMACIÓN DE LA RESERVA BASE

	Recurso	K (Mt)	Li (Mt)
Unidad Superficial	Medido	25.13	1.89
	Indicado	1.07	0.08
	Inferido	0.00	0.00
Unidad Intermedia	Medido	28.15	2.17
	Indicado	68.50	5.04
	Inferido	100.70	7.36
Unidad Profunda	Medido	0.00	0.00
	Indicado	0.00	0.00
	Inferido	169.37	9.66

Recurso Total	K (Mt)	Li (Mt)
Medido	53.28	4.06
Indicado	69.57	5.12
Inferido	270.17	17.02

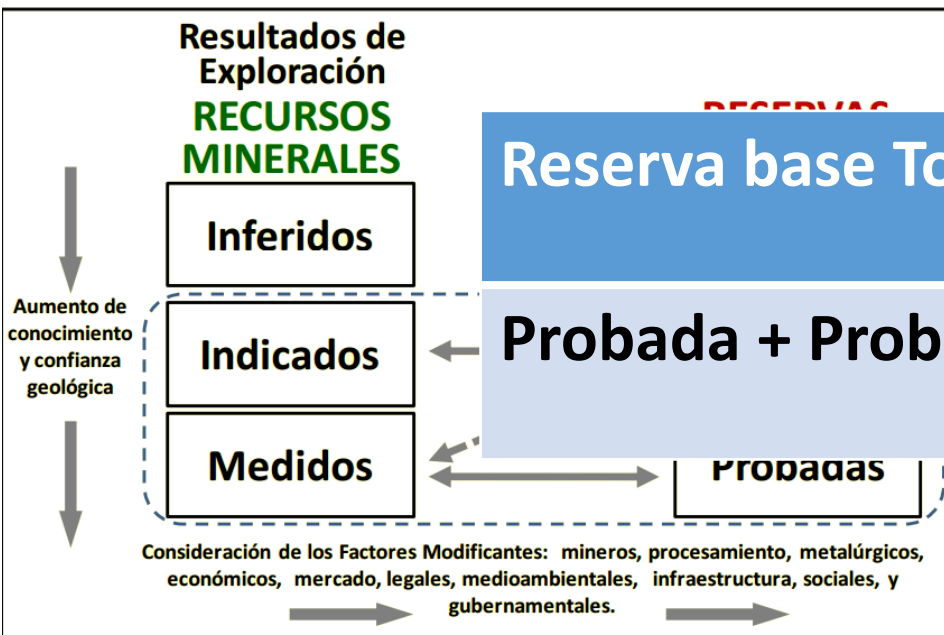
Mt = Millones de toneladas

Se ha aplicado una Ley de Corte de 1% de potasio y de 0.05% de Litio.

Reserva: Porción del recurso extraíble económicamente. Se basa en estudios de

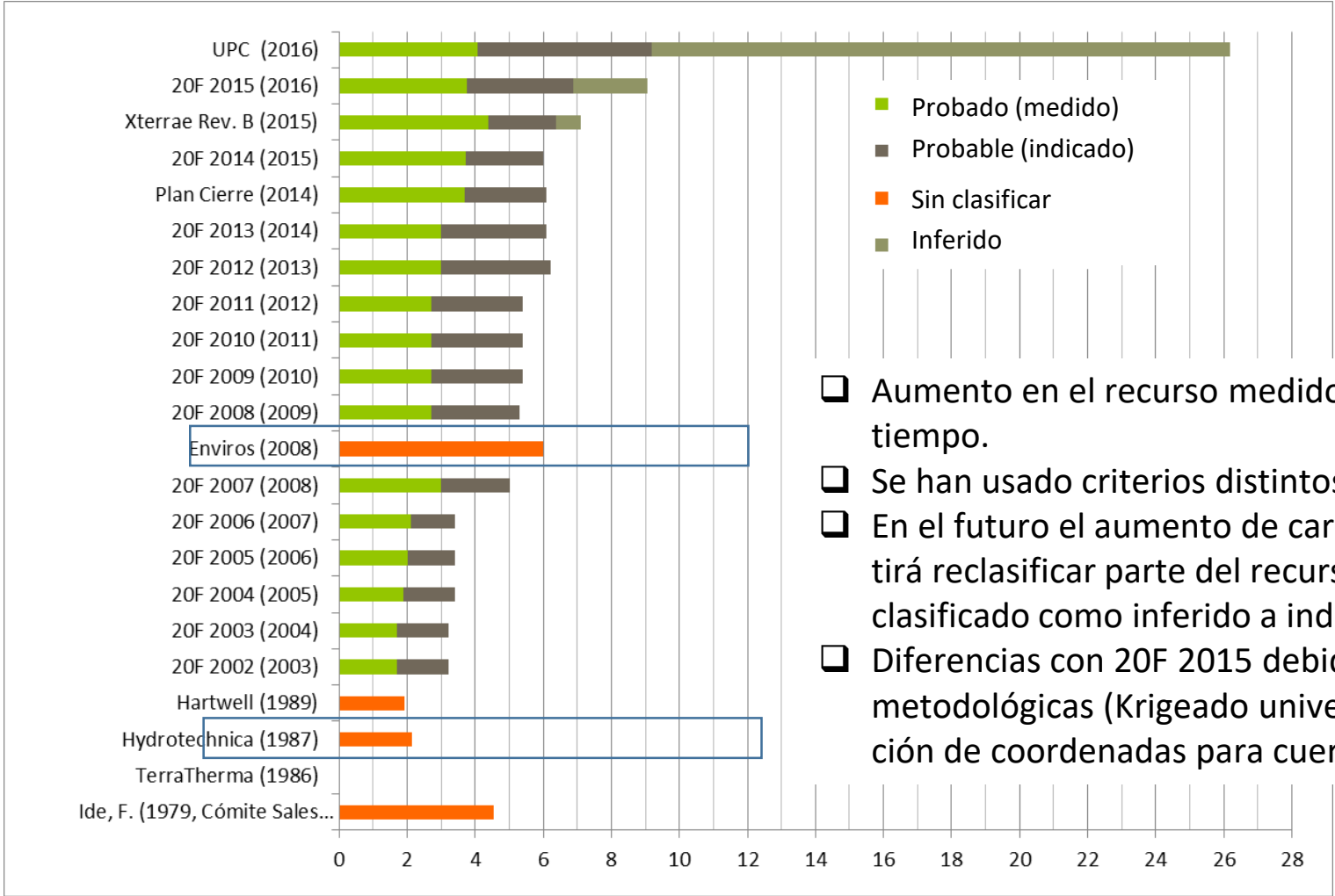
otros
comerciales, ...
teórico

Reserva base Total	K (Mt)	Li (Mt)
Probada + Probable	122.85	9.18



ESTIMACIÓN DE LA RESERVA BASE: COMPARATIVA

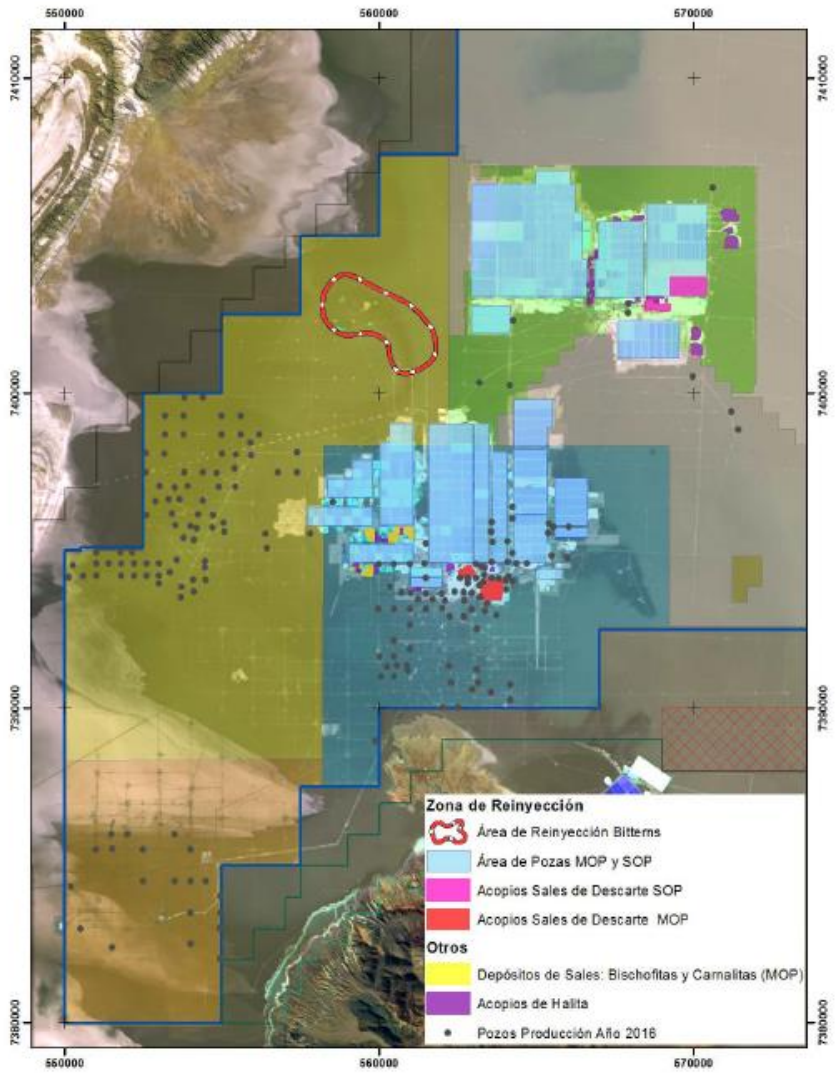
Comparación con otros estudios: Litio



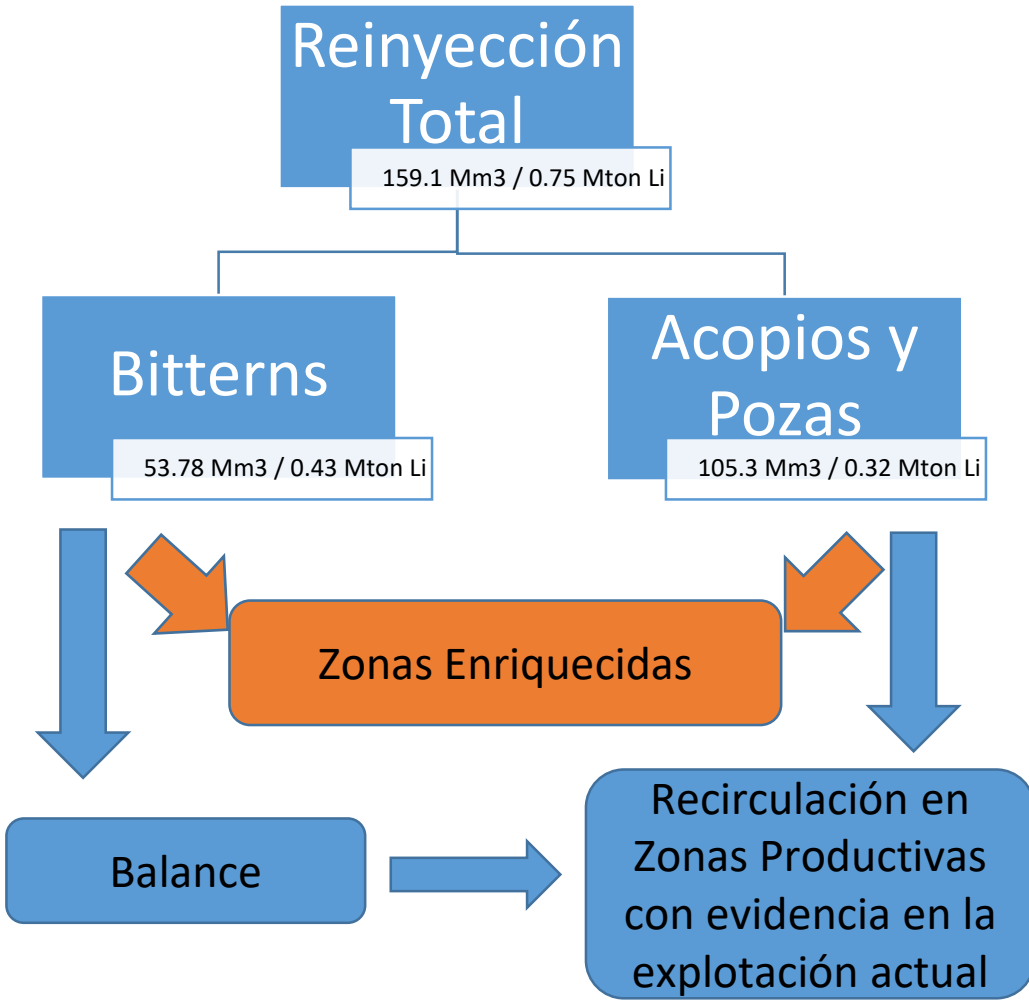
Millones de Toneladas de Litio

- Aumento en el recurso medido + indicado en el tiempo.
- Se han usado criterios distintos (p.e. ley de corte)
- En el futuro el aumento de caracterización permitirá reclasificar parte del recurso actualmente clasificado como inferido a indicado o medido.
- Diferencias con 20F 2015 debido mejoras metodológicas (Krigado universal + transformación de coordenadas para cuerpos curvilíneos)

CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA



Información histórica de operaciones de SQM entre 1996 y 2015



CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA

Consideraciones previas:

- ❑ **En las condiciones del Salar, el Litio se comporta como un soluto conservativo, es decir:**
 - ❖ No se degrada por procesos bioquímicos
 - ❖ No se evapora
 - ❖ No se transforma en otro compuesto o elemento

- ❑ **Por ese motivo, el Litio reinyectado en solución se mantiene en el sistema hidrogeológico**

Esto nos plantea dos preguntas

¿Dónde está la solución reinyectada?

¿Es factible su extracción?

CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA

Primer Método

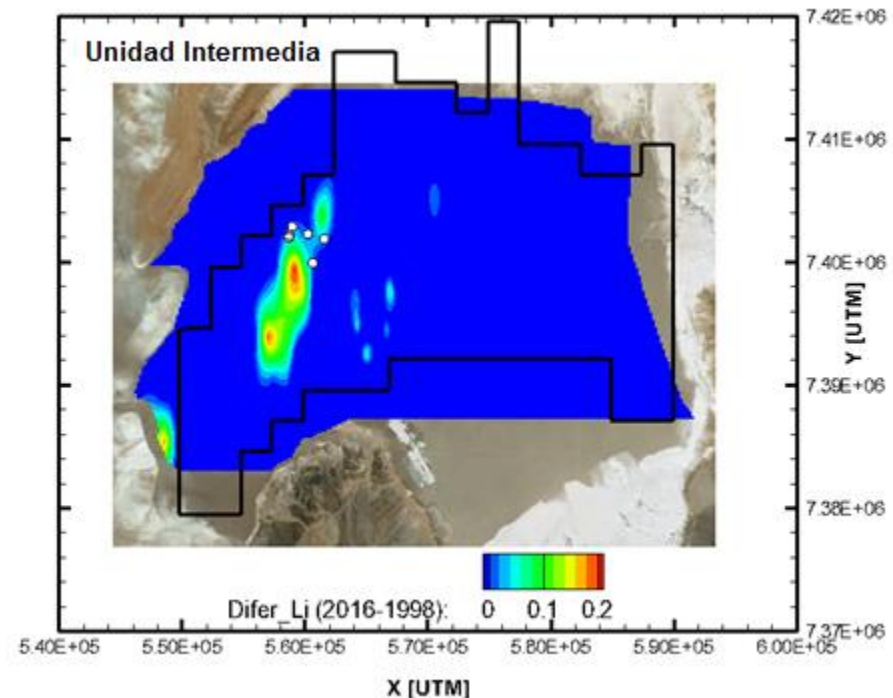
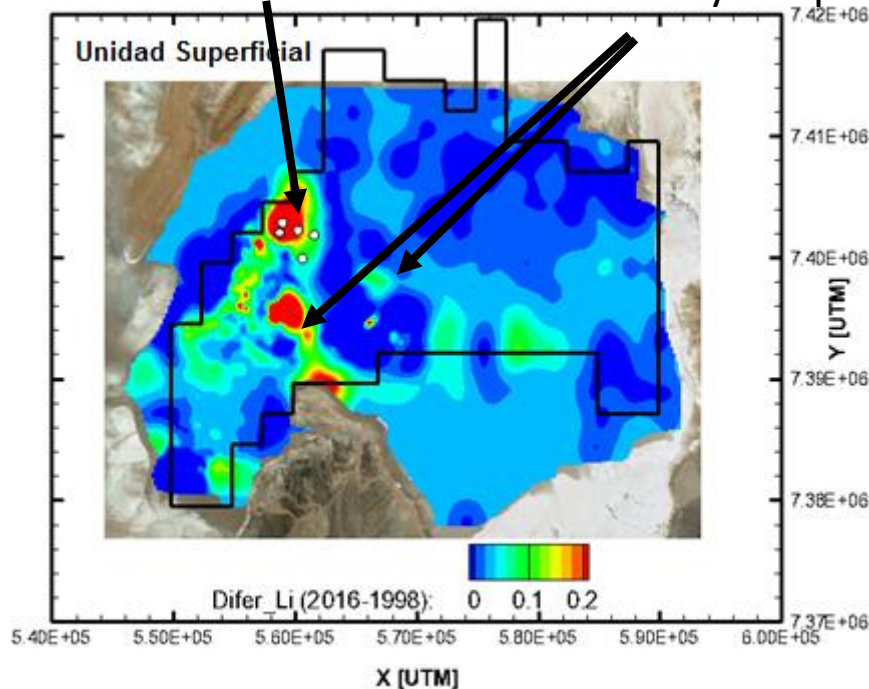
Distribución espacial de Litio reinyectado

Por diferencia de concentraciones $\Delta C_{Li}(x) = C_{Li}(x, t = 2016) - C_{Li}(x, t = 1998)$

Se calcula la masa acumulada $\Delta M_{Li} = \iiint_V \phi(x) \Delta C_{Li}(x) dx$ $V =$ zona de reinyección

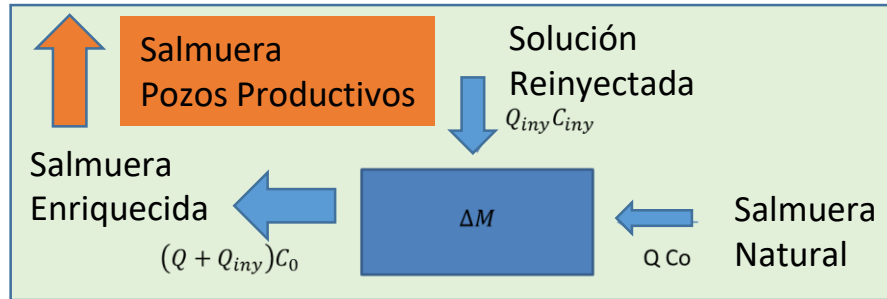
Reinyección bittern

Pozas y Acopios



CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA: BITTERN

Segundo Método Balance de Masa en Unidad Superior e Intermedia



$$Q_{iny} C_{iny} + Q C_0 - (Q + Q_{iny}) C_0 = \frac{\Delta M}{\Delta t}$$

Integrando en el tiempo desde $t_0=1998$ a $t_1=2016$ se tiene que:

$$\Delta M = M_{iny} - V_{iny} C_0$$

Incremento de masa de Litio en el sector bittern = Masa de Litio reinyectado en el sector bittern - Masa de Litio movilizada hacia el exterior del sector

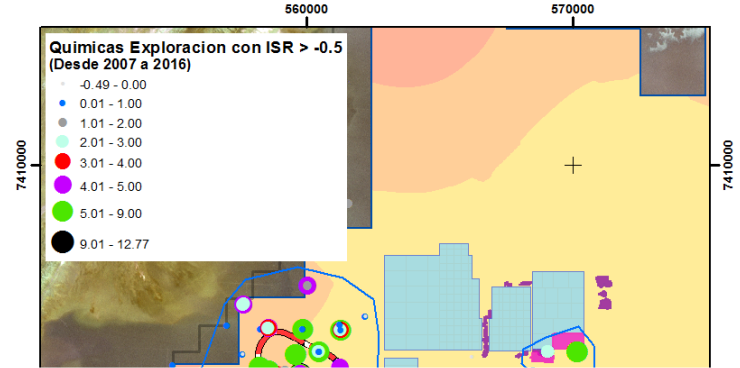
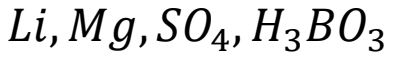
CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA

Tercer Método

índice de solución reinyectada (ISR)

Se trata de un indicador geoquímico basado en la química de exploración

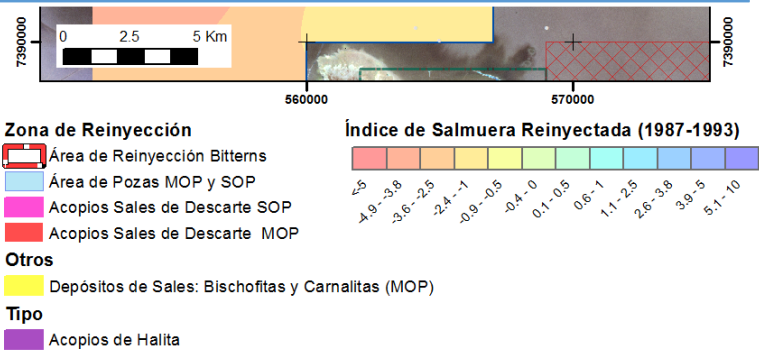
- La solución reinyectada está enriquecida en



Los 3 métodos: identifican la solución reinyectada en el área de estudio con resultados coherentes y comparables; todo el Li está disponible en el

depósito

$$ISR = Ln \left(\frac{Li \times Mg \times SO_4 \times H_3BO_3}{K \times Ca \times Na} \right)$$



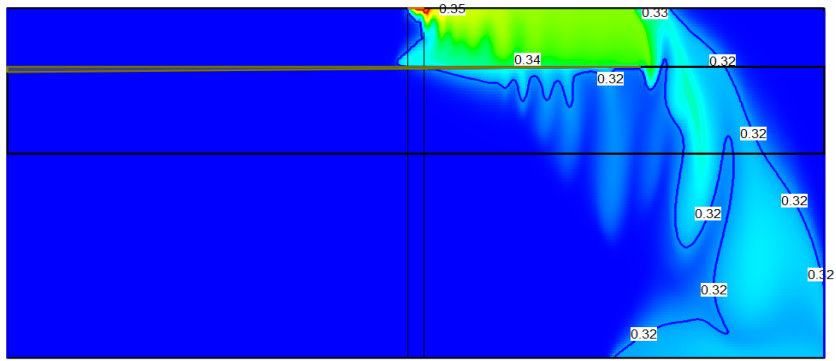
Comparación ISR con la Línea de Base ISR (1987-93)

CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA

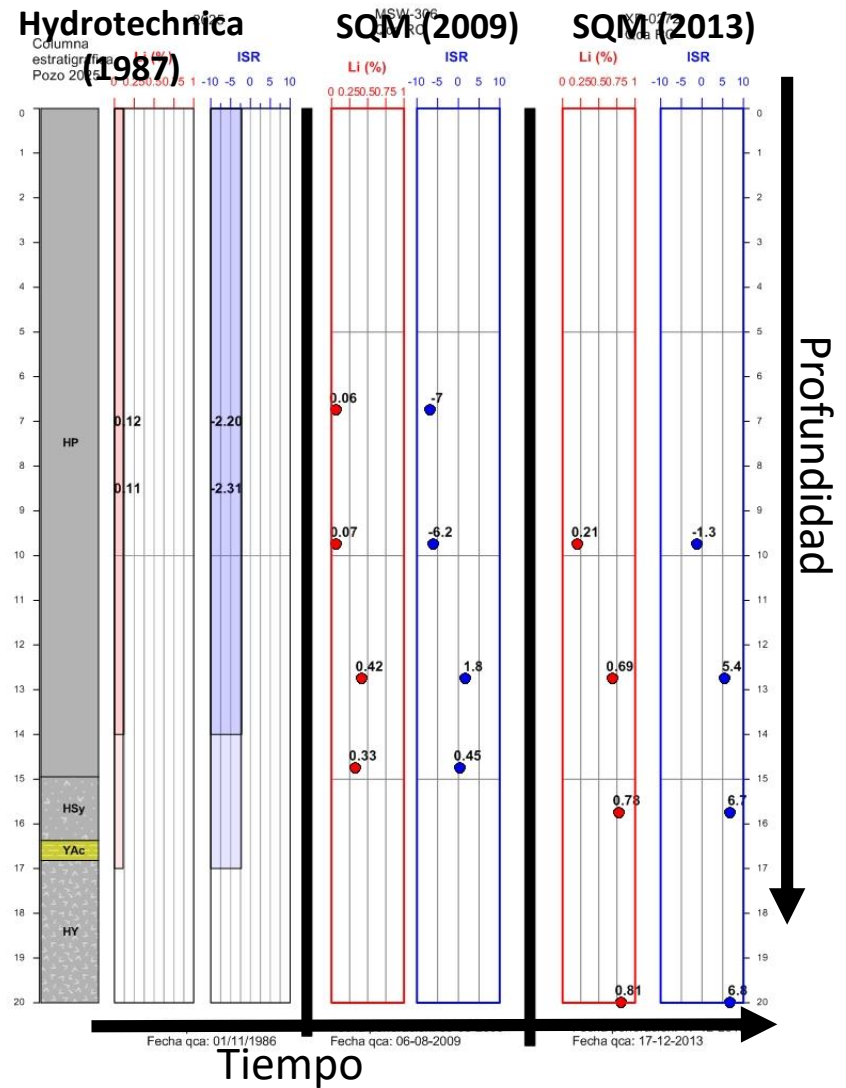
¿FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN?

Evidencias en sondajes del sector bittern

- Distancia entre sondajes <75m
- Evolución temporal Li(%) e ISR

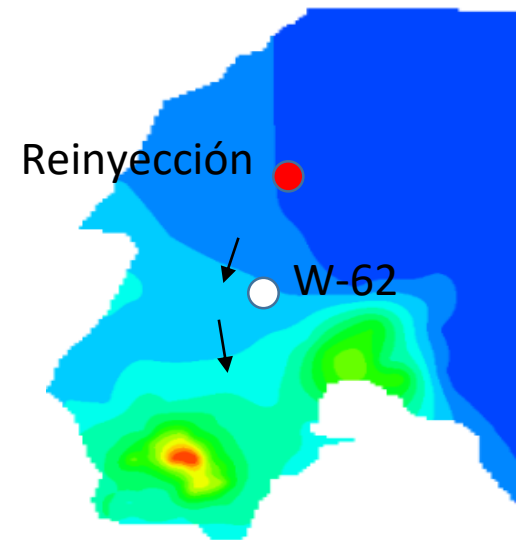
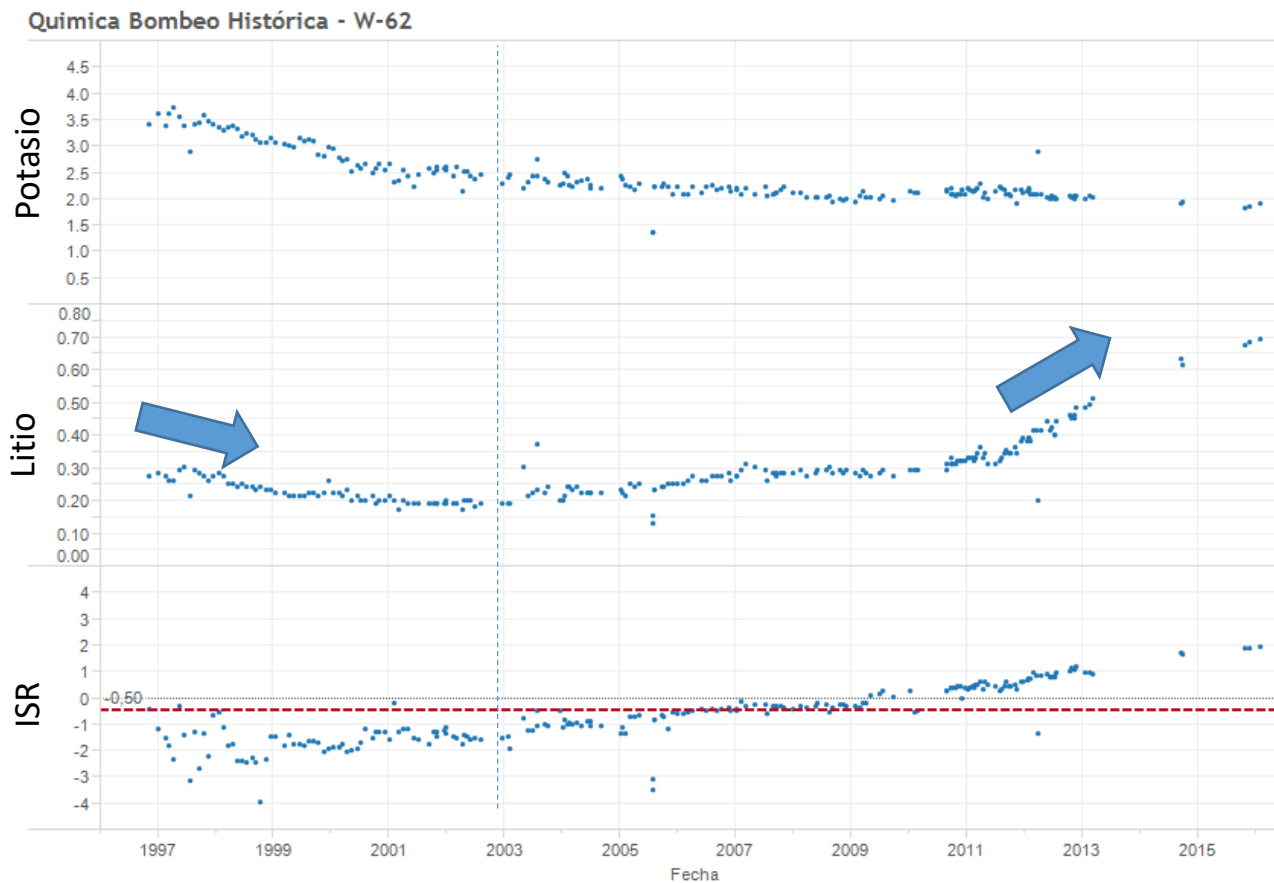


La solución reinyectada es más densa que la salmuera



CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA

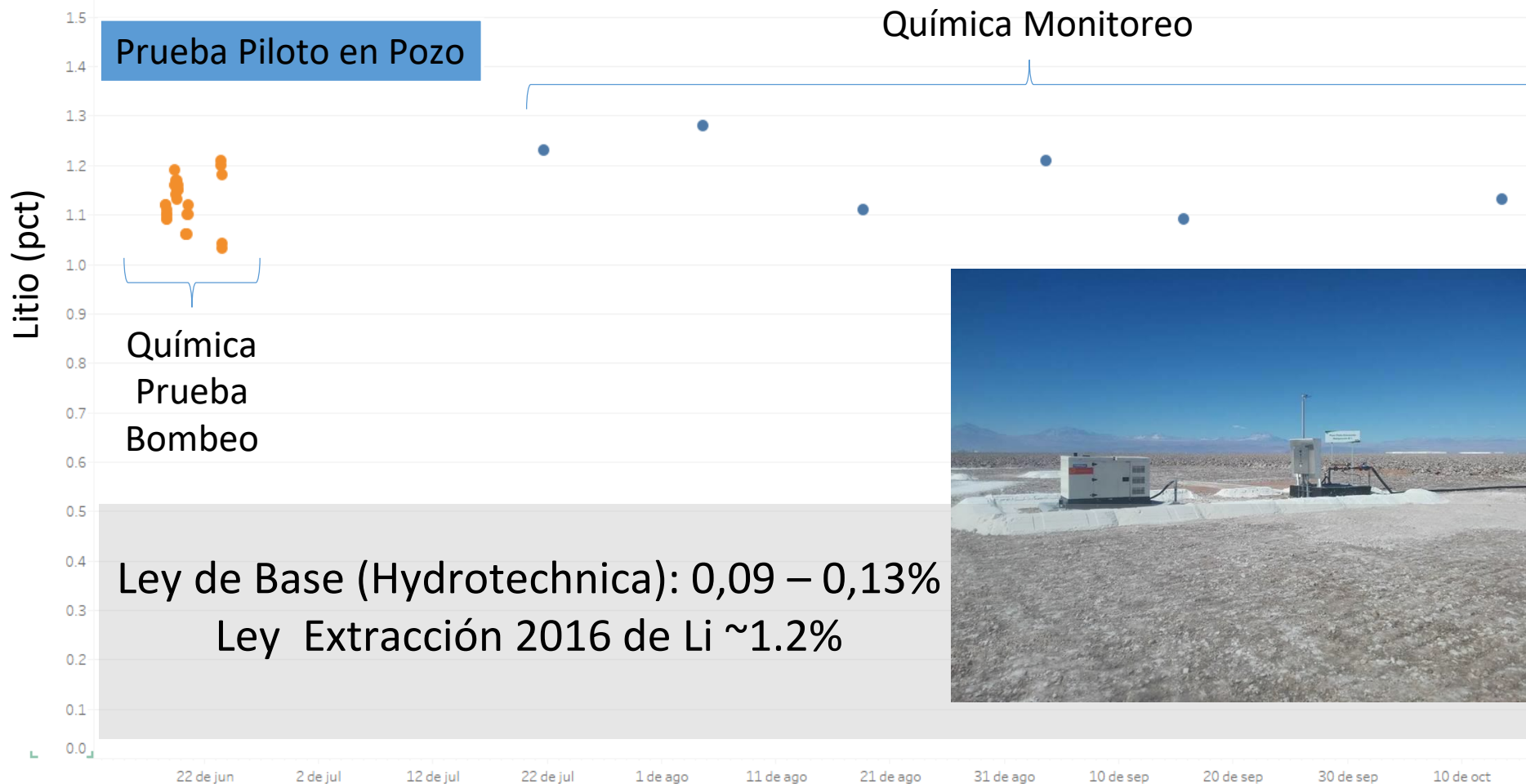
Extracción salmuera enriquecida por solución reinyectada en un pozo productivo sector pozas MOP Litio



Profundidad del nivel de salmuera y esquema de líneas de flujo

CARACTERIZACIÓN SOLUCIÓN REINYECTADA

Factibilidad de Extracción en sector Bitterns en Pozo Piloto de Extracción/Reinyección



RECURSO REMANENTE A 2030

HIPÓTESIS DE TRABAJO

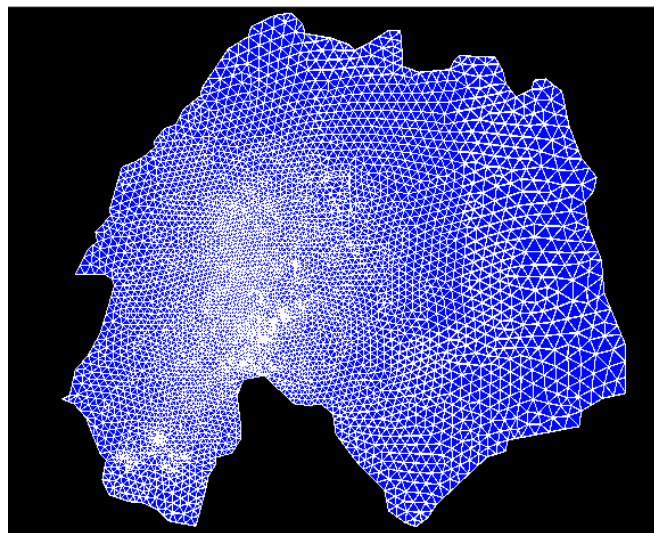
- Plan de Extracción de salmuera aprobado ambientalmente a SQM en la RCA 226/2006.
- Distribución espacial de las concentraciones de litio y potasio presentadas.
- Distribución del campo de pozos de extracción de SQM de Julio 2016.
- Se incluye la reinyección de solución y no el Li contenido en Sales en Acopios.

DOS ESCENARIOS

- Escenario **ESTÁTICO**: Se parte del recurso medido más indicado de 9.18Mt (millones de toneladas) de Li; se descuenta el valor extraído menos el reinyectado, de 0.63 Mt de Li en el periodo 2015-30. Se obtiene por tanto una estimación del recurso remanente en 12/2030 de **8.55 Mt** de Li.
- Se trata de un escenario **conservador**

RECURSO REMANENTE A 2030: SOFTWARE USADO + RESULTADOS

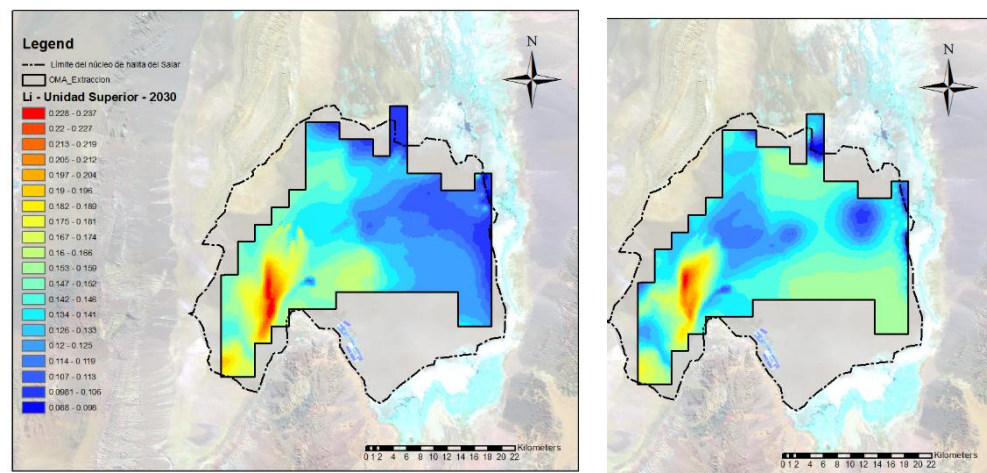
- Escenario **DINÁMICO**: Se utiliza un modelo numérico de simulación para evaluar la transición de parte de la salmuera que se moviliza. Es un escenario **menos conservador**



Para el modelo numérico se utilizó el software de acceso libre VisualTransin, creado por GHS-UPC-CSIC.

Este software permite la creación de modelos numéricos, de flujo y transporte, mediante la utilización de elementos finitos. Permite calibración automática de parámetros hidráulicos.

Proyección en planta, el modelo es 3D, discretizado con elementos en forma de prisma triangular



En este caso el recurso remanente a 12/2030 se estima en **8.85Mt** de Li.

No considera reclasificación de zonas (ej. de inferido a indicado o medido).

Resultados: Mapa de concentración de Li proyectado para 12/2030 a distintas profundidades (la distribución es 3D)

RECURSO REMANENTE A 2030: DISCUSIÓN

Dos conjuntos de elementos invitan a pensar que las estimaciones realizadas son muy conservadoras:

- 1. Valores de porosidad:** todos los métodos utilizados en la actualidad subestiman las porosidades reales; los valores bajos se miden con gran precisión, mientras que las porosidades altas son difícilmente caracterizables y más difícilmente medibles (y se infravaloran). El error en la evaluación de la media de la porosidad se estima en un factor 1,1 a 1,5. Así, en el escenario más conservador, el recurso disponible pasaría de 8.55 Mt de Li a **9.41 Mt (para 10% de incremento), 11.12 Mt (30%) o 12.83 Mt (50%)** de Li. En todo caso, incluso en el escenario más desfavorable, 8.55 Mt de Li supone la existencia de **recurso para 217 años**, sin considerar la existencia de recurso inferido (más incierto, y presente principalmente en la unidad inferior).
- 2. Clasificación del recurso:** Se aprecia la necesidad que en los próximos años SQM siga el proceso de caracterización del Salar, de modo que aumentará el área de exploración y el número de puntos de observación. Por ese motivo, parte del recurso actualmente clasificado como inferido se reclasificaría como indicado o medido. La cantidad que eso supondría en cuanto a recurso remanente es difícil de evaluar.

CONCLUSIONES (i)

❖ CUANTIFICACIÓN DE RECURSOS DE LITIO Y POTASIO

- La propuesta metodológica implica un estudio geoestadístico con técnicas innovadoras que permite estimar porosidades y concentraciones de K y Li como la base de evaluación de los recursos en un esquema 3D de casi 5 millones de bloques.
- La clasificación del recurso se basa en un sistema doble, donde se parte del coeficiente de varianza a partir de los resultados del krigeado y se penaliza si el grado de conocimiento de la unidad hidrogeológica donde se encuentra el bloque no se considera suficiente.
- La reserva base TOTAL se ha evaluado en 122.95 Mt de K y de 9.18 Mt de Li.
- Existe además un recurso inferido muy elevado, que hemos evaluado en 270,17 Mt de K y de 17,02 Mt de Li, y que se concentra fundamentalmente en la unidad inferior. Este valor es muy superior a las estimaciones realizadas hasta la fecha.
- Las estimaciones se han realizado con valores de porosidad muy conservadores y que presentan un sesgo a la baja. En estos momentos SQM está estudiando nuevos métodos que permitan mejores estimaciones de porosidad y que pueden, eventualmente, permitir actualizar esta cuantificación de recursos.

CONCLUSIONES (ii)

❖ REINYECCIÓN DE SOLUCIÓN

- El recurso reinyectado es un recurso **conservativo** en el sentido que no experimenta reacciones de degradación, evaporación u otras que supongan una merma de la masa reinyectada de Litio.
- Las propuestas metodológicas para el análisis implican la utilización de hasta 3 esquemas distintos: (1) cubicación por diferencias de concentraciones entre las campañas de 1998 y 2015, (2) balance de masas en las zonas de reinyección, (3) cambios temporales en el ISR.
- Existen evidencias claras de la presencia de esta solución reinyectada, tanto en el entorno de acopios y pozas como en el de bitterns. Estas evidencias se muestran en el aumento de las concentraciones de Litio en el entorno de las reinyecciones, que en algunos casos han supuesto un incremento de Litio en la salmuera de extracción.
- Como tal, es un recurso **recuperable**

CONCLUSIONES (iii)

❖ RECURSO REMANENTE A 2030

- La propuesta metodológica implica considerar: (1) un sistema estático y evaluar el recurso por balance de masas (muy conservador) y (2) un sistema dinámico mediante movilización de la salmuera durante la producción, y que da estimaciones más realistas.
- Las estimaciones más conservadoras indican que el recurso disponible a 12/2030 es de 8.55 Millones de toneladas de Li. Estas estimaciones aumentarían con un estudio más detallado de las porosidades existentes en el entorno de la zona de explotación, y podrían llegar a 9.41 Mt de Li (en el caso de 10% de incremento de la porosidad media), hasta 12.83 Mt de Li (si el aumento fuese del 50%).
- Las estimaciones de reservas aumentarían si se lleva a cabo en el futuro una tarea consistente en aumentar el conocimiento del sistema acuífero, de modo que parte del recurso clasificado actualmente como inferido pudiera reclasificarse como indicado o medido y ser considerado, por tanto, como reserva.

TAKE HOME MESSAGE

- ❖ **La combinación de metodologías de análisis avanzadas (modelos deterministas + técnicas geoestadísticas, de densidad constante + variable, reconociendo la heterogeneidad horizontal y vertical del medio), junto con el análisis riguroso de los datos y la continuación en la exploración progresiva y sostenida del medio, son la clave para realizar una explotación del recurso moderna, eficiente y sustentable.**

La realidad y los desafíos de la industria del litio: El cruce entre oferta y demanda

Foro del Litio
Agosto 2017

1 **Demanda**

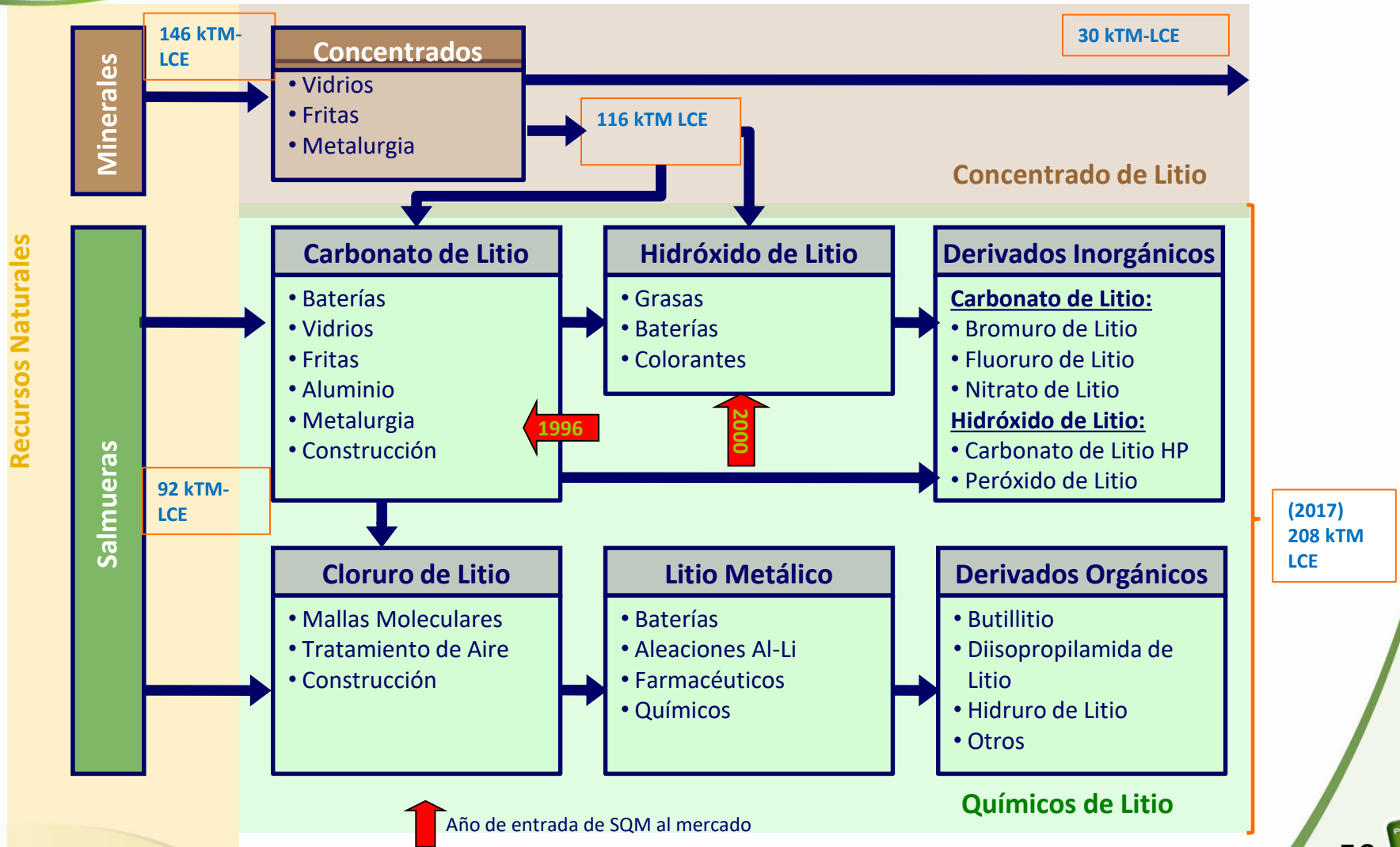
2 Oferta

3 SQM

4 Visión de futuro

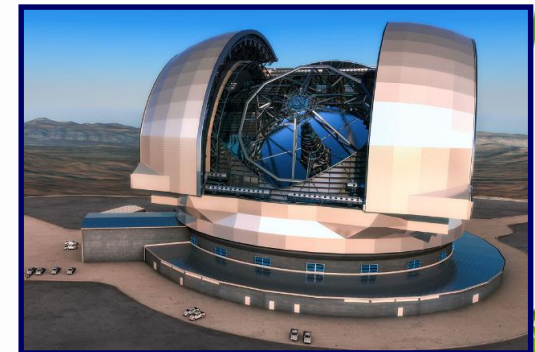
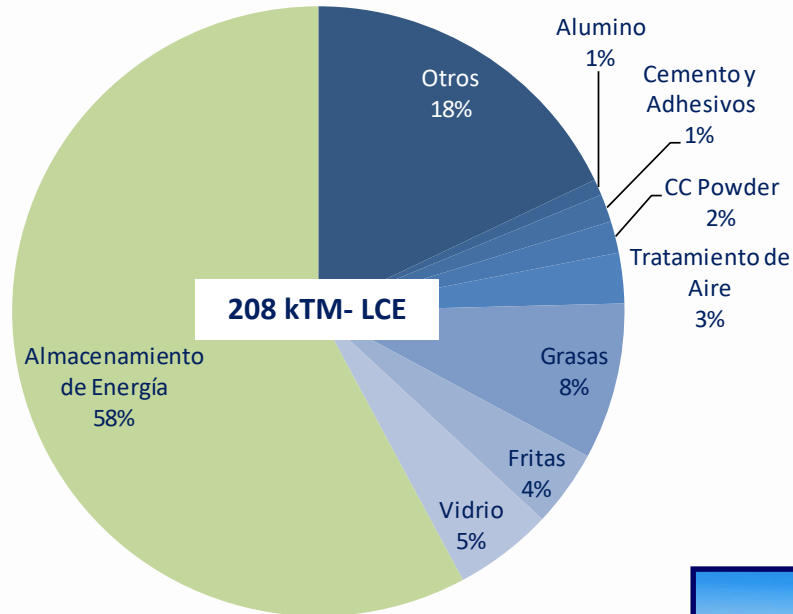
Demanda

Árbol del litio 2017

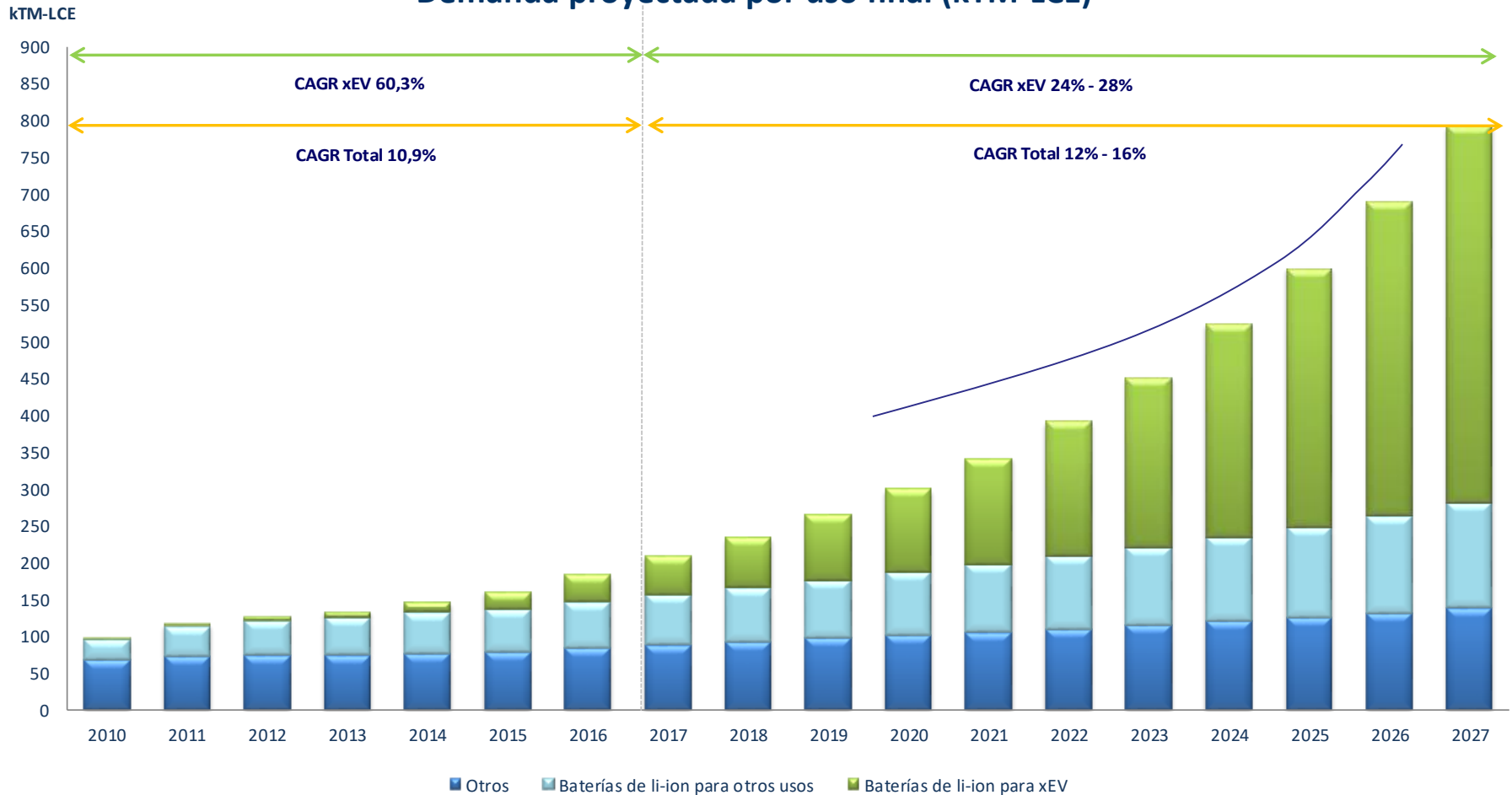




Demanda de Químicos de Litio 2017



Demanda proyectada por uso final (kTM-LCE)





Demanda

Pronóstico 2027 xEVs

Crecimiento de demanda se sustenta en crecimiento de xEVs

Type	Unit	2017	2022	2027
EV	000 units	950	3.125	8.640
EB/ET	000 units	105	336	868
PHEV	000 units	385	986	2.235
PHEB	000 units	50	91	210
HEV - Li	000 units	650	1.815	4.339
Total xEV - Li	000 units	2.140	6.352	16.292

EV: vehículos eléctricos
 EB/ET: buses/camiones eléctricos
 PHEV: vehículos híbridos enchufables
 PHEB: buses híbridos enchufables
 HEV - Li: vehículos híbridos (con batería li-ion)



Type	Unit	2017	(%)	2022	(%)	2027	(%)
EV	kMT-LCE	32	65%	120	69%	360	74%
EB/ET	kMT-LCE	11	23%	38	22%	95	19%
PHEV	kMT-LCE	4	8%	10	6%	21	4%
PHEB	kMT-LCE	1	2%	2	1%	5	1%
HEV - Li	kMT-LCE	1	2%	3	2%	7	1%
Total xEV - Li	kMT-LCE	50	100%	174	100%	487	100%



Demanda

Almacenamiento de Energía

Batería li-ion de EV → 0.75 kg-LCE/kWh



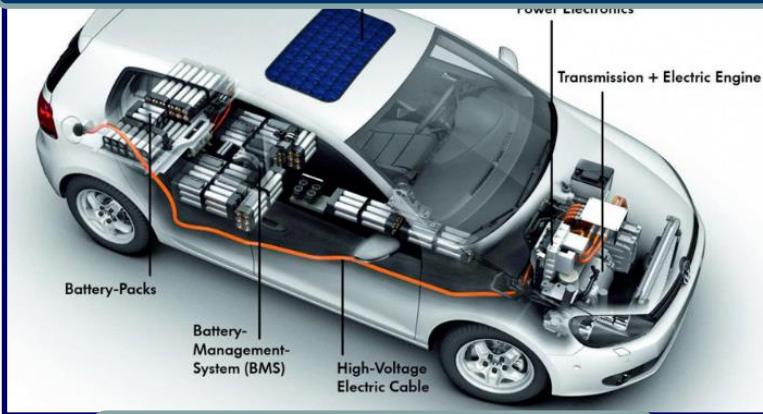
1 GWh → 750 TM-LCE

1 GWh → 20,000 EVs



Tesla Gigafactory → 35 GWh (2020)

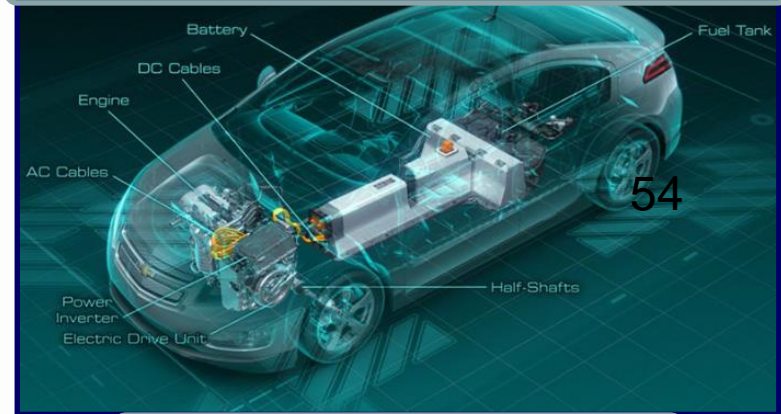
VW e-Golf



Batería li-ion de 25 kWh
(18.75 kg-LCE)



Chevy Bolt



Batería li-ion de 60 kWh
(45 kg-LCE)

Demanda

Vehículos eléctricos (EVs) más populares

Renault Zoe



EV más vendido en Europa 2016
Rango: 241 Km
Batería: 41 kWh
Li utilizado: 31 Kg LCE
Precio retail: US\$ 23,000

Tesla Modelo S



EV más vendido en EEUU 2016
Rango: 426 Km
Batería: 60-100 kWh
Li utilizado: 45-75 Kg LCE
Precio retail: desde US\$ 69,000

BYD E6

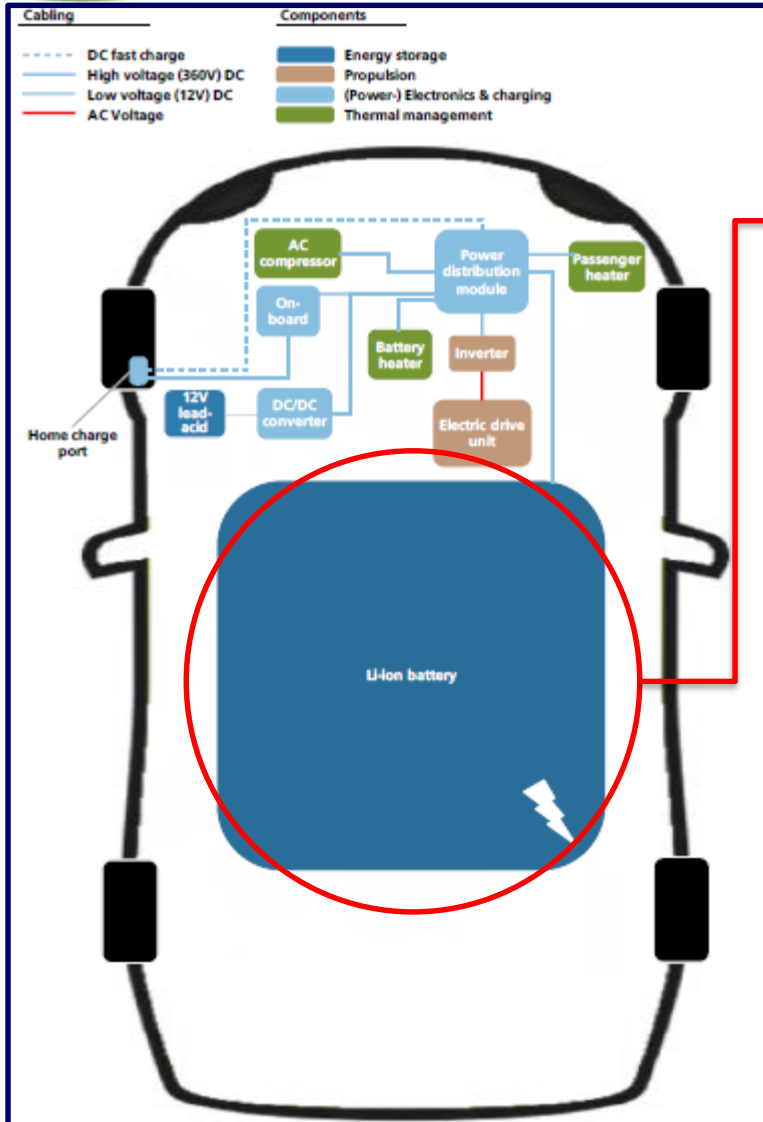


EV más vendido en China 2016
Rango: 480 Km
Batería: 60-80 kWh
Li utilizado: 45-60 Kg LCE
Precio retail: US\$ 52,000

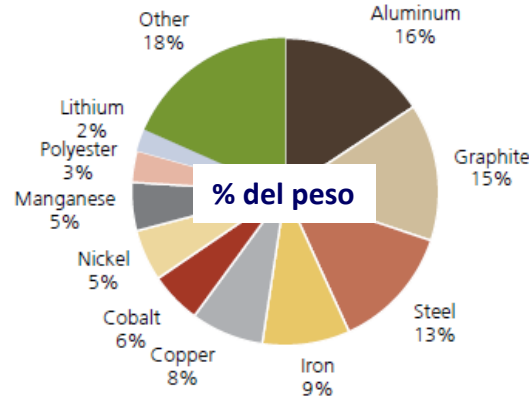
Desempeño entre 5-6 Km/kWh

Demanda

Dentro de un EV: Chevy-Bolt



Pack de Batería: 436 Kg



**Li: 8.7 Kg
(46 Kg-LCE)**

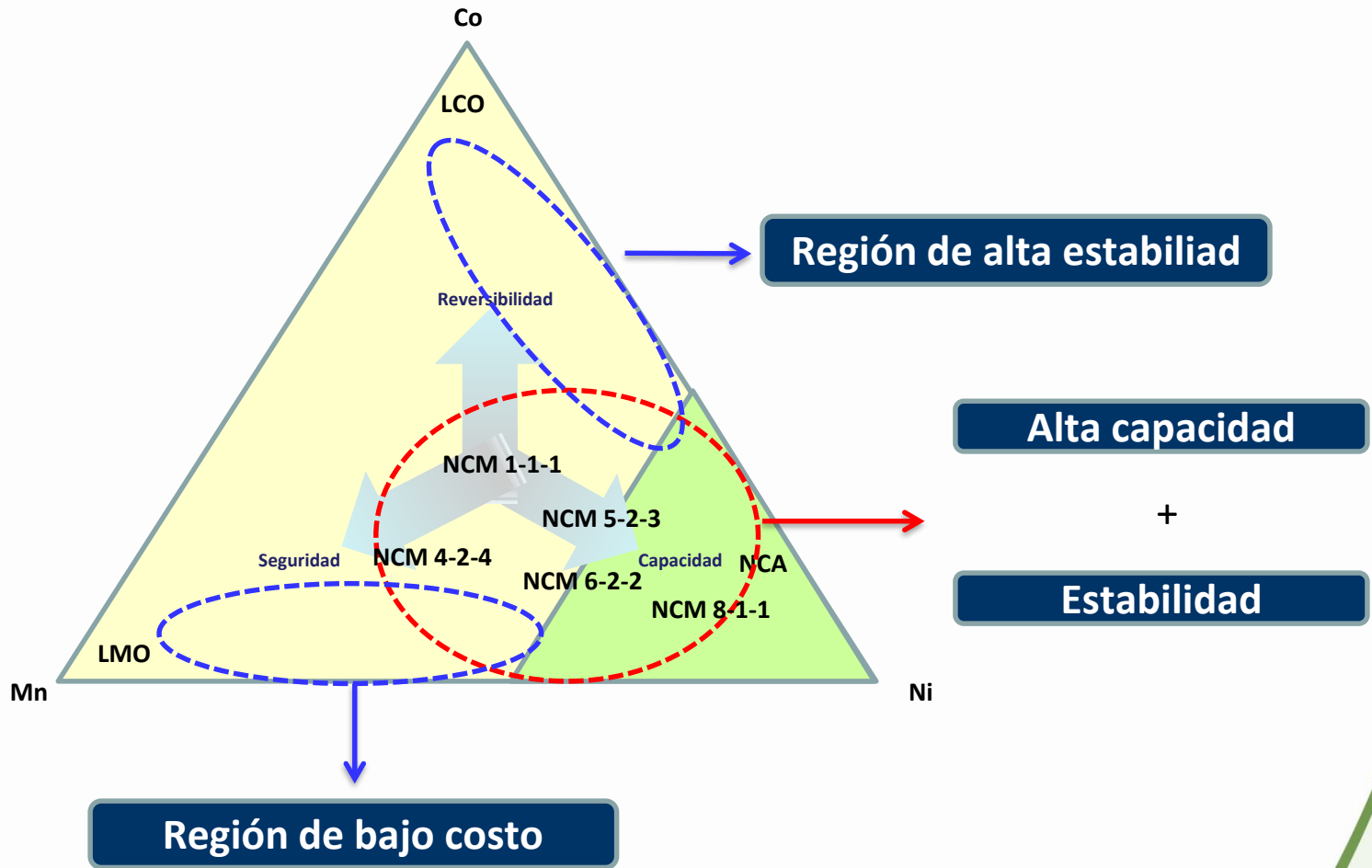
**Costo Batería:
US\$12,522 (34%)**

**Precio retail
Chevy Bolt:
US\$ 36,640**

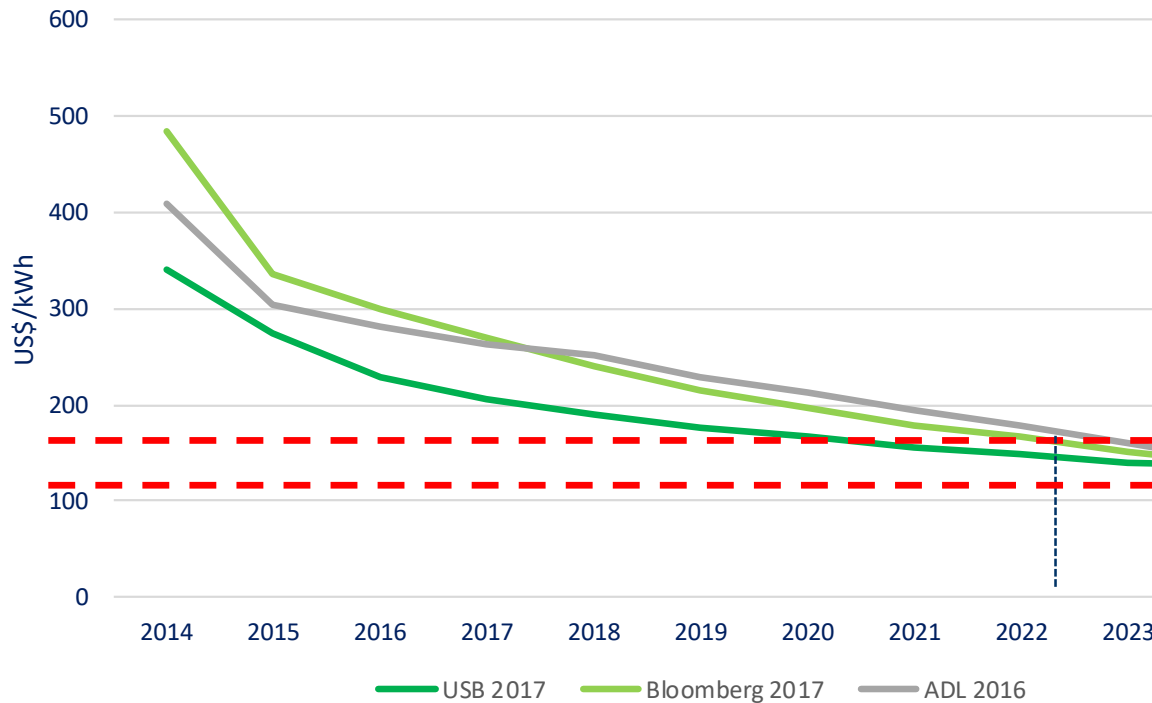
❑ Costo de materias primas (respecto del EV completo):

- Li: US\$ 550 (1.5%)
- Cu: US\$ 204 (0.6%)
- Co: US\$ 1.570 (4.3%)
- Al: US\$ 133 (0.4%)

Fuente: UBS (supone batería de 60 kWh)

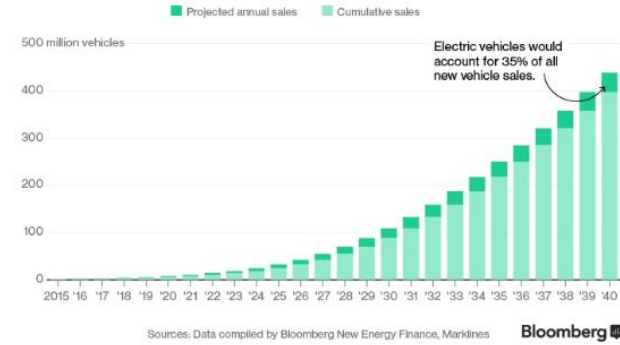


Costo Batería Li-ion (US\$/kWh)



The Rise of Electric Cars

By 2022 electric vehicles will cost the same as their internal-combustion counterparts. That's the point of liftoff for sales.



Equivalencia con costo de auto a combustión interna

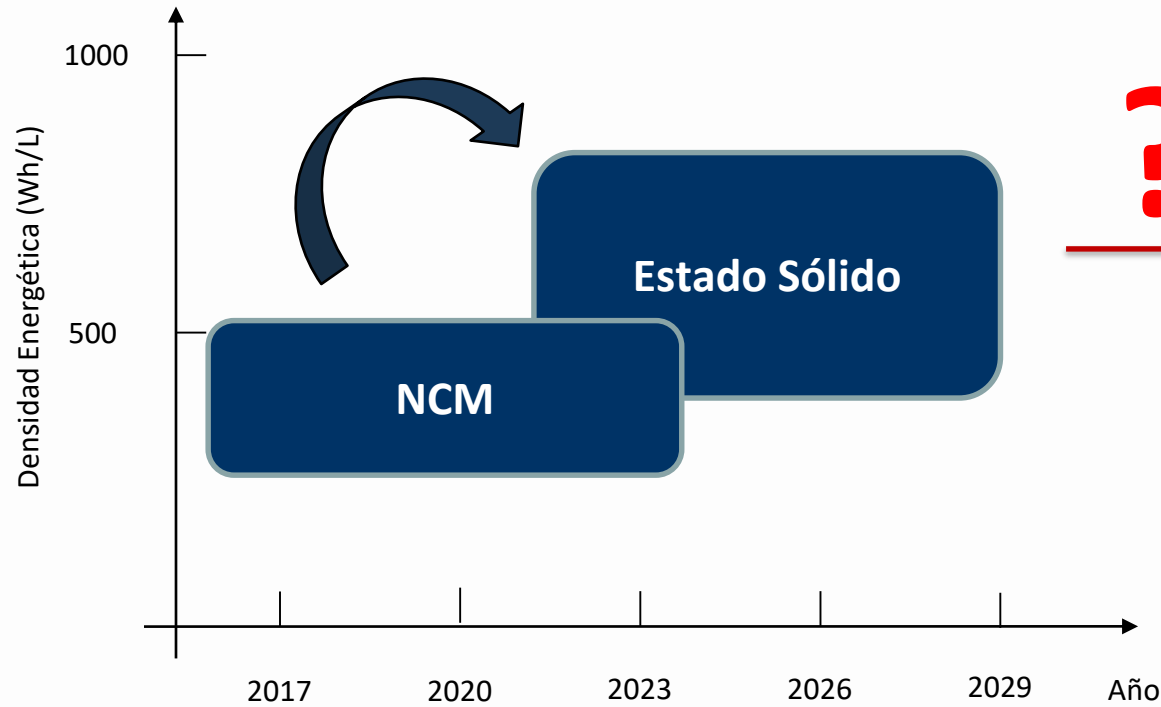
Electric cars 'will be cheaper than conventional vehicles by 2022'

Analysis predicts that the total cost of ownership of electric cars will dip below those with internal combustion engines in 2022



Fuente: Bloomberg, USB, ADL, otros

Demanda de litio se ve segura en el mediano plazo, pero existen amenazas



Otras tecnologías sin Litio

- Otros iones (Na, Mg, K)
- Zn-air
- Baterías de flujo
- Al-Grafito
- Sales de Almacenamiento
- Fuel cells
- Súper-capacitores de Grafeno

Why Toyota's Next Move Is Solid-State Batteries



The next-generation battery tech promises more energy density, faster charge times and less risk of fire.

July 28, 2017

Fuente: Panasonic

1 Demanda

2 **Oferta**

3 SQM

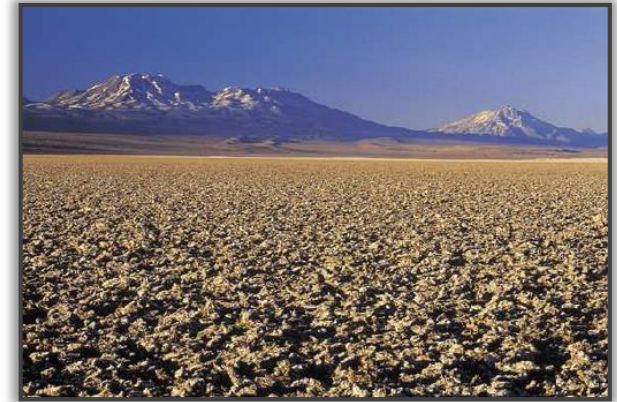
4 Visión de Futuro

Oferta

Fuentes principales de litio

- ❑ El litio se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza
- ❑ Principalmente en:
 - Salmueras continentales (100-2.700 ppm)
 - Salares (ej. Atacama en Chile, Hombre Muerto en Argentina y Uyuni en Bolivia)
 - Lagos salinos (ej. Zhabuye y Qinghai en China)
 - Minerales (2.300-18.000 ppm)
 - Unas 145 especies mineralógicas, pero solamente algunas constituyen fuentes comerciales de litio (ej. espodumeno, petalita y lepidolita)
 - Otros recursos
 - Salmueras de pozos petrolíferos (ej: Smackover, Texas, EE.UU.) (60-500 ppm)
 - Salmueras asociadas a campos geotermales (ej. Imperial Valley, California, EE.UU.) (50-400 ppm)
 - Arcillas sedimentarias (ej. Hectoritas en EE.UU. y Jaderitas en Serbia) (2.000-3.000 ppm)
 - Agua de mar (0,17 ppm)

Salmueras



Minerales



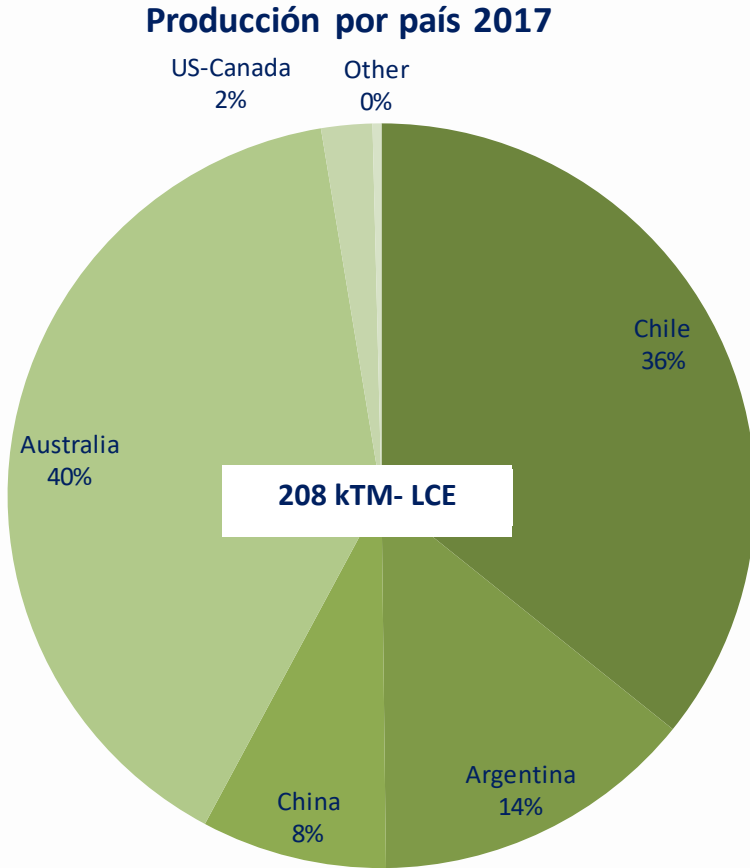
(1) Abundancia similar a otros elementos comunes (Níquel: 84 ppm, Zinc: 70 ppm, Cobre: 60 ppm, Cobalto: 25 ppm, Plomo: 14 ppm, Estaño: 1,3 ppm, Berilio: 2,8 ppm, Molibdeno: 1,2 ppm).

Australia (Minerales):

- Greenbushes
- Mt. Cattlin
- Mt. Marion
- Wodgina (comenzando)

China (Minerales):

- Sichuan (Jiajika, Maerkang, Lijiagou)
- Jiangxi (Yichun, Heyuan)
- Xinjiang (Koktokay)



Chile (Salmueras):

- Salar de Atacama (SQM, ALB)

Argentina (Salmueras):

- Salar de Hombre Muerto (FMC)
- Olaroz (ORE)

China (Salmueras):

- Taijinar (Citic, QLL)
- Zhabuye (Tibet)
- Chaerhan (QSLG)

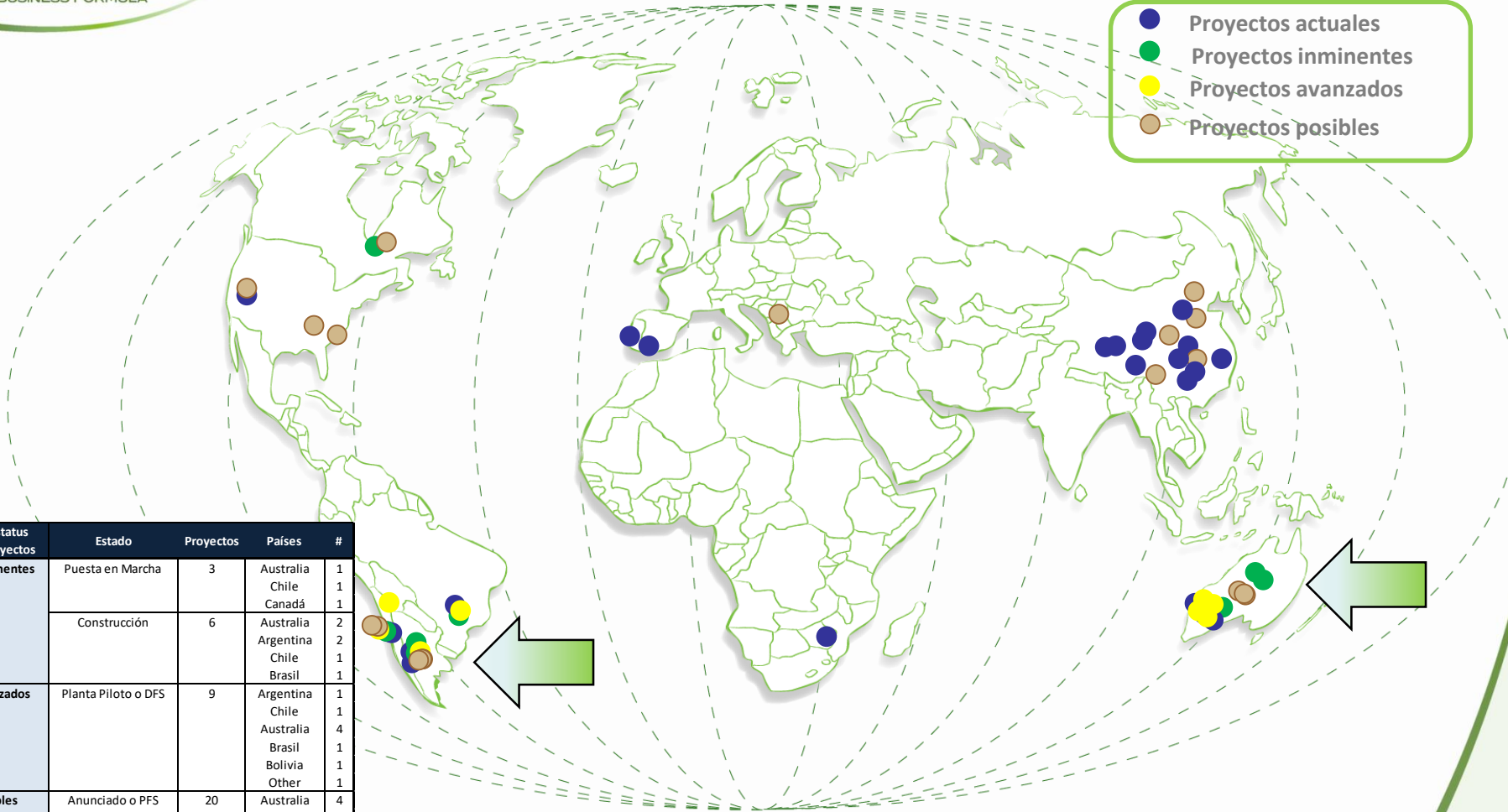


Oferta

Nuevos proyectos

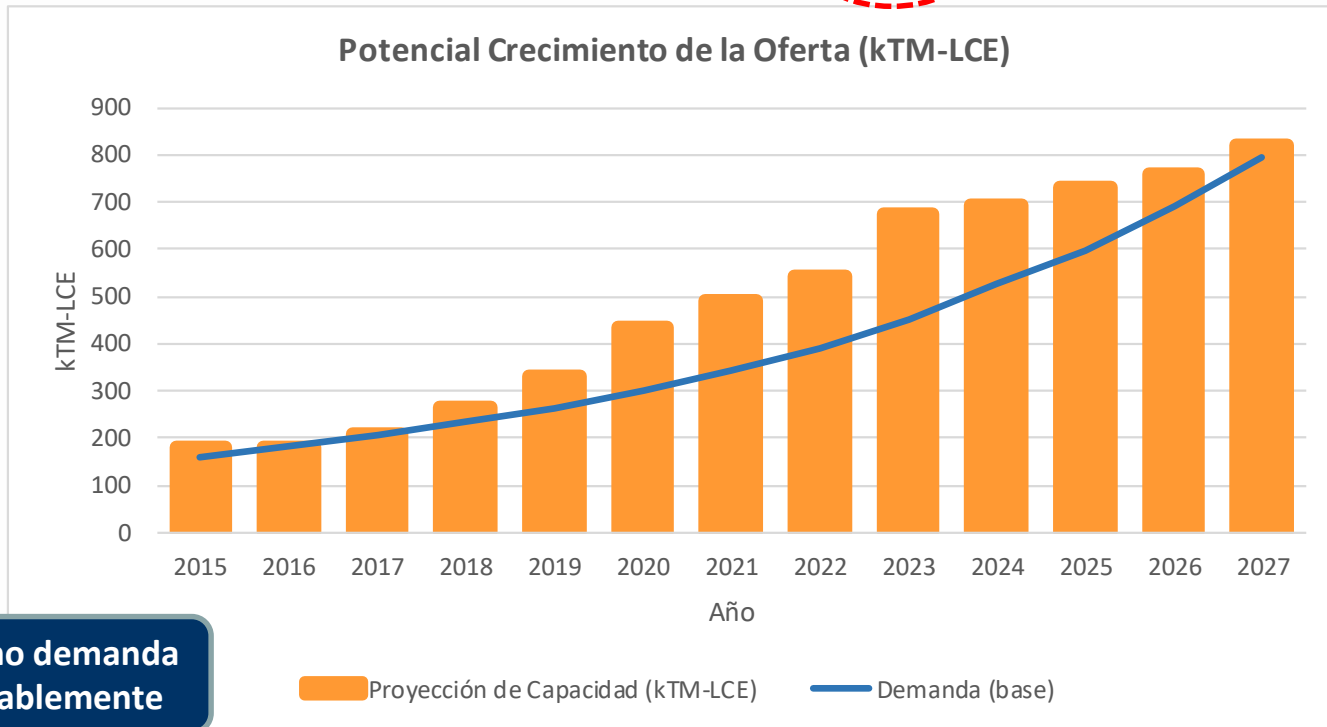
Australia (11) y Argentina (7) concentran la mayor cantidad de nuevos proyectos

- Proyectos actuales
- Proyectos inminentes
- Proyectos avanzados
- Proyectos posibles



Estatus Proyectos	Estado	Proyectos	Países	#			
Inminentes	Puesta en Marcha	3	Australia	1			
			Chile	1			
			Canadá	1			
	Construcción	6	Australia	2			
			Argentina	2			
			Chile	1			
Avanzados	Planta Piloto o DFS	9	Argentina	1			
			Chile	1			
			Australia	4			
			Brasil	1			
			Bolivia	1			
			Other	1			
Posibles	Anunciado o PFS	20	Australia	4			
			Argentina	4			
			China	5			
			Serbia	1			
			Canadá	1			
			Chile	2			
			Other	3			
			TOTAL		38		

Estatus Proyectos	Proyectos	Cap. Total (kTM LCE)
Inminentes	9	133
Avanzados	9	149
Posibles	20	325
Total	38	607



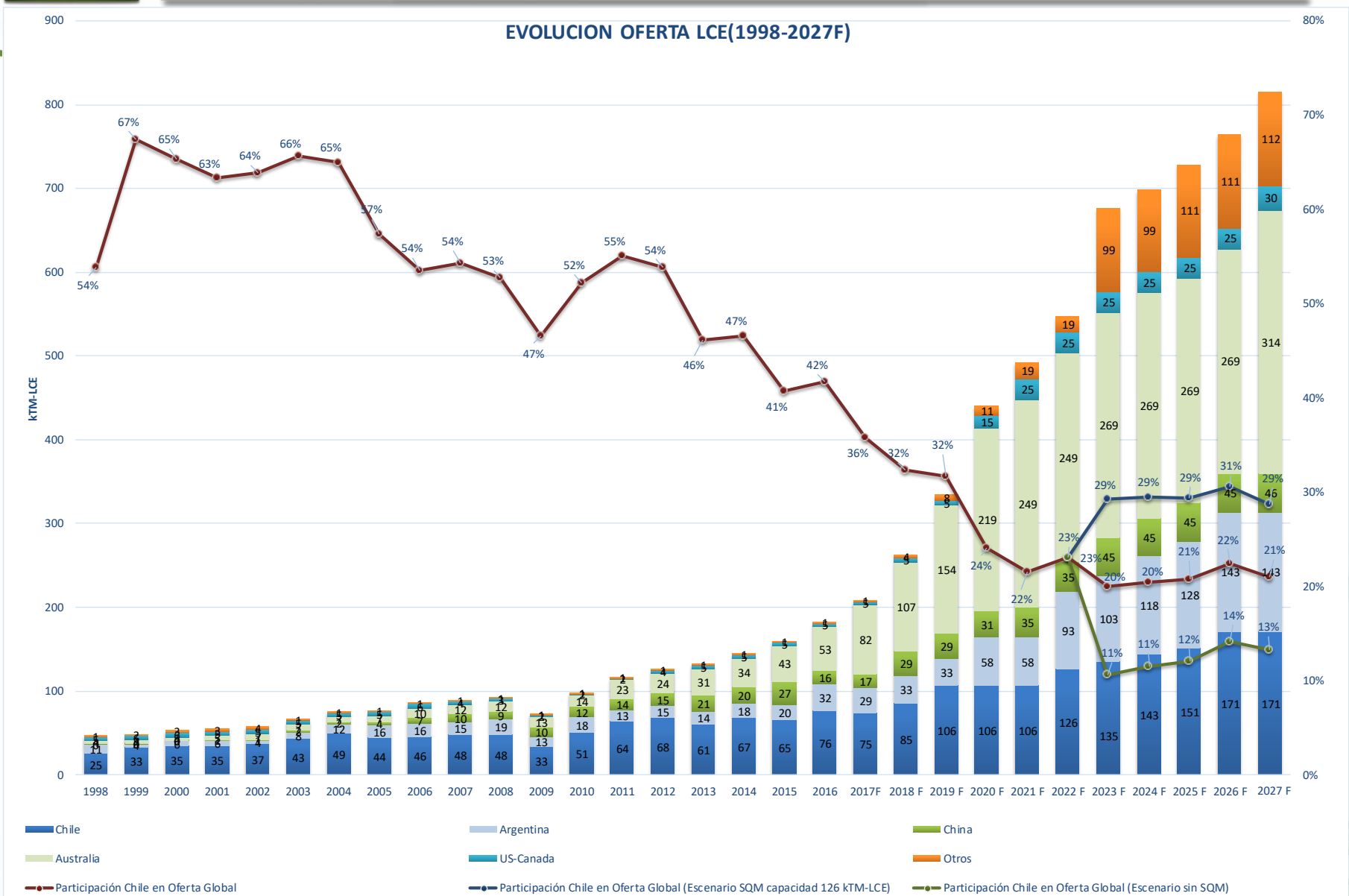
Tanto oferta como demanda crecen considerablemente



Oferta

Participación Chile 2027

Participación de Chile ha bajado desde un histórico 67% (1999)



Fuente: SQM



1 Demanda

2 Oferta

3 SQM

4 Visión de futuro

- Dos aumentos de capacidad actualmente en ejecución para nuestras operaciones chilenas:

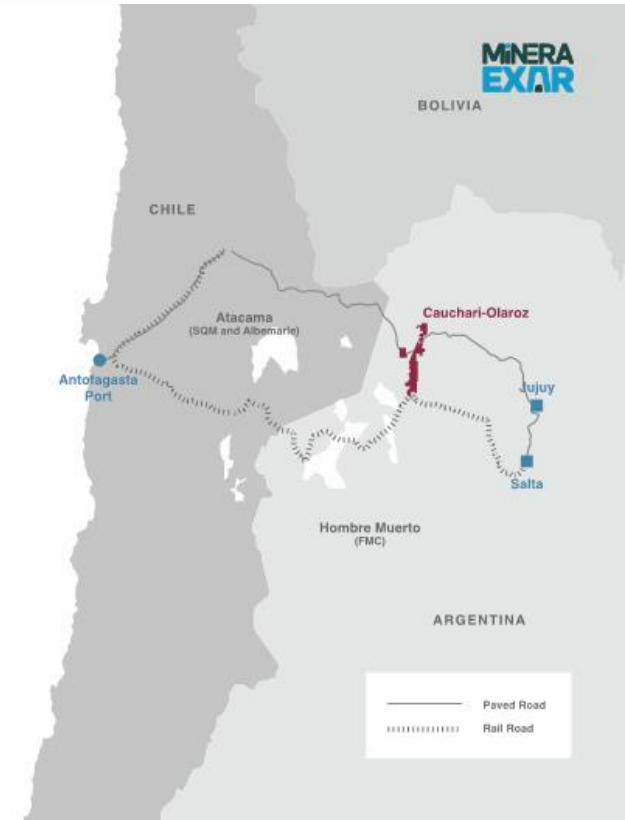


- Hidróxido de litio
 - Capacidad actual de 6 kton
 - Aumento a 13,5 kton a 2018
 - Inversión de ~ US\$ 30 m

- Carbonato de litio
 - Capacidad actual de 48 kton
 - Aumento a 63 kton a 2018
 - Inversión de ~ US\$ 50 m



- ❑ JV 50/50 con Lithium Americas Corp.
- ❑ Proyecto en base a salmuera
 - Tecnología similar a la usada en operaciones actuales de Salar de Atacama
- ❑ Proyecto de 50 kTM-LCE de carbonato de litio grado batería
 - Primera etapa de 25 kTM-LCE
 - Inversión total de ~ US\$ 675 m
 - Inicio de producción 2019
- ❑ Situada a sólo 300 km del Salar de Atacama
 - Importantes sinergias con operaciones actuales de la compañía



- ❑ JV 50/50 con Kidman Resources
- ❑ Producción de litio a partir de roca (espodumeno)
 - Minería a rajo abierto
- ❑ Proyecto integrado en químicos de litio
 - Mayor valor agregado al mineral de la mina
 - Planta dual permite producir Carbonato y /o Hidróxido de litio según requerimientos del mercado
- ❑ Producción de ~ 40 kMT de LCE
 - Inicio de producción de concentrado 2019
 - Inicio de producción de carbonato e hidróxido de litio 2021



1 Demanda

2 Oferta

3 SQM

4 Visión de futuro

Visión de futuro

Dónde estamos? Adónde vamos?

- ❑ El mercado de almacenamiento de energía plantea enormes desafíos para la industria.
- ❑ La producción de litio supone importantes desafíos operacionales, sobre todo para salmueras, en hidrogeología y procesos químicos.
- ❑ SQM es una compañía global con fuerte compromiso con el desarrollo del mercado del litio. Inversiones en Chile y en el extranjero son prueba de ello.
- ❑ Chile necesita aprovechar oportunamente este momento único.



La realidad y los desafíos de la industria del litio: El cruce entre oferta y demanda

Foro del Litio
Agosto 2017