

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE COBRE EN LA FRACCIÓN FINA DE SEDIMENTOS FLUVIALES DE LA CUENCA DE SANTIAGO, CHILE CENTRAL

José Luis Antinao\*, Sara Elgueta, Jaime Martínez

Departamento de Geología, Universidad de Chile

Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

### RESUMEN

Se analizaron 114 muestras de sedimentos fluviales de los ríos que drenan la Cuenca de Santiago, para determinar el contenido de Cu en la fracción granulométrica menor a 37 micrones y determinar la distribución espacial del metal en la región. Se concluyó que el contenido de Cu obedece fundamentalmente a factores naturales, que dependen de las rocas que componen el sustrato de la cuenca. Se estableció un valor de línea base de 129 ppm, que comparado con promedios globales para la corteza presenta un enriquecimiento del metal.

Se identificaron zonas anómalas naturales y antrópicas. Dentro de las zonas con anomalías de origen natural, se destacan las causadas probablemente por mineralización metálica en Tiltill (estero Lampa) y Río San Francisco.

Asimismo, como zona de impacto antrópico se destaca la ubicada al SW de la cuenca, cerca de Peñaflores y El Monte. Se discuten las fuentes para la contaminación en esta área. Las principales fuentes posibles son: (1) captura de agroquímicos ricos en Cu por los sedimentos; (2) cambios en ambiente químico debido al ingreso al sistema superficial de aguas subterráneas contaminadas; y (3) cambios en la sorción sobre las partículas debida a material orgánico presente en gran parte en los sedimentos del cauce inferior del Río Mapocho.

A pesar de que se detecta una intervención antrópica en los contenidos de Cu en el sector central de la cuenca, dentro de la ciudad de Santiago, no es de magnitud notable.

### ABSTRACT

The grain-size fraction less than 37 microns of 114 samples of fluvial sediments collected from rivers that drain the Santiago basin, central Chile, were analysed to assess their Copper (Cu) content and to determine its spatial distribution. It was concluded that the occurrence of Cu is strongly related to natural factors, which depend on the catchment bedrock lithology. A baseline of 129 ppm was established, that represents enrichment in Cu when compared to the world average.

\* Actualmente: Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10405, Santiago, e-mail: jantinao@sernageomin.cl



Areas of anthropogenic and natural anomalies in Cu were found. Within the areas of natural anomalies, it is apparent that they may be caused by metallic mineralisation at Tiltit, in the River Lampa, and in the River San Francisco. Areas of anthropogenic anomalies were found in the Southwest of the basin, at Peñaflores and El Monte. It is discussed the sources for the pollution in this area. The main sources could be: (1) sediment intake of Cu-rich agrochemicals; (2) changes in chemical environment due to polluted groundwater input; and (3) changes in sorption onto particles due to organic material present mostly in the lower Mapocho River.

The anthropogenic anomaly of Cu in the most polluted central area of the basin in Santiago City, is not significant in a regional analysis.

## INTRODUCCION

La manera más simple de analizar zonas contaminadas consiste en investigar la ocurrencia natural de ciertas sustancias y cuantificar la intervención humana sobre el medio comparando los niveles actuales con relación a tales contenidos naturales (Berger y Jams, 1996; Arakel, 1995). Una metodología basada en este principio consiste en describir la geoquímica de los sedimentos fluviales y, específicamente, determinar los contenidos de metales pesados en una zona bien determinada (Singh *et al.*, 1997; Ciszewski, 1997; Erel *et al.*, 1991). Los sedimentos registran la evolución geoquímica natural de los cauces que drenan una cuenca específica (Albarède y Semhi, 1995; Cullers, 1994) y una alteración antrópica puede ser detectada del mismo modo que se detectan anomalías naturales en prospección de yacimientos metálicos (Levinson, 1974; Bowie y Thornton, 1985; Thornton y Howarth, 1986; Ciszewski, 1997; Singh *et al.*, 1997; Murray, 1996). Se han desarrollado con éxito experiencias al respecto en EE.UU. (Murray, 1996), Japón (Teraoka y Kobayashi, 1980), Canadá (Oliver, 1973), Argentina (Fernández-Turiel *et al.*, 1994), Europa (Ciszewski, 1997) y Asia (Singh *et al.*, 1997; Konhauser *et al.*, 1997). Se ha probado también que es más simple analizar anomalías en sedimentos que en aguas, dado que se pueden analizar grandes áreas en tiempos

largos de muestreo y por lo tanto se requiere menor capacidad logística (De Grys, 1964).

A pesar de lo anterior, la química de los sedimentos por sí sola no es determinante para establecer si una zona está contaminada, pues esto se encuentra determinado por otros factores. Bajo esta perspectiva, la metodología de análisis geoquímico puede ser usada de manera preliminar para determinar áreas de investigación en detalle por su vulnerabilidad y definir un programa de monitoreo y/o remediación (Singh *et al.*, 1997; Murray, 1996; Fernández-Turiel *et al.*, 1994; Arakel, 1995) que permita efectuar análisis sobre ciertos componentes ya identificados que afecten a la calidad química de la columna de agua y a los sedimentos relacionados. En un estudio de detalle se pueden identificar factores específicos, por ejemplo la biodisponibilidad de los elementos, la cual depende de la especiación de éstos (Alloway y Ayres, 1995; Arakel, 1995; Young y Harvey, 1992; Thompson *et al.*, 1980).

En la Cuenca de Santiago, Chile central (Fig. 1), donde se concentra el 35% de la población (INE, 1994) y el 50% de la actividad industrial del país, se reconoce como un problema la contaminación de los cauces que la drenan (Espinoza *et al.*, 1994), aunque se han realizado pocos estudios relativos al tema de los metales pesados (SERPLAC, 1987), debido a que el principal problema detecta-



do es la contaminación orgánica domiciliaria (Espinoza *et al.*, 1994) y no la contaminación industrial que aportaría una cantidad apreciable de metales pesados, como ocurre por ejemplo en la Bahía de Concepción, altamente industrializada (Cisternas, 1994). Sin embargo, se ha reconocido la presencia de metales pesados dentro del sistema hídrico (SERPLAC, 1987) y específicamente en las aguas de regadío, elevando el contenido de metales pesados de cultivos realizados en la zona (Díaz *et al.*, 1989). Lo anterior señala que es el momento adecuado para iniciar estudios que permitan identificar problemáticas amplias y realizar posteriormente análisis detallados en la zona.

El cobre es un elemento ubicuo en la corteza terrestre (Taylor y McLennan, 1985) y especialmente en Chile, lo cual facilita los análisis químicos requeridos y el posterior estudio de los resultados obtenidos. Así, son varias las publicaciones referidas a este elemento en Chile central y norte (Campano *et al.*, 1976; De Grys, 1961a, 1961b, 1962, 1964; Irrázaval, 1977; Walker, 1977). Corresponde a un micronutriente bajo ciertas concentraciones (Alloway y Ayres, 1995; OMS, 1995), pero puede ser tóxico tanto para animales como para cultivos en concentraciones más altas (Alloway y Ayres, 1995). Para el hombre, existen algunos estudios que permiten explicar ciertas molestias gástricas en función de altos contenidos de cobre en el agua (OMS, 1995) pero no se conoce bien el comportamiento del organismo humano ante elevadas concentraciones. Estudios de calidad química de suelos consideran importante el análisis de concentraciones de elementos como el cobre (Martin, 1997) por lo que un manejo integral de la cuenca de Santiago debe considerar estudios básicos relacionados con estos metales y en particular con el cobre.

El presente estudio analiza la distribución espacial del cobre en la fracción fina de los

sedimentos fluviales de la Cuenca de Santiago. A través del análisis de anomalías con relación a valores *background* (o fondo geoquímico) y a valores de línea base (obtenidos en la cuenca dada la intervención humana), se determina de un modo preliminar la existencia de áreas vulnerables a mayor polución y que deben ser monitoreadas o de áreas que necesiten remediación por sus altos contenidos de metales y su inestabilidad ambiental.

## DESCRIPCION DEL AREA DEL ESTUDIO

La Cuenca de Santiago se ubica entre los 33° y 34° de latitud sur, en Chile central (Figura 1), enmarcada por la Cordillera Principal y la Cordillera de la Costa del orógeno andino, las cuales en este sector alcanzan gran desarrollo. El área definida por el relleno sedimentario de la cuenca alcanza sólo a los 3.000 Km<sup>2</sup>, aunque la hoya hidrográfica del sistema fluvial Maipo - Mapocho, que la drena, supera los 15.000 Km<sup>2</sup>.

Geológicamente, la cuenca se inscribe en una zona donde afloran mayoritariamente rocas estratificadas volcánicas y volcanoclásticas asignadas a edades que abarcan desde el Jurásico hasta el Plioceno (Thomas, 1958; Thiele, 1980; Gana *et al.*, 1994, 1996; Wall *et al.*, 1996, 1999). Es posible distinguir dos sectores dentro del conjunto de litologías precuaternarias. Uno, más oriental, dominado por rocas volcanoclásticas y sedimentarias de edades comprendidas entre el Jurásico y el Plioceno; el segundo, más occidental, dominado por rocas intrusivas del Cretácico, junto a rocas volcanoclásticas cretácicas (Figura 2). Los volcanes cuaternarios alcanzan particular importancia en las nacientes cordilleranas de los ríos que drenan la cuenca (Thiele, 1980). Por último, la cuenca se encuentra rellena por un potente espesor de depósitos no consolidados



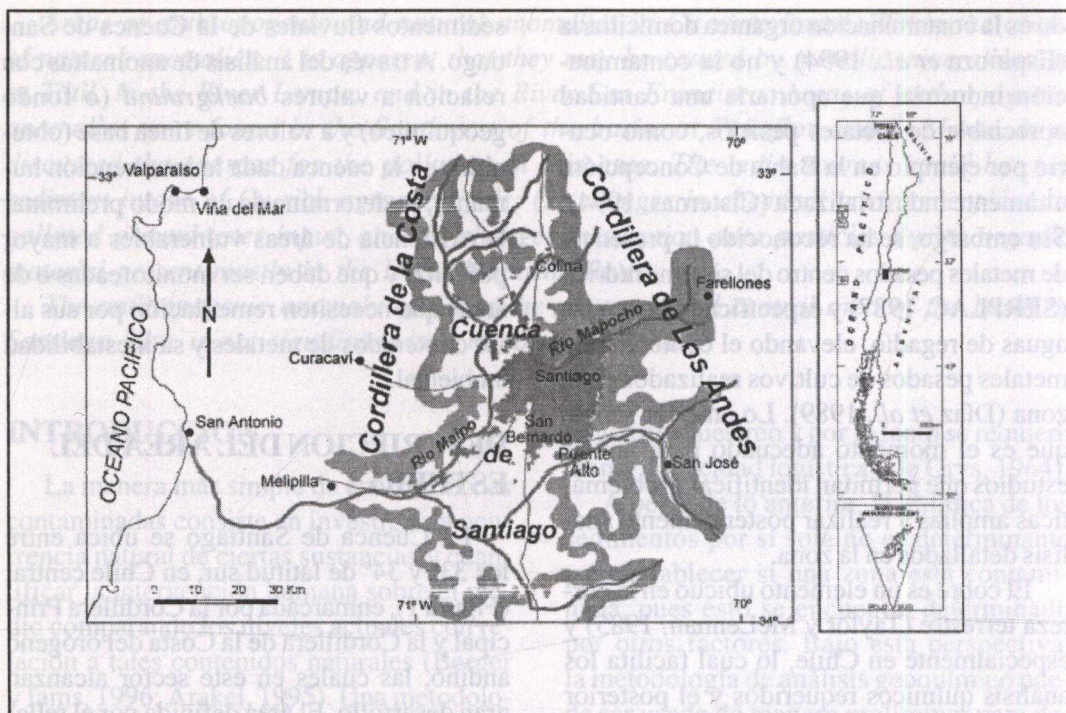


Figura 1. Mapa de la zona del estudio, mostrando la ubicación de los principales caminos y asentamientos de población, la red de drenaje mayor y los elementos morfológicos que enmarcan la Cuenca de Santiago.

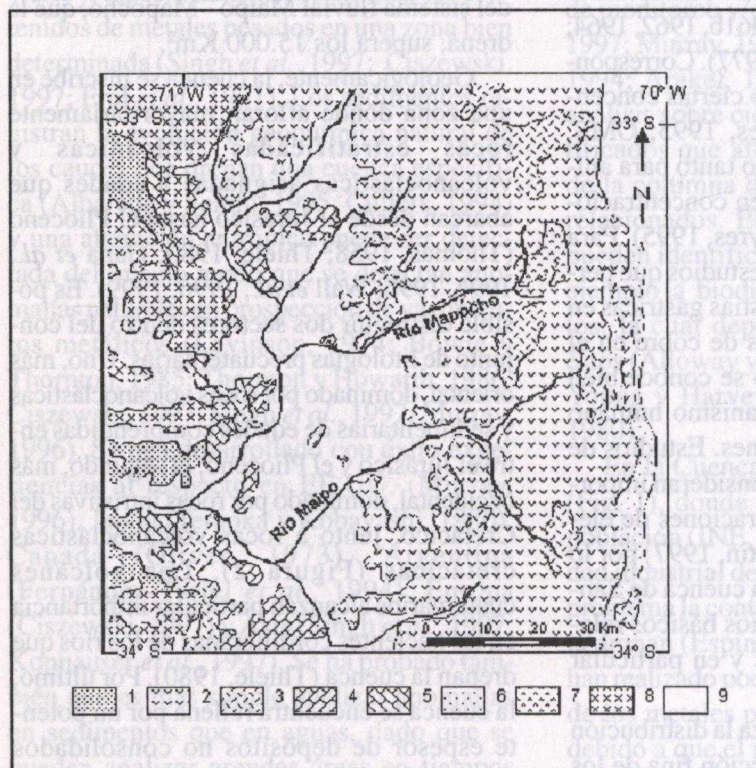


Figura 2. Entorno geológico del área del estudio. Leyenda: (1) Rocas jurásicas y pre-jurásicas indiferenciadas; (2) Formación Abanico, Oligoceno - Mioceno; (3) Intrusivos, Mioceno; (4) Formación Las Chilcas y (5) Formación Lo Prado, Cretácico Inferior; (6) Formación Colimapu, Cretácico Inferior; (7) Formación Farellones, Mioceno; (8) Intrusivos, Cretácico Superior; (9) Depósitos aluviales y fluviales indiferenciados. En sectores, para simplificar, se ha incluido en este depósito a la ignimbrita Pudahuel de Wall et al. (1996). Al oriente de las rocas de la Formación Colimapu, se encuentran rocas sedimentarias neocomianas (Formación Lo Valdés) y jurásicas, no mostradas en el mapa.







Simultáneamente, donde existía escurrimiento superficial, se determinaron las condiciones de óxido-reducción y temperatura en las aguas superficiales y porales del sedimento. La medición de estas condiciones en el agua superficial se realizó *in situ* en agua sin filtrar, con un equipo ORION 250A portátil, equipado con electrodos de Ag/AgCl calibrados para intensidad iónica similar a la encontrada en agua proveniente de cursos fluviales como los estudiados. El instrumental fue calibrado diariamente con soluciones buffer de pH 7,00 y semanalmente con soluciones buffer de pH 4,00 y 7,00. Para medir las variables en el agua intersticial se centrifugó una parte del sedimento a 3000 RPM por 5 minutos aproximadamente y luego se filtró el sobrenadante con papel filtro similar al papel Whatman #2 (5 micrones máximo de corte), analizándole inmediatamente el Eh y pH con el mismo equipo usado para medir en el agua superficial.

En cada punto de muestreo se tomó una muestra compuesta de alrededor de 5 Kg (peso seco), garantizando la mínima contaminación del material obtenido. La muestra se obtuvo del lecho con un muestreador de testigos de sedimentos especialmente diseñado. Éste está construido enteramente de PVC, de 60 cm de largo por 10 cm de diámetro interno, y extrae sedimento en profundidades variables entre 0,3 y 0,5 m dependiendo de la altura de la columna de agua.

El material se obtuvo en lo posible con granulometría bajo 10#ASTM (2 mm) *in situ*. Se depositó la muestra, con la menor cantidad de aire atrapado, dentro de un envase de polietileno y posteriormente éste se cerró herméticamente. Dado que los sitios de muestreo se encuentran a corta distancia del laboratorio donde se hace la preparación y análisis a las muestras, no es necesario congelar o tratar químicamente las muestras, lo cual se realiza para evitar el intercambio de

iones entre las fracciones finas y el agua intersticial (Arakel, 1995; Akagi *et al.*, 1986).

Dado que naturalmente el agua intersticial tiende a acumularse en la parte superior de los envases luego del transporte, una vez obtenida la muestra de agua intersticial en el laboratorio, se eliminó el sobrenadante y la muestra de sedimento con una humedad de 8 a 10% se somete a secado a temperatura ambiente. Cuando la humedad no se apreció a simple vista, las muestras se sometieron a secado en una estufa con temperatura controlada, menor a 50 °C, durante el tiempo necesario para eliminar prácticamente toda el agua intersticial. Finalmente, se separa la fracción bajo 400# ASTM, comprendiendo ésta principalmente las fracciones entre 37 y 5 micrones, dado que se utilizó para separar los finos el método de tamizaje en seco, que posee pérdidas en las fracciones finas por el polvo en suspensión.

El análisis de Cu se realizó en un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma inducido (ICP-AES), Perkin-Elmer, modelo P400, del Laboratorio Químico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Las muestras de sedimento se trataron de la siguiente manera: 0,5 g de sedimento en un vaso de teflón, fueron digeridas con una mezcla de 5 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml HF, 7 ml HClO<sub>4</sub>, hasta sequedad total, disolviendo posteriormente el residuo con HCl y agua destilada y aforando un matraz de 100 ml. Finalmente, las disoluciones fueron analizadas por ICP-AES.

El instrumento fue calibrado con soluciones diluidas multielemento preparadas a partir de soluciones patrones elementales de 1000 ppm. Por cada 10 muestras leídas se intercaló una muestra de sedimento y una roca estándar, cuando correspondía, disueltas mediante el mismo método que las muestras.

Los valores informados para estos sedimentos fueron calibrados y comparados con



Tabla 1. Ubicación de muestras, resultados de los análisis químicos y valores obtenidos usando razones de Cu con Fe y Al.

Muestra	Cauce	UTM E (m)	UTM N (m)	Cu (ppm)	Al (%)	Fe (%)	Cu/Cu* (1)	Cu/Al	Cu/Fe	Cu/Al en referencia a Cu*/Al* (2)	Cu/Fe en referencia a Cu*/Fe* (3)
E50-01	Lampa	322300	6320300	1213	7,18	4,85	9,40	168,92	249,94	10,57	11,32
E50-02	Lampa	322000	6322800	6940	7,73	5,98	53,80	897,95	1160,73	56,17	52,55
E50-03	Lampa	323700	6326600	463	8,20	6,29	3,59	56,49	73,65	3,53	3,33
E50-06	Peldehue	332850	6334250	75	8,80	7,17	0,58	8,52	10,45	0,53	0,47
E50-07	Peldehue	335400	6336400	120	9,20	6,36	0,93	13,04	18,86	0,82	0,85
E50-08	Chacabuco	325600	6331300	196	8,35	5,45	1,52	23,47	35,93	1,47	1,63
E50-09	Chacabuco	328600	6334100	166	9,32	6,60	1,29	17,80	25,15	1,11	1,14
E50-10	Chacabuco	331500	6337400	161	8,51	5,66	1,25	18,92	28,46	1,18	1,29
E50-12	Lampa	324000	6329000	630	7,71	10,35	4,88	81,68	60,87	5,11	2,76
E50-13	Lampa	321900	6331500	268	8,66	6,85	2,08	30,93	39,11	1,93	1,77
E50-14	Lampa	320800	6334400	378	5,84	4,91	2,93	64,72	77,00	4,05	3,49
E50-15	Lampa	320500	6337500	420	8,58	8,25	3,26	48,95	50,90	3,06	2,30
E50-16	Lampa	320200	6340100	483	8,47	7,44	3,74	57,00	64,91	3,57	2,94
E50-18	Lampa	323000	6346300	1440	7,37	7,26	11,16	195,47	198,38	12,23	8,98
E50-20	El Asiento	317300	6339150	545	8,80	7,94	4,22	61,95	68,67	3,88	3,11
E51-01	Chacabuco	337850	6340000	1290	9,52	6,08	10,00	135,49	212,03	8,48	9,60
E51-02	Chacabuco	340250	6341850	104	9,84	6,92	0,81	10,57	15,02	0,66	0,68
E51-03	Chacabuco	342400	6344500	124	9,31	6,22	0,96	13,32	19,92	0,83	0,90
E51-04	Chacabuco	344200	6346900	267	9,63	6,16	2,07	27,72	43,34	1,73	1,96
E51-05	Peldehue	337850	6337400	400	8,94	6,15	3,10	44,76	65,00	2,80	2,94
E51-09	Colina	344000	6323900	117	9,15	6,15	0,91	12,79	19,01	0,80	0,86
E51-10	Colina	346150	6327000	117	8,88	6,64	0,91	13,17	17,61	0,82	0,80
E51-11	Colina	348600	6327400	159	8,88	6,43	1,23	17,90	24,71	1,12	1,12
E51-12	Colina	350400	6326400	108	9,05	4,99	0,84	11,94	21,66	0,75	0,98
E51-14	Quilapilán	342000	6338500	270	9,57	7,06	2,09	28,20	38,23	1,76	1,73
E57-02	Mapocho	332750	6296500	244	7,78	7,80	1,89	31,35	31,29	1,96	1,42
E57-03	Lampa	330250	6299100	434	8,07	4,64	3,36	53,79	93,47	3,36	4,23
E57-04	Mapocho	333750	6301900	177	7,44	5,64	1,37	23,79	31,36	1,49	1,42
E57-05	Mapocho	336600	6302000	113	7,06	6,99	0,88	16,01	16,16	1,00	0,73
E57-08	Lampa	329100	6304900	179	8,35	6,01	1,39	21,43	29,76	1,34	1,35



Muestra	Cauce	UTM E (m)	UTM N (m)	Cu (ppm)	Al (%)	Fe (%)	Cu/Cu* (1)	Cu/Al	Cu/Fe	Cu/Al en referencia a Cu*/Al* (2)	Cu/Fe en referencia a Cu*/Fe* (3)
E57-12	Colina	335100	6315500	67	7,77	4,20	0,52	8,63	15,94	0,54	0,72
E57-13	Lampa	323900	6318300	2090	8,51	8,16	16,20	245,58	256,10	15,36	11,59
E57-15	Lampa	329500	6316300	187	8,01	5,72	1,45	23,36	32,69	1,46	1,48
E58-02	Mapocho	338700	6302100	85	7,18	5,53	0,66	11,85	15,37	0,74	0,70
E58-03	Mapocho	341300	6302600	194	7,16	5,90	1,50	27,10	32,87	1,70	1,49
E58-04	Mapocho	344800	6300500	98	7,31	5,50	0,76	13,41	17,83	0,84	0,81
E58-05	Mapocho	349500	6300000	112	6,99	6,01	0,87	16,02	18,62	1,00	0,84
E58-06	Mapocho	352000	6303100	1100	8,83	7,20	8,53	124,58	152,72	7,79	6,91
E58-07	Mapocho	354500	6306200	730	8,61	6,69	5,66	84,77	109,08	5,30	4,94
E58-08	Mapocho	358000	6306500	289	8,55	7,48	2,24	33,81	38,66	2,12	1,75
E58-09	Mapocho	361250	6307900	153	7,94	8,43	1,19	19,27	18,14	1,21	0,82
E58-10	Zanjón	337900	6293850	1176	6,63	7,76	9,12	177,30	151,50	11,09	6,86
E58-11	Zanjón	341500	6294500	192	7,46	6,66	1,49	25,75	28,81	1,61	1,30
E58-12	Zanjón	345400	6295000	105	7,09	5,52	0,81	14,81	19,01	0,93	0,86
E58-14	San Ramón	357750	6300200	1443	8,58	6,71	11,19	168,19	214,95	10,52	9,73
E59-02	Mapocho	363800	6307900	920	8,35	8,04	7,13	110,17	114,40	6,89	5,18
E59-03	Mapocho	366000	6307000	127	8,28	8,11	0,98	15,34	15,66	0,96	0,71
E59-05	El Arrayán	363700	6310600	490	8,55	5,97	3,80	57,29	82,15	3,58	3,72
E59-06	El Arrayán	364850	6312750	168	8,80	6,02	1,30	19,08	27,90	1,19	1,26
E59-09	San Francisco	372650	6308800	3155	7,52	10,21	24,46	419,77	309,02	26,26	13,99
E59-10	San Francisco	373350	6311600	11046	8,62	5,70	85,63	1281,88	1938,13	80,19	87,74
E59-11	San Francisco	373750	6314250	8700	8,70	6,43	67,44	999,76	1352,28	62,54	61,22
E59-12	San Francisco	374300	6317650	4235	8,39	8,11	32,83	504,55	522,07	31,56	23,63
E64-01	Mapocho	313600	6269250	280	7,60	4,34	2,17	36,86	64,58	2,31	2,92
E64-02	Maipo	311900	6268000	67	8,15	4,79	0,52	8,22	13,99	0,51	0,63
E64-03	Maipo	309200	6267100	74	7,53	4,79	0,57	9,83	15,45	0,62	0,70
E64-04	Maipo	307400	6267900	96	7,77	5,08	0,74	12,36	18,88	0,77	0,85
E64-05	Maipo	303800	6269800	60	7,71	5,70	0,47	7,78	10,53	0,49	0,48
E65-01	Maipo	337600	6269400	53	7,71	5,01	0,41	6,87	10,59	0,43	0,48
E65-02	Maipo	334950	6267350	89	8,17	5,38	0,69	10,89	16,53	0,68	0,75



Muestra	Cauce	UTM E (m)	UTM N (m)	Cu (ppm)	Al (%)	Fe (%)	Cu/Cu* (1)	Cu/Al	Cu/Fe	Cu/Al en referencia a Cu*/Al* (2)	Cu/Fe en referencia a Cu*/Fe* (3)
E65-03	Maipo	332100	6264400	97	7,50	5,41	0,75	12,93	17,92	0,81	0,81
E65-05	Maipo	321400	6264700	69	8,20	5,52	0,53	8,42	12,49	0,53	0,57
E65-06	El Gato	325200	6268200	87	8,39	4,45	0,67	10,37	19,56	0,65	0,89
E65-08	Maipo	321950	6267900	65	8,13	4,60	0,50	7,99	14,13	0,50	0,64
E65-09	Maipo	318600	6267200	73	8,19	4,32	0,57	8,92	16,89	0,56	0,76
E65-10	Maipo	315600	6267700	66	7,63	4,76	0,51	8,65	13,88	0,54	0,63
E65-11	Mapocho	317000	6271600	218	7,87	4,41	1,69	27,71	49,48	1,73	2,24
E65-12	Mapocho	320000	6273500	169	7,84	4,38	1,31	21,57	38,54	1,35	1,74
E65-14	Mapocho	322850	6280100	188	7,71	4,69	1,46	24,39	40,13	1,53	1,82
E65-16	Mapocho	327050	6285400	97	7,96	5,44	0,75	12,18	17,83	0,76	0,81
E65-17	Mapocho	329300	6287100	138	7,93	5,01	1,07	17,40	27,56	1,09	1,25
E65-18	Mapocho	330800	6291600	134	7,91	4,94	1,04	16,93	27,14	1,06	1,23
E66-01	Maipo	340300	6271200	72	7,44	5,10	0,56	9,68	14,10	0,61	0,64
E66-02	Maipo	344150	6274500	51	7,72	5,07	0,40	6,60	10,06	0,41	0,46
E66-05	Maipo	360300	6280500	73	7,56	5,40	0,57	9,65	13,52	0,60	0,61
E66-06	Maipo	354100	6278500	166	7,41	6,91	1,29	22,40	24,03	1,40	1,09
E66-07	Clarillo	349500	6275600	56	7,68	4,48	0,43	7,29	12,49	0,46	0,57
E66-07b	Clarillo	353500	6272700	72	8,15	5,10	0,56	8,83	14,10	0,55	0,64
E66-08a	Clarillo	355400	6271500	99	7,82	5,27	0,77	12,65	18,78	0,79	0,85
E66-09	Clarillo	360850	6268250	95	9,36	6,08	0,74	10,15	15,61	0,63	0,71
E66-10	Zanjón	359000	6292000	72	8,48	7,12	0,56	8,49	10,11	0,53	0,46
E66-11	Zanjón	355250	6290600	84	7,61	5,73	0,65	11,04	14,67	0,69	0,66
E66-12	Zanjón	352300	6291600	122	8,06	5,87	0,95	15,13	20,77	0,95	0,94
E67-01	Maipo	363500	6282500	84	7,15	6,85	0,65	11,75	12,26	0,74	0,55
E67-03	Maipo	368300	6283800	70	6,97	6,36	0,54	10,05	11,01	0,63	0,50
E67-04	Maipo	371900	6282100	460	6,78	8,53	3,57	67,83	53,92	4,24	2,44
E67-04b	Terraza Maipo	372750	6281750	167	9,39	6,08	1,29	17,78	27,45	1,11	1,24
E67-05	Maipo	374850	6280800	80	7,97	5,31	0,62	10,04	15,05	0,63	0,68
E67-06	Maipo	374800	6279000	440	7,54	6,10	3,41	58,38	72,07	3,65	3,26
E67-07	Maipo	374400	6275700	1329	8,12	6,22	10,30	163,62	213,54	10,24	9,67



Muestra	Cauce	UTM E (m)	UTM N (m)	Cu (ppm)	Al (%)	Fe (%)	Cu/Cu* (1)	Cu/Al en referencia a Cu*/Al* (2)	Cu/Fe en referencia a Cu*/Fe* (3)
E67-08	Maipo	375600	6273000	645	7,17	6,36	5,00	5,63	4,59
E67-09	Maipo	376400	6270000	95	7,97	5,24	0,74	0,75	0,82
E67-10	Maipo	379500	6267100	870	7,18	7,72	6,74	7,58	5,10
E67-13	Colorado	373400	6283400	72	6,70	4,99	0,56	0,67	0,65
E67-15	Colorado	380500	6287500	131	7,25	4,41	1,02	1,13	1,34
E74-01	Maipo	323800	6261000	55	7,71	6,28	0,43	0,45	0,40
E74-02	Maipo	325500	6258600	64	7,51	5,59	0,50	0,53	0,52
E74-04	Maipo	329500	6261500	59	7,61	4,90	0,46	0,49	0,55
E74-06	Angostura	331500	6255600	94	8,30	4,86	0,73	0,71	0,88
E74-11	Las Cabras	322500	6251100	95	8,72	4,76	0,74	0,68	0,90
E74-12	Pintué	326200	6250400	354	7,66	7,13	2,74	2,89	2,25
E74-13	Abrantes	329600	6252500	87	8,41	4,83	0,67	0,65	0,82
E74-14	Laguna de Aculco	324750	6253750	99	7,81	4,06	0,77	0,79	1,11
E74-16	Peralillo	328750	6255150	112	8,38	4,76	0,87	0,84	1,07
E74-17	Paine	338500	6254400	90	8,08	4,62	0,70	0,70	0,88
E74-18	El Chanco	327300	6261750	101	8,35	4,41	0,78	0,76	1,04
E75-01	Angostura	338600	6250600	140	8,84	5,80	1,09	0,99	1,09
E75-02	Angostura	340200	6246700	171	8,72	5,80	1,33	1,23	1,33
E75-03	Angostura	341500	6243500	770	8,52	5,91	5,97	5,66	5,90
E75-04	Peuco	345100	6241400	197	8,35	6,64	1,53	1,48	1,34
E75-05	Peuco	348500	6242700	275	8,56	6,26	2,13	2,01	1,99
E75-06	Peuco	351000	6245800	108	8,05	7,69	0,84	0,84	0,64
E75-07	Peuco	353000	6246700	145	8,41	6,29	1,12	1,08	1,04
E75-11	Angostura	341100	6237500	87	8,56	4,95	0,67	0,64	0,80

(1) Cu\* = 129 ppm, ver Tabla 3

(2) Cu\*/Al\*=15,985, ver Tabla 3

(3) Fe\*/Al\*=22,089 ver Tabla 3



muestras de sedimento y roca standard internacionales MESS-2 (Marine Sediment - NRCC) y AGV-1 (andesite - USGS). Cada vez que los valores recomendados para estos estándares no concuerden con los valores leídos por el espectrofotómetro, se recalibró éste hasta lograr su equivalencia. La desviación estándar (SD) fue calculada en el sedimento y roca estándar internacional sobre la base de 20 lecturas.

Se puso el máximo cuidado en diseñar cada etapa del proceso de las muestras con un mínimo posible de contaminación. La mayor fuente de contaminación en este caso lo puede proveer el tamizaje (Fairchild *et al.*, 1988), a través de impurezas en la aleación constitutiva de las mallas (bronce y acero inoxidable). Sin embargo, para las fracciones granulométricas analizadas y dado el tamaño de la muestra procesada, se determinó que el error inducido por la contaminación es mucho menor (1:100) que el error analítico en las lecturas del espectrofotómetro.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados de los análisis químicos. Se indican los valores de Cu, Al, Fe, los valores normalizados en referencia a la línea base calculada posteriormente para Cu y las razones de Cu/Al, Cu/Fe totales y en referencia a las razones calculadas para las líneas base de los elementos citados. En la Tabla 2 se indican los parámetros estadísticos calculados sobre la base de la población total tanto para Cu, Al, Fe.

Tabla 2. Estadísticos básicos (n=114) de los contenidos de metales mencionados.

Estadístico	Al (%peso)	Fe (%peso)	Cu (ppm)
mediana	8,07	5,90	139
media	8,08	6,01	570,9
desviación estándar	0,72	1,23	1516,7
media + sd	8,80	7,24	2087,6
media + 2 sd	9,51	8,47	3604,3

En la Figura 4 se presenta la variación de los estadísticos en función de la cantidad de muestras usadas para su cálculo, ordenadas de acuerdo al contenido en Cu. Se observa que todos los estadísticos muestran valores muy alejados de las tendencias para las últimas 6 muestras (códigos E50-02, E57-13, E59-09 a E59-12, ver Tabla 1)). Estas muestras son las que poseen mayores contenidos de Cu y esencialmente corresponden a lugares donde se presenta mineralización metálica intensa junto a explotación minera actual o pasada (González, 1977, Irrarázaval, 1977, López-Escobar, 1978, Latorre, 1981, López y Vergara, 1982). Se decidió por lo tanto eliminar estas muestras del análisis posterior dado que introducían excesiva polarización de los resultados. Este procedimiento es común en cálculos estadísticos geoquímicos (Seguel, 1994, Siegel, 1974).

Luego de filtrar los datos de acuerdo a lo anterior, los estadísticos resultantes son los que se aprecian en la Tabla 3. Se asignó como valor de línea base a la mediana de los valores obtenidos (Siegel, 1974), el cual es el estadístico más estable (Figura 4).

Tabla 3. Estadísticos básicos con población tamizada (n=108)

Estadístico	Al (%peso)	Fe (%peso)	Cu (ppm)
mediana	8,07	5,84	129
media	8,08	5,94	267,82
desviación estándar	0,73	1,16	324,2
media + sd	8,81	7,10	592,03
media + 2 sd	9,53	8,26	916,23

$Cu^*/Al^*=15,985$

$Cu^*/Fe^*=22,089$

El valor de línea base calculado es superior a los valores entregados en la literatura (Tabla 4) tanto para sedimentos como para valores promedio en la corteza continental. Si bien estos valores pueden no ser comparables por consignarse en referencia al total de fracciones granulométricas y no a una



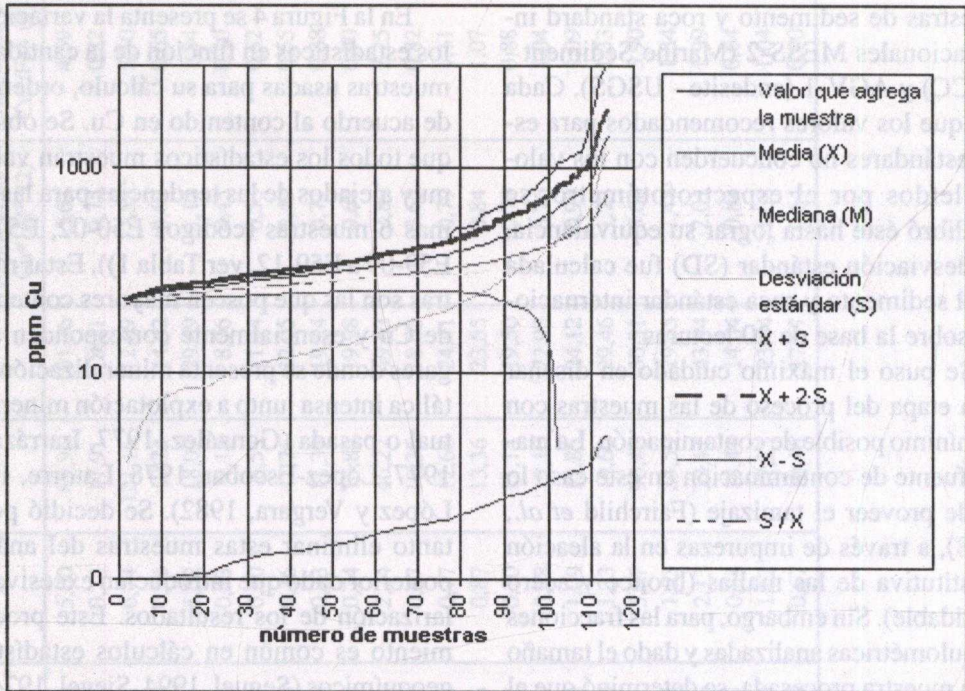


Figura 4. Estadísticos básicos y su relación con la cantidad de muestras consideradas para calcularlos, ordenadas de acuerdo al contenido de cobre (Cu).

fracción en particular, se puede señalar que Seguel (1994) obtiene un valor de 110 ppm analizando la fracción menor a 80 #ASTM. Por lo demás al aumentar las fracciones cambian más los contenidos de sustancias como  $\text{SiO}_2$ , Fe, Al y otros elementos mayores, no afectando por lo tanto a los contenidos de metales pesados, siempre del orden de las partes por millón. De este modo, se puede concluir que el Cu aparece enriquecido en la Cuenca de Santiago con respecto a la corteza terrestre. La razón más lógica para esto es la proveniencia de los sedimentos desde rocas calcoalcalinas provenientes de un ambiente tectónico de convergencia de placas, que enmarca la cuenca (Mpodozis y Ramos, 1994). Antinao *et al.* (1997a) señalan que Co y Ni en la Cuenca de Santiago aparecen en la fracción fina de los sedimentos en desmedro de contenidos promedio de la corte-

za, debido fundamentalmente al sustrato geológico calcoalcalino del cual se derivan estos sedimentos. Este sustrato, de arco volcánico, incluye además rocas sedimentarias continentales, contrasta con otros sectores de Chile, donde la predominancia de rocas asociadas directamente a productos calcoalcalinos es menor, y los contenidos de Cu son menores. Troncoso (1997) reporta valores de línea base para la fracción menor que 125 micrones en sedimentos de quebradas de la X Región en Cu en general bajo 100 ppm, lo cual contrasta con Seguel (1994) para la zona cercana a Santiago (Tabla 5). Si bien estos valores deben tomarse con precaución debido a que factores como la sorción de metales en el suelo y los sedimentos son influenciados por la cantidad y tipo de vegetación (Oyarzún y Godoy, 1997, Donoso, 1953), es claro que para distintas rocas



se tendrán distintos niveles de base, por lo cual este factor geológico es uno de los más importantes al determinar líneas de base. Esto es válido en general para todos los elementos traza y mayores y además influye en la capacidad de asimilación y biodisponibilidad de otros contaminantes y nutrientes (Alloway y Ayres,

1995), por lo que cualquier estudio que pretenda señalar una línea base con el fin de establecer una norma debe considerar la variable geológica, como ya lo apuntan Fernández-Turiel *et al.* (1994), Troncoso (1997) y Antinao *et al.* (1997b).

Tabla 4. Comparación del valor de línea base calculado para la fracción fina de sedimentos fluviales en la cuenca de Santiago, con valores de la literatura.

Referencia	Contenido de Cu (ppm)
Línea base propuesta (mediana, n=108)	129
Sedimentos en ríos drenando la cordillera al este de Santiago (De Grys, 1961a, 1961b, 1962, 1964)	75
Area al NE de Santiago (Seguel, 1994)	110
Promedios para la corteza continental (Bowen, 1979)	80
Valor de fondo para la cuenca de Santiago, Quebrada Macul (Antinao, 1997)	72
Promedios para la corteza continental superior (Taylor & McLennan, 1995)	75
Promedios para la corteza continental (Alloway y Ayres, 1995)	50

Tabla 5. Líneas de base propuestas para distintas regiones y litologías. Se indica además contenido de Cu para muestra de andesita basáltica obtenida en rocas del área de Colina por López-Escobar y Vergara (1997).

Litología, Ambiente	Contenido de Cu (ppm)	Referencia
Esquistos verdes paleozoicos, costa de la Región de los Lagos, Chile	59,94	Troncoso (1997)
Esquistos grises paleozoicos, costa de la Región de los Lagos, Chile	40,47	Troncoso (1997)
Volcanitas y sedimentitas cenozoicas, cordillera de los Andes, Osorno, Chile	95,3	Troncoso (1997)
Sedimentitas y volcanitas cenozoicas, costa de la Región de Los Lagos, Chile	37,06	Troncoso (1997)
Volcanitas mesozoicas-cenozoicas, cordillera de los Andes, Aconcagua, Chile	110	Seguel (1994)
Andesita basáltica, arco volcánico, Eoceno-Mioceno, Chile Central	91	Muestra 2 de López-Escobar y Vergara (1997)



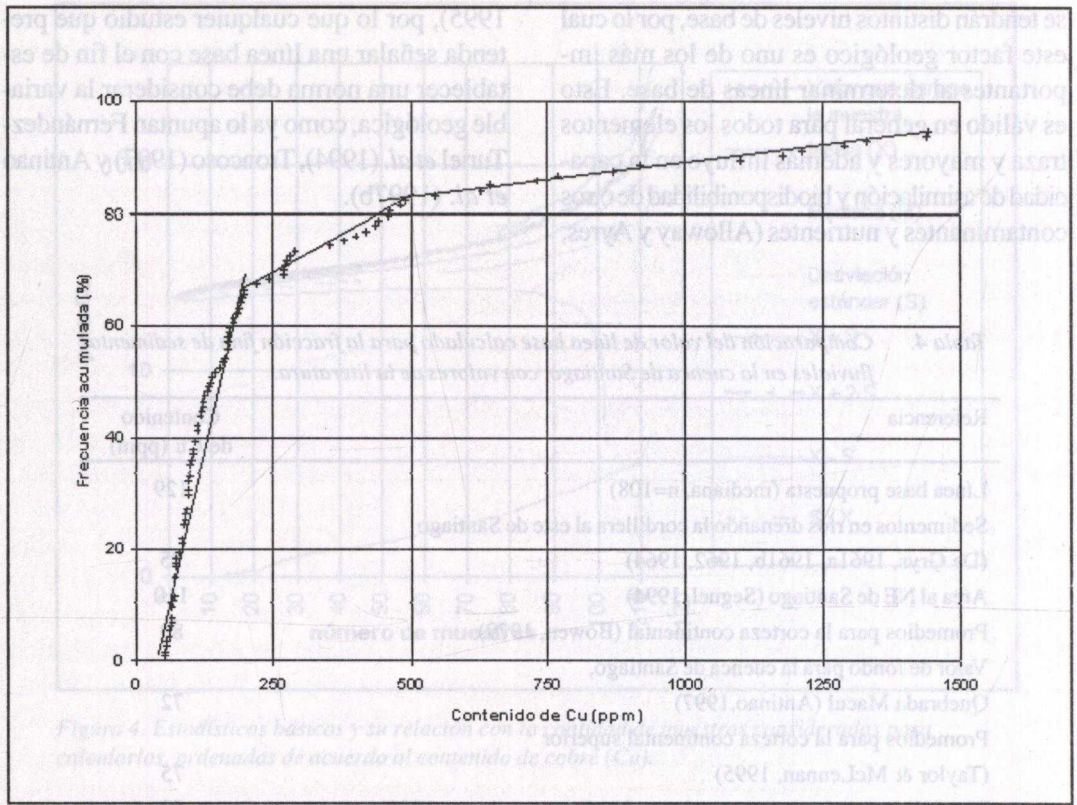


Figura 5. Frecuencias Acumuladas para el contenido de cobre (Cu), ppm.

Al realizar un análisis de frecuencias, se aprecia que el Cu no se distribuye normalmente, sino que posee una distribución bastante compleja, la cual en un diagrama de frecuencia acumulada (Figura 5) muestra dos quiebres significativos, uno a los 200 ppm y otro a los 500 ppm. La distribución antes de los 200 ppm es uniforme y el quiebre es indicativo de una distribución log-normal (Siegel, 1974). La distribución log-normal es común en metales traza como el Cu (De Grys, 1964, Siegel, 1974) por lo que este quiebre significa un comportamiento natural del metal. Sin embargo, luego de las 200 ppm, la curva de distribución experimenta un quiebre nuevamente en 500 ppm, el cual es explicable sólo en función de anomalías antrópicas dentro de la zona del estudio. Este valor coincide aproximadamente con el va-

lor obtenido para  $X + \sigma$  (Tabla 3b) y difiere notablemente de los valores reportados habitualmente como umbral para anomalías naturales (Levinson, 1974, Lepeltier, 1969, Siegel, 1974), esto es  $X + 2\sigma$ .

Una vez definidos los valores de base y el resto de los estadísticos, es posible señalar anomalías. Se ha escogido como valor umbral de anomalía aquel dado por la media aritmética más la desviación estándar ( $X + \sigma$ ). En el mapa de la Figura 6 se señala cuáles muestras son anómalas en contenidos de Cu en referencia al valor umbral y se destacan aquellas muestras con valores superiores a  $C + 2s$  (umbral geoquímico clásico, Siegel, 1974). Se indica asimismo el valor de background geogénico definido por Antinao (1997) para los sedimentos en las nacientes de la Quebrada Macul, al oriente de Santiago.



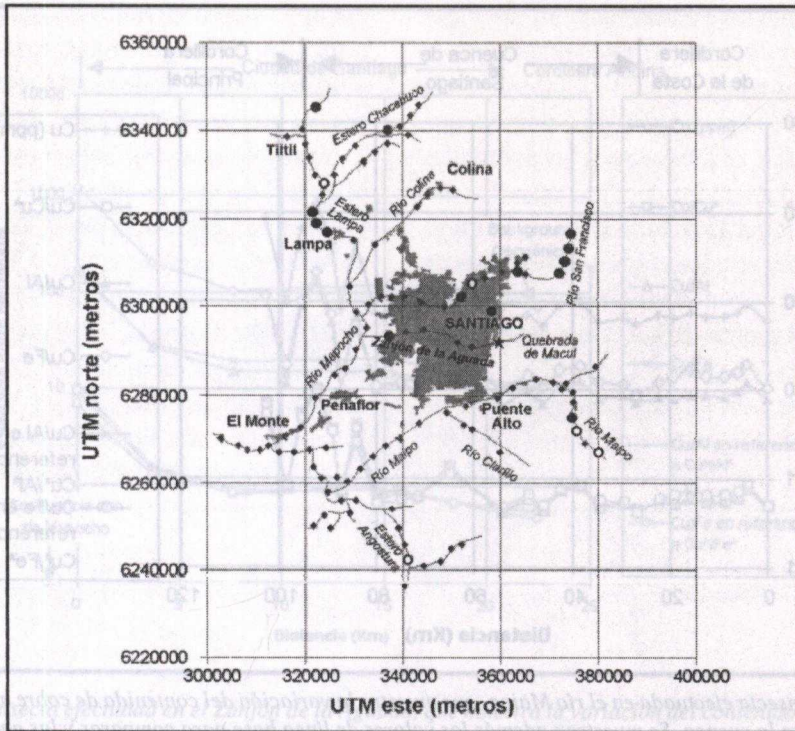


Figura 6. Mapa con anomalías de cobre (Cu). Los círculos llenos indican zonas con valores sobre la media más dos desviaciones estándar (umbral geoquímico clásico). Los círculos abiertos indican zonas con valores sobre la media más una desviación estándar (valor umbral escogido en este estudio). Estrella: background geogénico (Quebrada Macul, Antinao, 1997).

Las Figuras 7-9 muestran transectas realizadas en tres cauces importantes de la cuenca (Maipo, Mapocho, Zanjón de la Aguada). Se destaca que en el perfil del río Maipo (Figura 7) la tendencia inicial seguida por los contenidos de Cu es decreciente, percibiéndose una disminución paulatina de éste. Esta tendencia continua hasta entrar a la Cuenca de Santiago (Km 60 en Figura 7), desde donde se mantiene un valor relativamente constante hasta el último punto. El patrón de comportamiento citado probablemente constituye el patrón geoquímico natural para un cauce como el río Maipo. Para el río Mapocho (Figura 8) cerca de las nacientes presenta contenidos altos y erráticos, con una influencia notoria del río San Francisco. Al ingresar a la cuenca y luego de recibir aportes del río Maipo (Canal San Carlos), el

contenido de Cu se estabiliza, aunque en tramos cortos, se puede observar un aumento sostenido de Cu en los sedimentos. Se puede hacer la misma observación con respecto a la evolución aproximadamente natural que presenta el río Mapocho al atravesar la Cuenca de Santiago. Sin embargo, está notoriamente más alterado que el patrón del río Maipo, constituyendo los puntos de la zona de Peñafior-El Monte un resultado bastante interesante e inesperado. El Zanjón de la Aguada muestra contenidos de Cu estables hasta llegar a los dos últimos puntos, los cuales son notoriamente más elevados (Figura 9). Este cauce es el que presenta la alteración más notoria, aceptando que los patrones geoquímicos para cauces que drenan esta zona son similares a los que presentan los ríos Maipo y Mapocho.



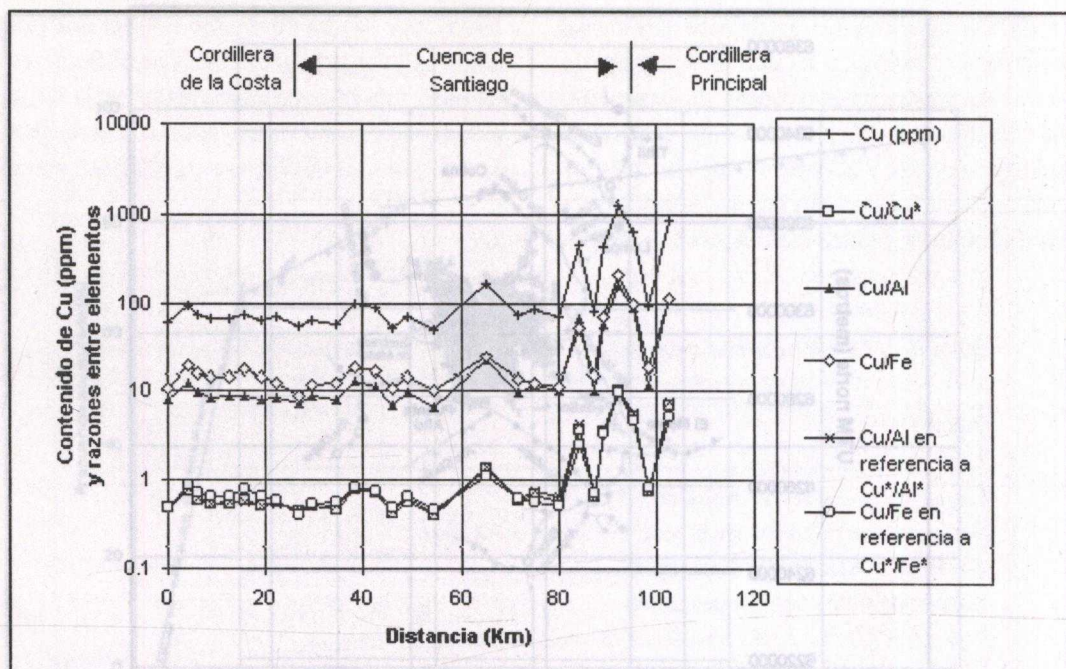


Figura 7. Transecta efectuada en el río Maipo, que muestra la variación del contenido de cobre a medida que el río atraviesa la cuenca. Se muestran además los valores de línea base para comparar y las anomalías de la razón Cu/Fe y Cu/Al.

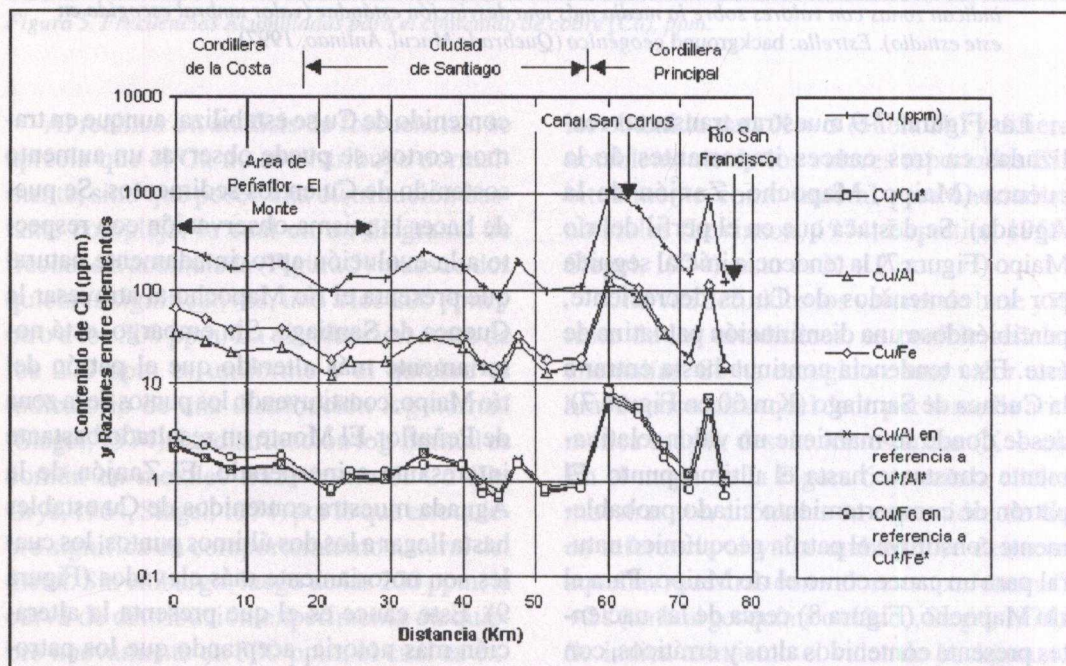


Figura 8. Transecta efectuada en el río Mapocho, que muestra la variación del contenido de Cu a medida que el río atraviesa la cuenca. Se muestran además los valores de línea base de la cuenca para comparar y las anomalías de la razón Cu/Fe y Cu/Al.



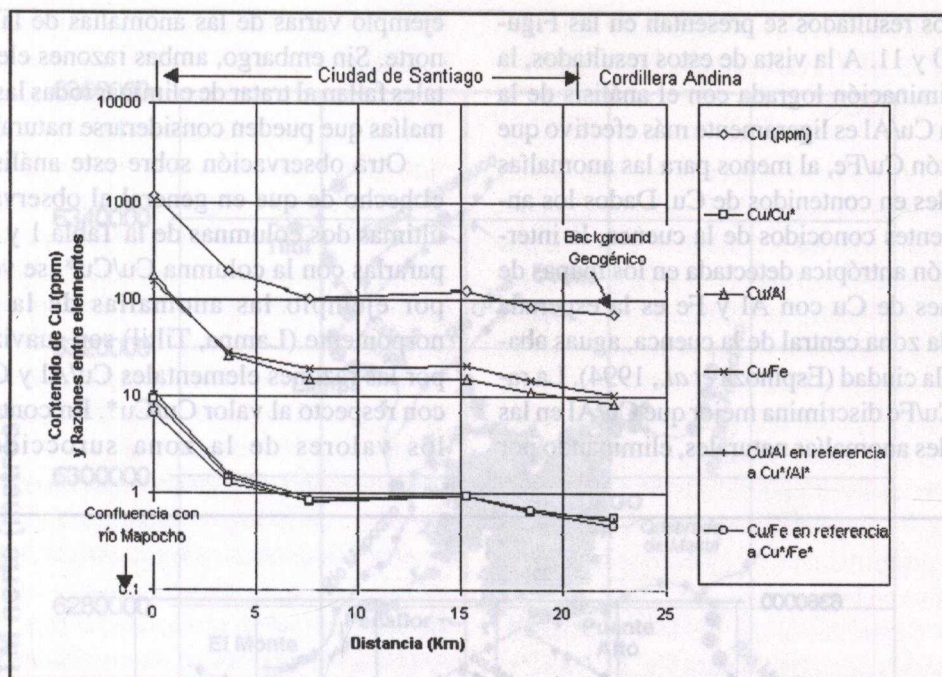


Figura 9. Transecta efectuada en el Zanjón de la Aguada, que muestra la variación del contenido de Cu a medida que el cauce atraviesa la ciudad de Santiago. Se muestran además los valores de línea base para comparar y las anomalías de la razón Cu/Fe y Cu/Al.

## DISCRIMINACION DE ANOMALIAS ANTROPICAS Y NATURALES

Murray (1996), Covelli y Fontolan (1997) y Marcet *et al.* (1997) han llevado a cabo análisis de sedimentos fluviales, marinos y estuarinos por metales pesados en los cuales normalizan los contenidos de metales en referencia a elementos considerados conservativos como el aluminio y el hierro, para de este modo obtener discriminación de anomalías antrópicas versus anomalías naturales. Se pueden usar los datos obtenidos en este estudio para realizar una prueba de los métodos citados y verificar su utilidad en ambientes fluviales como los de la Cuenca de Santiago.

Se conoce aproximadamente cuál es la situación de contaminación de los cauces

que drenan la cuenca y cuáles son algunas de las fuentes (SERPLAC, 1987, Espinoza *et al.*, 1994). Por otro lado, Murray (1996) describe los procedimientos de obtención de razones que en parte eliminan problemas como: distribuciones granulométricas disímiles (Troncoso, 1997), contenido variable de materia orgánica (De Grys, 1962) y patrones geoquímicos originales distintos (Fernández-Turiel *et al.*, 1994, Cullers, 1994). Las razones Cu/Fe y Cu/Al, una vez analizadas estadísticamente, deberían entregar valores anómalos que, en gran parte, reflejarían los aportes antrópicas más que los naturales, siendo significativamente mayores que los valores de línea base, obtenidos en función de las razones comparadas entre las medianas, como se realizó aquí, o de valores considerados como de fondo geoquímico (Murray, 1996, Marcet *et al.*, 1997).



Los resultados se presentan en las Figuras 10 y 11. A la vista de estos resultados, la discriminación lograda con el análisis de la razón Cu/Al es ligeramente más efectivo que la razón Cu/Fe, al menos para las anomalías grandes en contenidos de Cu. Dados los antecedentes conocidos de la cuenca, la intervención antrópica detectada en los mapas de razones de Cu con Al y Fe es la esperada para la zona central de la cuenca, aguas abajo de la ciudad (Espinoza *et al.*, 1994). La razón Cu/Fe discrimina mejor que Cu/Al en las grandes anomalías naturales, eliminando por

ejemplo varias de las anomalías de la zona norte. Sin embargo, ambas razones elementales fallan al tratar de eliminar todas las anomalías que pueden considerarse naturales.

Otra observación sobre este análisis es el hecho de que en general al observar las últimas dos columnas de la Tabla 1 y compararlas con la columna Cu/Cu\*, se ve que por ejemplo las anomalías de la zona norponiente (Lampa, Tiltil) son suavizadas por las razones elementales Cu/Al y Cu/Fe con respecto al valor Cu/Cu\*. En contraste, los valores de la zona suroccidental

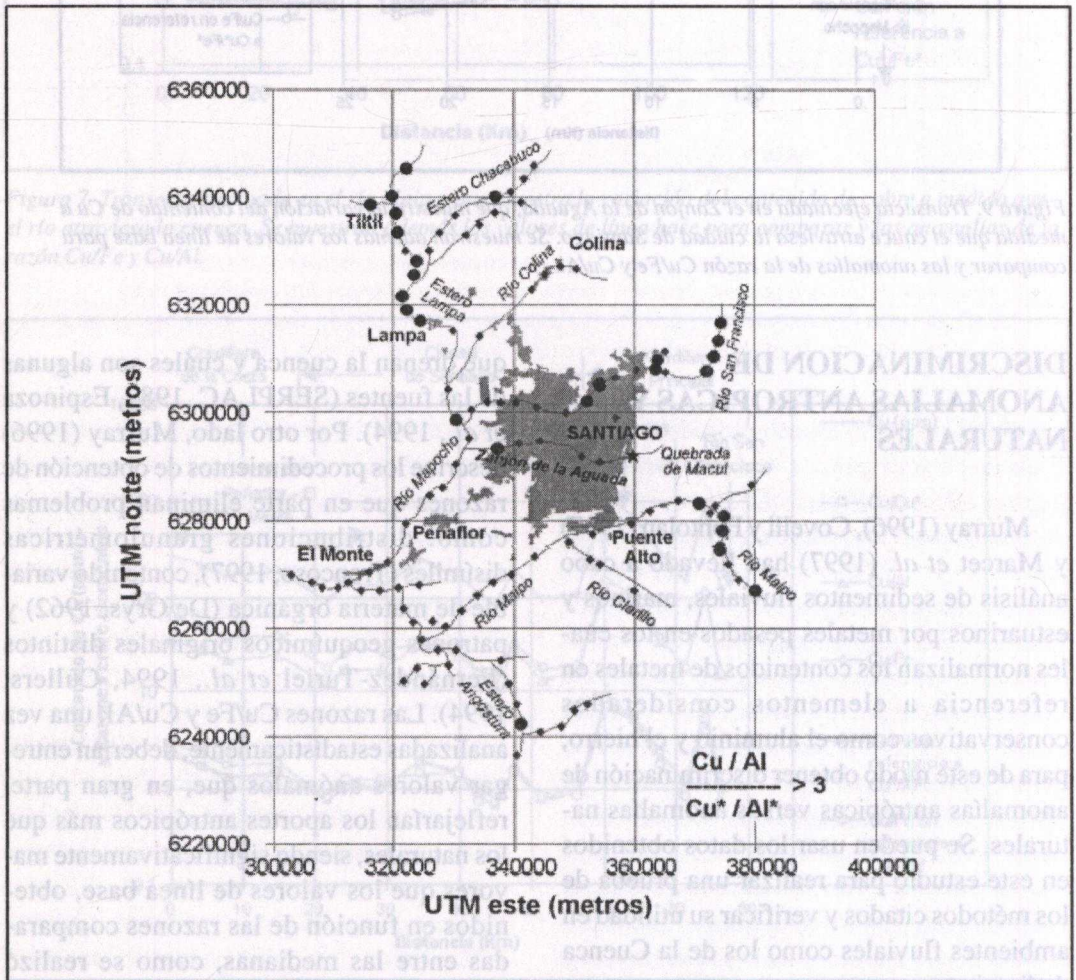


Figura 10. Mapa de razones anómalas Cu/Al. Se indican con círculos aquellos puntos donde la razón sobrepasa en 3 al valor de referencia Cu\*/Al\* (ver Tabla 4).



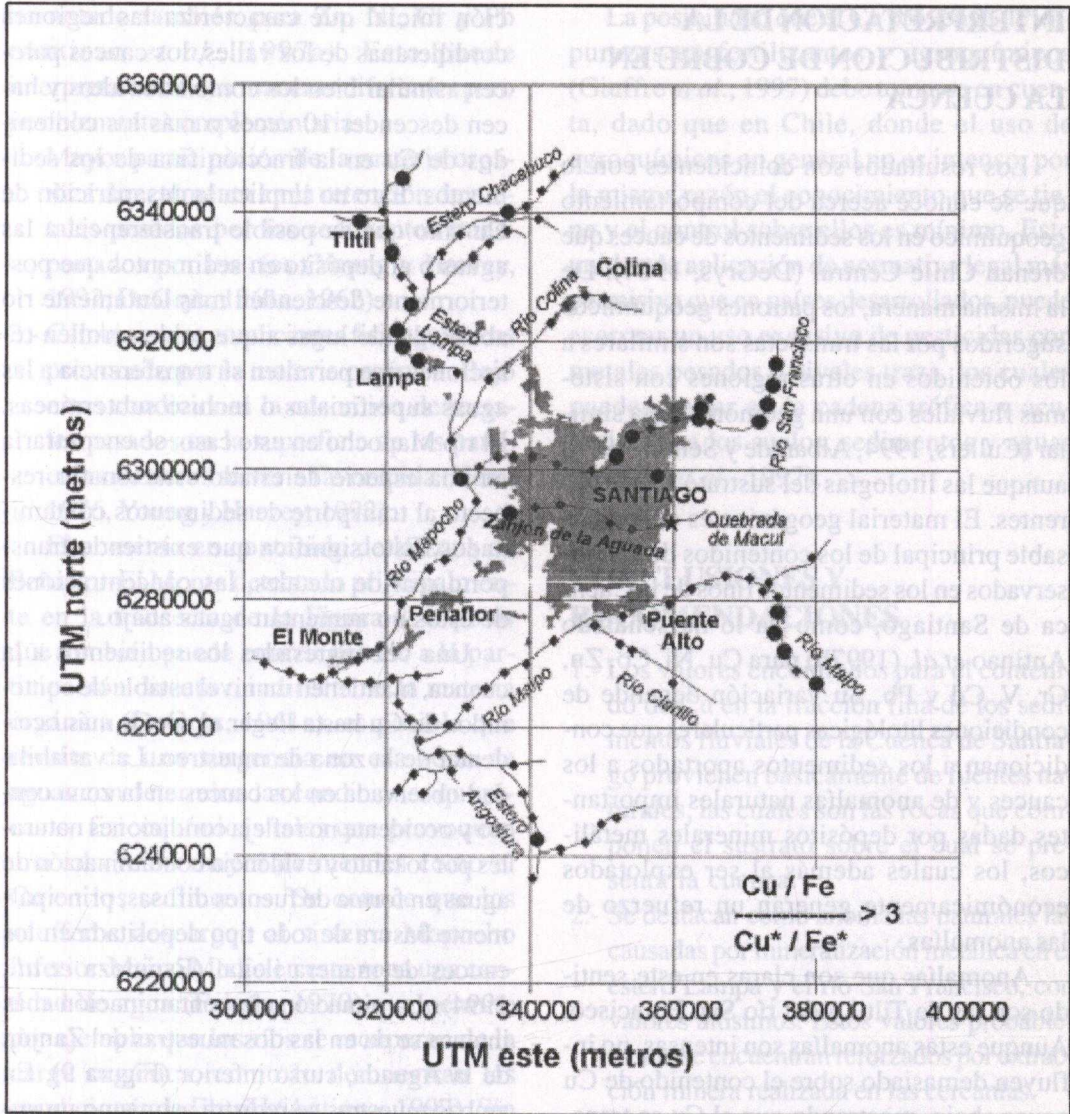


Figura 11. Mapa de razones anómalas Cu/Fe. Se indican con círculos aquellos puntos donde la razón sobrepasa en 3 al valor de referencia Cu\*/Fe\* (ver Tabla 4).

(Mapocho Inferior, Maipo) son reforzados al realizar el análisis de razones elementales. Además, los grandes valores anómalos del río San Francisco fueron en general disminuidos al aplicar ambas razones. Los resultados anteriores validan en parte la técnica aplicada, pues modulan las anomalías más cercanas a las fuentes naturales, esto es en las nacientes de los ríos y que probablemente tienen una

influencia de yacimientos metálicos y refuerzan las anomalías presentes en la zona inferior de la cuenca. Sin embargo, el efecto no es tan fuerte como puede ocurrir por ejemplo en sedimentos estuarinos (Marcet *et al.*, 1997) y marinos (Covelli y Fontolan, 1997), por lo cual no es una técnica definitiva al aplicarla en ambientes fluviales y aluviales como los de la Cuenca de Santiago.



## INTERPRETACION DE LA DISTRIBUCION DE COBRE EN LA CUENCA

Los resultados son coincidentes con lo que se conoce acerca del comportamiento geoquímico en los sedimentos de cauces que drenan Chile Central (DeGrys, 1964). De la misma manera, los patrones geoquímicos sugeridos por las transectas son similares a los obtenidos en otras regiones con sistemas fluviales con una geomorfología similar (Cullers, 1994, Albarède y Semhi, 1994) aunque las litologías del sustrato sean diferentes. El material geogénico es el responsable principal de los contenidos de Cu observados en los sedimentos finos de la Cuenca de Santiago, como ya lo ha señalado Antinao *et al.* (1997b) para Cu, Ni, Co, Zn, Cr, V, Cd y Pb. Su variación depende de condiciones litológicas particulares que condicionan a los sedimentos aportados a los cauces y de anomalías naturales importantes dadas por depósitos minerales metálicos, los cuales además al ser explotados económicamente generan un refuerzo de las anomalías.

Anomalías que son claras en este sentido son las de Tilt y del río San Francisco. Aunque estas anomalías son intensas, no influyen demasiado sobre el contenido de Cu aguas abajo, mostrando que el Cu se transforma rápidamente y mantiene los equilibrios, vinculados principalmente a las condiciones fisicoquímicas estables en que se encuentran los sedimentos (Antinao, 1997). Este hecho ya ha sido notado por DeGrys (1964).

El sector oriental de la cuenca posee Cu en forma de mineralización de sulfuros (ríos San Francisco y Maipo) o en forma de arcillas amorfas mezcladas con óxidos e hidróxidos de Cu, bastante estables en las cabeceras del río San Francisco, por ejemplo (Thiele, 1980, SERPLAC, 1987). A pesar de la aparente situación de contamina-

ción inicial que caracteriza las regiones cordilleranas de los valles, los cauces parecen asimilar bien los contenidos altos y hacen descender 10 veces o más los contenidos de Cu en la fracción fina de los sedimentos. Esto no implica la desaparición de Cu sino que su posible transferencia a las aguas o al depósito en sedimentos que posteriormente descienden más lentamente río abajo, dando lugar a que se desarrollen reacciones que permiten su transferencia a las aguas superficiales o incluso subterráneas. El río Mapocho en este caso, se encontraría en una especie de estado estacionario respecto al transporte de sedimentos contaminados. Esto significa que existiendo transporte real de metales, las concentraciones de éstos no aumentan aguas abajo.

Una vez ingresados los sedimentos a la cuenca, mantienen un nivel estable de contenidos de Cu hasta llegar al sector más occidental de la zona de muestreo. La variabilidad observada en los cauces en la zona centro y occidente no refleja condiciones naturales por lo tanto y evidencia contaminación de aguas en forma de fuentes difusas, principalmente basura de todo tipo depositada en los cauces de manera ilegal (Espinoza *et al.*, 1994). La situación de contaminación más intensa se da en las dos muestras del Zanjón de la Aguada, curso inferior (Figura 9). En ambas muestras se registra asimismo un aumento de la carga orgánica, reflejada en un aumento del contenido de fósforo (Antinao, 1997). Además las condiciones de óxido-reducción con Eh cercanos ó bajo 0 mV y pH neutros o levemente básicos en el agua superficial (Antinao, 1997), son propicias para la acumulación de metales como el Cu.

En la zona occidental de la cuenca, desde los puntos altamente anómalos del Zanjón de la Aguada hasta los últimos puntos del río Mapocho (zona de Peñaflores-El Monte), se aprecia la interacción de la materia orgánica con el contenido de Cu, como se



ha notado también para Zn, Ni, Cr y Pb (Antinao *et al.*, 1997a). Esto puede interpretarse de dos maneras diferentes pero posiblemente complementarias:

- 1.- Mayor participación de la materia orgánica directamente en la retención de metales pesados por los sedimentos transportados por los ríos (Young y Harvey, 1992, DeGrys, 1961a, 1962).
- 2.- Cambio en las condiciones fisicoquímicas provocado por la materia orgánica. Bajo estas condiciones la adsorción de metales pesados en la superficie de las partículas menores se vería favorecida (Hem, 1976, Young y Harvey, 1992).

El aumento en contenido de la zona de Peñaflores-El Monte detectado principalmente en la transecta de la Figura 8, a pesar que también puede ocurrir debido a la participación directa o indirecta de la materia orgánica (DeGrys, 1961a), es posible que resulte de una surgencia en esa zona de aguas con determinadas condiciones químicas o fisicoquímicas tales que provoquen una adsorción mayor de metales como el Cu en los sedimentos. Se conoce que los acuíferos descargan al sistema Mapocho Inferior-Maipo Medio en esta zona una cantidad de agua (Falcón, 1970) que permite por ejemplo que los ríos se recuperen de la carga orgánica, como lo demuestran las condiciones de Eh-pH (Antinao, 1997). Sin embargo, análisis químicos realizados en pozos de monitoreo ubicados cerca de Lo Errázuriz y en la comuna de Maipú, donde el abastecimiento de agua potable depende de las aguas subterráneas, desmienten la posibilidad de que al menos en algunos metales pesados (Pb, Cr, Cd, Cu, Zn) estas aguas posean contenidos cercanos a la norma chilena de agua potable. La realización de análisis completos por metales pesados, sus especies químicas y otras sustancias trazas permitirá analizar mejor esta alternativa.

La posibilidad que el Cu provenga de impurezas en fertilizantes y agroquímicos (Giuffrè *et al.*, 1997) debe tomarse en cuenta, dado que en Chile, donde el uso de agroquímicos en general no es intenso, por la misma razón el conocimiento que se tiene y el control sobre ellos es mínimo. Esto unido a la aplicación de normativa legal más permisiva que en países desarrollados, puede acarrear un uso excesivo de pesticidas con metales pesados a niveles traza, los cuales pueden entrar en la cadena trófica y acumularse en los suelos, sedimentos y aguas (Wilcke *et al.*, 1997).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Los valores encontrados para el contenido de Cu en la fracción fina de los sedimentos fluviales de la Cuenca de Santiago provienen básicamente de fuentes naturales, las cuales son las rocas que componen el sustrato sobre el cual se presenta la cuenca.
- 2.- Se destacan como anomalías naturales las causadas por mineralización metálica en el estero Lampa y el río San Francisco, con valores altísimos. Estos valores probablemente se encuentran reforzados por extracción minera realizada en las cercanías.
- 3.- Se detecta claramente la zona anómala en el centro de la ciudad de Santiago, representada por altos contenidos de Cu en el curso inferior del Zanjón de la Aguada, indicando claramente contaminación industrial directa.
- 4.- Una zona anómala de probable origen antrópico se destaca en la zona surponiente de Santiago (Peñaflores-El Monte). Estas anomalías no tienen una explicación sencilla, dado que se registran en sedimentos con una carga orgánica importante, en sectores occidenta-



les de la cuenca, específicamente en el curso más bajo del río Mapocho, donde al parecer no existen descargas industriales fuertes, sino que la actividad es más bien de tipo agrícola.

5.- Una causa posible es el resurgimiento de aguas contaminadas directamente con metales pesados desde los acuíferos de la zona central de la cuenca, implicando una biodisponibilidad de metales evidente. Los análisis químicos realizados en aguas subterráneas hasta el momento desmienten esta posibilidad. La realización de análisis completos por metales pesados y la determinación de otras sustancias (ligandos orgánicos por ejemplo) permitirá analizar mejor esta alternativa. No es descartable tampoco que el agua subterránea aporte cambios en las condiciones fisicoquímicas y/o químicas indirectamente.

Del mismo modo, dada la gran cantidad de materia orgánica en esta zona, es posible pensar en una interacción de la materia orgánica con los metales pesados, lo cual puede aumentar la biodisponibilidad de metales a través del regadío de cultivos con estas aguas.

Por último, otra causa puede ser el transporte de metales pesados en sedimentos y suelos contaminados por agroquímicos y pesticidas en esta zona de la cuenca. Esta alternativa es más compleja, dado el corto tiempo en que se han usado estos métodos en la agricultura chilena, al contrario de lo que ocurre en Europa. Sin embargo, su uso es creciente por lo que es necesario vigilarlos.

6.- El análisis futuro se debe centrar en estudiar la zona surponiente de la cuenca, tanto en geoquímica de sedimentos como suelos, determinando biodisponibilidad del metal y los mecanismos de retención de éste en la materia orgánica e inorgánica presente en suelos y sedimentos. Junto a

un análisis de este tipo, es necesario estudiar el transporte e intercambio químico de Cu a lo largo del curso superior de los ríos Mapocho y San Francisco, para determinar qué especies acumulan este metal y qué ocurre con ellos al bajar los cauces a la cuenca. Estudios de este tipo se constituyen en fundamentales para manejar los recursos hídricos de forma integral y contribuir a la planificación racional del uso de la tierra en un futuro cercano.

## AGRADECIMIENTOS

El proceso de las muestras (secado y separación de las fracciones finas) se realizó en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales del Departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile. Se agradece a A.M. Sancha por sus valiosos comentarios y a un editor anónimo por la revisión del artículo.

## REFERENCIAS

- Akagi, T.; Kodama, T.; Haraguchi, H.; Fuwa, K.; Tsubota, H. 1986. Distribution of heavy metals in seawater around the Shikoku Island. *Geochemical Journal*, Vol. 20, p. 127-135.
- Albarède, F.; Semhi, K. 1995. Patterns of elemental transport in the bedload of the Meurthe River (NE France). *Chemical Geology*, Vol. 122, p. 129-145.
- Alloway, B.J.; Ayres, D.C. 1995. *Chemical Principles of Environmental Pollution*, Blackie, 300 p., London.
- Antinao, J.L., 1998. Caracterización Química de la Contaminación Ambiental en la Cuenca de Santiago mediante el análisis de metales pesados en la fracción fina de sedimentos fluviales. Tesis para optar al grado de Magister, *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 103 p.



- Antinao, J.L., Elgueta, S., 1997a. Caracterización Química de la Contaminación Ambiental en la Cuenca de Santiago mediante análisis de sedimentos fluviales. *In Congreso Geológico Chileno, No. 8, Actas*, vol. I, p. 620-624, Antofagasta.
- Antinao, J.L., Elgueta, S., Martínez, J., 1997b. Nuevos antecedentes para una línea base de metales pesados en la Cuenca de Santiago. *In Congreso Iberoamericano de Química Ambiental, No. 1, Actas*, p. 54, Jahuel.
- Arakel, A.V. 1995. Towards developing sediment quality assesment guidelines for aquatic systems: an Australian perspective. *Australian Journal of Earth Sciences*, Vol. 42, p. 335-369.
- Berger, A.R., Iams, W.J. (Eds.), 1996. Geoindicators: assessing rapid environmental change in earth systems. Rotterdam: Balkema.
- Bowen, H.J.M., 1979. Environmental Chemistry of the Elements. *Academic Press*, London, 333 p.
- Bowie, S.H.U.; Thornton, I. (Eds.) 1985. Environmental Geochemistry and health. *D. Reidel Publishing Company*, 140 p., Dordrecht, Holanda.
- Campano, P.; Guerra, N.; Oyarzún, J. 1976. Contenido de Cu, Zn, Pb, Ni y Co en rocas extrusivas, intrusivas y sedimentarias del norte de Chile. *In Congreso Geológico Chileno, No. 1, Actas*, Vol. 2, p. F43-F57, Santiago.
- Cisternas, M. 1994. Observaciones sedimentológicas ambientales sobre labores de dragado: Puerto de Lirquén (VIII Región), un caso de estudio. *In Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas*, Vol. 1, p. 245-249.
- Ciszewski, D. 1997. Source of pollution as a factor controlling distribution of heavy metals in bottom sediments of Chechlo River (south Poland). *Environmental Geology*, Vol. 29, p. 50-57.
- Covelli, S.; Fontolan, G. 1997. Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines, Gulf of Trieste, Italy. *Environmental Geology*, Vol. 30, p. 34-45.
- Cullers, R.L. 1994. The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, Colorado, USA. *Chemical Geology*, Vol. 113, p. 327-343.
- De Grys, A. 1961a. Copper, lead and zinc in rivers draining Chilean Andes. *Economic Geology*, Vol. 56, No. 8, p. 1464.
- De Grys, A. 1961b. Prospección geoquímica preliminar y sedimentos en áreas seleccionadas de Chile Central. *In Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Anales*, No. 18, p. 247-273.
- De Grys, A. 1962. Seasonal variations in copper content in some Andean streams of Central Chile. *Economic Geology*, Vol. 57, No. 7, p. 1031-1044.
- De Grys, A. 1964. Copper distribution patterns in soils and drainage in Central Chile. *Economic Geology*, Vol. 59, No. 4, p. 636-646.
- Díaz, O.; Recabarren, E.; Ward, J.; Villalobos, J. 1989. Metales Pesados: Aspectos Ecológicos y Tecnológico-Alimentarios. *Contribuciones Científicas y Tecnológicas, USACH*, No. 84, p. 5-10.
- Donoso, W. 1953. Características químicas de las aguas del río Maipo. Universidad de Chile, Instituto de Geografía, *Informes Geográficos*, Nos. 3-4, p. 49-57.
- Erel, Y.; Morgan, J.M.; Patterson, C.C. 1991. Natural levels of lead and cadmium in a remote mountain stream. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 55, p. 707-719.



- Espinoza, G.; Gross, P.; Hajek, E. 1994. Percepción de los problemas ambientales en las regiones de Chile. *CONAMA*, 647 p., Santiago.
- Fairchild, Hendry, G.; Quest, M.; Tucker, M. 1988. Chemical analysis of sedimentary rocks. In *Techniques in Sedimentology* (Tucker, M.; editor). *Blackwell*, 349 p., UK.
- Falcón, E., Castillo, O., valenzuela, M. 1970. Hidrogeología de la Cuenca de Santiago. Instituto de Investigaciones Geológicas, Sección Hidrogeología. CORFO, Depto. de Recursos Hidráulicos.
- Fernández-Turiel, J.L.; Rossi, J.N.; Saavedra, J.; Medina, M.E.; Durán, F.; López, J.P.; Aceñolaza, P.; Querol, X.; López-Soler, A.; Toselli, A.J. 1994. Aspectos ambientales de la geoquímica de aguas y sedimentos de río de la Sierra de Famatina (La Rioja, Argentina). In *Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas, Vol. 1*, p. 618-622, Concepción.
- Gana, P.; Wall, R.; Gutiérrez, A.; Yáñez, G. 1994. Geología de la Cordillera de la Costa, Regiones de Valparaíso y Metropolitana, al oeste de los 71°00' W. In *Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas, Vol. 1*, p. 43-46, Concepción.
- Gana, P.; Wall, R.; Gutiérrez, A.; Yáñez, G. 1996. Mapa geológico del área de Valparaíso-Curacaví, Región de Valparaíso y Región Metropolitana, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, 1, Escala 1:100.000, 1 mapa, 1 anexo.
- González, F. 1977. Geología económica del prospecto Loma Los Silos, Area Metropolitana. Memoria de Título, *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 81 p.
- Giuffrè, L., Marbán, L., Ratto, S., 1997. Fertilización fosfatada y contaminación. In *Congreso Iberoamericano de Química Ambiental, No. 1, Actas*, p. 81, Jahuel.
- Hem, J.D. 1976. Geochemical controls on lead concentrations in stream water and sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 40, p. 599-609.
- INE 1994. Resultados preliminares del XIV Censo de Población y Vivienda 1991, Instituto Nacional de Estadísticas, 405 p., Santiago.
- Irarrázaval, V. 1977. Estudio geológico geoquímico de la zona de alteración hidrotermal de Tiltill, Area Metropolitana. Memoria de Título, *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 81 p.
- Konhauser, K.O.; Powell, M.A.; Fyfe, W.S.; Longstaffe, F.J.; Tripathy, S. 1997. Trace element chemistry of major rivers in Orissa State, India. *Environmental Geology*, Vol. 29, p. 132-141.
- Latorre, J. 1981. Geología y Petrología de la Formación Río Blanco, Mina Andina. Memoria de Título, *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 108 p.
- Lepeltier, C. 1969. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, Vol. 64, p. 538-550.
- Levinson, A.A. 1974. Introduction to exploration geochemistry. 2nd. Ed., *Applied Publishing Ltd.*, 612 p., Calgary.
- López, L., Vergara, M., 1982. Geoquímica y petrogénesis de rocas granodioríticas asociadas con el yacimiento cuprífero Río Blanco-Los Bronces. *Revista Geológica de Chile*, 15, 59-70.
- López-Escobar, L., 1978. Consideraciones petrogenéticas sobre las granodioritas terciarias de los Andes del Sur entre los 33° y 34° S (Chile Central). Univer-



- sidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones, 22, p. 1-31.
- López-Escobar, L., Vergara, M., 1997. Eocene-Miocene Longitudinal depression and Quaternary volcanism in the Southern Andes, Chile (33-42.5°S): a geochemical comparison. *Revista Geológica de Chile*, 24, p. 227-244.
- Marcet, P., Andrade, M.L., Montero, M.J., 1997, Enriquecimiento y Distribución de Zn, Cu y Pb en sedimentos someros de la ría de Vigo (España). In *Congreso Iberoamericano de Química Ambiental, No. 1, Actas*, p. 45, Jahuel.
- Martin, C.W., 1997. Heavy metal concentrations in floodplain surface soils, Lahn River, Germany. *Environmental Geology*, 30: 119-125.
- Mpodozis, C., Ramos, V., 1989. The Andes of Chile and Argentina. Circum-Pacific Council for Energy Resources. Earth Science Series, Vol. 11, p. 59-90.
- Murray, K.S., 1996. Statistical comparisons of heavy-metal concentrations in river sediments. *Environmental Geology*, 27, 54-58.
- Oliver, B.G., 1973. Heavy Metal levels of Ottawa and Rideau River sediments. *Environmental Science and Technology*, 7, 135-137.
- OMS, 1995. Guías para la calidad del agua potable, Segunda Edición. Vol. 1: Recomendaciones. OMS, Ginebra, 195 pp.
- Oyarzún, C., Godoy, R., 1997. Ciclos biogeoquímicos en bosques nativos del sur de Chile. In *Congreso Iberoamericano de Química Ambiental, No. 1, Actas*, p. 66, Jahuel.
- Seguel, A., 1994. Aplicación de la geoquímica regional de sedimentos de drenaje a la interpretación metalogénica en Chile Central. Memoria de Título, *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 136 p.
- SERPLAC, 1987. Informe Final Proyecto. Estudio base para la definición de un programa de control de la contaminación hídrica: Hoya del río Maipo. Intendencia Metropolitana, Santiago, 3 volúmenes.
- Siegel, F.R., 1974. *Applied Geochemistry*. Wiley, New York-London, 353 p.
- Singh, M., Ansari, A.A., Müller, G., Singh, I.B., 1997. Heavy metals in freshly deposited sediments of the Gomati River (a tributary of the Ganga River): effects of human activities. *Environmental Geology*, 29: 246-252.
- Taylor, S.R., McLennan, S.N., 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- Teraoka, H., Kobayashi, J., 1980. Concentrations of 21 metals in the suspended solids collected from the principal 166 rivers and 3 lakes in Japan. *Geochemical Journal*, 14, 203-226.
- Thiele, R., 1980. Carta Geológica de Chile, 39. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta Barriga, Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, 2, 86 pp.
- Thompson, J.A.J., MacDonald, R.W., Wong, C.S., 1980. Mercury geochemistry in sediments of a contaminated fjord of Coastal British Columbia. *Geochemical Journal*, 14: 71-82.
- Thornton, I., Howarth, R.J., (Eds.), 1986. *Applied Geochemistry in the 1980s*. Graham & Trotman, Londres, UK, 347 pp.
- Troncoso, R., 1997. Valores Preliminares de Línea Base de Metales Pesados, Región de Los Lagos, Chile. In *Congreso Iberoamericano de Química Ambiental, No. 1, Actas*, p. 17, Jahuel.
- Varela, J., 1991. Geología del Cuaternario de la Depresión Central en la zona de la



- cuenca de Santiago, Región Metropolitana, Chile. In: Congreso Geológico Chileno, 6, Resúmenes Expandidos, 593-596.
- Walker, C., 1977. Geología y geoquímica del prospecto La Americana. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 83 p., Santiago.
- Wall, R., Gana, P., Gutiérrez, A., 1996. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, N° 2, Escala 1:100.000, 1 mapa, 1 anexo.
- Wall, R., Sellés, D., Gana, P., 1999. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, N° 11, Escala 1:100.000, 1 mapa.
- Wilcke, W., Kretzschmar, S., Bundt, M., Saborío, G., Zech, W., 1997. Aluminium and Heavy Metal status of soils in Costa Rican Coffee plantations. In *Congreso Iberoamericano de Química Ambiental, No. 1, Actas*, p. 13, Jahuel.
- Young, L.B., Harvey, H., 1992. The relative importance of manganese and iron oxides and organic matter in the sorption of trace metals by surficial lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 1175-1186.