

## EXISTENCIA DE AGUA EN LA II REGIÓN DE CHILE: INTERROGANTES E HIPÓTESIS

*Pierre Pourrut \* , Alex Covarrubias \*\**

### Resumen

A pesar de la aridez de sus condiciones climáticas y del fuerte incremento de las extracciones, no se observa ninguna disminución del recurso agua explotado en la II Región de Chile. Los resultados de nuevos estudios, en especial aquellos referente a posibles modificaciones climáticas, permiten explicar en parte esta aparente antinomia.

**Palabras claves:** *Aridez, incremento demanda, recarga natural, formaciones detríticas, cambios climáticos.*

### LA PRÉSENCE D'EAU DANS LA IIÈME RÉGION DU CHILI : QUESTIONS ET HYPOTHÈSES

#### Résumé

Malgré l'aridité du climat et l'accroissement accéléré de l'extraction, on n'observe pour l'instant aucune diminution notable des quantités d'eau exploitées dans la IIème Région du Chili. Les résultats d'études récentes, particulièrement celles relatives à de possibles modifications climatiques, permettent dans une certaine mesure d'apporter quelques éclaircissements à cette apparente contradiction.

**Mots-clés :** *Aridité, demande en hausse, recharge naturelle, formations detrétiques, changements climatiques.*

### THE PRESENCE OF WATER IN THE II<sup>nd</sup> REGION OF CHILE: QUESTIONS AND HYPOTHESIS

#### Abstract

In spite of arid climatic conditions and the increasing human withdrawal of water, no diminution of the manageable water resources of the II<sup>nd</sup> Region of Chile is yet to be observed. Results from recent studies, particularly those relative to possible climatic changes, allow to some extent to cast a new light upon this paradoxical phenomenon.

**Key words:** *Arid conditions, increasing demand, natural recharge, detritic formations, climatic changes.*

---

\* ORSTOM, DEC-UR 21, Casilla 34, Correo 2, Antofagasta, Chile.

\*\* Universidad Católica del Norte, grupo UNIRHI, Casilla 1280, Antofagasta, Chile.

## INTRODUCCIÓN

Frente a la extrema escasez de precipitaciones que impera en todo el espacio comprendido entre la franja litoral y la puna andina, en la II Región de Chile, la procedencia del agua usada por los distintos sectores de desarrollo constituye una incógnita preocupante: "*¿Cómo se forma?, ¿de dónde viene?, ¿cómo circula? y ¿cuánto tiempo demora en su tránsito hasta los sitios donde se la puede captar?*". Otra interrogante fundamental es la siguiente: "*A pesar del aumento acelerado de las extracciones, que han pasado de 5 000 a 8 000 l s<sup>-1</sup> en los últimos veinte años, ¿por qué no se ha identificado todavía ningún descenso notable de la producción de aguas?*".

La presente comunicación pretende responder, parcial y preliminarmente, a las preguntas arriba planteadas. Geográficamente, el estudio se limita a las zonas de explotación de las aguas, que se sitúan por sobre los 2 500 m de altura, en las cuencas altas y en el piedemonte andino, a unos 250 km de la capital regional.

Después de describir brevemente los grandes rasgos geográficos que condicionan la formación del agua en la zona y una vez analizada la información disponible al respecto, se presentarán algunos aspectos de las investigaciones más novedosas con el propósito de formular algunas hipótesis, en especial aquellas basadas en una interpretación de las condiciones climáticas vigentes en épocas del pasado.

### 1. FACTORES NATURALES CONDICIONANTES DE LAS RESERVAS DE AGUA

El ámbito pluvioclimático y el contexto geodinámico son los agentes del entorno geográfico que condicionan más directamente la formación, localización, importancia y calidad del potencial hídrico. En efecto, de estas dos variables dependen las cantidades y las características del tránsito de las aguas en el sistema hidrológico superficial y subterráneo.

#### 1. 1. Entradas de agua al sistema hidrológico - Marco pluviométrico

La región es extremadamente seca, con muy escasas precipitaciones. Son tres las causas principales de la aridez.

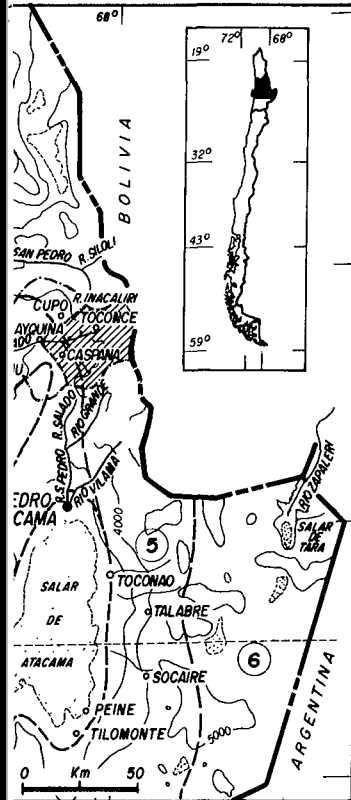
1 - Las características específicas de la circulación general de la atmósfera: la región se encuentra casi permanentemente bajo la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur, alimentado por el descenso de masas de aire frío y seco originado en latitudes ecuatoriales; como consecuencia, el tiempo es muy estable y caracterizado por altas presiones barométricas y cielos despejados;

2 - La proximidad de la Corriente de Humboldt, con aguas frías procedentes de la Antártica, disminuye la evaporación de las aguas superficiales del océano. Cuando ingresan al continente, las escasas masas así generadas, constituidas de aire relativamente frío y poco húmedo, no encuentran los requisitos termodinámicos de enfriamiento requeridos para precipitar y no se producen lluvias. Un caso especial ocurre en ciertas condiciones topográficas y de exposición de las vertientes, asociadas con condiciones de inversión térmica, bajo las cuales se forman neblinas llamadas *camanchacas* cuyo impacto es localizado;

3 - Las alturas elevadas de la Cordillera de los Andes contribuyen para aislar su vertiente pacífica del resto del continente suramericano puesto que van obstaculizando el

epito durante la época correspondiente  
ur del sol y una elevadísima radiación  
as ascendentes generadas en el *Chaco*  
esiones del Atlántico coinciden para  
7 caliente que provocan precipitaciones  
es cubiertas por el manto de nieve  
0.

zona estudiada y las líneas de igual  
ubicado bajo los 3 000 m de altura está  
00 mm, en la zona altiplánica, resultan



#### UNIDADES FISIOGRAFICAS

- CORDILLERA DE LA COSTA
- DEPRESION INTERMEDIA
- CORDILLERA DE DOMEYKO
- CUENCAS INTRAMONTANAS
- CORDILLERA DE LOS ANDES
- ALTIPLANO O PUNA

ión.

### **y almacenamiento de las aguas - Contexto geodinámico**

ogicas y la morfotectónica definen los distintos grados y tipos de derivada de la litología, microfracturamiento y macrofallamiento. bal, la convergencia dinámica de la placa oceánica Nazca y del responsable de la notable actividad sísmica y del volcanismo n oriental. Se ve también traducida en importantes fallamientos oximada norte-sur que definen diferentes bloques alzados y posible distinguir seis compartimientos morfoestructurales de *t al.*, 1990), ubicándose los dos primeros y gran parte del tercero metro estudiado: - 1) la *Cordillera de la Costa* - 2) la *Depresión omeyko* (Precordillera) - 4) las *Cuencas Intramontanas*, depresiones de la Cordillera de los Andes; las principales son la cuenca afluente el río Salado y la del Salar de Atacama; 5) la *Cordillera* to activo con estrato-volcanes cuyas altitudes frecuentemente id; 6) el *Alliplano (Puna)*, relieve relativamente suave con una 400 m de altura y un sistema hidrográfico endorreico; está sólo al de la región y se extiende hacia el este en territorio argentino

ía de las rocas aflorantes, plutones y volcanitas, son de origen , se da énfasis al período que abarca desde el Terciario Medio el frente magmático pasa a ocupar la posición actual y forma nació la Cordillera Principal de los Andes. Es importante citar ríodo [Terciario Medio hasta el Cuaternario], imperó un n escasa erosión, aunque se formaron extensas cubiertas depósitos lacustres y salinos, que constituyen las actuales salares localizados en la Depresión Intermedia y Cuencas ric et al., 1990).

### **evidias deducidas de las características del entorno ambiental**

uesto, se puede deducir que:

a al sistema, tanto las actuales como aquellas de un pasado que ser mínimas ya que las precipitaciones conocidas son muy rico, según Boric et al. (1990), impera desde hace varios millones

al almacenamiento y a la circulación de las aguas en el medio s aparentes son reducidas. En efecto, la secuencia estratigráfica s formaciones detríticas, quizás porque los trabajos geológicos almente minero, o quizás porque los resultados de los sondeos nciales. Además, pese a tener claro el panorama estructural a io indican numerosas evidencias de fallamientos locales, en este.

ndiciones climáticas no parecen propicias para conformar de consideración ya que los parámetros de sublimación y

evapotranspiración son los más favorecidos. De igual manera, al referirse a la información geológica existente, tampoco parece que las condiciones son favorables para conformar capas acuíferas y facilitar su tránsito.

## 2. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL BALANCE DE AGUA

Debido a su interés por la producción de agua, las cuencas hidrográficas del río Siloli y del río Salado (de esta última se están extrayendo 1560 l s<sup>-1</sup> para el agua potable y la gran minería) tienen instaladas antiguas redes de observación hidroclimatológica.

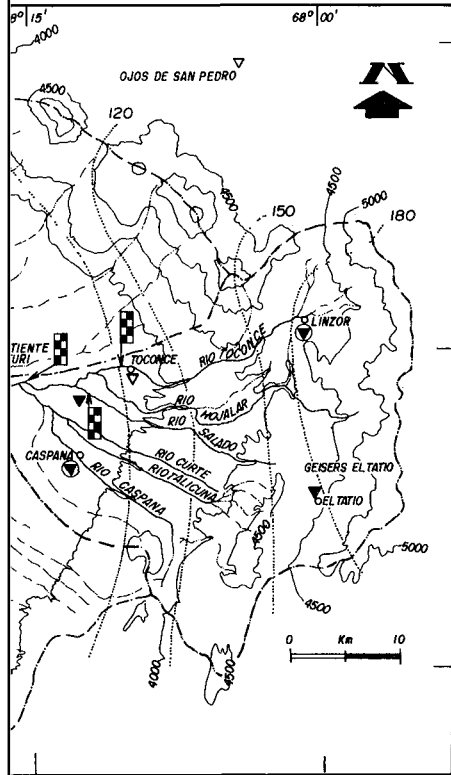
Con el fin de establecer su balance hídrico, se ha analizado en detalle (Kohnenkamp, 1993; Pourrut & Covarrubias, 1994; Covarrubias *et al.*, 1994) la información existente desde 1968 en el río Salado. La hoya (Fig. 2) se ubica sobre los 3 100 m de altitud y la zona de interés que controla el sistema cordillerano de producción de agua (estación de Ayquina) tiene una superficie de 784 km<sup>2</sup>. El total pluviométrico anual aumenta con la altura y varía entre 50 mm y alrededor de 200 mm, siendo elevadísima la irregularidad interanual. Un 90% de las precipitaciones ocurre entre diciembre y marzo, con lluvias diarias que raras veces pasan de 40 mm. Del 13 al 26 de febrero de 1977 se ha registrado un evento de frecuencia rara: 239 mm en Toconce, 223 mm en Linzor y 160 mm en Caspana, generando un pico de crecida de 370 l s<sup>-1</sup> km<sup>2</sup>.

Entre 1975 y 1990, los módulos específicos anuales fluctúan alrededor de 2 l s<sup>-1</sup> km<sup>2</sup>, con extremos mensuales entre 25 y 1,5 l s<sup>-1</sup> km<sup>2</sup>. La lámina escurrida es poco variable, con valores alrededor de 50 a 60 mm anuales, excepto cuando ocurren eventos anómalos, tal como en febrero del año 1977: en regla general, la lámina parece independiente de las precipitaciones que caen en la cuenca.

El cuadro 1 presenta los valores anuales de los parámetros del balance de agua, lo que permite evidenciar un resultado poco común: la lámina escurrida de los años secos es proporcionalmente elevada, hasta igualar o superar el valor de las precipitaciones.

Cuadro 1 - Balance hídrico en la hoya superior del río Salado (S = 784 km<sup>2</sup>).

Año híd.	Precipitación (mm)	Escorrentía (mm)	Déficit (mm)	Coeff. Esc. (%)
75-90	134	70	64	52,2
75-76	215	62	153	28,8
76-77	277	120	157	43,3
77-78	64	56	8	87,5
78-79	94	51	43	54,3
79-80	48	55	- 7	114,6
80-81	120	60	60	50,0
81-82	37	54	- 17	145,9
82-83	87	55	32	63,2
83-84	294	62	232	21,1
84-85	172	60	112	34,9
85-86	129	55	74	42,6
86-87	239	58	181	24,3
87-88	53	53	0	100,0
88-89	132	59	73	44,7
89-90	41	54	- 13	131,7



atológica y precipitación anual.

### PROBLEMÁTICA

el río Salado confirman las conclusiones ámbito geográfico: en primer lugar, la gran edad; en segundo lugar, la participación de aguas subterráneas de origen remoto. Ello es extremadamente limitada, fenómeno de muy corto tiempo de tránsito subterráneo. Pero a la muy reducida e irregular alimentación y escasez de la recarga natural del sistema de acuíferos en las zonas de altura debido a una sequía prolongada año tras año desde hace mucho tiempo.

Salado, debe resaltarse un aspecto peculiar que se traduce por un efecto de atenuación o de amortiguamiento de los aportes, sin duda benéfica, que viene a ser un efecto de suavizado. Hasta tal punto que pareciera que la serie de caudales presenta una ciclicidad de período anual y tendría un carácter de pluri-anual.

entras tanto, *¿Seguirán así o se agotarán las fuentes? ¿Cuáles son los argumentos que aplicar la realidad presente y, sobre todo, que permitirían augurar el futuro hídrico en la*

#### APORTE DE ESTUDIOS RECIENTES

distintas razones (incremento de la producción regional o interés científico), en los estudios que sobre el tema se están desarrollando en la actualidad. Sería so pretender establecer aquí la lista de todas las instituciones participantes y panorama completo del estado de avance de las distintas investigaciones, que impos y técnicas tan diversas como las de análisis isotópicos y de radiocarbón, a, paleolimnología, hidrología, arqueología antropología, teledetección, etc.

re los resultados ya obtenidos, la mayoría con carácter provisional, algunos rtalecer la idea de un recurso de agua con poca esperanza de futuro, otros dibujan más optimista y aportan valiosos elementos de comprensión. Esta diferencia en ativas constituye el guión de la presentación que se hace a continuación, lose a todos los resultados un igual grado de confianza.

#### 1. Expectativas pesimistas

##### 1.1. Fracción de tritio en las aguas

de subrayar que los análisis isotópicos efectuados en el marco de los estudios STOM demuestran la casi ausencia de tritio (menor de 2 UT) en toda la red ca regional (confirmado por Messerli *et al.*, 1993), particularmente en el sistema de l río Loa y en las fuentes altas que dan nacimiento a sus principales afluentes. Por dad de las aguas supera los 50 años y su origen tiene que ser esencialmente o. Este resultado parece reflejar una muy escasa o nula infiltración con ausencia natural. Parece también indicar que las aguas son *fósiles* y que su tiempo de tránsito vado. Esta afirmación conlleva un sinnúmero de problemas para la explotación recurso.

##### 1.2. Procesos de cambio climático actual y/o reciente

en el transcurso de los últimos 20-30 años, se ha evidenciado, en el Chile Central, de los regímenes térmicos (incremento de las temperaturas) y de precipitaciones ón de los totales anuales y del número de días con lluvia), traduciéndose en la del límite de las nieves en alrededor de doscientos metros. Dicha afirmación Börgel, comunicación personal) se ve en gran parte comprobada por las imágenes del último decenio: ellas muestran que las cubiertas de nieve ocupan actualmente geográfico menor durante un menor tiempo. En el Norte, pese a la ausencia de lgunas apreciaciones cualitativas (Baron & Reinhard, 1981) permiten adelantar lo

Los mecanismos de la circulación atmosférica podrían en realidad ser más (¿habrán cambiado ellos?) que el esquema tradicional presentado en el primer la introducción. En efecto, pese a ser resultados preliminares, ciertos análisis (Deuterio y Oxígeno 18) efectuados en precipitaciones líquidas y sólidas, parecen

río del invierno boliviano aparentemente restringida.

*dicados apuntan hacia una neta y subterráneos.*

iperaridez desde el Mioceno que los sistemas de drenaje, ido la capacidad para abrirse de la Cordillera de la Costa. sado no coinciden con estas húmedas que en el presente u impacto es doble:

ca que concurrieron hacia la orecido por las distintas fases tituidos grandes reservorios permeables; rios y constituir reservas de

#### *ario Medio*

una modificación en cuanto icialmente esta fecha ya que tas, la presencia de potentes marco geodinámico de esta

ensa actividad volcánica del acción, con la depositación de cas y limolitas, producto de te de corrientes de barro. La os fenómenos simultáneos: te erosivo. El levantamiento del Oligoceno; contribuye en llera de Domeyko y coincide inación hacia el oeste, lo que personal, 1993). La potencia l que la amplitud y extensión r la búsqueda del perfil de uces en el momento de los ia de un clima notablemente lamiento (interface Mioceno grandes valles, dejando al olla también pilares y fosas



tectónicas en compresión (Maksaev, 1979) y, beneficiándose de condiciones climáticas suficientemente húmedas, estas fosas dan paso a la formación de lagos, como lo muestra la presencia de potentes capas de calizas, areniscas calcáreas y diatomitas en numerosos puntos de la región. Posteriormente, se afirma que la sedimentación detrítica no es muy importante (Boric *et al.*, 1990), y es verdad que el mayor evento de la época es la reanudación de la actividad volcánica cuyos productos, ignimbritas, piroclastos y estrato-volcanes, corresponden a las unidades más extensas.

Por último, la concomitancia entre actividad volcánica y glaciaciones resulta ser un rasgo primordial. Está reflejada en la existencia de numerosos flujos de lodo y explica la gran heterogeneidad (formas y tamaños de los bloques) así como la amplia extensión de los depósitos con características aluviales o aluvio laháricas. Es también probable que este fenómeno haya generado aguas sobresaturadas en sales: su almacenamiento en cuencas endorreicas de origen tectónico y su posterior evaporación (ya empieza el clima árido) podría ser uno de los procesos de formación de los *salares*.

Para argumentar esta interpretación, dos trabajos de tesis de grado han identificado nuevas y potentes series detríticas. Una de ellas, ubicada en el sector de los cerros de Ayquina, es mio-pliocénica y la constituyen gravas, areniscas y conglomerados (Calderón, 1994). La otra, intercalada entre dos flujos de lava en el cauce superior del río Loa, es de edad pliocénica y se compone de areniscas y grauvacas (González, 1995).

De esta manera, quedan constituidos sistemas hidrogeológicos capaces de almacenar las aguas.

#### 4. 2. 2. Condiciones climáticas del Tardiglacial al Holoceno

Fundamentándose principalmente en evidencias palinológicas y paleolimnológicas (Markgraf, 1989; Messerli *et al.*, 1993; Grosjean & Núñez, 1994), así como paleoceanográficas (Ortlieb, 1994), importantes descubrimientos paleoecológicos han sido efectuados. A grandes rasgos, el modelo es el siguiente:

a) después del último paroxismo glacial (18 ka B.P.), durante el cual las temperaturas son muy inferiores a las actuales, el período tardiglacial (17-10 ka B.P.) evidencia niveles lacustres más altos (de 5 a 10 m) en relación con los de hoy día. La modelización de las condiciones climáticas muestra también que las precipitaciones anuales eran significativamente superiores (hasta 300 ó 400 mm, quizás más);

b) el Holoceno inferior (10 a 7 ka B.P.) se caracteriza por tener temperaturas más altas y condiciones mucho más húmedas. Se puede citar

*"The early Holocene (11-7 kyr B.P.) experienced wetter conditions and summer temperatures ... together with significant groundwater recharge"* (Messerli *et al.*, 1993).

c) las condiciones de hiperaridez son relativamente recientes: *"After about 3000 B.P. conditions became drier"* (Messerli *et al.*, 1993)".

Queda establecido que existieron condiciones climáticas propicias para alimentar las rocas-reservorios.

COMENTARIO: *En conjunto, los resultados presentados en este subcapítulo muestran que las características climáticas fueron favorables para conformar importantes reservorios subterráneos y para alimentarlos, en una época no tan remota.*

## 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y VISIÓN A FUTURO

Los argumentos presentados son antinómicos y pueden dar lugar a interpretaciones opuestas. Respecto al potencial de la recarga y a los procesos del tránsito subterráneo, piezas claves para contemplar el futuro del recurso agua, los autores ratifican la validez de tres hipótesis (Pourrut & Covarrubias, 1994).

1 - *La mala estimación de las precipitaciones*: existiría una recarga actual, procedente de la infiltración consecutiva a la fundición de las nieves. El agua se almacenaría en los estratos fracturados superiores y, después de un tiempo de tránsito por el momento desconocido, contribuiría en renovar las reservas.

2 - *La existencia de aportes externos*: la cuenca hidrogeológica de alimentación de la estribación andina-pacífica podría ser mucho más amplia que la hoya topográfica definida por las líneas divisorias de agua. Al respecto, estudios isotópicos (Giggenbach, 1978) han demostrado que las aguas termales del campo geotérmico de El Tatio se derivan de precipitaciones caídas en el sector oriental. Existen también evidencias de que, en la ladera andina oriental, las condiciones geológicas son muy favorables a la infiltración. Por ejemplo, se ha observado que fuertes crecidas han sido totalmente infiltradas después de un corto recorrido (François Risacher, comunicación personal, 1994). Dichas condiciones favorables han sido comprobadas por los autores en las cuencas altas de los ríos Inacaliri y Siloli, donde abundan sedimentos clásticos y tobas poco o nada consolidadas que dan nacimiento a manantiales importantes bajo las ignimbritas riolíticas de cobertura. Otro factor positivo conocido es la mayor abundancia de nieve en el lado oriental.

3 - *La descarga de potentes acuíferos*: la interestratificación de los estratos-reservorios entre capas impermeables del complejo volcánico (véase 4. 2) significa un grado más o menos elevado de aislamiento y bloqueo, en consecuencia, una cierta limitación y regulación de las salidas. Gracias a la acumulación de agua hasta altitudes elevadas, las reservas se encuentran entonces en carga hidráulica. Pueden circular en coladas volcánicas, a través de la red de fisuras producidas por el enfriamiento rápido de lavas relativamente ácidas (dacitas por ejemplo), o descargar directamente a los sistemas hidrográficos un flujo, quizás limitado, pero continuo e independiente de las precipitaciones.

El presente trabajo espera haber contribuido a aclarar algunos conceptos relativos a la existencia de agua en la II Región de Chile. Desde luego, falta todavía mucho antes de conocer toda la cadena que, a partir de la fuente original de vapor de agua, conduce a su redistribución en cada uno de los parámetros que conforman el ciclo hidrológico. Los estudios y tesis en curso, al igual que las investigaciones futuras, intentarán rellenar los principales vacíos en el conocimiento de una realidad compleja, constituyéndose el entendimiento cabal de los mecanismos en un complemento indispensable para la localización de los recursos de agua con miras a su racional aprovechamiento.

Finalmente, a la luz de los resultados mostrados, *¿podría ocurrir un colapso hídrico en la II Región?* Los autores, cuyo criterio personal ha sido ya develado, dejan la respuesta a libre interpretación.

## Referencias citadas

- BARON, A. M. & REINHARD, J., 1981 - Expedición arqueológica al volcán Licancabur. *Revista de la Corporación para el Desarrollo de la Ciencia*, No 1(4), Santiago.
- BORIC, R., DÍAZ, F. & MAKSAEV, V., 1990 - Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. *SERNAGEOMIN CHILE*, Boletín No 40.
- CALDERON, M., A., 1994 - *Relación entre las rocas volcánicas y el flujo y almacenamiento de agua subterránea, sector Vegas de Turi, II Región*, taller de título, convenio UCN-ORSTOM, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, UCN.
- COVARRUBIAS, A., POURRUT, P. & KÖHNENKAMP, J., 1994 - *Características y problemática hidrológica en los altos Andes septentrionales de Chile*, Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Santiago.
- GIGGENBACH, W., 1978 - The isotopic composition of waters from El Tatio geothermal field, Northern Chile, in: *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 979-988, Vol. 42.
- GONZÁLEZ, H., 1995 - *Hidrogeología de la cuenca superior del río Loa*. Informe de avance de tesis de grado, inédito.
- GROSJEAN, M. & NUÑEZ, L., 1994 - Lateglacial, Early and Middle Holocene environment, Human occupation and Resource use in the Atacama (Northern Chile). *Geoarchaeology: An Internat. Journal*, Vol. 9, No 4: 271-286.
- KÖHNENKAMP, G. J., 1993 - *Balance y caracterización de los recursos de agua superficiales de la cuenca del río Salado*. Memoria al título de ingeniero civil, convenio UCN-ORSTOM, Antofagasta.
- MAKSAEV, V., 1979 - *Las fases tectónicas Incaica y Quechua en la Cordillera de los Andes del Norte Grande de Chile*, Actas del Congreso Geológico Chileno, No 2, Vol. 1, Arica.
- MARKGRAF, V., 1989 - Paleoclimates in Central and South America since 18,000 B.P. Based on Pollen and Lake-level records. *Quaternary Science Reviews*, 8: 1-24.
- MESSERLI, B., GROSJEAN, M., BONANI, G., BURGI, A., GEYH, M., GRAF, K., RAMSEYER, K., ROMERO, H., SCHOTTERER, U., SCHREIER, H. & VUILLE, M., 1993 - Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18,000 years: a preliminar synthesis. *Mountain Research and Development*, Vol. 13, No 2: 117-127.
- ORTLIEB, L., 1994 - Evolución de la aridez en el desierto de Atacama durante el cuaternario: nuevas perspectivas. in: *7º Congreso Geológico Chileno, vol. I*: 351-355, Universidad de Concepción.
- POURRUT, P. & COVARRUBIAS, A., 1994 - High mountain basins in Northern Chile: water balance problems in volcanic complex. in: *Conference on Assessment of hydrological temporal variability and changes*: 129-140, Barcelona.