

Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: I. Vertientes y arroyos del batolito de Achala, provincia de Córdoba, Argentina

Andrea I. PASQUINI¹, Laura B. GROSSO², Arnaldo P. MANGAUD³
y Pedro J. DEPETRIS^{1,4}

¹ Centro de Investigaciones Geoquímicas y de Procesos de la Superficie (CIGeS), Universidad Nacional de Córdoba. Av. Velez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba. E-mail: apasquini@com.uncor.edu

² Cerro Vanguardia S.A. San Martín 1032, 9310 San Julián, Santa Cruz.

³ Centro de Investigaciones Entomológicas de Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarsfield 299, 5000 Córdoba.

⁴ CONICET.

RESUMEN. Se analiza la composición química de vertientes y arroyos de altura (>1100 m s.n.m.) sobre el batolito de Achala en las Sierras Pampeanas de Córdoba, donde la litología dominante es un monzogranito porfirico. El agua tiene una composición mayoritaria bicarbonatada/sódico-potásica a cálcica. La concentración de los elementos disueltos tiene un orden de magnitud entre 10^3 y 10^7 veces inferior a la corteza continental superior y al granito dominante. La concentración de los elementos químicos está vinculada con el grado de movilidad de los mismos bajo condiciones de meteorización incipiente. Los elementos más móviles (alcalinos y alcalinotérreos) presentan las concentraciones más elevadas en el agua y en la roca, mientras los más inmóviles (Al, Ga, Ti, Zr, Hf, Th y tierras raras) exhiben las más bajas. Ambos grupos de elementos están sujetos a un control litológico significativo. Los metales de transición, tienen solubilidades y concentraciones variables, sugiriendo la existencia de otros controles además del litológico. Los iones mayoritarios evidencian una dilución estival cercana al 60%, mientras que los elementos traza manifiestan un incremento de sus concentraciones por movilización durante el período estival. Las características geológicas de la región, junto con su condición climática semiárida, favorecen el predominio de un régimen de denudación "limitado por la meteorización", donde los procesos de erosión física predominan sobre la meteorización química. Bajo estas condiciones, las características geoquímicas del agua en la región, escasamente afectada por la actividad antrópica, ponen de manifiesto el control que ejercen la litología y el relieve sobre las mismas.

Palabras clave: Hidrogeoquímica, Ríos de montaña, Vertientes, Sierras Pampeanas, Tierras raras

ABSTRACT. *Geochemistry of mountain rivers in the Sierras Pampeanas: I. Springs and streams in the Achala batholith, Córdoba province, Argentina.* The chemical composition of mountainous (>1,100 m a.s.l.) springs and streams from the Achala batholith, in the Pampean Range of Córdoba, Argentina are analyzed; in this area, the most important lithology is porphyritic monzogranite. The dominant water composition is of the bicarbonate-type and varies from sodium-potassium dominance to calcium dominance. Dissolved element concentrations are 10^3 to 10^7 times lower than those of the mean upper continental crust and the dominant granitic country rock. The concentration of dissolved phases is linked to element mobility during initial weathering, the more mobile elements (alkaline and alkaline earths) exhibiting the highest concentrations in water and rocks, while the less mobile (Al, Ga, Ti, Zr, Hf, Th and rare earths) showing lower concentrations. Both groups of elements are subjected to a significant control exerted by the chemical nature of country rocks. Transition metals, with variable solubility and concentrations, are possibly subjected to other controls aside from the lithological one. Major ions show a summer time dilution (rainy season) close to 60%, whereas trace elements show a concentration increase due to mobilization during the rainy season. The geological characteristics of the region, along with a prevailing semiarid climate, favour the pre-eminence of a denudation regime known as "weathering-limited". In this regime, physical erosion overcomes chemical dissolution. Under such conditions, the aqueous geochemical characteristics, scarcely affected by man-made influences, reflect the control exerted by lithology and relief.

Key words: Hydrochemistry, Mountain rivers, Springs, Sierras Pampeanas, Rare-earth elements

Introducción

La composición química de las aguas continentales está controlada, directa o indirectamente, por diversos factores: la litología y el relieve de la cuenca de drenaje, las condiciones climáticas, los procesos biológicos y la actividad antrópica. En este sentido, las

vertientes, arroyos y ríos de montaña, en contacto con regolitos exiguos y suelos muy poco desarrollados, están más influenciados por las características químicas de las precipitaciones que los alimentan de lo que ocurre en otras cuencas, con mayor extensión y espesor de suelos.

La hidrología de las vertientes y arroyos montaño-

Los suelos están dominados por el escurrimiento superficial o subsuperficial (por ej. Finley *et al.* 1995), de manera que ellos también exhiben la impronta geoquímica de la disolución incipiente de los minerales que integran la litología dominante en la cuenca. Uno de los trabajos pioneros en esta temática ha sido el de Garrels y McKenzie (1967), quienes investigaron la composición química de las vertientes de la Sierra Nevada (EE.UU.) y señalaron la significación de los procesos de disolución de los silicatos.

En el ámbito de nuestro país, y particularmente en la provincia de Córdoba, se conocen escasos estudios orientados a caracterizar la hidroquímica de la región montañosa y/o analizar los procesos de meteorización química en esta región. Entre los realizados en las Sierras Pampeanas de Córdoba, pueden citarse los trabajos publicados por Nicolli y Baleani (1989), Gaiero *et al.* (1993), Gaiero (1998a y b) y Dargám *et al.* (1998).

En esta contribución se exponen los primeros resultados obtenidos en un estudio sobre las características hidroquímicas de vertientes y arroyos de alta montaña, en el batolito de Achala, Sierra Grande de Córdoba. La investigación, que abarca la totalidad de las Sierras Pampeanas y de la cual ésta es solamente una parte inicial, está dirigida a explorar la naturaleza de la señal geoquímica del agua y su relación con las variables geológicas y climáticas. En tal sentido las Sierras de Córdoba constituyen un escenario adecuado a los objetivos, dadas las características climáticas, litológicas y geomorfológicas que le son propias.

Características generales del área de estudio

La región estudiada está situada sobre el sector centro occidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba, entre los 64° 35' y 65° 00' O y los 31° 30' y 31° 45' S. Las vertientes y arroyos analizados se ubican sobre el batolito de Achala en la Sierra Grande y corresponden a las cabeceras de los arroyos La Suela y Mina Clavero. El primero es tributario del río Xanaes, cuya cuenca drena parte de la pendiente oriental de las sierras; el segundo pertenece a la cuenca del río Los Sauces desarrollada sobre la pendiente occidental.

Geológicamente la región está caracterizada por un basamento plutónico-metamórfico, cuya litología más conspicua en el área está representada por las rocas graníticas del batolito de Achala, emplazado en un complejo metamórfico constituido principalmente por metamorfitas de grano grueso (gneisses y migmatitas). La roca granítica aflorante en el área es el monzogranito porfírico de la facies B del batolito, definida por Lira y Kirschbaum (1990). Corresponde a un monzogranito subalcalino, de carácter peraluminoso. Su mineralogía principal está representada

por cuarzo, microclino, plagioclasa (An₂₋₂₂), biotita y muscovita; los minerales accesorios más abundantes son circón, magnetita-ilmenita, fluorapatita, rutilo, clorita, caolinita y minerales uraníferos como uraninita, pechblenda, autunita y uranofano. Los minerales de alteración más frecuentes son producto del reemplazo parcial de feldespato y biotita por muscovita y óxidos de hierro y titanio, y de la albitización de microclino y plagioclasa. Según Rapela (1982), estos granitoides presentan altos contenidos promedio de K₂O, elementos traza incompatibles y Nb, y bajos tenores de CaO, MgO y TiO₂. Demange *et al.* (1993) definen a estos granitos como serie Achala, señalando que corresponden a una línea magmática peraluminosa potásica rica en Rb, Sr, Th, U, Zr y F.

Las características climáticas más sobresalientes de la región son la irregular distribución de las precipitaciones y la ausencia de verano térmico. La temperatura media anual es de 10°C, con máximas de 14 a 20°C y mínimas de 5°C. La mínima absoluta desciende con frecuencia a -10°C, esto genera una importante amplitud térmica anual (Capitanelli 1979). La precipitación media anual en el área alcanza los 800 milímetros. Las lluvias están concentradas en una sola estación, el verano astronómico, en tanto que el período invernal es seco, no exento de algunas nevadas. Los datos pluviométricos de la última década, de las estaciones Copina y Las Ensenadas (cuenca del río de La Suela) y de las estaciones La Posta y Paraje Km 121 (cuenca del río Mina Clavero), indican que las máximas precipitaciones se han producido en los meses de diciembre y enero, con medias de aproximadamente 140 mm mensuales. En el período invernal, entre los meses de mayo y agosto, no superaron los 20 mm mensuales. Los valores más altos se registraron en la cuenca del río Mina Clavero, superando en el período estival del año 2000, los 240 mm mensuales.

Materiales y métodos

Las muestras de agua fueron tomadas durante dos campañas en los meses de abril y julio (1^{er} muestreo y 2^{do} muestreo respectivamente) del año 2000. Se recolectaron 6 muestras de vertientes y 5 de arroyos sobre roca granítica correspondientes a ambas cuencas, una muestra de vertiente sobre el gneis de caja del batolito en las cabeceras del arroyo La Suela y una muestra de una pequeña laguna ubicada sobre la divisoria de aguas, desarrollada sobre suelos incipientes. Temperatura del agua, pH, conductividad específica y alcalinidad (titulación con ácido sulfúrico 0,16N) fueron determinadas *in situ*. Las muestras fueron filtradas en campaña con filtros de celulosa de 0,22 y 0,45 µm de tamaño de poro. Cl⁻, SO₄²⁻ y nutrientes (N y P) fueron medidos en laboratorio por métodos volumétricos y espectrofotométricos estándares (Eaton *et al.* 1995). Los elementos mayoritarios y trazas fueron

determinados mediante plasma inductivamente acoplado - espectrometría de masa (ICP-MS). La especiación de las distintas formas de carbono inorgánico y los sólidos totales disueltos (STD) fueron calculados mediante el programa de modelado geoquímico AQUACHEM (Waterloo Hydrogeologic, Inc). La ubicación geográfica y características de los puntos de muestreo se presentan en el cuadro 1.

Resultados y discusión: hidrogeoquímica

La composición química del agua en relación con sus iones mayoritarios (Cuadro 2) fue determinada mediante la clasificación de Piper (1944). Las aguas analizadas tienen una composición catiónica sódico-potásica a cálcica. En la composición aniónica predomina siempre el HCO_3^- sobre el Cl^- y el SO_4^{2-} . El pH fluctúa entre 7,3 y 8,8, y los tenores de STD son bajos (entre 9 y 117 mg/l), como ocurre normalmente en aguas de estas características.

En terreno granítico, el pH medio de las vertientes (7,60) es inferior al pH medio de los arroyos (7,90). El modelado mediante AQUACHEM permitió apreciar que esto obedece a una mayor abundancia de CO_2 libre en las vertientes (9 mol%) respecto de los arroyos (4 mol%). La abundancia promedio de HCO_3^- y CO_3^{2-} en las vertientes es de 91 mol% y 0,16 mol% respectivamente, mientras en los arroyos estos valores crecen a 95,6 mol% y 0,4 mol%.

Con el fin de analizar la composición y distribución de elementos mayoritarios y traza en el agua, se realizó un ejercicio de normalización de los datos a los valores promedio para la corteza continental superior

consignados por Taylor y McLennan (1985). Esta práctica de normalización es una herramienta frecuentemente utilizada en petrología y sedimentología, pero ha sido escasamente empleada para la interpretación de datos químicos de elementos disueltos. La figura 1 muestra los diagramas normalizados a corteza continental superior de la composición química de vertientes y arroyos desarrollados sobre roca granítica, la vertiente sobre gneis y la composición promedio del monzogranito porfírico del Batolito de Achala (Rapela 1982; Piovano com. pers.). La roca granítica presenta un decrecimiento en relación con la corteza de elementos como Fe, Ca, Mg, Ba, Sr, Zn, Co, V, Y, Sc y un enriquecimiento en K, Rb, Pb, Cu, Th, Sb y Ga, mientras que los demás elementos muestran valores normalizados muy próximos a la corteza.

La abundancia de los elementos químicos en el agua es variable. Las concentraciones normalizadas de las vertientes y arroyos que discurren sobre granito tienen un orden de magnitud entre 10^3 y 10^7 veces inferior al valor promedio de la corteza continental superior y al de la roca granítica dominante. A partir del diagrama pueden distinguirse tres grupos de elementos: los que exhiben valores normalizados de magnitud superior a 10^{-4} , como el Ca, Na, Mg, Sr, Sc, As, Mo, Sb y Bi; los elementos que presentan las concentraciones normalizadas más bajas, como Al, Zr y Hf, con valores de magnitud inferior a 10^{-6} , y los demás elementos que exhiben valores normalizados comprendidos entre los dos intervalos anteriores. La vertiente sobre gneis presenta concentraciones más elevadas, tanto en algunos elementos aislados como Ca, Ba, Sr, Sb y Bi (Fig 1) como en la composición iónica mayoritaria, con excepción del SO_4^{2-} (Cuadro 2). Estas diferencias están

Cuadro 1: Ubicación geográfica de las muestras de agua de vertientes y arroyos del batolito de Achala.

Muestra	Latitud (S)	Longitud (O)	Altitud m s.n.m.	Cuenca	Observaciones
1 ^{er} muestreo					
SG1-L	31° 34' 19"	64° 39' 06"	1381	Río La Suela	Vertiente sobre granito
SG2-L	31° 42' 35"	64° 53' 52"	1615	Río Mina Clavero	Arroyo sobre granito
SG3-L	31° 41' 23"	64° 53' 50"	1692	Río Mina Clavero	Arroyo sobre granito
SG4-L	31° 40' 16"	64° 54' 01"	1818	Río Mina Clavero	Vertiente sobre granito
SG5-L	31° 37' 07"	64° 51' 43"	2039	Divisoria de aguas	Arroyo sobre granito
SG6-L	31° 37' 07"	64° 51' 43"	2093	Divisoria de aguas	Laguna sobre suelo
SG7-L	31° 35' 55"	64° 42' 50"	1813	Río La Suela	Arroyo sobre granito
SG8-L	31° 36' 46"	64° 40' 23"	1484	Río La Suela	Vertiente sobre granito
2 ^{do} muestreo					
SG2-L2	Idem SG2-L	Idem SG2-L	Idem SG2-L	Idem SG2-L	Idem SG2-L
SG7-L2	Idem SG7-L	Idem SG7-L	Idem SG7-L	Idem SG7-L	Idem SG7-L
SG9-L	31° 32' 21"	64° 40' 26"	1134	Río La Suela	Vertiente sobre gneis
SG10-L	31° 34' 32"	64° 39' 42"	1197	Río La Suela	Arroyo sobre granito
SG11-L	31° 36' 03"	64° 45' 09"	2114	Río La Suela	Vertiente sobre granito
SG12-L	31° 36' 35"	64° 40' 32"	1396	Río La Suela	Vertiente sobre granito

Cuadro 2: Composición química de vertientes y arroyos del batolito de Achala. Temp: temperatura, Conduc:conductividad, STD*: sólidos totales disueltos (calculados con AQUACHEM).

Muestra	Temp. °C	Conduc. uS/cm	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	STD* mg/l	P	NO ₃ ⁻ - N NO ₂ ⁻ - N NH ₃ - N		
													mg/l		
SG1-L	17,0	68,6	7,6	0,029	0,042	0,284	0,099	0,263	0,020	0,026	21,40	0,017	0,48	0,002	0,10
SG2-L	12,9	31,7	7,4	0,015	0,031	0,272	0,052	0,131	0,010	0,015	11,90	0,023	0,10	0,004	0,06
SG3-L	14,6	34,2	7,7	0,015	0,021	0,236	0,047	0,129	0,009	0,014	10,90	0,013	0,14	0,002	0,07
SG4-L	15,8	23,0	8,3	0,002	0,021	0,194	0,053	0,069	0,001	0,015	9,00	0,010	0,05	0,002	0,02
SG5-L	17,5	54,3	7,6	0,021	0,073	0,370	0,113	0,181	0,030	0,045	23,80	0,007	0,04	0,001	0,24
SG6-L	18,1	58,8	7,6	0,025	0,094	0,394	0,117	0,213	0,054	0,053	27,40	0,003	0,03	0,003	0,79
SG7-L	13,7	40,3	7,6	0,023	0,031	0,306	0,106	0,200	0,018	0,026	20,10	0,020	0,25	0,002	0,09
SG8-L	13,6	30,9	7,4	0,012	0,021	0,250	0,048	0,113	0,007	0,011	10,20	0,003	0,06	0,003	0,07
SG2-L2	9,9	38,1	7,7	0,018	0,016	0,298	0,051	0,155	0,006	0,013	11,20	0,033	0,06	0,003	0,01
SG7-L2	10,5	51,5	8,8	0,024	0,021	0,350	0,067	0,210	0,008	0,017	15,00	0,070	0,10	0,004	0,05
SG9-L	9,8	146,6	8,0	0,031	0,016	1,226	0,758	0,291	0,032	0,086	117,70	0,003	0,05	0,004	0,08
SG10-L	9,8	103,6	8,4	0,031	0,007	0,944	0,268	0,290	0,016	0,067	41,00	0,040	0,07	0,003	0,05
SG11-L	12,3	49,8	7,3	0,025	0,021	0,404	0,085	0,217	0,012	0,025	17,80	0,003	0,06	0,004	0,09
SG12-L	10,0	56,8	7,4	0,027	0,005	0,508	0,095	0,241	0,016	0,022	18,60	0,013	0,05	0,003	0,05

condicionadas por sus características mineralógicas (por ej., plagioclasas cálcicas en el gneis que justificarían la mayor abundancia de Ca y Sr).

La figura 2 muestra los valores normalizados de los elementos de tierras raras en el agua. Las concentraciones son extremadamente bajas, de un orden de magnitud aproximadamente entre 10^5 y 10^7 veces inferior a la corteza continental superior y al granito, como ocurre en todas las aguas naturales dada la naturaleza altamente insoluble de estos elementos (McLennan 1989). En el diagrama normalizado se advierte un leve incremento en las concentraciones de los elementos comprendidos entre el Sm y el Dy, que podría ser atribuido a procesos de adsorción actuando diferencialmente sobre las tierras raras livianas y pesadas. Por otra parte, todas las muestras exhiben una anomalía negativa de Ce, debida a que este elemento tiende a ser removido de la solución en forma de CeO₂ (Brookins 1989). La muestra correspondiente a la vertiente sobre gneis presenta una anomalía positiva de Eu, la que sin duda está controlada por la presencia de plagioclasa cálcica en esta roca.

Con especial atención se analizó la composición química del agua y su relación con la litología y el clima. La figura 3 expone la relación entre las concentraciones de los elementos químicos en la roca granítica y la concentración promedio de las vertientes y arroyos que discurren sobre granito, donde se han señalado diferentes grupos de elementos. Elementos alcalinos y alcalinotérreos (Na, Ca, Sr, Ba, Mg, K, Rb) presentan las concentraciones más elevadas en el agua y en la roca y manifiestan una correlación positiva significativa ($R^2 = 0,854$, $p < 0,001$). Las tierras ra-

ras también evidencian un estrecho control litológico a pesar de sus bajas concentraciones ($R^2 = 0,958$, $p < 0,001$). No es el caso de los metales de transición (por ej. Fe, Ti, Mn, Zn, Cu, Pb, Co), cuya baja correlación ($R^2 = 0,244$, $p > 0,05$) sugiere otros controles además del litológico.

Del análisis de la figura 3 se desprende que la concentración de los diferentes elementos químicos en el agua estudiada está vinculada con el grado de movilidad de los mismos bajo condiciones de meteorización incipiente. Es bien conocido que los elementos alcalinos y alcalinotérreos son los más móviles en dichas condiciones, aunque aquellos de mayor potencial iónico (el cociente entre la carga del catión y su radio), son retenidos con más facilidad en los sitios de intercambio de las arcillas (Taylor y McLennan 1985). Por otra parte, los elementos Al, Ga, Ti, Zr, Hf, Th y tierras raras son los más inmóviles en estas condiciones y presentan las concentraciones más bajas en el agua. Los demás metales de transición, si bien son relativamente inmóviles, exhiben un comportamiento más errático reflejado en la amplia variabilidad de las concentraciones (Fig 3).

Es posible analizar la influencia de la distribución anual de las precipitaciones sobre la hidroquímica al vincular la composición promedio del agua en el período de mayores precipitaciones y en el período seco (Fig 4a y b). La figura 4a revela el control climático sobre la composición de los iones mayoritarios, mostrando un efecto de concentración invernal (la recta de regresión se encuentra por encima de la recta $y = x$, de concentraciones estacionalmente invariables). La pendiente de la ecuación de regresión sugiere que el

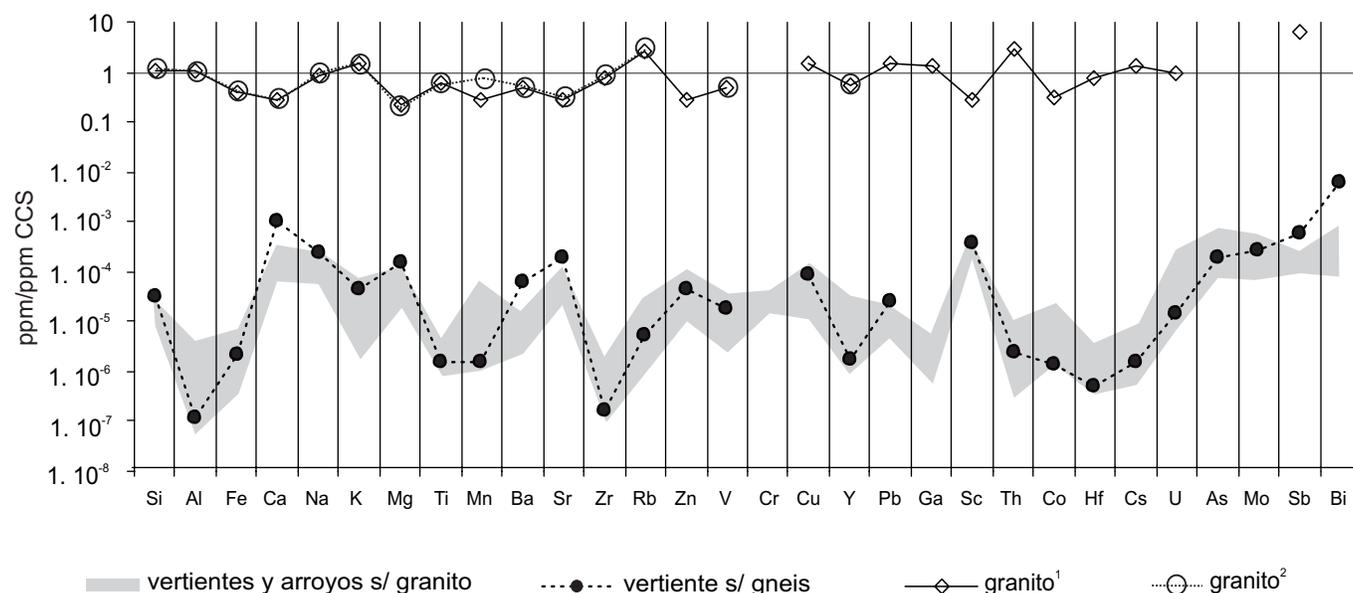


Figura 1: Composición química de vertientes y arroyos del batolito de Achala normalizada a la corteza continental superior (CCS). Se incluye el monzogranito porfírico del batolito de Achala (granito¹: Piovano com.pers. granito²: Rapela 1982).

efecto de dilución estival es próximo al 60%. Por otra parte, el valor medio de Mg^{2+} permanece invariable, mientras el SO_4^{2-} y el K^+ son los únicos iones cuya concentración es más alta durante el verano, posiblemente como resultado de un aporte pluvial dominante en el caso del SO_4^{2-} y debido a procesos de adsorción que en el caso del K^+ se ven favorecidos por su mayor radio iónico.

El efecto de dilución estival es mucho menos marcado en los metales de transición y tierras raras. La figura 4b muestra que estos elementos, al contrario de lo que ocurre con los mayoritarios, se encuentran en concentraciones más altas durante la época lluviosa (la mayoría de los puntos se ubican por debajo de la recta $y = x$), posiblemente por una movilización en los suelos y regolitos inducida por las precipitaciones.

El cuadro 2 también exhibe las concentraciones de fósforo y nitrógeno de nitrato, nitrito y amoníaco en las vertientes y arroyos analizados. Debido a la escasa actividad antrópica, resulta evidente que el nitrógeno tiene, en esta región, tres orígenes posibles: es el resultado de la fijación en leguminosas, es suministrado por las precipitaciones atmosféricas o por los residuos del ganado. Cabido (1985) y Cabido y Acosta (1985), en un extenso relevamiento fitogeográfico de la región, encontraron un escaso número de especies de leguminosas, las más importantes son: *Trifolium amabile*, *Cassia hookeriana* y especies de los géneros *Adesmia*, *Astragalus* y *Vicia*. Estas especies son poco abundantes y en ningún caso superan el 5% de cobertura vegetal. Por esta razón se descartaría como factor importante el aporte de nitrógeno por fijación de bacterias.

La respiración bacteriana y la descomposición de la

materia orgánica generan NO_3^- , además de agua, CO_2 , fósforo orgánicamente combinado y protones. Algunas bacterias reducen nitrato a nitrito y otras, a NH_3 , que en agua se transforma en NH_4^+ y OH^- . El NH_3 también es generado por la descomposición de los aminoácidos proteicos (Drever 1997). En los ambientes investigados, las concentraciones de NH_3-N son generalmente bajas y aquellas que resultaran significati-

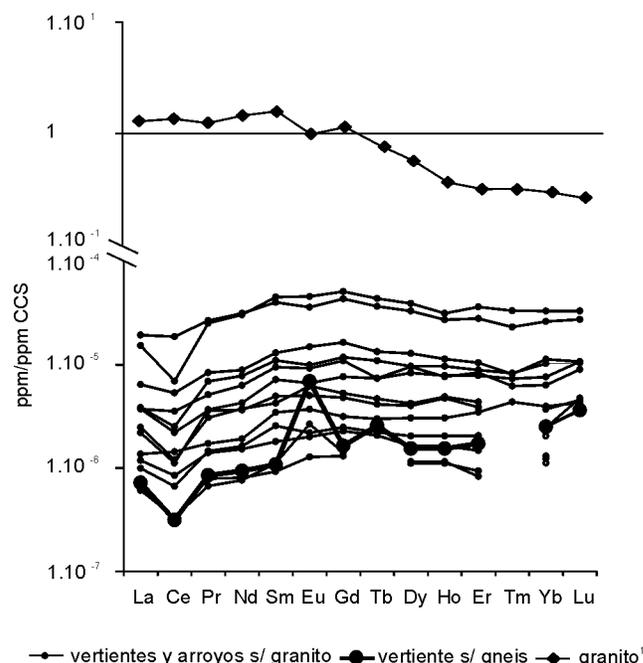


Figura 2: Elementos de tierras raras en las vertientes y arroyos del batolito de Achala normalizados a corteza continental superior (CCS). Granito: Piovano com. pers.

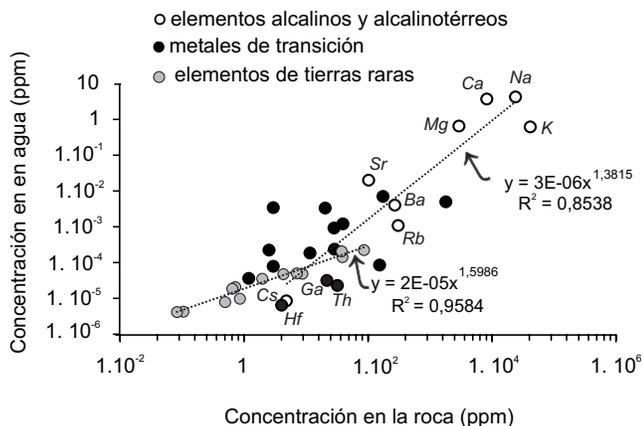


Figura 3: Composición química del granito¹ vs. el promedio composicional del agua de vertientes y arroyos que escurren sobre esta litología. Las regresiones son significativas ($p < 0,001$). Granito: Piovano com. pers.

vas (muestras SG5-L y SG6-L, cuadro 2) están asociadas a aportes directos de suelos. En general, los arroyos tienen una mayor abundancia relativa de $\text{NO}_3\text{-N}$ que las vertientes y en éstas se observa una mayor abundancia de $\text{NH}_3\text{-N}$ que en los arroyos. Es frecuente observar la dominancia del NH_4^+ en las cabeceras de los arroyos o ríos pequeños y su progresiva nitrificación aguas abajo (Stumm y Morgan 1996).

El nitrógeno y el fósforo son nutrientes biogeoquímicos importantes. En el caso de las vertientes y arroyos estudiados, sus concentraciones no parecen estar controladas por un factor común, ya que las correlaciones entre ellos nunca alcanzan un nivel de significación estadística (por ej. NO_2^- vs. NO_3^- , $r = -0,15$; NO_2^- vs. NH_3 , $r = 0,21$, $p > 0,05$). Es posible que las concentraciones estén controladas por una dinámica diferente en las vertientes y en los arroyos.

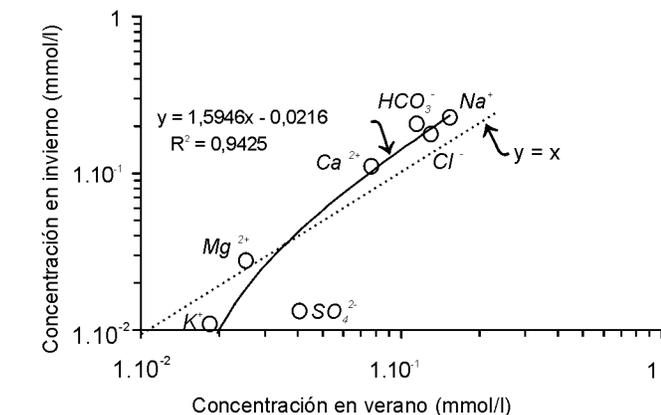
El control estacional es opuesto al que se evidencia para los componentes inorgánicos mayoritarios (Fig.

4a). La figura 5 vincula las concentraciones estacionales de nutrientes para las muestras SG2-L, SG7-L, SG2-L2 y SG7-L2; se observa que las concentraciones más altas para el nitrógeno se alcanzan en la época de mayores precipitaciones, posiblemente por los aportes pluviales y por la movilización de residuos mineralizados. El fósforo, por el contrario, está más concentrado en invierno y experimenta una dilución estival.

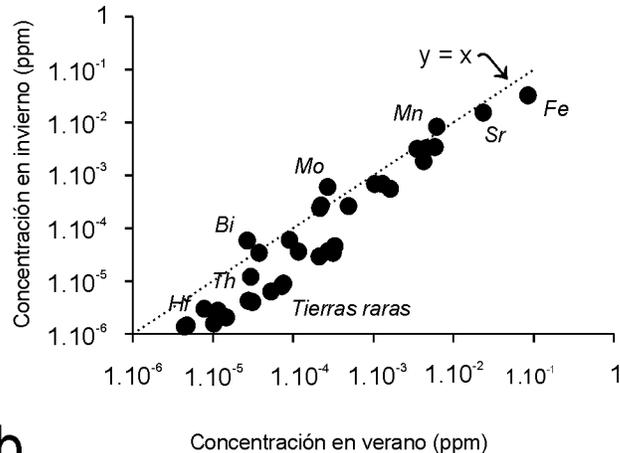
Conclusiones

La región estudiada se caracteriza por exhibir un régimen de denudación que corresponde al tipificado como “limitado por la meteorización” (o *weathering-limited*) por Stallard y Edmond (1981). En estos regímenes, los procesos de transporte que movilizan físicamente el material son potencialmente más rápidos que los procesos químicos o físicos que los generan. Los productos de la meteorización – fundamentalmente a partir de la hidrólisis de los silicatos - son incompletamente lixiviados y el detrito residual es rico en fases inestables. Consecuentemente, las características geológicas y geomorfológicas de la región estudiada, junto con su condición climática semiárida, son propicias para el desarrollo de este régimen de erosión, donde la composición mayoritaria del agua caracterizada por $\text{Na}^+ > \text{K}^+$ y $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$, es un rasgo típico. Los tenores de STD son bajos (9 – 118 mg/l) y las aguas son bicarbonatadas como resultado de la hidrólisis de los silicatos.

La diagramación de los datos normalizados a la corteza continental superior permite apreciar el ordenamiento según la movilidad relativa de los elementos: aquellos que tienen abundancia normalizada superior a 10^{-4} (elementos solubles) en un extremo, y los inmó-



a



b

Figura 4: a, Influencia estacional sobre la concentración de los iones mayoritarios disueltos. La regresión es significativa ($p < 0,001$). b, Idem para los elementos de transición y tierras raras. Se identifican algunos elementos como ejemplo. La recta $y = x$ (de concentraciones invariables) se incluye como referencia.

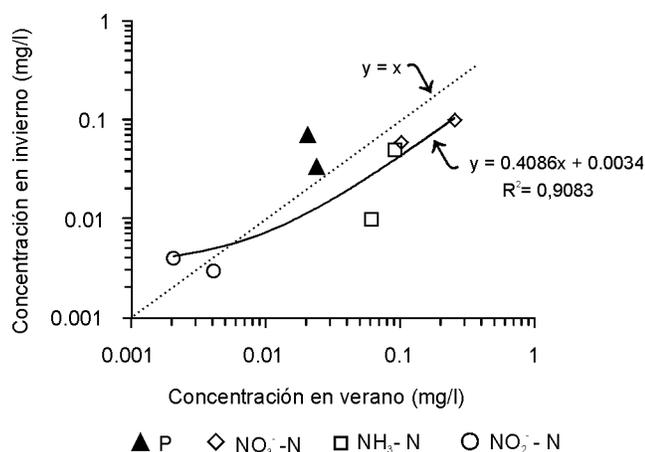


Figura 5: Variación estacional de los nutrientes disueltos (muestras SG2-L, SG7-L, SG2-L2 y SG7-L2). La recta significativa de regresión ($p < 0,005$) corresponde a las distintas formas del nitrógeno.

viles, esencialmente insolubles, con abundancias relativas del orden de 10^{-6} , como el Al, el Hf y el Zr, en el otro. Las tierras raras, por su parte, exhiben una muy baja abundancia normalizada y un diseño que difiere del presentado por la roca dominante, con predominio de los elementos intermedios (Sm-Dy).

Los metales más abundantes y solubles (alcalinos y alcalinotérreos) y las tierras raras (los elementos más insolubles) exhiben un claro control litológico, mientras que aquellos con abundancias intermedias parecen estar sujetos a otros mecanismos fisicoquímicos de control (por ej., adsorción, complejamiento).

Finalmente, el muestreo estacional ha facilitado la apreciación de la influencia de las precipitaciones como elemento de control de las concentraciones. El análisis efectuado ha permitido apreciar que la dilución llega a casi un 60% en la época estival para los elementos mayoritarios. Los elementos minoritarios y traza, por el contrario, experimentan una movilización que incrementa las concentraciones durante el período estival. En lo referido a los nutrientes, por su parte, las especies iónicas del nitrógeno son más abundantes en el verano, posiblemente por la movilización de residuos mineralizados o por aportes pluviales directos.

Agradecimientos

Los datos climáticos (precipitaciones) fueron suministrados por el Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida (CIHRSA). Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto "Factores que controlan la geoquímica de las aguas en las Sierras Pampeanas" de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba y del PIP 4829/96 del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Brookin, D.G., 1989. Aqueous geochemistry of rare earth elements. En Lipin, B.R. and McKay, G. A. (Eds.): Geochemistry and Mineralogy of rare earth elements, p. 201-225. Mineralogical Society of America, Washington, D.C.
- Cabido, M., 1985. Las comunidades vegetales de la pampa de Achala, Sierras de Córdoba, Argentina. Documents Phytosociologiques, 9: 431-443.
- Cabido, M. y Acosta, A., 1985. Estudio fitosociológico en bosques de *Polyleptis australis* Bitt. («tabaquillo») en las Sierras de Córdoba, Argentina. Documents Phytosociologiques, 9: 385-400.
- Capitanelli, R.G., 1979. Clima. En: Vásquez, J.B., Miatello, R.A. y Roqué, M.E. (Eds.): Geografía Física de Córdoba, p. 45-138, Ed. Boldt, Córdoba.
- Dargám, R. M., Herrero, S. A. y Pasquini, A. I., 1998. Procesos de meteorización química en una cuenca semiárida de montaña, Río Salsipuedes, Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 53 (4): 517-525.
- Demange, M., Alvarez, J., López, L. y Zarco, J. 1993. Existencia de series magmáticas diferentes en el Batolito de Achala, Córdoba. Actas 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 1: 23-29, Mendoza.
- Drever, J. I., 1997. The Geochemistry of Natural Waters. Surface and Groundwater Environments, 3° Edición, Prentice Hall, 436 p., New Jersey.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S. and Greenberg, A. E. (Eds.), 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. A.P.H.A./A.W.W.A./W.E.F., 1108 p., Washington D.C.
- Finley, J. B., Drever, J. I. and Turk, J.T., 1995. Sulfur isotope dynamics in a high-elevation catchment, West Glacier Lake, Wyoming. Water, Air, and Soil Pollution, 79:227-241.
- Gaiero, D. M., 1998a. Hidrogeoquímica de un sistema de la región semiárida: El río Suquia, Córdoba. 1. Fuentes de iones mayoritarios. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 53 (2): 167-186.
- Gaiero, D. M., 1998b. Hidrogeoquímica de un sistema de la región semiárida: El río Suquia, Córdoba. 2. Transporte de sólidos disueltos, meteorización y consumo de CO_2 . Revista de la Asociación Geológica Argentina, 53 (3):337-347.
- Gaiero, D. M., Dargám, R. M., Martínez, J. O., Piovano, E. L. y Depetris, P. J., 1993. Precipitación de carbonatos en una cuenca semiárida: El Río Los Tártagos, Córdoba, Argentina. Actas 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 6: 130-136. Mendoza.
- Garrels, R. M. and Mackenzie, F. T., 1967. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. Equilibrium Concepts in the Natural Waters Systems. American Chemical Society, Advance in Chemical Series, 67 : 222-242.
- Lira, R. and Kirschbaum, A. M., 1990. Geochemical evolution of granites from Achala batholith of the Sierras Pampeanas, Argentina. Geological Society of America, Special Paper 241: 67-75.
- McLennan, S. M., 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. En: B.P. Lipin and G.A. McKay (Eds.), Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements, Mineralogical Society of America: 169-200. Washington, D.C.
- Nicolli, H. B. and Baleani, A., 1989. Hydrochemical Investigations in Hard Rocks Areas of Sierras Pampeanas of Córdoba, Argentina. Actas 28° International Geological Congress, 2: 514, Washington D.C.
- Piper, A. M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. American Geophysical Union Transactions, 25: 914-923.

- Rapela, C. W., 1982. Aspectos geoquímicos y petrológicos del Batolito de Achala, Pcia. de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37(3): 314-330.
- Stallard, R. F. and Edmond, J. M., 1981. Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. *Journal of Geophysical Research*, 86 (10): 9844-9858.
- Stumm, W. and Morgan, J. J., 1996. *Aquatic Chemistry. Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, 3ª edición, John Wiley and Sons, 1022 p., Nueva York.

- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications, 312 p., Londres.

Recibido: 11 de junio, 2001

Aceptado: 10 de diciembre, 2002