



Relaciones Geoquímicas entre Rocas Ígneas, Suelos, Sedimentos y Relaves en la Zona Centro-Norte de Chile.

Jorge Oyarzún¹, Roberto Oyarzun^{2,3}, Javier Lillo^{4,3,5}, Pablo Higuera^{6,3}, Hugo Maturana¹ & Ricardo Oyarzún^{1,7}

¹Departamento Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena, Chile. joyarzun@userena.cl; hmaturan@userena.cl; royarzun@userena.cl

²Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain. oyarzun@geo.ucm.es

³Instituto de Geología Aplicada, E.I.M.I. Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, 13400 Almadén, (Ciudad Real), Spain. javier.lillo@urjc.es

⁴Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n, 28933 Móstoles Madrid, Spain. e-mail.

⁵IMDEA Agua, C/ Punto Net 4, 28805 Alcalá de Henares, Spain

⁶Departamento de Ingeniería Geológica y Minera de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, 13400 Almadén, Spain. pablo.higuera@uclm.es

⁷Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Benavente 980, La Serena, Chile

Resumen. Este estudio reúne y compara análisis químicos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, sin y con alteración hidrotermal, suelos, sedimentos activos y relaves de explotaciones cupríferas entre las latitudes 25°30'S a 35°00'S. Los resultados fueron tratados estadísticamente, tabulados, comparados con promedios mundiales de referencia y representados en diagramas. También se estudió el efecto composicional de los procesos hidrotermales, de la formación de suelos, de la erosión fluvial y de su conversión en relaves. Lo anterior, bajo las condiciones áridas a semi áridas que han prevalecido en la faja desde el Mesozoico. El estudio separó los elementos en cuatro grupos, conforme a sus afinidades y conducta geoquímica. Entre sus principales

conclusiones están: 1- El bajo contenido de Mg, Cr y Ni de los granitoides, la similitud de los contenidos Ba, La, Ce y Al de ambos grupos y su enriquecimiento en K, Sr y P respecto al promedio cortical, así como el enriquecimiento especial de V en las andesitas respecto al mismo promedio. 2-La consistencia del comportamiento de los elementos durante su transporte respecto a su potencial iónico y sus positivas implicaciones ambientales.

Palabras Claves: *geochemical anomalies, elements mobility, northern central Chile; arid basins; environmental assessment*

Introducción

El presente estudio describe, compara e interpreta la composición química de rocas ígneas no alteradas y alteradas hidrotermalmente, así como de suelos formados sobre ellas, de sedimentos producto de su meteorización y erosión y de relaves depositados en quebradas por las operaciones de la pequeña minería. La información analizada está publicada en distintos artículos en los que participó el primer autor y corresponde a estudios realizados en la faja del territorio chileno comprendida entre las latitudes 30°S y 34°S. La factibilidad de la comparación propuesta se basa en criterios analíticos y geológicos. Al respecto, excepto el estudio de los granitoides de la faja 33°-34°S (López-Escobar et al, 1979), todos los análisis utilizaron la metodología ICP, y como el recién citado, se realizaron en laboratorios de prestigio y sometidos a comprobación de calidad. El otro criterio considerado es la uniformidad geológica, geomorfológica y climática de los sitios muestreados, producto de los factores que se exponen a continuación. En primer término la geología del

territorio chileno se caracteriza por la uniformidad de los procesos tectónicos y magmáticos que lo configuraron desde el Paleozoico superior. Ello es producto de su posición en el borde del cratón sudamericano, enfrentado a la convergencia y subsidencia de placas oceánicas procedentes de la cuenca Pacífica (Charrier et al, 2007). Como consecuencia se ha registrado la generación de sucesivos pulsos magmáticos calcoalcalinos así como episodios compresivos y descompresivos ligados a la aceleración o desaceleración de la velocidad de convergencia. La composición de los cuerpos plutónicos resultantes se ha situado en torno a las granodioritas y dioritas, mientras la de las rocas volcánicas y piroclásticas lo ha hecho en torno a las andesitas y andesitas basálticas (Parada et al, 2007). Los procesos hidrotermales asociados a este magmatismo han alterado la mineralogía de las rocas y depositado una abundante pero poco variada mineralización sulfurada y oxidada en la que predominan Cu, Mo, Au, Fe, Mn y As (Maksae et al, 2007). En cambio, las rocas de la faja exhiben escasa meteorización, debido tanto a su rápida erosión y enterramiento en cuecas longitudinales N-S de rápida subsidencia, como a la aridez del clima dominante al

menos desde el Mesozoico (Clarke, 2006), condición que se explica por su desplazamiento del continente hacia el oeste paralelo al Ecuador, lo que no implica cambios latitudinales. Los factores señalados se expresan en una relativa uniformidad composicional, que facilita la evaluación del efecto de procesos como la alteración hidrotermal, la formación de suelos, el drenaje ácido y el transporte fluvial sobre la composición química de las rocas y demás materiales geológicos y relaves objeto del presente estudio.

Materiales y Métodos

El estudio realizado comprendió cuatro grupos de resultados analíticos correspondientes a: 1) Granitoides de Chile central, latitudes 33° a 34°S (López-Escobar et al, 1979); 2) Lavas Mesozoicas de Chile Central, latitudes 25° 30' a 35° S (Oyarzún et al, 1993); 3) Granitoides, lavas y suelos del Distrito de Cu-Au-Hg de Punitaqui, 30° 50' a 30° 54' S y 71° 14' W (Oyarzún et al, 2001; Cucurella et al, 2005); Sedimentos fluviales y relaves de la cuenca del Río Elqui, 29°45' a 30° 15' S (Oyarzún et al, 2004; Oyarzún et al, 2012). Excepto por el estudio de López-Escobar que utilizó métodos analíticos clásicos combinados con fluorescencia de rayos X, absorción atómica y activación neutrónica, la metodología básica utilizada fue ICP. En total se determinaron 32 elementos, aunque no todos los grupos incluyen su totalidad (Tablas 1 y 2). Los resultados fueron procesados por estadística clásica y comparados con las cifras propuestas para la corteza continental (Lof, 1987) y con los promedios calculados por Turekian y Wedepohl (1961) para las rocas granitoides cálcicos y los basaltos. También se consideró con fines referenciales la información entregada por los estudios de Bissig et al (2003) y de Morata y Aguirre (2003) para rocas volcánicas de la parte superior y media de la cuenca del Río Elqui respectivamente. Con el objeto de expresar el efecto de la meteorización, de la erosión y transporte, y del procesamiento metalúrgico en la composición de suelos, sedimentos finos y relaves, se utilizó un índice de empobrecimiento/enriquecimiento (DEi) respecto a la composición estimada para las rocas parentales. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1 y la Figura 1

La interpretación de los resultados se basó en los conceptos geoquímicos clásicos. Así, para la composición de las rocas se consideraron los aspectos cristalóquímicos de cada elemento, así como su afinidad geoquímica, sus relaciones de abundancia respecto a los distintos tipos de magmas y su conducta durante la cristalización fraccionada de éstos. Con tal fin los elementos fueron separados en cuatro grupos relacionados con su posición en la Tabla Periódica, a

saber: 1) Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba 2) Sc, Y, La, Ce, Sm, Yb, U, Al, P 3) Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni 4) Mo, Cu, Zn, Pb, As. En cuanto a su conducta en el ciclo exógeno se consideraron sus potenciales iónicos, así como sus productos de solubilidad respecto a los aniones principales sulfato y carbonato y su tendencia a ser adsorbidos por óxidos coloidales de Fe y Mn, así como por minerales arcillosos.

Discusión y Conclusiones

Los distintos estudios considerados en el presente trabajo se basan, cada uno de ellos, en conjuntos de análisis del orden de las decenas de muestras analizadas. Ello limita su tratamiento estadístico, factor que ha sido tomado en cuenta al excluir los análisis multivariados y al privilegiar la mediana (por su mayor "robustez") sobre la media para fines comparativos. Por otra parte, las conclusiones obtenidas han sido contrastadas con su consistencia respecto a las propiedades geoquímicas de los elementos analizados. Entre ellas se destacan las siguientes:

1-Respecto a los granitoides cálcicos, las rocas graníticas de Chile central presentan contenidos similares de Na, K, Mg, Ca, Sr, Sc, U, Al, P, Ti, V, Cr, Fe, Co y Ni. Tienen menos Ba, La, Ce, Sm e Yb, pero más Mn. Con relación al promedio de la corteza continental, son similares sus contenidos de Ba, La, Ce, Sm, Yb, Al, P y Mn. Están empobrecidas en Mg, Ca, Sc, U, Ti, V, Cr, Fe, Co y Ni y enriquecidas en Na, K y Sr

2- Con relación a los basaltos de referencia, las andesitas de Chile central muestran contenidos similares de La, Ce, Sm, Yb, P, V, Mn y Co. Tienen menos Mg, Ca, Sr, Ti, Cr, Fe, Ni, Cr Fe y Ni, siendo el empobrecimiento en Cr y Ni especialmente notable. Están enriquecidas en Na, K, Ba, Y, Yb y Al. En comparación con la corteza continental, las andesitas presentan cifras similares de Na, Sr, Ba, La, Ce, Al y Ti. Están empobrecidas en Mg e Yb y en especial en Cr y Ni. En cambio son más ricas en K, Ca, Y, Yb, P, V, Mn, Fe y Co.

3-Las andesitas con alteración hidrotermal de tipo Na-Ca y potásica de Punitaqui presentan contenidos similares a las de Chile central en La, Ce, Sm, Al, Ti y V. Están empobrecidas en Yb, Cr, Fe y Co, y enriquecidas en Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba, Y, P, Mn y Ni.

4-Los suelos de Punitaqui presentan escaso empobrecimiento respecto a sus materiales parentales. En cambio, están enriquecidos en Cr, Fe, Co, Cu, Pb y Zn, y muy enriquecidos en Cd, Hg y Sb.

5-Se constató una notable similitud entre la composición de los sedimentos finos de las quebradas secas muestreadas y la de los relaves abandonados en las mismas quebradas. Ello se explica tanto por el efecto de los episodios aluvionales que han tendido a mezclar estos materiales, así como por la similar litología de las rocas de las cuales ambos se derivan.

6-Los sedimentos finos “activos” del Río Elqui presentan empobrecimiento fuerte en Na y K, moderado en Al y Sr y leve en Fe, Mn y Co. En cambio muestran un elevado contenido de Cu (sobre 0.1%) y contenidos de Zn y de As de unas 400 y 100 ppm respectivamente. Ello se explica por la transferencia de Cu^{2+} y del Zn^{2+} del drenaje ácido procedente del Distrito El Indio (Au-Cu-As) a dichos sedimentos, al subir el pH del agua por su mezcla con aguas moderadamente alcalinas de afluentes no contaminados. En el caso del As, el pH actúa a través de la hidrólisis del Fe^{3+} que adsorbe e incorpora el As a los sedimentos finos.

7-Se constata una buena consistencia general entre la conducta de los distintos elementos en suelos, sedimentos y relaves con las predicciones teóricas basadas en sus potenciales iónicos y productos de solubilidad respecto a los iones carbonato y sulfato.

Referencias

- Bissig, T., Clark, A.H., Lee, J.K.W. & von Quadt, A. 2003. Petrogenetic and metallogenetic responses to Miocene slab flattening: new constraints from the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile/Argentina. *Mineralium Deposita* (Supplementary Material ESM1.pdf), 38,844–862.
- Clarke, J.D.A. 2006. Antiquity of aridity in the Chilean Atacama desert. *Geomorphology*, 73, 101–114.
- Cucurella, J., Oyarzún, J. & Pavicic, S. 2005. Hallazgo de albitas negras en andesitas basálticas porfíricas del distrito minero de Au-Cu-Hg de Punitaqui, Coquimbo, Chile. *Boletín Geológico y Minero*, 116,149–154.
- Lof, P. 1987. Elsevier's Periodic Table of the Elements. Elsevier Publishers, The Netherlands
- López-Escobar, L., Frey, F.A. & Oyarzún, J. 1979. Geochemical characteristics of central Chile (33°-34° S) granitoids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70,439–450.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. & Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. In: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.). *The Geology of Chile*. Geological Society, London, p. 179–199.
- Morata, D. & Aguirre, L. 2003. Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20'-30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Science*, 16,459–476.
- Oyarzún, J., Levi, B. & Nystrom, J.O. 1993. A within-plate geochemical signature and continental margin setting for the Mesozoic-Cenozoic lavas of central Chile. *Second ISAG*, Oxford (UK), 419-422; Available at http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/_pleins_textes_6/colloques2/38461.pdf. Accessed December, 2013
- Oyarzún, J., Oyarzun, R. & Pavicic, S. 2001. Estudio prospectivo en un distrito de Cu-Au-Hg asociado a zona de cizalla: Punitaqui, Chile. *Boletín Geológico y Minero*, 112,75–84.
- Oyarzún, J., Castillo, D., Maturana, H., Kretschmer, N., Soto, G., Amezaga, J., Rötting, T.S., Younger, P.L. & Oyarzún, R. 2012. Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 115,47–58.
- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J. & Maturana, H. 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: Industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 84,53–64.
- Turekian, K.K. & Wedepohl, K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 175–192.

Tabla 1. Resumen estadístico de las concentraciones de elementos en los cuatro grupos litológicos comparados

	Set 1										Set 2										Set 3										Set 4	
	Na	K	Mg	Ca	Sr	Ba	Se	Y	La	Ce	Sm	Yb	U	Al	P	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn								
	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm								
Granitoides Chile Central	3.12	1.97	0.89	2.68	455	487	13.3	na	19.0	38.2	3.8	2.0	2.5	8.59	900	0.39	82	19	748	3.37	10	11	36	58								
Median	2.95	2.28	0.72	2.26	465	500	12.0		18.0	41.0	3.7	2.2	2.0	8.59	900	0.39	85	18	800	3.57	10	10	22	60								
Std. Dev.	0.55	0.75	0.39	1.17	134	193	6.6		5.1	8.6	0.7	0.7	1.5	0.60	200	0.10	36	8	235	1.00	4	4	45	15								
Andesitas Chile Central	2.42	1.91	2.13	5.19	402	435	na	31.4	18.6	46.5	6.1	2.9	na	9.00	1320	0.69	222	49	1510	6.39	34	30	86	114								
Median	2.33	1.91	2.02	5.29	371	416		28.0	18.0	45.0	6.0	3.0		8.97	1230	0.61	224	37	1460	6.48	34	27	51	80								
Std. Dev.	0.46	0.29	0.58	0.73	120	145		13.5	6.5	15.4	2.2	1.1		0.55	967	0.21	56	40	551	0.93	18	14	100	89								
Granitoides Punitaqui	3.69	1.72	1.52	4.70	379	448	20.3	29.6	18.7	38.8	4.5	0.8	2.4	8.81	1400	0.42	175	18	730	4.63	12	38	292	29								
Median	3.48	1.69	1.67	5.11	457	388	18.5	28.0	20.5	38.5	4.3	0.8	1.9	8.96	1100	0.47	175	20	800	4.67	14	33	100	30								
Std. Dev.	0.96	0.70	0.87	1.49	199	313	8.7	14.0	8.4	19.7	2.4	0.3	1.4	0.77	700	0.19	80	11	408	1.98	6	21	417	19								
Andesitas Punitaqui	2.86	2.42	2.74	6.55	486	1347	24.7	30.3	17.3	34.5	4.6	0.7	1.0	9.53	1600	0.56	256	26	1600	5.43	17	54	58	98								
Median	2.83	2.62	2.23	5.80	477	600	24.0	36.5	18.5	39.0	5.0	0.8	0.8	9.34	1800	0.53	244	22	1600	5.92	16	47	27	61								
Std. Dev.	0.75	2.03	1.82	4.33	159	1530	4.7	14.3	6.9	13.4	1.5	0.3	0.9	0.46	800	0.07	56	16	1159	2.20	10	34	60	100								
High-Ca Acid Rocks	2.84	2.52	0.94	2.53	440	420	14.0	35.0	45.0	81.0	8.8	3.5	3.0	8.20	920	0.34	88	22	540	2.96	7	15	30	60								
Basaltic Rocks	1.80	0.83	4.60	7.60	465	330	30.0	21.0	15.0	48.0	5.3	2.1	1.0	7.80	1100	1.38	250	170	1500	8.65	48	130	87	105								
Continental Crust	2.27	1.50	2.80	4.55	320	456	21.9	19.0	20.0	43.0	3.9	1.9	1.3	8.43	800	0.72	138	135	800	5.23	27	59	27	72								

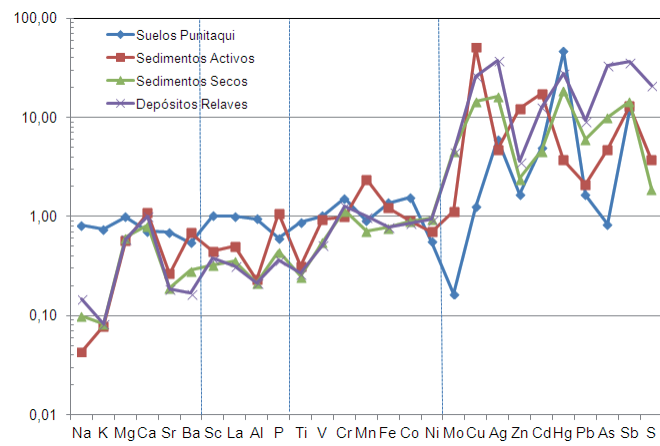


Figura 1. Índices de empobrecimiento/enriquecimiento de elementos químicos en suelos, sedimentos y relaves respecto a sus materiales parentales