
CENTRO DE ESTUDIOS PÚBLICOS

GESTION DEL AGUA EN LA MINERIA

W. HAYES, I. VALENZUELA, H. PEÑA, O. SUZUKI, F. JAKSIC,
P. MARQUET, H. GONZÁLEZ, G. LAGOS

Nº 273 - OCTUBRE 1997

Serie Documentos de Trabajo

El Centro de Estudios Públicos, CEP, es una fundación de derecho privado, sin fines de lucro y de naturaleza académica, que se ocupa del cultivo, análisis y difusión de los valores, principios e instituciones que sirven de base a un orden social libre. La institución se propone cumplir funciones orientadoras de la opinión pública a partir de la adhesión a las libertades personales y públicas, al derecho de propiedad privada concebido como resguardo a esas mismas libertades y a la democracia como forma pacífica y estable de gobierno.

Director y representante legal: Arturo Fontaine Talavera

La *Serie Documentos de Trabajo* es editada por el Centro de Estudios Públicos (ISSN 716-1123). Cada artículo es de responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente la opinión de los editores. Toda colaboración, comentario y correspondencia debe dirigirse al Centro de Estudios Públicos, Monseñor Sótero Sanz 175, Santiago 9, Chile.

CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS

MONSEÑOR SOTERO SANZ 175
TELEFONOS: 2315324-2315325

SANTIAGO - CHILE

GESTION DEL AGUA EN LA MINERIA*

WILLIAM HAYES

IVÁN VALENZUELA R.

HUMBERTO PEÑA T.

OSAMO SUZUKI

FABIÁN M. JAKSIC, PABLO A. MARQUET Y HÉCTOR GONZÁLEZ

GUSTAVO LAGOS

DOCUMENTO DE TRABAJO Nº 273

OCTUBRE 1997

* Este documento reúne las ponencias que hicieron los autores en el seminario Gestión del Agua en la Minería efectuado el 3 de junio de 1997.

INDICE

Presentación	7
William Hayes	
Futuro de la minería en Chile	9
Iván Valenzuela R.	
Derechos de agua y minería	13
Humberto Peña T.	
Exploración de agua subterránea	31
Osamo Suzuki	
Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el Norte Grande: La Región de Tarapacá como estudio de caso	37
Fabián M. Jaksic, Pablo A. Marquet y Héctor González	
Eficiencia del uso del agua en la minería del cobre	55
Gustavo Lagos	

PRESENTACION

William Hayes*

El agua es un tema de suma y creciente importancia para la minería y, en definitiva, para todo el país.

A medida que el agua parece ir convirtiéndose en un bien escaso en Chile, sea por efectos de una persistente sequía, por el aumento de la población y su consumo o, en fin, sea por una acentuada y nueva conciencia acerca de su valor, y a medida que la calidad de los recursos hídricos también se cuestiona, han surgido una serie de interrogantes técnicas, económicas, jurídicas e incluso éticas acerca de lo adecuado que puede o no ser el marco regulatorio hoy vigente en Chile al respecto. Cabe preguntarse, con especial consideración al proyecto de reforma del Código de Aguas, si con ello se logra verdaderamente cumplir mejor con la misión de proteger este recurso, a la vez que facilitar su uso oportuno y eficaz en beneficio de un desarrollo económico sostenible a lo largo del país. Es en esta armonización donde radica la óptima asignación racional del recurso.

Algunas reflexiones adicionales:

El desarrollo sustentable significa conciliar la protección del medio ambiente con el desarrollo económico. Este equilibrio sólo es posible si se entiende a ambos elementos de la ecuación como factores que se necesitan y se potencian mutuamente. No hay protección al medio ambiente sin desarrollo económico, y este último no es deseable si deteriora la calidad de vida como consecuencia.

Ambos factores son instrumentales al mismo fin: mejorar la calidad de vida, y es este concepto el que nos sirve para analizar las consideraciones éticas que cabe hacer.

Hoy por hoy, la industria minera chilena es una de las más importantes y prometedoras del mundo, a la vez que un factor absolutamente clave en la generación de aquel tipo de desarrollo que mejora la calidad de vida de la población. No creo que necesite citar ejemplos en las áreas de empleo y remuneraciones, infraestructura, vivienda, transporte, energía, educación, salud, tecnología... y, por cierto, protección ambiental. Este fenómeno no es casual, sino consecuencia de otra armonía: entre las normas jurídicas que han permitido que se den las condiciones para el desarrollo estable y sostenido de esta actividad.

Entre estas normas, que en conjunto proporcionan lo que se da en llamar "Certeza Jurídica", y que en definitiva constituyen la base de la confianza que lleva a la inversión sostenida de largo

* President and C.E.O., Placer Dome Latin America.

FUTURO DE LA MINERÍA EN CHILE

Iván Valenzuela R.*

La minería en Chile es hoy una realidad sólida. Las inversiones iniciadas en la década de los '80 y consolidadas en la de los '90, dieron por resultado una producción creciente que hoy día contribuye en medida importante al crecimiento de la economía nacional. Lo anterior no fue el resultado del azar sino de una conjunción de políticas públicas y privadas, que van desde la dictación del DL 600 de 1974, pasando por la promulgación del Código de Minería de 1983, la estabilización de la economía en la década de los '90 y la consolidación del sistema democrático a partir de 1990, lo que hizo posible disminuir sensiblemente el riesgo-país y permitió la aprobación del financiamiento de numerosos proyectos mineros que han aumentado la producción a niveles insospechados.

A las favorables condiciones políticas y sociales anteriores se agrega un potencial de exploración que hace de Chile uno de los países con mayores perspectivas geológicas del mundo. Sólo en el año 1996 se invirtieron cerca de 180 millones de dólares en exploración, en un contexto de descubrimientos recientes tales como Cerro Casale y Spence. A lo anterior se agrega la existencia de abundante talento local, uno de los elementos que han permitido el boom de proyectos mineros de la última década.

La solidez de la realidad descrita permite pronosticar un buen futuro para la minería en Chile. En el caso del cobre, por ejemplo, a pesar de las predicciones de caída en la demanda del metal y la perenne amenaza que representa la sustitución por otros materiales, los analistas especializados predicen un sostenido aumento de la demanda a nivel mundial, la que será satisfecha en buena parte con producción originada en Chile, país que en el año 2000 representará casi el 40 por ciento de la producción total de cobre.

Todo lo anterior tiende a sugerir que la minería en Chile seguirá disfrutando de buena salud en el futuro previsible. Pasar de 1,6 millón de toneladas a más de 4 millones representa un crecimiento, en términos relativos y absolutos, sin parangón en la historia minera mundial, por lo que cabría esperar una desaceleración.

Aceptando lo anterior, mi interés es plantear algunos temas de futuro, cuyo adecuado manejo es fundamental para mantener en alto la actividad de la minería. Algunos pueden pensar que el buen clima para hacer negocios que hoy día existe en Chile hace ocioso cualquier tipo de discusión. Sin embargo, la experiencia indica que ese buen clima resulta de un equilibrio social, político y económico muy complejo. Al respecto, es interesante comentar un estudio de proyección realizado en la década de los '70 (Resources for the Future), y que trataba de la producción y el consumo de

* Vicepresidente de Exploraciones y Asociaciones Mineras, CODELCO-Chile.

diversos minerales, incluyendo el cobre, para los años 2000. A Chile se le visualizaba una producción de 1,2 millón de toneladas de cobre fino, cifra inferior a la de Zambia, similar a Zaire (actual Congo). Las grandes variaciones, hacia arriba o abajo, que se desprenden de aquel estudio no tuvieron tanto que ver con la geología como con el ambiente político, que no sólo condiciona el acceso al recurso geológico disponible, sino que a través del estímulo a la exploración posibilita el descubrimiento de nuevos recursos.

Las prioridades de la industria internacional minera se han concentrado, fundamentalmente, en cómo ganar acceso a los distritos mineralizados de mayor potencial en el mundo y en obtener de los respectivos gobiernos reglas claras y estables para la inversión. Menos atención le ha merecido el cómo hacer que los gobiernos y países mantengan en el largo plazo una actitud de bienvenida. Esta situación, en palabras de J. Cooney, Director de Asuntos Internacionales y Asuntos Públicos de Placer Dome Inc., podría significar que la industria minera estuviera acumulando más riesgo político global que el que generalmente se reconoce.

La estabilidad, paradójicamente, juega en contra de un mayor esfuerzo en este sentido, pues los ejecutivos de algunas compañías no sienten suficiente estímulo, dado que las señales sociales y políticas de corto plazo que reciben tienden a ser tranquilizadoras. Esta percepción dificulta la anticipación de escenarios y es lo que explica, en gran medida, los peculiares ciclos políticos ligados a esta actividad. De manera gráfica, y siguiendo al profesor de la Universidad de Georgetown Theodore Moran, podemos hablar de la existencia de un péndulo o ciclo (Project Cycle), que oscila desde la alfombra roja de bienvenida que se pone a los inversionistas en un momento dado, hasta el otro extremo del péndulo en que se les hostiga. De más está decir que los movimientos extremos del péndulo son muy malos para el país.

La minería es una actividad relativamente poco integrada al resto de la economía. Desde el punto de vista de la historia, la minería ha sido tradicionalmente en Chile un campo donde la inversión extranjera ha tenido una presencia dominante. Bástenos recordar el caso de la industria del salitre en el siglo pasado, que se encontraba controlada por los capitales de origen inglés, o las posteriores inversiones en la minería del cobre por compañías norteamericanas como Braden Copper Co. o Kennecott. Si bien sus encadenamientos indirectos son significativos, todavía no lo son en relación a su tamaño global. Para el volumen de negocios que representa la minería, ventas por más de US\$ 8 mil millones al año, el soporte de una capacidad propia de generar servicios de calidad y de alto valor agregado, con un buen nivel de adaptación y de desarrollo de mejoras tecnológicas, con impacto más profundo en la preparación y entrenamiento de técnicos y profesionales chilenos, son todavía muy incipientes. Esta falta de vinculación se da con mayor fuerza aún en su relación con el sector financiero.

La minería debería ser capaz de generar un mayor valor agregado, probablemente no sólo por medio de una mayor integración vertical, sino a través de la conformación de una industria de servicios más especializados e intensiva en mano de obra calificada, en el área técnica propiamente tal, y también en materia de servicios de ingeniería conceptuales, financieros, legales, etcétera.

Chile va a producir más de 4 millones de toneladas de cobre anuales a partir del año 1999. Esto le otorga un liderazgo, y una tremenda responsabilidad, a las empresas situadas en Chile en orden a defender los mercados del cobre y a tratar de estimular el consumo desarrollando nuevos usos, manteniéndonos en la vanguardia del conocimiento de los mercados mundiales y al tanto de todos los nuevos desarrollos tecnológicos que pudieran incidir en el consumo de cobre, con esquemas

con capacidad de anticipación que permitan evitar que se repita lo que nos pasó hace décadas con el salitre.

La disminución del peso relativo de la industria minera en los países desarrollados (sólo una empresa minera aparece en el listado de las 500 mayores empresas del Índice Fortune 500), la torna más vulnerable frente a las presiones medioambientalistas y de sustitución, procesos que justamente se originan en los centros más industrializados.

La sustentabilidad de la minería también tiene mucho que ver con la mitigación del impacto ambiental que acarrea. La tecnología disponible hoy día posibilita disminuir bastante los impactos negativos que la explotación minera tiene sobre el medio ambiente. Esto se refiere a minimizar los impactos mientras dura la explotación del proyecto, efluentes líquidos y emisión de gases a la atmósfera, y a optimizar el uso de recursos escasos, como el agua en la zona norte. El eventual cierre de la explotación debería incluir la reparación del impacto que se haya causado en el medio ambiente (reclamation).

A nuestro juicio, se hace muy necesario seguir avanzando en la integración de la actividad minera. Se requiere de políticas que estimulen la participación creciente de la industria minera en su conjunto en actividades de transferencia tecnológica y apoyo al proceso de desarrollo tecnológico y de aumento de la productividad del personal de las empresas mineras. Ello podría lograrse a través del financiamiento de un fondo de desarrollo tecnológico y de recursos humanos de la minería, con especial énfasis en el desarrollo de actividades en las regiones mineras.

Las empresas mineras deben estar más integradas al país, y no constituir meras operaciones de empresas situadas en otros países. Las empresas mineras deben tender a abrirse al Mercado de Capitales en Chile y, de esa manera, evidenciar un compromiso con el desarrollo económico nacional. Las AFPs chilenas deberían ser accionistas de la minería, negocio que ha demostrado ser el más rentable en el largo plazo (la rentabilidad promedio de la minería supera el 20%, mientras que la del sector que la sigue, el eléctrico, alcanza al 13%). Esto, sin duda, constituiría un mecanismo concreto de acercamiento de estas empresas a la economía y sociedad chilenas.

Desde el punto de vista financiero, la integración de la industria minera a la economía nacional se vería catapultada si se estimulara la participación de las empresas extranjeras en los Mercados de Capitales nacionales a través de la emisión de títulos de las compañías operadoras locales y la cotización de los títulos de sus compañías madres en las Bolsas de Valores nacionales o en una Bolsa offshore. Esto aumentaría en forma exponencial la capitalización de mercado del Mercado de Capitales local y potenciaría la realización de proyectos, como el de convertir Santiago en el centro financiero de América Latina. También, posibilitaría el desarrollo de un mercado prácticamente inexplorado por los inversionistas institucionales que en la actualidad buscan participar en el negocio minero local, pero carecen de oportunidades de inversión.

De esta manera, creemos, que se establecen las bases para una mayor y más profunda legitimidad de la actividad minera en Chile, logro que permite, además, resolver de mejor manera algunos factores que pudieran afectar su competitividad. Me refiero específicamente a la presión alcista de los costos laborales, a las mayores exigencias ambientales, a la conveniencia y posibilidad de reducir los costos energéticos, a la creciente dificultad para acceder a los recursos hídricos y, en general, a los aumentos de costos como resultado de cuellos de botella originados en la presión que se ejerce a una todavía insuficiente dotación de infraestructura de la economía chilena.

La minería es una actividad conveniente y que florece y se desarrolla bien en un ambiente

de paz social y de tranquilidad. En Chile tenemos una geología privilegiada y deberíamos ser capaces de generar una actividad autosustentable de largo plazo. Necesitamos que la distribución de las ganancias sea percibida por la comunidad nacional como equitativa, que la minería y sus principales empresas estén y sean vistas como muy integradas al país, ambientalmente limpias y comprometidas con su destino en el largo plazo.

Para finalizar, quisiera señalar que más de alguien pudiera extrañarse por ciertos requerimientos que se hacen a la minería y que no se perciben tan fuertemente en otros sectores de la economía nacional, inclusive ligados a recursos naturales. La observación es válida, pero el peso relativo de la actividad, su no renovabilidad relativa a la magnitud de las inversiones, la preponderancia de la inversión extranjera, su focalización espacial, el fuerte impacto ambiental, cierta tendencia a operar como enclave, se han traducido en que este sector tenga, históricamente, una visibilidad relativamente mayor que la de otros sectores, lo cual ha quedado claramente reflejado en la historia económica y política de Chile. Y las empresas mineras, estatales y privadas deben hacerse cargo de ello.

DERECHOS DE AGUA Y MINERÍA

Humberto Peña T.

1. El desafío de los recursos hídricos y la minería

Los principales rasgos que caracterizan los recursos hídricos del país son la elevada heterogeneidad espacial y la aridez que dominan gran parte del territorio. En efecto, el estudio del balance hídrico publicado por la Dirección General de Aguas (DGA) a base de un período estadístico de 30 años muestra que aun cuando Chile tiene una precipitación media similar a 1.500 mm/año, muy superior a la media mundial, y un caudal medio total 30.000 m³/s, sólo unos 13.000 m³/s tienen interés económico. Además de ese total sólo unos 10.000 m³/s se ubican en la zona más poblada del país entre Arica y Puerto Montt, y las dos regiones del extremo norte sólo registran un caudal total de 21 m³/s, con el agravante de que una parte significativa de dichos caudales drena hacia países vecinos o se trata de aguas de mala calidad.

A este respecto, cabe destacar que la disponibilidad de agua por habitante desde la Región Metropolitana (RM) al norte es de por sí muy pequeña, ya que en general es inferior a 1.000 m³/hab/año, e inclusive en algunas regiones alcanza a 500 m³/hab/año, umbrales considerados internacionalmente como altamente restrictivos para el desarrollo económico de los países. (Véanse Figuras 1 y 2.)

Por otra parte, el sostenido crecimiento económico y desarrollo social experimentado por el país durante la última década ha generado demandas cada vez mayores sobre los recursos hídricos por parte de los distintos sectores usuarios. Este crecimiento sostenido, sin precedentes en la historia, se produce en un contexto en el cual los recursos hídricos en una buena medida ya están comprometidos en el abastecimiento de los usos actuales.

A este respecto, la Dirección General de Aguas (DGA) ha venido desarrollando diversos estudios que permiten visualizar el escenario actual y futuro de uso de los recursos hídricos en el país. De acuerdo a dichos estudios, el uso del agua en el territorio alcanza a un valor aproximado a los 2.000 m³/s de caudal continuo, de los cuales el 67,8% corresponde a usos hidroeléctricos y el 32,2% a usos consuntivos. Estas cifras reflejan la importancia de la energía hidromecánica, la cual históricamente ha significado aproximadamente el 70% de la potencia instalada para la producción de energía eléctrica, correspondiendo el 30% restante a plantas térmicas cuyo objetivo ha sido otorgar seguridad al sistema frente a la variabilidad hidrológica.

Entre los usos consuntivos, el riego representa el 84,5% a nivel nacional con un caudal medio de 556 m³/s. Este caudal es utilizado en el abastecimiento de unos 2 millones de hectáreas,

FIGURA N° 1: DISPONIBILIDAD ANUAL DE AGUA POR HABITANTE PARA CADA UNA DE LAS REGIONES (REGIONES I A X)

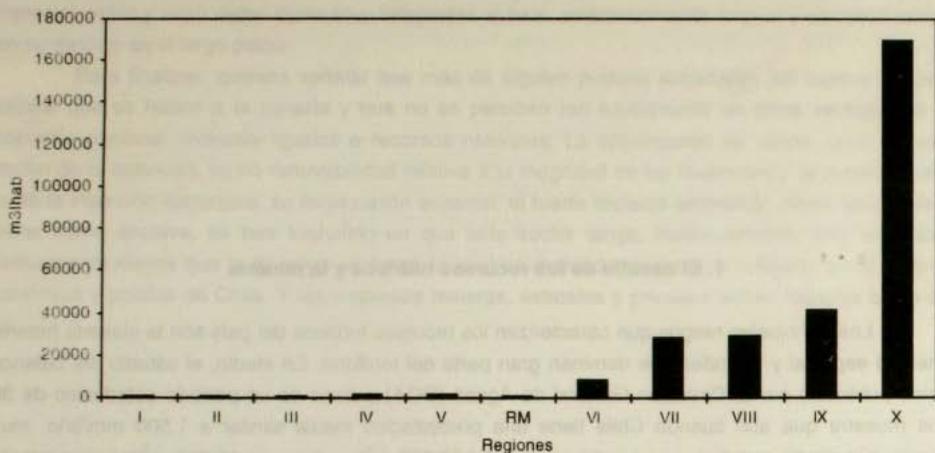
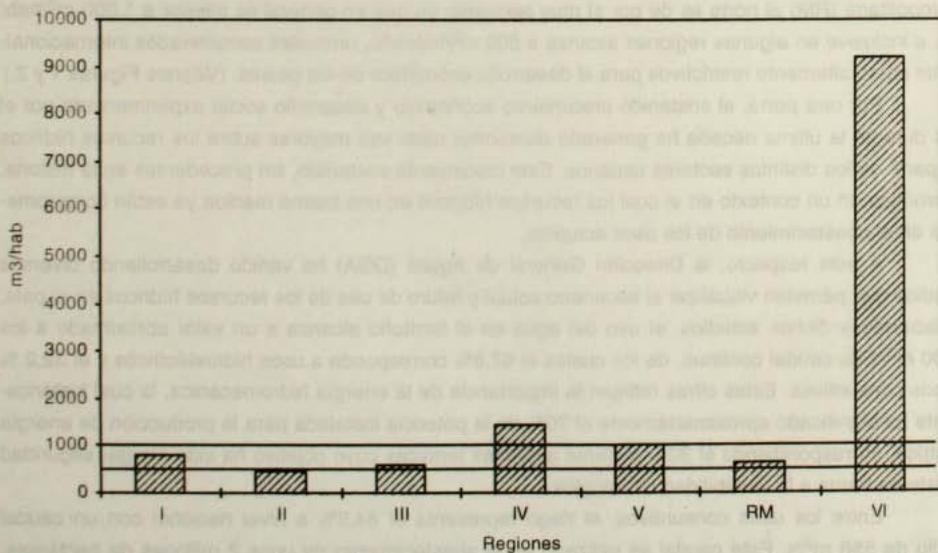


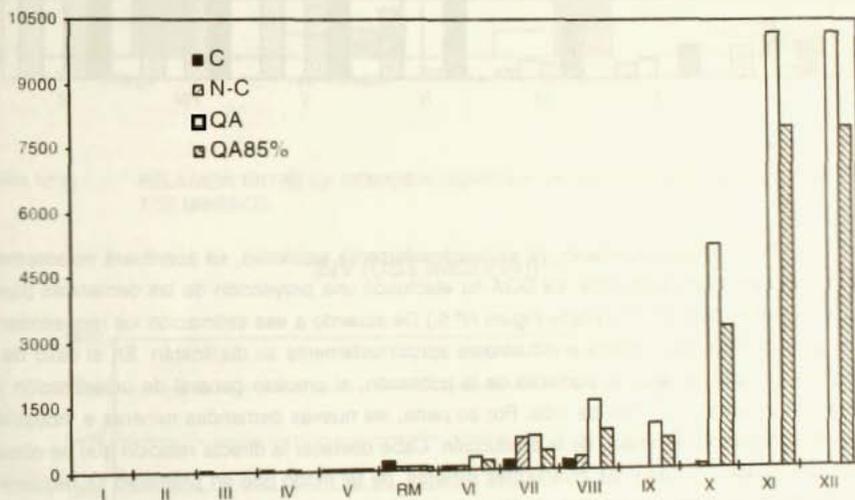
FIGURA N° 2: DISPONIBILIDAD ANUAL DE AGUA POR HABITANTE PARA LAS REGIONES I A VI



que se localizan casi completamente de la IX Región, al norte de las cuales se estima que 1,3 millón de hectáreas tienen una seguridad de riego razonable. El uso doméstico equivale al 4,4% de los usos consuntivos, con unos 29 m³/s, y es utilizado para dar abastecimiento al 98% de la población urbana y aproximadamente al 80% de la población rural (concentrada). Los usos mineros e industriales representan el 11% del uso consuntivo total, con caudales de 30 y 42 m³/s, respectivamente.

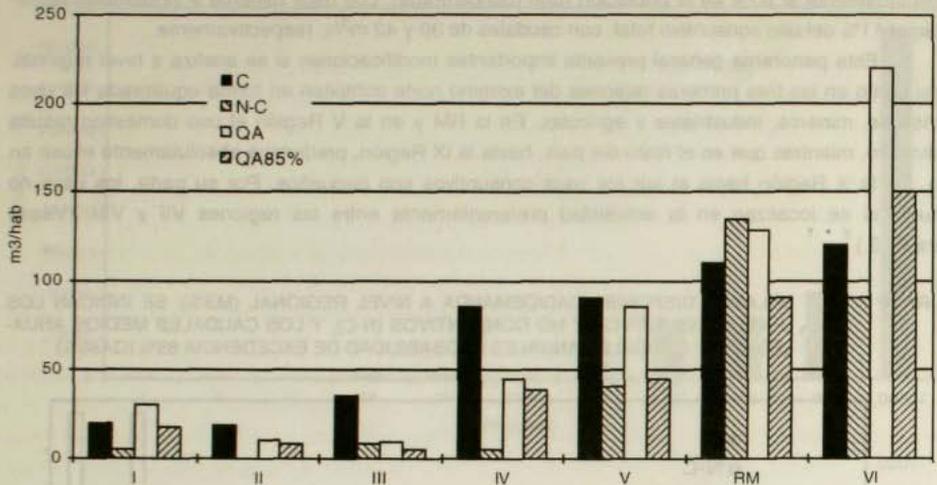
Este panorama general presenta importantes modificaciones si se analiza a nivel regional. Es así como en las tres primeras regiones del extremo norte compiten en forma equilibrada los usos domésticos, mineros, industriales y agrícolas. En la RM y en la V Región el uso doméstico resulta significativo, mientras que en el resto del país, hasta la IX Región, predomina absolutamente el uso en riego. De la X Región hacia el sur los usos consuntivos son pequeños. Por su parte, los usos no consuntivos se localizan en la actualidad preferentemente entre las regiones VII y VIII. (Véase Figura N° 3.)

FIGURA N° 3: BALANCE DISPONIBILIDAD/DEMANDA A NIVEL REGIONAL (M³/S). SE INDICAN LOS USOS CONSUNTIVOS Y NO CONSUNTIVOS (N-C); Y LOS CAUDALES MEDIOS ANUALES (QA) Y CAUDALES ANUALES PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA 85% (QA85%)



La magnitud de estos usos equivale a tasas de consumo por habitante muy elevadas en comparación a países de similar nivel de desarrollo, e inclusive de aquellos desarrollados, y además representan una extraordinaria presión sobre los recursos hídricos existentes, especialmente de Santiago al norte. En efecto, de la RM al norte las demandas superan el caudal disponible (Figura N° 4), situación que sólo se explica por el reuso reiterado de los recursos de agua a lo largo del curso de los ríos. La elevada intensidad de uso de los recursos de agua en esta zona explica el hecho que durante periodos de extrema sequía los sobrantes que llegan al océano sean prácticamente nulos hasta el río Rapel. La relación demanda/disponibilidad se presenta sustancialmente más favorable entre la VI y IX Región, y finalmente de la X Región al sur la disponibilidad supera ampliamente las demandas.

FIGURA N° 4: BALANCE DISPONIBILIDAD/DEMANDA PARA LAS REGIONES I A VI. SE INDICAN LOS USOS CONSUNTIVOS Y NO CONSUNTIVOS (N-C); Y LOS CAUDALES MEDIOS ANUALES (QA) Y CAUDALES ANUALES PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (QA 85%)



En el futuro, este escenario, ya extraordinariamente restrictivo, se acentuará notablemente debido a los nuevos requerimientos. La DGA ha efectuado una proyección de las demandas para el período de 25 años 1992-2017. (Véase Figura N° 5.) De acuerdo a esa estimación los requerimientos para los usos domésticos, mineros e industriales aproximadamente se duplicarán. En el caso de los usos domésticos ello se debe al aumento de la población, al proceso general de urbanización y al mejoramiento de las condiciones de vida. Por su parte, las nuevas demandas mineras e industriales resultan del crecimiento esperado de la producción. Cabe destacar la directa relación que se observa entre las demandas hídricas y las inversiones mineras, de tal modo que en promedio se requiere un caudal del orden de 1 por cada millón de dólares de inversión (Figura N° 6). El uso agrícola del agua se estima que puede crecer en aproximadamente 20% como resultado de las inversiones orientadas a mejorar la seguridad de abastecimiento de unas 500.000 hectáreas y de la incorporación al riego de otras 500.000 hectáreas. Cabe señalar que estos desarrollos suponen la construcción de nuevos embalses y grandes obras de infraestructura, así como la incorporación de nuevas tecnologías, como el riego por goteo, que permiten incrementar el área potencialmente regable. Es del caso señalar que estas proyecciones pudieran resultar excesivamente conservadoras en el sur del país, considerando que el escenario de competitividad internacional que se ha propuesto para el futuro de la agricultura en esa zona significa un fuerte estímulo para extender las áreas regadas, como importante medio para introducir mejoras tecnológicas significativas a la producción. Es de interés señalar que el incremento de la demanda para usos consuntivos significa un aumento relativo de los usos domésticos mineros e industriales, los que subirán su participación en el consumo total del 11 al 20% en el año 2017.

FIGURA Nº 5: PROYECCIÓN DE DEMANDAS PARA EL PERÍODO 1993-2017 (DGA)

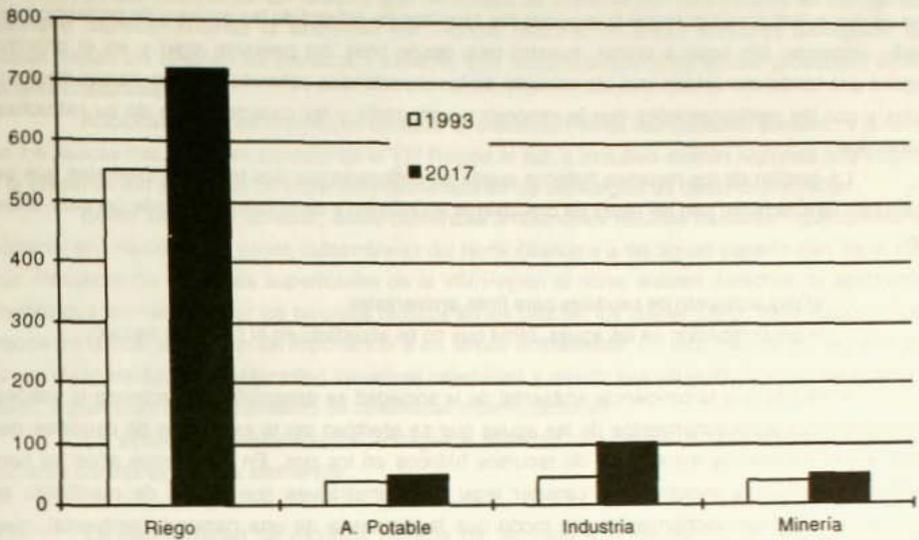
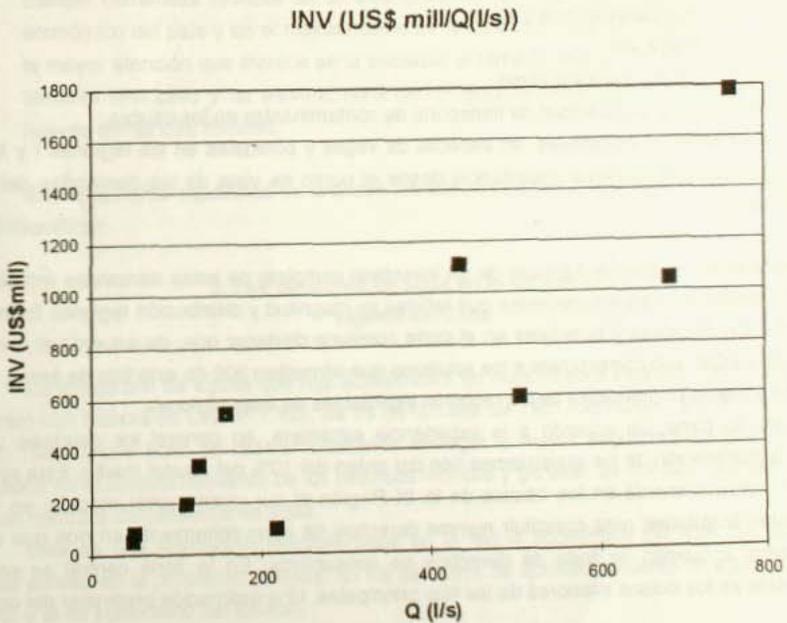


FIGURA Nº 6: RELACIÓN ENTRE LA DEMANDA HÍDRICA Y LA INVERSIÓN EN DISTINTOS PROYECTOS MINEROS



La experiencia de los países altamente desarrollados indica que la gestión de los recursos hídricos pasa progresivamente de una fase en la cual predominan los problemas de tipo cuantitativo a una en que la restricción principal la imponen los aspectos de calidad de las aguas y de protección del medio ambiente. Sin lugar a dudas, nuestro país desde fines del presente siglo y en el próximo seguirá una tendencia similar, con las ventajas de las experiencias obtenidas por los países desarrollados y con las particularidades que le imponen su geografía y las características de su estructura económica.

La gestión de los recursos hídricos queda condicionada por dos temas ambientales que se relacionan directamente con las tasas de crecimiento económico y de la calidad de vida del país. Ellos son:

- el requerimiento de caudales para fines ambientales
- la contaminación de las aguas, tema que no es abordado en el presente trabajo.

A medida que la conciencia ambiental de la sociedad se desarrolla, se reconoce la validez de determinados aprovechamientos de las aguas que se efectúan sin la extracción de caudales del cauce y que suponen la mantención de recursos hídricos en los ríos. En los últimos años se han materializado diversas iniciativas de carácter legal o administrativas que ponen de manifiesto la vigencia de estos aprovechamientos, de modo que la existencia de una demanda ambiental, que determina la disponibilidad de recursos hídricos para atender las nuevas demandas de los sectores productivos, es una realidad indiscutible.

Las demandas ambientales más relevantes se refieren a la reserva de caudales para:

- Conservación de ecosistemas fluviales y marinos
- Usos recreacionales en ríos y lagos
- Pesca y navegación
- Preservación escénica y turismo
- Mantención de la capacidad de transporte de contaminantes en los cauces
- Preservación de humedales, en especial de vegas y bofedales en las regiones I y II, tema que resulta de la mayor importancia desde el punto de vista de las demandas del sector minero.

Aunque no es posible disponer de un inventario completo de estas demandas ambientales, se pueden entregar algunos antecedentes que reflejan su magnitud y distribución regional. En relación a la preservación de vegas y bofedales en el norte conviene destacar que, de acuerdo al inventario realizado por la DGA, ello compromete a los acuíferos que alimentan 300 de este tipo de áreas, lo cual significa una limitación significativa de los recursos explotables de esas regiones.

Por su parte, de acuerdo a la experiencia extranjera, en general los caudales que se destinan a la mantención de los ecosistemas son del orden del 10% del caudal medio. Esta situación se presenta frecuentemente en los cauces de la IX Región al sur y, en menor medida, en la VIII, cuando existen solicitudes para constituir nuevos derechos de aprovechamiento en ríos que aún no están agotados o cuando se trata de derechos no consuntivos. En la zona central se presenta ocasionalmente en los cursos inferiores de los ríos principales. Una estimación preliminar del orden de

magnitud de los caudales que serán reservados para estos fines en esas regiones entrega un valor del orden de los 1.000 m³/s. En relación a la necesidad de preservación de caudales en los cauces, conviene destacar además la existencia del sistema nacional de áreas silvestres protegidas, las cuales tienen un régimen de protección especial que limita drásticamente el uso productivo de los recursos naturales.

Adicionalmente, es importante destacar el creciente interés recreacional, escénico y turístico de los cauces naturales, en especial de la VIII Región al sur, e inclusive existen regiones que asignan a la preservación ambiental un papel muy destacado en las estrategias de desarrollo regional.

Como se puede apreciar, estas demandas ambientales resultan bastante significativas, en especial en relación a las aguas subterráneas del Norte Grande y a las aguas superficiales de la zona sur. Respecto de las aguas superficiales de la VIII Región al norte, existen derechos de aprovechamiento que permiten agotar los recursos hídricos en los cauces, los cuales fueron constituidos en una época en la cual se daba poca importancia a los temas ambientales. En esta materia no se prevé que en un plazo mediano se desarrollen iniciativas orientadas a revertir esa situación, las que, en cualquier caso, supondrían el financiamiento de cuantiosas indemnizaciones.

En síntesis, los antecedentes entregados permiten caracterizar la situación de los recursos hídricos con los siguientes elementos:

- La disponibilidad de recursos hídricos de Santiago al norte constituye objetivamente una condicionante significativa a sus posibilidades de desarrollo.
- La gran mayoría de los recursos hídricos de esta región ya están comprometidos con las actuales demandas, y, en general, son reutilizados en forma sucesiva a lo largo de los cauces.
- Existen demandas hídricas en el área fuertemente crecientes originadas en el desarrollo económico del país y en el mejoramiento de la calidad de vida de la población, así como en la mayor atención que merece en la sociedad el tema ambiental. En este escenario frecuentemente restrictivo y de elevado nivel de conflicto se desarrolla la tarea de abastecer las nuevas demandas mineras.

En los párrafos siguientes se analizan las condicionantes y alternativas de solución que se pueden identificar.

2. Los derechos de agua en la legislación vigente en Chile

La legislación de aguas que rige actualmente en nuestro país está incluida básicamente en el Decreto con Fuerza de Ley N° 1.122, de 29 de octubre de 1981, conocido como Código de Aguas del año 1981. Dicho texto se redactó buscando entregar la mayor seguridad jurídica posible a los interesados en el aprovechamiento de los recursos hídricos y generar las condiciones para la existencia de un mercado de derechos de agua.

Esta es una legislación fundamentada en la teoría económica del libre mercado, por su marcado énfasis en la propiedad privada, en los derechos de aprovechamiento de aguas, la lógica de mercado y el rol subsidiario del Estado.

Esta normativa parte del supuesto de que la eficiencia en el uso del agua se mejora si ese bien asume un valor y precio reales; si los derechos de aprovechamiento se definen como un derecho real de dominio, permitiéndose su enajenación sin restricciones de ninguna especie, y se reduce a un mínimo el rol de la autoridad administrativa (Estado) en relación al manejo y desarrollo de este recurso natural.

Si bien, tanto el Código Civil (artículo 595) como el Código de Aguas (artículo 5) declaran que las aguas son bienes nacionales de uso público, esto es, de aquellos cuyo dominio pertenece a la nación toda, y su uso corresponde a todos los habitantes de la nación (artículo 589, Código Civil), se concede a los particulares un derecho de aprovechamiento sobre esas aguas (derecho a usar y gozar de las aguas), el que es definido como un derecho real con características similares a las del dominio civil, cuyo titular puede usar, gozar y disponer de él como de cualquier otro bien susceptible de apropiación privada. Así, una vez otorgado, tal derecho de aprovechamiento pasa a ser protegido como propiedad privada, según lo dispone el artículo 19 N° 24 inciso final de la Constitución Política.

De acuerdo a esta legislación, el agua es un bien principal y no accesorio de la tierra o industria para las que hubiera estado destinada, por lo cual en Chile se puede ser dueño de tierras sin agua, y de derechos de aprovechamiento de aguas sin tierra o industria a las cuales destinarlas. Lo anterior implica, además, que para el agua se ha establecido un régimen registral similar al de la propiedad raíz.

Entre otras materias, se eliminó la distinción entre concesión provisional y definitiva, y el beneficiario del derecho ya no está obligado a ejecutar obras de aprovechamiento con las cuales acredite la seguridad del uso real y efectivo del recurso; de esta manera no existe la obligación de usar los derechos de aprovechamiento de aguas y su no uso no trae aparejada ninguna sanción. De este modo, la Dirección General de Aguas constituye nuevos derechos cuando existe disponibilidad del recurso; no se menoscaban derechos de terceros y es legalmente procedente.

A diferencia de la legislación anterior, ya no existe un orden de preferencia en relación con los diversos usos del agua para decidir el otorgamiento de los derechos en caso de presentarse varias solicitudes sobre las mismas aguas.

En la actualidad, si se presentan varias solicitudes sobre las mismas aguas y no existen recursos para satisfacer todos los requerimientos, su otorgamiento se resolverá por remate al mejor postor (Artículo 142 y sgtes., Código de Aguas).

Los derechos de aprovechamiento son otorgados gratuitamente por el Estado a los particulares que los solicitan. Por otra parte, como ya se ha dicho, la conservación de estos derechos a lo largo del tiempo, se utilicen o no en forma productiva, no tiene para su titular costo directo alguno.

En el tema de los recursos hídricos se ha definido una institucionalidad caracterizada por un organismo estatal regulador único, la Dirección General de Aguas, independiente de los distintos sectores usuarios, la cual no asume funciones de ejecutar obras de aprovechamiento. Este servicio tiene la responsabilidad de investigación y medición del recurso, asignación original de los derechos de aprovechamiento, planificación, política y vigilancia de las aguas y cauces, y supervisión de las organizaciones de usuarios.

Cabe destacar que las funciones de planificación u ordenamiento son en la práctica nominales y las de policía y vigilancia, muy limitadas. Asimismo, la coherencia del modelo institucional, con un organismo independiente de los sectores usuarios, no considera el tema de la gestión de la calidad del agua, materia en la cual existe una gran dispersión de atribuciones en numerosas instituciones.

Este marco jurídico se ha mostrado eficiente en la práctica desde el punto de vista del fomento de la inversión en proyectos productivos asociados a la explotación de los recursos naturales.

Es así como en la actualidad un alto porcentaje de las exportaciones nacionales corresponde a productos de ese tipo (minería, fruticultura, celulosa, etcétera).

En este contexto, la libre transacción de los derechos de aprovechamiento constituye en general un mecanismo adecuado para la reasignación de los derechos concedidos, permitiendo un nuevo uso más productivo desde el punto de vista del interés general.

No obstante, es preciso reconocer que se presentan carencias y problemas que es necesario estudiar detenidamente, ya que el análisis en profundidad de la modalidad de aplicación de los mecanismos de mercado al tema de los derechos del agua demuestra que se contradicen, en ocasiones, las premisas básicas de la propia teoría económica y en otras las características físicas concretas de los sistemas hidrológicos. Por esta razón se hace necesario introducir reformas y correcciones, que garanticen una asignación eficiente de los recursos desde el punto de vista de la sociedad en su conjunto, en especial considerando sus intereses de mediano y largo plazo. Los problemas que requieren una solución más urgente son:

- La asignación original de los derechos.
- La consideración de las demandas de mediano y largo plazo, y la planificación del recurso hídrico.
- El mejoramiento de la eficiencia de uso de los recursos hídricos y la dinamización de los mecanismos de mercado.
- El desarrollo de una gestión integrada de los recursos hídricos en el ámbito de la cuenca.

Por exceder sus objetivos propios, en el presente informe no se hace un análisis en profundidad de estas carencias; sin embargo, el primer tema se aborda brevemente en relación a las modificaciones al Código de Aguas propuestas por el Gobierno al Congreso.

3. Alternativas de abastecimiento de nuevas demandas

Frente a estos desafíos, y en el marco jurídico-económico vigente, los nuevos usuarios de recursos hídricos deben abastecerse recurriendo a una de las cuatro alternativas siguientes:

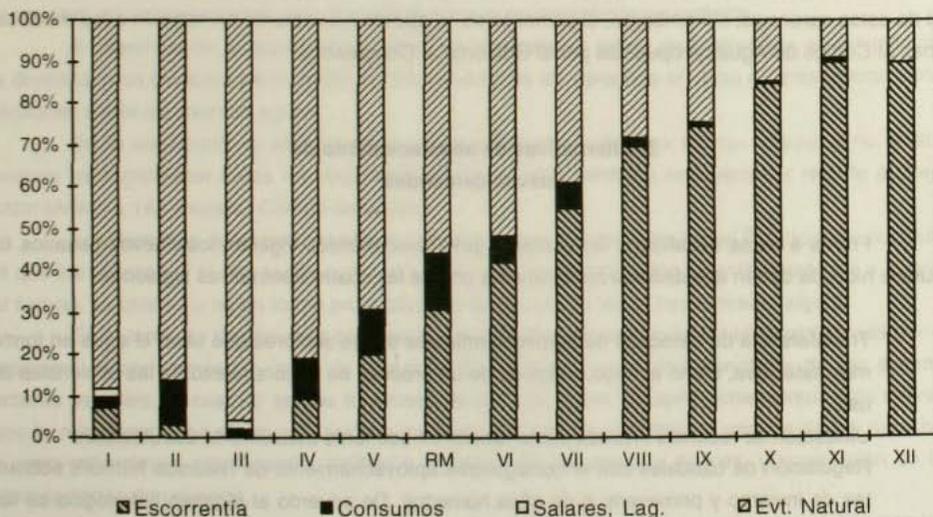
- Transferencia de derechos de aprovechamientos desde sectores que usan el agua en forma más extensiva, como el riego, después de un proceso de mejoramiento de las eficiencias de uso.
- Utilización de recursos hídricos subterráneos en acuíferos actualmente subutilizados
- Regulación de caudales con el consiguiente aprovechamiento de recursos hídricos sobrantes de invierno y primavera, o de años húmedos. De acuerdo al régimen hidrológico de los ríos, en el norte del país los embalses deberán diseñarse para una regulación interanual, mientras que en la zona central y sur deberán ser de regulación estacional.
- Descontaminación de cauces, reutilización de recursos tratados y desalinización de aguas salobres o de mar.

Asimismo, el marco jurídico-económico debe favorecer la implementación de estas alternativas como único medio de evitar que la escasez de recursos hídricos sea un obstáculo para el desarrollo nacional.

De acuerdo a sus características propias y localización geográfica cabe efectuar algunos comentarios relativos a las perspectivas concretas de abastecimiento de las demandas mineras, en el marco general de alternativas ya indicado:

- La posibilidad de desarrollo de fuentes no utilizadas de Santiago al norte son extraordinariamente limitadas. Específicamente los recursos de agua superficiales prácticamente están todos utilizados, como se verá más adelante; inclusive hay un número creciente de acuíferos en su límite de explotación. No obstante, de acuerdo a los resultados del balance hídrico de Chile (DGA, 1987) (Figura N° 7) existen importantes recursos (32 m³/s) en las regiones I, II y III que se evaporan desde salares y otras cuencas cerradas altioplánicas, los que, evidentemente, constituyen las mejores posibilidades de incorporar nuevas fuentes a través de la captación de aguas subterráneas. En la misma área existe, además, una cantidad significativa de recursos hídricos compartidos con países vecinos, los que suponen acuerdos internacionales para su aprovechamiento.

FIGURA N° 7: COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO DE CHILE A NIVEL REGIONAL
(En porcentajes)



- Considerando los escasos recursos de agua que se utilizan en la agricultura, en relación a los usos domésticos, mineros e industriales, en las tres regiones del extremo norte del país la relevancia de las transferencias intersectoriales como alternativa de abastecimiento de las nuevas demandas mineras no resulta especialmente destacada, y, en general, en las ocasiones en que se efectúan transacciones de ese tipo ellas se dan en un escenario relativamente conflictivo. A partir de la III Región hacia el sur, la clara predominancia del uso agrícola abre notablemente la posibilidad de acceder a recursos de agua a través de la compra de derechos de aprovechamiento a ese sector.

A continuación se analizan con algún grado de detalle los principales rasgos que se observan en ambas alternativas de abastecimiento.

3.1. Aprovechamiento de las aguas subterráneas

En relación a este tipo de aprovechamiento conviene destacar los siguientes aspectos:

- i) El acceso a los recursos hídricos subterráneos se da, en general, en un escenario de aguda competencia y acelerado agotamiento de los acuíferos disponibles. A este respecto, se puede señalar que durante 1996 se ingresaron a la DGA solicitudes de derechos correspondientes a unos 1.000 pozos, y el 85% de las solicitudes de la R. M. hacia el norte fueron por aguas subterráneas. Este acelerado incremento de las solicitudes de derechos por aguas subterráneas obligó a la DGA a dejar de constituir nuevos derechos en ocho acuíferos ubicados al norte de Santiago, por haberse alcanzado niveles de explotación similares a las recargas estimadas. Es importante destacar que la DGA antes de constituir nuevos derechos hace un balance entre las recargas de largo plazo de los acuíferos y los aprovechamientos y considera su obligación evitar la sobreexplotación de éstos, tanto por razones de sustentabilidad en el largo plazo de los aprovechamientos como por la necesidad de resguardar los derechos de los usuarios existentes. A este respecto, cabe recordar que la legislación define dos formas de limitar el acceso a los particulares a un acuífero. Ellas son la declaración de zona de restricción y la declaración de zona de prohibición. Mientras la primera supone una solicitud de los interesados y permite la constitución de nuevos derechos, en el carácter de provisional, la segunda es definida directamente por la DGA y además impide cualquier tipo de nueva constitución de derechos de aprovechamiento. La reciente normativa introducida por la DGA ha puesto especial énfasis en caracterizar el primer tipo de restricción como una instancia de carácter preventivo que se declara cuando existe un riesgo de sobreexplotación del acuífero: en cambio la zona de prohibición se ha definido que corresponde a una situación de sobreexplotación comprobada.
- ii) Existen importantes limitaciones ambientales para la explotación de los recursos hídricos de las cuencas cerradas de las regiones del norte del país por la presencia de salares y humedales con ecosistemas delicados, que corresponden a áreas que de acuerdo a nuestra legislación presentan un régimen de protección especial, ya sea a través del Código de

Aguas (vegas y bofedales) o del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas (SNASPE). De acuerdo a la ley 19.300 de bases de medioambiente las actividades que se desarrollan en dichas áreas necesariamente deben someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental.

De acuerdo a lo anterior, y considerando la magnitud de los recursos hídricos involucrados, la evaluación científico-técnica de las modalidades concretas de explotación de parte de dichos recursos, sin que ello signifique un deterioro ambiental significativo, es una tarea de gran importancia estratégica para el desarrollo futuro de la minería en esas áreas.

- iii) En el contexto de aguda competencia por los recursos de agua subterránea señalado en i), la autorización de exploración en bienes nacionales que corresponde otorgar a la DGA a los particulares que lo solicitan resulta un elemento extremadamente crítico y conflictivo. De acuerdo a la normativa vigente, dicha autorización entrega al particular la exclusividad para efectuar exploraciones por un período determinado y le otorga además la prioridad para los efectos de constituir nuevos derechos. La importancia de esta autorización ha llevado a una solicitud masiva de áreas de exploración, las cuales en ocasiones no están exentas de un mero afán especulativo. Es así como la DGA ha recibido más de 300 solicitudes de exploración en un año, y existen regiones con gran parte de su territorio solicitado o comprometido. Con el propósito de facilitar a la mayor parte de interesados el acceso a las posibilidades de exploración y en el marco de la legislación vigente, la DGA ha introducido recientemente (1996) modificaciones a la normativa. Dichas modificaciones buscan que los peticionarios soliciten las áreas y los plazos efectivamente requeridos por las investigaciones, que las autorizaciones mantengan su vigencia sólo en la medida que el interesado realmente lleve adelante sus labores de investigación y que los resultados queden disponibles para el país, una vez solicitados los derechos de agua a que puedan dar origen. Cabe destacar que la DGA ha llevado adelante una política, no exenta de conflictos, tendiente a facilitar las exploraciones, consciente de la trascendencia que tiene para el desarrollo nacional descubrir nuevos recursos de agua.
- iv) En un escenario de progresivo agotamiento de los recursos disponibles, adquiere una nueva importancia el tema de la gestión óptima de los acuíferos, materia en la cual no existe experiencia en el país. Definiciones tales como los descensos económicamente aceptables de las aguas subterráneas y la localización espacial óptima de las extracciones son problemas complejos de ingeniería de recursos hídricos y que en un futuro próximo deberán ser asumidos a través de negociaciones entre los interesados y con el apoyo de herramientas técnicas idóneas para esos fines. Teniendo este escenario en perspectiva, la Dirección General de Aguas incorporó entre las modificaciones a la normativa de aguas subterráneas los procedimientos para que se organicen en los acuíferos sometidos a áreas de restricción comunidades de aguas subterráneas equivalentes a aquellas que se organizan en torno a una obra de aprovechamiento común, como un canal o una Junta de Vigilancia en el ámbito de un cauce natural. Dichos entes, inexistentes actualmente en el país, en nuestra opinión debieran desempeñar un papel de gran importancia en la gestión de acuíferos críticos, desarrollando programas de monitoreo y de investigación, implementando un sistema de

control de extracciones y en general iniciando acciones coordinadas entre los usuarios, tareas todas que resultan imprescindibles y que en ningún caso sería adecuado y posible que ellas fueran asumidas por el Estado. Adicionalmente, y en la perspectiva de facilitar y flexibilizar la gestión de los acuíferos, se incluyó en la nueva normativa la posibilidad de cambio de punto de captación de un derecho existente en un acuífero, lo que permite reemplazar pozos o relocalizarlos de acuerdo a las necesidades de gestión de las aguas subterráneas..

3.2 Transferencias de derechos de aprovechamiento

Aunque en general la actividad del mercado de derechos de aprovechamiento es escasa, la elevada productividad del agua utilizada en la minería le otorga a la compraventa de derechos un especial interés, en especial cuando existen recursos significativos dedicados a la actividad agrícola. A este respecto, es conveniente efectuar algunos comentarios en relación a la implementación práctica de estas transferencias, tal como se han observado en situaciones concretas:

- i) La inadecuada definición de los derechos existentes puede ser fuente de conflictos al momento de destinarlos a otros usos, ya que propiedades esenciales del derecho, como son su carácter de permanente o eventual, sus características de continuidad, discontinuidad o uso alternado, e inclusive el valor del caudal, muchas veces no se incluyen en los registros legales.
- ii) La transferencia de derechos de aprovechamiento usualmente va asociada a la necesidad de traslado del punto de captación, lo cual puede generar impactos negativos en otros usuarios; por ejemplo por las nuevas condiciones que se generan en la operación de las obras de aprovechamiento común. Por esta razón, para hacer efectiva una transferencia, frecuentemente se deben desarrollar negociaciones con otros usuarios.
- iii) Es importante señalar que el cambio de destino de un determinado caudal, cuando se trata de una magnitud comparativamente relevante, puede significar un riesgo para el equilibrio del sistema hidrológico de aguas abajo, el cual no está considerado explícitamente en la legislación chilena. En efecto, en los ríos del país, debido a que el uso efectivo de las aguas difícilmente alcanza el 30% del caudal derivado por los canales, un 70% retorna a los cauces y son reutilizados en forma sucesiva hasta 5 veces. De ese modo, el traspaso de caudales a un uso sustancialmente más intensivo, que realmente consuma gran parte del caudal derivado, o su aprovechamiento en un lugar alejado, puede significar una reducción muy importante de los caudales históricos aguas abajo, generándose un escenario de conflicto en un marco legal inadecuado. Aun cuando no existen precedentes, posiblemente en algunos proyectos en los que por sus características corresponde que ingresen al sistema de evaluación de impacto ambiental, esta materia deberá ser motivo de análisis.

- iv) Aunque no corresponde propiamente a una transferencia de derechos de aprovechamiento de un usuario a otro, es importante destacar el notable impacto que ha tenido en el abastecimiento de nuevas demandas la liberación de recursos al interior de una misma empresa a través del mejoramiento de la eficiencia de uso de los derechos de agua que ya poseía. Esta tendencia a mejorar la eficiencia en el uso de agua en la minería ha llevado en algunos casos a disminuir prácticamente a la mitad el consumo de agua por metro cúbico de mineral tratado, permitiendo el desarrollo de nuevos proyectos sin necesidad de recursos hídricos adicionales.

4. Las modificaciones al Código de Aguas

La modificación al Código de Aguas que se encuentra en discusión en el Congreso considera aproximadamente diez materias distintas priorizadas por el Gobierno. A continuación se entregan algunos comentarios en relación a las tres modificaciones que han sido motivo de mayor controversia.

- el establecimiento de una patente a los derechos no utilizados.
 - la justificación de los caudales en las nuevas solicitudes de derechos.
 - la obligación de reserva de un caudal ecológico en la constitución de nuevos derechos.
- i) Establecimiento de la obligación de pago de una patente a los derechos de agua constituidos y cuyos dueños no la utilizan

En la actualidad los derechos de aprovechamiento son concedidos en forma gratuita y a perpetuidad a quien los solicita, sin ningún compromiso de uso ni aprovechamiento productivo. Esta situación constituye una transferencia de riqueza a los particulares, de un Bien Nacional de Uso Público, claramente anómala. Tal como lo prevé la teoría económica, esta situación puede dar origen a una actividad especulativa que, en definitiva, puede distorsionar gravemente la asignación de los derechos de aprovechamiento, con el consiguiente costo para el desarrollo del país.

En efecto, como era previsible, un sistema de asignación (único en el mundo) mediante el cual un bien económico de la importancia del agua es entregado a perpetuidad al que lo solicite, sin ninguna obligación ni costo, conduce a la transferencia masiva a manos de aquellos que, conociendo el vacío legal existente, están en condiciones de apreciar la enorme importancia estratégica de los recursos hídricos para el desarrollo nacional.

Es así como se ha solicitado a la Dirección General de Aguas la constitución de nuevos derechos por más de 50.000 m³/s, valor que representa sobre cuatro veces el caudal de los ríos utilizables del país y que no tiene relación alguna con los requerimientos previstos para el desarrollo nacional en los próximos 50 años.

Esta situación puede significar trabas artificiales para el uso de los recursos hídricos por parte de los verdaderos interesados en el aprovechamiento de las aguas, y está lejos de resultar indiferente para el normal avance de las actividades productivas.

El objetivo del Gobierno en esta materia al proponerse una modificación al Código de Aguas es corregir el grave escenario que se generó en el país en relación a las solicitudes de derechos de

aprovechamiento de aguas a partir del Código de 1981, para lo cual propone la incorporación de un costo a la tenencia de un derecho de aprovechamiento cuando dicho derecho no esté siendo utilizado. El valor de la patente es creciente hasta el año 11º; se establece un período de gracia, y su magnitud se ha deducido directamente de la valorización económica del perjuicio que puede significar para la sociedad la no utilización de esos recursos.

Como es evidente, los propósitos del Gobierno al proponer una modificación legal al Código de Aguas no tienen ninguna relación con un supuesto y absurdo propósito de mejorar la eficiencia del uso del agua a través de procedimientos burocráticos, para lo cual es obvio que el establecimiento de una patente por no uso resulta por completo inadecuado.

Del mismo modo, suponer en ello una amenaza a la seguridad jurídica y al rol del mercado como instrumento de reasignación se aleja completamente de la realidad. Es más, para el Gobierno resulta absolutamente claro, como se señala en el mensaje del propio proyecto, que cualquier análisis que aborde la realidad de los desafíos que deberá resolver el país en materia de desarrollo de sus recursos hídricos debe concordar en la decisiva y creciente importancia que tendrá el mercado como elemento clave para abastecer las nuevas demandas de recursos hídricos asociados al crecimiento económico-social del país. De este modo, el texto no introduce ninguna restricción en el funcionamiento de dicho mercado, como tampoco a la libre transacción de los derechos de agua, y los más de 300.000 usuarios seguirán decidiendo acerca de dichos derechos en la misma forma actual. Por su parte, los escasos detentores de derechos de agua no utilizados, pero de gran trascendencia por su caudal, tendrán que evaluar si les resulta adecuado mantenerlos indefinidamente sin perspectiva de uso, pero pagando una patente que refleje el costo para la sociedad por mantenerlos inactivos o si los transfieren a un interesado que efectivamente intente desarrollarlos. En consecuencia, lo que se debiera esperar es justamente la activación del mercado de derechos de aprovechamiento, por el interés en vender de aquellos que no les han definido un destino productivo a los derechos que poseen.

En la misma medida se puede prever el desarrollo de un escenario futuro, en el cual los interesados en nuevos proyectos en áreas donde aún existen recursos hídricos no utilizados podrán solicitar la constitución de nuevos derechos directamente a la autoridad, sin que se presenten barreras artificiales controladas por terceros, compitiendo a base de disponer el mejor proyecto y con una perspectiva de materialización razonablemente próxima, pudiendo afectar el desarrollo de regiones enteras y del país en su conjunto.

Algunos han señalado que este hecho no constituye verdaderamente un problema, ya que si hay interesados los derechos se reasignarán, pues el dueño tiene un costo de oportunidad, el cual lo induce a vender. La realidad muestra que aun cuando en este comportamiento se puede dar un cierto número de casos, este análisis refleja poca comprensión del problema general.

En efecto, dicho análisis económico queda frecuentemente desvirtuado por las distorsiones producto del control que permite el agua de otras actividades y mercados; por la presencia en las decisiones de motivaciones no-económicas; por la existencia de actividades incipientes, poco consolidadas, que resultan, en definitiva, desincentivadas, aun cuando pueda ser de interés nacional o regional (riego), por la existencia de escalas técnicas y económicas muy distintas en las actividades relacionadas con el agua, y por las dificultades administrativas para hacer operativas las reasignaciones y otras.

Obviamente, la fijación de una patente a los derechos no utilizados supone una forma de definir qué se entiende por no uso y una participación de la administración en el proceso de identifica-

ción de los pagadores. Con este propósito se han establecido ciertas presunciones orientadas a restringir la discrecionalidad administrativa.

Dichas presunciones, por ejemplo, establecen que si existe la obra de captación se puede entender que hay uso. No cabe duda de que en esta materia es posible definir durante el debate parlamentario la redacción más adecuada, con el propósito de evitar dobles interpretaciones, teniendo siempre presente que el objetivo no es controlar administrativamente la eficiencia de uso. En todo caso, los particulares siempre podrán reclamar el respeto de un derecho ante los tribunales de justicia.

ii) Justificación de los caudales en la solicitud de nuevos derechos de aprovechamiento

En relación a la obligación de justificación para los nuevos derechos que se incluye en la modificación propuesta, parece necesario señalar en primer lugar que resulta de la más elemental prudencia que el traspaso a un privado de un bien que legalmente es definido como un Bien Nacional de Uso Público se realice sobre una razonable convicción de que dicho bien va a ser utilizado (exigencia que se aplica en todos los países del mundo) o al menos (como se propone) que no cause un perjuicio a la sociedad y que el caudal sea consistente con los fines invocados.

La hipótesis que indica que ello sería innecesario, ya que si un bien tiene algún valor habrá varios interesados en el mismo, se ha mostrado completamente irreal en relación a los recursos hídricos. De otro modo, habría que suponer que decenas de miles de metros cúbicos por segundo no tienen ningún valor para la sociedad, al habérselos solicitado sin oposición.

En esta situación, inclusive por razones éticas, no resulta conveniente que se otorguen los derechos en la forma actual, es decir, bastando para ello la sola solicitud y que exista disponibilidad.

Pero, además, la situación resulta especialmente inaceptable si existe la convicción que de la constitución de un nuevo derecho va a resultar un perjuicio para el equilibrio de la cuenca o para el interés público. Este, por ejemplo, es el caso de localidades aisladas, con escasas alternativas válidas de abastecimiento de aguas para uso doméstico y que, eventualmente, pueden quedar excluidas de su única fuente de abastecimiento. La situación resulta en esos casos tan aberrante que normalmente se ha encontrado una solución política al problema, al margen de los códigos.

Adicionalmente, respecto del tema de la justificación de los nuevos derechos, cabe recordar las limitaciones que tiene el mercado para resolver situaciones muy complejas que se presentan en el mediano y largo plazo. De ese modo, si la constitución original de los derechos de agua no considera una visión de la evolución futura de las demandas en las cuencas se pueden generar obstáculos insalvables o de alto costo en el desarrollo nacional. Se trata de un problema fácilmente asimilable a los costos que genera el crecimiento urbano si no está sometido a una visión integrada y previsoras como la de los planes reguladores, en especial si se consideran los problemas ambientales y de protección de las cuencas asociadas a la gestión de los recursos hídricos.

De acuerdo a lo anterior, las modificaciones legales propuestas complementan las atribuciones actuales de la Dirección General de Aguas en relación a la planificación del recurso hídrico en las fuentes naturales, incluyendo ahora la posibilidad de limitar o denegar una nueva solicitud por derechos de aprovechamiento cuando existen razones fundadas de bien público o de riesgo del equilibrio de las cuencas.

Cabe advertir, como se ha planteado, que la norma propuesta no impide la libre transacción

de los derechos una vez utilizados, ya que siempre será conveniente una reasignación, la cual se supone será para dedicar el recurso a un propósito más productivo que el original.

iii) **Obligación de reserva de caudales mínimos ecológicos en la constitución de nuevos derechos**

La obligación misma de reserva de estos caudales mínimos no ha sido cuestionada directamente por los distintos sectores; sin embargo se ha señalado que estaría contradiciendo la ley 19.300 de Bases de Medio Ambiente, ya que correspondería a la CONAMA (COREMAS) definir esta materia a través del sistema de evaluación de impacto ambiental. En realidad una aseveración de esa naturaleza muestra un claro desconocimiento del articulado y alcances de dicha ley y del problema concreto que se quiere resolver.

En primer lugar, es conveniente señalar que la modificación al Código de Aguas propuesta no sólo no contradice la ley 19.300, sino que prácticamente reproduce textualmente sus artículos 41 y 42, complementándolos en el sentido de precisar en el caso del agua cuál es el organismo encargado por ley de regular el uso de un recurso natural y la instancia de su aplicación.

De ese modo, sólo se busca dar una mayor coherencia al Código de Aguas en lo relativo al proceso de constitución de nuevos derechos.

La idea de que la definición de estos caudales debiera hacerse a través del sistema de evaluación de impacto ambiental es además completamente inconveniente, atendiendo las siguientes circunstancias:

- La ley 19.300 establece claramente cuáles son los proyectos que entran al sistema, de tal modo que una fracción insignificante de los nuevos derechos dan origen a proyectos con esas características. Cabe recordar que la DGA en la actualidad recibe unas 3.000 solicitudes de distinta naturaleza cada año. ¿Significa que no se considerará un caudal mínimo en más del 90% de las solicitudes?
- El dueño de un derecho de agua en la actualidad no tiene ningún plazo para realizar un proyecto de aprovechamiento y, si corresponde, la evaluación de impacto ambiental asociada. Lo anterior significa que, de acogerse los comentarios, en ese lapso, que puede durar décadas, existirá una completa incertidumbre en los ríos acerca de la existencia de disponibilidad para otros usuarios. ¿Sería razonable esperar a que el poseedor se decida a preparar un proyecto para que se pueda resolver acerca de las nuevas solicitudes?
- Adicionalmente, desde la perspectiva empresarial parece conveniente que antes de llegar a estados avanzados del proyecto se conozca el recurso efectivamente utilizable.

5. Comentarios finales

Como se ha indicado en los párrafos precedentes, el desarrollo de las nuevas actividades mineras se realizará en un escenario de extraordinaria competencia de los recursos hídricos; sin embargo, en el marco jurídico-institucional vigente existen alternativas de abastecimiento que hacen

posible la materialización de los proyectos, ya sea a través del aprovechamiento de nuevas fuentes o por la adquisición de derechos de agua.

En este contexto, es de importancia destacar que:

- En el país no está en duda el carácter de los derechos de aprovechamiento de aguas, como bienes patrimoniales y transferibles, y, en consecuencia, están garantizados la seguridad jurídica de los mismos y el rol del mercado en su reasignación.
- El aprovechamiento de buena parte de las potenciales nuevas fuentes de agua pasa por la evaluación precisa de sus recursos hídricos y de las demandas ambientales asociadas, lo que supone un profundo conocimiento científico de los complejos procesos físicos, químicos y biológicos presentes en los sistemas hidrológicos. En ausencia de ese conocimiento será extremadamente difícil establecer el adecuado equilibrio entre los requerimientos del crecimiento económico y la conservación ambiental, pudiendo quedar la toma de decisiones distorsionada por opiniones subjetivas, sin fundamento. De acuerdo a lo anterior, el fomento de la investigación científica en estas materias tiene un gran valor estratégico para el futuro desarrollo de la minería en las zonas áridas de Chile. En este sentido, la cooperación de los actores públicos y privados en torno a la investigación se presenta como un objetivo del mayor interés, el cual se podría concretar, por ejemplo, a través de la creación de un instituto especializado.
- En un escenario de uso intensivo de los recursos hídricos en una cuenca (o subcuenca), la interdependencia entre los distintos usuarios se incrementa significativamente. Esta realidad debe ser internalizada por cada uno de los actores. De acuerdo a lo anterior, resulta de la mayor importancia la disposición de los usuarios a apoyar el fortalecimiento de las instancias de participación, con el propósito de lograr una gestión de los recursos hídricos técnica, equitativa, integrada y de elevado nivel profesional.

EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Osamo Suzuki*

1. Introducción

Hoy en día existe una conciencia bastante generalizada de la importancia del agua subterránea y un uso de la misma mucho más común que hace un par de décadas. Una de las principales causas del mayor uso del agua subterránea en los últimos años es que en casi todo el país el agua superficial está agotada desde el punto de vista de los derechos susceptibles de ser otorgados.

Este mayor uso también se debe a un aspecto práctico, puesto que en muchas ocasiones el agua subterránea se ubica con mayor facilidad que el agua superficial, por ejemplo en el caso de una industria que puede construir un pozo o varios en el mismo sitio de la planta, o en los predios agrícolas con cultivos de alta rentabilidad. El agua subterránea les da independencia, seguridad de abastecimiento y constancia en la calidad del agua.

En el caso de la minería o empresas que tienen alto consumo del líquido, el agua subterránea es la única fuente que puede satisfacer su demanda, salvo que se compraran derechos de agua superficial, en cuyo caso no se están utilizando recursos nuevos, sino que sólo cambiando el uso.

2. Restricciones de la exploración

La exploración del agua subterránea tiene en la actualidad una serie de limitaciones, las que señalaremos a continuación:

Distancia económica para cada proyecto

Como las áreas más evidentes de contener acuíferos productores ya están siendo explorados, las áreas hidrogeológicamente interesantes se encuentran bastante retiradas de las áreas urbanas. Por otro lado, cada proyecto, dependiendo de su tamaño y productividad, define una distancia máxima para traer el agua, ya que una inversión mayor en ese ítem lo hace poco rentable.

* Presidente, Exploración y Desarrollo de Recursos de Aguas S. A.

Ley de Aguas

Para explorar agua subterránea es necesario contar con un permiso de exploración de la Dirección General de Aguas, por lo cual antes de iniciarla es necesario verificar si los sectores de interés están ya concedidos. Esta situación es de suma importancia en el norte, ya que prácticamente no existen áreas libres, salvo en sectores muy alejados o donde la existencia de agua subterránea es muy difícil.

Los permisos de exploración de agua son otorgados en cada región por la oficina respectiva de la Dirección General de Aguas, por lo cual la información necesaria debe ser recolectada en esas oficinas. Entiendo que está en implementación un sistema centralizado de información en esa institución para facilitar la información a los usuarios.

Ley de Vegas y Bofedales

Esta ley está dirigida a la protección de sectores donde la flora y fauna son de importancia por aspectos ecológicos o sociales relacionados con los habitantes del altiplano chileno de la Primera y Segunda Región.

Esta ley especifica mediante coordenadas y mapas los sectores restringidos.

Parques Nacionales y Otros

Otro aspecto restrictivo al iniciar una exploración de agua subterránea son las áreas cubiertas por Parques Nacionales y aquellas que son de interés medioambientales y turísticos.

Recursos Limitados

Una vez ubicadas las áreas que no tienen las restricciones antes mencionadas, debemos enfrentarnos a la disponibilidad del recurso, es decir, buscar sectores donde la cantidad de agua disponible sea atractiva para el proyecto. Recordemos que hay muchos sectores del norte que se consideran agotados, como son la cuenca del río Copiapó, algunos sectores asociados al río Loa, Azapa, Pampa del Tamarugal y algunas cuencas que están siendo explotadas intensivamente.

El que solicita agua en estas regiones que se consideran agotadas requiere de estudios muy detallados y de alto costo que, a pesar de demostrar la eventual existencia de recursos adicionales, no aseguran la obtención de los derechos de aprovechamiento.

Luego los lugares donde se pueden desarrollar las exploraciones de agua subterránea, serán aquellas áreas libres de restricciones legales que queden dentro de un radio determinado, fijado por la evaluación económica preliminar del anteproyecto.

3. Fases de una exploración de agua subterránea

a) Etapa preliminar

El objetivo de la etapa preliminar es básicamente determinar si el sector escogido tiene condiciones hidrogeológicas favorables para continuar con la exploración que significa una inversión de consideración. Por este motivo, se utilizan todas aquellas técnicas que no siendo onerosas permiten tener un juicio relativamente acertado sobre el potencial de agua subterránea del sector. Obviamente que la certeza de esta etapa depende de la cantidad de información previa existente, sobre todo en lo que se refiere a sondajes y geología.

Análisis de situación de derechos

La primera actividad es realizar un catastro de derechos en la zona de interés fijada por el radio determinado por la distancia máxima que el proyecto acepta como aducción de agua.

El catastro debe incluir los aspectos de concesión de exploración y derechos de aprovechamiento, tanto aprobados y vigentes como aquellos en trámite.

Reconocimiento

Una vez conocida el área de interés se debe reconocer aquellos sectores que geológicamente muestran condiciones para la existencia de acuíferos.

Análisis de antecedentes existentes

Se deben analizar los estudios previos del área y los antecedentes geológicos, hidrológicos y de sondajes. Si existen antecedentes, ellos darán el primer indicio sobre los posibles acuíferos.

Análisis de imágenes de satélites

En las zonas sin antecedentes, la imagen satelital es de gran ayuda para reconocer el área y ver la forma y extensión de las cuencas, así como también el sistema de fallas de la zona

Geofísica preliminar

La geofísica es una herramienta que permite en forma indirecta detectar la existencia de unidades acuíferas y determinar su forma y extensión.

Como es una herramienta indirecta, lo más importante para la interpretación de los resultados es la calibración, la que debe realizarse en un pozo con estratigrafía conocida.

Luego de un proceso computacional, la geofísica entrega resultados que, dependiendo de la forma del trabajo, se traduce en un corte del suelo, donde se muestra una serie de capas de suelo con distintas características de resistividad. Al calibrar los resultados o distintas unidades de igual resistividad, éstos se asocian a un determinado tipo de suelo o roca y así es posible obtener un corte del suelo con tipos de suelo o roca, es decir gravas, arenas, arcillas, limos, rocas de diferentes tipos.

Recomendaciones para etapa siguiente

Si la geofísica y los antecedentes básicos indican la posible existencia de un acuífero, éste se puede evaluar en forma preliminar en cuanto a su tamaño y potencial volumen almacenado, lo cual señalará la conveniencia de seguir adelante con la exploración.

b) Etapa de exploración

Geología

Las áreas favorables deben ser objeto de una definición del marco geológico de detalle, preferentemente a escala 1:50.000. Esta geología debe contener, además de la geología de superficie, un conocimiento sobre la historia geológica de los principales eventos, una estratigrafía regional y además definiciones de los límites roca/relleno y principales lineamientos y fallas de la zona.

Hidrología

La hidrología permite estimar la recarga del acuífero, que será el índice básico para saber la cantidad de agua que será posible obtener como derecho de aprovechamiento.

La limitante más importante de estos estudios es la falta de antecedentes básicos, como para calcular con mayor grado de exactitud los eventos extremos y la evaporación desde las cuencas cerradas, por señalar algunos de los factores que son relevantes en las evaluaciones del norte y que dicen directa relación con los respaldos técnicos para obtener derechos.

Geoquímica

La geoquímica es una herramienta complementaria a la hidrogeología, que permite, mediante el contenido de elementos químicos disueltos en el agua, y contenido isotópico de su molécula, definir patrones de flujo, origen del agua y estado de mezcla de distintos cuerpos de agua, entre otros.

Estos antecedentes ayudan bastante a complementar el conocimiento de la hidrogeología de cualquier sistema acuífero.

Pozos de exploración

La perforación de los pozos de exploración es la actividad de mayor importancia y costo, pero que a la postre indicará directamente la existencia de acuíferos explotables en la zona de estudio.

Estos pozos son de un diámetro en torno a las 6" y deben alcanzar una profundidad tal que permitan calibrar los resultados de los trabajos de geofísica, especialmente respecto de los límites de cada unidad y ubicación de la roca basal.

Geofísica

En esta etapa la geofísica deberá ser orientada a la definición de otras áreas de interés y a la determinación de la geometría del sistema acuífero, ya que ello sería muy costoso de hacer con pozos de explotación. Esto es posible de desarrollar, debido a que los pozos de exploración permiten tener una muy buena correlación entre unidades geoelectricas y tipo de sedimento o roca.

Pozos de bombeo

Si los pozos de exploración entregan buenos resultados, es necesario construir pozos de bombeo que permitan determinar las características hidráulicas de los acuíferos

Los pozos de bombeo son de mayor diámetro, tipo 12", lo más característico, y deben ser construidos provistos de un pozo de observación cercano a éste, donde se registran los descensos de los niveles del agua durante la prueba de bombeo y recuperación.

Las pruebas de bombeo se deben ajustar a un cierto protocolo para que posteriormente sean reconocidas por la Dirección General de Aguas al evaluar los informes técnicos que deben acompañar la solicitud de derechos de aprovechamiento.

Evaluación del acuífero

La evaluación del acuífero debe cumplir con los siguientes objetivos o, al menos, contener la información que permita, con informes complementarios, llegar a ellos:

- Determinar las características principales del acuífero o sistema acuífero, tales como transmisividad, almacenamiento, geometría, tipo, química del agua subterránea, recarga, superficie equipotencial y descarga.
- Recomendar las características técnicas de los pozos de producción y establecer un diseño tentativo del campo de pozos.
- Contener los antecedentes que sustentan el caudal solicitado en cada pozo.
- Contener los antecedentes técnicos que permitan sustentar la cantidad total de agua solicitada como derecho de aprovechamiento.
- Contener los antecedentes que permitan determinar el adecuado radio de protección de cada pozo.
- Antecedentes técnicos suficientes para poder defender los derechos de agua que se obtengan de posibles daños de terceros.

c) Etapa de desarrollo

La etapa de desarrollo corresponde a las actividades de Diseño del Campo de Pozos de Producción: la construcción de estos pozos, la construcción de los pozos de observación y la evaluación final.

Diseño del campo de pozos

El campo de pozos se debe diseñar de modo que se extraiga la cantidad de agua requerida con el menor descenso de la superficie equipotencial. La mejor forma para diseñar un campo de pozos es mediante el uso de modelos de simulación, con lo que se puede predecir el comportamiento de los descensos para las diferentes soluciones o diseños de campo de pozos.

Estos modelos se han desarrollado al punto de ser manejables por cualquier persona que tenga conocimiento hidrogeológico del área que se quiere modelar.

Para que se tenga una idea del potencial de los modelos actuales se mostrarán algunas imágenes de resultados obtenidos en varios estudios.

Pozos de producción

Una vez seleccionados los lugares, los pozos se construyen en el diámetro y profundidad recomendados.

Pozos de observación

Es importante considerar en esta etapa la construcción de pozos de observación que registren los descensos de la superficie equipotencial, tanto dentro del campo de pozos como fuera de él, ya que esta respuesta del acuífero a las exigencias de una explotación intensa es una información fundamental para comprobar si el acuífero fue evaluado en su real magnitud. Permitirá además calibrar los modelos con información real y de este modo implementarlo adecuadamente. Una vez calibrado con datos reales, el modelo podrá predecir el comportamiento del campo de pozos y las variaciones que se producirán en la superficie freática.

Evaluación final

Con el objeto de solicitar los derechos de aprovechamiento de los pozos de producción se deberá presentar a la Dirección de Aguas una evaluación del acuífero.

UNA PERSPECTIVA ECOLÓGICA SOBRE EL USO DEL AGUA EN EL NORTE GRANDE: LA REGIÓN DE TARAPACÁ COMO ESTUDIO DE CASO

Fabián M. Jaksic*
Pablo A. Marquet** y
Héctor González***

1. Características generales de los ecosistemas del Norte Grande

La gran mayoría de los ecosistemas de nuestro planeta se encuentra en distintos grados de degradación, producto de la acción directa e indirecta del hombre (Vitousek 1994, Hannah et al. 1995, Leemans y Zuidema 1995). Parte de esta degradación se expresa en modificaciones sustanciales de la composición, estructura y funcionamiento de los ecosistemas, ligado a procesos tales como la extinción local y global de especies (crisis de la biodiversidad, Wilson 1992) y la alteración de los ciclos biogeoquímicos, producto del cambio global en el ambiente. En este contexto, es necesario contar con conocimiento básico de los distintos ecosistemas amenazados que nos permita identificar los componentes y los procesos que dan cuenta de su funcionamiento y variabilidad temporal y espacial, y, por otro lado, diagnosticar y anticipar potenciales situaciones de cambio que podrían ser irreversibles, de no ser identificadas a tiempo.

Todo lo anterior es especialmente aplicable a los ecosistemas del Norte Grande de Chile (regiones I, II y III) dada su fragilidad, producto de condiciones climáticas de temperaturas y aridez extremas y la larga data de ocupación humana (más de 10.000 años). Los ecosistemas del Norte Grande corresponden esencialmente a ecosistemas desérticos. Mundialmente, éstos se caracterizan, según Noy-Meir 1973, 1985, por: a) baja productividad; b) productividad muy variable y dependiente de las precipitaciones y la disponibilidad de nutrientes, principalmente nitrógeno; c) alto cociente productividad/biomasa -i.e., tasa de recambio o producción relativa-; d) alto cociente entre biomasa sobre y bajo el suelo; e) baja eficiencia de utilización de la producción de plantas por parte de los herbívoros; f) biomasa de plantas removida principalmente por erosión, y g) baja riqueza de especies, la cual está correlacionada con las precipitaciones.

La descripción anterior responde en gran medida a la existencia de características ambientales rigurosas, entre las cuales destacan: a) baja presión parcial de oxígeno y de dióxido de carbono; baja presión absoluta de vapor y alta radiación solar; b) suelos pobremente desarrollados con baja

* Licenciado en Biología, Universidad de Chile. D. del Departamento de Ecología, Ph. D. en Zoología, University of California-Berkeley; Certified Senior Ecologist, Ecological Society of America. Director Académico y Profesor Titular de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Catedrático Presidencial en Ciencia.

** Licenciado en Biología, Universidad de Concepción. Ph. D. en Biología, University of New Mexico. Profesor auxiliar de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Tesorero de la Sociedad de Ecología de Chile.

*** Investigador del Departamento de Arqueología y Museos, Universidad de Tarapacá.

disponibilidad de nutrientes; c) bajas temperaturas con marcada variación diaria, y d) distribución irregular de precipitaciones con marcados períodos de aridez.

El Norte Grande de Chile se ubica en los Andes Centrales, que comprenden la zona andina de Perú, Bolivia, Argentina y Chile, situada entre las latitudes 8 y 27°S. Los Andes Centrales se caracterizan por la existencia de mesetas desérticas ubicadas por sobre los 3.500 m de altura, que en su conjunto forman lo que se denomina "Puna" o "Altiplano". Las precipitaciones en esta área se concentran en una única estación (verano) de longitud variable. La precipitación anual total varía entre 150 y 1.000 mm, incrementando en sentido sur a norte. Esta zona presenta una vegetación compuesta principalmente de extensos matorrales de arbustos enanos, formaciones vegetacionales abiertas dominadas por gramíneas cespitosas y plantas en cojín y formaciones azonales de vegas (Troll, 1958; Molina y Little 1981).

La zona de la Puna (especialmente en Perú y Bolivia) es el área más densamente habitada de los Andes Centrales; 4 millones de personas viven en la puna de Perú y entre 2,6 a 3,5 en la puna de Bolivia (Molina y Little, 1981; Little, 1981; Brockman, 1986; Morales 1990). La puna en general ha sufrido una intensa y sostenida explotación por parte del hombre. Ha habido modificaciones debido a la introducción de especies exóticas de plantas y animales, lo que ha traído como consecuencia cambios en la cobertura de la vegetación y de la riqueza florística. A estos efectos se suman las modificaciones inducidas por el sobrepastoreo y las derivadas de la actividad minera en el área. Esta última ha contribuido sustancialmente a la casi desaparición de los bosques de *Polylepis* y de las formaciones de vegas (bofedales).

2. Caracterización Ecológica del Altiplano de la I Región

2.1 Fauna

La zona altoandina de la I Región se caracteriza por poseer una alta diversidad de especies de vertebrados (Valencia et al., 1992; CONAMA, 1994; Simonetti et al., 1995; Jaksic, 1997). En total existen 164 especies, de las cuales 115 son de aves, 35 de mamíferos, 8 de reptiles y 6 de anfibios (véase Tabla 1, basada en datos no publicados de Marquet). De este total sobresalen los roedores (con 22 especies) y las aves. Ambos grupos se caracterizan por poseer un alto número de especies endémicas a esta ecorregión, lo cual, sumado a la fragilidad del ecosistema y al alto grado de intervención antrópica, ha resultado en que sea designada como un área prioritaria para la preservación de la biodiversidad en América Latina (Biodiversity Support Program et al., 1995). El alto porcentaje de endemidad en esta fauna atestigua el papel del altiplano como un centro activo de generación de biota (Mueller, 1973; Reig, 1986; Vuilleumier y Simberloff, 1980; Marquet, 1989, 1994).

La fauna de mamíferos del altiplano chileno es la mejor conocida. Actualmente se cuenta con listas de especies (Osgood, 1943; Mann, 1960; Tamayo et al., 1987) y con descripciones de sus hábitat y rasgos ecológicos básicos (Mann, 1945, 1950, 1978; Pearson, 1948; Koford, 1954; Miller y Rottmann, 1976; Spotorno, 1976; Fuentes y Jaksic, 1979; Pine et al., 1979; Tamayo y Frasinetti, 1980; Miller et al., 1983; Rau y Muñoz, 1985; Campos, 1986; Reise y Venegas, 1987; Nowak, 1991; Redford y Eisenberg, 1992; Marquet et al., 1993a, 1993b; Jaksic, 1997). Resaltan estudios recientes (Marquet, 1994; Marquet et al., 1994; Palma, 1995), que proveen información respecto de la biogeografía,

TABLA 1: ESPECIES DE VERTEBRADOS EFECTIVAMENTE OBSERVADOS EN ONCE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA I REGIÓN

Cuenca Hidrográfica	Aves	Mamíferos	Reptiles	Anfibios	Total
CH 201 Lluta	9	12	0	0	21
CH 202 San José	0	4	0	0	4
CH 204 Camarones	0	3	0	0	3
CH 501 Caquena-Cosapilla	16	8	1	0	25
CH 502 Lauca	45	8	3	2	58
CH 503 Parajalla	8	3	2	1	14
CH 504 Isluga	43	11	2	1	57
CH 602 Chungará	21	10	3	2	36
CH 603 Surire	36	9	4	1	50
CH 604 Pampa Tamarugal	7	4	0	0	11
CH 605 Huasco	32	4	1	0	37
Total Regional	115	35	8	6	164

ecología y estado de conservación de esta fauna. Dentro de la fauna de mamíferos, el componente mejor conocido lo constituyen los roedores. Las especies de roedores presentes en esta área se caracterizan por sus altos niveles de simpatria (Pearson 1951, 1958; Hershkovitz, 1962; Yoneda, 1983, 1984; Marquet, 1994), así como por una alta tasa de recambio de especies a lo largo de gradientes altitudinales y latitudinales (Dorst, 1971; Pearson y Ralph, 1978; Pizzimenti y De Salle, 1980, 1981; Pearson, 1982; Marquet, 1994).

Sobre las aves hay bastante menos información disponible, excepto por listas de especies y guías de campo (Philippi, 1941, 1964; Philippi et al., 1944; Barros, 1954; Araya y Millie, 1986; Araya et al., 1995) o descripciones sumarias de su biología (Johnson, 1965, 1967; McFarlane y Loo, 1974; Fjeldsa y Krabbe, 1990; Jiménez y Jaksic, 1990; Jaksic et al., 1991; Fjeldsa, 1992, 1993; Estades, 1996). Los flamencos y parinas (Phoenicopteridae) han recibido bastante atención, aunque los estudios más bien se concentran en la II Región de Antofagasta (Parada, 1988a,b,c,d,e). Datos no publicados sobre censos de aves acuáticas en la I Región (véase Tabla 2, basada en datos no publicados de Marquet) revelan que el lago Chungará, Salar de Surire, Salar de Huasco y Laguna de Parinacota son de especial relevancia por contener un gran número de individuos (1.000 a 5.700) y de especies (13 a 17) de aves. Las especies acuáticas más numerosas corresponden a la Tagua gigante (*Fulica gigantea*), Parina grande (*Phoenicoparrus andinus*), Blanquillo (*Podiceps occipitalis*), Parina chica (*Phoenicoparrus jamesi*) y Pato puna (*Anas puna*). Para el caso de las aves terrestres (véase Tabla 2, basada en datos no publicados de Marquet), los sitios de mayor relevancia en relación a su alto número de individuos (50 a 80) y de especies (7 a 10) corresponden a Laguna de Huasco, Bofedal y Quebrada de Enquelga, y Bofedal de Parinacota. Las especies más abundantes son el Plebeyo (*Phrygilus plebejus*), Tortolita aymara (*Metropelia aymara*) y Jilguero negro (*Carduelis atrata*).

Sobre los reptiles y anfibios también hay poca información disponible, que incluye listas de especies (Capurro, 1950; Codoceo, 1950; Veloso y Navarro, 1988; Núñez y Jaksic, 1992) y descripción de algunos rasgos de su ecología (Ceí, 1962; Donoso-Barros, 1966; Valencia et al., 1982; Veloso et al., 1982; Ortiz y Marquet, 1987; Marquet et al., 1989; Báez y Cortés, 1990). En cuanto a los peces, las especies de Orestias (*Cyprinodontidae*) en el altiplano han sido poco estudiadas (Arratia, 1982), y al respecto destaca el estudio de Pinto y Vila (1987) sobre morfometría y relaciones tróficas de *Orestias laucaensis* en la I Región.

TABLA 2: NÚMERO DE INDIVIDUOS DE AVES ACUÁTICAS Y TERRESTRES CENSADOS EN 15 SITIOS DE LA I REGIÓN

Sitios de la I Región	Nº aves/spp. acuáticas	Nº aves/spp. terrestres
CH 602 Chungará (lago)	5687/17	—
CH 603 Surire (bofedal)	182/13	—
CH 603 Surire (laguna)	4805/13	31/6
CH 605 Huasco (laguna)	1387/14	59/7
Ancuyo (laguna)	56/8	—
Arabella (bofedal)	38/5	—
Chuzmiza (quebrada)	—	18/7
Enquelga (bofedal)	138/11	57/10
Enquelga (quebrada)	—	82/10
General Lagos (tolar)	—	7/2
Parinacota (bofedal)	135/12	56/10
Parinacota (laguna)	1116/16	—
Parinacota (tolar)	—	26/10
Tufacayacta (laguna)	386/12	—
Ungatire (laguna)	379/11	—

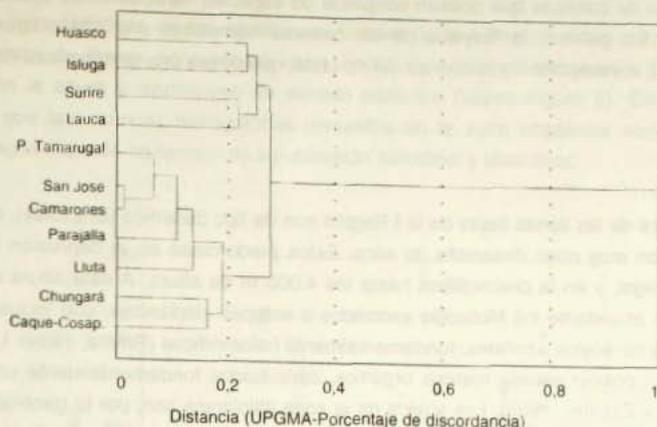
La asociación de las especies de vertebrados en relación a las distintas cuencas hidrográficas de la I Región se presenta en la Figura 1, en la que se documenta un análisis de agrupamiento basado en la disimilitud de las cuencas en cuanto a la composición de especies que cada una posee. En este análisis se usó como índice de distancia el porcentaje de discordancia, que varía entre 0 (para sitios que comparten todas las especies) y 1 (sitios que no comparten ninguna especie). Este análisis revela un alto grado de similitud (nótese que en general la distancia es menor a 0,3, lo que implica que las distintas cuencas comparten a lo menos el 70% de su fauna). A pesar de esta homogeneidad faunística regional, es posible diferenciar dos grandes grupos de cuencas. Por un lado están las cuencas de Huasco, Isluga, Surire y Lauca, y por otro la cuencas de Chungará, Caquena-Cosapilla, Lluta, Parajalla, Camarones, San José y Pampa del Tamarugal. Estas cuencas se diferencian principalmente en relación a las especies de aves que contienen (y no de los demás vertebrados), aparentemente una consecuencia de la presencia de aves que habitan cuerpos de agua salobres y bofedales.

2.2 Flora y Vegetación

De acuerdo a la clasificación biogeográfica de Gajardo (1993), la vegetación andina de la I Región pertenece a la Región Biogeográfica de la Estepa Alto-Andina. Para esta ecorregión los factores determinantes de la fisonomía particular de sus formaciones vegetales son altitud y relieve, además de la aridez y el corto período vegetativo. La composición de la flora y la estructura de la vegetación en el Norte Grande han sido relativamente bien caracterizadas en relación a su distribución altitudinal, latitudinal y su riqueza de especies (Villagrán et al., 1981, 1983; Arroyo et al., 1982, 1988; Rundel et al., 1991). En general, la diversidad de especies está correlacionada positivamente con las precipitaciones y es máxima a alturas intermedias a lo largo de un gradiente altitudinal.

La vertiente occidental de la cordillera de los Andes proporciona un gradiente en altura, en conjunto con un gradiente en las precipitaciones (grado de desertificación), y en las características

FIGURA Nº 1: ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO (ESPECIES DE VERTEBRADOS)



térmicas del ambiente. Estos factores han sido críticos en determinar la fisonomía de las formaciones vegetales y la distribución latitudinal de la flora andina (Arroyo et al., 1982; Villagrán et al., 1983). En el gradiente altitudinal se distinguen una serie de formaciones vegetales que pueden caracterizarse por la dominancia de diversas formas de crecimiento. Villagrán et al. (1981, 1982) y COSERREN (1982) caracterizaron esta secuencia para los Andes de Arica, Iquique y Antofagasta distinguiendo tres pisos altitudinales, cada uno con una formación vegetal característica:

- a) Formaciones Desérticas (piso Pre-puneño). Distribuidas entre los 1.540 m, límite inferior de la vegetación zonal en la región, y los 2.800 m en la precordillera. Se caracterizan fisonómicamente como vegetación de matorral bajo con escasa cobertura y abundancia de suculentas columnares y cespitosas. El elemento florístico dominante es de procedencia desértica, endémico de la costa Pacífica de Sudamérica (Arroyo et al., 1982).
- b) Formaciones de Tolar (piso Puneño). Esta formación se extiende entre aproximadamente 3.000 a 4.000 m de altura. Se caracteriza fisonómicamente por la alta cobertura de la vegetación y la riqueza de arbustos y subarbustos siempreverdes y caducifolios.
- c) Formaciones de Pajonales (piso Altoandino). Se extiende por el Altiplano y en los cerros que emergen sobre éste, hasta el límite superior de la vegetación entre los 4.000 a 4.900 m de altura. La fisonomía de la formación está determinada por la dominancia de gramíneas perennes de crecimiento en campos. Localmente dentro de este piso altitudinal se presentan formaciones intrazonales de bosquesillos de *Polylepis tarapacana* (queñoales) y agrupaciones de *Azorella compacta* (llaretales). Es también característica la presencia azonal de formaciones de vegas (bofedales) de *Oxychloe andina* y *Distichlia muscoides*.

En total se han documentado 218 especies de plantas para la zona andina de la I Región (Villagrán et al. 1982, COSERREN 1982), dominando en cuanto a riqueza de especies la familia de las Compuestas (Angiospermae, Compositae) con 85 especies (39%). Un análisis de agrupamiento basa-

do en la similitud en composición de especies a nivel de siete cuencas muestra que no existe una clara diferenciación de cuencas que posean conjuntos de especies característicos (datos no publicados de Marquet). En general, la mayoría de las cuencas comparten una alta proporción de sus especies (ca. 70%), a excepción de la cuenca del río Lluta, que posee una gran riqueza de especies.

2.3 Suelos

Los suelos de las zonas bajas de la I Región son de tipo desértico (Entisoles), sin evolución de horizontes o con muy poco desarrollo de ellos. Estos predominan en la depresión intermedia o Pampa del Tamarugal, y en la precordillera hasta los 4.000 m de altura. A esta altura comienzan a aparecer en forma abundante los Molisoles asociados a estepas altiplánicas, con inclusiones más o menos importantes de suelos azonales, fundamentalmente halomórficos (Rovira, 1984). Los Molisoles se caracterizan por poseer escasa materia orgánica, constituidos fundamentalmente por elementos minerales (Toledo y Zapater, 1989). Los suelos de la zona altiplánica son, por lo general, recientes y las variaciones del perfil por efecto de pedogénesis son escasas. Están compuestos por arenas y gravas finas, y la estratificación está dada principalmente por fenómenos aluviales y coluviales. Azonalmente se encuentran en el área altiplánica suelos turbosos o bofedales. Conjuntamente a las planicies esteparias se desarrollan formas volcánicas cuaternarias de relieve abrupto, en donde los tipos más representativos de suelos son los afloramientos rocosos, Litosoles y Regosoles de muy débil desarrollo.

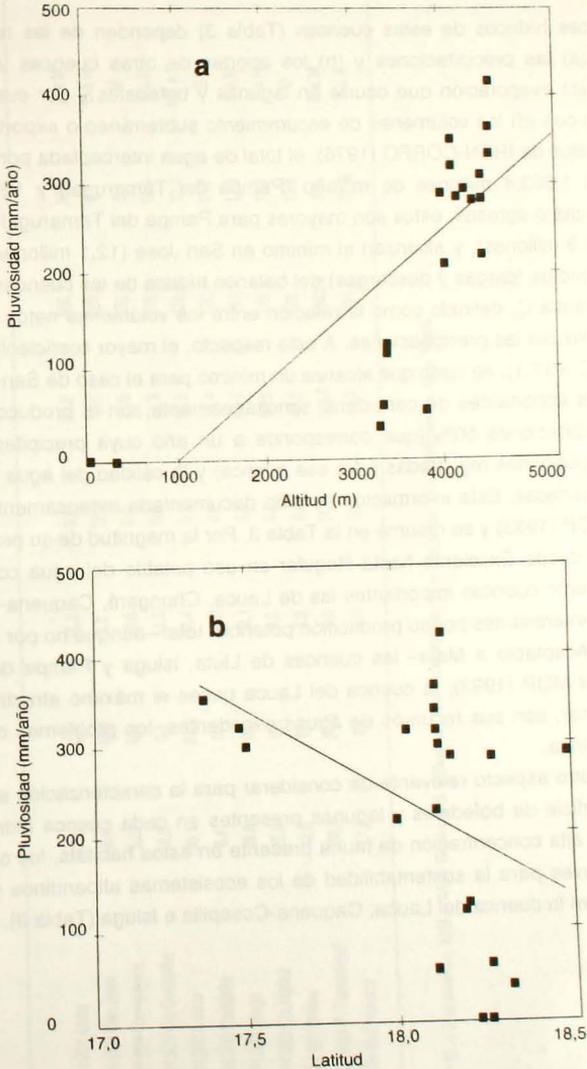
En relación a su capacidad de uso, los suelos de la zona altiplánica y precordillerana son generalmente de los tipos IV, VI, VII y VIII. Los suelos tipo IV se caracterizan por poseer rendimientos marginales ubicándose en el límite en que es posible cultivar el suelo con rendimientos remunerativos. Son suelos pobres en nutrientes ubicados en zonas con serias limitaciones en relación a pendiente, erosión, pedregosidad y drenaje. Estos predominan en las áreas precordilleranas. En los suelos tipo VI, VII y VIII se acentúan las características que imposibilitan su cultivo. Son en general no aptos para cultivos y su uso está limitado principalmente a praderas naturales y vida silvestre. Estos son los tipos de suelos predominantes en la zona altiplánica. Albornoz (1977) realizó un estudio acerca de las características químicas y aptitud de los suelos de secano y de riego de la zona de Isluga. Este autor señaló que los suelos de secano se caracterizan por un bajo contenido salino, pH ligeramente alcalino a ligeramente ácido. También señaló que los suelos bajo riego presentan mayores contenidos de sales, aunque sin llegar a los límites de considerarse suelos salinos. En general, todos los suelos analizados por Albornoz (1977) se caracterizan por una capacidad de uso tipo III con texturas moderadamente gruesas, baja retención de humedad, pero suficiente en algunos casos para el desarrollo de cultivos andinos explotables, tales como quínoa, papa y ajo, pero susceptibles a la erosión y a convertirse en salinos.

El análisis (no publicado) de 8 muestras de suelo provenientes de la localidad de Tacora en las formaciones de Tolar dominado por *Parastrephia lucida* y Pajonal dominado por *Festuca orthophylla*, indica la existencia de suelos con baja a muy baja disponibilidad de nitrógeno, media a alta disponibilidad de macronutrientes, tales como potasio y fósforo, salinidad entre baja y media, pH levemente alcalino y bajo porcentaje de materia orgánica. Esto es aplicable para ambas situaciones, de Tolar y Pajonal. Estos resultados no publicados concuerdan en señalar la baja aptitud de los suelos altoandinos para fines agrícolas.

2.4 Recursos hídricos

Las características de las aguas superficiales de la I Región están condicionadas por un régimen atlántico de lluvias concentrado en la época de verano. Típicamente, las precipitaciones aumentan con la altura y disminuyen en sentido norte-sur (véase Figura 2). Estas tendencias se verifican en que las cuencas hidrográficas presentes en la zona altiplánica varíen en relación al volumen de agua captada en función de su ubicación altitudinal y latitudinal.

FIGURA Nº 2



Para los efectos de este análisis se pueden distinguir 11 cuencas hidrográficas, cuyos límites geográficos las sitúan total o marginalmente en el área altiplánica de la I Región (IREN-CORFO 1976) y para las cuales existe información –aunque en algunos casos escasa– respecto de sus recursos naturales. Estas son las cuencas de Huasco, Isluga, Surire, Lauca, Chungará, Caquena-Cosapilla, Lluta, Parajalla, Camarones, San José, y Pampa del Tamarugal. De éstas, las cuencas del Lluta, Camarones y San José se clasifican como pre-andinas (IREN-CORFO 1976), con drenaje hacia el Pacífico, en tanto que las cuencas de Caquena-Cosapilla, Lauca, Parajalla e Isluga, son cuencas con aporte hacia el extranjero. Un tercer grupo lo conforman las cuencas de Chungará, Surire, Pampa del Tamarugal y Huasco, que corresponden a cuencas cerradas, con drenaje interior o, al menos, sin salida superficial.

Los balances hídricos de estas cuencas (Tabla 3) dependen de las recargas efectuadas principalmente por (a) las precipitaciones y (b) los aportes de otras cuencas y de las descargas manifestadas en la (c) evaporación que ocurre en lagunas y bofedales y por evapotranspiración de cultivos, en conjunto con (d) los volúmenes de escurrimiento subterráneo o exportados a otras cuencas. De acuerdo a datos de IREN-CORFO (1976), el total de agua interceptada por cada una de estas cuencas varía entre 1.363,4 millones de $m^3/año$ (Pampa del Tamarugal) y 120,7 (Parajalla). En relación a las descargas o egresos, estos son mayores para Pampa del Tamarugal (128,0 millones de $m^3/año$) y Lauca (98,9 millones), y alcanzan el mínimo en San José (12,1 millones) y Parajalla (19,4 millones). Ambos aspectos (cargas y descargas) del balance hídrico de las cuencas se resumen en el coeficiente de escorrentía C, definido como la relación entre los volúmenes netos totales efluentes y los ingresos producidos por las precipitaciones. A este respecto, el mayor coeficiente de escorrentía lo presenta Chungará ($C = 17,1$), en tanto que alcanza un mínimo para el caso de San José ($C = 8,1$).

Dos factores importantes de considerar simultáneamente son la producción potencial total para el año de precipitaciones 50% (que corresponde a un año cuya precipitación es igual a la mediana de las precipitaciones registradas para esa cuenca) y la calidad del agua en función de sus características hidroquímicas. Esta información ha sido documentada extensamente por Niemeyer y Cereceda (1984) y MOP (1993) y se resume en la Tabla 3. Por la magnitud de su producción potencial total y por la calidad desde Excelente hasta Regular en uso potable del agua correspondiente, se pueden caracterizar como cuencas importantes las de Lauca, Chungará, Caquena-Cosapilla y Huasco. Por otro lado, son interesantes por su producción potencial total –aunque no por la calidad química del agua que es de Aceptable a Mala– las cuencas de Lluta, Isluga y Pampa del Tamarugal. De acuerdo al informe del MOP (1993), la cuenca del Lauca posee el máximo atractivo respecto de la posibilidad de solucionar, con sus recursos de aguas excedentes, los problemas de abastecimiento potable y agrícola de Arica.

Finalmente, otro aspecto relevante de considerar para la caracterización ecológica del área de estudio es la superficie de bofedales y lagunas presentes en cada cuenca hidrográfica. Esto es importante debido a la alta concentración de fauna presente en estos hábitats, los cuales pueden ser considerados como claves para la sustentabilidad de los ecosistemas altoandinos de la I Región. A este respecto sobresalen la cuenca del Lauca, Caquena-Cosapilla e Isluga (Tabla 3).

TABLA 3: BALANCE HÍDRICO Y CALIDAD DEL AGUA EN ONCE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA I REGIÓN.

Cuenca Hidrográfica	Evap. total Mm3/a	Ingreso otras cuencas	Egresos a mar o Bolivia	Egresos otros Mm3/a	Egresos netos Mm3/a	Total intercep. Mm3/a	Coef. escorr. %	Calidad del agua*	Prod. Pot. Total P50% l/s	Área laguna (ha)	Área bofedal (ha)
CH 201 Uuta	37,0	0,0	16,2	0,0	53,2	466,7	10,0	D a M	7944	0	5300
CH 202 San José	18,4	18,9	6,3	12,3	12,1	220,5	6,1	B a R	1640	0	0
CH 204 Camarones	5,2	0,0	18,6	0,0	23,8	372,1	8,4	M	2980	30	100
CH 501 Ca-Cosapilla	19,8	0,0	51,5	0,0	71,3	275,8	14,5	B a R	5024	0	7900
CH 502 Lauca	30,1	33,5	83,4	0,0	98,9	838,8	12,2	MB a B	6664	660	9000
CH 503 Parajalla	6,4	0,0	13,0	0,0	19,4	120,7	13,2	B	1010	0	2560
CH 504 Isluga	28,8	0,0	32,1	0,0	60,9	761,7	11,3	A a M	6179	750	5130
CH 602 Chungará	25,0	0,0	0,0	0,0	58,5	178,5	17,1	E a R	1468	2100	1920
CH 603 Surire	42,8	0,0	0,0	0,0	42,8	226,7	13,8	D	924	3175	530
CH 604 P. Tamarugal	165,4	24,0	0,0	11,7	128,0	1363,4	9,3	D a M	5842	0	740
CH 605 Huasco	17,2	0,0	0,0	0,0	41,2	334,0	12,3	B a A	2343	950	1250

* E = Excelente, MB = Muy Buena, B = Buena, A = Aceptable, R = Regular, D = Deficiente, M = Mala

3. Estado de conservación de los recursos naturales del Altiplano de la I Región

3.1 Flora y fauna

Benoit (1989) y Glade (1993) analizaron el estado de conservación de la flora y fauna de Chile y de la I Región. Las categorías utilizadas por estos autores son las siguientes. a) Extinta: Especie que sin lugar a dudas no ha sido localizada en estado silvestre en los últimos 50 años. b) En peligro: Taxon (especie o subespecie) en peligro de extinción y cuya supervivencia es poco probable si los factores causales de peligro continúan operando. c) Vulnerable: Taxa de los cuales se cree que pasarán en el futuro cercano a la categoría En Peligro si los factores causales de la amenaza continúan operando. d) Rara: Taxon cuya población mundial es pequeña, que no se encuentra actualmente En Peligro, ni es Vulnerable, pero que está sujeto a cierto riesgo. e) Amenaza Indeterminada: Taxon respecto del cual se sabe que corresponde, ya sea a la categoría En Peligro, Vulnerable o Rara, pero respecto del cual no se sabe a ciencia cierta cuál es la más apropiada. f) Fuera de Peligro: Taxon que antes estuvo incluido en una de las categorías anteriores, pero que en la actualidad se considera relativamente seguro debido a la adopción de medidas efectivas de conservación o a que la amenaza que existía ha sido eliminada. g) Inadecuadamente Conocida: Taxon que se supone pertenece a una de las categorías anteriores, pero respecto del cual no se tiene certeza debido a falta de información.

En la Tabla 4 se utilizan las categorías ya señaladas para clasificar la fauna de vertebrados de la I Región, de acuerdo a su estatus de conservación tanto a nivel nacional como regional. En total se detectaron 42 especies con estatus de conservación, que equivalen al 26% del total de especies de vertebrados potenciales en el área de estudio. De éstas, 16 corresponden a aves, 19 a mamíferos, 3 a reptiles y 4 a anfibios. Es importante además considerar que del total de especies con estatus de conservación, 15 (36%) están presentes sólo en la I Región. En relación a las distintas categorías de conservación a nivel nacional, 6 especies presentan estatus de conservación En Peligro, 19 son Vulnerables, 10 son Raras, 1 está con Amenaza Indeterminada y 6 son Inadecuadamente Conocidas. En relación al estatus de conservación Regional, 1 especie está Extinta, 8 aparecen en la categoría de

TABLA 4: ESPECIES DE VERTEBRADOS EN ALGUNA CATEGORÍA DE CONSERVACIÓN EN ONCE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA I REGIÓN

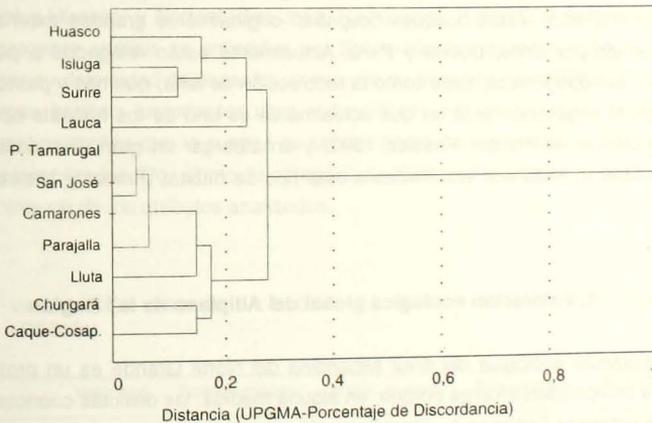
Cuenca Hidrográfica	Aves	Mamíferos	Reptiles	Anfibios	Total
CH 201 Luta	1	5	0	0	6
CH 202 San José	0	0	0	0	0
CH 204 Camarones	0	1	0	0	1
CH 501 Caquena-Cosapilla	2	5	0	0	7
CH 502 Láuca	9	4	0	1	14
CH 503 Parajalla	0	2	0	1	3
CH 504 Isluga	7	4	0	1	12
CH 602 Chungará	4	4	0	1	9
CH 603 Surire	9	5	0	1	15
CH 604 Pampa Tamarugal	0	1	0	0	1
CH 605 Huasco	9	2	0	0	11

En Peligro, 12 son Vulnerables, 6 son Raras, 1 está con Amenaza Indeterminada, 5 son Inadecuadamente Conocidas y 4 están Fuera de Peligro. Cinco especies no tienen categorización regional, pero sí nacional.

En relación al número de especies de fauna observadas en terreno por cuenca hidrográfica, el mayor número de especies con estatus de conservación (15) se encuentra en la Cuenca de Surire, seguida por las cuencas del Lauca con 14 especies, Isluga con 12 y Huasco con 11 especies. Un análisis de agrupamiento tendiente a dilucidar la similitud en composición taxonómica para las distintas cuencas en base a las especies con estatus de conservación (Figura 3) revela la existencia de dos grupos. Hay un grupo compuesto por las cuencas con mayor riqueza de especies (Surire, Lauca, Isluga y Huasco) y otro caracterizado por un número menor de especies importantes para la conservación.

En relación a la flora, sólo existen 3 especies con estatus de conservación en el área de estudio (*Polylepis tarapacana*, *Polylepis besseri* y *Azorella compacta*). Estas especies son de amplia distribución en el área de estudio, encontrándose en casi todas las cuencas altoandinas y en las cabeceras de las cuencas que se desarrollan primariamente en la vertiente occidental de los Andes tales como Camarones, Lluta, Pampa del Tamarugal y San José. Debido a esto no es posible, por ahora, categorizar las distintas cuencas en relación a su importancia para la flora.

FIGURA Nº 3: ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO (VERTEBRADOS CON ESTATUS DE CONSERVACIÓN)



3.2 Suelos, recursos hídricos y hábitats

En relación a los suelos, y de acuerdo a la información disponible, éstos son de baja calidad en la gran mayoría de las cuencas, siendo en general poco aptos para la agricultura. Sin embargo, la calidad aparente de los suelos es adecuada en la cuenca de Isluga, de acuerdo a lo planteado por Alborno (1977).

Respecto de los recursos hídricos, es posible realizar una jerarquización de las distintas cuencas en relación a su Producción Potencial Total y Calidad del Agua. Tal como se señalara

anteriormente, las cuencas de Lauca, Caquena-Cosapilla y Chungará son de alto valor ecológico por su buena calidad de aguas y altas producciones potenciales. Tal como lo reconoce Castro (1992), los sistemas hidrológicos de Caquena y Lauca son las áreas más significativas en cuanto al aporte de agua y praderas naturales. Por otro lado, son interesantes por sus producciones potenciales totales, aunque no por la calidad química de sus aguas, las cuencas de Lluta, Isluga, Camarones y Huasco. Las otras cuencas son de menor importancia comparativa en virtud de sus bajas productividades, aunque en algunas de ellas (e.g., Parajalla) la calidad del agua sea buena.

En relación a la importancia de los distintos tipos de hábitats para el funcionamiento de los ecosistemas altoandinos, sobresalen de manera evidente los bofedales, lagunas y los bosques de queñoa. Los bofedales representan uno de los principales recursos forrajeros para camélidos y ovinos de la región (Gunderman, 1984; Bernhardson, 1985; De Carolis, 1987; Castro, 1992). Entre los más importantes se reconocen los bofedales de Caquena-Cosapilla, Parinacota y Guallatire (todos en la cuenca del Lauca). También son relevantes las cuencas de Lluta e Isluga, las que poseen extensas áreas de bofedales (Tabla 3).

Las lagunas también son piezas claves del funcionamiento del ecosistema andino altiplánico. Estos hábitats no sólo son importantes en el sentido de permitir y articular asentamientos humanos y actividades ganaderas, sino que además controlan gran parte del balance hídrico de las cuencas, al representar grandes superficies de evaporación y posibilitar la existencia de poblaciones importantes de especies acuáticas de fauna y flora.

El otro hábitat de gran importancia en la región lo constituyen los bosques de queñoa. De acuerdo a Kessler (1993), estos bosques ocupaban originalmente grandes extensiones en todo el altiplano compartido por Chile, Bolivia y Perú. Actualmente están relegados a pequeños parches, debido a efectos antropogénicos, tales como la recolección de leña, quemadas y pastoreo. La importancia de este tipo de vegetación está en que actualmente es uno de los hábitats boscosos en mayor peligro de extinción en el mundo (Kessler, 1993) y en albergar una gran diversidad de especies de aves, de las cuales muchas son endémicas a este tipo de hábitat (Frimer y Nielsen, 1989; Fjeldsa, 1992, 1993).

4. Valoración ecológica global del Altiplano de la I Región

La valoración ecológica del área altoandina del Norte Grande es un problema complejo y multivariado. La complejidad emerge porque, en alguna medida, las distintas cuencas no son independientes, ni para procesos físicos (e.g., conexiones de aguas subterráneas entre las cuencas del Lauca y Chungará, por ejemplo) ni en cuanto a la fauna y flora, ya que la fauna se desplaza y la flora lo hace a través de sus propágulos (gametos y semillas). Tampoco son independientes en relación a las actividades de sus habitantes, puesto que los grupos humanos de la zona articulan en sus ámbitos de quehacer económico distintos espacios geográficos que pueden corresponder a diferentes cuencas hidrográficas. De hecho, la ecorregión Puneña completa ha sido catalogada por el Biodiversity Support Program et al. (1995) y por Dinerstein et al. (1995) como Vulnerable, y de la más alta prioridad para la conservación. Dada esta situación, y reconociendo que en general todas las cuencas analizadas son importantes, lo factible es tratar de identificar aquellas cuencas que sobresalgan en relación a su importancia para la biodiversidad y para la sustentabilidad de los ecosistemas andinos de la región.

La naturaleza multivariada del problema de asignar prioridades se relaciona con el gran número de variables que inciden en asignar un criterio de importancia para un área dada. Tales variables son de índole tanto biológico como antropológico. Desde una perspectiva netamente ecológica es posible caracterizar las distintas cuencas del área de estudio sobre la base de los criterios recomendados y empleados por el Biodiversity Support Program et al. (1995) que son: a) Valor biológico y b) Estatus de conservación. El valor biológico se refiere al número total de especies, la diversidad filogenética de éstas, y el número de especies endémicas. A este respecto, una localidad con un alto valor respecto de estos atributos tendrá mayor valor ecológico. El estatus de conservación se refiere a la importancia de una localidad dada en relación a la presencia de especies amenazadas o con estatus de conservación. Por último, a estas dos variables se puede incorporar una adicional relativa a la importancia de la cuenca en relación a la existencia de hábitats y recursos claves para la sustentabilidad de los ecosistemas. Esta variable la denominaremos Importancia para la Sustentabilidad y puede ser estimada en base a la Productividad Potencial de la cuenca y su área de bofedales y lagunas.

En la Tabla 5 se presenta una categorización de las distintas cuencas en relación a las tres variables. Para cada una se asignó un valor entre 1 y 3, dependiendo de si la cuenca en cuestión era "normal" (= 1), "superior" (= 2) o "sobresaliente" (= 3) en relación a cada uno de los atributos. Posteriormente se sumaron los puntajes, asignándose una prioridad o valoración de acuerdo al total de puntos acumulados –el puntaje más bajo posible es 3 y el más alto es 9–. Es así como se pueden distinguir cuencas con un valor Sobresaliente (Lauca, Isluga y Surire), Superior (Lluta, Caquena-Cosapilla, Chungará y Huasco) y Normal (San José, Camarones, Parajalla y Pampa del Tamarugal). Para efectos del presente análisis se entienden por Sobresalientes aquellas cuencas que destacan simultáneamente por su diversidad de especies, presencia de especies con estatus de conservación y que además albergan hábitats importantes para el funcionamiento de los ecosistemas altoandinos. Una valoración Superior implica que la cuenca es sobresaliente en al menos uno y tal vez dos de los atributos o variables analizadas. Por último, la categoría de Normal implica que la cuenca no sobresale con respecto a ninguno de los atributos analizados.

TABLA 5: VALORACIÓN ECOLÓGICA GLOBAL DE ONCE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA I REGIÓN

Cuenca Hidrográfica	Valor biol.	Estatus conserv.	Impórt. sustent.	Total puntaje	Prioridad conservación
CH 201 Lluta	2	2	3	7	Alta
CH 202 San José	2	1	1	4	Normal
CH 204 Camarones	2	1	1	4	Normal
CH 501 Caquena-Cosapilla	3	2	3	8	Alta
CH 502 Lauca	3	3	3	9	Sobresaliente
CH 503 Parajalla	2	1	2	5	Normal
CH 504 Isluga	3	3	3	9	Sobresaliente
CH 602 Chungará	3	2	3	8	Alta
CH 603 Surire	3	3	3	9	Sobresaliente
CH 604 Pampa Tamarugal	1	1	1	3	Normal
CH 605 Huasco	3	3	2	8	Alta

5. Conclusiones

Los ecosistemas altoandinos de la I Región presentan características físicas y biológicas únicas (Veloso y Bustos-Obregón, 1982; Tecchi y Veloso, 1992). Estos ecosistemas son frágiles, en el sentido de que los procesos asociados con la mantención y perpetuación del sistema son muy sensibles a cambios producidos por eventos catastróficos naturales o modificaciones introducidas por el hombre. A esto se suma el hecho de su baja capacidad para responder a perturbaciones, producto de suelos poco desarrollados con disponibilidad marginal de ciertos nutrientes, bajas temperaturas, baja productividad y bajo potencial regenerativo (Winterhalder y Thomas, 1978). En este contexto, es evidente que cualquier proyecto que contemple un impacto sobre estos sistemas debe considerar la implementación de medidas preventivas tendientes a aminorar potenciales efectos negativos tales como la alteración y destrucción de hábitats claves para el funcionamiento de los ecosistemas. De especial importancia de conservación son las cuencas cuya prioridad es Sobresaliente y Superior.

6. Referencias bibliográficas

- Albornoz, I. A. 1977. "Antecedentes sobre estudios de suelo y agua del sector de Isluga, altiplano tarapaqueño". Dirección Académica, Universidad del Norte, Iquique. Convenio SERPLAC-Universidad del Norte. 114 pp.
- Araya, B. y G. Millie. 1986. Guía de campo de las aves de Chile. Editorial Universitaria, Santiago. 389 pp.
- _____, M. Bernal, R. Schlatter y M. Sallaberry. 1995. Lista patrón de las aves chilenas. Editorial Universitaria, Santiago. 35 pp.
- Arratia, G. 1982. "Peces del altiplano chileno". Pp. 93-144 en Veloso, A. y E. Bustos-Obregón (editores) El ambiente natural y las poblaciones humanas de los Andes del norte grande de Chile (Arica, Lat. 18°28'S). Volumen I: Proyecto MAB-6, UNEP-UNESCO 1105-77-01, ROSTLAC, Montevideo.
- Arroyo, M. T. K., C. Villagrán, C. Marticorena y J. J. Armesto. 1982. "Flora y relaciones biogeográficas en los Andes del norte de Chile". Pp. 71-92 en Veloso, A. y E. Bustos-Obregón (editores) El ambiente natural y las poblaciones humanas de los Andes del Norte Grande de Chile (Arica, Lat. 18°28'S). Volumen I, Proyecto MAB-6, UNEP-UNESCO 1105-77-01, ROSTLAC, Montevideo.
- _____, F. A. Squeo, J. J. Armesto y C. Villagrán. 1988. Effects of aridity on plant diversity on the northern Chilean Andes: results of a natural experiment. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 75: 55-78.
- Báez, C. y A. Cortés. 1990. "Precisión de la termorregulación conductual del lagarto neotropical *Tropidurus quadrivittatus* (Lacertilia: Iguanidae)". *Revista Chilena de Historia Natural* 63: 203-209.
- Barros, O. 1954. "Aves de Tarapacá". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 2: 35-64.
- Benoit, I. 1989. Libro rojo de la flora terrestre de Chile. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura, Santiago, 157 pp.
- Bernhardson, W. 1985. "El desarrollo de recursos hidrológicos del altiplano ariqueño y su impacto sobre la economía ganadera de la zona". *Chungará* 9: 169-181.
- Biodiversity Support Program, Conservation International, The Nature Conservancy, Wildlife Conservation Society, World Resources Institute y World Wildlife Fund. 1995. A regional analysis of geographic priorities for biodiversity conservation in Latin America and the Caribbean. Biodiversity Support Program, Washington, D.C., 140 pp.
- Brockman, C. E. (editor) 1986. Perfil ambiental de Bolivia. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, La Paz.
- Campos, H. 1986. Mamíferos terrestres de Chile. Colección Naturaleza de Chile, Volumen 5. Marisa Cúneo Ediciones, Valdivia.
- Capurro, L. 1950. "Batracios de Tarapacá". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 1: 9-12.
- Castro, M. 1992. "Utilización de recursos hídricos, economía de pastoreo y asentamientos humanos en la puna árida". Pp. 69-76

- en R. Tecchi y A. Veloso (editores) *Ecosistemas altoandinos de Argentina y Chile*. Instituto de Biología de la Altura, Universidad Nacional de Jujuy, Memoria 3, 86 pp.
- Cel, J. M. 1962. *Batrachios de Chile*. Ediciones Universidad de Chile, Santiago, cviii + 128 pp.
- Codoceo, M. 1950. "Reptiles de Tarapacá". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 1: 15.
- CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente). 1994. *Perfil ambiental de Chile*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Secretaría Técnica y Administrativa, Santiago, 569 pp.
- COSEERREN Consultores (1982) *Catastro de recursos del Parque Nacional Volcán Isluga*.
- De Carolis, G. 1987. "Descripción del sistema ganadero y hábitos alimentarios de camélidos domésticos y ovinos en el bofedal de Parinacota". Tesis, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Santiago.
- Dinerstein, E., D. M. Olson, D. J. Graham, A. L. Webster, S. A. Primm, M. P. Bookbinder y G. Ledec. 1995. *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. The World Bank, Washington, D.C.
- Donoso-Barros, R. 1966. *Reptiles de Chile*. Ediciones Universidad de Chile, Santiago, cxliv + 458 pp.
- Dorst, J. 1971. "Nouvelles recherches sur l'écologie des rongeurs des haut plateaux Péruviens". *Mammalia* 35: 515-547.
- Estades, C. F. 1996. "Natural history and conservation status of the Tamarugo Conebill in northern Chile". *Wilson Bulletin* 108: 268-279.
- Fjeldsa, J. 1993. "The avifauna of the Polylepis woodlands of the Andean highlands: the efficiency of basing conservation priorities on patterns of endemism". *Bird Conservation International* 3: 37-55.
- _____. 1992. "Biogeographic patterns and evolution of the avifauna of the relict high-altitude woodlands of the Andes". *Steenstrupia* 18:9-62.
- _____. y N. Krabbe. 1990. *Birds of the high Andes*. Zoological Museum, University of Copenhagen, Denmark.
- Frimer, O. y S. M. Nielsen. 1989. *The status of Polylepis forest and their avifauna in Cordillera Blanca, Peru*. Copenhagen: Zoological Museum.
- Fuentes, E. R. y F. M. Jaksic. 1979. "Lizards and rodents: an explanation for their relative species diversity in Chile". *Archivos de Biología y Medicina Experimentales (Chile)* 12: 179-190.
- Gajardo, R. 1993. *La vegetación natural de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago.
- Glade, A. (editor) 1993. *Libro rojo de los vertebrados terrestres chilenos*. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura, Santiago, 65 pp.
- Gundermann, H. 1984. "Ganadería aymara, ecología y forrajes: evaluación regional de una actividad productiva andina". *Chungará* 12: 99-124.
- Hannah, L., J. J. Carr y A. Lanckerani. 1995. "Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global data set". *Biodiversity and Conservation* 4: 128-155.
- Hershkovitz, P. 1962. "Evolution of Neotropical cricetine rodents (Muridae) with special reference to the Phyllotine group". *Fieldiana, Zoology* 46: 1-525.
- IREN-CORFO (Instituto de Investigación de Recursos Naturales, Corporación de Fomento de la Producción). 1976. *Inventario de recursos naturales por método de percepción del satélite Landsat, I Región, Tarapacá*. Convenio IREN-SERPLAC I Región. Tomo 1: xi + 178 pp.
- Jaksic, F. M. 1997. *Ecología de los vertebrados de Chile*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, 262 pp.
- _____. S. Silva, P. A. Marquet y L. C. Contreras. 1991. "Food habits of Gurney's Buzzard in pre-Andean ranges and the high Andean plateau of northernmost Chile". *Journal of Raptor Research* 25: 116-119.
- Jiménez, J. E. y F. M. Jaksic. 1990. "Diet of Gurney's Buzzard in the puna of northernmost Chile". *Wilson Bulletin* 102: 344-346.
- Johnson, A.W. 1965. *The birds of Chile and adjacent regions of Argentina, Bolivia and Peru*. Platt Establecimientos Gráficos, Buenos Aires. Volumen I, 398 pp.
- _____. 1967. *The birds of Chile and adjacent regions of Argentina, Bolivia and Peru*. Platt Establecimientos Gráficos, Buenos Aires. Volumen II, 447 pp.
- Koford, O. 1954. "Nuevos mamíferos para Chile". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 2: 95-96.

- Leemans, R. y G. Zuidema. 1995. "Evaluating changes in land cover and their importance for global change". *Trends in Ecology and Evolution* 10: 76-81.
- Little, M. A. 1981. "Human populations in the Andes: the human science basis for research planning". *Mountain Research and Development* 1: 145-170.
- Mann, G. 1945. "Mamíferos de Tarapacá". *Biológica* 2: 23-134.
- _____. 1950. "Nuevos mamíferos de Tarapacá". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 1: 2.
- _____. 1960. "Regiones biogeográficas de Chile". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 6: 15-49.
- _____. 1978. "Los pequeños mamíferos de Chile (marsupiales, quiropteros, edentados y roedores)". *Gayana (Zoología)* 40: 1-342.
- Marquet, P. A. 1989. "Paleobiogeography of South American cricetid rodents: A critique to Caviedes y Iriarte". *Revista Chilena de Historia Natural* 62: 193-197.
- _____. 1994. "Diversity of small mammals in the Pacific coastal desert of Peru and Chile and in the adjacent Andean area: biogeography and community structure". *Australian Journal of Zoology* 42: 527-542.
- _____. J. C. Ortiz, F. Bozinovic y F. M. Jaksic. 1989. "Ecological aspects of thermoregulation at high altitudes: the case of Andean *Liolaemus* lizards in northern Chile". *Oecologia* 81: 16-20.
- _____. L. C. Contreras, J. C. Torres-Mura, S. I. Silva y F. M. Jaksic. 1993a. "Food habits of *Pseudalopex foxes* in the Atacama desert, pre-Andean ranges, and the high Andean plateau of northernmost Chile". *Mammalia* 57: 130-135.
- _____. L. C. Contreras, S. Silva, J. C. Torres-Mura y F. Bozinovic. 1993b. "Natural history of *Microcavia niata* in the high Andean zone of northern Chile". *Journal of Mammalogy* 74: 136-140.
- _____. J. Salazar y R. Ojeda. 1994. "Small mammals conservation in the Puna area of Bolivia and Argentina". Final Report of the Biodiversity Support Program, Washington, D.C.
- McFarlane, R. W. y E. P. Loo. 1974. "Food habits of some birds in Tarapacá". *Idesia (Chile)* 3: 163-166.
- Miller, S. y J. Rottmann. 1976. *Guía para el reconocimiento de mamíferos chilenos*. Editora Nacional Gabriela Mistral, Santiago. 200 pp.
- Miller, S. D., J. Rottmann, K. J. Raedeke y R. D. Taber. 1983. "Endangered mammals of Chile: status and conservation". *Biological Conservation* 25: 335-352.
- Molina, E. G. y A. V. Little. 1981. "Geocology of the Andes: the natural science basis for research planning". *Mountain Research and Development* 1: 115-144.
- DGA-MOP (Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile). 1993. "Estudio análisis de los recursos de agua de la Primera Región de Tarapacá". Realizado por Ingeniería y Geotecnia Ltda., Santiago.
- Morales, C. B. 1990. *Bolivia: medio ambiente y ecología aplicada*. Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- Mueller, P. 1973. *The terrestrial centres of terrestrial vertebrates in the Neotropical Realm*. The Hague.
- Niemeyer, H. y P. Cereceda. 1984. *Hidrografía*. Tomo VIII. Colección Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago. 320 pp.
- Nowak, R. M. 1991. *Walker's mammals of the world, fifth edition*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Noy-Meir, I. 1973. "Desert ecosystems: environment and producers". *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 25-51.
- _____. 1985. "Desert ecosystems: Structure and function". Pp. 93-103 en M. Evenari, I. Noy-Meir y D.W. Goodall (editores) *Hot deserts and arid shrublands*. Elsevier, Amsterdam.
- Núñez, H. y F.M. Jaksic. 1992. "Lista comentada de los reptiles terrestres de Chile continental". *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural (Chile)* 43: 63-91.
- Ortiz, J. C. y P. Marquet. 1987. "Una nueva especie de lagarto altoandino: *Liolaemus istlugensis* (Reptilia-Iguanidae)". *Gayana (Zoología)* 51: 59-63.
- Osgood, W. H. 1943. "The mammals of Chile". *Field Museum of Natural History, Zoological Series* 30: 1-268.
- Palma, R. E. 1995. "Range expansion of two South American mouse opossums (*Thylamys*, Didelphidae) and their biogeographic implications". *Revista Chilena de Historia Natural* 68: 515-522.

- Parada, M. 1988a. "Flamencos en el norte de Chile: distribución, abundancia y fluctuaciones poblacionales del número". Pp. 52-66 en Parada, M., J. Rottmann y C. Guerra (editores) Actas del I Taller Internacional de Especialistas en Flamencos Sudamericanos. Corporación Nacional Forestal, Chile y New York Zoological Society, USA. 217 pp.
- _____. 1988b. "Flamingos in northern Chile: distribution, abundance and fluctuation in numbers". Pp. 67-79 en Parada, M., J. Rottmann y C. Guerra (editores) Actas del I Taller Internacional de Especialistas en Flamencos Sudamericanos. Corporación Nacional Forestal, Chile y New York Zoological Society, USA. 217 pp.
- _____. 1988c. "Flamencos en el norte de Chile y su reproducción". Pp. 132-139 en Parada, M., J. Rottmann y C. Guerra (editores) Actas del I Taller Internacional de Especialistas en Flamencos Sudamericanos. Corporación Nacional Forestal, Chile y New York Zoological Society, USA. 217 pp.
- _____. 1988d. "Flamingo breeding in northern Chile". Pp. 140-147 en Parada, M., J. Rottmann y C. Guerra (Eds.) Actas del I Taller Internacional de Especialistas en Flamencos Sudamericanos. Corporación Nacional Forestal, Chile y New York Zoological Society, USA. 217 pp.
- _____. 1988e. "Flamencos en el norte de Chile: decrementos invernales y proposición de movimientos migratorios". Pp. 148-153 en Parada, M., J. Rottmann y C. Guerra (editores) Actas del I Taller Internacional de Especialistas en Flamencos Sudamericanos. Corporación Nacional Forestal, Chile y New York Zoological Society, U.S.A. 217 pp.
- Pearson, O. P. 1948. "Life history of mountain viscachas in Peru". *Journal of Mammalogy* 29: 345-374.
- _____. 1951. "Mammals in the highlands of southern Peru". *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology (Harvard)* 106: 117-174.
- _____. 1958. "A taxonomic revision of the rodent genus *Phyllotis*". *University of California Publications in Zoology* 54: 391-496.
- _____. 1982. "Distribución de pequeños mamíferos en el altiplano y los desiertos del Perú". En P. Salinas (editor) Actas del VIII Congreso Latinoamericano de Zoología, Mérida.
- _____. y J. Ralph. 1978. The diversity and abundance of vertebrates along an altitudinal gradient in Peru. *Memorias del Museo de Historia Natural "Javier Prado"*, Volumen 18.
- Philippi, R. A. 1941. "Notas sobre aves observadas en la provincia de Tarapacá". *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural (Chile)* 19: 43-77.
- _____. 1964. "Catálogo de la aves chilenas con su distribución geográfica". *Investigaciones Zoológicas Chilenas* 11: 1-179.
- _____. A. W. Johnson y J. D. Goodall. 1944. "Expedición ornitológica al norte de Chile". *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural (Chile)* 22: 65-120.
- Pine, R. H., S. D. Miller y M. L. Schamberger. 1979. "Contributions to the mammalogy of Chile". *Mammalia* 43: 339-376.
- Pinto, M. y I. Vila. 1987. "Relaciones tróficas y caracteres morfofuncionales de *Orestias laucaensis* Arratia 1982 (Pisces, Cyprinodontidae)". *Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso* 18: 77-84.
- Pizzimenti, J. J. y R. De Salle. 1980. "Dietary and morphometric variation in some Peruvian rodent communities: the effects of feeding strategy on evolution". *ç* 13: 263-285.
- Pizzimenti, J. J. y R. De Salle. 1981. Factors influencing the distributional abundance of two trophic guilds of Peruvian cecelid rodents. *Biological Journal of the Linnean Society* 15: 339-354.
- Rau, J. R. y A. Muñoz. 1985. Una contribución para el conocimiento de los mamíferos chilenos. *Boletín de Vida Silvestre* 4: 23-59.
- Redford, K. H. y J. F. Eisenberg. 1992. *Mammals of the Neotropics, volume 2: the southern cone*. Chicago University Press. Chicago, ix + 430 pp.
- Reig, O. A. 1986. Diversity patterns and differentiation of high Andean rodents. Pp. 405-439 en F. Vuilleumier y M. Monasterio (editores) *High altitude tropical biogeography*. Oxford University Press, New York.
- Reise, D. y W. Venegas. 1987. Catalogue of records, localities and biotopes for research work on small mammals in Chile and Argentina. *Gayana (Zoología)* 51: 103-130.
- Rovira, A. 1984. *Geografía de los suelos*. Serie Geografía de Chile, Tomo V. Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- Rundel, P. W., M. O. Dillon, B. Palma, H. A. Mooney, S. L. Gulmon y J. R. Ehleringer. 1991. The phytogeography and ecology of the coastal Atacama and Peruvian deserts. *Aliso* 13: 1-49.
- Simonetti, J. A., Arroyo, M. T. K., Spotorno, A. E. y Lozada, E. (Editores). 1995. *Diversidad biológica de Chile*. Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, Santiago. xii + 364 pp.

- Spotorno, A. E. 1976. Análisis taxonómico de tres especies altiplánicas del género *Phyllotis* (Rodentia: Cricetidae). *Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso* 9: 141-161.
- Tamayo, M. y D. Frassinetti. 1980. Catálogo de los mamíferos fósiles y vivientes de Chile. *Noticiario Mensual del Museo Nacional de Historia Natural (Chile)* 37: 323-399.
- Tamayo, M., H. Nuñez y J. Yañez. 1987. Lista sistemática actualizada de los mamíferos vivientes en Chile y sus nombres comunes. *Noticiario Mensual del Museo Nacional de Historia Natural (Chile)* 312: 1-13.
- Tecchi, R. y A. Veloso (compiladores). 1992. Ecosistemas altoandinos de Argentina y Chile. Instituto de Biología de Altura, Universidad Nacional de Jujuy, Memorias 3.
- Toledo, X. y E. Zapater. 1987. Geografía general y regional de Chile. Editorial Universitaria, Santiago.
- Troll, C. 1958. The cordilleras of the tropical Americas: aspects of climatic, phytogeographical and agrarian ecology. Pp. 15-56 en C. Troll (editor) *Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas*. Dummeleers Verlag, Bonn.
- Valencia, J., A. Veloso y M. Sallaberry. 1982. Nicho trófico de las especies de herpetozoos del transecto Arica-Chungará. Pp. 269-291 en Veloso, A. y E. Bustos-Obregón (editores) *El ambiente natural y las poblaciones humanas de los Andes del norte grande de Chile (Arica, Lat. 18° 28' S)*. Volumen I, Proyecto MAB-6, UNEP-UNESCO 1105-77-01, ROSTLAC, Montevideo.
- Valencia, J., M. Sallaberry, J. G. Fernández y V. Mascitti. 1992. Estado del conocimiento de la fauna de vertebrados terrestres de la puna, con especial énfasis en la zona del Parque Nacional Lauca (Chile) y Laguna de Pozuelos (Argentina). Pp. 23-33 en R. Tecchi y A. Veloso (editores) *Ecosistemas altoandinos de Argentina y Chile*. Instituto de Biología de la Altura, Universidad Nacional de Jujuy, Memoria 3, 86 pp.
- Veloso, A. y E. Bustos-Obregón (editores). 1982. *El ambiente natural y las poblaciones humanas de los Andes del norte de Chile (Arica, Lat 18° 28' S)*. Volumen I: La vegetación y los vertebrados inferiores de los pisos altitudinales entre Arica y el Lago Chungará. Proyecto MAB-6, UNEP-UNESCO 1105-77-01, ROSTLAC, Montevideo.
- Veloso, A. y J. Navarro. 1988. Lista sistemática y distribución geográfica de anfibios y reptiles de Chile. *Bollettino del Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino* 6: 481-539.
- Veloso, A., M. Sallaberry, J. Navarro, P. Iturra, J. Valencia, M. Penna y N. Diaz. 1982. Contribución al conocimiento de la herpetofauna del extremo norte de Chile. Pp. 135-268 en Veloso, A. y E. Bustos-Obregón (editores) *El ambiente natural y las poblaciones humanas de los Andes del norte grande de Chile (Arica, Lat. 18° 28' S)*. Volumen I, Proyecto MAB-6, UNEP-UNESCO 1105-77-01, ROSTLAC, Montevideo.
- Villagrán, C., J. J. Armesto y M. T. Kalin-Arroyo. 1981. Vegetation in a high Andean transect between Tunj and Cerro Leon in northern Chile. *Vegetatio* 48: 3-16.
- Villagrán, C., J. J. Armesto y M. T. K. Arroyo. 1982. La vegetación en los Andes del norte de Chile (18-19 Sur). Pp. 13-69 en Veloso, A. y E. Bustos-Obregón (editores) *El ambiente natural y las poblaciones humanas de los Andes del Norte Grande de Chile (Arica, Lat. 18° 28' S)*. Volumen I, Proyecto MAB-6, UNEP-UNESCO 1105-77-01, ROSTLAC, Montevideo.
- Villagrán, C., M. T. K. Arroyo y C. Marticorena. 1983. Efectos de la desertización en la distribución de la flora andina de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 56: 137-157.
- Vuilleumier, F. y D. Simberloff. 1980. Ecology versus history as determinants of patchy and insular distributions in high Andean birds. *Evolutionary Biology* 12: 235-379.
- Vitousek, P. M. 1994. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology* 75: 1861-1876.
- Wilson, E. O. 1992. *The diversity of life*. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Winterhalder, B. P. y R. B. Thomas. 1978. *Geocology of southern highland Peru*. University of Colorado, Institute of Arctic and Alpine Research, Occasional Paper 27.
- Yoneda, M. 1983. Roedores del altiplano y los valles bolivianos. *Museo Nacional de Historia Natural (La Paz)* 2, 12 pp.
- Yoneda, M. 1994. Composición por especies y ciclo reproductor de los roedores de la parte norte de los Andes bolivianos. *Ecología en Bolivia* 5: 53-62.

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE

Gustavo Lagos*

1. Introducción

El tema de este trabajo dice relación con un concepto utilitario: la eficiencia de uso del agua. Ello se justifica debido a que Chile está abordando un problema de escasez de agua en la región más seca del mundo: el norte.

¿En qué consiste la eficiencia del uso del agua en la minería? ¿Es comparar el uso del agua en la minería con el de otras actividades económicas? ¿Es comparar el uso del agua en diversas actividades mineras? ¿Es comparar el uso del agua en dos actividades mineras similares? ¿O bien, es la definición tradicional de la eficiencia? Estas son preguntas que serán abordadas más adelante.

La eficiencia se define en las disciplinas de la ingeniería como la fracción aprovechada del total utilizado. Los mecanismos de pérdida de agua se denominan consumo y corresponden a la evaporación, transpiración, incorporación a productos, cultivos o al suelo, consumo humano y animal, o bien transformada en no usable debido a algún proceso. Cabe agregar que parte del agua consumida por seres humanos y animales es recuperada en diversas partes del mundo para nuevo uso. Asimismo, el agua usada en procesos industriales, por ejemplo en la minería, puede ser reutilizada, debido a técnicas que permiten eliminar los contaminantes que estas aguas han incorporado durante los procesos.

En el caso de la minería, la eficiencia de uso puede ser definida como aquella fracción del total utilizada que no es consumida. Este trabajo estima los consumos de agua en las diversas etapas de los principales procesos de recuperación de los minerales, hasta llegar a cobre fino. También analiza los factores que afectan dicho consumo y define aquellas áreas en donde es posible realizar mayores ahorros de consumo. El trabajo también discute brevemente la eficiencia del uso del agua en términos del potencial económico generado.

En el presente trabajo no se aborda el problema de la obtención de las aguas. Cabe agregar en este sentido que en la actualidad existen numerosos lugares del norte de Chile en donde la demanda de agua es superior a la oferta, lo que crea conflictos evidentes. Los nuevos proyectos mineros han debido, por esto, explorar nuevas fuentes, muchas veces a un costo considerable. Es con frecuencia distinta la situación de las explotaciones mineras antiguas, las que funcionan desde sus inicios en un contexto de disponibilidad de aguas. En muchos casos de antiguas explotaciones, sin

* Ingeniero de Minas, Ph.D. Universidad de Leeds. Profesor de la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Programa de Minería.

embargo, el requerimiento de agua ha ido aumentando debido al empobrecimiento de la ley de los minerales. Por lo anterior, las tendencias que han ocurrido en los últimos años en la minería han estado orientadas a obtener nuevas fuentes de agua y a ahorrar agua en los procesos de extracción, lo que incluye no sólo reducir el consumo de agua por unidad de cobre producida, sino que en muchos casos la utilización del agua de descarte en otras actividades.

2. Consumo del Agua en la Minería del Cobre

Aquí se aborda exclusivamente el consumo directo del agua en la minería del cobre. Por su similitud, el análisis que sigue es aplicable a la minería del oro, plata, cinc, plomo, y níquel. No se considera el uso indirecto del agua, es decir el agua utilizada en producir la energía, los insumos y el transporte que requiere la minería.

En la minería del cobre el agua se utiliza fundamentalmente en el proceso tradicional de concentración por flotación, seguido de fusión y electrorrefinación, o en el proceso hidrometalúrgico, el que consta de lixiviación –extracción por solventes– y electroobtención.

A continuación se analiza el uso del agua en cada una de las actividades de la minería.

2.1 Consumo humano en campamentos

El agua de consumo humano es para bebida, cocción, lavado, riego y baños. Los datos disponibles indican que esta cantidad varía entre 130 y 200 litros diarios por persona (Bechtel Chile, 1997). Esta cantidad representa usualmente menos de 1,5% por ciento del agua consumida en una empresa minera. Este porcentaje varía bastante debido al diferente ámbito de actividades de las diversas empresas mineras. En empresas de gran dimensión, el consumo es usualmente más cercano o inferior a 1%.

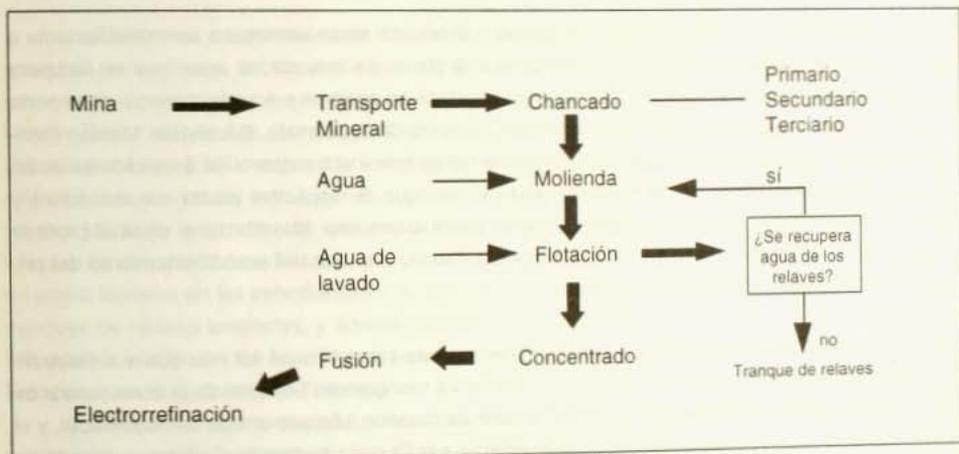
2.2 Consumo en la mina

El uso principal de agua en las minas de cielo abierto es en el riego de caminos para reducir el polvo en suspensión. Se trata, por ende, de consumo. En la minería subterránea, el consumo del agua es reducido y el problema consiste generalmente, al igual que en la minería de cielo abierto, en extraer el agua natural que se aposa en el fondo de los piques, la que puede provenir de lluvias o de afloramientos de las napas subterráneas. Las cifras disponibles para minas recientemente inauguradas es de 5,4 a 5,8 m³/ton de cobre fino producido (Lefort, 1996). Esta cifra es bastante más variable que lo indicado anteriormente, ya que hay muchos factores que influyen en el abatimiento del polvo: superficies expuestas, morfología del terreno, precipitaciones anuales, vegetación natural, etc. Cifras disponibles indican que el agua utilizada en riego de caminos puede variar entre cero y 15% del consumo total de agua de una faena minera. El consumo de 5,4 y 5,8 m³ por tonelada indicado corresponde aproximadamente al 3% del consumo total por tonelada de cobre producida, considerando que la planta llega hasta el cobre catódico.

2.3 Plantas de Procesamiento de minerales

Estas plantas realizan el chancado y molienda del mineral, seguidos por la flotación, clasificación y espesamiento. La alimentación de estas plantas consiste en el mineral proveniente de la mina, sulfuros de cobre, los que contienen usualmente entre 0,5 y 3 por ciento de cobre. Con frecuencia, el mineral es acondicionado previo a la molienda. Ello significa que se le agrega agua y algunos reactivos que son importantes en la flotación. En ésta existe un exceso de agua en relación al mineral y se hace generalmente a un pH alcalino (10 a 11). Por tanto es necesario añadir algún reactivo, usualmente cal, para elevar el pH desde 7 que contiene el agua natural, hasta 10 o 11. El producto de estas plantas es un concentrado (parte valiosa del mineral que flota durante el proceso), el que contiene entre 25 y 45 por ciento de cobre dependiendo de las especies de mineral involucrado (calcopirita, covelina, calcosina, óxidos, etc.). Por otro lado el desecho de estas plantas es el relave, el que consiste en el mineral que no flota y que es enviado a los tranques de relave. En algunas alternativas de la flotación el mineral valioso es el que no flota, mientras que el desecho flota. La Figura 2.1 muestra los procesos unitarios involucrados en este método de recuperación:

FIGURA 2.1 PROCESO TRADICIONAL DIAGRAMA DE FLUJO



Las pérdidas de agua durante el procesamiento de minerales es variado, debido a la complejidad de las plantas:

evaporación, especialmente en tranques de relave, espesadores y acopio de mineral y/o concentrado. La humedad del concentrado o de los minerales puede variar desde unos pocos puntos porcentuales hasta 15 o 20 por ciento, siendo lo usual cerca de 10 por ciento. En general, las transacciones de concentrado se hacen considerando esta última cifra. La evaporación que se puede producir a partir de un concentrado con 10% de humedad en el desierto es severa, mientras que en lugares cerca del mar esta cifra puede mantenerse. La

evaporación que puede producirse en un tanque de relaves varía tan sustancialmente que no vale la pena dar cifras promedio. Sólo a modo de ejemplo, Minera Escondida cita en un estudio del año 95 (Mel, 1995) una evaporación en el relave de aproximadamente 13% respecto de la circulación de agua en el relave. Si la cifra se compara con la alimentación de agua fresca, el porcentaje evaporado es aproximadamente 23%.

- infiltraciones producidas hacia las napas subterráneas pueden ser consideradas muchas veces como pérdidas, ya que una parte considerable de esta agua es absorbida por los suelos o se evapora. Sin embargo, una parte del agua puede ser recuperada de las napas.
- proceso de secado del concentrado previo a la fusión. El mineral debe ser alimentado a los hornos de fusión con la mínima cantidad de agua posible para aprovechar al máximo el combustible y las reacciones exotérmicas producidas durante la fusión. Si se considera una fundición de 100 mil toneladas de concentrado por año y de 10% de humedad, el agua que debe ser evaporada antes de la fusión es aproximadamente 0,3 metro cúbico por tonelada de cobre blister, aunque esta cifra puede variar, dependiendo de la ley del concentrado y de las características de la fundición.
- en los casos en que el tranque de relaves o espesador estén ubicados a aproximadamente a la misma altura sobre el nivel del mar que la planta de flotación, el agua que se recupera puede ser reutilizada en el proceso. Así acontece en muchos procesos mineros en el norte de Chile. Ejemplos de ello son las instalaciones de Chuquicamata, Escondida, Mantos Blancos, Candelaria y Pelambres. En cambio en otros casos el tranque o los espesadores están ubicados a menor altura sobre el nivel del mar que la respectiva planta concentradora y resulta demasiado caro bombear agua de vuelta al proceso. No retornar el agua al proceso de flotación tiene el costo, no sólo del agua misma, sino que del acondicionamiento del pH, como se mencionó anteriormente.

Casos de tranques ubicados a mucho menor altura sobre el nivel del mar que sus respectivas plantas de procesamiento de minerales son dos de los tres grandes tranques de la zona central de Chile. El Carén perteneciente a la División El Teniente de Codelco, ubicado al este del lago Rapel, y el Tranque Ovejeras, aún no en operación, perteneciente a la División Andina de Codelco y ubicado en el valle central en la Provincia de Chacabuco. En cambio el tranque las Tórtolas perteneciente a Disputada de Las Condes está situado al mismo nivel que la planta del mismo nombre, en la Provincia de Chacabuco (colindante con las comunas de Til-Til, Colina y Lampa), ya que la mina Los Bronces envía el mineral mediante un mineroducto, a Las Tórtolas.

En el caso de descarte de agua de tranques de relave, debe considerarse que los niveles de metales o sales de estas aguas, denominadas las aguas claras, muchas veces no es adecuado para uso en agricultura. En el caso de Las Tórtolas se utiliza el agua en regar un bosque plantado por la misma empresa en las inmediaciones del tranque. En el caso del Carén las aguas contienen altos niveles de molibdeno y sulfatos. A pesar de que Codelco ha invertido importantes sumas de dinero en demostrar la viabilidad de algunos cultivos con estas aguas, aún no existen resoluciones oficiales que permitan hacerlo, por lo que estas aguas son descartadas y van a dar al lago Rapel. De existir la

alternativa de riego con las aguas claras de los tranques Carén, Las Tórtolas y Ovejera, habría importantes beneficios, los que han sido estimados (Andía, 1996) en la posibilidad de regar 2.800 hectáreas adicionales de las provincias de Chacabuco y del Cachapoal. La única inversión requerida sería de canalización para la distribución a usuarios.

En general, se puede afirmar que las plantas concentradoras de las grandes minas de cobre chilenas recuperan entre 30 y 84% del agua, dependiendo de las características específicas de los procesos. De los datos disponibles, el consumo de agua por tonelada de mineral tratado (mineral que ingresa a las plantas concentradoras) varía: 0,36 m³ (por tonelada seca) para el caso de Candelaria (*Minería Chilena*, N° 186, 1996), 0,4 m³/ton después de la ampliación proyectada de Pelambres (*Minería Chilena*, N° 185, 1996), 0,68 m³/ton en el caso de Minera Escondida (en 1995) (MEL, 1995), y aproximadamente 1 m³/ton en el caso de otras grandes instalaciones mineras (Lefort, 1996).

En plantas concentradoras de tamaño mediano pequeño (>120 toneladas por día) hay cifras que sitúan el consumo entre 1,3 a 1,4 m³/ton de mineral, mientras que en plantas menores que 120 tpd en general no se recupera agua y el consumo puede llegar a 2,1 m³/ton (Luna, 1991).

2.4 Transporte de mineral o concentrado

El mineral es generalmente tratado en plantas concentradoras que se encuentran en la vecindad de las minas, debido a que el costo de su transporte es entre 10 y 60 veces más caro que transportar concentrado. La excepción en Chile la constituye la mina Los Bronces de la Compañía Minera Disputada de Las Condes. Como ya se mencionó, ésta envía el mineral desde la mina, ubicada a más de 2.500 metros sobre el nivel del mar, a la planta de las Tórtolas, ubicada a unos 500 metros sobre el nivel del mar. Esta es una solución eficiente desde el punto de vista del uso del agua, ya que la planta está ubicada aproximadamente a la misma altura sobre el nivel del mar que el tranque de relaves de Las Tórtolas, por lo que la recuperación de agua puede ser óptima. Lo mismo no podía lograrse en las inmediaciones de Los Bronces, debido al alto costo de seguir ampliando los tranques de relaves existentes, y además debido al riesgo percibido por la población de Santiago, de una posible avalancha de los antiguos tranques (Pérez Caldera) ubicados en la cuenca del río San Francisco, por la quebrada de El Arrayán.

Existen básicamente dos formas de transportar el concentrado desde las minas a las fundiciones o a un puerto: mediante camiones o trenes, y a través de un mineroducto.

En Chile hay tres grandes plantas concentradoras que envían, o enviarán, el concentrado a un puerto mediante un mineroducto. Estas son las plantas de Minera Escondida, la de Collahuasi y la de Pelambres. En todos estos casos el concentrado es transportado más de 150 kilómetros, desde alturas por sobre los dos mil metros sobre el nivel del mar hasta un puerto. Con el objeto de que el concentrado fluya a lo largo del mineroducto es preciso agregar agua. El agua promedio utilizada en estos mineroductos es de 40 litros por tonelada (MEL, 1995) de concentrado, y representa aproximadamente entre un 4 y un 6% del total de agua consumida en las respectivas plantas concentradoras. Adicionalmente, la cantidad de agua utilizada por tonelada de mineral transportada es constante respecto de la distancia transportada, lo que no ocurre en el caso del transporte terrestre. En el caso de Minera Escondida, único de estos tres mineroductos actualmente en actividad, la totalidad de esta agua está disponible: 14% en el tranque Jarón, ubicado al sur de la planta concentradora de Coloso, 76% en el mar, y 10% se exporta con los concentrados, como humedad. Cabe agregar que el tranque

Jarón fue construido debido a que Minera Escondida tiene un proceso de flotación de mineral ubicado en las cercanías del puerto de Coloso, el que es requerido después de una lixiviación amoniacal efectuada en dicho lugar con parte del concentrado proveniente de la mina.

Minera Escondida ha utilizado parte de esta agua en el riego de jardines que se encuentran en las inmediaciones del puerto de Coloso y no se puede descartar que en el futuro esta agua sea utilizada por alguna instalación industrial de la zona de Antofagasta. La misma opción debería existir en el caso del agua disponible en los puertos de embarque de los concentrados de Pelambres y de Collahuasi. Por tal motivo, si bien el agua requerida para el funcionamiento de los mineroductos constituye un consumo en la actualidad, en el futuro podría dejar de serlo, al menos en proporción relevante.

Finalmente, en el caso del transporte por camión o tren, el uso aparente de agua está constituido por la humedad del concentrado, la que es equivalente a aproximadamente un 10% de la que se transporta en un mineroducto. Sin embargo aquí no se cuenta el consumo de agua del uso de camiones o trenes, el que es muy superior al consumo del radiador. El uso equivalente de agua debe considerar el mantenimiento del camión, el consumo de agua de las personas que manejan y mantienen el camión, el consumo de agua para producir y refinar el petróleo, etc. En este estudio no se dispone de cifras equivalentes de uso de agua por kilómetro de transporte. Como dato de referencia, para refinar un litro de gasolina a partir de petróleo crudo se requieren 133 litros de agua, y para fabricar un automóvil se requiere un consumo de 380 mil litros de agua (Masters, 1991). Aplicando solamente el factor de uso de combustible en el transporte se llega a una cifra de aproximadamente 900 litros de agua por tonelada de mineral transportado 170 kms. (distancia de mina Escondida y puerto de Coloso). Sin embargo el agua gastada en extraer y refinar el combustible no proviene de la misma región, por lo que el análisis se complica.

Por esto, es muy posible, debido a las cifras analizadas anteriormente, que el mineroducto sea más eficiente desde el punto de vista del consumo de agua para transportar concentrado que hacerlo en camiones o trenes.

2.5 Fundiciones

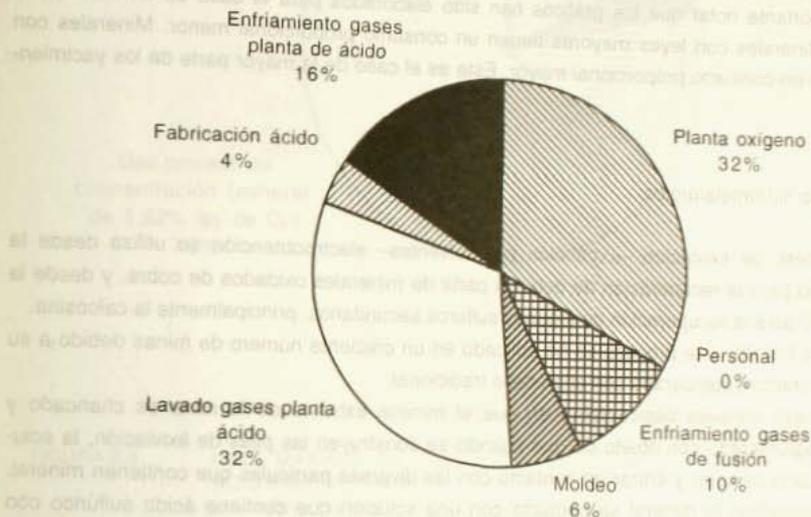
La fusión de concentrados se realiza con minerales sulfurados en diversos reactores y da origen al cobre blister o a ánodos. Una parte fundamental de la fusión es la recuperación del azufre contenido en el concentrado, el que durante la fusión se transforma en anhídrido sulfuroso, SO_2 . La siguiente figura muestra el consumo de agua en el proceso de fusión de cobre y de producción de ácido sulfúrico, subproducto prácticamente obligatorio para las fundiciones. En este ejemplo (Refimot, 1994), correspondiente a una fundición chilena, cerca del 26% del agua consumida se utiliza en enfriamiento de gases, ya sea directamente en la fusión o en la sección de producción de ácido sulfúrico, donde el gas llega con una temperatura superior a 200 centígrados.

El consumo de agua en enfriamiento de gases puede variar considerablemente de una fundición a otra. Por ejemplo, una que se encuentre cercana al mar puede utilizar en la casi totalidad del enfriamiento agua de mar, devolviéndola una vez utilizada y asegurando que no se produzcan impactos ambientales de consideración debido al cambio de temperatura. Por otra parte, se pueden utilizar intercambiadores de calor más eficientes en el enfriamiento, reduciendo de esta forma el consumo. También es posible utilizar más agua que la indicada anteriormente.

Los otros procesos en que se usan cantidades importantes de agua es en la producción de oxígeno, el que es necesario para hacer más eficientes las reacciones de fusión, y el lavado de gases que se realiza en las plantas de ácido con objeto de remover los sólidos que vienen entrampados en los gases.

Por los motivos expuestos hemos estimado que la variación en el consumo de agua de una fundición de cobre puede variar entre 8 y 15 m³/tonelada de cobre blister. La Figura 2.2 presenta un consumo típico de agua de una fundición de cobre.

FIGURA 2.2 CONSUMO DIRECTO DE AGUA EN UNA FUNDICIÓN DE COBRE (11 m³/ton de blister)



2.6 Refinerías Electrolíticas

El proceso de refinación electrolítica es el último de la vía tradicional de recuperación del cobre. Consiste en electrolizar los ánodos provenientes de la fundición con objeto de eliminar las impurezas, principalmente metálicas, que son del orden de 0,1 a 0,3 por ciento. El cobre depositado en los cátodos durante la electrorrefinación debe tener una pureza superior al 99,99%. En la electrorrefinación las pérdidas de agua se producen fundamentalmente debido a la evaporación y al descarte de soluciones. La primera ocurre en la parte superior de las celdas electrolíticas y está exacerbada debido a que la temperatura del electrólito es de aproximadamente 60 grados centígrados. En la actualidad se utilizan pequeñas esferas plásticas que flotan sobre el electrólito y reducen la evaporación en forma muy sustancial. Se dispone de una cifra para una planta de electroobtención recién construida, respecto a la que no existen tantas variaciones. Esta cifra es de 0,25 m³ de agua por tonelada de cobre producido (Fluor-Daniel, 1997).

El descarte de soluciones debe realizarse debido a que el electrólito se va envenenando con metales y elementos no deseados, tales como el arsénico y el antimonio, y debe limpiarse en celdas

especiales mediante un proceso de electroobtención. Al cabo de las diversas etapas de limpieza siempre hay soluciones que contienen demasiadas impurezas y, por tanto, no pueden ser recicladas. Dependiendo de las impurezas iniciales que contenga el ánodo, el descarte de electrólito puede variar entre 0,5 y 1,0 m³/tonelada de cobre producido (Biswas-1976, Fluor Daniel-1997).

2.7 Consumo de agua en el conjunto de procesos de concentración - fusión - electrorrefinación

Las Figuras 2.3 y 2.4 muestran la distribución del consumo en el proceso de concentración, fusión y electrorrefinación, para el caso de consumo mínimo y máximo en Chile.

Es importante notar que los gráficos han sido elaborados para el caso de un mineral de 1,62% de ley. Minerales con leyes mayores tienen un consumo proporcional menor. Minerales con menor ley tienen un consumo proporcional mayor. Este es el caso de la mayor parte de los yacimientos del país.

2.8 Proceso hidrometalúrgico

El proceso de lixiviación –extracción por solventes– electroobtención se utiliza desde la década de los '60 para la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados de cobre, y desde la década de los '80 para la recuperación de algunos sulfuros secundarios, principalmente la calcosina.

Durante los '90, este proceso se ha aplicado en un creciente número de minas debido a su bajo costo de operación, comparado con el proceso tradicional.

El proceso consiste básicamente en que el mineral extraído de la mina es chancado y posteriormente aglomerado con objeto de que cuando se construyen las pilas de lixiviación, la solución lixivante pueda percolar y entrar en contacto con las diversas partículas que contienen mineral. Durante la aglomeración el mineral se contacta con una solución que contiene ácido sulfúrico con objeto de comenzar el proceso de disolución del cobre. Con posterioridad a la aglomeración, el mineral, que contiene aproximadamente un 10% de humedad, se acopia en pilas de unos pocos metros de altura (dos a diez metros), dependiendo de las características del mineral y del lugar, y se riega la superficie superior con una solución ácida. Dicha solución percola al interior de la pila y junto al oxígeno produce la oxidación de los óxidos y sulfuros secundarios de cobre. Este proceso se puede acelerar con la inclusión de otros agentes oxidantes tales como ión férrico, o bacterias. Las pilas han sido construidas sobre una superficie impermeabilizada con objeto de recuperar la totalidad de las soluciones y evitar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. La Figura 2.5 muestra el conjunto de operaciones incluidas en un diagrama de flujo comúnmente usado en la minería del cobre.

La solución recuperada en la parte inferior de las pilas contiene una pequeña concentración (1 a 3 g/l) de cobre, y previo a recuperar este mediante electroobtención, es preciso elevar su concentración en la solución. Ello se hace mediante el proceso de extracción por solventes (SX), el que consiste en la extracción del cobre de la fase acuosa a una fase orgánica y posteriormente la re-extracción del cobre desde la fase orgánica cargada con cobre a una nueva fase acuosa. La concentración del cobre en esta nueva fase acuosa, al cabo del proceso de extracción por solventes, es de aproximadamente 40 g/l. Esta solución, denominada fase cargada, alimenta la planta de electroobtención.

FIGURA 2.3

USO MINIMO DE AGUA EN PROCESO DE CONCENTRACION-FUSION-ELECTORREFINACION
(40 m³/ton Cu fino)

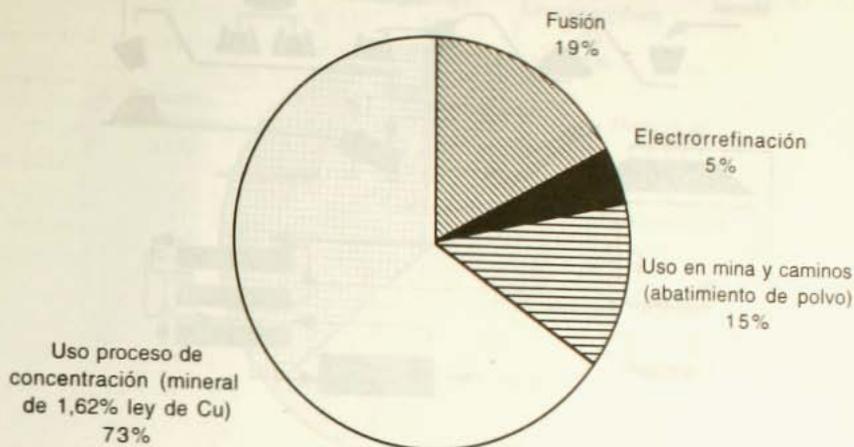


FIGURA 2.4

USO MAXIMO DE AGUA EN PROCESO DE CONCENTRACION-FUSION-ELECTORREFINACION
(175 m³/ton Cu fino)

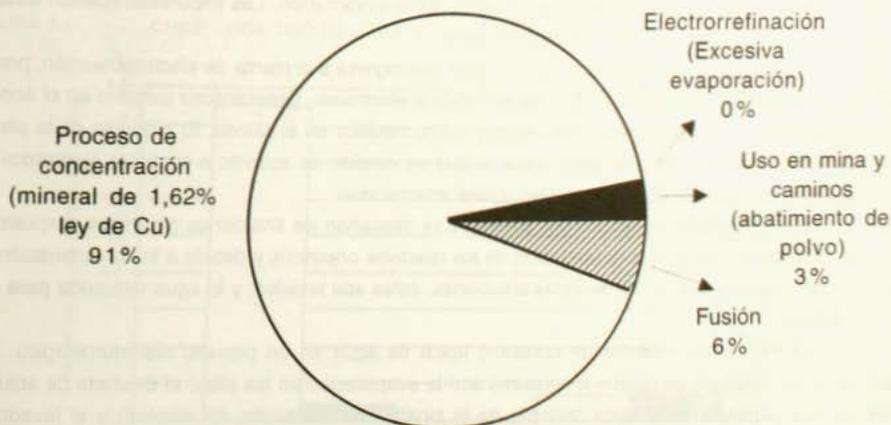
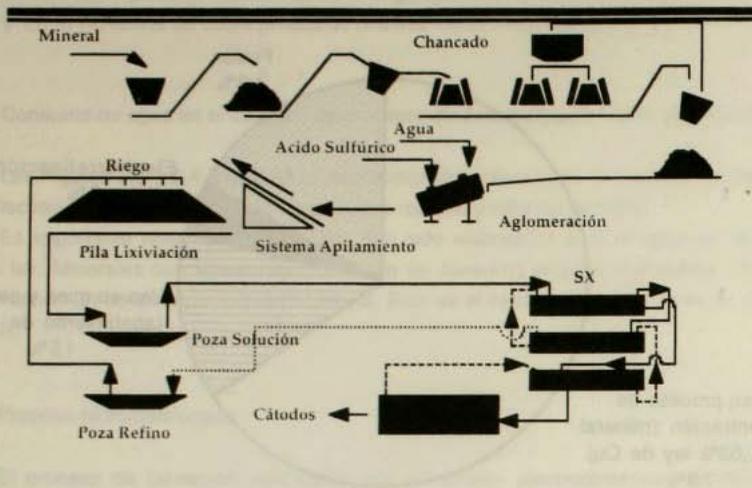


FIGURA 2.5 PROCESO HIDROMETALURGICO
DIAGRAMA DE FLUJO



Una vez que la solución proveniente de la lixiviación es descargada de cobre mediante SX, se recondiciona su pH, el que ha variado, y se reutiliza en el riego de las pilas. En definitiva y al cabo de algunos ciclos, la solución preñada contiene bastantes impurezas que han sido incorporadas mediante la disolución de las pilas. La forma de descartar estas soluciones es agregarlas a una pila de la que ya se extrajo todo el cobre presupuestado y dejarla ahí. Como la base de estas pilas es impermeable, el destino de la solución de descarte es la evaporación. Las impurezas quedan atrapadas en la pila de descarte, la que se denomina ripo.

Por último, la solución cargada con cobre que ingresa a la planta de electroobtención, previo filtrado para eliminar impurezas sólidas, es sometida a electrólisis, generándose oxígeno en el ánodo, constituido a partir de una aleación de plomo y cobre metálico en el cátodo. El producto de la planta de electroobtención es cobre de alta pureza, el que es vendido de acuerdo a contratos realizados en alguna de las bolsas de metales existentes a nivel internacional.

En la planta de extracción por solventes se descartan las soluciones orgánicas después de numerosos ciclos, debido a la degradación de los reactivos orgánicos y debido a la contaminación de la solución. Durante la vida útil de estas soluciones, éstas son lavadas, y el agua requerida para ello es cuantiosa.

La Figura 2.6 muestra un consumo típico de agua en un proceso hidrometalúrgico. Los factores más variables en cuanto a consumo son la evaporación en las pilas, el descarte de soluciones (el que depende entre otros factores de la cinética de disolución del mineral) y el lavado de orgánico.

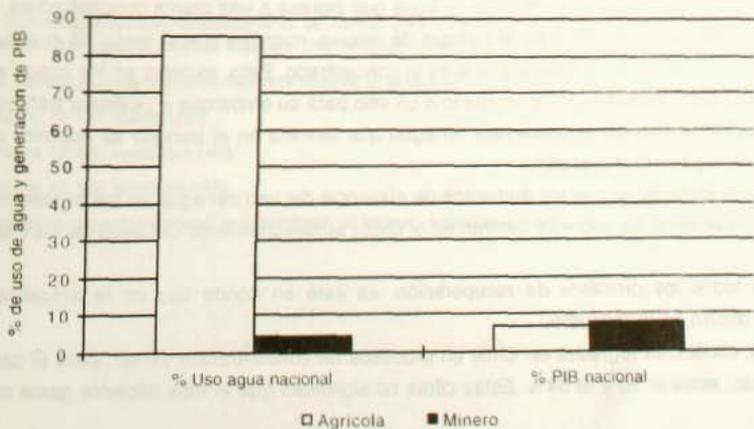
FIGURA 2.6 CONSUMO TÍPICO DE PROCESOS DE LIXIVIACIÓN - SX - EO
(32 m³/ton Cu fino)



3. Uso del Agua desde una Perspectiva Económica

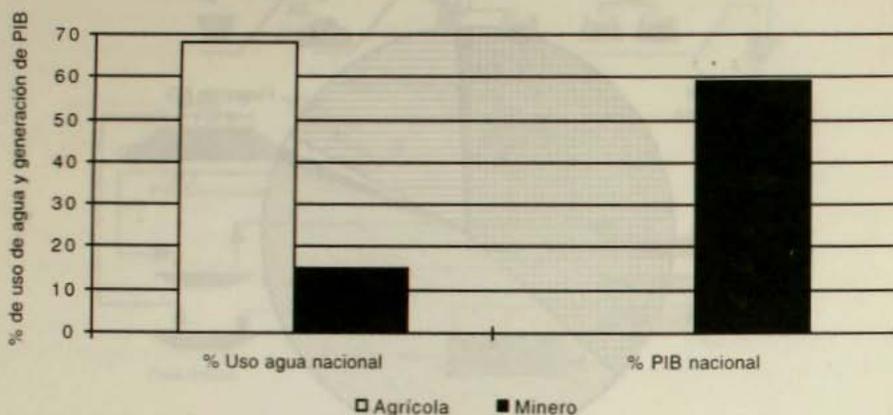
En el país, el 84,5% del agua se usa en riego, mientras el 4,5% se utiliza en la minería (*Minería Chilena*, marzo, 96). Esta proporción se invierte cuando se trata de la generación del producto interno bruto, como se aprecia en la Figura 3.1.

FIGURA 3.1 CHILE - 1994, USO DE AGUA VERSUS GENERACIÓN DE PIB



Lo mismo ocurre, en forma más acentuada, a nivel de la II Región, en donde la minería es la principal actividad económica.

FIGURA 3.2 SEGUNDA REGION - 1990, USO DE AGUA VERSUS GENERACIÓN DE PIB



Estas relaciones sugieren que al analizar el consumo de agua es conveniente mirar el conjunto de los problemas que afectan a la sociedad, incluido el desarrollo logrado, las capacidades y oportunidades futuras. Encarar el problema de esta forma no significa sugerir que se debe terminar con las actividades que son poco eficientes en utilizar el agua desde el punto de vista económico, pero sí pueden indicar la necesidad de elevar la eficiencia en el uso del elemento en dichos sectores.

4. Conclusiones

La mayor pérdida de agua en la minería se produce a partir de la no reutilización de lo que queda de los tranques de relaves. Del total de agua que ingresa a una planta concentradora, generalmente más del 95 por ciento va a dar al tranque de relaves, mientras que el resto se evapora o está contenida en el producto de la flotación, que es el concentrado. Esto, excepto en los casos en que el concentrado es conducido por un mineroducto a un sitio para su embarque o posterior tratamiento. En este caso, de todas formas, el porcentaje de agua que termina en el tranque es superior al 90 por ciento y puede llegar, incluso, al 95%.

Por lo anterior, es que los aumentos de eficiencia del uso del agua en los procesos convencionales de tratamiento del cobre se centran en el mejor aprovechamiento del agua de los tranques de relaves.

De todos los procesos de recuperación, es éste en donde hay en la actualidad mayor potencial de ahorro en el consumo.

Las eficiencias logradas en Chile en procesos de concentración varían, para el caso de las grandes minas, entre el 30 y el 84%. Estas cifras no significan que el más eficiente gasta menos, ya

que afecta fuertemente en el resultado la ley del mineral. Así por ejemplo una instalación que ahorra 80% de agua puede consumir 100 m³/tonelada de cobre fino, mientras que otra faena minera con la misma eficiencia puede consumir la mitad o menos. Por esto es que la eficiencia en sí es indicativa sólo de la voluntad del dueño en ahorrar agua, o de la escasez de agua, pero no dice relación con una eficiencia económica del uso del agua.

El consumo de agua en procesos hidrometalúrgicos puede sufrir variaciones del orden del 100%, dependiendo del tipo de proceso, mineral, etc., mientras que en los procesos de concentración las variaciones en el consumo pueden llegar a ser 500%.

En general, las grandes nuevas faenas mineras están en el primer cuartil de consumo de agua por tonelada de cobre producido. Por esto, su potencial de ahorro futuro no es tan importante como en otros sectores de la minería, en donde el consumo es mucho mayor. Para una empresa minera mediana o grande sería mucho más rentable invertir en una agricultura más eficiente en el uso del agua y comprar o utilizar los derechos sobrantes después del logrado el ahorro.

Por lo anterior parece conveniente que la nueva ley sobre aguas facilite o incentive el ahorro y la más eficaz utilización del agua, ya que estos factores serán cruciales para el desarrollo futuro de la economía del norte de Chile. Entre los aspectos que es conveniente normar también está la utilización de aguas con altos contenidos de algunos metales y sales en ciertos cultivos. Ello permitiría posiblemente beneficios importantes para el país, sin que ello signifique efectos negativos para al medio ambiente.

5. Referencias Bibliográficas

- Andia M. y G. Lagos, "Aprovechamiento de Aguas de Relaves en la Agricultura", Informe de proyecto, Centro de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1996.
- Bechtel Chile, Comunicación Personal, 1997.
- Biswas A.K. y W.G. Davenport, *Extractive Metallurgy of Copper*, Pergamon, 1976.
- Fluor Daniel, Comunicación Personal, 1997.
- Lefort L., 1996, Memoria de Titulación de Ingeniería Civil Industrial con Mención en Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1997.
- Luna, R., Metodología para el establecimiento de normas para efluentes metalúrgicos en hoyo hidrográfica de Copiapo, memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, 1991.
- MEL, 1996, Gestión y Conservación de Recursos Hídricos en Minera Escondida Limitada, Julio 1995.
- Minería Chilena*, N° 177, marzo 1996.
- Minería Chilena*, N° 185, noviembre 1996.
- Minería Chilena*, N° 186, diciembre 1996.
- Refimet, Estudio de Impacto Ambiental de la Fundación de Refimet, Antofagasta, 1994.

CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS

MONSEÑOR SOTERO SANZ 175
TELEFONO: 2315324 - FAX: 2335253

SANTIAGO - CHILE

SERIE DOCUMENTOS DE TRABAJO DEL CEP

(ULTIMOS ESTUDIOS)

- Nº 273 WILLIAM HAYES, IVAN VALENZUELA R., HUMBERTO PEÑA T., OSAMO SUZUKI,
FABIAN M. JAKSIC, PABLO A. MARQUET, HECTOR GONZALEZ,
GUSTAVO LAGOS
"Gestión del Agua en la Minería", octubre 1997.
- Nº 272 RAINER SCHWEICKERT
"El Estado Benefactor Europeo en Crisis: La Experiencia Alemana y Sueca y sus
Implicaciones para las Economías de Mercado Emergentes", septiembre 1997.
- Nº 271 CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS
"Estudio Nacional de Opinión Pública Nº 6 (Tercera Serie). Junio-Julio 1997", agosto
1997.
- Nº 270 ELIANA CARRASCO C., JORGE PRECHT P. Y RAUL BERTELSEN R.
"La Legalidad de la Reglamentación del Sistema de Evaluación de Impacto
Ambiental", julio 1997.
- Nº 269 BERNARDO FONTAINE Y RODRIGO VERGARA
"Una Reforma Tributaria para el Crecimiento", junio 1997.
- Nº 268 CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS
"Estudio Nacional de Opinión Pública Nº 5 (Tercera Serie). Noviembre-diciembre
1996. Tema Especial: Educación en Chile: ¿Qué Piensan los Padres?", junio 1997.
- Nº 267 JORGE QUIROZ Y RÓMULO CHUMACERO
"El Costo de la Educación Particular Subvencionada en Chile", mayo 1997.
- Nº 266 LEONEL SIERRALTA (EDITOR)
"Aspectos Conceptuales para Clasificar Especies según su Estado de Conservación",
abril 1997.

- Nº 264 FRANCISCO ROSENDE R.
"Ajuste en 1996, ¿Anclas en 1997?", marzo 1997.
- Nº 263 CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS
"Estudio Nacional de Opinión Pública Nº 4 (Tercera Serie). Junio-julio 1996. Tema Especial: Pobreza y Estratificación Social en Chile: Motivaciones, Percepciones y Realizaciones", febrero 1997.
- Nº 262 OSVALDO JARA G. Y CARLOS VERGARA DEL RIO
"Subsidio del 2% de Cotización Adicional de la Ley 18.556", febrero 1997.
- Nº 261 EMILIO MENESES C.
"Manteniendo Capacidades Disuasivas con Recursos Fijos: Proyecciones del Financiamiento de las Adquisiciones Militares en Chile", enero 1997.
- Nº 260 JOSE M. FERNANDEZ-DAZA
"Régimen Jurídico de las Concesiones de Carreteras en España: Un Precedente para Chile", diciembre 1996.
- Nº 259 DANTE CONTRERAS
"Pobreza y Desigualdades en Chile: (1987-1992). Discurso, Metodología y Evidencia Empírica", noviembre 1996.
- Nº 258 ALDO MASCAREÑO
"Intervención Reflexiva: Una Nueva Estrategia para la Coordinación en el Campo de las Políticas Sociales de Infancia y Juventud", octubre 1996.
- Nº 257 CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS
"Estudio Nacional de Opinión Pública Nº 4 (Tercera Serie). Junio-julio 1996", septiembre 1996.
- Nº 256 LUIS MENESES E IRMA MIRANDA
"La Probidad Administrativa en las Municipalidades. Probidad y Corrupción", septiembre 1996.
- Nº 255 ANTONIO DAHER
"Tratados y Exportaciones Regionales", agosto 1996.
- Nº 254 DOMINIQUE HACHETTE DE LA F. Y GUSTAVO MORALES
"Impactos Regionales de Nafta y Mercosur", agosto 1996.

