



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS DEL RÍO
CRUCES EN LA PROVINCIA DE VALDIVIA, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

JAVIERA PÍA MULET BUNDER

**PROFESOR GUÍA:
VICTOR GABRIEL VARGAS EASTON**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
KATJA DECKART
LUISA DEL CARMEN PINTO LINCOÑIR**

**SANTIAGO DE CHILE
2011**

RESUMEN

El Santuario del río Cruces, ubicado en la XIV Región de Los Ríos, es parte de un sistema estuarino de tipo tectónico y dominado por mareas, formado producto de la subsidencia del terreno como consecuencia del terremoto de Valdivia de 1960. La cuenca del río Cruces drena una superficie de 3233 km² y tiene un desarrollo total de 125 km de NE a SO, formando un valle aluvial encajonado entre riberas con numerosos meandros que dejan islas y humedales. Esta cuenca se desarrolla encajada en rocas y depósitos correspondientes a depósitos cuaternarios de origen glacio-fluvial y fluvio-estuarino; sedimentitas marinas y continentales del Mioceno; rocas intrusivas del Paleozoico y Cretácico, y rocas metamórficas del Paleozoico-Triásico.

Los sedimentos fluvio-estuarinos se caracterizan por su heterogeneidad en composición, selección y tamaño de grano; esta variabilidad es función de características globales como la geología, relieve, clima y extensión del área drenada, y de procesos locales como la litología, hidrodinámica, geomorfología y posiblemente factores antropogénicos. De esta manera, el objetivo de este estudio fue caracterizar la sedimentología, mineralogía y geoquímica de los sedimentos del río Cruces. Esto, con el fin de entender los procesos sedimentarios predominantes en el sistema fluvio-estuarino del río Cruces, condicionados por la evolución geomorfológica y estratigráfica propia de la cuenca sedimentaria, como consecuencia de la recuperación *post*-subsidencia del terreno en 1960. Para esto se muestrearon testigos de sedimentos obtenidos del lecho del río Cruces (6 testigos entre 35 y 48 cm) y de sus tributarios San José y Pichoy (2 testigos de 47,8 y 45 cm, respectivamente). La sedimentología y mineralogía se estudió mediante las propiedades físicas de los sedimentos (porcentaje de agua, densidad aparente y susceptibilidad magnética), granulometría láser y análisis de espectrometría infrarroja (FTIR). En tanto, la caracterización geoquímica de los sedimentos se estudió estadísticamente a partir de los resultados del análisis geoquímico de 177 muestras, a través del análisis de distribución de frecuencia, componentes principales y redes neuronales artificiales.

En general, la variabilidad de las propiedades sedimentológicas, mineralógicas y geoquímicas sugieren un importante control litológico, donde el material clástico, caracterizado por la media granulométrica (fracción arena muy fina a media) y una mayor densidad aparente, se asocia a la variabilidad de los elementos Si, Ca, Na, Mg, Ni, Ti, Cr, Ba y \pm Zn. Por otro lado, la fracción sedimentaria fina (<63 μ m) dominada por una mineralogía arcillosa, generalmente de mayor susceptibilidad magnética másica y con un alto porcentaje de agua, se asocia a la variabilidad de los elementos Al, Fe, K y P y de los metales trazas Li, V, Co, Mn, Cu, Co, Sc, Y y \pm Zn. Esto como producto de la alta capacidad catiónica de las arcillas y partículas coloidales. Además, los elementos Cl y S se muestran asociados, revelando la influencia del agua marina o de pesticidas y/o fertilizantes.

Las secuencias de los sedimentos fluvio-estuarinos muestran la evolución del sistema mediante la progradación de facies, producto del ajuste *post*-subsidencia, reflejada en el aumento abrupto o paulatino de la media granulométrica y del porcentaje de líticos en los sedimentos más superficiales. A escala local, en cada testigo sedimentario se observan secuencias estratigráficas propias de cada contexto geomorfológico (bancos cercanos al canal principal, derrame de llanura, barras de punta y barras mareales).

La variabilidad de la composición geoquímica de los sedimentos es explicada por factores naturales dado que éstos presentan una geoquímica conforme a la esperada en lutitas, rocas basálticas, barros fluviales, sedimentos estuarinos y a los criterios de calidad de sedimentos, a excepción del cromo, y en menor proporción, del cobre. Debido a que los metales trazas se asocian principalmente a la fracción limo-arcillas, se recomienda caracterizar la variabilidad de la composición geoquímica de la fracción fina (<63 μ m), de manera de disminuir la influencia de la granulometría en la variabilidad de la composición geoquímica de los sedimentos.

AGRADECIMIENTOS

Primero, quería agradecer a mi profesor guía, Gabriel, por hacerme parte de este proyecto y guiarme a lo largo de toda mi memoria, siempre con un trato afable. También a Katja y Luisa por responder mis preguntas siempre con tanta disposición y amabilidad. A Juan Pablo Lacassie, por su gran ayuda y gentileza.

A mis papis, que me han dado todo el amor y apoyo del mundo; son mi pilar en la vida. A mi papi que siempre encontré en él la palabra y el consejo justo, y a mami porque siempre ha estado ahí alentándome y entendiéndome en todo. A la Valy, que a pesar de las peleítas, es la mejor y la más fiel de las amigas. Al Andrecito, que desde que nació me ha alegrado la vida. A mi abueli y a la Vany por ser siempre mis amigas, y muchas veces mis cómplices. A Jimmy y Carlos por ser más que cuñados, ser mi parte de mi familia. Y a Katrin, por su inocencia y acogimiento. A mis tías, tíos, primos y primas por su todo su cariño, a pesar de la distancia.

A todos mis amigos y compañeros, por ser mi segunda familia y por compartir tantas y tantas risas y ridiculeces conmigo. A mis amiguis: Gaby, Stefy y Danys. A los primeros aquí en Santiago: Carlitos, Carlita, Migue, Feña, Manu, Alan, Juampa, Nico, Seba, Mauro y Diego. Y a mis coleguitas queridos: Alida, Irene, Pauli, Cami, Vivi, Montsi, y los ropes: Galle, Juan, Nacho, Chapa, Nico y Rafa. Y a muchos otros: mis amigos y compañeros de colegios, de universidad y de la vida, por formar parte de preciados recuerdos.

A mi guachito, Oscar, por apoyarme y escucharme siempre. Gracias por todo tu amor y por querer compartir toda una vida conmigo.

Finalmente, quiero recordar a la Maca Pinochet quien, en agosto de 2010, nos enseñó a volar con más alegría y a amar lo que tenemos.

Gracias a todos por hacerme tan feliz.

ÍNDICE

I. CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN.....	11
<i>I.1</i> Introducción general.....	11
<i>I.2</i> Objetivos e Hipótesis de trabajo	12
1.2.1 Objetivos.....	12
1.2.2 Hipótesis de trabajo	12
<i>I.3</i> Estudios anteriores	13
<i>I.4</i> Ubicación y accesos	15
<i>I.5</i> Clima y vegetación.....	16
<i>I.6</i> Marco teórico.....	17
1.6.1 Sistemas estuarios y fluviales.....	17
1.6.1.1 Sistema Estuarino	17
1.6.1.2 Sistema fluvial.....	20
1.6.1.3 Secuencias de Valles Incididos.....	22
1.6.2 Mineralogía y Geoquímica de sedimentos fluviales y estuarinos	24
1.6.2.1 Influencia de la litología	25
1.6.2.2 Elementos Mayores.....	26
1.6.2.3 Elementos trazas.....	27
II. CAPÍTULO: MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO.....	29
<i>II.1</i> Geomorfología e hidrología de la cuenca del Río Cruces	29
11.1.1 Formación del estuario y humedal del Río Cruces.....	31
<i>II.2</i> Marco Geológico	32
11.2.1 Paleozoico	33
11.2.1.1 Complejo Metamórfico Bahía Mansa (Duhar et al., 1998)	33
11.2.1.2 Formación Panguipulli (Aguirre & Levi, 1964)	33
11.2.1.3 Batolito Panguipulli-Riñihue (Aguirre & Levi, 1964)	34
11.2.2 Mesozoico	34
11.2.2.1 Formación Tralcán (Aguirre & Levi, 1964).....	34
11.2.2.2 Plutón Panguipulli (Aguirre & Levi, 1964).....	34
11.2.2.3 Rocas Intrusivas Granodioríticas y Dacíticas (Arenas et al., 2005).....	35
11.2.3 Cenozoico.....	35
11.2.3.1 Formación Cura-Mallín (Aguirre & Levi, 1964)	35
11.2.3.2 Estratos de Pupunahue (Illies, 1970)	35
11.2.3.3 Formación Santo Domingo (Martínez & Pinto, 1979).....	36
11.2.3.4 Formación Malleco (Aguirre & Levi, 1964)	36
11.2.3.5 Depósitos sedimentarios no consolidados	36
11.2.3.5.1 Estratos de Niebla (Elgueta et al., 2000)	36
11.2.3.5.2 Depósitos Volcánicos recientes	36
11.2.3.5.3 Depósitos morrénicos, glaciofluviales y fluvioestuarinos (Porter, 1981)	37
11.2.3.5.4 Fluviales (Arenas et al., 2005).....	37

II.2.3.5.5	Depósitos coluviales, aluviales y de remoción en masa.....	38
II.3	Yacimientos Minerales de la Provincia de Valdivia.....	39
II.3.1	Metálicos	39
II.3.1.1	Antimonio	39
II.3.1.2	Cobre	39
II.3.1.3	Manganeso	39
II.3.1.4	Oro.....	40
II.3.2	No metálicos	40
II.3.2.1	Arcillas	40
II.3.2.2	Asbestos	40
II.3.2.3	Azufre	40
II.3.2.4	Carbón	41
II.3.2.5	Diatomitas	41
II.3.2.6	Talco.....	42
III.	CAPÍTULO: MATERIALES Y METODOS	43
III.1	<i>Extracción de testigos de sedimentos</i>	43
III.2	<i>Submuestreo de testigos</i>	45
III.3	<i>Medición de propiedades físicas, granulométricas y mineralógicas de los sedimentos</i> 47	
III.3.1	Densidad aparente y Susceptibilidad Magnética	47
III.3.2	Análisis multicomponente de espectroscopia de absorción infrarroja	48
III.3.2.1	Preparación de la muestra.....	50
III.3.2.2	Análisis cuantitativo y cualitativo de datos de espectrometría.....	50
III.3.3	Granulometría láser.....	52
III.3.4	Análisis geoquímico	54
III.3.4.1	Preparación de la muestra.....	56
IV.	CAPÍTULO: CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA Y MINERALÓGICA	58
IV.1	<i>Introducción.....</i>	58
IV.2	<i>Caracterización Sedimentológica.....</i>	59
IV.2.1	Testigo PlantaG	59
IV.2.2	Testigo SJG	60
IV.2.3	Testigo 221G	62
IV.2.4	Testigo 221EG	63
IV.2.5	Testigo 222G	64
IV.2.6	Testigo 223G	65
IV.2.7	Testigo 207G	66
IV.2.8	Testigo 213G	68
IV.3	<i>Caracterización Mineralógica.....</i>	69
IV.3.1	Testigo SJG	69
IV.3.2	Testigo 221G	70
IV.3.3	Testigo 222G	72
IV.3.4	Testigo 223G	73
IV.3.5	Testigo 213G	74
IV.4	<i>Análisis de Componentes Principales.....</i>	75
IV.4.1	Resultado de ACP de los parámetros sedimentológicos	77
IV.4.2	Resultado de ACP de las propiedades físicas, sedimentológicas y mineralógicas	80

V. CAPÍTULO: CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS	83
V.1.1 Introducción	83
V.2 <i>Descripción de la geoquímica de los sedimentos</i>	83
V.2.1 Testigo 221G	83
V.2.2 Testigo 222G	84
V.2.3 Testigo 223G	85
V.2.4 Testigo 213G	88
V.3 <i>Distribución de Frecuencia</i>	91
V.3.1 Resultados de la Distribución de Frecuencia	91
V.4 <i>Análisis de Componentes Principales</i>	94
V.5 <i>Redes Neuronales Artificiales</i>	101
V.5.1 Resultados del análisis de RNA	102
VI. DISCUSIÓN	106
VI.1 <i>Sedimentología y evolución estratigráfica</i>	106
VI.2 <i>Geoquímica de los sedimentos</i>	116
VI.3 <i>Correlación lateral de los testigos</i>	125
VII. CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	128
VII.1 <i>Conclusiones</i>	128
VII.2 <i>Recomendaciones</i>	130
REFERENCIAS	131
ANEXOS	137
<i>Anexo A: Resultados del Análisis de FTIR</i>	137
<i>Anexo B: Matrices de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralógicos</i>	142
<i>Anexo C: Resultados geoquímica de elementos mayores y elementos trazas</i>	147
<i>Anexo D: Matrices de correlación de los elementos mayores y trazas</i>	151
<i>Anexo E: Valores geoquímicos de referencia y concentraciones promedios de los elementos trazas fluvio-estuarinos analizados</i>	155

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura I-1. *Mapa de ubicación y accesos de la zona de estudio. Cuadro rojo muestra la zona de estudio. Imagen Quick Bird obtenida de Google Earth.....* 16
- Figura I-2. *Distribución dentro de un estuario dominado por mareas. (a) Tipos de energía (b) Componentes morfológicos. Modificado de Dalrymple, Zaitlin & Boyd, 1992.* 18
- Figura I-3. *Tipos principales de estuarios basados en sus características fisiográficas. Modificado de Fairbridge (1980).* 19
- Figura I-4. *Modelo clásico de deposición de barra de punta en una canal de río meándrico. Flecha vertical indica secuencia granodecreciente. Modificado de Allen (1970).* 21
- Figura I-5. *Sección esquemática a lo largo del eje de un Estuario Dominado por Marea mostrando la distribución de las litofacias resultantes de una caída temprana del nivel del mar, seguida de una transgresión del estuario, relleno de estuarino y progradación de barras de arenas y planicies mareales. La cantidad de la secuencia de transgresión preservada depende de las tasas relativas de las subidas del nivel del mar y de la traslación del thalweg o de los canales mareales. Modificado de Dalrymple, Zaitlin & Boyd, 1992.* 23
- Figura I-6. *Fuentes, sumideros y controles principales de los iones mayores en los ríos actuales.* 27
- Figura I-7. *Proporción de cationes y aniones absorbidos en la superficie de hidroxidos, a altas razones de adsorción. Modificado de Gaillardet (2004).* 28

CAPÍTULO II

- Figura II-1. *Rasgos geomorfológicos principales e hidrología de la cuenca del Río Valdivia.* 30
- Figura II-2. *(a) Mosaico de fotografías aéreas mostrando la geomorfología de 1944, previa al terremoto de 1960 y la consecuente subsidencia del terreno (b) Contornos de isobase (líneas puntadas son inferidas) mostrando el nivel de subsidencia o levantamiento, en metros, después del terremoto de Valdivia de 1960. Modificado de Reinhardt et al., 2009.* 32
- Figura II-3. *Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Arenas et al. (2005), McDonough et al. (1998), Mapa escala 1:1.000.000 SERNAGEOMIN; DEM SRTM, zona Valdivia; GCS WGS 1984.* 38

Figura II-4. <i>Ubicación de yacimientos minerales de la Provincia de Valdivia. 1: Los Joaquines (Sb); 2: Santo Domingo (Mn); 3: Isabel (Mn); 4: Bellavista (Mn); 5: Piedra Negra (Mn); 6: El Roble (Au); 7: Madre de Dios (Au); 8: Purulón (Au); 9: Juanito (Au); 10: Ciruelo (Caolín); 11: Las Lomas (Caolín); 12: Quitaluto (Arcilla); 13: Punucapa (Arcilla); 14: Juanita (Asbesto); 15: Bonifacio (Asbesto); 16: Las Azufreras (S); 17: Copihues de Pupunahue (Carbón); 18: Catamutun (Carbón); 19: Futanome (Diatomita); 20: Erika (Talco). Modificado de Di Biase & Lillo (1973).</i>	41
--	----

CAPÍTULO III

Figura III-1. <i>Puntos de muestreo donde se extrajeron los testigos de sedimentos en 7 sitios diferentes a lo largo del Río Cruces (testigos 221G, 221EG, 222G, 223G y 207G), San José (testigo SJG) y Río Pichoy (testigo 213G). Líneas amarillas muestran rutas. Imagen Quick Bird obtenida de Google Earth.</i>	43
---	----

Figura III-2. <i>Detalle de los testigos obtenidos. (a) Testigos SJG, 221G, 221EG y 222G (b) Testigos 213G, 223G y 207G. Líneas amarillas muestran rutas. Imagen Quick Bird obtenida de Google Earth.</i>	44
---	----

Figura III-3. <i>Sellamiento y medición del largo de la columna de sedimentos de los testigos de sedimentos.</i>	46
--	----

Figura III-4. <i>Técnica de muestreo de testigos de sedimentos.</i>	47
---	----

Figura III-5. <i>Esquema de un interferómetro. Proceso de irradiación de una muestra y su respuesta. Modificado de Villaseñor (2005).</i>	49
---	----

Figura III-6. <i>Corrección a la línea base del espectro de la muestra 353 del testigo SJG. Izquierda: espectro original. Derecha: espectro corregido. La línea verde marca la base del espectro luego de realizar el procedimiento (escala vertical exagerada).</i>	52
--	----

Figura III-7. <i>Comparación del espectro original (curva azul) con la curva creada a partir de 8 especies minerales (curva verde). A la derecha se muestran los controles para modificar la curva y los porcentajes utilizados. Muestra 353 del testigo SJG.</i>	53
---	----

Figura III-8. (a) <i>Granulómetro láser Mastersizer 2000 (b) Celda de medición (c) Muestra de sedimento y tamiz No. 18.</i>	54
---	----

Figura III-9. <i>Distribución del tamaño de partícula del análisis granulométrico de la muestra 79 del testigo de sedimento 207G.</i>	55
---	----

Figura III-10. <i>Instrumentos para el análisis geoquímico de los sedimentos fluviales de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. (a) ICP-óptico (b) Cromatógrafo iónico (IC).</i>	56
--	----

CAPÍTULO IV

Figura IV-1. <i>Valores promedios de los parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63µm) de los testigos sedimentarios PlantaG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G, SJG y 213G.</i>	59
---	----

Figura IV-2. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63 μm) del testigo PlantaG.</i>	60
Figura IV-3. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo SJG.</i>	61
Figura IV-4. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo 221G.</i>	62
Figura IV-5. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo 221EG.</i>	63
Figura IV-6. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo 222G.</i>	64
Figura IV-7. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo 223G.</i>	66
Figura IV-8. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <μ μm) del testigo 207G.</i>	67
Figura IV-9. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo sedimentario 213G.</i>	68
Figura IV-10. <i>Promedio de la, porcentaje de minerales félsicos (cuarzo + albita + bytownita), arcillas (illita + montmorillonita), media granulométrica y sedimentos finos, en los testigos 221G, 222G, 223G y 213G.</i>	69
Figura IV-11. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo SJG.</i>	70
Figura IV-12. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 221G.</i>	71
Figura IV-13. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 222G.</i>	72
Figura IV-14. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm), y</i>	

porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 223G.	73
Figura IV-15. <i>Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63µm), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 213G.</i>	74
Figura IV-16. <i>Explicación gráfica de la metodología de los componentes principales. Modificado de García-Cabrero & Moreno-Sánchez (2006).</i>	76
Figura IV-17. <i>Porcentaje acumulado de la varianza para cada componente principal o factor del ACP asociado a la variación sedimentológica de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G.</i>	78
Figura IV-18. <i>Coefficientes de correlación de parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética volumétrica y másica, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje sedimentos finos), incluidos en el ACP de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, con respecto a los dos factores más significativos (Factor 1 v/s Factor 2).</i>	79
Figura IV-19. <i>Porcentaje acumulado de la varianza para cada componente principal o factor del ACP asociado a la variación sedimentológica y mineralógica de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G.</i>	81
Figura IV-20. <i>Coefficientes de correlación de parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía, incluidos en el ACP de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, con respecto a los dos factores más significativos (Factor 1 v/s Factor 2).</i>	82

CAPÍTULO V

Figura V-1. <i>Variaciones de la geoquímica del testigo 221G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.</i>	86
Figura V-2. <i>Variaciones de la geoquímica del testigo 222G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.</i>	87
Figura V-3. <i>Variaciones de la geoquímica del testigo 223G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.</i>	89
Figura V-4. <i>Variaciones de la geoquímica del testigo 213G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.</i>	90
Figura V-5. <i>Histogramas de Distribución de frecuencia observadas (barras azules) y teóricas (línea roja) para Mg, K, Li, Sc, Co, Mn, Si y Ca.</i>	93
Figura V-6. <i>Porcentaje acumulado de la varianza para cada componente principal o factor del ACP asociado a la variación de la geoquímica de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G.</i>	95

Figura V-7. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 223G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.	98
Figura V-8. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 223G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.	99
Figura V-9. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 223G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.	100
Figura V-10. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 213G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.	100
Figura V-11. (a) Resultados del análisis GCS del conjunto de datos elementos mayores y trazas. La red GCS final consta de 6 nodos interconectados representativos de los testigos de sedimentos 221G, 222G, 223G y 213G (líneas punteadas). La escala a la derecha de las distribuciones de las variables de entrada indica concentraciones en ppm, tanto para los elementos mayores como para los elementos trazas; (b) Esquema de la distribución de las muestras asociadas a los nodos 1-6 de los testigos 221G, 222G y 223G del río Cruces, y del testigo 213G del río Pichoy.	103

CAPÍTULO VI

Figura VI-1. Correlación entre la susceptibilidad magnética y el porcentaje de sedimentos finos en los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. R^2 = coeficiente de determinación; en negrita indican valores significativos al umbral $\alpha =0,050$ (prueba bilateral).	108
Figura VI-2. Correlación entre la susceptibilidad magnética y el porcentaje de sedimentos finos para los primeros 20, 24, 23, 27 y 22 cm de profundidad de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, respectivamente. R^2 = coeficiente de determinación; en negrita indican valores significativos al umbral $\alpha =0,050$ (prueba bilateral).	108
Figura VI-3. Correlación entre el porcentaje de arcillas y sedimentos finos para los 20, 24, 23, 27 y 22 cm de profundidad de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, respectivamente. R^2 = coeficiente de determinación; en negrita indican valores significativos al umbral $\alpha =0,050$ (prueba bilateral).	109
Figura VI-4. Sitio Planta. Se observa que el testigo PlantaG fue extraído de la parte interna de un meandro del canal confinado del río Cruces.	110
Figura VI-5. Sitio SJG. El testigo SJG se extrajo de un brazo tranquilo del río San José, correspondiente a un crevasse splay (c),. El sitio está rodeado de planicies y cerros bajos de no más de 10 m de altura (a y b).	111
Figura VI-6. Sitio 221. Los testigos 221G y 221EG se extrajeron de puntos cercanos al cauce del canal principal (de aproximadamente 50 m de ancho) (c). Al Este del sitio se observa un amplio humedal, de hasta 400 m de ancho (b) con presencia de cerros islas y relativamente poca presencia de juncos y árboles cercanos a los puntos de extracción (a).	112

Figura VI-7. Sitio 222. El testigo 222G se extrajo en una zona amplia del humedal (de hasta 1 km de ancho), con gran cantidad de cerros islas pequeños y barras fluviales cubiertas por juncos (a y b).....	113
Figura VI-8. Sitio 223. En comparación a los demás sitios, el sitio 223 presenta una mayor densidad de árboles inundados y crecimiento de juncos (a y b). La extracción del testigo 223G se realizó en una zona somera ((1.5 m de profundidad), cercana al canal principal (de un ancho aproximado de 80 m). Se ubica en una zona amplia del humedal, de hasta ca. 2 km de ancho, río abajo de la confluencia con el río Pichoy.	114
Figura VI-9. Sitio 207. Se ubica en una zona de morfología fluvial trenzada tipo Platte, con alta densidad de barras fluviales longitudinales, correspondientes a barras mareales del sistema estuarino (c). El canal principal más cercano al sitio de extracción del testigo 207G tiene aproximadamente 50 m de ancho. Se observan alta densidad de juncos (a).....	115
Figura VI-10. Sitio 213.	115
Figura VI-11. Tendencias de meteorización del diagrama ternario A-CN-K. A = Al ₂ O ₃ ; C = CaO; N = Na ₂ O; K = K ₂ O; F = Fe total; M = MgO (Liu et al., 2009). Flecha indica la tendencia de mayor meteorización exhibida en los sedimentos.	117
Figura VI-12. Índice de alteración química de los sedimentos de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. CIA = [Al ₂ O ₃ /(Al ₂ O ₃ +CaO+Na ₂ O+K ₂ O)]*100; se asume CaO correspondiente principalmente al calcio de las facies silicatadas (Nesbitt & Young, 1982).....	118
Figura VI-13. Coeficientes de correlación de los elementos Zn, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Y incluidos en el ACP de: los testigos 221G, 222G, 223G y 213G; los valores publicados por Turekian & Wedepohl (1961) para una lutita, arenisca y roca basáltica promedio; y la geoquímica de los Esquistos Paleozoicos de Bahía Mansa publicada por Díaz (1988); con respecto a los dos factores más significativos Factor 1 y Factor 2, que explican el 97.14% de la varianza total.	124
Figura VI-14. Susceptibilidad Magnética Másica de los testigos PlantaG, SJG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G. La línea punteada representa las correlaciones realizadas entre los testigos sedimentarios. Explicación en el texto.	125
Figura VI-15. Media granulométrica de los testigos PlantaG, SJG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G. La línea punteada representa las correlaciones realizadas entre los testigos sedimentarios mediante la susceptibilidad magnética másica.	126

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO III

Tabla III-1. <i>Descripción general y coordenadas de muestreo de los testigos obtenidos en el humedal del río Cruces.</i>	45
---	----

CAPÍTULO V

Tabla V-1. <i>Distribución de frecuencia para las variables, según los valores Chi-cuadrado.</i>	92
Tabla V-2. <i>Componentes principales o factores del ACP del testigo 221G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6</i>	96
Tabla V-3. <i>Componentes principales o factores del ACP del testigo 222G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6</i>	96
Tabla V-4. <i>Componentes principales o factores del ACP del testigo 223G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6</i>	97
Tabla V-5. <i>Componentes principales o factores del ACP del testigo 213G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6</i>	97

I. CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN

I.1 Introducción general

Los sedimentos fluviales se caracterizan por su heterogeneidad en composición, selección y tamaño de grano; esta variabilidad es función de la geología, relieve, clima y extensión del área drenada (Meyer *et al.*, 1979). De esta manera, las facies fluviales dependerán de los distintos procesos predominantes en el sistema fluvial, obteniendo desde facies de granos tamaño grava y arena, en los canales principales y barras fluviales, a facies de granos más finos, como arenas finas, limos y arcillas, en las llanuras de inundación.

Mediante el estudio de los sedimentos fluviales, es posible determinar la proveniencia, distribución, extensión, riesgos de contaminación y procesos geológicos e hidrodinámicos que los afectan. El estudio de testigos sedimentarios, en particular, es una buena herramienta para evaluar estas influencias (Moros *et al.*, 2010).

El terremoto del 22 de mayo de 1960, de magnitud $M_w=9.4$, ocurrido en el Sur de Chile, provocó la subsidencia del terreno (de 1-2 m) comprendido en el área costera en la Provincia de Valdivia. Posterior a ésta subsidencia se han acumulado unos 60 a 80 cm de sedimentos fluviales debido a la consecuente ampliación del lecho del río Cruces (Reinhardt *et al.*, 2010).

Este trabajo se orienta al estudio sedimentológico, mineralógico y geoquímico de los sedimentos fluvio-estuarinos acumulados en la cuenca del río Cruces, mediante el análisis de testigos sedimentarios extraídos en el lecho de los ríos Cruces, San José y Pichoy, permitiendo así el entendimiento de su variabilidad y los procesos que la afectan.

I.2 Objetivos e Hipótesis de trabajo

I.2.1 Objetivos

Objetivo general

Caracterizar la variabilidad sedimentológica, mineralógica y geoquímica de los sedimentos fluvio-estuarinos recientes del lecho río Cruces.

Objetivos específicos

1. Caracterizar descriptiva y estadísticamente las propiedades sedimentológicas y mineralógicas de los sedimentos fluviales de los últimos 50 años del lecho del río Cruces.
2. Caracterizar estadísticamente la geoquímica de los sedimentos fluviales depositados en los últimos 50 años en el lecho del río Cruces.
3. Comparar la sedimentología, mineralogía y geoquímica de los sedimentos fluviales del río Cruces con la de sus tributarios.

I.2.2 Hipótesis de trabajo

El estudio detallado de la sedimentología, mineralogía y geoquímica de los sedimentos de la cuenca del río Cruces permite caracterizar los procesos predominantes del sistema fluvio-estuarino, ya sean naturales o antropogénicos. Estos procesos influirían en la variabilidad sedimentológica y geoquímica de los sedimentos, tanto a escala global de cuenca como a escala local, dependiendo del contexto geomorfológico propio de cada sitio de extracción de los testigos sedimentarios. De esta forma, la variabilidad de los sedimentos a lo largo de los testigos, que representa la variabilidad temporal de

éstos, estaría condicionada por la evolución estratigráfica propia de la cuenca sedimentaria, como consecuencia de la recuperación *post*-subsistencia del terreno.

I.3 Estudios anteriores

En el área de estudio se han realizado diversos trabajos respecto al análisis de sedimentos y su correlación con eventos ya sea ambientales o antrópicos. A continuación se describen brevemente los antecedentes y las técnicas descritas en ellos.

El estudio de Reinhardt *et al.* (2010) tenía como objetivo determinar el tiempo estimado de recuperación del río Cruces a ser nuevamente una llanura de inundación, como lo era antes del terremoto del 1960. Para ello, se estudió la variabilidad y la distribución del tamaño de grano de los sedimentos, materia orgánica y de *thecamoebians* (rizópodos de agua dulce), y se realizaron dataciones de ^{210}Pb y ^{137}Cs con el fin de determinar la temporalidad de las distintas facies definidas en los testigos sedimentarios. Las facies diferenciadas en los sedimentos acumulados fueron: facies y horizontes de suelo de llanura de inundación pre-1960; unidad relacionada al tsunami ocurrido por el mismo terremoto o a la inundación provocada por la re-apertura del lago Riñihue; facie de ajuste *post*-terremoto; y facie de sedimentación de los sedimentos fluviales *post*-1960, que se acumularon debido a la subsistencia de la llanura de inundación. Entre las conclusiones finales del estudio se tiene que la acumulación de sedimentos desde 1960 hasta 2008 fue de 60 a 80 cm, con una tasa de sedimentación media de 1.25 a 1.68 cm/año, la cual va variando a través del tiempo, siendo mayor en los primeros años, disminuyendo progresivamente en los años 70's y volviendo a aumentar nuevamente a fines de la década de los 90's. Finalmente obtienen un período de recuperación del río Cruces a una llanura de inundación de unos 100 a 200 años, indicando éste sería un buen registro de la actividad sísmica histórica ocurrida en el área, puesto que la recurrencia de grandes sismos en la región es de 400 años según algunos antecedentes paleosísmicos (Cisternas *et al.*, 2005).

En el trabajo de Mulsow & Grandjean (2006), a pesar de que no estar relacionado con el estudio específico de los sedimentos del lecho del río, sí se estudiaron los cambios geoquímicos de las aguas del río Cruces y sus consecuencias en la salud de la flora y fauna del “Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter”, ubicado río abajo de la conjunción del río Cruces y el río Calle-Calle. Se estudió la variación química de las aguas del río Cruces luego de que la planta de celulosa CELCO-ARAUCO iniciara sus operaciones el año 2004, vertiendo más de 40 t de sulfato (SO_4) y 6 a 9 t de H_2SO_4 diarios al río, según Mulsow & Grandjean (2006). Según éstos autores, estos compuestos habrían afectado la naturaleza bicarbonatada de las agua del río Cruces, provocando el deterioro y muerte de la planta vascular *Egeria densa*, debido a que esta utiliza el bicarbonato de calcio (HCO_3^-). El desecho ácido con alto contenido de sulfato habría provocado un desequilibrio aniónico/catiónico induciendo la precipitación de óxidos de Mg^{2+} y Ca^{2+} (brucita y portlandita), y disminuyendo por tanto la fuente del calcio de las aguas. A través de experimentos con *Egeria densa* sanas recolectadas en el río Calle-Calle se realizaron experimentos que indican una disminución del (HCO_3^-) debido a una reacción química entre este último y el sulfato, provocando de esta manera la muerte de la planta, implicando a su vez la muerte y migración de los cisnes de cuello negro que poblaban el Santuario Carlos Andwandter.

En Mulsow *et al.* (2009) relacionan los bajos máximos de contenido de metales pesados (como Fe, Mn y Al) y de ^{210}Pb , obtenidos en la parte superior de los testigos de sedimentos, con la removilización de estos elemento productos de una cambio químico del agua relacionado con residuos industriales arrojados al río, un líquido negro con alto niveles de sulfatos, que habrían causado la muerte de *Egeria densa* (una planta subacuática). Para esto, Mulsow *et al.* (2009) analizó sólo la parte más superficial, y por lo tanto más recientemente depositada de los sedimentos del lecho del río Cruces, con el objetivo de relacionar principalmente la variabilidad geoquímica con la actividad antrópica ligada a la apertura de la planta de celulosa, instalada aguas arriba del río Cruces.

Por su parte, Schaefer y Einax (2010) estudiaron la calidad del agua del río Cruces a través de la descripción de los elementos filtrados, materia suspendida y sedimento superficial del lecho (2 cm de profundidad máxima). Para esto se analizan, mediante

métodos espectroscópicos, las concentraciones de Al, As, Ca, Co, Cr, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr y Zn. A través de un análisis cuantitativo, de componentes principales y de factor espacio-tiempo de las variaciones de estos elementos en 19 sitios de muestreo a lo largo del río Cruces y sus tributarios, no es concluyente la influencia directa actual de las aguas residuales de la planta de celulosa CELCO-ARAUCO y su influencia negativa en el ecosistema del río Cruces, pues la comparación de las aguas del río con el “Dato de bancos sobre los efectos ecotoxicológicos y de calidad” ilustra una buena calidad de las aguas, excepto de la cantidad de cobre que lo supera.

En el estudio analítico de Saldivia (2005) se estudian muestras de hígado y riñón de cisnes, *Egeria densa*, agua y sedimentos de muestras recolectadas fuera y dentro del Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, con el objetivo de cuantificar los metales As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Mn, Pb y Zn. De todos los metales analizados en los órganos de cisne se encontró que la concentración de Fe en hígado fue particularmente alta (1.60×10^4 mg/Kg peso seco en promedio). Tanto en *Egeria densa* como en las muestras de sedimento, se encontraron altas concentraciones de Fe y Mn ([Fe]= 3.10×10^4 y 4.22×10^4 mg/Kg peso seco, respectivamente; [Mn]= 9.03×10^3 y 1.17×10^3 mg/Kg peso seco, respectivamente). También se encontraron altas concentraciones de Fe y Mn en los análisis realizados a las muestras de aguas de río Cruces. En este trabajo se infiere que existe contaminación en el Santuario y que ésta es de origen antropogénico, provenientes de fuentes puntuales que desarrollan sus actividades en la cuenca del río Cruces.

I.4 Ubicación y accesos

La zona de estudio se ubica en la XIV Región de Los Ríos, Chile, entre los paralelos $39^{\circ}25'S$ y $40^{\circ}00'S$, y los meridianos $73^{\circ}30'W$ y $72^{\circ}40'W$, en la cuenca del río Cruces, desde las cercanías de la ciudad de Valdivia hasta aproximadamente 50 km río arriba. Por vía terrestre se accede a la ciudad de Valdivia por la Ruta 207 ubicada al Este de la Ruta 5 Sur (Figura I-1), accediendo luego a los ríos por medio de una lancha pesquera.

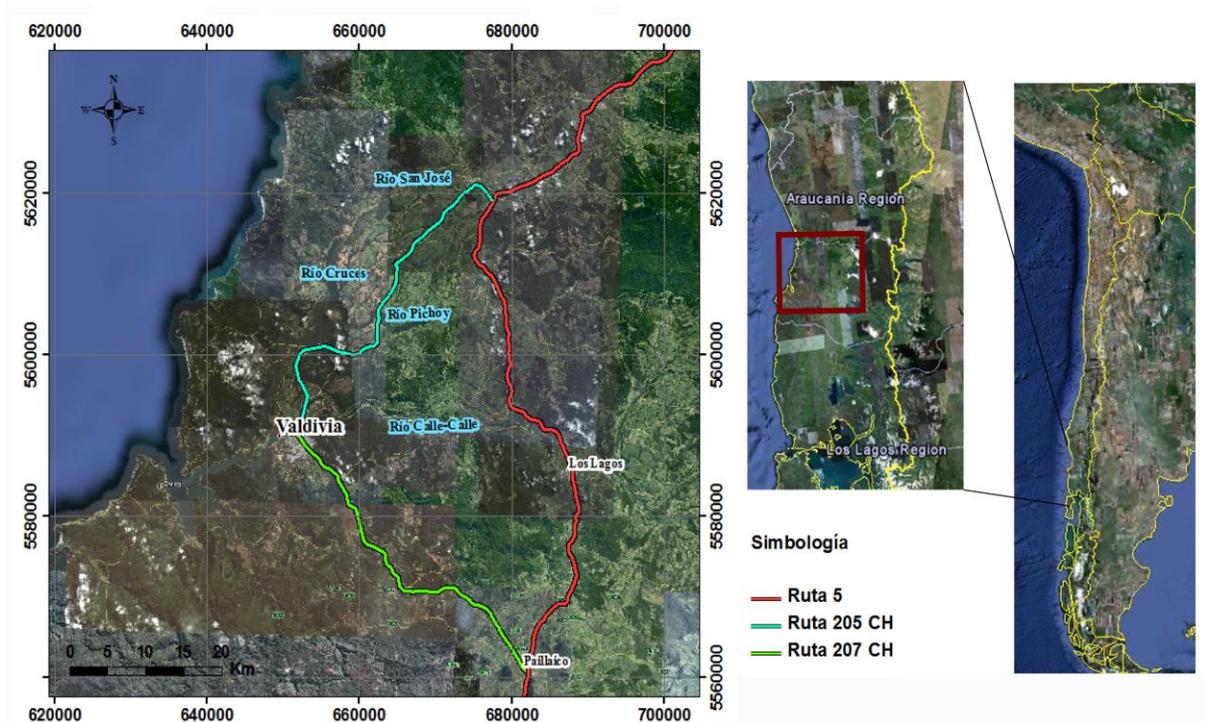


Figura I-1. Mapa de ubicación y accesos de la zona de estudio. Cuadro rojo muestra la zona de estudio. Imagen Quick Bird obtenida de Google Earth.

I.5 Clima y vegetación

La zona se caracteriza por presentar un clima templado cálido lluvioso (IGM, 1980), con temperaturas máximas promedio en el área de estudio de 23°C, en verano, y temperaturas mínimas promedio de 7°C, en invierno. Las precipitaciones medias anuales son de 1791 mm (± 370 mm; Marín *et al.*, 2009), distribuyéndose durante todo el año, pero con mayor concentración en los meses invernales, principalmente en el mes de junio. Estas son principalmente causadas por sistemas frontales de latitud media moviéndose hacia el Pacífico. Un año típico está caracterizado por un decrecimiento monótonico en la temperatura, empezando en enero (comienzos del verano) hasta fines de abril (mediados de otoño), donde las temperaturas comienzan a aumentar (Marín *et al.*, 2009).

La cobertura vegetal de la cuenca del Río Cruces presenta un alto porcentaje de terrenos agrícolas (54% del total del área de la cuenca), 817 km² de bosque nativo y mixto (27%), 376 km² de plantaciones de forestales de pino, *Pinus radiata*, y eucaliptus, *Eucaliptus glubulus* (15%), y el resto (aproximadamente 4%) corresponde a área urbanas (20 km²), matorrales y humedales (Arévalo *et al.*, 2005; Schlatter & Mansilla, 1998).

I.6 Marco teórico

I.6.1 Sistemas estuarios y fluviales

I.6.1.1 Sistema Estuarino

Los estuarios son considerados, en términos generales, como los cursos terminales de un río costero semi-abierto, dentro del cual el agua marina está mensurablemente diluida con el agua dulce, derivada del continente (Princhard, 1967). Dalrymple *et al.* (1992) lo definen como: la porción hacia el mar de un sistema fluvial drenado, que recibe sedimentos tanto de fuentes fluviales como de fuentes marinas, conteniendo, consecuentemente, facies influenciadas por la marea, el oleaje y procesos fluviales. Según estos autores, los estuarios son producto de una subida relativa del nivel del mar (*i.e.* transgresión), donde luego la progradación de facies tiende a rellenarlos y destruirlos, convirtiéndolos en deltas.

Usualmente un estuario se divide en tres sectores (Fairbridge, 1980; Reading, 1996): (a) sector marino o estuario externo, de alta energía y con conexión libre con el océano

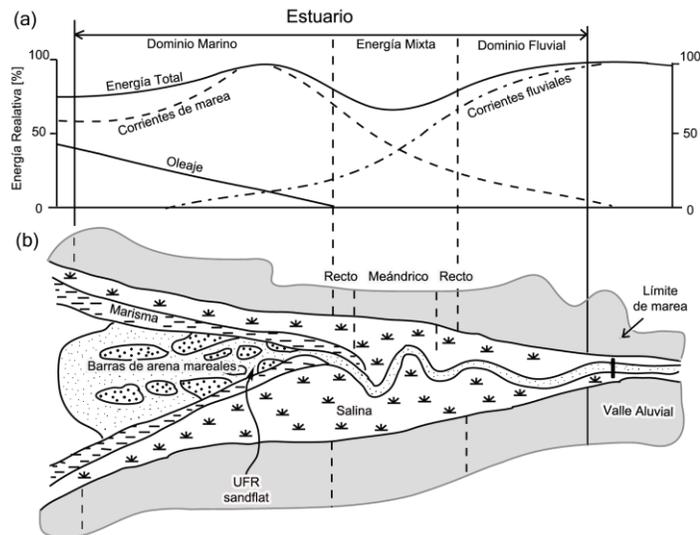


Figura I-2. Distribución dentro de un estuario dominado por mareas. (a) Tipos de energía (b) Componentes morfológicos. Modificado de Dalrymple, Zaitlin & Boyd (1992).

abierto; (b) estuario central, de baja energía y sujeto a una elevada mezcla de agua dulce y salada, presentando una red de convergencia de sedimentos finos; y (c) estuario interior o fluvial, caracterizado por agua dulce, pero sujeta a la acción mareal diaria, con transporte de sedimentos hacia el océano (Figura I-2).

Según las características fisiográficas basadas en el relieve relativo y en el grado de bloqueo de la desembocadura o boca del canal, se han reconocidos 7 tipos de estuarios modernos (Figura I-3; Fairbridge, 1980). La zona de estudio correspondería a un estuario tipo Tectónico (Figura I-3g; Pino *et al.*, 1994), formado durante el terremoto de Valdivia del 22 de mayo de 1960 (Sección II-1.1.1). Los estuarios tectónicos están caracterizados por una “forma embotellada”, formado por una ría de alto relieve precedido por una planicie de bajo relieve, creada por actividad tectónica.

Según el dominio principal, los estuarios se agrupan en dos tipos (Dalrymple, Zaitlin & Boyd, 1992): “Dominados por oleaje” y “Dominados por mareas”, siendo este último el correspondiente a la zona de estudio (Figura I-2).

Los estuarios dominados por mareas, en los cuales la energía de la corriente de marea excede a la energía de oleaje en la boca del estuario, pueden a su vez ser divididos en

tres zonas, según su energía: (i) marino-dominados; (ii) energía mixta (de menor energía total); y (iii) fluvial-dominados (Figura I-2). En la zona de dominio marino, la zona axial, dominada por arenas más gruesas cerca de la boca del estuario, estará flanqueada por planicies fangosas y marismas a lo largo del sistema. Tierra adentro, la zona axial pasa a facies de arenas más finas, con régimen de laminación planar. La zona central, de baja energía, mostrará una secuencia fluvial recta-meándrica-recta, progresión de la sinuosidad de los canales y sedimentos de granulometría más fina. Finalmente, más hacia la cabecera, el sistema pasa a la zona de dominio fluvial, con depósitos predominantemente de gravas y arenas.

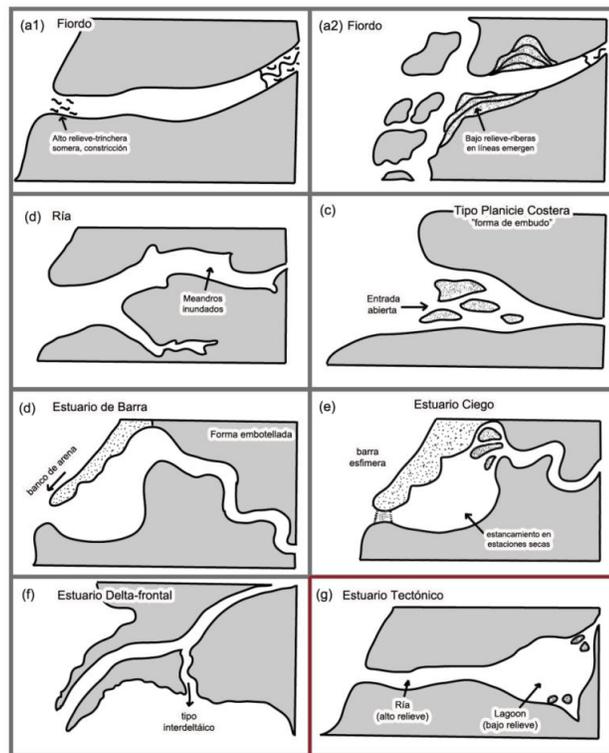


Figura I-3. Tipos principales de estuarios basados en sus características fisiográficas. Modificado de Fairbridge (1980).

I.6.1.2 Sistema fluvial

Los sistemas fluviales han sido reconocidos como el principal medio por el cual los sedimentos son transportados a lo largo de la superficie terrestre hacia su eventual lugar de deposición, correspondiente a lagos u océanos. En base a su morfología, existe un amplio espectro de tipo de ríos, dependiendo de la sinuosidad y del transporte, dominado por grava, arena o limo. Los principales tipos de ríos corresponden a: ríos trezados, ríos meándricos y ríos rectos (siendo estos últimos muy poco comunes). En la zona de estudio, el dominio fluvial de la cuenca del río Cruces corresponde principalmente al del tipo meándrico.

Los depósitos de los ríos meándricos están caracterizados por estar confinados a un canal mayor por bancos cohesivos difíciles de erosionar. Se caracterizan por su alta sinuosidad, bajos gradientes y por una carga sedimentaria fina (Boggs, 2001). En ocasiones, los ríos meándricos varían a ríos tipo anastomosados, con un sistema permanente y estable de varios canales de alta sinuosidad, con bancos cohesivos y separados entre sí por islas estabilizadas por vegetación.

Los elementos morfológicos de los ríos meándricos consisten principalmente en: (i) canal meándrico principal; (ii) barras de punta, que se van construyendo hacia afuera de lado interno de la curva del meandro; (iii) riberas naturales (*levee*); (iv) llanuras de inundación (v) derrame de llanura (*crevasse splay*); y (v) lagos semilunares (*oxbow lakes*) y meandros abandonados (Figura I-4). De esta manera, los sedimentos se acumulan en las diferentes partes de este sistema debido al flujo del canal y a inundaciones periódicas, generando depósitos de granulometría y estructuras sedimentarias características de cada subambiente.

Durante episodios de crecidas del caudal, el canal principal es el responsable de la erosión y deposición de sedimentos dentro del sistema (Boggs, 2001). Estos períodos de crecida ocurren periódicamente, a menudo estacionalmente. Durante condiciones de bajo caudal, la velocidad máxima del flujo del canal cambia de un lado a otro a través del canal, apegado a la parte cóncavo (exterior) del meandro. Durante condiciones de alto caudal, la corriente toma un camino más recto. El desplazamiento

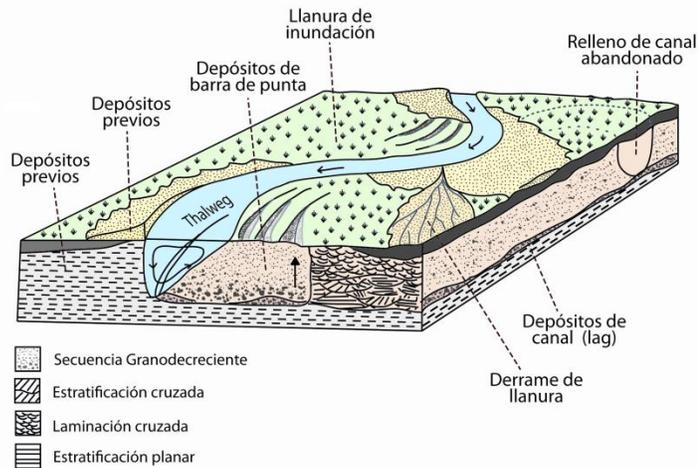


Figura I-4. Modelo clásico de deposición de barra de punta en una canal de río meándrico. Flecha vertical indica secuencia granodecreciente. Modificado de Allen (1970).

lateral establece un flujo transversal helicoidal que desvía el agua desde el banco externo cóncavo hacia el banco convexo interior del meandro. De esta manera, el flujo helicoidal transporta los sedimentos a través del canal y sobre los bancos empinados de las barras de punta adyacentes, donde son depositados en condiciones de baja velocidad (Figura I-4; Boggs, 2001). Sólo los sedimentos más gruesos son acumulados como depósitos de *lag* en la parte más profunda del canal.

Durante los periodos de inundación, el desborde del río permite la deposición de limo y arcillas en la orilla del banco, causando la construcción de las riberas naturales, siempre que la tasa de deposición exceda la tasa de destrucción del banco. De esta manera, los sedimentos finos son depositados en las llanuras de inundación y en los lagos semilunares adyacentes, principalmente por acreción vertical (Boggs, 2001). Las riberas naturales ocasionalmente pueden romperse, permitiendo que el agua cargada de sedimentos, en suspensión y como carga de fondo, sea rápidamente depositado en las llanuras de inundación, implicando la formación de derrames de llanura (*crevasse splay*).

A medida que el movimiento lateral de los distintos subambientes ocurre dentro del canal meándrico, los sedimentos de subambientes continuos se superpondrán o

apilarán verticalmente. Como resultado de esto, los depósitos gruesos de *lag* serán sobreyacidos por arena, limo y arcilla, formando una secuencia granodecreciente en las barras de punta (Figura I-4).

I.6.1.3 Secuencias de Valles Incididos

Los sistemas de valles incididos consisten en la incisión del valle y su relleno sedimentario (Dalrymple *et al.*, 1992). Este relleno sedimentario típicamente comienza a acumularse durante un consiguiente aumento del nivel de base. Puede contener depósitos seguidos de un alto estadio y subsecuentes ciclos del nivel del mar. Estos sistemas pasan, tierra adentro, a sistemas no incididos: sistemas de canales fluviales que alimentan el valle (Figura I-2).

La incisión fluvial es promovida en primera instancia por: (i) una caída relativa del nivel base, ya sea por una caída del nivel del mar o por alzamiento tectónico; y (ii) un incremento en la descarga del río causado por cambios climáticos o captura de redes fluviales. Posterior a la incisión, la transgresión del estuario comienza, implicando el relleno estuarino y la progradación de barras de arenas y planicies mareales (Reading, 1996).

La parte más externa del sistema está predominada por las facies de bajo estadio, hasta donde la línea de costa se estabiliza cuando comienza la progradación durante el alto estadio. Mientras el nivel base está bajo, el valle es cortado por la incisión fluvial, formando el límite de secuencia (Figura I-5). Durante esta fase, también puede ocurrir deposición fluvial, mientras el nivel relativo del mar comienza a aumentar, implicando una superficie de inundación transgresiva sobre los depósitos fluviales. Mientras el nivel relativo del mar continúa aumentando, se depositan secuencias granodecrecientes, pasando de depósitos de arena a depósitos mixtos de arena/limo. Mientras la transgresión continua, las condiciones de estuario se establecen en la parte más costera, migrando tierra adentro (Reading, 1996).

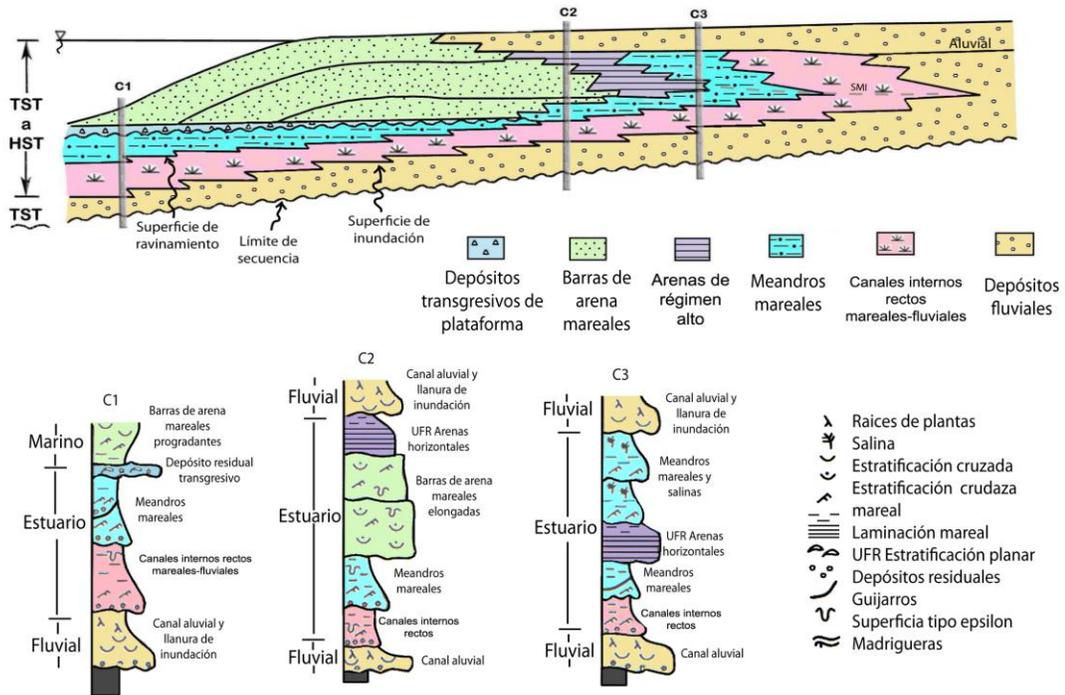


Figura I-5. Sección esquemática a lo largo del eje de un Estuario Dominado por Marea mostrando la distribución de las litofacies resultantes de una caída temprana del nivel del mar, seguida de una transgresión del estuario, relleno de estuarino y progradación de barras de arena y planicies mareales. La cantidad de la secuencia de transgresión preservada depende de las tasas relativas de las subidas del nivel del mar y de la traslación del *thalweg* o de los canales mareales. Modificado de Dalrymple, Zaitlin & Boyd (1992).

La parte media del sistema, que se extiende entre el límite marino-estuarino hasta la superficie de máxima inundación (correspondiente al periodo de máxima transgresión), corresponde al área ocupada por valle inundado por el estuario, hasta el final de la secuencia de transgresión (Figuras I-2 y 5). Los depósitos predominantes son secuencia de arenas (de régimen alto) granocrecientes de un sistema progradante, pasando a depósitos fluviales en la fase de alto estadio. El límite tierra adentro está limitado por la influencia marina, características mareales o traza de aguas salobre (Reading, 1996).

La parte más interna del sistema se extiende desde el límite de influencia del estuario hasta el límite de la incisión, donde el nivel relativo del mar no controla el estilo fluvial (Figuras I-2 y 5). El estilo fluvial dominante en esta zona puede ir variando sistemáticamente debido a cambios en el nivel base y a la tasa de creación de espacio

de acomodación (Reading, 1996). Los depósitos fluviales durante el bajo estadio serán relativamente delgados si el sistema fluvial es predominantemente erosivo o actúa como una zona de *bypass*. Los depósitos durante la transgresión temprana pueden ser relativamente gruesos y dominados por la coalescencia de canales de arena, pasando a una secuencia granodecreciente en cuerpos de arena aislados interdigitados con depósitos de desbordamiento más finos (e.g. barras de punta).

De esta manera, la secuencia de valle incidido estará dividida principalmente en tres superficies estratigráficas. La base estará formada por la “superficie de límite de secuencia”, formada por la incisión fluvial; sobre ésta la “superficie de inundación”, comúnmente reconocida entre el contacto estuario-fluvial, pudiendo representar además una superficie transgresiva, la cual separa las secuencias progradantes o agradantes del bajo estadio, de las secuencias retrogradacionales; y sobre esta última, estará la “superficie de ravinamiento”, la cual puede ser producida por diferentes tipos de canales mareales (Figura I-5).

I.6.2 Mineralogía y Geoquímica de sedimentos fluviales y estuarinos

Los ríos y estuarios pueden ser considerados como sistemas acuáticos complejos en cuanto a la fuente y composición de sus sedimentos (e.g. Moros *et al.*, 2010; Sensarma, 2008; Meybeck, 2003). Debido a la hidrología que afecta a los procesos deposicionales en los estuarios, estos ambientes poseen características altamente variables tales como: pH, salinidad, tipo de sedimento, habitantes biológicos, nivel del agua, y procesos deposicionales y de transporte. La proveniencia de los sedimentos depende de todos los aspectos del área de drenaje de la cuenca, incluyendo: litología fuente, geomorfología, energía de transporte e hidrodinámica del ambiente deposicional (Sensarma, 2008), siendo probablemente el más relevante la litología de la roca caja del sistema fluvial (Olivia *et al.*, 2003). De esta manera, la composición geoquímica de los sedimentos clásticos es resultado de una serie de factores geológicos, y posiblemente también biológicos (Sensarma, 2008). Entre estos factores se encuentran: (i) la naturaleza de la roca fuente y la intensidad de su meteorización

química; y (ii) la tasa de ingreso de sedimentos y la selección de éstos, tanto textural como mineralógica, durante su transporte y deposición (e.g. Sensarma *et al.*, 2008).

La fase acuosa está constantemente sometida a intercambio químico con el material en suspensión y los sedimentos en el lecho del río. Son precisamente estos intercambios, y la traza geoquímica que estos dejan en los sedimentos que son preservados a lo largo del tiempo, los que nos dicen la historia pasada o reciente de los sistemas fluviales, proveyendo de valiosa información de los cambios geológicos, geoquímicos, climáticos u otras condiciones (Apitz *et al.*, 2009).

I.6.2.1 Influencia de la litología

La litología es un factor esencial en la determinación de la geoquímica de un río, especialmente a escala local (Meybeck, 2003). Ésta, a su vez, depende de la abundancia relativa de los minerales específicos y de la susceptibilidad de cada mineral a ser meteorizado. La escala de meteorización usualmente adoptada es la propuesta por Stallard (1995), desde el mineral más estable al menos estable: cuarzo > feldespatos potásico, micas > feldespatos sódico > feldespatos cálcico (plagioclasa), anfíbolos > piroxenos > dolomita > calcita > pirita.

La fracción sedimentaria fina son el resultado del tiempo, la meteorización, y de la desintegración de los minerales, durante y después del transporte desde el área de recarga de la cuenca, hasta el depósito sedimentario. Las partículas finas poseen mayores concentraciones naturales de metales trazas que los sedimentos menos meteorizados (a menudo de grano más grueso; >63 µm), pertenecientes a la misma matriz mineral parental. Esta fracción de grano más grueso, que puede sobrevivir al transporte, está hecha de minerales más resistentes (e.g. granos de cuarzo), los cuales contienen menores cantidades de metales dentro de su estructura y tienen menor área superficial específica. Así, en términos simples, estas dos fracciones son mezcladas y depositadas en porciones variables, en función de la hidrodinámica de la cuenca sedimentaria (Apitz *et al.*, 2009).

I.6.2.2 Elementos Mayores

La alteración química y mecánica de la roca caja, descompone y desintegra las rocas primarias. La posterior selección de las partículas durante el transporte implica, a menudo, el enriquecimiento preferencial de ciertos minerales específicos en granos de cierto tamaño, por lo que la composición de los sedimentos tiende a ser función de la granulometría (Whitmore *et al.*, 2004). Debido a esto, y dependiendo de la distancia a la fuente, podrán existir variaciones significativas en las concentraciones de los elementos mayores, las cuales se relacionan con el nivel de meteorización de los sedimentos. Se puede observar, por ejemplo, mayores concentraciones de Al_2O_3 , TiO_2 y Fe_2O_3 a mayores grados de meteorización (Sensarma *et al.*, 2008).

El patrón de distribución de los elementos en los sistemas fluviales ha sido interpretado como función de múltiples fuentes, sumideros y controles en la geoquímica fluvial. Cada elemento puede tener múltiples fuentes y sumideros (Figura I-6), al igual que los principales factores de control de cada elemento (Meybeck, 2003).

Entre los factores que controlan la geoquímica de los ríos están (Meybeck, 2003): (i) Clima: las altas temperaturas en general incrementar la disolución de los minerales; (ii) Escorrentía: un mayor caudal incrementará las tasas de meteorización, mientras que bajos caudales incrementarán la retención de los elementos en el suelo; (iii) Distancia a los océanos: como factor controlante de la entrada de sales marinas; (iv) Tectónica: ejerciendo un control regional, puesto que en márgenes tectónicamente activos, con volcanismo y alzamiento, las rocas “frescas” serán más fácilmente erosionadas que aquellas rocas superficiales expuesta durante millones de años en los cratones estables, donde los minerales más solubles ya han sido reemplazados por minerales menos solubles como cuarzo, arcillas, y óxidos de aluminio y hierro (Stallard, 1995); Vegetación: la meteorización de los minerales silicatos y carbonatados dependerá también de los ácidos orgánicos generados. De esta forma, debido al efecto de la litología local, distancia al océano, clima y tectónica regional, y la ocurrencia de lagos y ríos, la geoquímica en una determinada área puede ser altamente variable.

	Iones Mayores							Controles							
	SiO ₂	K	Na ¹	Cl	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	DIC	T°	t	q	d	Qh	V	T
Fuentes Naturales															
Atmósfera															
Meteorización de silicatos	—————					—————			+		+		x	+	-
Pirita	—————					—————					+				
Carbonatos						—————					+			+	
Yeso						—————					+				
Halita			—————								+				
Aguas subterráneas	—————														-
Sumideros Naturales															
Vegetación terrestre	-----								+		+			+	-
Suelos	—————										-		x		-
Lagos	—									+			x		
									prod	pop	fert	trat	irrig	nb	
Fuentes Antropogénicas															
Minas			-----						+				+		
Industrias			-----						+				+		
Ciudades			—————							+					
Agricultura			—————										+		
Sumideros Antropogénicos															
Reservorios	—														+
Suelos irrigados	—————												+		

Figura I-6. Fuentes, sumideros y controles principales de los iones mayores en los ríos actuales. + , - : incremento y decrecimiento relativo relacionado al control; x : relación compleja; DIC: Carbono inorgánico disuelto (*disolved inorganic carbón*); T° : temperatura; q : escorrentía; d: distancia al océano; QH: Historia cuaternaria (*Cuaternary history*); V : biomasa terrestre; t : tiempo de residencia del agua; T : volcanismo, alzamiento tectónico y subsidencia; Prod: producción; pop: población urbana; fert: tasa de fertilización; treat: tratamiento de y reciclaje de aguas; irrig: pérdida de agua por riego; nb: volumen del reservorio y eutrofización. Modificado de Meybeck (2003).

I.6.2.3 Elementos Trazas

Los ríos son las arterias primarias en el transporte y redistribución de los metales en la superficie terrestres. Dentro del sistema fluvial, la fracción fina de los sedimentos (<2 mm) son los principales transportadores de metales trazas, y una vez depositados a lo largo de los ríos, estas partículas portadoras de metales pueden residir en las llanuras de inundación, o en otros depósitos fluviales, por cientos de años (Hudson-Edwards, 2000). Por lo tanto, la abundancia de los elementos trazas en los ríos no sólo dependerá de su abundancia en la roca fuente, sino también del estilo de meteorización y deposición.

Existen tres grupos principales de elementos (Gaillardet *et al.*, 2004): (i) aquellos que no son afectados por el procedimiento de ultrafiltración y se encuentran presentes como iones disueltos (e.g. calcio, magnesio, litio, sodio, potasio, estroncio, bario,

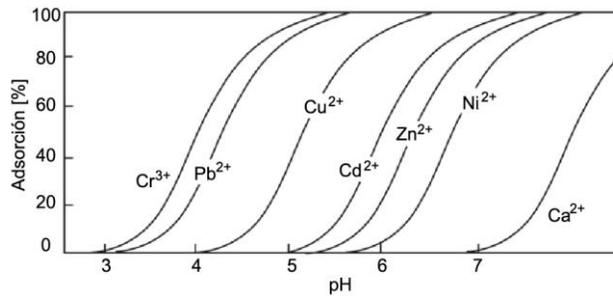


Figura I-7. Proporción de cationes y aniones absorbidos en la superficie de hidróxidos, a altas razones de adsorción. Modificado de Gaillardet (2004).

rubidio, cesio, silíceo); (ii) aquellos que están presentes en la fracción más fina (1-10 kDa¹) bajo la forma de complejos orgánicos e inorgánicos (e.g. manganeso, cobalto, níquel, cobre, zinc cadmio, cromo, itrio); y (iii) aquellos que están fuertemente asociados con grandes coloides de hierro (e.g. fósforo, aluminio, plomo, vanadio, cromo, titanio).

Hay varios tipos de sólidos capaces de interactuar con los elementos trazas disueltos, generalmente mediante procesos de adsorción: la superficie de los óxidos, carbonatos y sulfuros; la superficie de los minerales de arcilla; la materia orgánica; y las partículas coloidales (Gaillardet *et al.*, 2004). Específicamente, las partículas coloidales (partículas amorfas muy pequeñas con altas áreas de superficie específica y altas capacidades de adsorción) son uno de los mayores transportadores de elementos trazas en los ríos (Gaillardet *et al.*, 2004). La adsorción sobre hidróxidos (e.g. hidróxidos de Fe-Mn) también es uno de los mayores reguladores de la concentración de elementos trazas en los ríos. Sin embargo, la adsorción de los cationes y aniones también dependerá fuertemente del pH, teniendo, por ejemplo, una mayor adsorción de cationes a mayores valores de pH (Figura I-7). El rango de pH en el cual la adsorción se lleva a cabo dependerá a su vez de las propiedades ácido-base de la superficie y de las constantes de adsorción del metal (Gaillardet *et al.*, 2004).

¹kDa=kilodalton=1.66 x 10⁻²⁷ kg.

II. CAPÍTULO: MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

II.1 Geomorfología e hidrología de la cuenca del Río Cruces

La cuenca del río cruces se extiende a través de tres rasgos geomorfológicos principales, de este a oeste: Cordillera de los Andes, Valles Centrales y Cordillera de la Costa. Específicamente, el área de estudio se sitúa entre el rango de los valles centrales y el sector costero, principalmente en la unidad morfológica de la Cordillera de la Costa, donde ésta alcanza alturas de hasta 700 m s.n.m. con pendientes altas a moderadas, y en la Depresión San José de la Mariquina (en el sector noreste) y Depresión de Valdivia (en el sector sur), que constituyen en planicies aluviales que no superan los 25 m s.n.m. y los 13 m s.n.m., respectivamente (Figura II-1).

La cuenca del río Cruces corresponde a una subcuenca de la cuenca del río Valdivia. Esta última se caracteriza por contener, en su curso alto, una cadena de grandes lagos dispuestos en serie: lagos Calafquén, Panguipulli y Riñihue (Figura II-1). Los principales ríos tributarios de la cuenca de Valdivia son el río Calle-Calle y el río Cruces.

El río Cruces nace con el nombre de San José Copihuelpi, de la reunión de varios esteros que se originan en la vertiente occidental de los cerros situados entre los lagos Villarrica y Calafquén (Dirección General de Aguas, 2004). Tiene un desarrollo total de 125 km de NE a SO, formando un valle aluvial encajonado, entre riberas acantiladas con numerosas vueltas y meandros que dejan islas y pantanos (Reinhardt *et al*, 2010). Su ancho varía, en su parte terminal, entre 75 m y 3.5 km, con profundidades aproximadamente de 4-5 m en promedio y amplios bancos poco profundos de

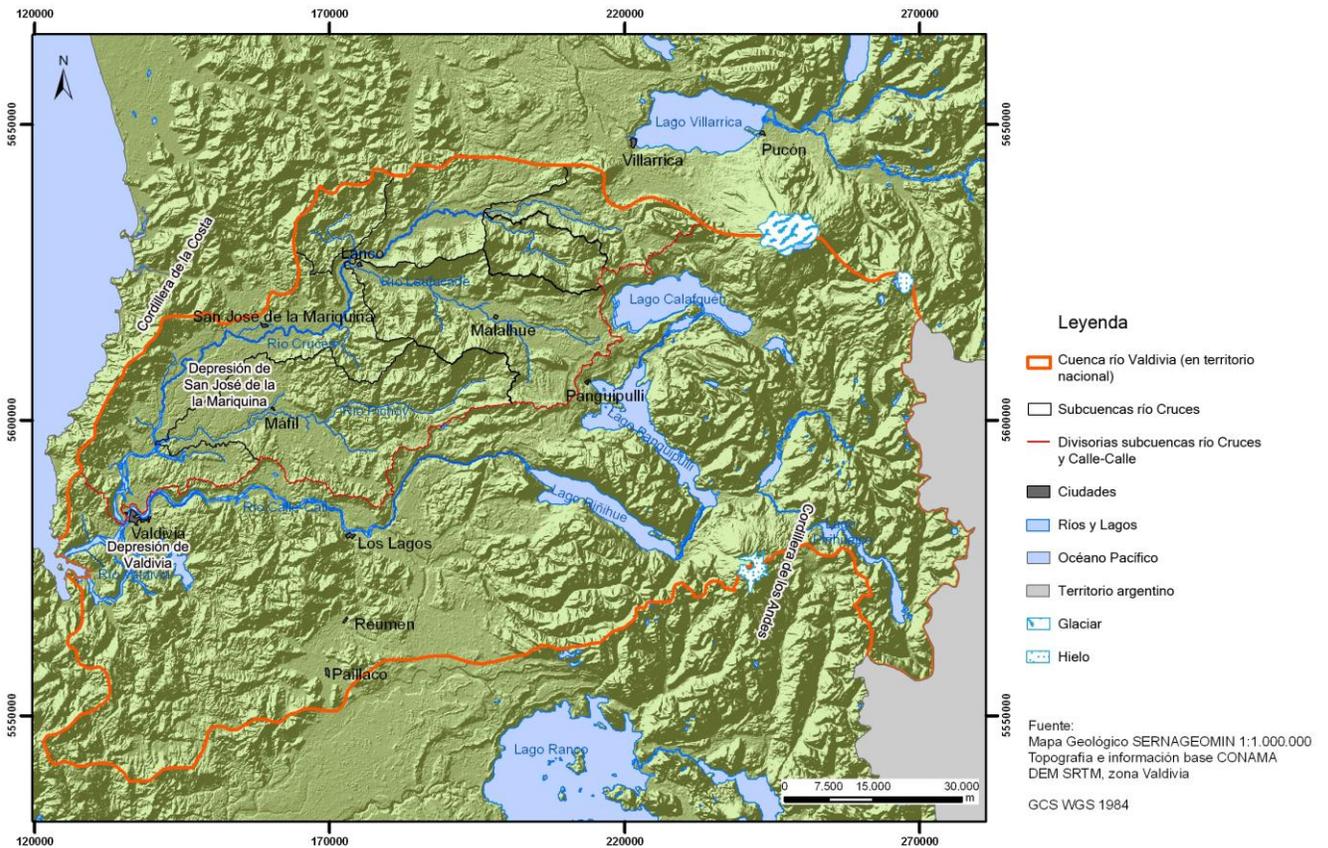


Figura II-1. Rasgos geomorfológicos principales e hidrología de la cuenca del Río Valdivia.

0.25 a 1 m. Las mayores profundidades se encuentran en el sector sur del Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter (Ramsar; Irán, 1971) en los últimos 10 km, alcanzando una profundidad de hasta 12 m en el cauce del río.

El río Cruces drena una superficie de 3233 km², con un caudal medio anual de 92.3 m³/s, con fluctuaciones de promedio de 179.3 m³/s máxima en invierno y 37.2 m³/s mínima en verano (Estación Rucaco, entre 1969 a 1993). Las aguas de escorrentía se han dividido en dos partes. Una cuenca alta que recoge las aguas antes del Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, y la cuenca baja, que corresponde a las aguas reunidas por ríos afluentes del río Cruces, en el sector del santuario. La cuenca alta aporta al sistema un caudal de 97.4 m³/s, en cambio la baja, en conjunto,

aporta 74.4 m³/s. Estas aguas se acumulan en un poco más de 10 % en los cauces profundos y el resto en las aguas someras.

Las aguas del humedal del río Cruces presentan un pH promedio de 6.7, con valores alrededor de 6.0 durante el invierno y hasta un pH 9.0 en verano (Schlatter & Mansilla, 1998). Según estos autores, el estuario se encuentra en el proceso de eutrofización.

Los ríos tributarios más importantes son: Pichoy, Nanihue, San José, Leufucade, Santa María, Cayumapu y Caucau. Al llegar a la ciudad de Valdivia se une con el río Calle-Calle para conformar, en su confluencia, al río Valdivia (Figura II-1). Estos ríos forman parte del sistema estuarino que desemboca al mar en la bahía de Corral y cuya cuenca hidrográfica tiene una superficie total aproximada de 11.120 Km², lo que la hace la primera cuenca binacional de norte a sur (Arevalo *et al.*, 2005; Schlatter & Mansilla, 1998).

II.1.1 Formación del estuario y humedal del Río Cruces

El terremoto del 22 de mayo de 1960, el mayor registrado en la historia (Ms=8.8, Mw=9.4; Servicio Sismológico, Universidad de Chile, 2004), tuvo en la zona de estudio su máximo impacto, con el consecuente maremoto en Corral (con olas de hasta 10 m), inundación por desplazamientos que regresaron el lago Riñihue (25 de julio de 1960) y subsidencia del terreno de 1 a 2 m en promedio (Figura II-2b), llegando hasta 2.7 m de subsidencia en áreas cercanas a Valdivia (Plafker and Savage, 1970).

La subsidencia cosísmica, causada por el efecto combinado de la compactación y subsidencia regional, provocó la profundización de los ríos más costeros, incluyendo al río Cruces, ampliación de sus canales (la amplitud del canal del río Cruces pre-1960 era sólo de 250 a 400 m; Reinhardt *et al.*, 2009), creación de bancos someros (que formaban parte de llanuras de inundación y terrenos agrícolas y forestales pre-1960) y la creación de extensos humedales, modificando de esta manera la geomorfología de la zona (Figura II-2a). Dentro de estos humedales, se ubica el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter del río Cruces (declarado en 1981), com-

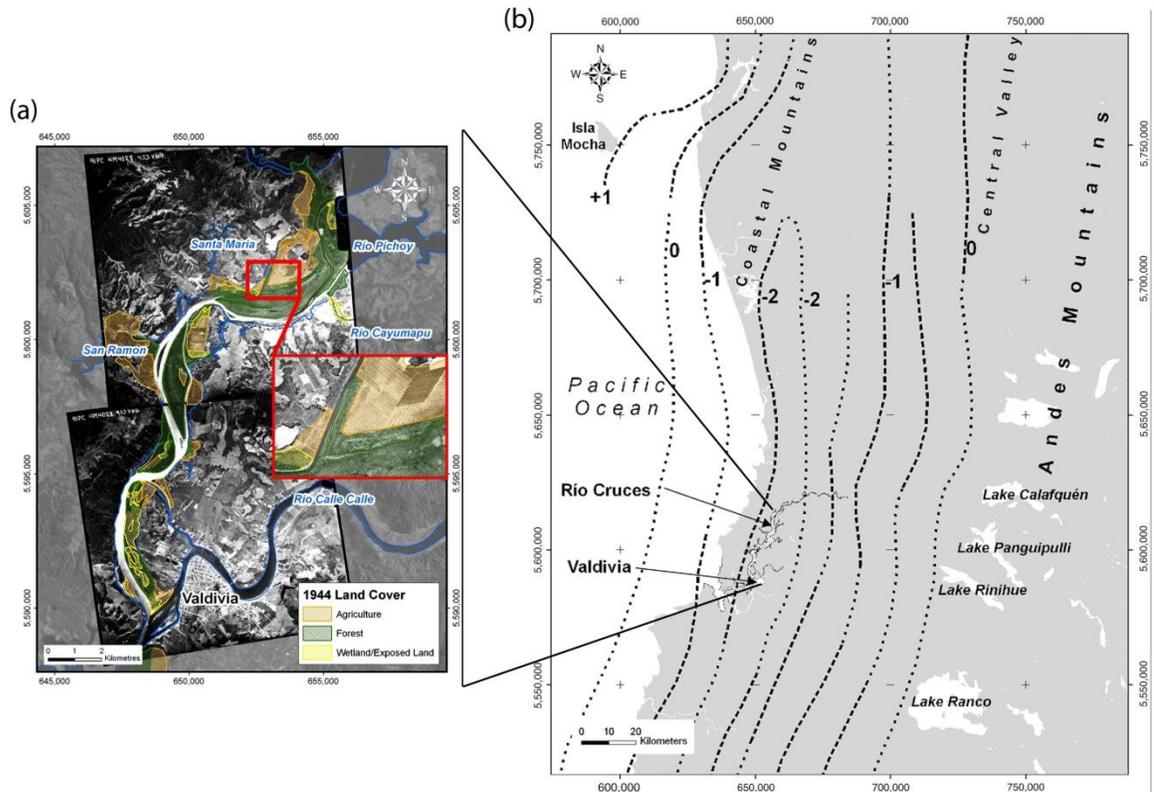


Figura II-2. (a) Mosaico de fotografías aéreas mostrando la geomorfología de 1944, previa al terremoto de 1960 y la consecuente subsidencia del terreno (b) Contornos de isobase (líneas puntadas son inferidas) mostrando el nivel de subsidencia o levantamiento, en metros, después del terremoto de Valdivia de 1960. Modificado de Reinhardt *et al.*, 2009.

prendido en el área estuarina de la zona baja del río Cruces, que abarca una superficie aproximada de 4.877 hectáreas, con características de humedal interior y, en algunos sectores, marino/costero (Schlatter & Mansilla, 1998).

II.2 Marco Geológico

El conocimiento geológico es fundamental en la mayoría de los estudios de carácter ambiental (Arenas *et al.*, 2005). La composición y geoquímica de las rocas aflorantes en los alrededores y zonas afluentes de un río puede influenciar significativamente, junto con la morfología del río, el tipo de sedimentos fluviales presentes en su lecho, en cuanto a su sedimentología y composición geoquímica.

En la zona de estudio afloran depósitos cuaternarios de origen glacio-fluvial y fluvio-estuarino; sedimentitas marinas y continentales del Mioceno; rocas intrusivas del Paleozoico y Cretácico, y rocas metamórficas del Paleozoico-Triásico (Figura II-3). Su historia geológica se caracteriza por una fuerte influencia tectónica con numerosos hundimientos y alzamientos del terreno asociados a sucesivas regresiones y transgresiones marinas que han quedado registradas en las rocas sedimentaria de los alrededores de Valdivia (Arenas *et al.*, 2005).

II.2.1 Paleozoico

II.2.1.1 Complejo Metamórfico Bahía Mansa (Duhar et al., 1998)

Las rocas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) consisten en: (i) esquistos pelíticos a semipelíticos, metaareniscas y metacherts, caracterizados mineralógicamente por asociaciones de cuarzo-muscovita, cuarzo-albita-muscovita-biotita, cuarcitas graníticas, micáceas, ferruginosas, y anfibolitas y esquistos de actinolita; (ii) intercalaciones de esquistos máficos (metabasitas) de color verde, con asociaciones mineralógicas típicas de cuarzo-albita-clorita-anfíbola-epidota, cuarzo-hematita-muscovita, titanita, hornblenda, mica blanca (phengita) y cuarzo; y (iii) esquistos anfibolíticos y peridotitas serpentinizadas, correspondientes a escasos cuerpos de rocas ultramáficas tectónicamente emplazadas (Ojeda, 1976), asociadas a rocas cloríticas-antigoríticas, esquistos talcosos, tremolíticos, nefritas, etc., que afloran principalmente en el Morro Gonzalo y Morro Bonifacio.

II.2.1.2 Formación Panguipulli (Aguirre & Levi, 1964)

Corresponde a una secuencia de rocas sedimentarias y metamórficas de bajo grado, de edad Triásica superior y/o Paleozoico Superior. Está constituida principalmente por metareniscas, pizarras y filítas oscuras, algo micáceas, intercaladas con conglomerados cuarcíferos, metaformizados en algunos sectores a metaconglomerados y cuarcitas; al microscopio presentan cuarzo, albita, muscovita y

biotita, como minerales esenciales, y turmalina y leucoxeno como accesorios (Di Biase & Lillo, 1973).

II.2.1.3 Batolito Panguipulli-Riñihue (Aguirre & Levi, 1964)

Rocas graníticas correspondientes a granitos, dioritas de piroxeno, tonalitas, granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda, y, en menor proporción, a rocas aplíticas y granitos pegmatíticos. Ocupan gran parte de la Cordillera de los Andes de la Provincia de Valdivia, extendiéndose en una franja N-S. Se encuentra intruyendo a la Formación Panguipulli. Las rocas granodioríticas presentan cuarzo, plagioclasa (parcialmente alterada a sericita), feldespato potásico, biotita (parcial o totalmente alterada a clorita), hornblenda y minerales opacos. La edad asignada es Carbonífero-Pérmico (328-235).

II.2.2 Mesozoico

II.2.2.1 Formación Tralcán (Aguirre & Levi, 1964)

Secuencia de rocas sedimentarias continentales constituidas por conglomerados con matriz de arenisca, de color gris rojizo, con intercalaciones de lutitas rojas con abundante flora fósil, y en menor proporción, por conglomerados brechosos. Los clastos son predominantemente de cuarzo y cuarcitas y, en menor cantidad, por fragmentos de feldespatos y rocas. Las areniscas presentan, a su vez, una matriz sericítica, en parte limosa y con pequeñas zonas de hematita y magnetita. La edad asignada a esta formación es Triásico Superior. Ha sido interpretada como secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres, en parte transicionales.

II.2.2.2 Plutón Panguipulli (Aguirre & Levi, 1964)

Monzodiorita cuarcífera, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. La edad asignada es jurásico Medio a Superior (180-182 Ma).

II.2.2.3 Rocas Intrusivas Granodioríticas y Dacíticas (Arenas *et al.*, 2005)

Corresponden a granodioritas de grano medio a grueso, con biotita y hornblenda. Intruyen al CMBM. Presentan fenocristales de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, hornblenda y biotita parcialmente reemplaza por clorita. Las edades asignadas según dataciones U-Pb, en zircón, y K-Ar, en una mezcla de biotita y clorita, son de 85.1 ± 1 Ma y 91 ± 2 Ma, respectivamente.

II.2.3 Cenozoico

II.2.3.1 Formación Cura-Mallín (Aguirre & Levi, 1964)

Se designa con este nombre al conjunto de lavas (cordadas y de bloque) y piroclastos (brechas, tobas, y bombas de lapilli y ceniza) de composición andesítica y/o basáltica, y lahares. El espesor de la serie efusiva máfica varía desde algunas decenas de metros. En base a sus relaciones de contacto se le asigna una edad Oligoceno-Mioceno.

II.2.3.2 Estratos de Pupunahue (Illies, 1970)

Unidad sedimentaria continental a paralítica. La secuencia es granodecreciente, compuesta por alternancias de conglomerados arenosos y areniscas gruesas a microconglomerádicas, que gradan a areniscas arcillosas. Los clastos corresponden principalmente a cuarzo y fragmentos de esquistos micáceos. Las areniscas son ricas en materia orgánica, con intercalaciones de carbón pizarrosos (mantos de has 1 m de potencia). La edad asignada corresponde al límite Oligoceno-Mioceno. Los depósitos de esta unidad han sido interpretados como depósitos de canales trenzados que se acumularon en valles fluviales y en la parte intermedia de abanicos aluviales (Elgueta *et al.*, 2000).

II.2.3.3 Formación Santo Domingo (Martinez & Pinto, 1979)

Secuencia sedimentaria marina transgresiva, con asociaciones laterales de carácter parálico-continental. Está constituida por: i) areniscas finas a muy finas, fangolitas (limolitas y arcillolitas) cuarzo-líticas muy micáceas, con horizontes fosilíferos; y ii) areniscas cuarzo-líticas, de granulometría media con clastos de cuarzo y líticos de proveniencia metamórfica. La naturaleza de la sucesión marina y las asociaciones de macro y microfauna sugieren que estas facies se depositaron en bahías protegidas, de baja energía, formadas tras la inundación de valles fluvioestuarinos (Elgueta *et al.*, 2000). La edad asignada es Mioceno Inferior a Medio.

II.2.3.4 Formación Malleco (Aguirre & Levi, 1964)

Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. La edad asignada es miocena.

II.2.3.5 Depósitos sedimentarios no consolidados

II.2.3.5.1 Estratos de Niebla (Elgueta *et al.*, 2000)

Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados, coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos. La edad asignada es Pleistoceno.

II.2.3.5.2 Depósitos Volcánicos recientes

Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos. Corresponden a rocas

principalmente calco-alcaldas. Comprenden depósitos volcánicos de edad cuaternaria.

II.2.3.5.3 Depósitos morrénicos, glaciofluviales y fluvioestuarinos (Porter, 1981)

Corresponden a los depósitos de las glaciaciones de Río Llico, Santa María, Llanquihue y del último período interglacial. Están compuestos principalmente por: (i) gravas y arenas gruesas, polimícticas; (ii) arenas, gravas finas arenosas, limos y arcillas, que se intercalan con capas limosas con abundantes fósiles marinos y niveles de turba. Los fragmentos corresponden, principalmente, a rocas volcánicas (basaltos y andesitas), rocas intrusivas, rocas metamórficas (esquistos), cuarzo, magnetita y pómez. En algunos sectores presentan óxidos de hierro y manganeso en forma de pátinas, halloysita, caolinita y montmorillonita (Arenas *et al.*, 2005). Los materiales finos, probablemente correspondan a ambientes de estuario y palustre, con presencia de pantanos y lagunas con importante componente orgánico y fauna marina. Los materiales más gruesos podrían representar ambientes de deposición fluvial y/o litoral. En los sectores costeros corresponderían a depósitos deltaicos (Pino *et al.*, 2002). Los depósitos glaciofluviales provendrían de las cuencas glaciadas de los lagos Panguipulli y Riñihue. La edad asignada es Pleistoceno-Holoceno.

II.2.3.5.4 Fluviales (Arenas *et al.*, 2005)

Corresponden a depósitos fluviales y fluvioestuarinos, que conforman las terrazas fluviales más bajas (hasta 5 m s.n.m.) de los actuales cauces de los ríos. Están compuestos por gravas y arenas, gruesas, clasto soportadas, y en menor proporción, arenas finas, limos y arcillas con alto contenido de materia orgánica, propios de un ambiente estuarino. Los clastos corresponden principalmente a rocas volcánicas (basaltos y andesitas) e intrusivas, con cantidades subordinadas de rocas metamórficas y cuarzo, las que aumentan en las cercanías del basamento metamórfico. Han sido asignadas al período *post*-glacial (Pleistoceno-Holoceno).

II.2.3.5.5 Depósitos coluviales, aluviales y de remoción en masa

Corresponden a depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltáicos, litorales o indiferenciado.

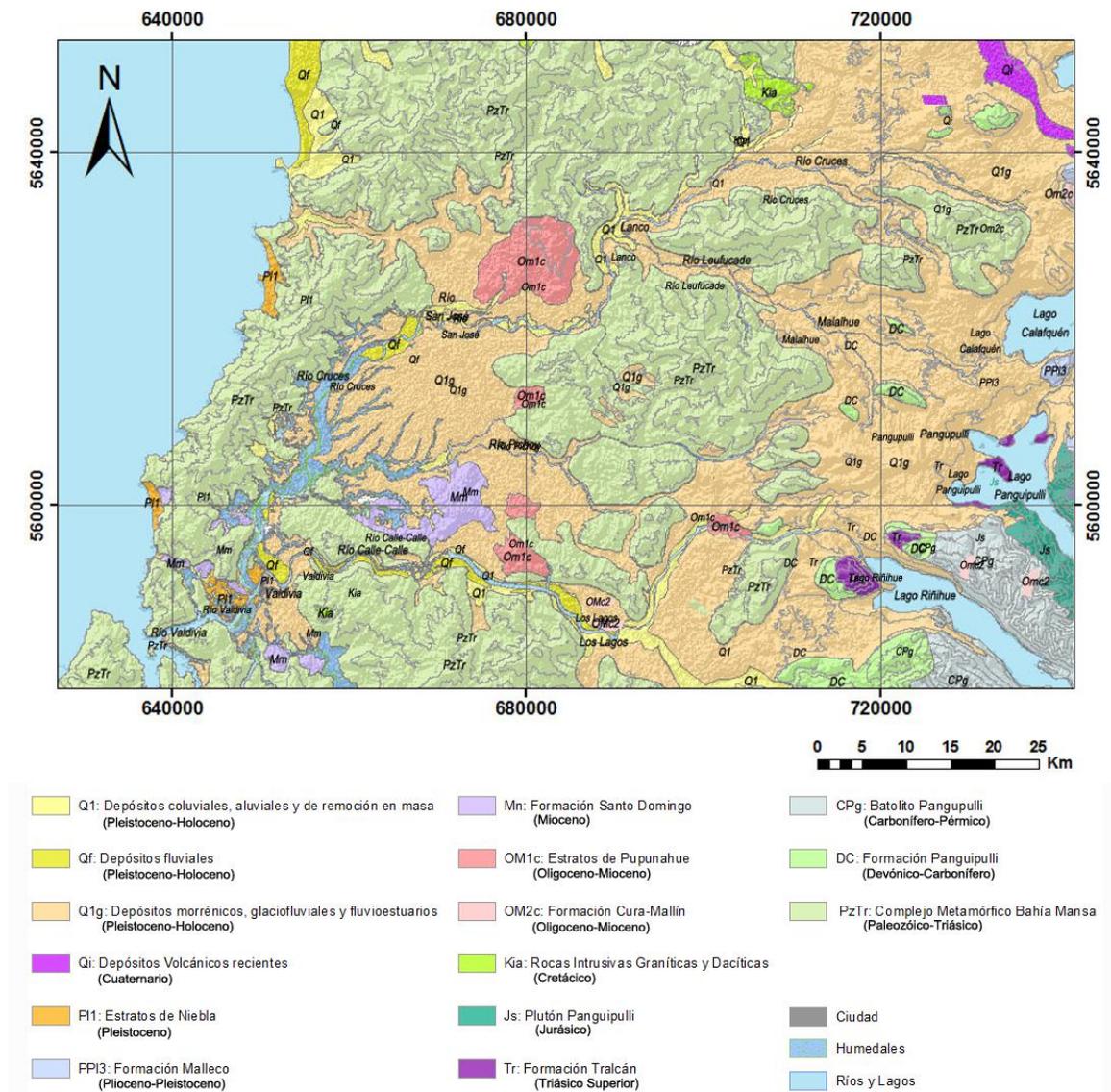


Figura II-3. Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Arenas *et al.* (2005), McDonough *et al.* (1998), Mapa escala 1:1.000.000 SERNAGEOMIN; DEM SRTM, zona Valdivia; GCS WGS 1984.

II.3 Yacimientos Minerales de la Provincia de Valdivia

II.3.1 Metálicos

II.3.1.1 Antimonio

En la provincia de Valdivia sólo se conoce el yacimiento “Los Joaquines”, ubicado a 200 m s.n.m. en la ribera sur del río Futa (Figura II-4; Di Biase & Lillo, 1973). El mineral se presenta en lentes aislados y discontinuos en esquistos micáceos, con cristales de estibinita (sulfuro de antimonio), esfalerita, pirita y cuarzo.

II.3.1.2 Cobre

Aunque en Valdivia no se conocen yacimientos de Cu, existen posibilidades de mineralización, tanto en las rocas del basamento metamórfico, como en los contactos de las rocas intrusivas cretácicas, como ocurre en la provincia de Cautín (Di Biase & Lillo, 1973). Según un estudio geoquímico realizado por Di Biase & Lillo, 1973, en zona de estudio se establecieron áreas de posible interés (con concentraciones mayores al umbral de 45 ppm) en el lecho del río Cruces (entre las confluencia de los ríos San José y Pichoy).

II.3.1.3 Manganeso

Los yacimientos de Mn de la provincia de Valdivia, carecen de importancia económica, sin embargo poseen una amplia distribución asociada a las rocas del basamento metamórfico, donde los minerales de Mn, pirolusita y rodonita, están asociados a capas de cuarcitas. Los principales yacimientos conocidos en la provincia son: “Santo Domingo”, “Isabel”, “Bellavista” y “Piedra Negra” (Figura II-4; Di Biase & Lillo, 1973).

II.3.1.4 Oro

Los placeres de oro de la provincia de Valdivia provienen de la disgregación de vetillas de cuarzo aurífero, asociadas al basamento metamórfico, de donde el oro fue liberado y concentrado en forma de pepitas por procesos fluviales (Di Biase & Lillo, 1973). Los yacimientos más importantes, aunque actualmente están sin actividad, son “Madre de Dios”, “El Roble”, “Purulón” y “Juanito” (Figura II-4).

II.3.2 No metálicos

II.3.2.1 Arcillas

Las arcillas de esta provincia se caracterizan por su elevado porcentaje de sílice libre, que varía entre un 20 y 40%, y por su reducida proporción de caolín, que es de 40 a 50% (Di Biase & Lillo, 1973). Los yacimientos se encuentran asociados a: pequeños cuerpos intrusivos alterados en la costa, como los yacimientos de “Quitalluto”, “Punucapa” y “Niebla” (Figura II-4); la gran cantidad de depósitos glaciales, fluvio-glaciales y glaciolacustres, como los depósitos de “Ciruelo” y “Las Lomas”; y a formaciones sedimentarias con intercalaciones de mantos de carbón.

II.3.2.2 Asbestos

Los yacimientos de asbestos están asociados a rocas básicas serpentinizadas del basamento metamórfico (Ojeda, 1976). Los principales yacimientos “Bonifacio” y “Juanita” (Di Biase & Lillo, 1973).

II.3.2.3 Azufre

El depósito más conocido de la región es el denominado “Las Azufrera” (Figura- II-4), al SE del lago Ranco, perteneciente al grupo volcánico del Puyehue. En el interior del cráter se presenta abundante cantidad de azufre, producto de la actividad solfatárica

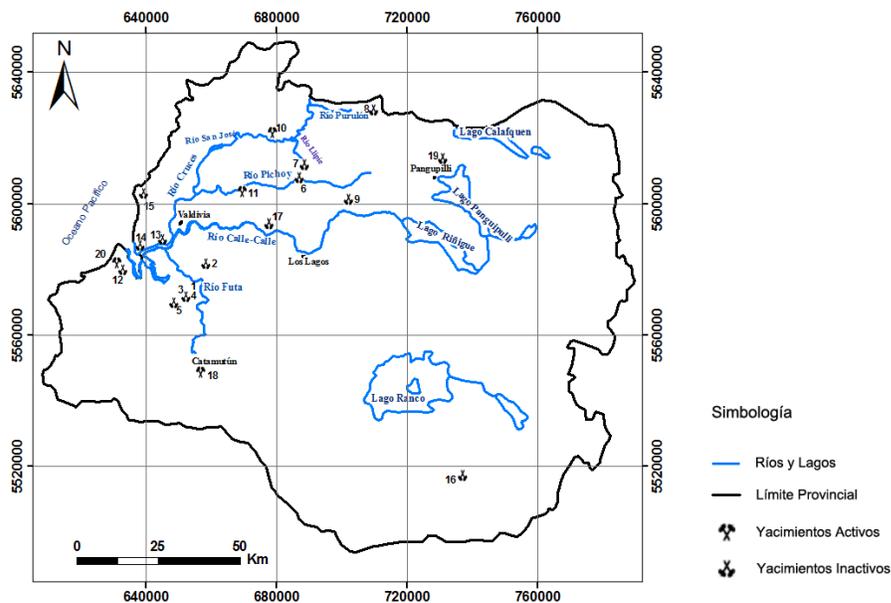


Figura II-4. Ubicación de yacimientos minerales de la Provincia de Valdivia. 1: Los Joaquines (Sb); 2: Santo Domingo (Mn); 3: Isabel (Mn); 4: Bellavista (Mn); 5: Piedra Negra (Mn); 6: El Roble (Au); 7: Madre de Dios (Au); 8: Purulón (Au); 9: Juanito (Au); 10: Ciruelo (Caolín); 11: Las Lomas (Caolín); 12: Quitaluto (Arcilla); 13: Punucapa (Arcilla); 14: Juanita (Asbesto); 15: Bonifacio (Asbesto); 16: Las Azufreras (S); 17: Copihues de Pupunahue (Carbón); 18: Catamutun (Carbón); 19: Futanome (Diatomita); 20: Erika (Talco). Modificado de Di Biase & Lillo (1973).

posterior a la erupción volcánica del año 1960, que podría llegar a constituir un yacimiento (Di Biase & Lillo, 1973).

II.3.2.4 Carbón

En esta provincia existen mantos de carbón que se asocian a series sedimentarias continentales del Terciario. Existen dos cuencas carboníferas: la de San José de la Mariquina-Máfil, a la cual corresponde la Mina “Los Copihues de Pupunahue”, y la cuenca de Catamutún, cerca de la Unión (Figura II-4; Di Biase & Lillo, 1973).

II.3.2.5 Diatomitas

En la comuna de Panguipulli, a 6 o 7 km del pueblo homónimo, se encuentra el yacimiento “Futanome” (Figura II-4), correspondiente a un manto horizontal de 1- 1.5 m

de potencia. La génesis posiblemente se deba a la proliferación de diatomeas en una laguna post-glacial (Di Biase & Lillo, 1973).

II.3.2.6 Talco

El único yacimiento de talco en la provincia que se ha explotado es la Mina “Erika”, ubicada a 5 km al oeste del puerto de Corral (Figura II-4). El talco y la serpentina de este depósito se habrían originado de las rocas básicas, peridotitas a serpentinitas, del basamento metamórfico.

III. CAPÍTULO: MATERIALES Y METODOS

III.1 Extracción de testigos de sedimentos

La obtención de testigos de sedimentos se realizó en el lecho del río Cruces (testigos PlantaG, 221G, 221EG, 222G, 223G y 207G) y los ríos tributarios San José (testigo SJG) y Pichoy (testigo 213G), en las cercanías de la ciudad de Valdivia, entre el 22 y 24 de marzo de 2010 (Figuras III-1 2). Los sitios elegidos para la extracción de los testigos corresponden a 7 sitios representativos y protegidos, de diferentes zonas a lo largo del río Cruces, Pichoy y San José (Tabla III-1).

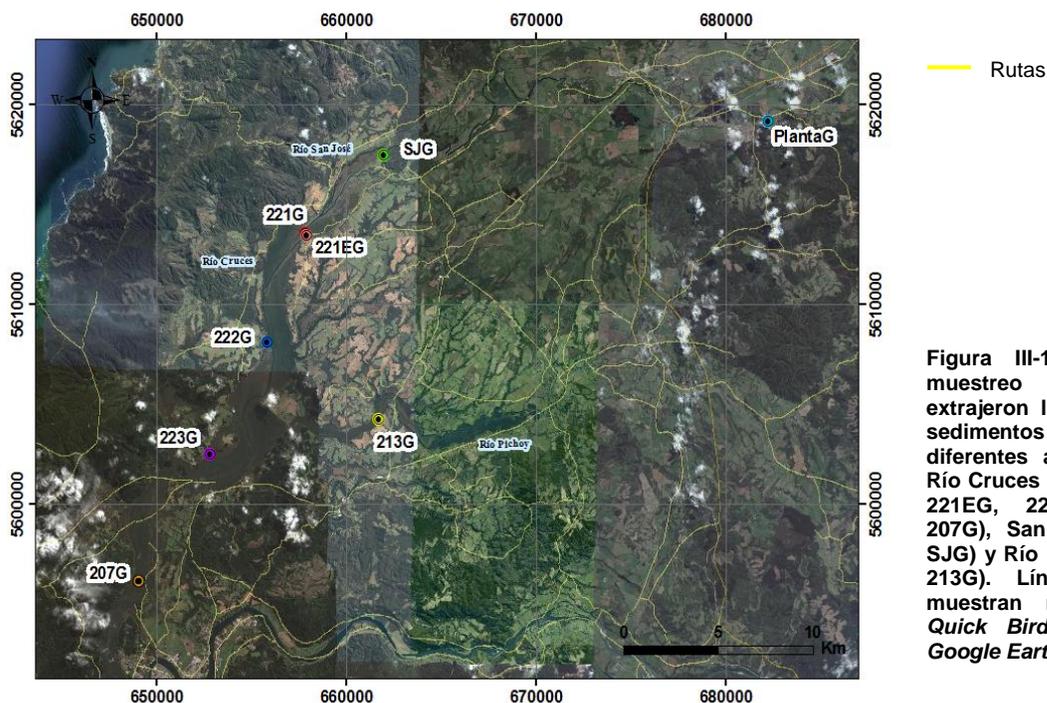


Figura III-1. Puntos de muestreo donde se extrajeron los testigos de sedimentos en 7 sitios diferentes a lo largo del Río Cruces (testigos 221G, 221EG, 222G, 223G y 207G), San José (testigo SJG) y Río Pichoy (testigo 213G). Líneas amarillas muestran rutas. Imagen Quick Bird obtenida de Google Earth.

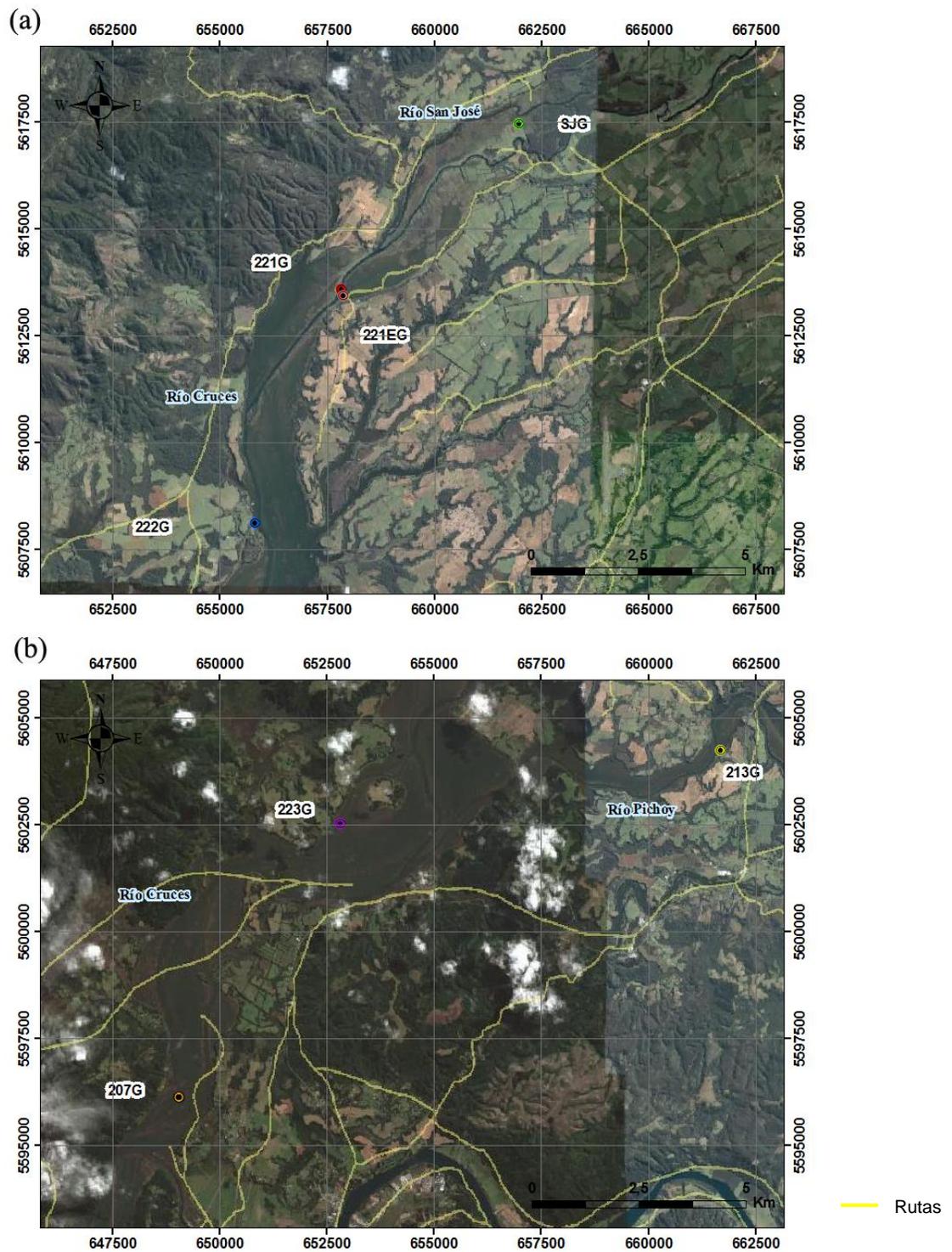


Figura III-2. Detalle de los testigos obtenidos. (a) Testigos SJG, 221G, 221EG y 222G (b) Testigos 213G, 223G y 207G. Líneas amarillas muestran rutas. Imagen Quick Bird obtenida de Google Earth.

Tabla III-1. Descripción general y coordenadas de muestreo de los testigos obtenidos en el humedal del río Cruces.

Sitio	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Testigo	Diámetro Interno [cm]	Largo sedimento al momento del muestreo [cm]	Profundidad [m]
Planta	39,55670	72,87707	Planta G	13,4	44 - 45	1
SJ	39,57618	73,11197	SJG	13,4	47,8	2
221	39,61118	73,15928	221G	13,4	47,5	5
221	39,61308	73,15887	221EG	13,4	48	2
222	39,66128	73,18131	222G	13,4	42	1,75
223	39,71229	73,21522	223G	13,4	35	1,5
207	39,77042	73,25771	207G	13,4	39	1,5
213	39,69519	73,11233	213G	13,4	45	1

El procedimiento de extracción de los testigos se realizó mediante la operación de un buzo *scuba*, quien una vez sumergido en el agua, entierra un tubo de acrílico en el lecho del río, tapando la parte superior del tubo para generar vacío. Luego se tapa la parte inferior para así recuperar el sedimento dentro del testigo. Los testigos fueron cerrados por el buzo, previo a su extracción fuera del río. Es importante tomar en cuenta que el sitio considerado no se perturbó durante la extracción de los testigos. Una vez en la lancha, se sellaron con cinta eléctrica y tipo *duct tape*. Posterior a esto se midió el largo de la columna de sedimento (Figura III-3). Extraídas las muestras, y procurando siempre mantener los testigos en forma vertical, éstos fueron trasladados al Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, en Santiago, en donde se preservaron en una cámara frigorífica entre 1°C a 3°C hasta el momento de su análisis.

III.2 Submuestreo de testigos

El submuestreo de los testigos de sedimentos se realizó en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

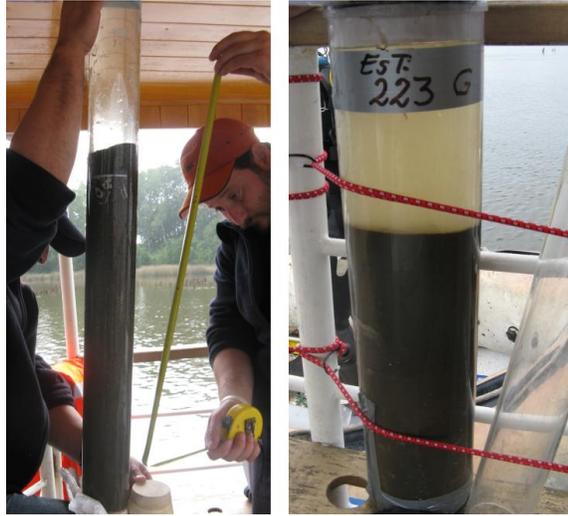


Figura III-3. Sellamiento y medición del largo de la columna de sedimentos de los testigos de sedimentos.

Previo al comienzo del muestreo, se midió el largo de la columna de sedimento de cada testigo (Tabla III-1). Los testigos fueron cortados en secciones de base circular de 5 mm de espesor, en los primeros 10 cm, y de 10 mm de espesor, para el resto del testigo. La técnica de muestreo consistió en la instalación del testigo cuidadosamente sobre un extractor *extruder* que permite realizar cortes a intervalos de espesor determinados (Figura III-4). La recolección de los sedimentos se realizó con espátulas de plástico y guardados en recipientes de plástico de peso conocido. El peso húmedo de cada muestra se midió en una balanza de precisión $\pm 0,1$ mg, marca Sartorius, modelo CP224S. Luego, las muestras se secaron en un horno a 50°C , durante 3 días, o fueron almacenadas en la cámara fría hasta el momento del secado.

Debido a la compactación de los sedimentos durante el transporte y submuestreo, se calculó la constante de “descompresión” de cada testigo para corregir este efecto. Las constantes para cada testigo corresponden a 1.20 (PlantaG), 1.02 (SGJ), 1.21 (221G), 1.06 (221EG), 1.16 (222G), 1.34 (223G), 1.04 (207G) y 1.09 (213G).



Figura III-4. Técnica de muestreo de testigos de sedimentos.

III.3 Medición de propiedades físicas, granulométricas y mineralógicas de los sedimentos

III.3.1 Densidad aparente y Susceptibilidad Magnética

Una vez secas las muestras de sedimentos, el peso seco y la susceptibilidad magnética general (*bulk magnetic susceptibility*; Ellwood, 1980) de las muestras obtenidas de los testigos Planta G, SJG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G mediante el sistema *Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter* modelo KLY-3S, Pick-up Unit marca Kappabridge (resolución de hasta 10^{-9}), en el Laboratorio de Paleomagnetismo del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. La desviación estándar promedio de estas mediciones es de $6.65 \text{ SI} \cdot 10^{-6}$.

Para el cálculo de la densidad aparente (Ecuación III-1), se consideró el peso total de los sedimentos secos de cada muestra, el radio interno del testigo correspondiente y el espesor de la muestra (para el cálculo del volumen respectivo).

$$\rho_{\text{aparente seca}_i} = \frac{\text{peso seco}_i}{\text{volumen muestra}_i} \quad (\text{Ecuación III-1})$$

Para la determinación de la susceptibilidad magnética se utilizaron frascos plásticos cuyo peso y susceptibilidad fueron medidos previo a su relleno con sedimentos. Se realizaron 5 mediciones por muestra, para luego sacar un promedio de cada una. Finalmente se realizó el cálculo estadístico para obtener el valor de la susceptibilidad magnética volumétrica (Ecuación III-2) y másica (Ecuación III-3) de cada muestra con su respectiva desviación estándar (desviación estándar promedio de $2.41 \cdot 10^{-5}$ SI o cm^3/g , según corresponda).

$$\text{Suscep. Magnética Volumétrica}_i = c \cdot \text{promedio suscep. magnética}_i \cdot \frac{\text{densidad}_{\text{seco}_i}}{\text{peso}_{\text{muestra en frasco}_i}}$$

(Ecuación III-2)

$$\text{Suscep. Magnética Másica}_i = c \cdot \frac{\text{promedio suscep. magnética}_i}{\text{peso}_{\text{muestra en frasco}_i}}$$

(Ecuación III-3)

$c = 10 [\text{cm}^3]$, correspondiente al volumen estándar medido por el susceptibilímetro.

En total se analizaron 378 muestras correspondientes a 47 muestras del testigo PlantaG (muestras 103 a 149), 55 muestras del testigo SJG (muestras 329 a 383), del 47 muestras del testigo 221G (185 a 232), 54 muestras del testigo 221EG (muestras 1 a 54), 44 muestras del testigo 222G (233 a 277), 34 muestras del testigo 223G (150 a 184), 48 muestras del testigo 207G (muestras 55 a 102) y 49 muestras testigo 213G (muestras 384 a 433).

III.3.2 Análisis multicomponente de espectroscopia de absorción infrarroja

La espectrometría infrarroja es utilizada para identificar un compuesto o investigar la composición de una muestra. Para esto se utiliza la radiación infrarroja, la cual se pasa a través de un mineral. Parte de esta radiación es absorbida por la muestra y otra es

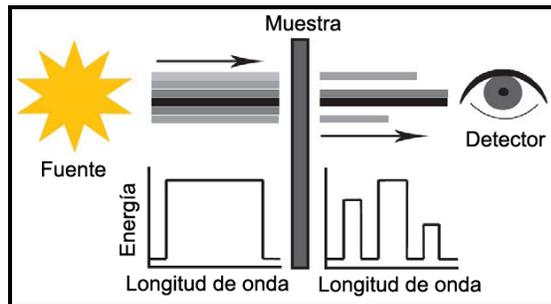


Figura III-5. Esquema de un interferómetro. Proceso de irradiación de una muestra y su respuesta. Modificado de Villaseñor (2005).

transmitida. El espectro resultante representa la absorción molecular del mineral, que es único (Figura III-5). La banda media de la radiación infrarroja (2.5-40 μm) es la región donde la mayoría de los minerales formadores de roca tienen sus bandas fundamentales de vibración. Así mismo, se ha establecido que la cantidad de radiación absorbida es proporcional a la cantidad de materia absorbente en la muestra (Bertaux *et al.*, 1998). El análisis de espectrometría infrarroja (FTIR) se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional. De esta manera, los *peaks* obtenidos en el espectro corresponden a las frecuencias de vibración entre los enlaces atómicos en la estructural de un mineral (Villaseñor, 2005).

A través del interferómetro, se transmite un rayo monocromo de luz infrarroja a través de la muestra, y se registra la cantidad de energía absorbida. La señal resultante se denomina interferograma, cuya característica principal es que cada punto de ella tiene información sobre cada frecuencia infrarroja proveniente de la fuente. Los análisis a través de FTIR (*Fourier Transform Infrared*) requieren de un espectro de frecuencia para realizar la identificación del mineral, por lo que al interferograma se le debe aplicar la transformada de Fourier (por medio del computador), descomponiendo de esta forma la señal única en componentes de distintas frecuencias.

III.3.2.1 Preparación de la muestra

La espectrometría infrarroja será realizada en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. El método utilizado para desarrollar esta metodología es el denominado “método del disco de KBr” descrito en detalle en Bertaux *et al.* (1998). En total se analizaron 100 muestras correspondientes a los primeros 20 cm, cada intervalo de 1 cm, de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, respectivamente.

Para su medición se realiza una preparación previa de la muestra a utilizar. Para esto se muelen 10 a 20 mg de muestra mezclada con acetona en un mortero cilíndrico automático (de *Specamill*) con esferas de ágata, durante 2.5 horas, a baja temperatura. Con esto se obtiene un tamaño de grano de 2 μm en promedio. Luego se recupera la mezcla (muestra más acetona) y se dispone en un recipiente de vidrio parabólico para su secado a temperatura ambiente, de tal manera que la acetona se evapore y se obtenga la muestra original. Se seleccionan 2.5 mg de muestra que serán mezclados con bromuro de potasio (KBr) hasta obtener un peso de mezcla de 1 g. Tras moler manualmente con un mortero de ágata por 5 minutos, se separan de la mezcla 300 mg, los que son introducidos en un prensador *Perkin Elmer*® para aplicar vacío de 0.5 bar, por 30 minutos, y luego aplicar una presión de 10 ton/cm^2 para formar una pastilla de 13 mm de diámetro, la cual se lleva a un horno a 100°C por 24 horas. Finalmente, la pastilla es llevada al espectroscopio para obtener el espectro con las intensidades respectivas en un gráfico de absorbancia versus longitud de onda, que se compara (manualmente primero y luego mediante un computacionalmente) con los espectros de muestras puras para obtener su composición mineralógica.

III.3.2.2 Análisis cuantitativo y cualitativo de datos de espectrometría

El análisis de espectroscopia de absorción se realizó usando el equipo Spectrum 100 de Perkin Elmer®, el que se encuentra equipado con el software Spectrum® que permite ajustar los parámetros con los que se van a realizar las mediciones y en el que

se puede visualizar el espectro de absorción de cada muestra, además de realizar comparaciones entre varias muestras y/o con espectros de referencia.

Los espectros infrarrojos fueron adquiridos en el rango 4000 a 365 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} . Cada espectro corresponde a un promedio entre 10 mediciones sucesivas realizadas. Cabe aclarar que una medición se refiere a un evento de incidencia de radiación infrarroja en la muestra y la generación del espectro asociado. Previo al comienzo de las mediciones se hace una prueba sin muestra para medir la absorbancia “de fondo” (*background*). En general, los peaks que presentan los espectros son comunes a todas las muestras, variando su magnitud, la cual estaría directamente relacionada con la proporción de cada fase mineral en la muestra (Bertaux et al., 1998). Se observa además que la mayor parte de los espectros muestran una fuerte pendiente en el rango de 4000-2000 cm^{-1} , lo que podría deberse a un tamaño de grano superior al requerido. Para resolver este problema, se llevó el espectro a una línea base. Este procedimiento es automático en el programa *Spectrum* y consiste en llevar todos los “valles” del espectro al valor correspondiente a la menor absorbancia registrada en el espectro original (Figura III-6).

Se cuenta con un set de espectros de 8 minerales puros, los que se combinan y comparan con el espectro de la muestra. La mineralogía de las muestras estudiadas se eligió en base a los *peaks* característicos encontrados y en base a la mineralogía esperada según la litología de la roca que encajona al valle fluvial. En este estudio, los minerales identificados fueron: cuarzo, plagioclasa (bytownita y albita), anfíbola, biotita, arcillas (montmorillonita e illita) y calcita (o carbonatos en general).

La cuantificación se llevó a cabo a través de un código usado en el programa *MatLab*®, que permite hacer una cuantificación de las proporciones de minerales presentes en la muestra. El error asociado a esto es de $\pm 0,5\%$. El proceso consiste en combinar los espectros de los minerales identificados de forma tal que se reproduzca el espectro de la muestra. Para este estudio, todos los espectros presentan *peaks* en las mismas bandas, lo que sugiere que todas contienen las mismas fases minerales, de modo que sólo se debe modificar cada vez la proporción de cada uno de ellos (Figura III-7). El

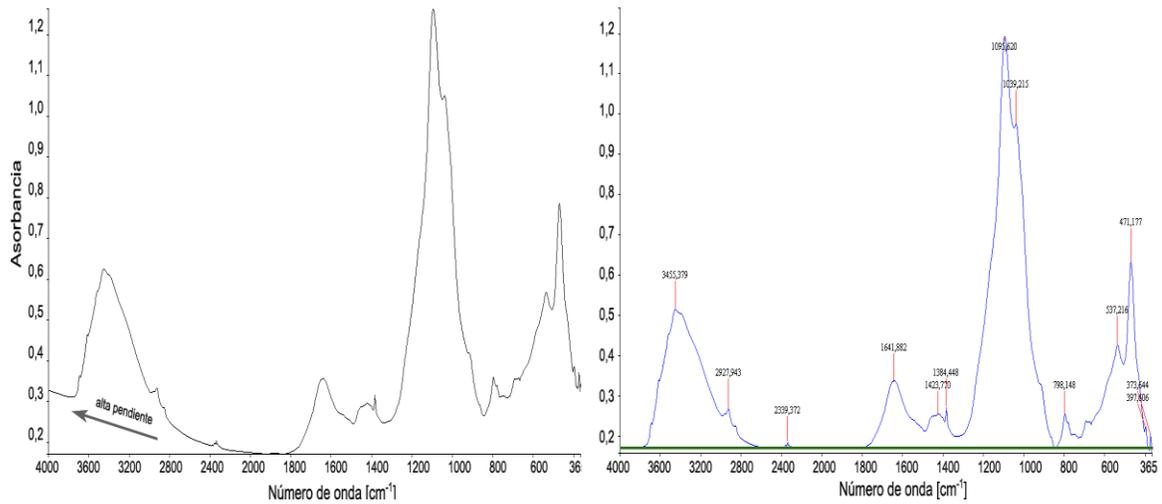


Figura III-6. Corrección a la línea base del espectro de la muestra 353 del testigo SJG. Izquierda: espectro original. Derecha: espectro corregido. La línea verde marca la base del espectro luego de realizar el procedimiento (escala vertical exagerada).

programa muestra el porcentaje de cada curva que se combina para reproducir el espectro original.

III.3.3 Granulometría láser

La granulometría laser, llevada a cabo en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, se realiza para determinar el tamaño de grano de cada muestra y analizar, de esta manera, su variación a lo largo de los testigos sedimentarios.

Para la medición de la granulometría se utilizó granulómetro láser *Mastersizer 2000* marca *Malvern* (Figura III-8a), a través del software *Mastersizer*. Presenta un módulo adicional, *Hydro G*, está diseñado para crear suspensión de partículas en agua u otro medio líquido el cual puede ser optimizado a través del uso de ultrasonido cuando es necesario. La precisión del equipo es de $\pm 1\%$ y mide materiales desde $0.02 \mu\text{m}$ hasta $2000 \mu\text{m}$. Las muestras analizadas corresponden a las mismas señales en la Sección III.3.1.

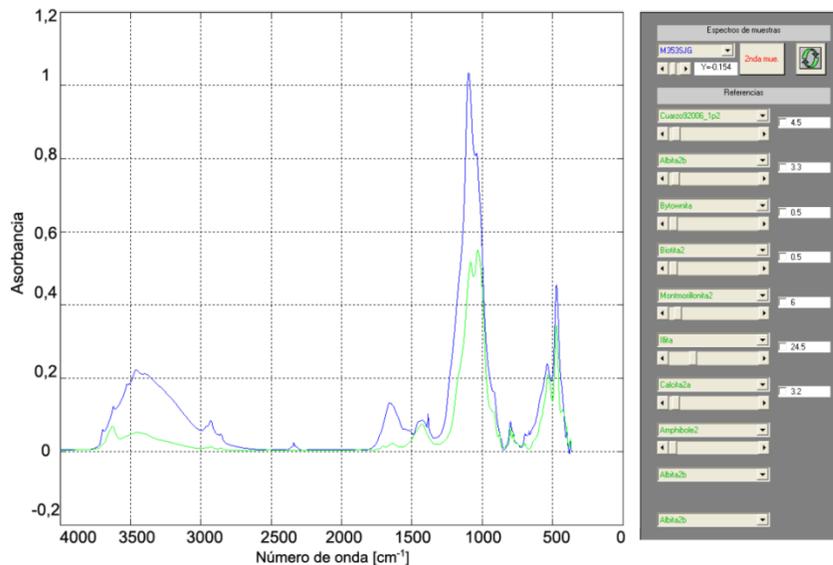


Figura III-7. Comparación del espectro original (curva azul) con la curva creada a partir de 8 especies minerales (curva verde). A la derecha se muestran los controles para modificar la curva y los porcentajes utilizados. Muestra 353 del testigo SJG.

Luego de tamizar la muestra de sedimento (tamiz No. 18; Figura III-8c) se dispone en un medio dispersante (agua en este caso, ya que se trata de arcillas, limos y arenas) para que las partículas no se aglomeren ni se disuelvan. Para homogeneizar la muestra, el medio dispersante con los sedimentos se pasa a través de un girador mecánico y, si fuese necesario para separar las partículas más aglomeradas, por ondas de ultrasonidos. Este líquido va pasando por la celda (Figura III-8b), por la cual pasan los rayos X que se difractan con distinto ángulo según el tamaño de la partícula. Mientras mayor es el ángulo de difracción, más pequeña es la partícula.

El programa *Mastersizer* entrega la base de datos de cada muestra (el promedio entre dos mediciones realizadas por cada muestra), en la cual aparecen los parámetros granulométricos relacionadas a los tamaños medidos de las partículas, entre ellos, la distribución del tamaño de los granos (Figura III-9) y los diámetros correspondientes al 10% ($d(0,1)$), 50% ($d(0,5)$, media) y 90% ($d(0,9)$). Además se calculó el porcentaje de arcilla (diámetros $<63 \mu\text{m}$ aproximadamente) y la desviación estándar de la distribución, mediante las herramientas incorporadas del programa Excel.

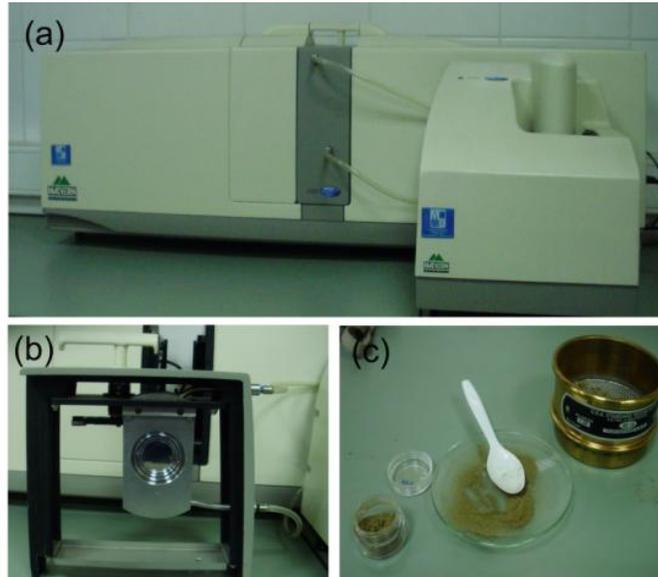


Figura III-8. (a) Granulómetro láser Mastersizer 2000 (b) Celda de medición (c) Muestra de sedimento y tamiz No. 18.

III.3.4 Análisis geoquímico

Los análisis geoquímicos se realizaron en el Laboratorio Geoquímico el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

En total se analizaron 177 muestras de sedimentos. De estos, se examinaron 47 muestras del testigo 221G, cada 0.5 cm (entre los 0.5 y 13 cm de profundidad) y cada 1 cm (entre los 14 y 38 cm de profundidad); 45 muestras del testigo 222G, cada 0.5 cm (entre los 0.5 y 12 cm) y cada 1 cm, con irregularidades, (entre los 14 y 35 cm); 35 muestras del testigo 223G cada 0.5 cm (hasta los 25 cm de su largo total); y 38 muestras del testigo 213G se tomaron cada 0.5 cm (entre los 0.5 y 15 cm de profundidad) y cada 1 cm (entre los 16 y 40 cm de profundidad).

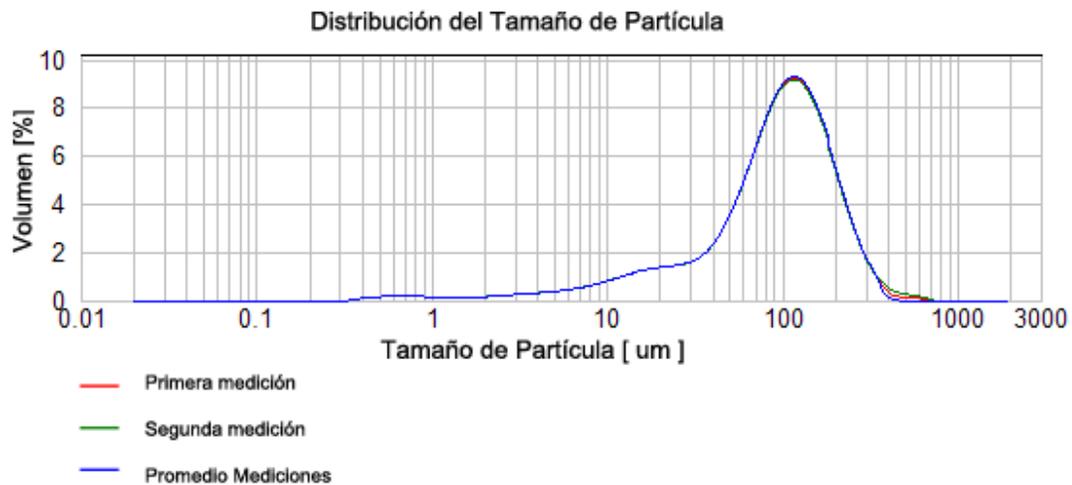


Figura III-9. Distribución del tamaño de partícula del análisis granulométrico de la muestra 79 del testigo de sedimento 207G.

Se analizaron 10 elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 tot, CaO , MgO , TiO_2 , MnO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) y 12 elementos traza (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sc, V, Y, Zn, S, Cl), con el instrumento analítico de ICP-AES (*Inductively Couple Plasma*), modelo *Optima 7300V Cyclonic*, marca Perkin Elmer; a excepción de los elementos S y Cl, los cuales se analizaron a través del cromatógrafo iónico modelo 861 Advanced Compact, marca Metrohm 861 (Figura III-6).

La mayoría de los elementos y óxidos registraron valores superiores al límite de detección dado por los instrumentos analíticos. Los elementos As, Cd y Mo quedaron en todos los testigos bajo del límite de detección (<2 ppm; Anexo C).

- **ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry*)**

Este método se basa en la excitación energética de una muestra líquida mediante la interacción con plasma. Esto hace que los electrones de los átomos a analizar, salten a niveles energéticos mayores. Cuando los electrones retornan a su estado inicial, liberan una onda energética con una cierta longitud de onda, característica de cada elemento, y una intensidad proporcional a la concentración de este. Para generar plasma se suministra gas argón a la bobina antorcha, aplicándose corriente eléctrica

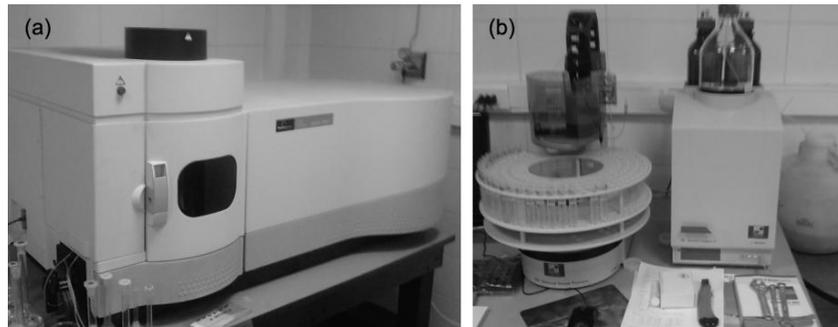


Figura III-10. Instrumentos para el análisis geoquímico de los sedimentos fluviales de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. (a) ICP-óptico (b) Cromatógrafo iónico (IC).

de alta frecuencia a la bobina en la punta del tubo antorcha. De esta forma el campo electromagnético creado en el tubo antorcha ioniza el argón, generando plasma. Este plasma tiene una alta densidad de electrón y alta temperatura (1000 Kelvin), siendo utilizada su energía para la excitación-emisión de la muestra.

- **Cromatografía de intercambio iónico (IC: *Ion-exchange chromatography*)**

Este método permite la separación de iones y moléculas eléctricamente cargadas, basado en la retención de los analitos moleculares mediante interacciones químicas. De esta forma se pueden obtener los grupos iónicos que interactúan con los iones analitos de carga opuesta. Este tipo de cromatografía se subdivide a su vez en la cromatografía de intercambio catiónico y cromatografía de intercambio aniónico. La cromatografía de intercambio catiónico retiene cationes cargados positivamente debido a que la fase estacionaria muestra un grupo funcional cargado negativamente, como un ácido fosfórico. La cromatografía de intercambio de aniones retiene aniones usando grupos funcionales cargados positivamente, como un catión de amonio.

III.3.4.1 Preparación de la muestra

Las muestras de sedimentos fueron secadas a 40°C, cada una de ellas fue pulverizada en un mortero de ágata. La determinación analítica se realizó como sigue:

- Determinación de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 tot., CaO , MgO , MnO , TiO_2 : 0.25 g de muestra, fusión en crisol de Pt con 1 g de la mezcla $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ (1:2), en mechero Bunsen, se enfría y se disuelve con dos ml de HNO_3 conc. con agitador magnético, se afora en 100ml, en dilución 25 se determina en ICP-AES (Perkin Elmer, Optima 7300V). El error promedio asociado es de 0.2%.
- Determinación de Na_2O , K_2O , P_2O_5 , As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Pb, Sc, V, Y, Zn: 0.5 g de muestra en vaso de teflón con 10 ml HF + 10 ml HNO_3 + 7 ml de HClO_4 , se calienta en plancha calefactora a los 160 °C por toda la noche, al día siguiente se aumenta la temperatura de la plancha calefactora a los 260 °C, a sequedad total, se enfría y se agrega 10ml de HCl concentrado, se hierve, se enfría y se afora en 100 ml, en esta solución se determina con ICP-AES. El error promedio asociado es de 0.05%, para los elementos mayores, y de 5.4 ppm, para los elementos trazas.
- Determinación de S y Cl: 2 g de muestra en vaso precipitado, se agregan 0.6 ml de HNO_3 1.75N + 2 ml de H_2O_2 + agua destilada se calienta a 70 °C en plancha calefactora por toda la noche, se afora a los 100 ml con agua destilada, se filtra 0.2 micra en bomba de vacío y se realiza el análisis en IC (Cromatografía Iónica). Los errores promedios asociados son de 20.2 y 10.6 ppm, respectivamente.

En la determinación de S y Cl, el instrumento IC fue calibrado con soluciones diluidas multielemental conocida a partir de soluciones patrones de 1000 ppm.

Para la medición de los cationes se usó el instrumento ICP-AES, el cual fue calibrado con soluciones diluidas multielemental a partir de patrones de 1000 ppm. Por cada 10 muestras leídas se intercaló una roca estándar disuelta al igual que las muestras. Los valores obtenidos en los sedimentos fluviales fueron comparados con las muestras de rocas estándar internacionales, W-2 (USGS-*diabase*) y la GXR-2 (USGS-*soil*). Si en el proceso de lectura, los valores recomendados de las rocas estándares, cuando no concuerdan con los valores leídos por el espectrofotómetro, se recalibra hasta lograr su equivalencia.

IV. CAPÍTULO: CARACTERIZACIÓN SEDIMENTOLÓGICA Y MINERALÓGICA

IV.1 Introducción

El muestreo de los testigos sedimentarios tiene como objetivo la caracterización sedimentológica y mineralógica de los sedimentos fluviales del río Cruces (testigos 221G, 221EG, 222G, 223G y 207G) y de sus ríos tributarios San José (testigo SJG) y Pichoy (testigo 213G), permitiendo, de esta manera, el estudio de la variabilidad en el registro sedimentario a través del tiempo (aproximadamente de los últimos 50 años en el caso de este estudio).

El estudio del registro sedimentario consistió en la descripción, a lo largo de cada testigo, de las variaciones en profundidad de la densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos (<63 μm). Particularmente, se estudiaron más detalladamente los testigos 221G, 222G, 223G y 213G, caracterizando tanto su sedimentología (incluyendo también la susceptibilidad magnética másica) como su mineralogía, esta última obtenida mediante el análisis de FTIR. Finalmente, mediante un análisis estadístico a través del Análisis de Componente Principales, se determinaron las asociaciones más características entre los parámetros ya mencionados.

IV.2 Caracterización Sedimentológica

IV.2.1 Testigo PlantaG

El testigo sedimentario se caracteriza por un bajo contenido de agua (19% en promedio), y una alta densidad aparente (1.49 g/cm^3 en promedio) y media granulométrica ($278.8 \mu\text{m}$ en promedio), respecto a los demás testigos (Figura IV-1). El testigo PlantaG se dividió en dos unidades estratigráficas principales (Figura IV-2): Unidad 1 y Unidad 2. La Unidad 1 se caracteriza por una tendencia creciente del porcentaje de agua y una tendencia decreciente de la densidad aparente (esta última mostrando además una alta variabilidad), con valores entre 7.4-25.4% y $0.9\text{-}2.6 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. La media granulométrica, en tanto, muestra tendencia a disminuir, con valores entre 177.9 y $321.6 \mu\text{m}$, y el porcentaje de sedimentos finos presenta una tendencia relativamente constante, pero altamente variable, con valores entre 7.4 y 23.5%. Sin embargo, estos últimos valores corresponderían sólo a los granos pertenecientes a la matriz de los sedimentos, puesto que estos últimos presentan una mala selección, con granos líticos y de cuarzo de hasta 3 mm, que fueron tamizados antes de ser medidos.

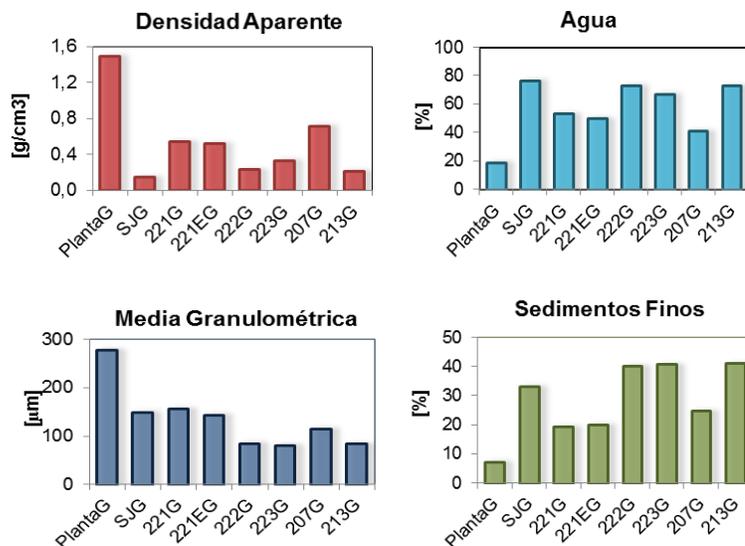


Figura IV-1. Valores promedios de los parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63 \mu\text{m}$) de los testigos sedimentarios PlantaG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G, S1G y 213G.

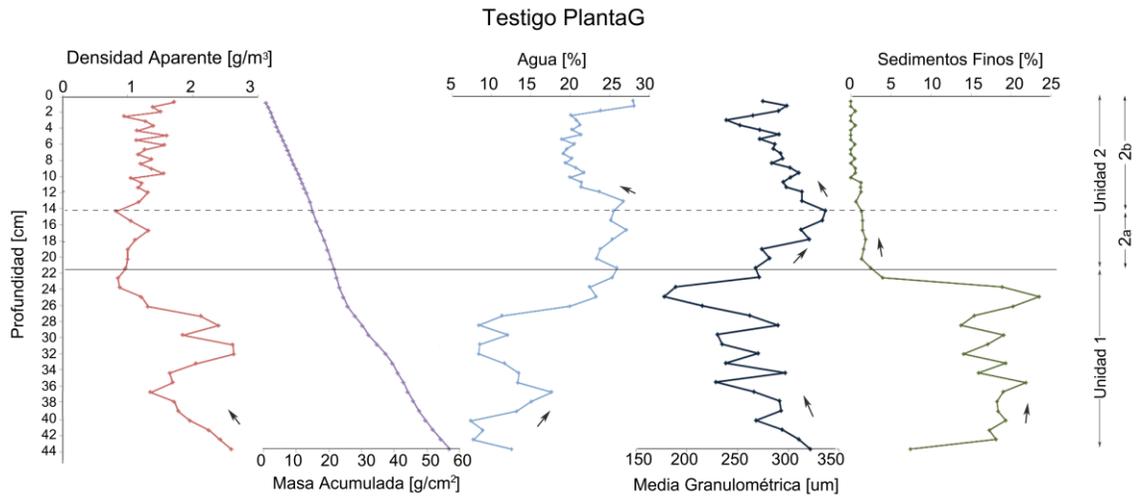


Figura IV-2. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63 µm) del testigo PlantaG.

La Unidad 2 presenta una menor varianza de las propiedades sedimentológicas, respecto a la Unidad 1. La densidad aparente muestra una tendencia levemente creciente, con valores entre 0.8 y 1.7 g/cm³, mientras el porcentaje de finos tiende a disminuir (Figura IV-2). El porcentaje de agua y la media granulométrica presentan valores entre los 18.9- 28.0% y 239.9-336.7 µm, respectivamente. Debido a un cambio en las tendencias de las curvas de estos últimos dos parámetros y a un leve cambio en la pendiente de la curva de masa acumulada a los 10 cm, se subdividió la Unidad 2 en dos subsecciones: 2a y 2b. La subsección 2a se caracteriza por una tendencia casi constante del porcentaje de agua (de 25% aproximadamente) y por una tendencia creciente de la media granulométrica. La subsección 2b, en tanto, presenta menor porcentaje de agua (20% aproximadamente) y una tendencia decreciente de la media granulométrica.

IV.2.2 Testigo SJG

El testigo SJG se caracteriza por presentar un alto porcentaje de agua (76.9% en promedio), una baja densidad aparente (0.1 g/cm³ en promedio) y una media granulométrica relativamente alta (149.9 µm en promedio; Figura IV-1). No obstante,

los valores obtenidos en las mediciones de la media granulométrica no reflejan el tamaño real de los granos puesto que, observados al microscopio, éstos corresponden en realidad a los granos de menor granulometría respecto a los demás testigos. Sin embargo, éstos presentan una alta propensión a la aglomeración, lo que induciría a mayores mediciones granulométricas. Pese a esto, se dividió el testigo SJG en dos unidades estratigráficas principales: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-3). La Unidad 1 se caracteriza por una alta variabilidad de la media granulométrica y del porcentaje de sedimentos finos, presentando tendencias creciente (con valores entre 74.9 y 248.6 μm) y decreciente (con valores entre 24.9 y 44.8%), respectivamente. El porcentaje de agua muestra una tendencia relativamente constante, con valores entre 75.7 y 78.6%, mientras la densidad aparente muestra una leve tendencia a la disminución, con valores entre 0.13 y 0.17 g/cm^3 .

La Unidad 2 se destaca debido a una disminución de la media granulométrica (con valores entre 121.8 y 196.4 μm), con tendencia a seguir decreciendo. Contrariamente, el porcentaje de sedimentos finos muestra una tendencia al aumento, presentando valores entre 27.6 y 35.3%. La Unidad 2 se subdividió además en dos subunidades estratigráficas: 2a y 2b (Figura IV-3); diferenciadas entre sí principalmente por una importante disminución del porcentaje de agua en la subunidad 2b (hasta 72.1%).

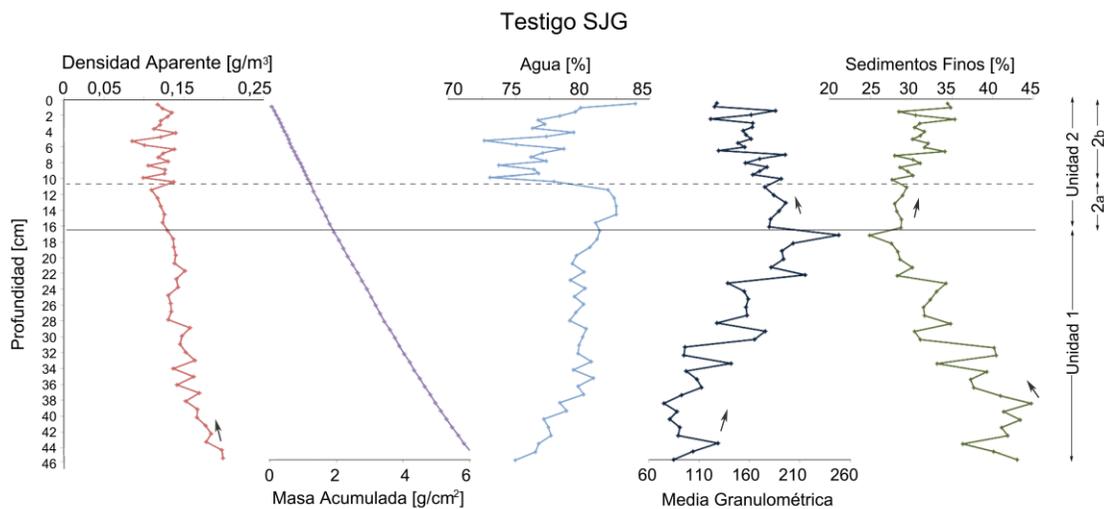


Figura IV-3. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$) del testigo SJG.

IV.2.3 Testigo 221G

El testigo sedimentario se caracteriza por una densidad aparente relativamente alta (0.5 g/cm^3 en promedio) y por un bajo porcentaje de agua (53.2% en promedio) y sedimentos finos (19.2% en promedio), respecto a los demás testigos, sin considerar el testigo PlantaG puesto que el contexto geomorfológico de éste es muy distinto (Figuras III-1 y IV-1). El testigo 221G se dividió en dos unidades estratigráficas principales: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-4). La Unidad 1 se caracteriza por una alta variabilidad de los parámetros granulométricos, *i.e.*, media y porcentaje de sedimentos finos, con valores entre $82.9\text{-}186.6 \mu\text{m}$ (sin considerar el mínimo local anómalo a los 38.7 cm de profundidad de $871.5 \mu\text{m}$) y entre $6.0\text{-}38.7\%$, respectivamente. La densidad aparente y el porcentaje de agua presentan tendencias opuestas, decreciente y creciente, con valores relativamente variables entre $0.4\text{-}0.8 \text{ g/cm}^3$ y $42.9\text{-}57.0\%$, respectivamente.

La Unidad 2 destacada por un cambio en la pendiente de la curva de masa acumulada y por presentar una menor variabilidad de los parámetros granulométricos. Esta unidad fue subdividida en dos subsecciones: 2a y 2b (Figura IV-4). La subsección 2a se caracteriza por una tendencia al aumento de la media granulométrica y densidad aparente, con valores entre $102.2\text{-}173.7 \mu\text{m}$ y $0.3\text{-}0.7 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

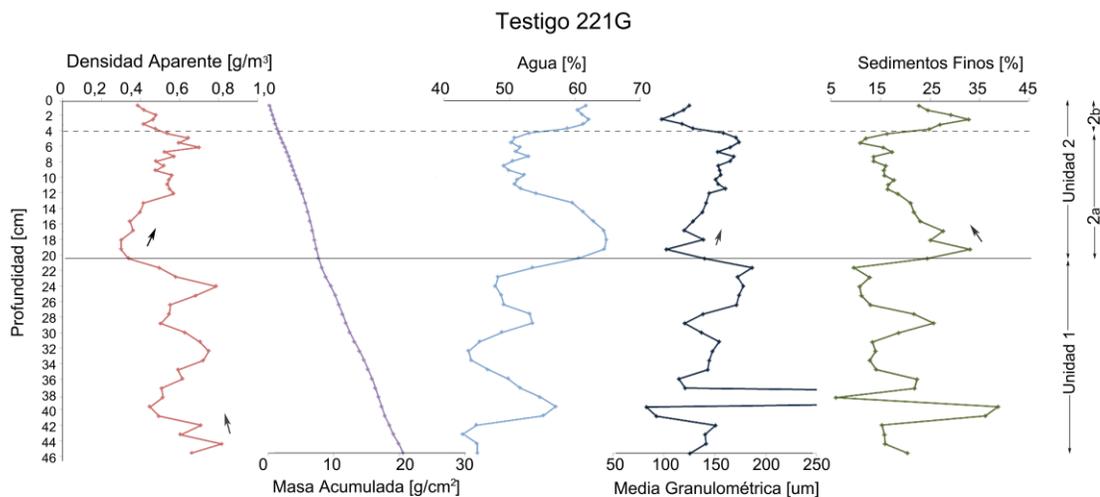


Figura IV-4. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$) del testigo 221G.

Contrariamente, el porcentaje de sedimentos finos y de agua muestran una tendencia a la disminución, presentando valores entre 10.9-33.1% y 49.1-64.8%, respectivamente. La subsección 2b se identifica principalmente por un aumento abrupto del porcentaje de sedimentos finos (hasta 32.8%), acompañado de una disminución de la media granulométrica (hasta 97.8 μm).

IV.2.4 Testigo 221EG

El testigo 221EG, al igual que el testigo 221G, se caracteriza por presentar valores promedios relativamente altos de la media granulométrica (144.4 μm) y densidad aparente (0.5 g/cm^3), y bajos porcentajes de agua (49.9% en promedio) y de sedimentos finos (20.1% en promedio; Figura IV-1). El testigo se dividió en dos unidades estratigráficas: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-5). En la Unidad 1 la densidad aparente y la media granulométrica presentan valores decrecientes entre 0.5-1 g/cm^3 y 107.1-190.7 μm , respectivamente. El porcentaje de agua y de sedimentos finos muestran, en cambio, una tendencia creciente con valores entre 35.2-55.2% y 107.1-190.7%, respectivamente.

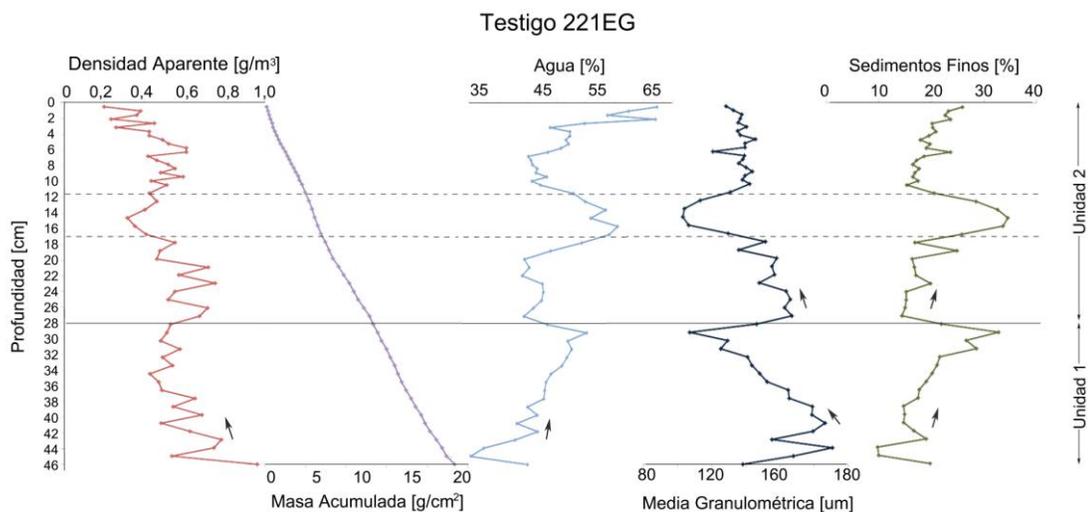


Figura IV-5. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$) del testigo 221EG.

La Unidad 2 se distingue por un aumento abrupto de la media granulométrica, contrario a una disminución abrupta del porcentaje de finos y de agua. En general, la media granulométrica muestra una tendencia decreciente, entre 120.6 y 166.9 μm . Inverso a ésta, el porcentaje de sedimentos finos muestra una tendencia creciente, con valores entre 14.4 y 25.9%. Dentro de esta unidad, entre los 11 y 16 cm de profundidad (Figura IV-5), se observa un alto porcentaje de finos (hasta 34.5%), implicando una baja en los valores de la media granulométrica (hasta 103.1 μm).

IV.2.5 Testigo 222G

El testigo sedimentario se caracteriza por presentar porcentajes de agua y de sedimentos finos relativamente altos, con valores promedios de 73.1% y 40.3%, respectivamente (Figura IV-1). El testigo 222G fue dividido en dos unidades estratigráficas: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-6). En la Unidad 1, la media granulométrica presenta valores entre 49.2 y 114.2 μm y la porcentaje de sedimentos finos valores entre 35.5 y 56.0%. Ambos parámetros muestran tendencias opuestas

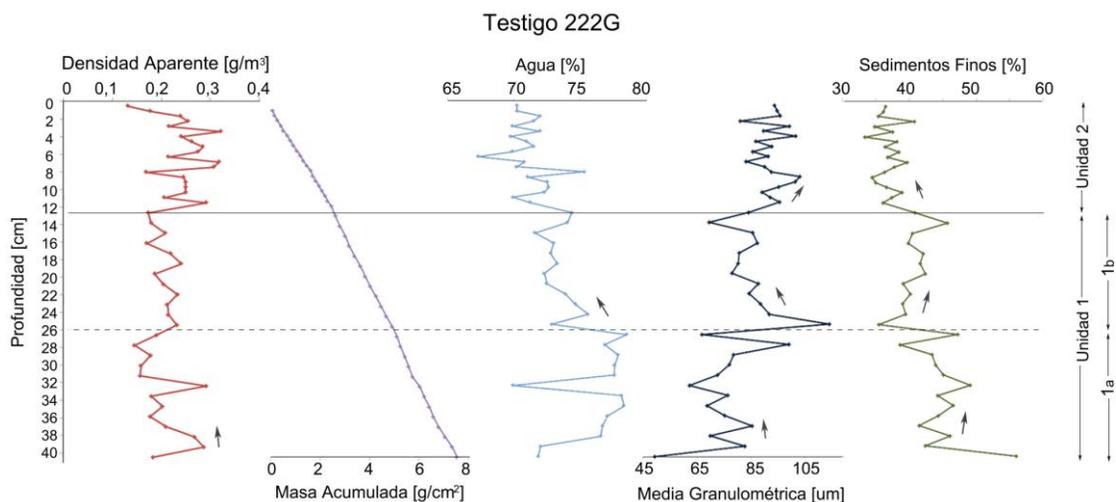


Figura IV-6. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$) del testigo 222G.

(decreciente y creciente, respectivamente), mostrando un quiebre en las tendencias los 13 cm de profundidad. Debido a este quiebre y al cambio en la pendiente de la curva de masa acumulada, se subdivide la unidad en dos subunidades estratigráficas: 1a y 1b (Figura IV-6). La subunidad 1a presenta menores valores de media granulométrica que la subunidad 1b (74.1 μm y 86.0 μm en promedio, respectivamente) y menores porcentajes de agua y de sedimentos finos.

En la Unidad 2, que muestra una menor variabilidad de los parámetros, se observa un aumento significativo de la densidad aparente (0.24 g/cm^3), reflejado también en un cambio en la pendiente en la curva de la masa acumulada y por el aumento de la media granulométrica (entre 80.9 y 103.2 μm). El porcentaje de sedimentos finos y de agua, en tanto, muestran una disminución de sus valores, respecto a la unidad inferior, con tendencias decrecientes y valores entre 33.4-40.8% y 67.3-75.3%, respectivamente (Figura IV-6).

IV.2.6 Testigo 223G

El testigo sedimentario presenta porcentajes de sedimentos finos relativamente altos (40.7% en promedio) y bajos valores en la media granulométrica (81.5 μm en promedio; Figura IV-1). El testigo 223G se dividió en dos unidades estratigráficas principales: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-7). La Unidad 1 presenta valores de media granulométrica entre 67.1 y 82.4 μm , y porcentajes de agua y de sedimentos finos de 65.2-71.4% y 39.4-46.3%, respectivamente. Según el cambio en la tendencia de los parámetros granulométricos y del porcentaje de agua, la Unidad 1 fue subdividida en dos subunidades: 1a y 1b (Figura IV-7). La subunidad 1a presenta una tendencia creciente en la media granulométrica y el porcentaje de agua, mientras el porcentaje de finos se muestra relativamente constante. La subunidad 1b presenta valores de la media granulométrica relativamente mayores respecto de la subunidad inferior, mostrando una tendencia decreciente, opuesta a la tendencia creciente de los sedimentos finos, los cuales presentan valores relativamente menores con respecto a la subunidad 1a.

La Unidad 2 muestra mayores valores de densidad aparente (entre 0.2 y 0.5 g/cm³), reflejado también en la mayor pendiente de la curva de masa acumulada, y de media granulométrica (entre 66.9-98.7 μm), presentando ambos parámetros tendencias relativamente constantes (Figura IV-7). El porcentaje de sedimentos finos muestra una abrupta disminución, mostrando valores entre 34.6 y 46.3%, con tendencia a seguir disminuyendo.

IV.2.7 Testigo 207G

El testigo sedimentario se caracteriza por presentar una alta densidad aparente (0.7 g/cm³ en promedio), con respecto a los demás testigos, exceptuando al testigo PlantaG, y porcentajes de agua y de sedimentos finos relativamente bajos (valores promedios de 41.1% y 24.8%, respectivamente; Figura IV-1). El testigo 207G se dividió en dos unidades estratigráficas principales: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-8).

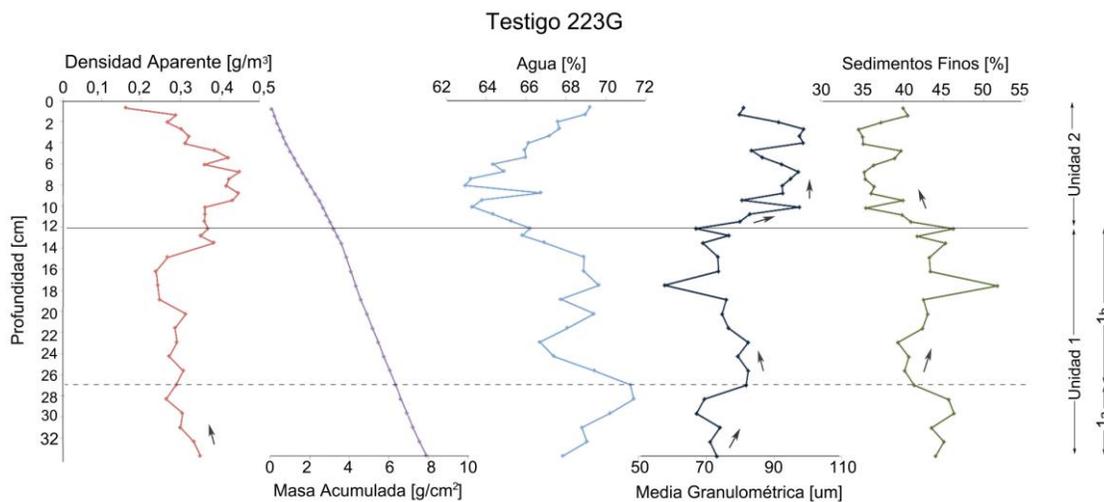


Figura IV-7. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <63μm) del testigo 223G.

La Unidad 1 está caracterizada por presentar un alto porcentaje de sedimentos finos (entre 22.1 y 54.6%) y una baja media granulométrica (entre 67.1 y 82.4 μm), ésta última con tendencia claramente creciente. La Unidad 2, en cambio, presenta valores relativamente altos de la media granulométrica (entre 86.6 y 175.8 μm) y porcentajes relativamente bajos de sedimentos finos (9.3 y 35.0%). Esta unidad fue subdividida además en dos subunidades estratigráficas: 2a y 2b (Figura IV-8); en base a un aumento relativo de la media granulométrica, pasando de una tendencia relativamente constante a una tendencia creciente, acompañada, además, de una disminución relativa del porcentaje de sedimentos finos y de agua. Se observa también un cambio en la tendencia de la densidad aparente, puesto que la subunidad 2a presenta una tendencia débilmente decreciente y la subunidad 2b una tendencia al aumento, ambos tramos, sin embargo, con una alta variabilidad.

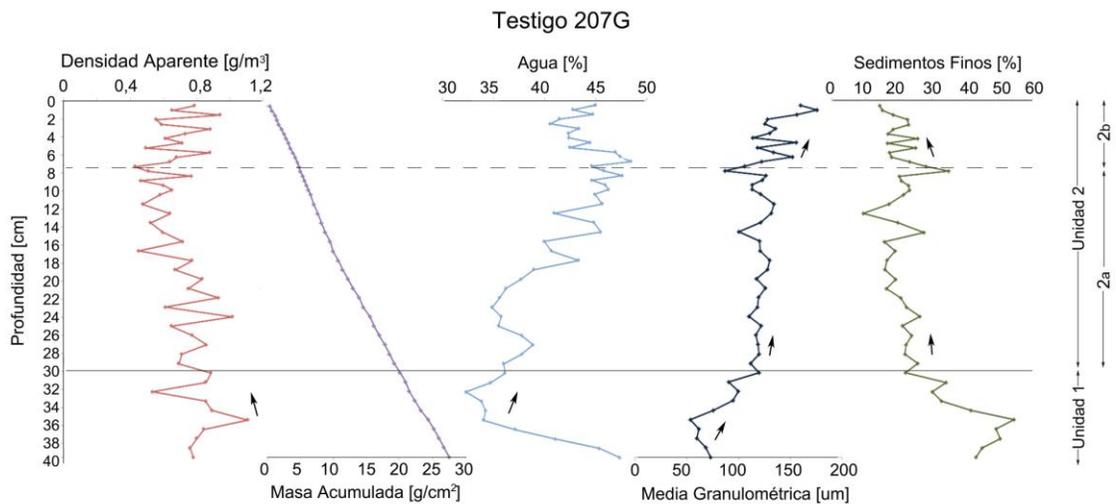


Figura IV-8. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $< \mu\text{m}$) del testigo 207G.

IV.2.8 Testigo 213G

El testigo 213G en general presenta un alto porcentaje de sedimentos finos (41.1% en promedio), porcentaje de agua relativamente alto (72.9% en promedio) y una baja densidad aparente (0.2 g/cm^3 en promedio; Figura IV-1). El testigo sedimentario fue subdividido en dos unidades estratigráficas principales: Unidad 1 y Unidad 2 (Figura IV-9). En la Unidad 1, tanto la media granulométrica como el porcentaje de sedimentos finos se caracterizan por presentar tendencias relativamente constante, pero con una alta variabilidad, mostrando valores entre $53.6\text{-}105.8 \text{ }\mu\text{m}$ y $38.2\text{-}54.2\%$, respectivamente. La densidad aparente, en tanto, presenta una tendencia levemente decreciente, con valores entre 0.15 y 0.33 g/cm^3 .

La Unidad 2 se caracteriza por presentar una tendencia creciente de la media granulométrica (con valores entre 71.3 y $128.8 \text{ }\mu\text{m}$), contraria a la tendencia decreciente del porcentaje de sedimentos finos (con valores entre 44.9 y 25.8%), al igual que el porcentaje de agua. Se observa además una mayor pendiente en la curva de masa acumulada con respecto a la unidad inferior (Figura IV-9).

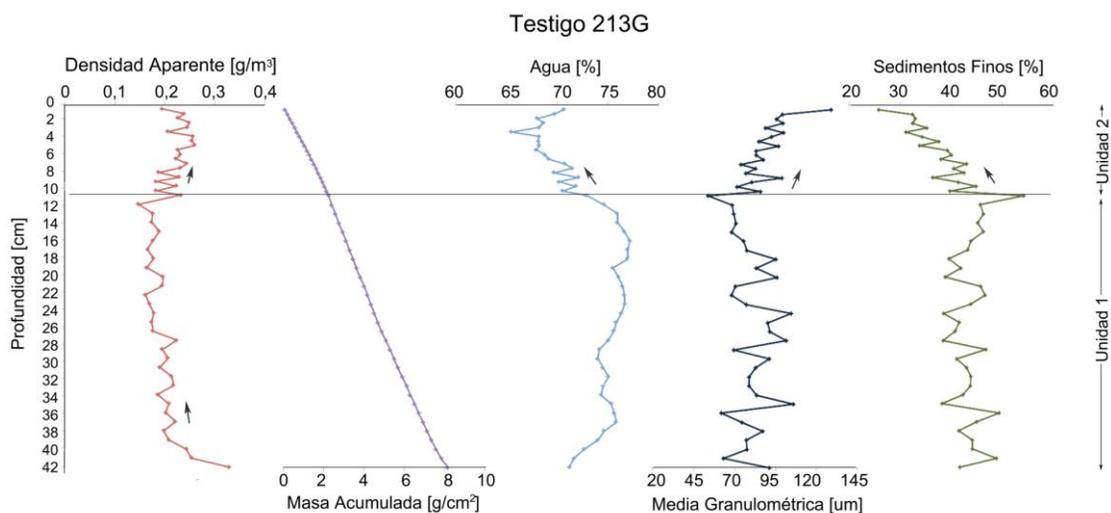


Figura IV-9. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, masa acumulada, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$) del testigo sedimentario 213G.

IV.3 Caracterización Mineralógica

IV.3.1 Testigo SJG

Como se expuso anteriormente, el testigo SJG se caracteriza por presentar una alta media granulométrica (149.9 μm en promedio), sin embargo ésta no representa el tamaño real del grano debido a una alta aglomeración. Esto podría deberse al alto porcentaje de arcillas (illita y montmorillonita) que presentan los sedimentos (32.2% en promedio), las cuales tienen a aglomerarse debido a su alta capacidad de absorber agua. Particularmente en este testigo, además de determinar el porcentaje de illita (25.4% en promedio) y montmorillonita (6.9% en promedio), paralelamente se determinó el porcentaje de caolinita, puesto que el espectro, obtenido a través del análisis de FTIR, muestra una señal (*peak*) característica de este mineral, presentando un porcentaje promedio de 6.2% (Anexo A).

En la Unidad 1, definida anteriormente, se observa una tendencia creciente de la susceptibilidad magnética (con valores entre $9.28 \cdot 10^{-4}$ y $1.25 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$; Figura IV-11), a excepción de los últimos 4 cm superiores de la unidad, donde muestra una tendencia creciente. Esta tendencia decreciente también se observa en la densidad aparente y el porcentaje de sedimentos finos y de arcillas.

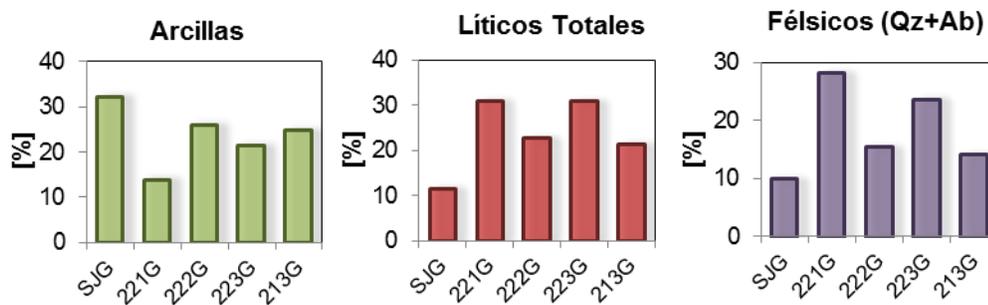


Figura IV-10. Promedio de la, porcentaje de minerales félsicos (cuarzo + albita + bytownita), arcillas (illita + montmorillonita), media granulométrica y sedimentos finos, en los testigos 221G, 222G, 223G y 213G.

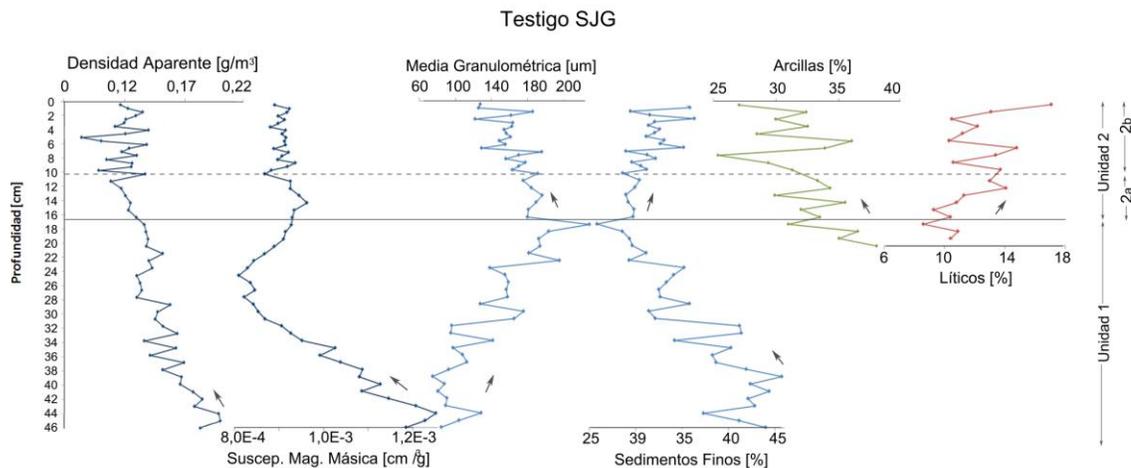


Figura IV-11. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <math><63\mu\text{m}</math>), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo SJJ.

La Unidad 2 presenta una menor varianza de la susceptibilidad magnética, con valores entre $9.63 \cdot 10^{-4}$ y $8.68 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, mostrando una tendencia relativamente constante. Por su parte, el porcentaje de arcillas muestra una tendencia decreciente, con valores entre 25.4 y 35.5%. Contrariamente, el porcentaje de líticos presenta una tendencia creciente, con valores entre 8.2 y 16.7%, dentro de los cuales, el cuarzo y la biotita son los que muestran un mayor aumento relativo (Anexo A).

IV.3.2 Testigo 221G

El testigo 221G presenta una media granulométrica relativamente alta (157.1 μm en promedio), con respecto a los demás testigos, sin considerar el testigo PlantaG. Presenta un alto contenido de líticos (30.1% en promedio), particularmente de minerales félsicos (Figura IV-10), y un bajo porcentaje de arcillas (13.9% en promedio). En la Unidad 1, definida previamente, se observa que la susceptibilidad magnética másica presenta una tendencia decreciente entre los 20 y 40 cm de profundidad, con valores entre $2.35 \cdot 10^{-3}$ y $3.27 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ (Figura IV-12).

La Unidad 2 se caracteriza por presentar un aumento abrupto del porcentaje de sedimentos finos, de la susceptibilidad magnética y del porcentaje de arcillas, con respecto a la unidad inferior. En la subunidad 2a, tanto el porcentaje de sedimentos finos como la susceptibilidad magnética muestran una clara tendencia decreciente, que también se observa, en menor medida y con una mayor variabilidad, en el porcentaje de arcillas (con valores entre 9.2 y 21.2%), sobre en la montmorillonita (Anexo A). El porcentaje de líticos, en tanto, presenta una tendencia general creciente (presentando también una alta variabilidad, con valores entre 25.6 y 37.7%), la cual es observada paralelamente en la densidad aparente y en la media granulométrica. La subunidad 2b está caracterizada por presentar un significativo aumento del porcentaje de sedimentos finos (hasta 32.8%), acompañado de un aumento local del porcentaje de arcillas (hasta 19%) y de la susceptibilidad magnética (hasta $2.94 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$). Se observa además, una importante disminución del porcentaje de líticos (hasta 23%), sobre todo de los minerales félsicos (cuarzo y plagioclasas; Anexo A).

En términos generales, en el testigo 221G se observa que el patrón general de la susceptibilidad magnética másica es similar al del porcentaje de sedimentos finos, mostrando tendencias semejantes y *peaks* locales en las mismas profundidades.

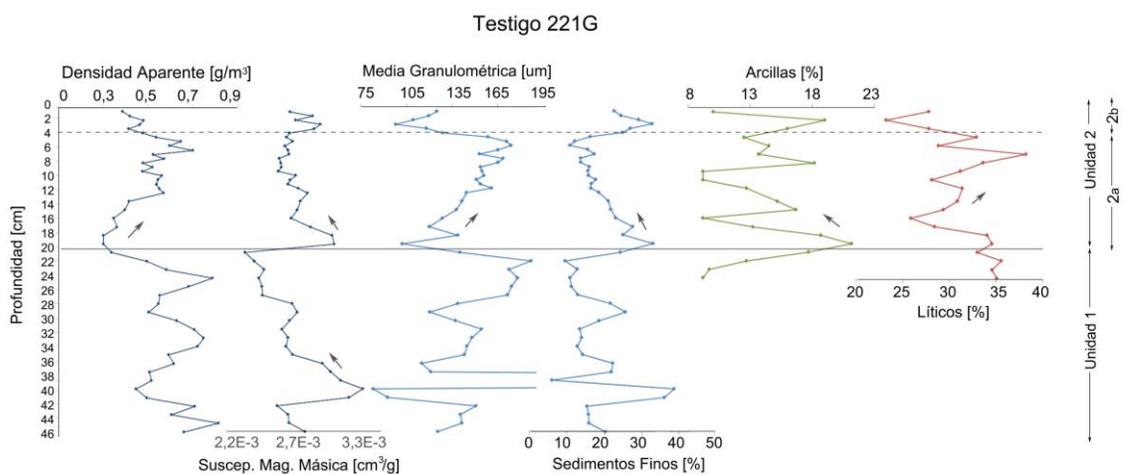


Figura IV-12. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 221G.

IV.3.3 Testigo 222G

EL testigo 222G, caracterizado por un porcentaje de sedimentos finos relativamente alto (40.3%), presenta también un alto porcentaje de arcillas (26% en promedio) y un bajo porcentaje de líticos (especialmente de minerales félsicos), respecto a los testigos 221G, 223G y 213G. En la Unidad 1, definida previamente, la susceptibilidad magnética másica presenta una alta variabilidad, con mínimos importantes a los 24 y 30 cm de profundidad (de $2.26 \cdot 10^{-3}$ y $2.31 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, respectivamente; Figura IV-13). Particularmente, la subunidad 1b presenta una tendencia decreciente de la media granulométrica y del porcentaje de líticos (con valores entre 18.8 y 26.3%), y, en menor medida, del porcentaje de arcillas (con valores entre 22.5 y 35.5%), particularmente de montmorillonita (Anexo A).

La Unidad 2, se caracteriza por un aumento relativo de la media granulométrica, de la densidad aparente y del porcentaje de líticos, donde este último presenta valores entre 20.3 y 27.7%, y muestra, en particular, un alto contenido relativo de cuarzo (hasta

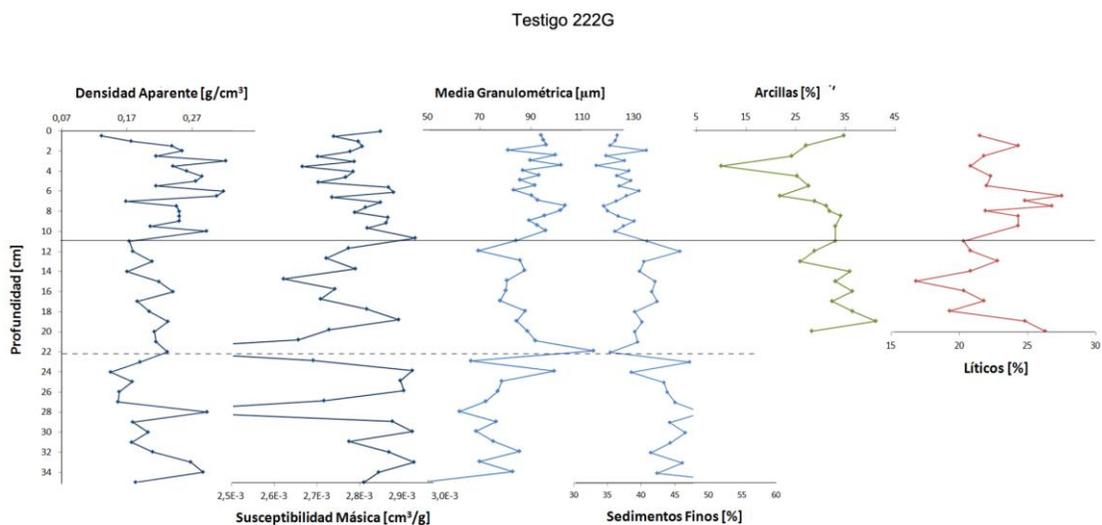


Figura IV-13. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63\mu\text{m}$), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 222G.

9.5%; Anexo A). Al igual que susceptibilidad magnética, el porcentaje de arcillas muestra tendencia a disminuir, mostrando sin embargo, un máximo local a los de 35% en los sedimentos más superficiales (Figura IV-13).

IV.3.4 Testigo 223G

El testigo 223G, al igual que el testigo 221G, presenta un alto porcentaje de líticos (30% en promedio), respecto a los demás testigos. Sin embargo, a diferencia del testigo 221G, presenta una media granulométrica relativamente baja (81.5 μm en promedio). En la Unidad 1, definida anteriormente, la susceptibilidad magnética presenta valores entre $2.67 \cdot 10^{-3}$ y $28.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, con una tendencia levemente creciente, especialmente en la subunidad 1a (Figura IV-14).

La Unidad 2 está caracterizada por un abrupto aumento de la media granulométrica y del porcentaje de líticos (con valores entre 27 y 40.8%), sobre todo de anfíbola y bytownita (Anexo A). Contrariamente, el porcentaje de sedimentos finos, la susceptibilidad magnética y el porcentaje de arcillas, especialmente de montmorillonita,

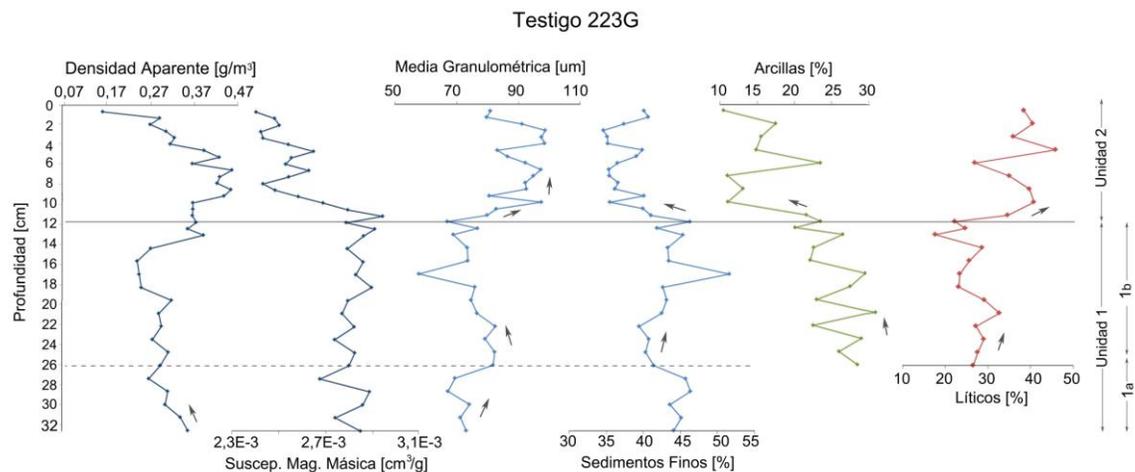


Figura IV-14. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética másica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, <math><63\mu\text{m}</math>), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 223G.

muestran una abrupta disminución (hasta 34.6%, $24.3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ y 10.5%, respectivamente).

IV.3.5 Testigo 213G

El testigo 213G presenta un porcentaje de sedimentos finos relativamente alto (41.1% en promedio) y un porcentaje de líticos totales comparativamente bajo (21.3% en promedio). La Unidad 1 presenta una media granulométrica relativamente constante, pero con una alta variabilidad (Figura IV-15). A partir de los 20 cm de profundidad aproximadamente, se observa que el contenido el porcentaje de arcilla presenta una tendencia decreciente (con valores entre 22.8 y 29.5%), sin embargo, al considerar por separado cada arcilla se tiene que el porcentaje de illita y montmorillonita muestran tendencias opuestas, decreciente y creciente, respectivamente (Anexo A). El porcentaje de líticos, por su parte, muestra una tendencia creciente (con valores entre 12.4 y 23.6%).

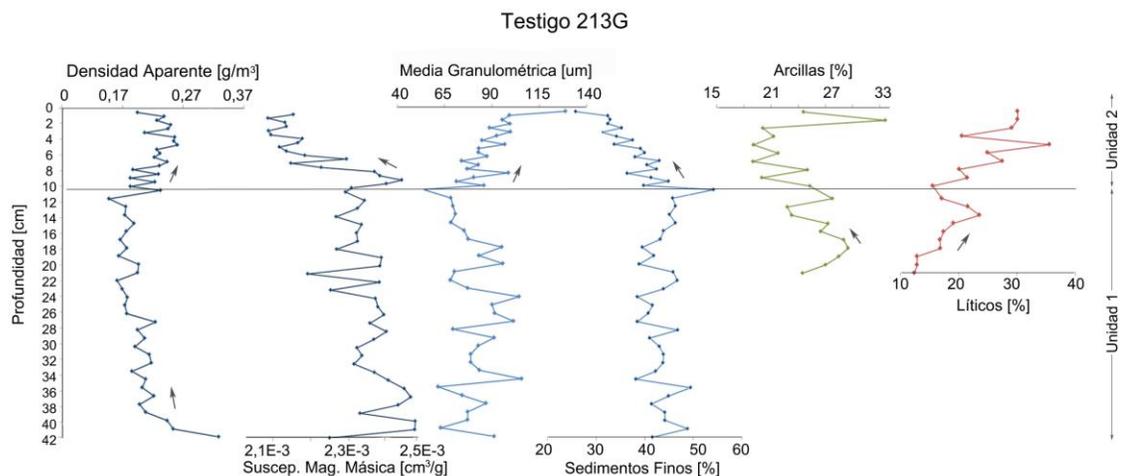


Figura IV-15. Parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad magnética mássica, media granulométrica y porcentaje de sedimentos finos, $<63 \mu\text{m}$), y porcentaje de arcillas (illita + montmorillonita) y líticos totales (cuarzo + albita + bytownita + biotita + anfíbola) del testigo 213G.

La Unidad 2 presenta un menor porcentaje de arcillas, con valores entre 20.1 y 27.8%, sin considerar el primer centímetro, donde el porcentaje de montmorillonita alcanza un 20% (Figura IV-15; Anexo A). Igualmente, en esta unidad se observa un menor porcentaje de sedimentos finos y menores valores de susceptibilidad magnética másica, ambos mostrando una tendencia decreciente. Contrariamente, el contenido de líticos totales aumenta con respecto a la unidad inferior (con valores entre 15.6 y 35.6%), al igual que la media granulométrica y la densidad aparente.

IV.4 Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística exploratoria y multivariable que puede ser usada para analizar la variabilidad de los datos (Reid & Spencer, 2009). En términos simples, el ACP es una técnica de reducción de la dimensionalidad de un conjunto de datos en nuevas variables llamadas “componentes principales” o “factores”, calculadas a partir de combinaciones de las variables originales. La carga de cada factor corresponderá al coeficiente de correlación entre la variable original y el factor, el cual deberá ser próximo a 1, -1 o 0, mostrando una buena correlación positiva, negativa o muy poca correlación, respectivamente.

La primera componente principal, o primer factor, captura la mayor parte de la varianza del conjunto de datos disponibles, el cual puede ser seguido por otros factores que capturan un porcentaje cada vez menor de la varianza total (Webster, 2001). Esto permite agrupar variables cuya variabilidad se comporta de modo similar a lo largo de los testigos, facilitando su interpretación (Reid & Spencer, 2009).

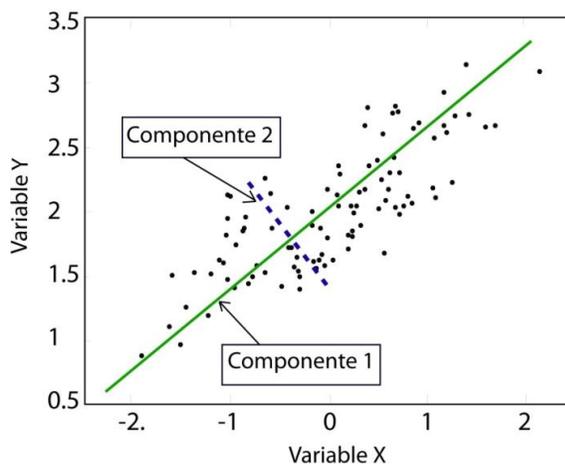


Figura IV-16. Explicación gráfica de la metodología de los componentes principales. Modificado de García-Cabrero & Moreno-Sánchez (2006).

Esta metodología de análisis determina un conjunto de variables m que permiten explicar n variables (en un espacio de n dimensiones), al minimizar el error de reconstrucción lineal y factores ortogonales mientras que maximiza la varianza de las variables. La Figura IV-16 muestra un diagrama de dispersión entre 2 variables X e Y , donde se supone que las variables tiene una relación de tipo lineal y de proporcionalidad directa. Si se definen dos nuevos ejes para representar los datos (línea verde continua y azul discontinua), se puede apreciar que hay un eje sobre el cual, si se proyectan las muestras, estas presentan una mayor variación (línea verde continua), mientras que en el otro (línea azul discontinua) la proyección de los puntos presenta una variación menor que para el eje anterior. Por lo tanto se puede decir que si se quiere representar el conjunto de datos originales en el nuevo sistema de ejes, se requiere una variable (Componente 1), mientras que en el espacio original se necesitarían 2 (X e Y). A estos nuevos ejes se les denomina componentes y cuando esta misma idea se extiende a un espacio de mayor dimensionalidad, se tiene la metodología de los componentes principales (García-Cabrero & Morena-Sánchez, 2006).

Matemáticamente este procedimiento corresponde a la determinación de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza C (de $m \times m$ dimensiones), lo cual está dado por:

$$C \cdot e_i = \lambda_i \cdot e_i$$

Donde e_i serían los vectores propios y λ_i los correspondientes valores propios. En términos concretos las direcciones de los nuevos ejes sobre los cuales se puede proyectar la información corresponderían a los vectores propios, y la extensión de dichos ejes estaría dada por los respectivos valores propios. Estos valores propios corresponden a la varianza explicada por cada uno de los componentes o vectores propios de la matriz de covarianza y de esta forma se puede determinar cuantitativamente cual es la proporción de la información original que es explicada por estos componentes (García-Cabrero & Moreno-Sánchez, 2006).

IV.4.1 Resultado de ACP de los parámetros sedimentológicos

Para generar el ACP de las muestras obtenidas en el río Cruces, San José y Pichoy, se trabaja con el programa XLSTAT-Pro 7. Se incluyen en el análisis la densidad aparente, porcentaje de agua, susceptibilidad magnética volumétrica y másica, media granulométrica y porcentajes de sedimentos finos (<63 μ m) de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G. Se generan matrices de correlaciones de 10 x 10, a partir de las cuales, aplicando el Método del Componente Principal, y se extraen 9 factores que explican el 100% de varianza del sistema (Figura IV-17). Dado que los primeros dos factores de cada testigo explican entre el 73 y 89% de la varianza total, se realiza el análisis mediante estos dos factores más significativos, graficándolos entre sí (Figura IV-18), de manera de visualizar las asociaciones más dominantes del sistema.

A través del ACP es posible distinguir dos grupos principales entre los parámetros sedimentológicos: Grupo 1 y Grupo 2 (Figura IV-18).

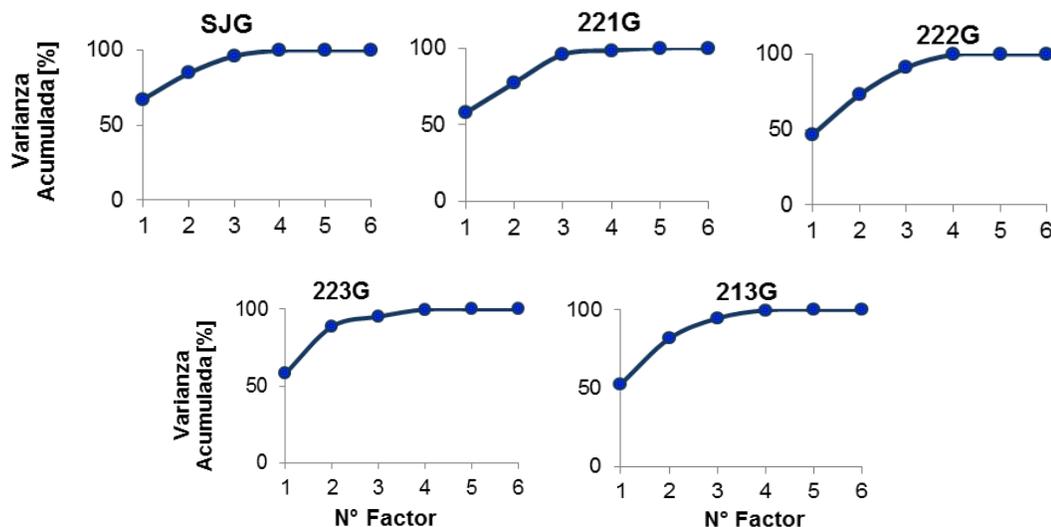


Figura IV-17. Porcentaje acumulado de la varianza para cada componente principal o factor del ACP asociado a la variación sedimentológica de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G.

El Grupo 1 asocia la densidad aparente con la susceptibilidad magnética volumétrica. Sin embargo, esta asociación reflejaría más bien la fuerte influencia de la densidad en el cálculo de la susceptibilidad volumétrica (Sección III.3.1), y no necesariamente una relación proporcional entre la densidad de los sedimentos y la susceptibilidad magnética neta (que está relacionada con el contenido de minerales ferromagnesianos o metales; Thompson, 1975; Evans & Heller 2003). En el caso del testigo SJG, el Grupo 1 también incluye la susceptibilidad magnética másica y el porcentaje de sedimentos finos, sin embargo, se debe tener precaución al considerar esta relación puesto que el porcentaje de sedimentos finos podría no reflejar la real proporción de estos en las muestras del testigo SJG por aglomeración (Figura IV-18). En el testigo 223G, en tanto, también se incluye en este grupo la media granulométrica, asociando de esta manera a los sedimentos de mayor granulometría (>63 μm) a una mayor densidad.

El Grupo 2 asocia al porcentaje de sedimentos finos con el porcentaje de agua y la susceptibilidad magnética másica (a excepción del testigo 222G; Figura III-18).

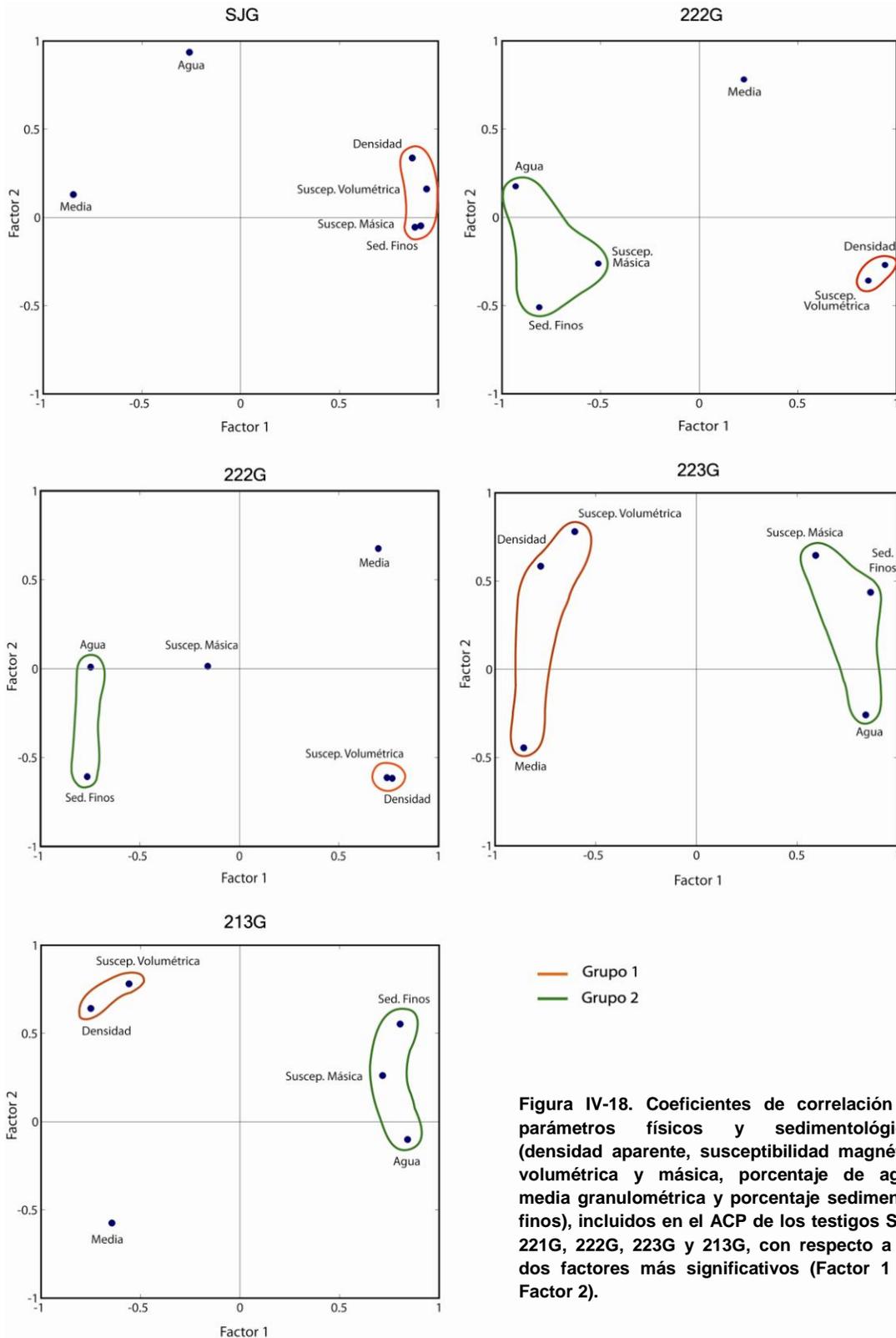


Figura IV-18. Coeficientes de correlación de parámetros físicos y sedimentológicos (densidad aparente, susceptibilidad volumétrica y máscica, porcentaje de agua, media granulométrica y porcentaje sedimentos finos), incluidos en el ACP de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, con respecto a los dos factores más significativos (Factor 1 v/s Factor 2).

IV.4.2 Resultado de ACP de las propiedades físicas, sedimentológicas y mineralógicas

Con el objetivo de determinar las relaciones entre los parámetros sedimentológicos y mineralógicos de los sedimentos de los testigos, se realiza el ACP considerando los primeros 21, 24, 23, 27 y 22 cm de profundidad de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, respectivamente. Se generan matrices de correlaciones de 10 x 10, a partir de las cuales, aplicando el Método del Componente Principal, y se extraen 9 factores que explican el 100% de varianza del sistema (Figura II-19). Dado que los primeros dos factores de cada testigo explican entre el 60 y 77% de la varianza total, se realiza el análisis mediante estos dos factores más significativos, graficándolos entre sí (Figuras II-20), de manera de visualizar las asociaciones más dominantes del sistema.

A través del ACP es posible distinguir dos grupos principales asociaciones: Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3 y Grupo 4 (Figura III-20).

El Grupo 1 asocia, en general, la densidad aparente, susceptibilidad magnética volumétrica, media granulométrica y porcentaje de líticos (Figura III-20). Esto implica que la variabilidad de la media granulométrica está principalmente controlada por el contenido de líticos totales, los cuales a su vez presentan una mayor densidad (y por lo tanto una mayor susceptibilidad volumétrica, como se explicó anteriormente). En el testigo 223G, se encuentran agrupados por separado la densidad y susceptibilidad volumétrica de la media y porcentaje de líticos.

El Grupo 2 asocia el porcentaje de sedimentos finos con el porcentaje de arcillas, de agua y de calcita. En el caso de los testigos 223G y 213G, en este grupo también se encuentra asociada la susceptibilidad magnética másica, excluyendo al porcentaje de agua y de arcillas, respectivamente (Figura III-20). Esto implicaría que, en términos generales, los sedimentos finos (<63µm) estarían asociados principalmente al contenido de arcillas. A su vez, la susceptibilidad másica estaría más bien controlada por el porcentaje de arcillas, al igual que el porcentaje de agua, lo cual es coherente dada la alta capacidad de éstas de adsorber metales en su superficie (Dessai *et al.*, 2009; Coakley *et al.*, 1993; Jonathan *et al.*, 2004) y la alta capacidad de absorber

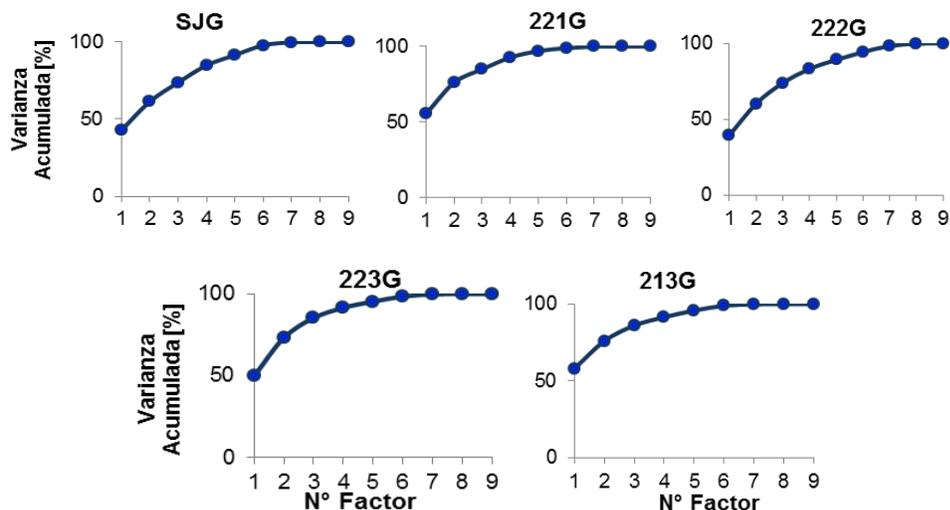


Figura IV-19. Porcentaje acumulado de la varianza para cada componente principal o factor del ACP asociado a la variación sedimentológica y mineralógica de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G.

agua en su estructura, respectivamente. Por otra parte, el contenido de calcita estaría asociado al porcentaje de sedimentos finos, lo cual podría también ser interpretado como una mayor precipitación de carbonatos en ocurrencia de sedimentos más finos.

Con respecto al Grupo 3 y 4, éstos sólo se encuentran en el testigo SJG (Figura III-20). El Grupo 3 asocia a los sedimentos finos y al porcentaje de líticos totales, y el Grupo 4 asocia la media granulométrica con el porcentaje de agua, densidad, susceptibilidad magnética (volumétrica y másica) y porcentaje de calcita. Este comportamiento de la granulometría difiere al comportamiento observado en los demás testigos. Esto se debería a la alta capacidad de aglomeración que tienen las arcillas (las cuales se presentan en un porcentaje significativo en el testigo SJG), lo cual podría inducir a resultados erróneos en la medición de la granulometría, y por lo tanto, a resultados descriptivos y estadísticos equívocos.

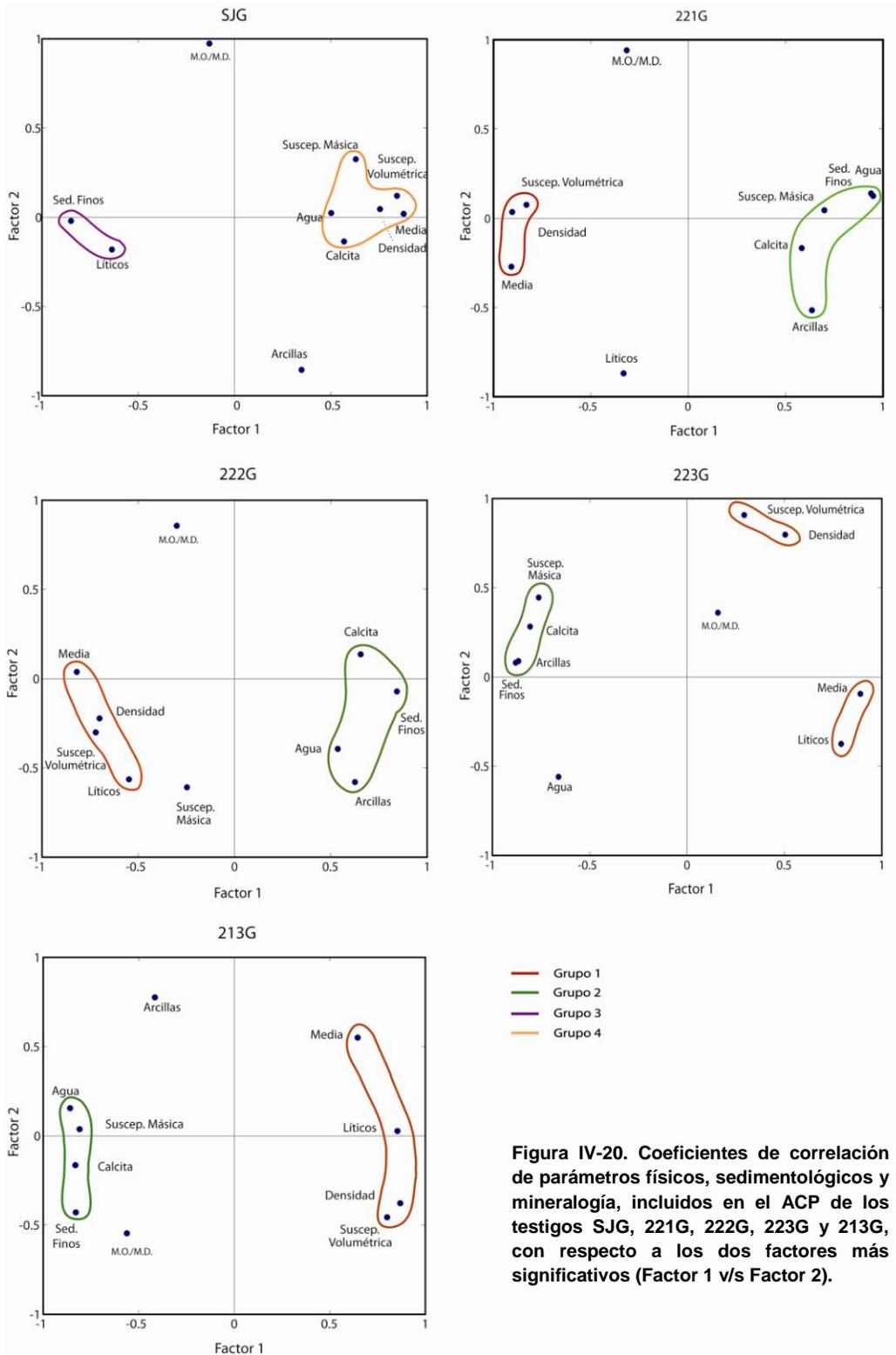


Figura IV-20. Coeficientes de correlación de parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía, incluidos en el ACP de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, con respecto a los dos factores más significativos (Factor 1 v/s Factor 2).

V. CAPÍTULO: CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS

V.1.1 Introducción

El muestreo geoquímico realizado en este trabajo tiene como objetivo la caracterización de los elementos Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Mn, Ti, P, Ba, Cr, Co, Li, Ni, Cu, Pb, Sc, V, Y, Zn, S y Cl, de los sedimentos fluviales del río Cruces (testigos 221G, 222G y 223G) y del río Pichoy (testigo 213G).

La metodología utilizada para el tratamiento de los datos consistió en la descripción breve de los elementos a lo largo de cada testigo sedimentario, con el propósito de observar las variaciones de estos en profundidad, y el análisis estadístico mediante la Distribución de Frecuencia de los elementos, Análisis de Componentes Principales y Redes Neuronales Artificiales, con el fin de determinar los patrones entre los elementos y factores que podrían afectar su distribución.

V.2 Descripción de la geoquímica de los sedimentos

V.2.1 Testigo 221G

En la primera unidad definida (I; Figura V-1), entre los 30 y 46 cm de profundidad, los patrones de los óxidos Na_2O , MgO , CaO , TiO_2 y K_2O se observan muy similares y con concentraciones relativamente bajas con respecto a los niveles más superiores, presentando una tendencia creciente. Particularmente, a los 40 cm de profundidad, se

observa una disminución importante de éstos elementos, opuesta a un aumento significativo del S, Zn, Cu y de los metales trazas en general.

Entre los 22 y 29 cm de profundidad, correspondiente a la segunda unidad definida (II; Figura V-1), se observa un aumento significativo en las concentraciones de SiO_2 , Na_2O , MgO y CaO y de la razón Si/Al, en tanto, los óxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 tot, MnO y P_2O_5 , los elementos trazas como Pb, Sc, Co, Cu, Ba, Cr y S, y la razón Mn/Fe, muestran una notoria disminución en sus concentraciones respectivas. Este patrón geoquímico observado es coincidente con un aumento en la media granulométrica a estas profundidades (Figura IV-3). El Cl y Li no varían significativamente en este intervalo de profundidad. Se observa además un aumento significativo del azufre a partir de los 22 cm hacia la superficie.

En la tercera unidad definida (III; Figura V-1), que comprende los primeros 21 cm de profundidad, se observa una alta variabilidad de la concentración de los óxidos y elementos traza, presentando una tendencia generalmente constante, a excepción del SiO_2 , Na_2O , K_2O , Cu y Zn que presentan una tendencia creciente. Particularmente, entre los 1.8 y 3.6 cm de profundidad, se observan valores elevados en las concentraciones de Al_2O_3 , Fe_2O_3 tot, P_2O_5 , V, S y Ba, y de metales trazas como Sc, Co, Ni, Cu, Cr y Zn.

V.2.2 Testigo 222G

Entre los 25 y 40.7 cm de profundidad (unidad I; Figura V-2), se observa un menor porcentaje en peso en las concentraciones de los óxidos Na_2O , MgO , CaO , TiO_2 y K_2O , respecto a los niveles superiores, en tanto, los óxidos MnO y P_2O_5 muestran un leve mayores concentraciones. El S y Cl muestran un brusco aumento a los 25.6 cm de profundidad. En términos generales, el patrón de cada óxido se observa muy paralelo con respecto a los demás óxidos, observando mínimos locales en sus concentraciones a los 25.6 y 32.6 cm, al igual que mínimos locales observados en los elementos Y, Sc, Co, Ni, Cu, Cr, Zn, V, Ba y S.

En la segunda unidad definida (II; Figura V-2), definida entre los 11 y 24.4 cm de profundidad, las concentraciones de los óxidos y metales muestran una baja variación, a excepción del S, que presenta una alta variabilidad, y del CaO y Al₂O₃, que presentan una tendencia a creciente.

En los primeros 10.5 cm de profundidad, correspondientes a la tercera unidad definida (III; Figura V-2), el sedimento se caracteriza por un progresivo aumento en las concentraciones de K₂O, MgO, CaO, Cr y de la razón Si/Al, en tanto el porcentaje en peso del Al₂O₃, Fe₂O_{3 tot} P₂O₅, MnO y, en menor proporción, S, Cl y Zn muestran una leve tendencia a la disminución.

V.2.3 Testigo 223G

En la primera unidad definida, entre los 12.7 y 33.5 cm de profundidad (I; Figura V-3), el SiO₂ muestra una alta variabilidad, presentando valores de hasta 47.6 wt% a los 22.8 cm de profundidad. Las concentraciones de Na₂O, K₂O, MgO, TiO y Zn muestran tendencias crecientes. Por el contrario, las concentraciones de Al₂O₃, Fe₂O_{3 tot}, MnO y P₂O₅ muestran tendencias levemente decrecientes.

De manera similar al testigo 222G, en los primeros 12 cm de profundidad, correspondientes a la segunda unidad definida (II; Figura V-3), se observa un aumento progresivo en las concentraciones de SiO₂, MgO, CaO, Na₂O, K₂O y Pb y en la razón Si/Al, en tanto los óxidos Al₂O₃, Fe₂O_{3 tot}, MnO, P₃O₅, TiO₂ y metales trazas como Co, Cu, Sc, Cr y Cl, presentan una tendencia decreciente.

En general, se observan variaciones de gran amplitud en las concentraciones de Cl y S, los cuales presentan patrones relativamente similares. Por su parte, los elementos trazas como V, Li, Ni Y Ba muestran concentraciones relativamente constante a lo largo del testigo (Figura V-3).

Testigo 221G

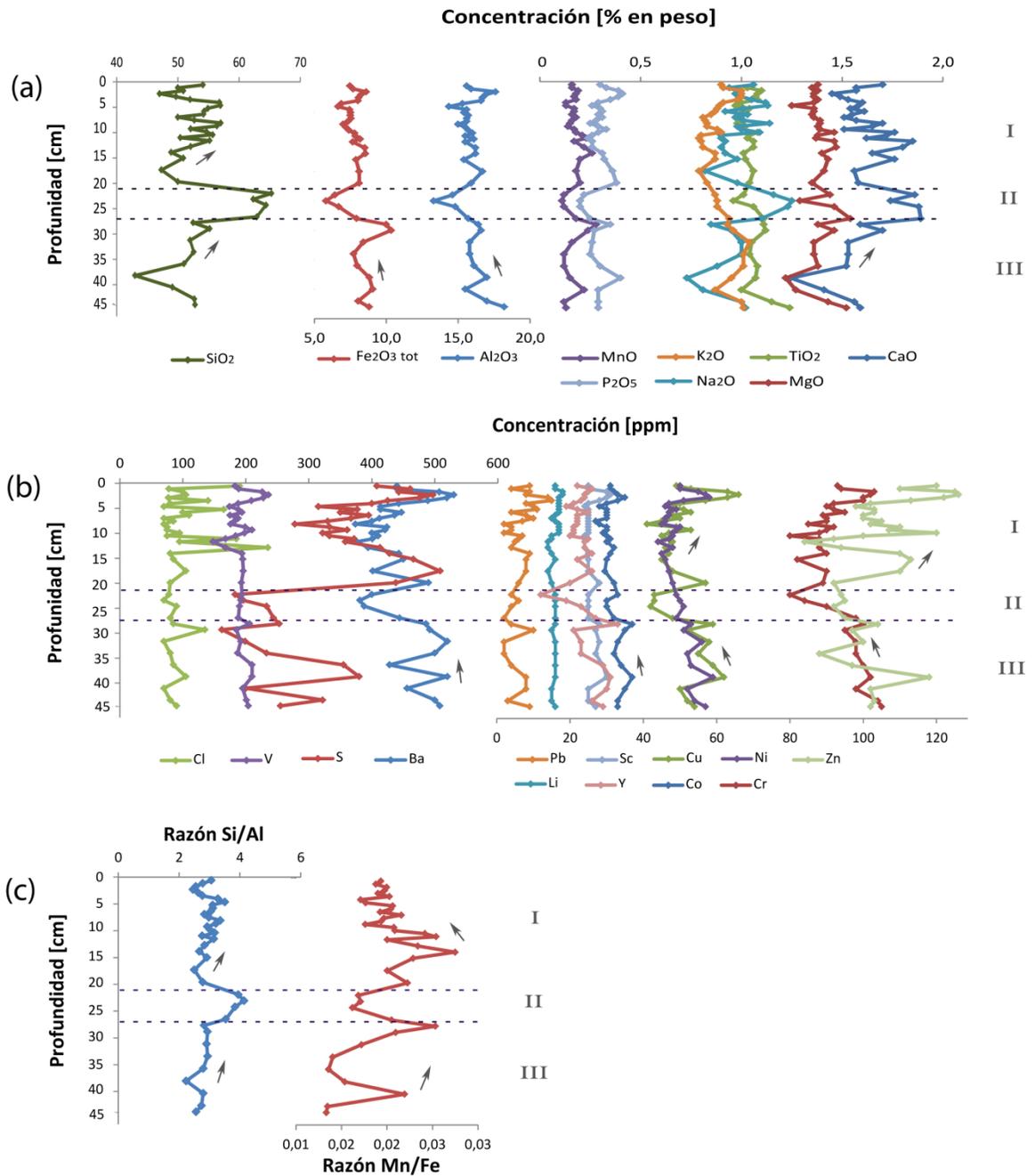


Figura V-1. Variaciones de la geoquímica del testigo 221G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.

Testigo 222G

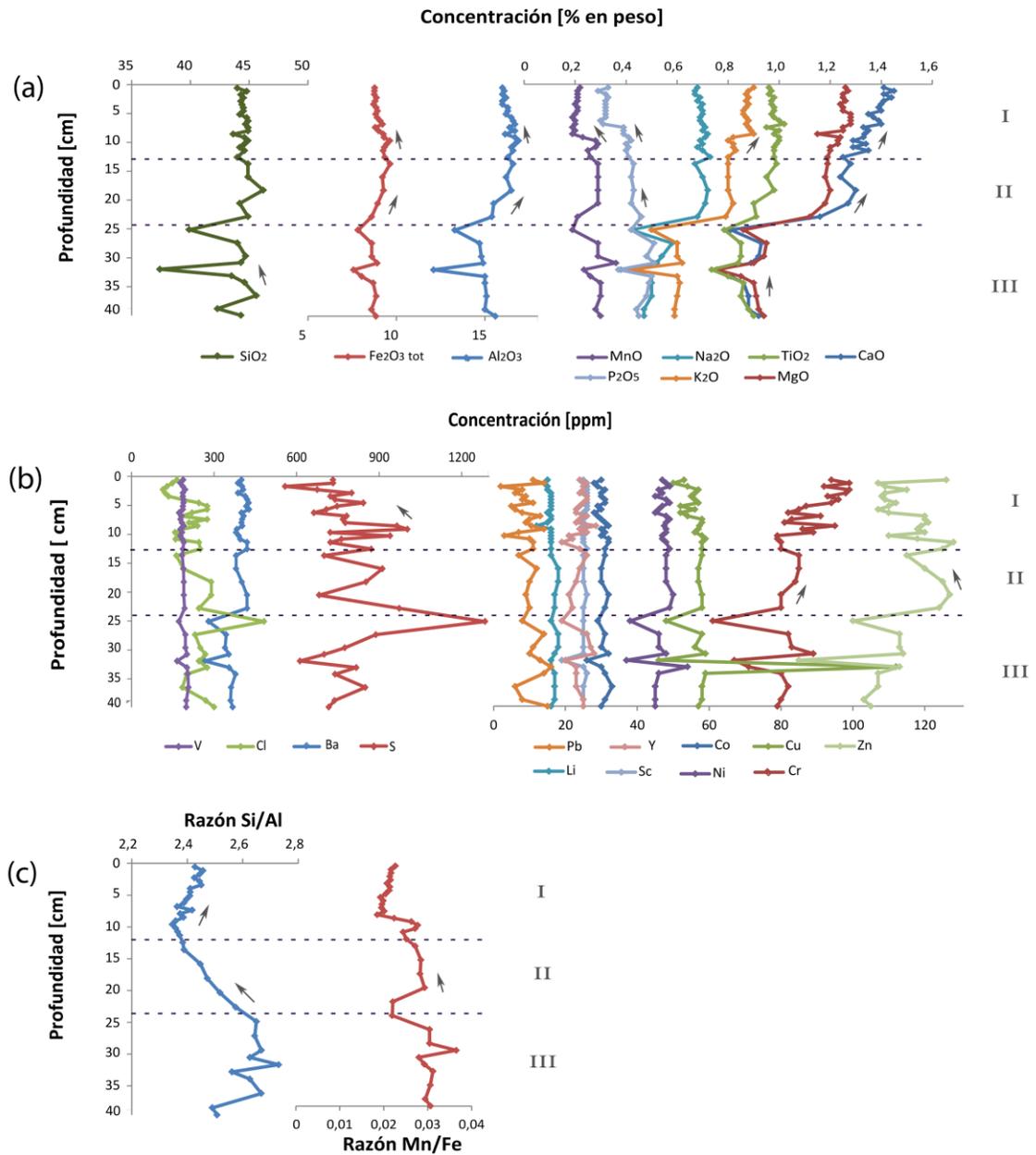


Figura V-2. Variaciones de la geoquímica del testigo 222G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.

V.2.4 Testigo 213G

La primera unidad definida, entre los 33 y 43.5 cm de profundidad (I; Figura V-4), muestra un máximo local en la concentración de SiO_2 (hasta 41 wt%), mientras las concentraciones de Al_2O_3 , Fe_2O_3 tot., MnO , Cr y Zn muestran bajas concentraciones con respecto a los niveles superiores. El S , en tanto, muestra valores elevados respecto a los niveles superiores, sobre todo a los 40 cm (hasta 800 ppm).

En la segunda unidad definida, entre los 10.3 y 32.6 cm de profundidad (II; Figura V-4), las concentraciones de SiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , Ba y Cr muestran una tendencia creciente. En general, las concentraciones de los elementos de V , Li , Y , Sc y, en menor proporción Ni , se mantienen con valores relativamente constantes a lo largo de todo el testigo.

De manera similar a los testigos 222G y 223G, los primeros 10 cm del testigo 213G, correspondientes a la tercera unidad definida (III; Figura V-4), muestran un aumento progresivo en las concentraciones de SiO_2 , MgO , K_2O , CaO , Si/Al y, en menor proporción, de Cr . En tanto, los elementos y óxidos Zn , Cu , Co , Al_2O_3 y P_2O_5 muestran menores concentraciones con respecto a niveles inferiores.

Testigo 223G

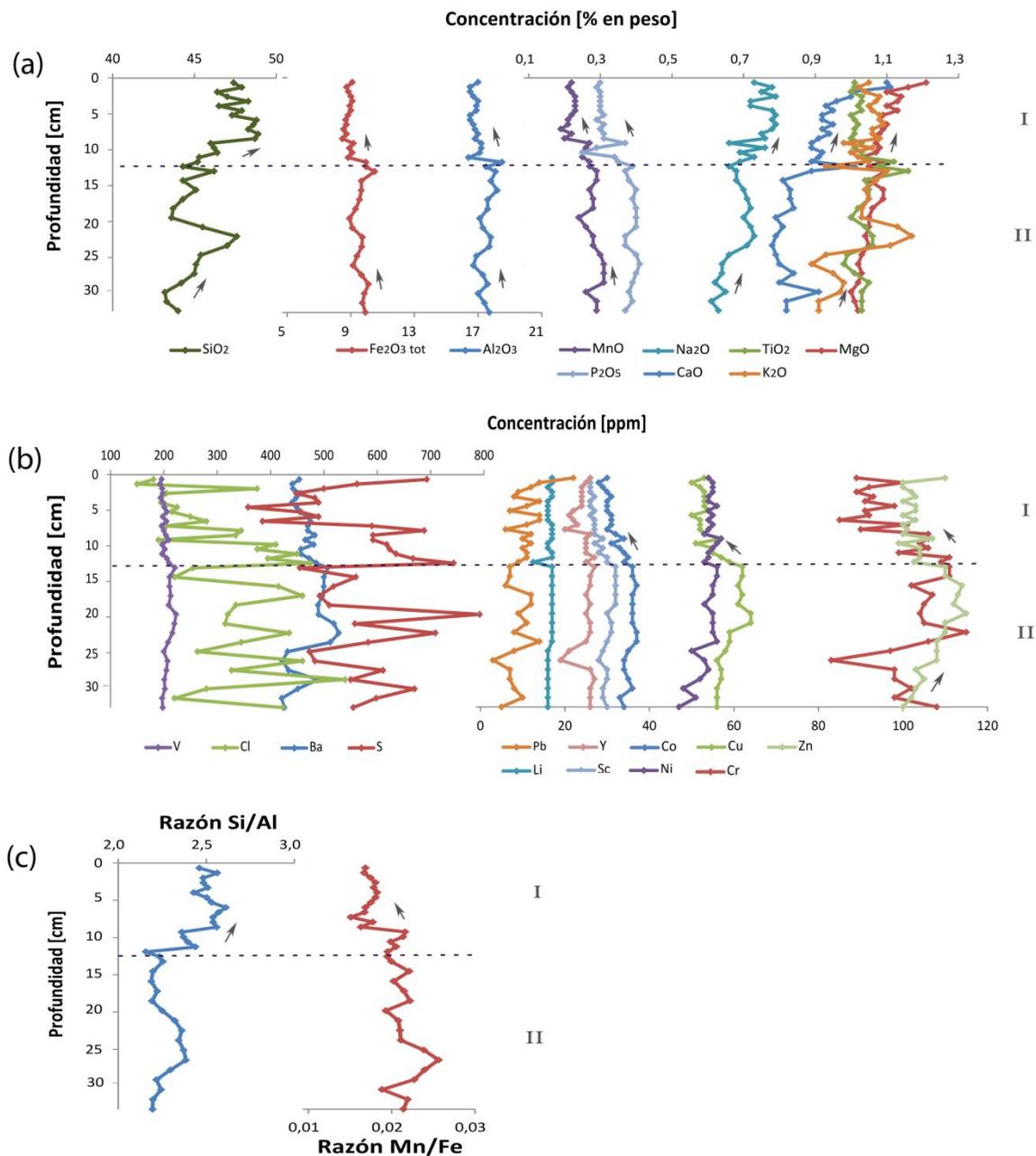


Figura V-3. Variaciones de la geoquímica del testigo 223G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.

Testigo 213G

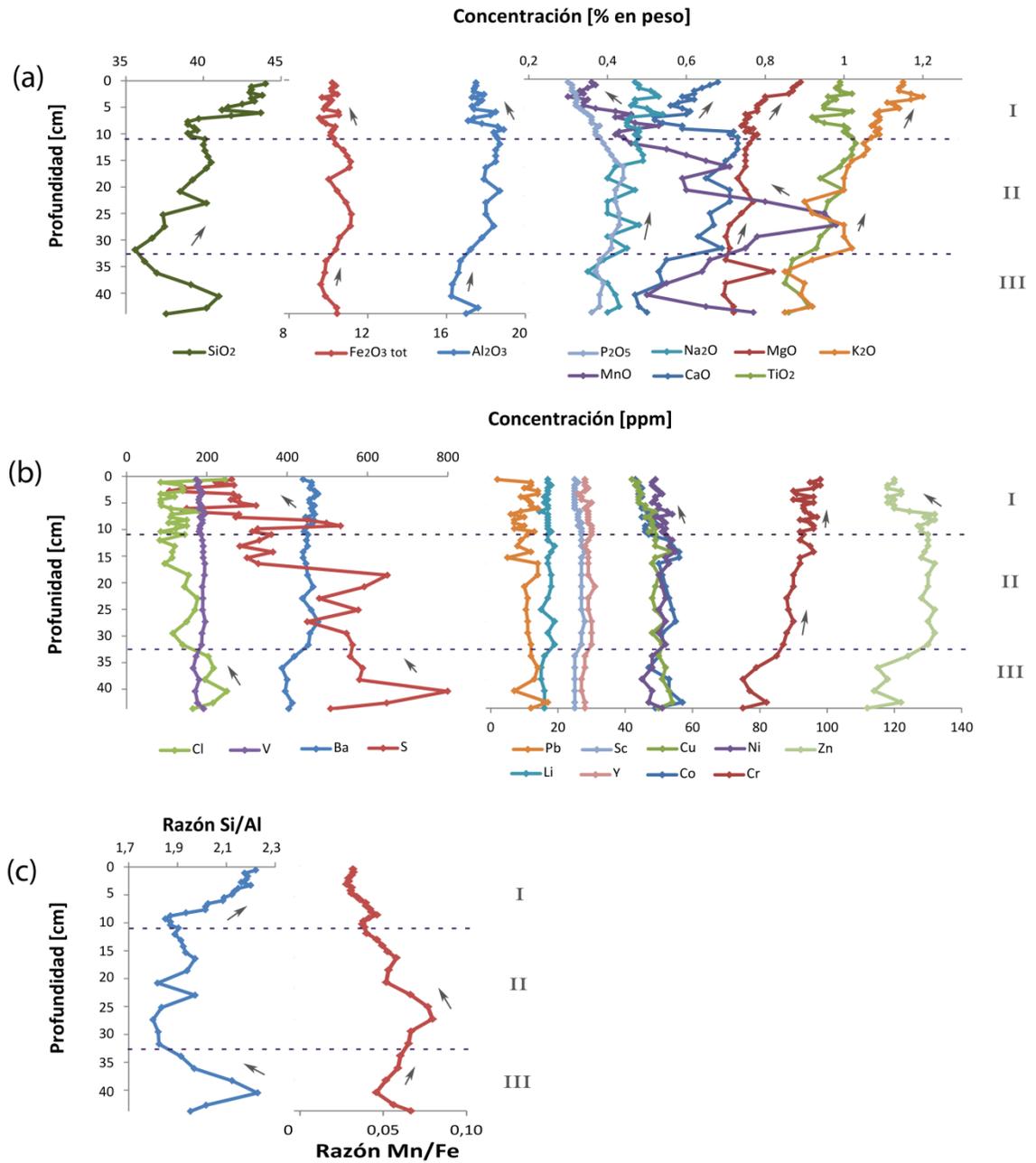


Figura V-4. Variaciones de la geoquímica del testigo 213G en profundidad. (a) Elementos mayores (como óxidos) (b) Elementos trazas (c) Razón Si/Al y Mn/Fe. Marcadores a los 17 y 25 cm de profundidad.

V.3 Distribución de Frecuencia

La distribución de frecuencia de las concentraciones de los elementos presentes en el medio ambiente, en general, muestran una tendencia “log-normal” (Gubac, 1986). Esto significa que los logaritmos de las concentraciones observadas se distribuyen normalmente en el histograma, es decir, con muchos valores bajos y pocos valores altos. Sin embargo, aquellos elementos que presentan distribuciones de frecuencias “normal” también son considerados como representativos del medio ambiente (Apitz *et al.*, 2009; Castillo, 2008). En el corto tiempo que concierne a este trabajo (aproximadamente 50 años; corto con respecto a la escala geológica del tiempo), es posible esperar un contenido casi constante de los elementos trazas en los distintos minerales y así, la misma distribución de frecuencia (Apitz *et al.*, 2009).

La determinación de la distribución de frecuencia de los elementos se realiza mediante la prueba del Chi-cuadrado, en donde se calcula un índice de discrepancia (χ^2), entre las frecuencias observadas y las que son previsible encontrar, en el caso de que el modelo elegido sea el adecuado (Castillo, 2008). Entre menor es este índice, mayor es la probabilidad de que los datos se ajusten al tipo de distribución esperada, ya sea normal o log-normal.

V.3.1 Resultados de la Distribución de Frecuencia

Mediante el programa XSLTAT-Pro 7.5, se obtienen los histogramas y los valores Chi-cuadrado de la distribución de la geoquímica de los sedimentos de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G analizados en conjunto (*i.e.* todos los datos geoquímicos juntos Tabla V-1).

En general, se tiene que la mayoría de los elementos se distribuyen ya sea de manera normal o log-normal. Sin embargo, para los elementos Mg, K, Li, Co y Sc los índices de discrepancia en la prueba del Chi-cuadrado son muy elevados, lo que indicaría que estas cinco variables no se comportan “normal” o “log-normalmente”.

Tabla V-1. Distribución de frecuencia para las variables, según los valores Chi-cuadrado.

Elemento	χ^2 observado Distr. Normal	χ^2 observado Distr. Log-normal	Tipo de Distribución
Si	63,23	41,97	Log-Normal
Al	13,25	31,69	Normal
Ca	49,98	45,22	Log-Normal
Mg	89,17	85,78	No comprueba
Fe	12,47	19,30	Normal
Mn	147,75	21,65	Log-Normal
Ti	35,67	49,16	Normal
Na	30,92	31,62	Normal
K	51,95	117,66	No comprueba
P	14,75	14,40	Log-Normal
Ba	22,31	76,54	Normal
Co	128,76	96,44	No comprueba
Cr	13,09	25,62	Normal
Cu	10,60	328790,65	Normal
Li	61,38	130,50	No comprueba
Ni	22,28	36,76	Normal
Pb	25,62	55,30	Normal
Sc	79,39	75,39	No comprueba
V	10,80	8,43	Log-Normal
Y	25,38	163,80	Normal
Zn	24,59	26,64	Normal
S	9,62	15,02	Normal
Cl	61,76	11,49	Log-Normal

En la Figura V-5 se observa que tanto el Mg, K y Co presentan una distribución bimodal. Para el caso del Mg, esto se debería a las bajas concentraciones obtenidas en el testigo 213G (<0.57 wt%) y en los sedimentos entre los 25.6 y 40.7 cm de profundidad del testigo 222G, las cuales coinciden con bajos valores de K (<0.55 wt%) a esa profundidad. Por su parte, el Co presenta un comportamiento bimodal debido a los altos valores de este elemento (>43 ppm) obtenidos en el testigo 213G (Figura V-5). Este comportamiento se observa de manera similar en el histograma del Mn, el cual tiene una distribución log-normal, pero con una curva de asimetría fuertemente positiva debido a las altas concentraciones de Mn (>0.27% wt) medidas en el río Pichoy (testigo 213G). En los histogramas del Sc y Li se observan *outliers* (de 19 y 12-13 ppm, respectivamente), correspondientes a las contribuciones responsables de la no-conformidad de la prueba Chi-cuadrado (Figura V-5). Sin embargo, estos valores corresponden a valores aislados que no reflejan una anomalía real. En el caso del Li, los bajos valores *outliers* podrían deberse a la técnica utilizada durante la fusión

geoquímica, realizada en el análisis de los sedimentos, en la cual se utilizó una mezcla de litiotetraborato ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), que podría influenciar las concentraciones de Li.

Los elementos Si y Ca presentan valores de χ^2 relativamente altos. Esto se refleja en los histogramas respectivos (Figura V-5), donde el Si presenta altas concentraciones aisladas (entre 28.7 y 30.1 wt%), obtenidas entre los 23 y 27.8 cm del testigo 221G. El Ca presenta, en cambio, un comportamiento bimodal, debido a las altas concentraciones obtenidas en los testigos 221G y 222G (>0.77 wt%), respecto a los testigos 223G y 213G.

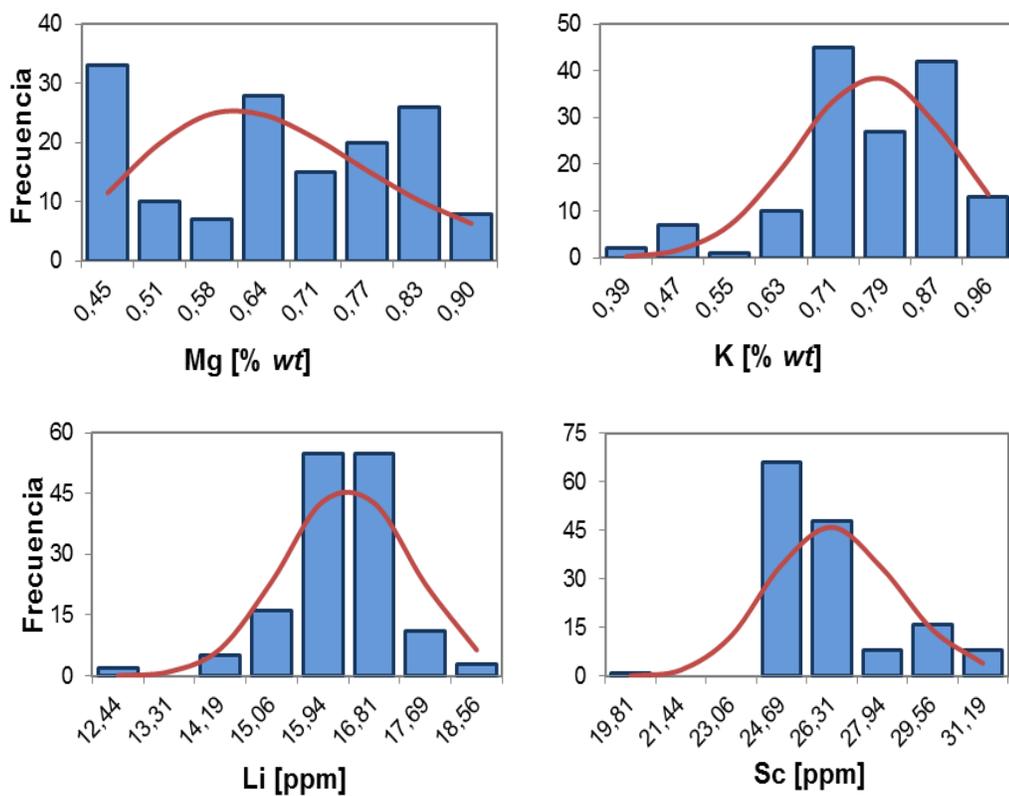


Figura V-5. Histogramas de Distribución de frecuencia observadas (barras azules) y teóricas (línea roja) para Mg, K, Li y Sc en los testigos 221G, 222G, 223G y 213G en conjunto.

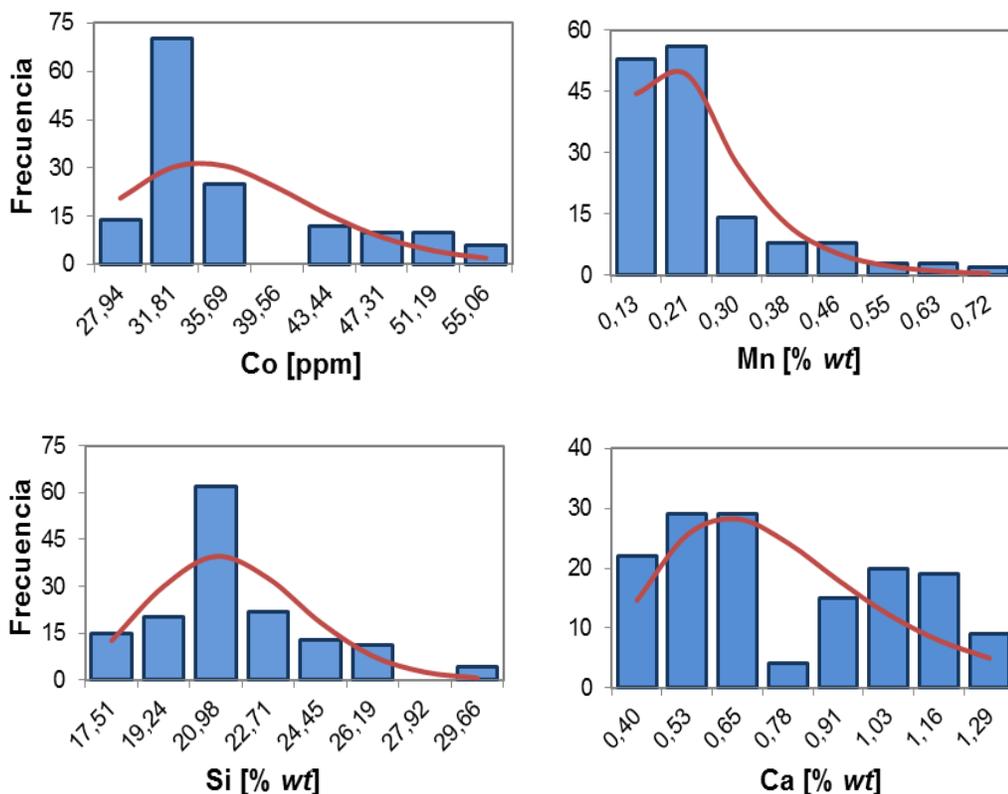


Figura V-5 (continuación). Histogramas de Distribución de frecuencia observadas (barras azules) y teóricas (línea roja) para Co, Mn, Si y Ca de los testigos 221G, 222G, 223g y 213G en conjunto.

V.4 Análisis de Componentes Principales

Para generar el ACP de las muestras obtenidas en el río Cruces y Pichoy, se trabaja con el programa XLSTAT-Pro 7.5. Se incluyen en el análisis todos los óxidos y elementos trazas analizados además del porcentaje de sedimentos finos ($<63\mu\text{m}$) de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G. Se generan matrices de correlaciones de 24×24 , a partir de las cuales, aplicando el Método del Componente Principal, se extraen 24 factores que explican el 100% de varianza total del sistema (Figura V-6).

Tomando en cuenta que los primeros tres factores de cada testigo explican entre el 70 y 73%% de la varianza total, se realiza el análisis mediante estos factores más significativos (Tablas V-2, 3, 4 y 5) y graficándolos entre sí (Factor 1 v/s Factor 2 y Factor 1 v/s Factor 3; Figuras V-7, 8, 9 y 10), de manera de poder visualizar las asociaciones de elementos más dominantes del sistema.

En la Figura V-6 se muestra la varianza acumulada para cada componente principal de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G.

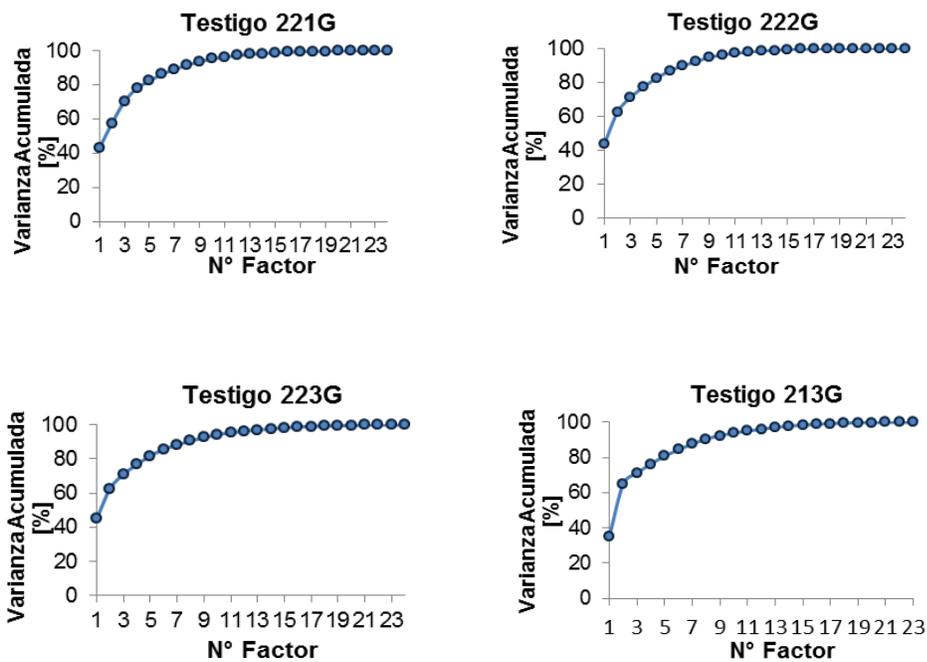


Figura V-6. Porcentaje acumulado de la varianza para cada componente principal o factor del ACP asociado a la variación de la geoquímica de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G.

Tabla V-2. Componentes principales o factores del ACP del testigo 221G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6 (Reid & Spencer, 2009; Castillo, 2008; Spencer, 2002).

Elemento	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Si	-0,720	-0,471	0,335
Al	0,817	0,237	0,241
Ca	-0,693	0,016	0,412
Mg	-0,184	0,101	0,650
Ti	0,570	-0,002	0,663
Mn	0,235	0,724	0,068
Fe	0,684	0,480	0,411
Na	-0,548	-0,687	0,016
K	0,664	-0,583	0,308
P	0,819	0,155	-0,441
Ba	0,864	-0,221	0,135
Co	0,725	0,005	0,401
Cr	0,826	-0,229	0,272
Cu	0,919	-0,170	-0,058
Li	0,241	-0,699	-0,374
Ni	0,787	-0,413	0,240
Pb	0,340	0,115	-0,415
Sc	0,853	-0,308	-0,030
V	0,745	-0,424	-0,177
Y	0,628	0,318	0,280
Zn	0,599	-0,106	-0,478
S	0,341	0,359	-0,635
Cl	0,032	0,471	0,091
Sed. Finos	0,791	0,222	-0,146

Tabla V-3. Componentes principales o factores del ACP del testigo 222G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6 (Reid & Spencer, 2009; Castillo, 2008; Spencer, 2002).

Elemento	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Si	0,725	0,551	-0,030
Al	0,930	0,169	0,060
Ca	0,942	-0,298	0,017
Mg	0,952	-0,245	0,077
Ti	0,949	-0,091	0,025
Mn	-0,364	0,721	-0,170
Fe	0,745	0,322	0,033
Na	0,945	-0,041	0,182
K	0,973	-0,164	0,049
P	-0,569	0,738	0,178
Ba	0,895	0,178	0,055
Co	0,240	0,741	0,176
Cr	0,743	-0,006	-0,511
Cu	-0,123	0,535	0,092
Li	-0,368	0,485	0,125
Ni	0,599	0,587	0,041
Pb	-0,334	0,233	-0,054
Sc	0,620	0,409	0,157
V	-0,104	0,839	-0,244
Y	0,306	0,260	-0,612
Zn	0,615	0,469	0,383
S	-0,183	0,020	0,736
Cl	-0,553	0,002	0,581
Sed. Finos	-0,606	0,340	-0,391

Tabla V-4. Componentes principales o factores del ACP del testigo 223G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6 (Reid & Spencer, 2009; Castillo, 2008; Spencer, 2002).

Elemento	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Si	-0,772	0,394	-0,095
Al	0,797	0,284	0,299
Ca	-0,737	0,088	0,492
Mg	-0,626	0,500	0,266
Ti	0,527	0,437	0,482
Mn	0,846	-0,309	-0,032
Fe	0,819	-0,091	0,383
Na	-0,745	0,534	-0,157
K	-0,226	0,892	-0,120
P	0,864	-0,197	-0,249
Ba	0,434	0,779	-0,108
Co	0,936	0,123	-0,165
Cr	0,664	0,365	0,333
Cu	0,889	0,248	-0,206
Li	-0,023	0,536	-0,257
Ni	-0,199	0,737	-0,150
Pb	-0,458	0,388	0,331
Sc	0,950	0,186	-0,053
V	0,689	0,459	-0,320
Y	0,521	0,310	0,621
Zn	0,650	0,399	-0,356
S	0,289	0,005	0,289
Cl	0,520	-0,179	-0,037
Sed. Finos	0,810	-0,088	0,174

Tabla V-5. Componentes principales o factores del ACP del testigo 213G. Se destacan en negrilla las coordenadas mayores a 0.6 (Reid & Spencer, 2009; Castillo, 2008; Spencer, 2002).

Elemento	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Si	0,275	-0,772	0,441
Al	0,776	0,338	0,272
Ca	0,746	0,302	0,254
Mg	0,327	-0,773	0,254
Ti	0,880	-0,067	0,357
Mn	-0,220	0,835	0,081
Fe	0,368	0,545	0,612
Na	0,855	-0,298	-0,172
K	0,814	-0,398	-0,310
P	0,564	0,514	-0,335
Ba	0,824	-0,170	-0,178
Co	-0,199	0,848	0,249
Cr	0,853	-0,304	-0,042
Cu	-0,425	0,798	0,059
Li	0,565	0,229	-0,048
Ni	0,633	0,490	0,123
Pb	-0,254	0,024	-0,094
Sc	0,549	0,781	0,016
V	0,540	0,527	-0,025
Y	0,452	0,509	-0,251
Zn	0,587	0,657	-0,263
S	-0,627	0,584	-0,147
Cl	-0,671	0,115	0,263
Sed. Finos	-0,139	0,744	-0,003

A través del ACP es posible distinguir tres grupos principales de elementos en los testigos 222G, 223G y 213G: Grupo 1, Grupo 2 y Grupo 3 (Figuras V-8, 9 y 10). En el testigo 221G se observan asociaciones particulares, agrupadas en los Grupos 4 y 5 (Figura V-7).

El Grupo 1 asocia a aquellos elementos propios de la litología y mineralogía del sector (Illies, 1970; Di Biase & Lillo, 1973; Díaz *et al.*, 1988). Los elementos Al, Si, Ca, Na, \pm K

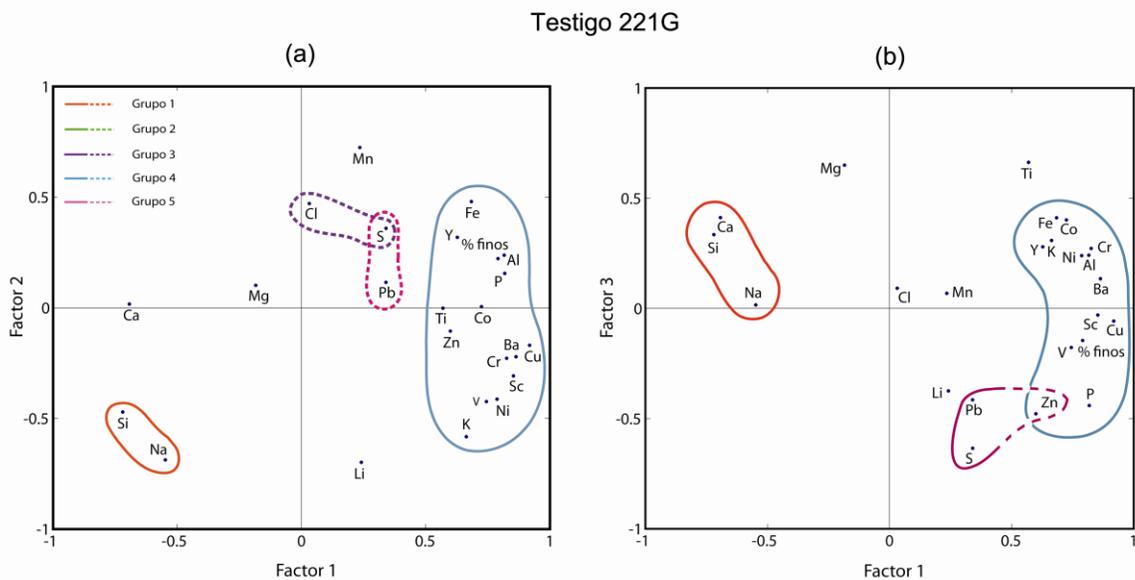


Figura V-7. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 221G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.

y $\pm\text{Ba}$ (dado que usualmente el Ba^{2+} sustituye al K^+ ; Rankama & Sahama, 1954) se encuentran principalmente relacionados en minerales félsicos como cuarzo, feldspatos (potásicos y sódicos), plagioclasas y ceolitas; mientras que los elementos como Fe, Mg, Ti, Cr, Ni, $\pm\text{Sc}$, $\pm\text{Co}$, $\pm\text{V}$ y $\pm\text{Zn}$ se encuentran más asociados a minerales ferromagnesianos como anfíbolos (e.g. hornblenda), piroxenos (e.g. augita), esfeno (o titanita) y epidota, los cuales pueden contener Ca; y a biotita, clorita, magnetita, ilmenita y petlandita (mineral de Ni). En particular, el vanadio se puede encontrar en la estructura de minerales como la ilmenita, titanomagnetita, esfeno y apatito como V^{3+} , V^{4+} y V^{5+} sustituyendo al Fe^{3+} , Ti^{4+} y P^{5+} , respectivamente. De la misma manera, los cationes Cr^{3+} y Sc^{3+} se pueden encontrar en minerales ferromagnesianos sustituyendo al Fe^{3+} ; y el Ni^{2+} , Co^{2+} y Zn^{2+} sustituyendo al Mg^{2+} (Rankama & Sahama, 1954). Además, los elementos como Al, K, Ba, V, Sc y Li pueden también estar asociados a filosilicatos como muscovita u otras micas como biotita y lepidolita (Rankama & Sahama, 1954).

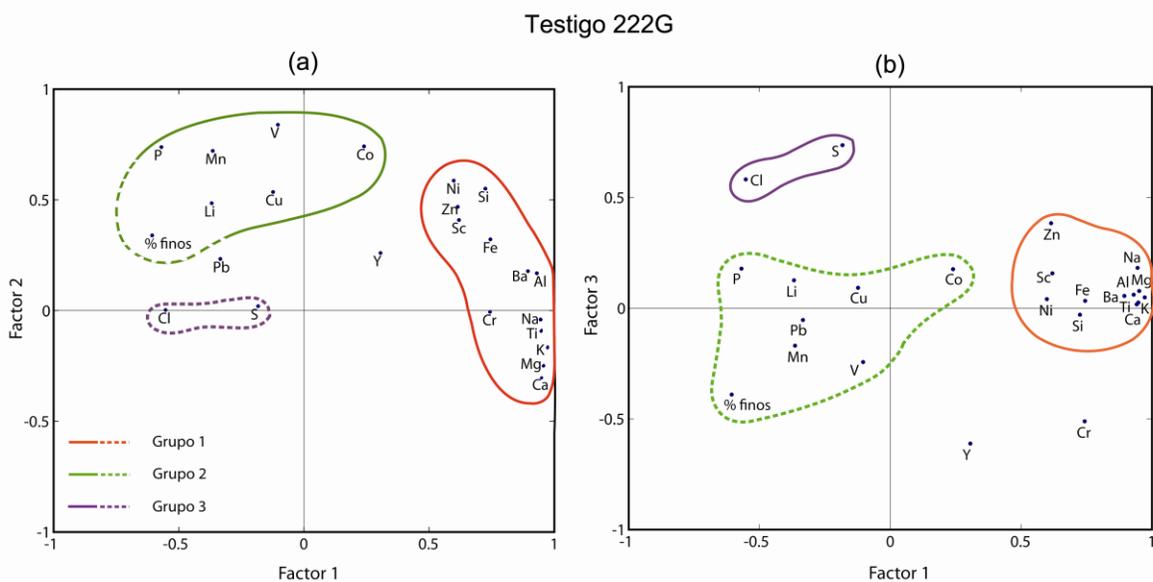


Figura V-8. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 222G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.

En el Grupo 2 se encuentran elementos P, V, Sc, Li, Cu, Mn, Co, Cr, Y, \pm Zn, \pm Pb y \pm Fe, típicamente asociados a minerales arcillosos, debido a la capacidad de las arcillas de adsorber cationes gracias a su alta razón superficie externa/volumen (Dessai *et al.*, 2009; Coakley *et al.*, 1993; Jonathan *et al.*, 2004). El material arcilloso posiblemente se encuentra asociado también a materia orgánica (rica en fosfatos), dada la contribución de fósforo. Sin embargo, el P podría también estar asociado a apatito. La contribución del porcentaje de sedimentos finos a este grupo reafirma la asociación de minerales arcillosos en él.

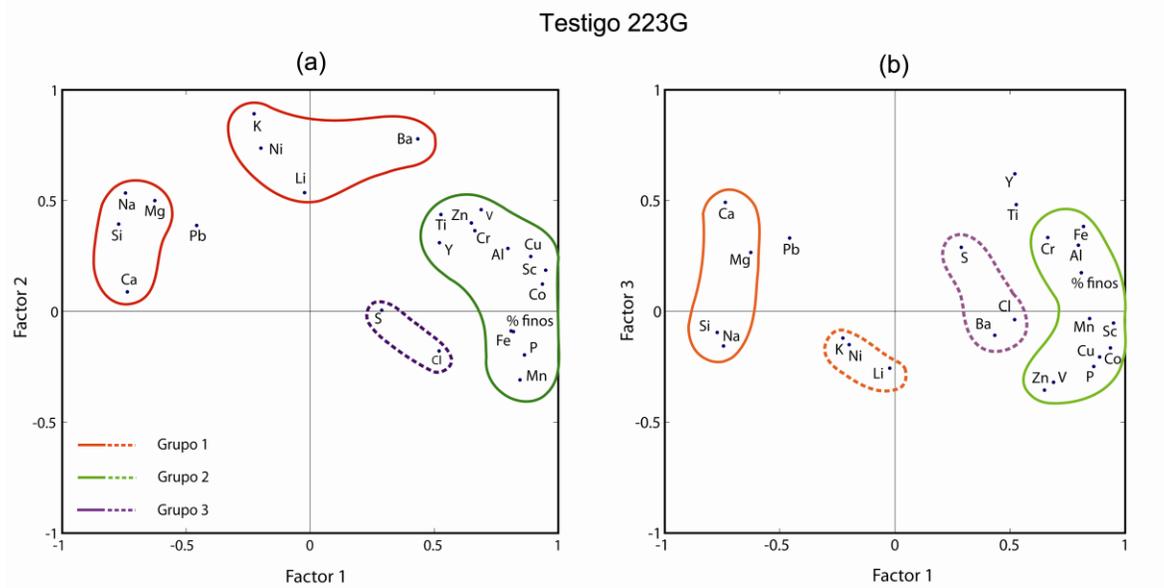


Figura V-9. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 223G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.

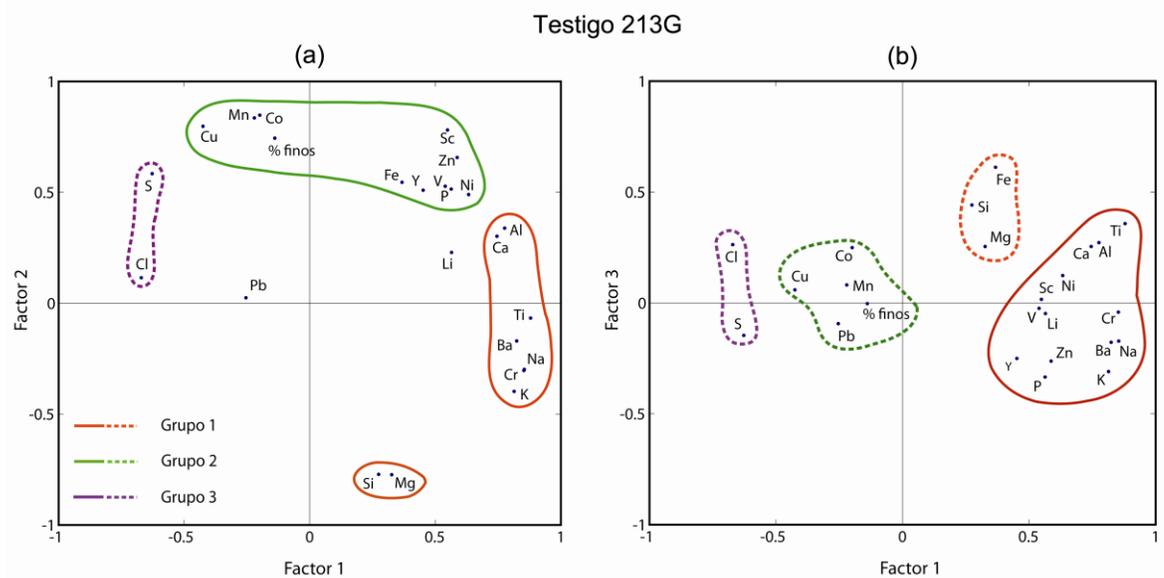


Figura V-10. Coeficientes de correlación de los elementos y porcentajes de sedimentos finos (% finos) incluidos en el ACP del testigo 213G con respecto a los tres factores más significativos. (a) Factor 1 v/s Factor 2; (b) Factor 1 v/s Factor 3.

En el Grupo 3 se encuentran asociados Cl y S, los cuales podrían estar reflejando la influencia del estuario (agua marina) en el sistema, disueltos como iones Cl^- y SO_4^{2-} (Gaillardet *et al.*, 2004; Reid & Spencer, 2009). En el caso del testigo 223G el Ba también se encuentra asociado a este grupo. Es importante notar que esta asociación también se observa en el testigo 213G del río Pichoy, puesto que podría implicar la entrada de agua marina también en este río.

En el testigo 221G se observan tres grupos principales: el Grupo 1, asociando más bien sólo a minerales félsicos en este testigo (agrupación de Si, Na y Ca); Grupo 4, que agrupa a los ya mencionados Grupos 1 y 2, puesto que se encuentran asociados los elementos Al, K, Fe, K, V, Ba, Ti, Cr, Co, Ni, Sc y Zn y el porcentaje de sedimentos finos, sin poder diferenciarlos claramente en dos grupos. Esto se podría deber a una menor selección de los sedimentos (reflejada en una mayor media granulométrica con alta desviación estándar, lo cual se debería al distinto contexto geomorfológico de este testigo, pues fue extraído en un banco del cauce principal del río Cruces), al bajo contenido de arcillas y sedimentos finos, y alto contenido de minerales félsicos (Figura IV-10). El Grupo 5 asocia S, Pb y $\pm\text{Zn}$, los cuales podrían estar relacionados a sulfatos o sulfuros de Pb y Zn como el mineral blenda.

V.5 Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se pueden definir como redes de procesadores individuales (“unidades o neuronas”) que tienen la posibilidad de almacenar una pequeña cantidad de memoria local. Estas unidades están interconectadas por canales de comunicación o “conexiones”, que usualmente transportan datos numéricos (Lacassie *et al.*, 2004). El análisis multivariable de la geoquímica de los sedimentos fluviales se realiza mediante el uso de redes neuronales *Growing Cell Structure* (GCS; Lacassie & Ruiz-Del-Solar, 2010).

Las redes GCS (Fritzke, 1996; citado en Lacassie *et al.*, 2004) son redes auto-organizativas generadas gradualmente durante el proceso incremental de autoaprendizaje y son determinadas por el problema en cuestión. Una red GCS típica

puede ser descrita como una matriz de salida bidimensional, donde las unidades están organizadas formando triángulos, luego la estructura se va reorganizando en cada iteración donde puede o no insertarse una nueva unidad, la que se conecta localmente a las otras unidades vecinas, emergiendo nuevamente la estructura triangular. Después del aprendizaje, la estructura de la red GCS corresponde a un número determinado de unidades o nodos, los cuales se encuentran conectados con sus vecinos a través de vértices en forma de triángulos.

Debido a que las variables químicas incluyen tanto elementos mayores como elementos trazas, los cuales presentan una amplia diferencia en términos de sus varianzas, previo al análisis de GCS, los datos son estandarizados (media y varianza igual a 0 y 1, respectivamente, para todas las variables químicas). Los cálculos del GCS fueron realizados mediante el *software* GCSVIS (Walker *et al.*, 1999; citado en Lacassie y Ruiz-Del-Solar, 2010), el cual convierte la frecuencia en casos asociados a cualquier resultado de salida en una posterior probabilidad a cada nodo de la red. En el ciclo de aprendizaje, la selección de los mejores juegos de nodos fue realizada utilizando la medida de la distancia Euclidiana.

V.5.1 Resultados del análisis de RNA

El análisis CGS (*Growing Cell Structure*) de los datos químicos de los elementos mayores y trazas resultó en un mapa neuronal compuesto por 6 nodos interconectados, cada uno de ellos asociados a un grupo de muestras sedimentarias que presentan características geoquímicas similares (Figura V-11a). La distribución de la asociación muestra-nodo señala una cercana relación entre el los sitios muestreados (testigos tipo G) y la signatura geoquímica de los sedimentos estudiados.

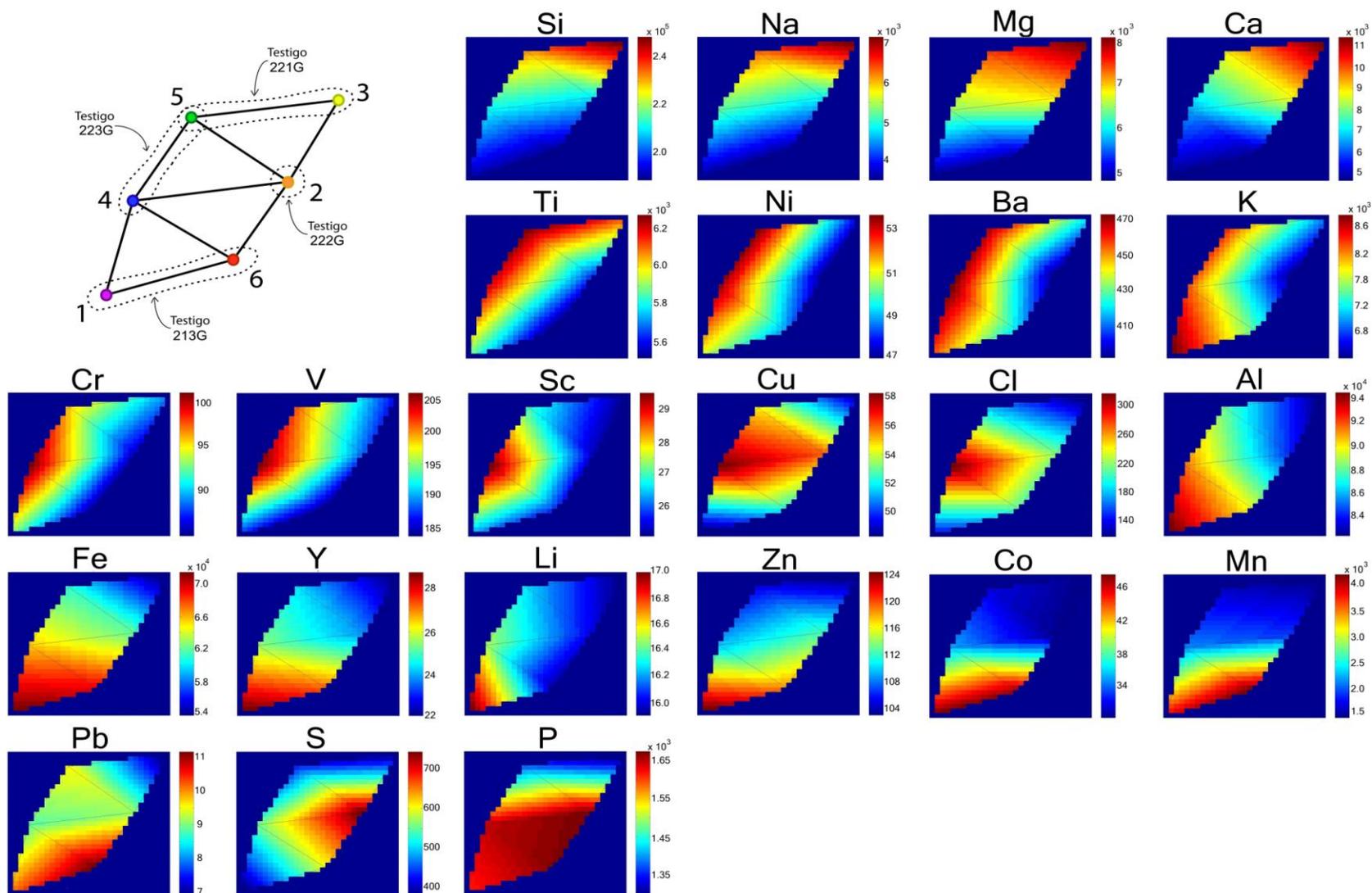


Figura V-11a. Resultados del análisis GCS del conjunto de datos elementos mayores y trazas. La red GCS final consta de 6 nodos interconectados representativos de los testigos de sedimentos 221G, 222G, 223G y 213G (líneas punteadas). La escala a la derecha de las distribuciones de las variables de entrada indica concentraciones en ppm, tanto para los elementos mayores como para los elementos trazas.

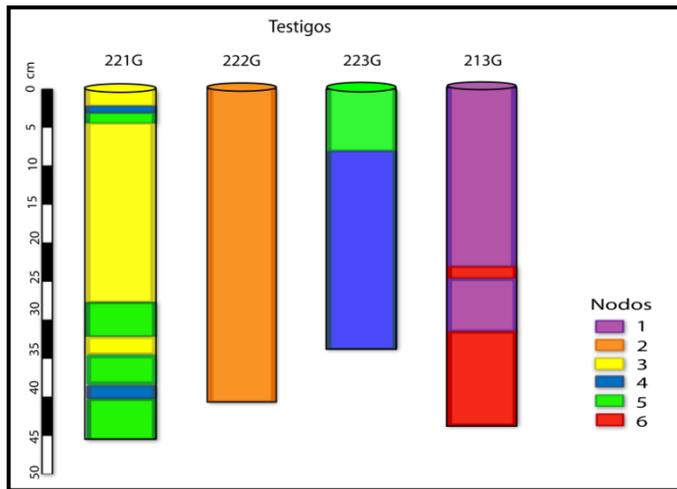


Figura V-11b. Esquema de la distribución de las muestras asociadas a los nodos 1-6 de los testigos 221G, 222G y 223G del río Cruces, y del testigo 213G del río Pichoy.

El análisis de distribuciones de las concentraciones de las variables geoquímicas (elementos mayores y trazas; ambos en ppm) sobre el mapa GCS (Figura V-11a y b) muestra que el testigo 221G, asociado principalmente al nodo 3 y al nodo 5, presenta altas concentraciones, respecto a los demás testigos, de Si (>23 wt%), Na (>0.6 wt%), Mg (>0.8 wt%), Ca (>9 wt%) y Ti (>0.6 wt%), sobre todo los primeros 23 cm de profundidad, y además de Ni (>52 ppm), Ba (>440 ppm) y K (8.0-8.4 ppm) a partir de los 24 cm (Figura V-12b). Por otro lado, el testigo 221G se encuentra empobrecido principalmente en Mn (0.4 wt%), Co (<34 ppm), Zn (<110 ppm), Y (<25 ppm), Li (<16.4 ppm), Pb (<10.5 ppm), P (<0.14 wt% en peso), Fe (<6.4 wt%) y Al (<8.8 wt%; estos cuatro últimos están empobrecidos sobre todo en los primeros 23 cm). Las muestras correspondientes a los 2.4 y 40 cm de profundidad del testigo 221G se asocian al nodo 4, el cual se encuentra principalmente enriquecido en Cl, V, Sc, Ni, Cu, Cr, Ba, Al, Ti y K respecto a los demás niveles.

El testigo 222G, asociado al nodo 2 (Figura V-11a y b), muestra altas concentraciones, respecto a los demás testigos, de S (>650 ppm) y P (>0.152 wt%), y bajas concentraciones principalmente de Ni (<49 ppm), Ba (<410 ppm), K (<0.7 wt%) y Cr (<90 ppm).

El testigo 223G, asociado a los nodos 4 y 5 (Figura V-11a y b), se encuentra enriquecido en V, Ni, Cr, Ba, Ti, Mg, Na y Si (con los mismos valores del 221G, puesto

que también corresponde al nodo 5) y en Cl (>280 ppm), V (>200 ppm), Sc (>28.5 ppm), Ni (> 52 ppm), Cu (>58 ppm), Cr (>95 ppm), Ti (>0.60-0.61 ppm) y Al (8.9-9.3 wt%), a partir de los 7.3 cm de profundidad hacia abajo.

El testigo 213 del río Pichoy, asociado a los nodos 1 y 6 (Figura V-11a y b), presenta altas concentraciones de Zn (>116 ppm), Y (>26 ppm), Pb (>9.5 ppm), Li (>16.6 ppm), Co (>42 ppm), Fe (>6.6 wt%), Mn (>0.35 wt%), Al (>9 wt%) y P (0.16 wt%), donde el Zn, Y, Li, Fe y Al se encuentran principalmente enriquecido de los 0 a 31.5 cm de profundidad, y el Pb y Mn en los últimos 11 cm de profundidad.

En términos generales, se observa que casi todos los testigos de sedimentos, a excepción del 221G, presentan un contenido uniforme de fósforo, entre un 0.13 y 0.20 wt %.

VI. CAPÍTULO: DISCUSIÓN

VI.1 Sedimentología y evolución estratigráfica

Los sedimentos fluvio-estuarinos del río Cruces y Pichoy muestran, en general, una tendencia creciente del tamaño de grano en la parte superior de los testigos sedimentarios. Ésta se ve reflejada ya sea en un abrupto aumento (testigos 223G y 213G) o en un aumento paulatino de la granulometría (testigos 221G, 221EG, 222G y 207G), acompañado de un mayor porcentaje de líticos. Esta secuencia granocreciente, con un progresivo aumento del material más clástico, respondería a la evolución propia de un sistema de valle incidido (Figura I-5; Dalrymple *et al.*, 1992), producto de un aumento del nivel base como consecuencia de la subsidencia cosísmica del terreno durante el terremoto de Valdivia de 1960 (Plafker and Savage, 1970). El aumento del nivel base implica una acomodación del sistema mediante la progradación de facies hacia la boca del estuario, produciendo, de esta manera, secuencias granocrecientes a medida que ocurre la progradación de facies más gruesas hacia el océano.

En general, los sedimentos están compuestos en gran parte por arcillas, con valores promedios entre un 14% y un 33%, siendo illita la arcilla predominante según el análisis de espectrometría FTIR (Anexo A). La porción lítica de los sedimentos, con valores promedios entre un 11% y un 31%, está constituida principalmente por cuarzo, albita y \pm biotita (Anexo A). Esto es concordante con la mineralogía de la roca por la cual se encajona el río Cruces y sus ríos tributarios, correspondiente principalmente a esquistos paleozoicos, ricos en micas (muscovita y biotita), cuarzo y albita (Di Biase & Lillo, 1973; Díaz *et al.*, 1988; Ojeda, 1976), y a rocas sedimentarias conformadas principalmente por clastos de cuarzo y líticos de proveniencia metamórfica, volcánica e intrusiva. La mineralogía de los sedimentos corresponde a una mineralogía

composicionalmente madura, implicando importantes procesos de desintegración, descomposición y transporte de los clastos (Stallard, 1995), puesto que los minerales más inestable, como anfíbola (mineral presente en esquistos verdes y rocas intrusivas de la litología circundante) se presenta en muy bajas proporciones. La gran proporción de arcillas indicarían, además, una meteorización importante de la roca caja. En particular, la mayor proporción de illita con respecto a montmorillonita se debería a que esta última se forma principalmente por precipitación a partir de una solución alta en sílice disuelta y magnesio, mientras que la primera se puede formar a partir de la alteración de micas primarias (como muscovita) o de la alteración de arcillas como montmorillonita y vermiculita, siendo especialmente común en sedimentos derivados de rocas metamórficas y sedimentarias, particularmente depósitos glaciares, ricas en micas y arcillas (Marshall, 1965).

Del análisis de componentes principales (Sección III-5) y de correlación múltiple (Anexo B), se extrae que las propiedades sedimentológicas y mineralogía principalmente asociadas corresponden a (sin considerar el testigo SJG): (i) porcentaje sedimentos finos, porcentaje de agua, susceptibilidad magnética másica, arcillas y calcita (Figuras IV-20 y 22 y Figuras VI-1, 2 y 3); y (ii) densidad aparente, susceptibilidad volumétrica, \pm media granulométrica y \pm líticos totales. En el testigo 222G la susceptibilidad másica no presentan una asociación preferente. La primera asociación responde a la alta capacidad de las arcillas de retener o absorber agua (intersticial, capilar o higroscópica) y adsorber cationes metálicos en su superficie externa (e.g. Dessai *et al.*, 2009; Coakley *et al.*, 1993; Jonathan *et al.*, 2004; Gaillardet *et al.*, 2004), sobre de todo de la montmorillonita, que tiene una mayor capacidad catiónica y de expansión (Degens, 1965). De esta manera, se esperaría una alta concentración de metales asociados a los sedimentos más finos. Por otro lado, la media granulométrica estaría principalmente controlada por el aporte de sedimentos más clásticos, en general de mayor densidad. Sin embargo, en algunos horizontes la media granulométrica también estaría controlada por materia orgánica como hojas y palitos de plantas terrestres, presentes comúnmente en los sedimentos. La alta corre-

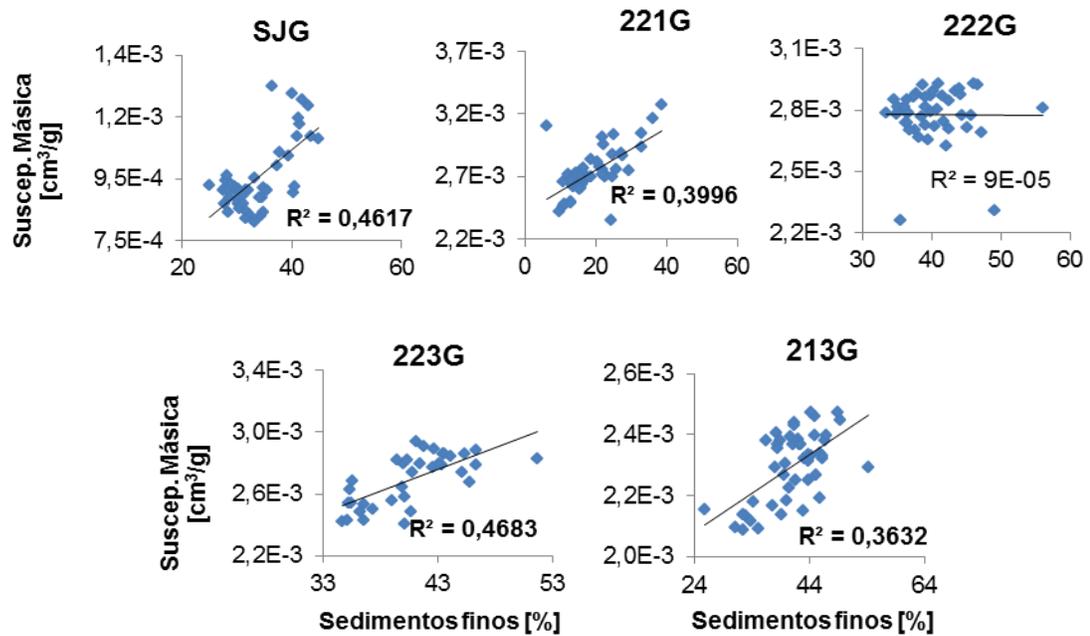


Figura VI-1. Correlación entre la susceptibilidad magnética y el porcentaje de sedimentos finos en los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. R²= coeficiente de determinación; en negrita indican valores significativos al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

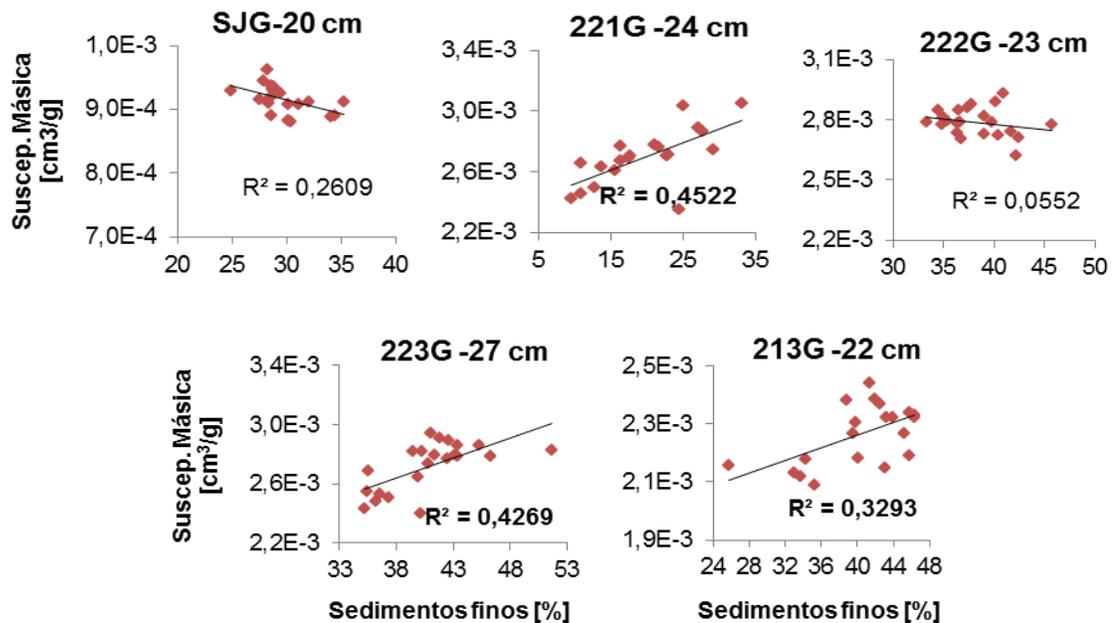


Figura VI-2. Correlación entre la susceptibilidad magnética y el porcentaje de sedimentos finos para los primeros 20, 24, 23, 27 y 22 cm de profundidad de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, respectivamente. R²= coeficiente de determinación; en negrita indican valores significativos al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

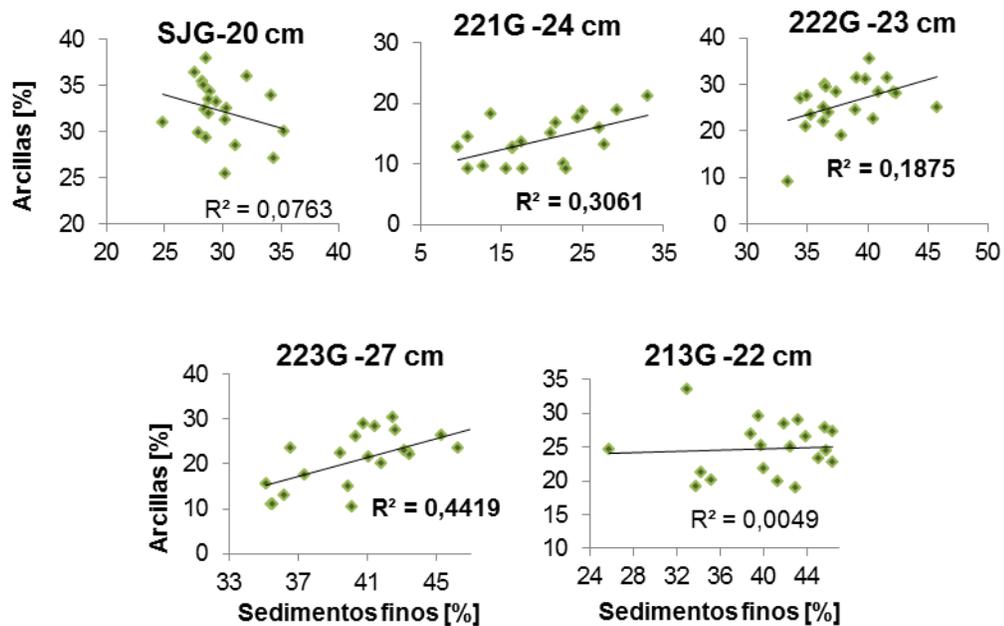


Figura VI-3. Correlación entre el porcentaje de arcillas y sedimentos finos para los 20, 24, 23, 27 y 22 cm de profundidad de los testigos SJG, 221G, 222G, 223G y 213G, respectivamente. R^2 = coeficiente de determinación; en negrita indican valores significativos al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

lación de la susceptibilidad volumétrica con la densidad aparente es causa de la importante influencia de este último en el cálculo de la susceptibilidad volumétrica, siendo ambas directamente proporcionales según la Ecuación III-2.

- **Testigo PlantaG:**

Según los parámetros sedimentológicos y lo observado con aumento de 10X en muestras de sedimento, el testigo PlantaG presenta sedimentos principalmente clásticos, de media granulométrica relativamente alta (278.8 μm en promedio), con fragmentos líticos, de cuarzo y, menor proporción, mica blanca, feldespatos, vidrio, biotita y minerales ferromagnesianos oscuros. El nivel inferior (bajo los 22 cm de profundidad) presenta mala selección, con clastos tamaño arena media a gravilla fina inmersos en una matriz fina, tamaño limo-arcilla. En la parte más inferior de este nivel se observan bolones de cuarzo de hasta 4 cm aproximadamente. El nivel superior (sobre los 22 cm), presenta una buena selección y está constituido principalmente



Figura VI-4. Sitio Planta. Se observa que el testigo PlantaG fue extraído de la parte interna de un meandro del canal confinado del río Cruces.

por clastos más finos, tamaño arena fina a media. De esta forma, la curva de la media granulométrica observada en la Figura IV-2 representa el cambio de selección entre ambos niveles, más que un aumento de la granulometría en la parte superior.

De esta manera, los sedimentos del testigo PlantaG corresponden a sedimentos fluviales con una alta madures textural y composicional, dispuestos en una secuencia granodrecescente, representando la evolución típica de las barras de punta desarrolladas en la parte interna de un meandro (Figura VI-1). Sin embargo, entre ambos niveles se supone un periodo de baja energía, seguramente debido al abandono parcial del cauce principal, permitiendo, de esta manera, la deposición de material más fino, tamaño limo-arcilla, que infiltró en el nivel inferior de gravillas y bolones.

- **Testigo SJG:**

El testigo SJG presenta una granulometría muy fina (tamaño limo o arcilla), la cual no es reflejada en el análisis granulométrico debido a aglomeración de las partículas. Mineralógicamente se observa un alto contenido de arcillas, principalmente de illita. A diferencia de los otros testigos analizados mediante FTIR, el espectro del testigo SJG muestra una clara señal de caolinita (6.2 % en promedio; Anexo A). Esto podría

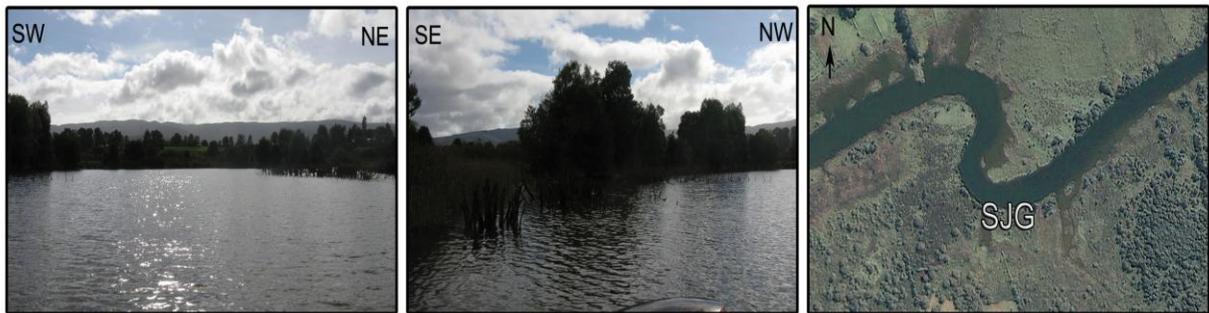


Figura VI-5. Sitio SJK. El testigo SJK se extrajo de un brazo tranquilo del río San José, correspondiente a una derrame de llanura (*crevasse splay*). El sitio está rodeado de planicies y cerros bajos de no más de 10 m de altura.

deberse a la influencia del yacimiento de caolín “Ciruelo” (Figura II-3), ubicado río arriba, al norte de San José de la Mariquina.

Por otra parte, considerando el contexto geológico del testigo SJK, el testigo se extrajo de un pequeño “brazo” del río San José (Figura VI-2) que correspondería a un *crevasse splay*, con alta acumulación de sedimentos finos debido a que en este sitio se deposita principalmente la carga en suspensión (material fino) que trae el canal principal del río San José.

- **Testigo 221G:**

El testigo 221G presenta una mayor granulometría respecto a los demás testigos (a excepción del testigo PlantaG) y un mayor porcentaje de líticos, sobre todo de minerales félsicos de alta madurez composicional (cuarzo, feldespatos; Anexo A). Esto se debería al contexto geomorfológico del testigo, correspondiente a un banco situado en el canal principal del río Cruces, a 5 m de profundidad bajo la superficie del agua (Figura VI-6). Por lo tanto, la mayor variabilidad de los parámetros sedimentológicos y la mayor media granulométrica podrían ser producto de la mayor energía imperante en el sistema fluvial local.

La Unidad 1 (Figura IV-4), muestra una alta variabilidad de los parámetros, sin embargo, la subunidad 2a presenta una clara tendencia creciente de la media



Figura VI-6. Sitio 221. Los testigos 221G y 221EG se extrajeron de puntos cercanos al cauce del canal principal (de aproximadamente 50 m de ancho). Al Este del sitio se observa un amplio humedal, de hasta 400 m de ancho con presencia de cerros islas y relativamente poca presencia de juncos y árboles cercanos a los puntos de extracción.

granulométrica, la cual se debería a la evolución propia de una secuencia de valles incididos, en la propagación de facies más gruesas hacia la boca el estuario. El último nivel, correspondiente a la subunidad 2b, correspondería a un input local de sedimentos finos.

- **Testigo 221EG:**

El testigo 221EG presenta una granulometría promedio similar al testigo 221G, sin embargo sus tendencias, en los diferentes nivel estratigráficos, se muestran distintas en ambos testigos. El testigo muestra dos secuencias granodecipientes, separadas entre sí por un abrupto aumento de la media granulométrica a los 28 cm de profundidad (Figura IV-4). Dado que el sitio 221EG se encuentra en un terreno constantemente inundado, cercano a la parte interna de un meandro (Figura VI-6), éstas secuencias de menor escala corresponderían a barras de puntas desarrolladas en este sector. El abrupto aumento de la media granulométrica a los 28 cm podría responder tanto a un traslado lateral de los meandros como a la evolución propia de una secuencia de valle incidido, con facies progradantes hacia la boca del estuario. Dentro de la Unidad 2 se observa un abrupto aumento del porcentaje de sedimentos finos, el cual se podría deber a una disminución temporal de la corriente, debido, por ejemplo, a la protección del sitio gracias a algún obstáculo río arriba de éste.

- **Testigo 222G:**

EL testigo 222G corresponde a una secuencia granocreciente, con dos secuencias granodecrecientes consecutivas en la parte inferior (subunidades 1a y 1b; Figura IV-5) y una secuencia granocreciente en la parte superior (Unidad 2). Al igual que el testigo 221EG, la progradación de facies explicaría el aumento progresivo del tamaño de grano hacia arriba. Las subsecuencias granodecrecientes, observadas en el tramo inferior, podrían representar la agradación propia de una barra de punta. El aumento progresivo del tamaño de grano es acompañado de un aumento progresivo del porcentaje de líticas a partir de los 17.4 cm, especialmente de cuarzo y anfíbola (Anexo A), opuesto a un decrecimiento del porcentaje de arcillas.

A diferencia de los testigos sedimentarios 221G, 223G y 213G, la susceptibilidad magnética másica no se correlaciona significativamente con ninguna propiedad sedimentológica, ni con ningún mineral específico (Anexo B), presentando además una alta variabilidad, sobre todo en la unidad inferior (Figura IV-5). Sólo en la parte superior, sobre los 13 cm de profundidad, la susceptibilidad másica presenta una tendencia decreciente, levemente similar a la tendencia decreciente del porcentaje de arcilla.

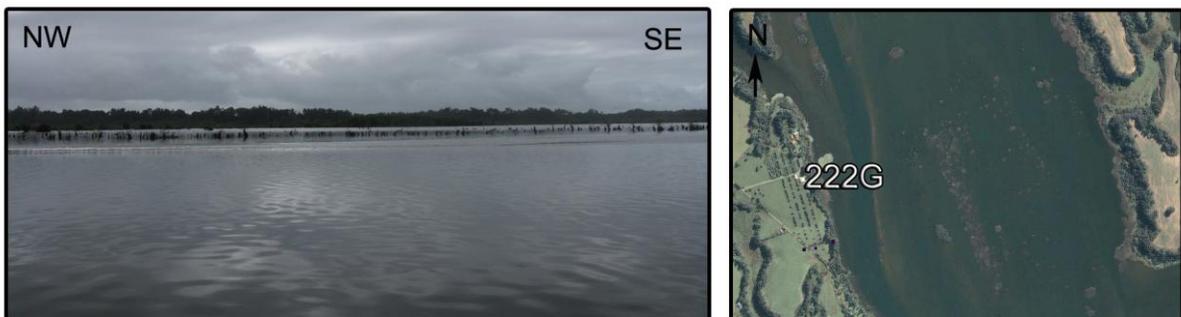


Figura VI-7. Sitio 222. El testigo 222G se extrajo en una zona amplia del humedal (de hasta 1 km de ancho), con gran cantidad de cerros islas pequeños y barras fluviales cubiertas por juncos.

- **Testigo 223G:**

En el testigo 223G se observa un abrupto aumento de la media granulométrica a partir de los 12 cm de profundidad, bien correlacionado con un aumento en el porcentaje de lúticos (Anexo B). Este cambio más abrupto, en comparación con los demás testigos, podría deberse a que el testigo 223G se extrajo de una parte más cercana a la boca del estuario, siendo más susceptible a cambios por progradación de facies.

- **Testigo 207G:**

El testigo 207G presenta un aumento de la media granulométrica a los 7 y 31 cm de profundidad, mostrando siempre una tendencia creciente (Figura IV-7). Los sedimentos del testigo presentan una mayor granulometría que los testigos 222G y 223G, no siguiendo con la tendencia que presentaba la media granulométrica promedio de los sedimentos a ir disminuir río abajo (Figura IV-1), dada la deposición de las partículas más finas que se habían mantenido en suspensión. Esto se debería a que el sitio 207, localizado en un sector donde el río Cruces tiene morfología trenzada tipo *Platte*, corresponde a una zona con alta densidad de barras fluviales longitudinales, correspondientes a barras mareales en el contexto del estuario (Figura I-5 y VI-7), permitiendo, por lo tanto, la acumulación de sedimentos de una mayor granulometría en una secuencia granocreciente.

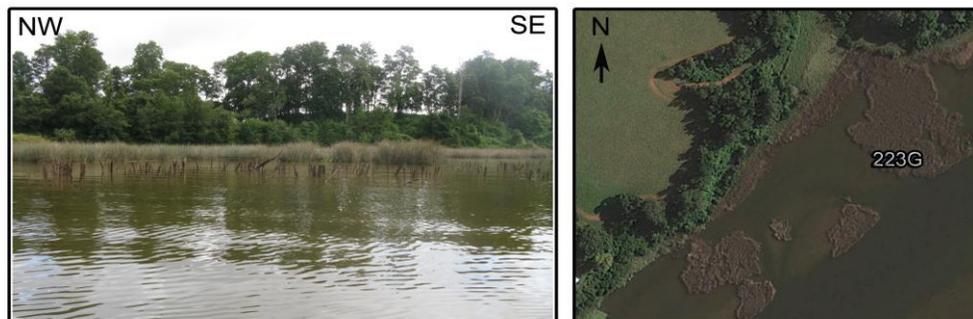


Figura VI-8. Sitio 223. En comparación a los demás sitios, el sitio 223 presenta una mayor densidad de árboles inundados y crecimiento de juncos. La extracción del testigo 223G se realizó en una zona somera (1.5 m de profundidad), cercana al canal principal (de un ancho aproximado de 80 m). Se ubica en una zona amplia del humedal, de hasta ca. 2 km de ancho, río abajo de la confluencia con el río Pichoy.



Figura VI-9. Sitio 207. Se ubica en una zona de morfología fluvial trenzada tipo *Platte*, con alta densidad de barras fluviales longitudinales, correspondientes a barras mareales del sistema estuarino. El canal principal más cercano al sitio de extracción del testigo 207G tiene aproximadamente 50 m de ancho. Se observan alta densidad de juncos.

- **Testigo 213G:**

Al igual que en el testigo 223G y 207G, se observa una secuencia granocreciente en la parte superior del testigo (a partir de los 11 cm de profundidad), obedeciendo también a la respuesta del sistema, progradando las facies más gruesas hacia la boca del estuario. Este aumento del tamaño de grano es acompañado de un aumento progresivo del porcentaje de líticos, especialmente de cuarzo (Anexo A), y de la densidad aparente.



Figura VI-10. Sitio 213. Ubicado en el río cruces cercano al canal principal, rodeado de extensos humedales y plantaciones.

VI.2 Geoquímica de los sedimentos

Según la litología de la roca por la cual se encajona el río Cruces y sus tributarios, correspondiente principalmente a las rocas del basamento metamórfico, constituido por de meta-esquistos, metacherts, metabasitas y serpentinitas, es esperable encontrar ciertas anomalías de los elementos Ni, Co, Fe, Mn, Al, Ti, Si, Mg y Cr, componentes químicos en estos tipos de rocas (Illies, 1970; Di Biase & Lillo, 1973; Díaz *et al.*, 1988). Las variaciones a lo largo de los testigos sedimentarios podrían ser relacionadas a cambios de aporte sedimentario, es decir, a la tasa de meteorización y erosión en la hoya hidrográfica.

A través del ACP, se observa que los elementos Si, Ca, Na, Mg, Ni, Co, Ti, Cr, Ba, Sc, \pm Fe, \pm Al, \pm K, \pm V y \pm Zn se encuentran relacionados en el Grupo 1 (Figuras V-7, 8, 9 y 10), el cual se asocia a la litología y mineralogía típica del sector. Particularmente, los elementos Si, Al, Ca, Na, K, y Ba se encuentran en minerales félsicos (cuarzo, plagioclasa y feldespatos), mientras que los elementos metálicos como el Fe, Mg, Ti, Ni, Co, Cr, V, Zn y Sc (junto también con el Si y Al) se pueden encontrar asociados en los minerales ferromagnesianos (anfíbola, biotita, clorita, piroxeno, magnetita, titanita, etc.). La asociación Al-Ba-V-K puede también estar relacionada a muscovita rica en V-Ba, producto de la meteorización de los esquistos micáceos. En algunos sectores, la asociación de Al y Fe podría estar relacionada además a suelos tipo Trumao expuestos en el área, los cuales están enriquecidos en estos elementos (Schaefer & Einax, 2009).

En general, se observa que las concentraciones de Al_2O_3 y el Fe_2O_3 tot, muestran variaciones muy semejantes entre sí, trazándose casi paralelamente a lo largo de los testigos (con mayores concentraciones de Al con respecto Fe; Figuras IV-1, 2, 3 y 4), lo cual también se ve reflejado en las correlaciones significativas entre Al y Fe (Anexo D). Las variaciones de Al pueden ser relacionadas a cambios en el material sedimentario; el sedimento más arcilloso será más rico en Al que el sedimento limoso o arena. Se observa que las concentraciones de Al y Fe van aumentando río abajo a través del río Cruces, con los mayores valores en el río Pichoy (contrario a lo observado en las concentraciones de S, Na, Mg y Ca; Figura V-11), lo cual es concordante con el

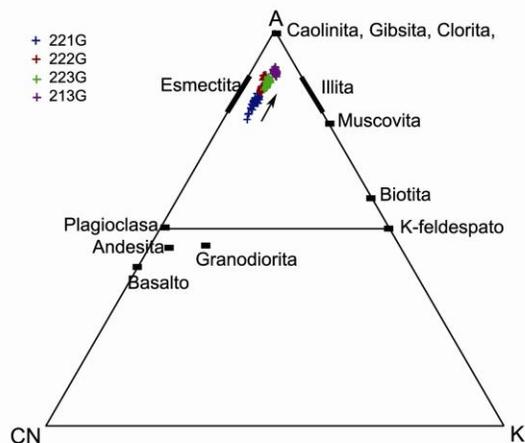


Figura VI-11. Tendencias de meteorización del diagrama ternario A-CN-K. A = Al₂O₃; C = CaO; N = Na₂O; K = K₂O; F = Fe total; M = MgO (Liu *et al.*, 2009). Flecha indica la tendencia de mayor meteorización exhibida en los sedimentos.

aumento en el grado de meteorización de los sedimentos, los cuales son ricos en arcillas del tipo esmectita (e.g. montmorillonita) e illita (Figura VI-11). En el mismo contexto, se pueden ver algunos elementos como Li, V, Co, Mn, Cu, Co y Sc están normalmente asociados a arcillas, debido a la capacidad que tienen éstas de adsorber cationes en su superficie gracias a su alta razón superficie externa/volumen (Dessai *et al.*, 2009; Coakley *et al.*, 1993; Jonathan *et al.*, 2004). Esto se ve reflejado en el Grupo 2 del ACP (Figuras IV-1, 2, 3 y 4) donde los elementos Mn, V, Sc, Cu, Co, Y, ±Fe y ±Cr se encuentran asociados al porcentaje de sedimentos finos, confirmando la asociación de estos metales con material arcilloso. Particularmente, la asociación Mn-Fe, cuya variabilidad podría depender de la variabilidad de las condiciones redox y/o del pH (Spencer, 2002), puede encontrarse asociada a la formación de óxidos o hidróxidos de Fe-Mn o coloides minerales asociados a las fases arcillosas (Gaillardet *et al.*, 2004). Por su parte, la contribución de fósforo a este grupo podría deberse a la formación de coloides orgánicos, considerando el alto contenido de materia orgánica de los sedimentos finos (Schlatter & Mansilla, 1998), con un alto contenido en metales trazas (Gaillardet *et al.*, 2004, Dessai *et al.*, 2009; González *et al.*, 1991) o al hecho de que los hidróxidos de Fe-Mn son la principal fase portadora de P en el medio acuático (Spencer, 2002).

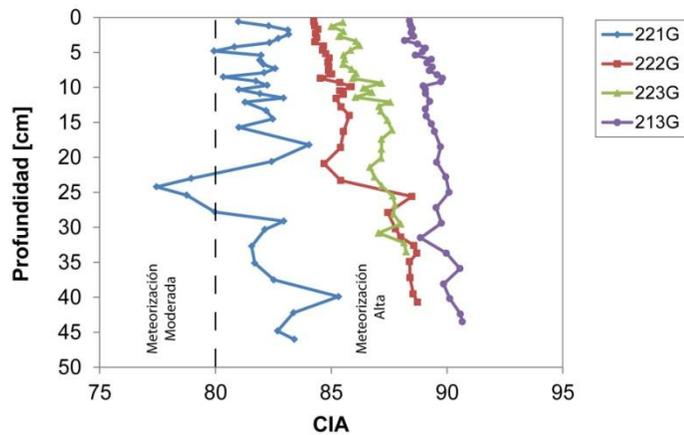


Figura VI-12. Índice de alteración química de los sedimentos de los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] * 100$; se asume CaO correspondiente principalmente al calcio de las faces silicatadas (Nesbitt & Young, 1982).

Dado esto, un cambio en el material aportado, en cuanto a su granulometría y mineralogía, producirá fluctuaciones en las concentraciones de los óxidos y metales trazas.

Según la razón Mn/Fe (0.01-0.08), no se observan ambientes reductores (Schroll, 1976), sin embargo el aporte adicional natural de Mn dado por la roca por la cual el río se encajona (Illies, 1970; Di Biase & Lillo, 1973; Díaz *et al.*, 1988), tomando en cuenta la alta meteorización que presentan los sedimentos, en especial los del río Pichoy (Figura VI-12), podría camuflar condiciones anóxicas del sistema ambiental, puesto a que en este tipo de ambiente el Mn entra más fácil en solución que el Fe.

Respecto a las variaciones en la concentración de azufre, sólo el Zn muestra una similitud con el patrón de este elemento (Figuras IV-1, 2, 3 y 4). En el testigo 221G, el ACP muestra que los elementos S, Pb y Zn se encuentran asociados, lo que podría indicar la presencia de sulfuros de Pb y Zn (*e.g.* mineral blenda). Por otro lado, la asociación entre S y Cl observada en el Grupo 3 del ACP podría ser indicador de la influencia del estuario (agua marina) en el sistema (Gaillardet *et al.*, 2004; Reid & Spencer, 2009), tanto en el río Cruces como en el río Pichoy; por lo que la alta variabilidad de este elemento, al igual que la alta variabilidad del Cl, podría estar

relacionada a la alta variabilidad de las mareas en el sistema estuarino. Sin embargo, la asociación azufre-cloro también podría estar relacionada a fertilizantes o a pesticidas organocloruros utilizados usualmente en la industria agrícola (Arenas, 2005; Barbash, 2003; Di Biase & Lillo, 1973; Schlatter & Mansilla, 1998).

Respecto al Pb, considerando que en general no muestra correlaciones estadísticamente significativas con ningún otro elemento (a excepción de con Zn y S en el testigo 221G; Anexo D) y que en algunos testigos como el testigo 221G y 223G muestra una leve tendencia creciente hacia la superficie, la contribución de Pb al sistema podría estar influenciada por aportes antropogénicos debido a la creciente emisión de Pb por combustión de combustibles fósiles, incineración de residuos, entre otros (Callender, 2003). Sin embargo, no representaría una contaminación importante dado que sus concentraciones están bajo los criterios de calidad de los sedimentos de Estados Unidos (USA/EPA) y Canadá (OME) (1991), presentando además valores similares a una lutita promedio (Turekian & Wedepohl, 1961; Anexo E).

- **Testigo 221G:**

El testigo 221G presenta mayores concentraciones de Si, Na, Ca, Mg, Ti y Ni, sobre todo en los sedimentos más superficiales (Figura V-11), lo cual es concordante con la mayor media granulométrica y el mayor porcentaje de líticos, especialmente félsicos, que presentan los sedimentos respecto a los demás testigos. Observando comparativamente las propiedades sedimentológicas y geoquímicas de los sedimentos, se tiene que las tendencias de las concentraciones de SiO_2 , Na_2O , Si/Al y, en menor medida, CaO , MgO presentan tendencias similares a la media granulométrica. En tanto, las concentraciones de Fe, Al, Mn, P, V, Ba, Co, Ni y, en menor medida Y, muestran tendencias similares al porcentaje de sedimentos finos, implicando que el porcentaje de metales trazas está controlado principalmente por el contenido de arcilla, principalmente de la montmorillonita dada su mayor capacidad catiónica (Degens, 1965; Di Biase & Lillo, 1973), lo cual es reafirmado por la correlación estadísticamente significativa entre ésta y la susceptibilidad másica (Anexo B).

A los 38.7 cm de profundidad se observa un aumento muy importante de la media granulométrica, acompañada de un aumento del P, S, Cl y Ba, y de los metales Al, Cu, Ni, Zn (Figura V-1). Contrario a esto, se observa una disminución del SiO₂, NaO, MgO, CaO y Si/Al. Esto podría corresponder a un alto contenido de materia orgánica representada principalmente por hojas y ramas de plantas (aportando fosfatos), las cuales aumentarían considerablemente la granulometría. Considerando los altos valores de Cl, Ba y S, este nivel podría estar relacionado a la llegada de agua marina, correlacionándose de esta manera con la unidad de Tsunami/inundación observada por Reinhardt (2010). La mayor concentración de S podría por lo tanto estar relacionada a: (i) el alto contenido de materia orgánica (Bernal & Railback, 2008); (ii) a un mayor predominio del agua marina (Gaillardet *et al.*, 2004; Reid & Spencer, 2009); o bien (iii) a la erupción del volcán Puyahue en mayo de 1960, dos días después del terremoto de Valdivia, el cual produjo una gran actividad solfatárica que habría producido el yacimiento “Las Azufreras” (Figura II-4; Di Biase & Lillo, 1973).

- **Testigo 222G:**

Los sedimentos del testigo 222G muestran una composición relativamente homogénea a lo largo del testigo (Figura V-11b), puesto que presenta una baja variabilidad de los porcentajes en peso de SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ y de los metales trazas Pb, Y, Co, Cu, Li, Sc, Ni. Los óxidos Na₂O, K₂O, TiO₂, CaO y MgO, en tanto, muestran una tendencia creciente a partir de los 24 cm de profundidad.

A diferencia de los demás testigos, en el testigo 222G se tiene una correlación positiva entre el Si y el Al (Anexo D), por lo que para este caso la razón Si/Al no es totalmente asertiva en la determinación comparativa del contenido de material clástico, asociado en general a una mayor media granulométrica. Por el contrario, el Si y Al se muestran asociados, junto con los elementos Fe, Na, K, Ca, Mg, Ti, Ni, Cr, Zn, Sc y Ba (Figura V-9), representando de esta manera un mayor contenido clástico (con mineralogía principalmente de feldespatos cálcicos y sódicos, y hornblenda) a partir de los 24 cm de profundidad hacia la superficie.

Comparativamente el testigo 222G presenta, en general, bajas concentraciones en la mayoría de los elementos, a excepción del azufre, cobre y fósforo (Figura V-11). El contenido de Cu relativamente alto es concordante con lo observado por Di Biase & Lillo (1973), quienes, a través de un estudio de prospección geoquímica, detectaron mayores proporciones de Cu en este sector del río Cruces respecto a sectores aledaños. Por su parte, si bien el alto contenido de S podría estar asociado a la formación de sulfuros, el azufre no presenta correlaciones estadísticamente significativas con ningún elemento calcófilo (Anexo D). Sin embargo, tomando en cuenta la alta actividad agrícola del sector, el azufre también podrían estar relacionado al uso de fertilizantes que, gracias a los riachuelos y esteros presentes hacia el este del sitio 222 (Figura III-1), serían capaces de concentrar el azufre y el cobre (que también se puede encontrar en fertilizantes y pesticidas; Eisler, 2000) utilizados en los cultivos. Por otro lado, es importante destacar que la suma total de los elementos mayores y trazas en este testigo representan un 74.4% en promedio de la composición geoquímica total de los sedimentos (más bajo que en los demás testigos), lo cual se podría deber, por ejemplo, a una mayor cantidad de materia orgánica (LOI) de los sedimentos. Esto también podría implicar un mayor contenido de azufre, si es que el ambiente fuese anóxico (Howarth et al. 2005).

- **Testigo 223G**

En el testigo 223G las concentraciones de los óxidos, a excepción del Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , P_2O_5 y TiO_2 , muestran tendencias similares a la media granulométrica. Por su parte, los óxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , P_2O_5 , TiO_2 y los elementos trazas Co, Cu, Y, Sc, Zn y V se encuentran más asociados a los sedimentos finos, representando la geoquímica de un material más arcilloso. De esta forma, el nivel superior, sobre los 12 cm de profundidad, representa un nivel más clástico, de mayor media granulométrica y mayor densidad aparente. Esto es concordante con lo observado en el análisis de redes neuronales, donde el nodo 5 (Figura V-11), correspondiente al nivel superior, se encuentra enriquecido en Si, Al, Mg, Na, Ti y Ni respecto al nivel inferior mayormente enriquecido en Cr, V, Sc, Cu, Al, Fe e Y.

En términos generales, los sedimentos del testigo 223G se encuentran enriquecidos, respecto a los demás testigos, en Ti, Ni, Ba, Cr, V, Sc, Cu, Cl, y en menor proporción, Al, Fe y K (Figura V-11). Particularmente, el fuerte enriquecimiento en cloruro en este testigo se debería a la mayor influencia del agua marina, ya que el sitio 223 es el que se encuentra más próximo a la boca del estuario respecto a los demás sitios (Figura III-1).

- **Testigo 213G:**

El testigo 213G se encuentra enriquecido en Mn, Co, Zn, Y, Li, Fe, Al y K, lo cual es concordante con la mayor proporción de sedimentos finos obtenida en este testigo (Figura IV-1), relacionada a un alto porcentaje de arcillas e hidróxidos u óxidos e hidróxidos de Mn-Fe. Ambas facies tienen una alta capacidad de adsorber metales, tales como Co, Zn, Fe, Y, Cu, Sc y V (e.g. Dessai *et al.*, 2009; Coakley *et al.*, 1993; Gaillardet *et al.*, 2004). Particularmente los hidróxidos u óxidos de Mn tienen una alta tendencia a asociarse con Zn, Pb y Co (Hudson-Edwards, 2000), lo que explicaría las mayores concentraciones de estos elementos respecto a los demás testigos (Figura V-11).

Los altos contenidos de manganeso encontrados en el río Pichoy, asociados sobre todo a los niveles inferiores más ricos en sedimentos finos, podrían deberse a yacimientos de Mn asociados a capas de cuarcitas del basamento metamórfico, tales como los encontrados más al sur, en las cercanías del río Futa (yacimiento “Santo Domingo”, “Isabel, Bellavista”, “Piedra Negra”; Figura II-4). De la misma manera, las altas concentraciones de arcillas y sedimentos finos podrían estar influenciadas por el yacimiento de caolín “Las Lomas”, ubicado aguas arriba del sitio 213 (Figura II-4).

Las altas concentraciones de Mn y Fe del Pichoy influenciarían las mayores concentraciones de estos elementos en los sedimentos del testigo 223G respecto a los testigos 221G y 222G, puesto que éste se encuentra aguas abajo de la confluencia del río Pichoy con el río Cruces (Figura III-1).

En general, se tiene que los sedimentos analizados en los ríos Cruces y Pichoy presentan valores geoquímicos promedios no sobrepasan los valores “naturales” de los elementos trazas esperados en el contexto geológicos del área de estudio, según los valores obtenidos por Turekian & Wedepohl (1961) para una lutita, arenisca y roca basáltica promedio, a excepción del azufre que presenta mayores concentraciones promedios en el testigo 222G y 223G (Anexo E). Sin embargo, las concentraciones promedio de Cr y Cu presentan valores sobre los límites de sedimentos no contaminados según los criterios de calidad de los sedimentos de Estados Unidos (USA/EPA) y Canadá (OME; 1991). No obstante, las concentraciones de Cr en sedimentos obtenidas por Saldivia (2005), de 12.7 ppm en promedio en sitios similares a los muestreados en este estudio, muestra concentraciones de Cr menores a los presentados en este estudio, no sobrepasando los límites de sedimentos no contaminados según Estados Unidos (USA/EPA) y Canadá (OME; 1991) (Anexo E). Por otro lado, según los valores recolectados por Callender (2003) en barros fluviales, sedimentos estuarios y materia particulada en ríos, sólo las concentraciones promedio de Zn, Cu y Ni obtenidas en este estudio presentan mayores valores que las esperadas en un barro fluvial, sin embargo, los valores de Zn y Cu (a excepción de un valor anómalo aislado de 112 ppm a los 33.7 de profundidad en el testigo 222G; Figura V-2) están bajo las concentraciones esperadas en sedimentos estuarinos y en materia particulada en ríos (Anexo E). Por otro lado, las concentraciones de Ni en el estudio realizado por Saldivia (2005), de 19.2 ppm en promedio, se encuentran bajo los valores esperados en Callender (2003). En comparación con las concentraciones geoquímicas del basamento metamórfico de Bahía Mansa publicadas por Díaz *et al.* (1988), el cual constituye gran parte de la litología por la cual se encajona el río Cruces, todas las concentraciones de los elementos trazas se encuentran en menor proporción en los sedimentos fluvio-estuarinos analizados respecto al basamento, a excepción de los elementos Cu y V (Anexo E), que por procesos de meteorización, transporte, deposición y/o precipitación pudieron haberse concentrado con respecto a las rocas del basamento, o bien se encuentran en mayores proporciones en las demás litologías circundantes, como por ejemplo, en los depósitos fluvio-estuarinos y glaciares del pleistocenos, que cubren gran parte de la zona de estudio.

Finalmente, a través de un ACP considerando los elementos trazas Zn, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Y obtenidos en los sedimentos fluvio-estuarinos analizados en este estudio en comparación con la geoquímica de estos elementos en una lutita, arenisca y roca basálticas promedio (Turekian & Wedepohl, 1961) y la geoquímica del basamento metamórfico de Bahía Mansa (Díaz, *et al.*, 1988; Figura VI-13), se tiene que la varianza de estos elementos en los sedimentos del río Cruces y Pichoy es comparable con la varianza de la geoquímica de referencia de una lutita, roca basáltica (que podrían estar representadas por los esquistos verdes del CMBM) y del basamento metamórfico, por lo que se podría suponer, sumado a los demás resultados analíticos obtenidos, un control litológico predominante en la geoquímica de los sedimentos.

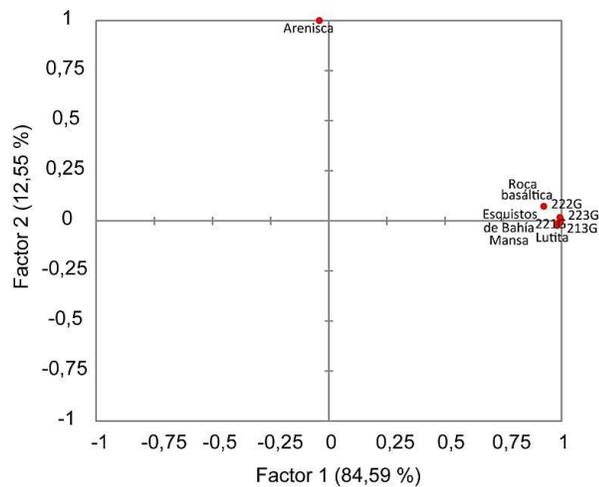


Figura VI-13. Coeficientes de correlación de los elementos Zn, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Y incluidos en el ACP de: los testigos 221G, 222G, 223G y 213G; los valores publicados por Turekian & Wedepohl (1961) para una lutita, arenisca y roca basáltica promedio; y la geoquímica de los Esquistos Paleozoicos de Bahía Mansa publicada por Díaz (1988); con respecto a los dos factores más significativos Factor 1 y Factor 2, que explican el 97.14% de la varianza total.

VI.3 Correlación lateral de los testigos

La evolución de los sedimentos dentro de una misma hoya hidrográfica (desde su erosión hasta su deposición) estaría controlada por procesos globales comunes. Considerando además que la litología por la que se encauza el río Cruces es relativamente homogénea, correspondiendo principalmente a rocas metamórficas paleozoicas y rocas sedimentarias pleistocenas correspondientes a depósitos fluvio-estuarinos y fluvio-glaciares, la variabilidad en las propiedades sedimentológicas a lo largo de los distintos testigos sedimentarios debiesen ser similares, y por lo tanto correlacionables (tomando siempre en cuenta el contexto geomorfológico de cada testigo).

Una manera de correlacionar es mediante el uso de la susceptibilidad magnética, la que reflejaría procesos globales a escala de la hoya hidrográfica, puesto que depende del aporte de minerales ferromagnesianos, principalmente óxidos, hidróxidos y sulfuros (e.g. Thompson, 1975; Evans & Heller, 2003) y/o de la concentración de metales adsorbidos en la superficie por las arcillas (Dessai *et al.*, 2009; Coakley *et al.*, 1993; Jonathan *et al.*, 2004); ambos dependientes a su vez de la energía del sistema y bien de la capacidad de meteorización de éste.

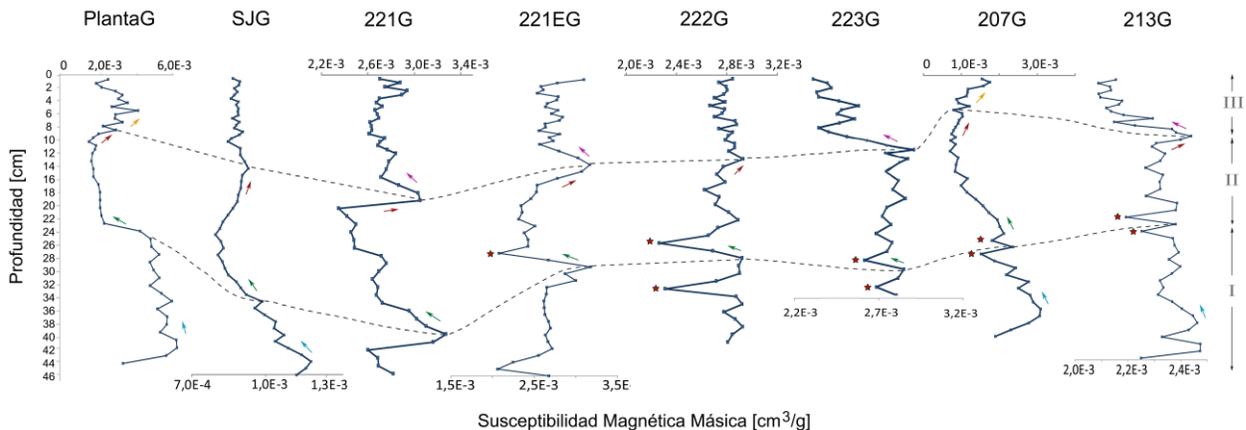


Figura VI-14. Susceptibilidad Magnética Másica de los testigos PlantaG, SJG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G. La línea punteada representa las correlaciones realizadas entre los testigos sedimentarios. Explicación en el texto.

La susceptibilidad magnética másica muestra tendencias similares a lo largo de los testigos sedimentarios PlantaG, SJG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G, pudiendo correlacionar distintos niveles. En la Figura VI-14 se muestran las correlaciones realizadas, basadas principalmente en las variaciones de la susceptibilidad magnética, y apoyada también en los cambios granulométricos observados en cada testigo, descritos en la Sección IV.2. De esta manera, se tiene tres niveles estratigráficos principales: I, II y III.

En la Figura VI-13 se observa que en el nivel estratigráfico (I), la susceptibilidad magnética másica de los testigos PlantaG, 221G, 221EG, 207G y 213G muestra tendencias decrecientes (flechas celestes). El segundo nivel estratigráfico (II) muestra variaciones similares en las tendencias de la susceptibilidad magnética, observando primero una tendencia decreciente y luego una tendencia creciente (flechas verdes y rojas, respectivamente). El tercer nivel estratigráfico (III), presenta una tendencia creciente en los testigos PlantaG y 207G (flechas naranja), mientras que en los testigos 221G, 221EG, 223G y 213G muestra una tendencia inicial decreciente (flechas magentas). Por otro lado, se observan mínimos locales que se repiten en los testigos 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G, en los niveles I y II, correspondientemente (estrellas rojas).

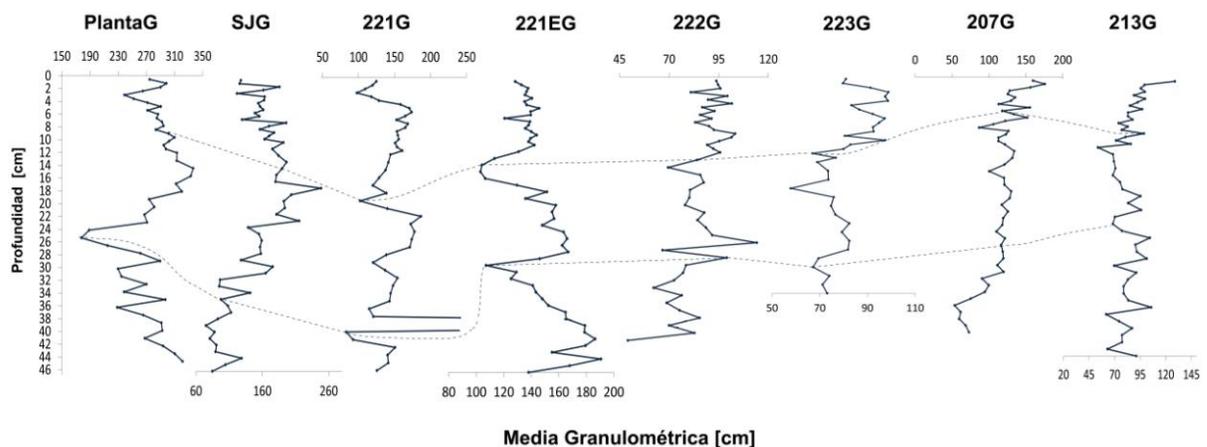


Figura VI-15. Media granulométrica de los testigos PlantaG, SJG, 221G, 221EG, 222G, 223G, 207G y 213G. La línea punteada representa las correlaciones realizadas entre los testigos sedimentarios mediante la susceptibilidad magnética másica.

Comparando la correlación realizada mediante la susceptibilidad magnética másica con los perfiles de la media granulométrica (Figura VI-15), se observa que los testigos 222G, 223G y 213G son los que muestran mejor correlación, puesto que presentan tendencias similares (aunque con mayor variabilidad en el testigo 222G), observando particularmente que los aumentos en la parte superior de la media de cada testigo se correlacionan entre sí. Esto es coherente con los contextos geomorfológicos similares entre estos tres testigos. Por su parte, los testigos 221G y 221EG, a pesar de mostrar una gran similitud en los perfiles de susceptibilidad magnética, en los perfiles granulométricos no se observa el mismo grado de similitud. Esto se debería a que, a pesar de que ambos testigos están en bancos cercanos al canal principal del río Cruces, el testigo 221EG muestra una secuencia de barra de punta, mientras el testigo 221G está más profundo y más cercano al cauce. El testigo 207G, por su parte, se correlaciona levemente con los demás testigos, debido a que pertenece a una barra mareal. Finalmente, los testigos PlantaG y SJG, presentan perfiles granulométricos más particulares, que no reflejan el cambio granulométrico real de los sedimentos, por lo que su correlación mediante el perfil granulométrico no sería válida.

A pesar de la gran heterogeneidad de los sedimentos fluviales, ya que estos dependen en gran medida su contexto geomorfológico, mediante la correlación realizada se observa que los aumentos más abruptos en la granulometría coinciden en los testigos 221EG, 222G, 223G y 213G, por lo que es posible confirmar la progradación de facies más gruesas hacia la boca del estuario en un contexto más global a la escala de la cuenca.

VII. CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 Conclusiones

Las secuencias de los sedimentos fluvio-estuarinos observadas a través del estudio de testigos sedimentarios extraídos en el lecho del río Cruces, muestran la evolución del sistema estuarino mediante la progradación de facies producto del ajuste post-terremoto de Valdivia, ocurrido el año 1960. Esta progradación de facies se ve reflejada en el aumento abrupto o paulatino de la media granulométrica en los sedimentos más superficiales de los testigos. Sin embargo, a escala más local, en cada testigo sedimentario se encuentran secuencias estratigráficas propias de cada contexto geomorfológico, ya sea: bancos cercanos al canal principal (testigo 221G); *crevasse splay* (testigo SJG); barras de punta (testigos PlantaG, 221EG, 222G, 223G y 213G); y barras mareales (testigo 207G). Este aumento de la granulometría es acompañado de un mayor aporte de material clástico, de mayor densidad aparente, constituido principalmente por cuarzo, y feldespatos sódicos y cálcicos. De manera opuesta, se observa una disminución del porcentaje de sedimentos finos, tamaño limo y arcilla (<63 μ m) en los niveles superiores de los testigos. En general, esta disminución del porcentaje de sedimentos finos implica una disminución en el porcentaje de arcillas, tanto de montmorillonita como de illita, asociadas a su vez a una disminución del porcentaje de agua y de la susceptibilidad magnética másica, dado que ésta última se relaciona al porcentaje de metales adsorbidos en la superficie de las arcillas.

Por su parte, la geoquímica de los sedimentos en general está predominantemente controlada por la litología circundante (correspondiente principalmente a rocas metamórficas y sedimentarias fluvioestuarinas-glaciofluviales) y la respectiva mineralogía como producto de su meteorización (correspondiente principalmente

arcillas), mostrando una variabilidad influenciada principalmente por los cambios granulométricos y mineralógicos de los sedimentos. Particularmente el material clástico, de mayor granulometría, se encuentra asociado a los elementos Si, Ca, Na, Mg, Ni, Ti, Cr, y Ba (\pm Fe, \pm Al, \pm K, \pm V, \pm Sc y \pm Zn); mientras que la fracción sedimentaria fina ($<63 \mu\text{m}$) se asocia principalmente a Al, K, P (este último probablemente como remanente de materia orgánica) y a metales trazas como Li, V, Co, Mn, Cu, Sc, Fe e Y, debido a la capacidad catiónica de las arcillas y partículas coloidales.

En general, no se observan variaciones estadísticamente significativas que pudiesen estar ligadas a fuentes externas o contaminación antropogénica, puesto que los sedimentos presentan una geoquímica conforme a la esperada en lutitas, rocas basálticas, barros fluviales, sedimentos estuarinos y a los criterios de calidad de los sedimentos de Estados Unidos (USA/EPA) y Canadá (OME) (1991), a excepción del cromo y, en menor proporción, del cobre.

Particularmente, el testigo 221G muestra un enriquecimiento relativo de Si, Na, Ca, Mg, Ti y Ni debido a la mayor predominancia de material clástico con alto contenido de minerales félsicos, respecto a los testigos 221G, 222G, 223G y 213G. El testigo 222G presenta mayores concentraciones de S y Cu, lo cual se podría deber a un mayor contenido de materia orgánica en un ambiente anóxico o bien a la influencia antropogénica de los fertilizantes y pesticidas utilizados en cultivos. El testigo 223G muestra un enriquecimiento de Cl respecto a los demás testigos, evidenciando una mayor influencia del agua marina. Finalmente, el testigo 213G muestra mayores concentraciones de Mn y Fe, y en menor proporción de Co y Zn (asociados principalmente al porcentaje de sedimentos finos), las cuales se podrían deber a concentraciones naturales de estos elementos asociadas al basamento metamórfico, tal como se observa más al sur del área de estudio.

De esta manera, el comportamiento global de los sedimentos se explicarían debido a las variaciones naturales de la granulometría, producto del contexto geomorfológico, litológico y estratigráfico, implicando a su vez variaciones sedimentológicas, mineralógicas y geoquímicas ligadas a éstas.

VII.2 Recomendaciones

En estudios posteriores a realizar en los testigos de sedimentos del río Cruces se recomienda:

- Realizar la geoquímica de los sedimentos considerando sólo la fracción fina (<63 μm) de manera de disminuir la influencia del tamaño de grano en la variabilidad geoquímica ya que podría enmascarar anomalías geoquímicas provenientes de otros factores, diferentes al litológico.
- Determinar el contenido de materia orgánica (por ejemplo de forma indirecta mediante el LOI; *loss on ignition*) para poder determinar posible la relación entre ésta y la concentración de elementos traza.
- Realizar un trabajo multidisciplinario en conjunto con otros datos, como por ejemplo la caracterización química de las aguas de los ríos (composición, estado redox, pH, salinidad), para entender que minerales se lixivian y/o precipitan desde las aguas de los ríos, así compararlos con los minerales de los sedimentos que provienen de la erosión de la roca. Esto se puede realizar mediante el uso de software de especiación como Phreqc.

REFERENCIAS

- AGUIRRE, L., LEVI, B. (1964). Geología de la Cordillera de los Andes de las provincias de Cautín, Valdivia, Osorno y Llanquihue. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile. Bol. N.o 17. 37 pp.
- AHRENS, L.H. (1954). The lognormal distribution of the elements. *Geochim. Cosmochim. Acta* 5 (2), pp. 49–73.
- ALLEN, J.R.L. (1970). A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits: *Geol. Jour.*, v. 7, pp. 129-146.
- APITZ, S.E., DEGETTO, S., CANTALUPPI, C. (2009). The use of statistical methods to separate natural background and anthropogenic concentrations of trace elements in radio-chronologically selected surface sediments of the Venice Lagoon. *Marine Pollution Bulletin*, v. 58, pp. 402-414.
- ARENAS M., JARA, C., MILOVIC, J., TRONCOSO, R., BEHLAU, J., HANISCH, J., HELMS, F. (2005). Geología para el ordenamiento territorial: Área Valdivia, Región de Los Lagos. *Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental*. No. 8, 71 p.
- BERNAL, J.P., RAILSBACK, B. (2008). Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, núm. 2, pp. 236-246.
- BERTAUX, J. FRÖHLICH, F., ILDEFONSE, PH. (1998). Multicomponent analysis of FTIR spectra: quantification of amorphous silica and crystallized mineral phases in synthetic and natural sediments. *Journal of Sedimentary Research* 68 (3), pp 440-447.
- BOGGS, S. (2001). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*, Prentice Hall. 726 p.
- CALLENDER, E. (2003). Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. *Treatise on Geochemistry, Volume 9*. Editor: Barbara Sherwood Lollar. Executive Editors: Heinrich D. Holland and Karl K. Turekian. Elsevier, pp.67-105.
- CASTILLO, P. (2008). Geoquímica y evaluación ambiental de los sedimentos fluviales del sistema hidrográfico Alhué, Cordillera de la Costa, Chile Central. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, 129 p.

- COAKLEY, J.P., NAGY, E., SERODES, J.B. (1993). Spatial and vertical trends in sedimentphase contaminants in the upper estuary of the St. Lawrence river. *Historical Trends in Contamination of Estuarine and Coastal Sediments*, v. 16, pp. 653–669.
- DALRYMPLE, R. W., ZAITLIN, B. A., AND BOYD, R. (1992). Estuarine facies models-- Conceptual basis and stratigraphic implications: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 62, pp. 1130-1146.
- DEGENS, E.T. (1965). *Geochemistry of Sedimentes. A Brief Survey*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 3432 pp.
- DESSAI, D.V.G., NAYAK, G.N., BASAVIAH, N. (2009). Grain size, geochemistry, magnetic susceptibility: Proxies in identifying sources and factors controlling distribution of metals in a tropical estuary, India, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 85 (2), pp. 307-318.
- DÍAZ, L., VIVALLO, W., ALFARO, G., CISTERNAS, M.E. (1988). Geoquímica de los esquistos paleozoicos de Bahía Mansa Osorno, Chile. V Congreso Geológicos Chileno, tomo II, pp. 75-96.
- DI BIASE, F., LILLO, F. (1973). *Geología Regional, Geoquímica del Drenaje, Minería de la Provincia de Valdivia*. Instituto de investigación de recursos naturales, Inscripción No. 40596, Santiago, Chile, 83 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. (2004). *Cuenca del Río Valdivia. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- DUHAR, P., LARA, L., PÉREZ, Y., RODRÍGUEZ, C., ANTINAO, J.L., CLAYTON J., MCDONOUGH, M., FONSECA, E., MUÑOZ, J. (1998). Síntesis Geológica, v. 2, Tomo I. In *Estudio Geológico-Económico de la X Región Norte*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Informe Registrado, IR-98-15, 6 vols., 12 Tomos, 27 mapas.
- ELGUETA, S., MCDONOUGH, M., LE ROUX, J., URQUETA, E., DUHART, P. (2000). Estratigrafía y sedimentología de las cuencas terciarias de la Región de Los Lagos (39-41°30'S). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, No. 57, 50 p.
- EISLER, R. (2000) *Handbook of Chemical Risk Assessment. Health, Hazard to Humans, Plants and Animals*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 650 p.
- EVANS, M., HELLER, F. (2003). *Environmental Magnetism, Principles and applications of Enviromagnetics*. Academic Press, 298 p.
- FAIRBRIDGE, R. W. (1980). The estuary: its definition and geodynamic cycle. In : E. Olausson and I. Cato (Editors), *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, Willey, New York, pp. 1-35.
- GAILLARDET J, VIERS J, DUPRÉ B. (2004). Trace elements in river waters. Drever JI (ed) *Surface and Ground Water, Weathering, and Soils. Treatise on Geochemistry*, v. 5, Elsevier, San Diego, pp. 225-272.

- GARCÍA-CABRERO, O. & MORENO-SÁNCHEZ, G. (2006). Sobre la Utilización del Análisis de Fourier, Análisis Espectral Singular y Redes Neuronales Artificiales en Estratigrafía. Parte 1: Teoría y Caso Sintético. *Geología Colombiana*, v. 31, pp. 105-120.
- GUBAC, J. (1986). On the character of distribution of chemical elements in nature. *Mathematical Geology*, v. 18 (4), 429–432.
- HOWARTH, R.J., EVANS, G., CROUDACE, I.W., CUNDY, A.B. (2005). Sources and timing of anthropogenic pollution in the Ensenada de San Simon (inner Ria de Vigo), Galicia, NW Spain: an application of mixture-modelling and nonlinear optimization to recent sedimentation, *Science of The Total Environment*, v. 340, pp 149-176.
- HUDSON-EDWARDS, K.A. (2000). Heavy-metal bearing Mn oxides in river channel and floodplain sediment. *Environmental Mineralogy: Microbial Interactions, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management* (Cotter-Howells, J.D., Campbell, L.S., Valsami-Jones, E., Batchelder, M., editors). Mineralogical Society Series, 9. Mineralogical Society, London, pp. 207-26.
- ILLIES, H. (1970). *Geología de los alrededores de Valdivia y Volcanismo y Tectónica en márgenes del pacífico en Chile Meridional*. Instituto de Geología y Geografía, Universidad Austral de Chile, 64 p.
- JONATHAN, M.P., RAM-MOHAN, V., SRINIVASALU, S. (2004). Geochemical variations of major and trace elements in recent sediments, off the Gulf of Mannar, the southeast coast of India. *Environmental Geology*, v. 45, pp. 466–480.
- LACASSIE, J.P.; ROSER, B.; RUIZ DEL SOLAR, J.; HERVÉ, F. (2004). Discovering geochemical patterns using self-organizing neural networks: a new perspective for sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 165: pp. 175-191.
- LACASSIE, J.P., RUIZ DEL SOLAR, J. (2010). Application of artificial neural networks to the geochemical study of an impacted fluvial system. *IEEE Int Joint Conf. on Neural Networks- Barcelona, España*, 8 p.
- LIU, Z., ZHAO, Y., COLIN, C., SIRINGAN, F.P., WU, Q. (2009). Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments. *Applied Geochemistry*, v. 24 (11), pp. 2195-2205.
- MARSHALL, C. E. (1965). *The Physical Chemistry and Mineralogy of Soils. V. I: Soil Materials*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 293 p.
- MARÍN, V..H., TIRONI, A., DELGADO, L.E., CONTRERAS, M., NOVOA, F., TORRES-GÓMES, M., GARREAUD, R., VILA, I., SEREY, I. (2009). On the sudden disappearance of *Egeria densa* from a Ramsarwetland site of Southern Chile: A climatic event trigger model. *Ecological Modeling*, pp. 1752-1763.

- MARTINEZ, R., PINO, M. (1979). Edad, paleoecología y sedimentología del Mioceno marino de la Cuesta Santo Domingo, Provincia de Valdivia, X Región. In Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas, v. 2, pp. H103-H124.
- MCDONOUGH, M., DUHART, P., ANTINAO, J., ELGUETA, S., CRIGNOLA, P. (1998). Geología Preliminar Área de Valdivia. Mapa 10, escala 1:100.000, Vol. 2, Tomo II, En Estudio Geológico-Económico de la X Región Norte. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Informe Registro IR-98-15, v. 6., 12 Tomos, 27 mapas. Santiago.
- MEYBECK M. (2003). Global Occurrence of Major Elements in Rivers. Treatise on Geochemistry. Vol. 5, Elsevier, San Diego, v. 5, pp. 207-223.
- MEYER, W., THEOBALD, P., BLOOM, H. (1979). Stream Sediment Geochemistry; en geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores (editado por Peter Hood), Geological Survey of Canada, Economic Geology, Report 31, pp. 411-434.
- MOROS, J., CASSELLA, R.J., BARCIELA-ALONSO, M.C., MOREDA-PINEIRO, A., HERBELLO-HERMELO, P., BERMEJO-BARRERA, P., GARRIGUES, S., DE LA GUARDIA, M. (2004). Estuarine sediment quality assessment by Fourier-transform infrared spectroscopy, *Vibrational Spectroscopy*, v. 53 (2), pp. 204-213.
- MULSOW, S., GRANDJEAN, M. (2006). Incompatibility of sulphate compounds and soluble bicarbonate salts in the Rio Cruces waters: an answer to the disappearance of *Egeria densa* and black-necked swans in a RAMSAR sanctuary. *ESEP 2006*, pp. 5–11.
- MULSOW, S., PIOVAN, E., CORDOBA, F. (2009). Recent aquatic ecosystem response to environmental events revealed from 210Pb sediment profiles. *Marine Pollution Bulletin* 59, pp. 175–181.
- NESBITT, H.W., YOUNG, G.M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, pp. 715–717.
- OJEDA, J.M. (1976). Estudio petrológico y estructural del basamento metamórfico y de la serpentinita del Morro Bonifacio, Provincia de Valdivia. Décima Región. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 94 p.
- OME (Ontario Ministry of the Environment). (1991). Criteria for sediment concentration of metals in: Heavy metal contamination in the Upper Connecting Channels of the Great Lakes (Nichols, S. et al., 1991) *Hydrobiology*. 219, pp. 307-315.
- PINO, M., PERILLO, G.M.E., SANTAMARINA, P. 1994. Residual fluxes in a cross-section of the Valdivia River Estuary, Chile. *Est. Coastal Shelf Sci.*, 39, pp. 491-505.
- PINO, M., MORENO, K., RIEDEMANN, M. (2002). La terraza del último interglacial en la costa de Valdivia: observaciones, interpretaciones y desafíos. In Simposio Internacional de Geología Ambiental para Planificación del Uso del Territorio, Resúmenes, pp. 165-168.
- PLAFKER, G., SAVAGE, J.C. (1970). Mechanism of the Chilean Earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin* 81, pp. 1001–1030.

- PORTER, S.C. (1981). Pleistocene Glaciation in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, v. 16, pp. 263-292.
- RANKAMA, K., SAHAMA, T. 1954. *Geoquímica*. Ediciones Madrid, Aguilar S.A, 862 p.
- READING, H.G. (1996). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell, Oxford, 688 p.
- REID, M.K., SPENCER, K.L. (2009). Use of principal components analysis (PCA) on estuarine sediment datasets: The effect of data pre-treatment, *Environmental Pollution*, Volume 157 (8-9), pp. 2275-2281.
- REINHARDT, E., NAIRN R., LOPEZ, G. (2010). Recovery estimates for the Río Cruces after the May 1960 Chilean earthquake. *Marine Geology* 269, pp. 18–33.
- SALDIVIA, M. A. (2005). Determinación de metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb y Zn) en hígado y riñón de cisnes de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*), lucheillo (*Egeria densa*), sedimento y agua, recolectados en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter y Humedales adyacentes a la Provincia de Valdivia. Tesis de Grado de Titulo de Químico Farmacéutico, Universidad Austral, 80 p.
- SCHAEFER, K., EINAX, J. (2010). Analytical and chemometric characterization of the Cruces River in South Chile. *Environ Sci Pollut Res*, v. 17, pp. 115–123.
- SCHLATTER, R., MANSILLA, Y. (1998). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. 2ª edición. Instituto de Zoología, Universidad Austral de Chile. 19 pp. enviado a la Oficina Ramsar.
- SCHROLL, E. (1976). *Analytische Geochemie*. Bd. II, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 374 p.
- SENSARMA, S., RAJAMANI, V., TRIPATHI, J.K. (2008). Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, Southern India: Implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology*, v. 205 (3-4), pp. 111-125.
- SPENCER, K.L. (2002). Spatial variability of metals in the inter-tidal sediments of the Medway Estuary, Kent, UK, *Marine Pollution Bulletin*, v. 44 (9), pp. 933-944.
- STALLARD R. F. (1995). Tectonic, environmental and human aspects of weathering and erosion: a global review using a steady-state perspective. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 23, pp. 11–39.
- THOMPSON, R., BATTARBEE, R.W., O'SULLIVAN, P.E., OLDFIELD, F. (1975). Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnology and Oceanography* 20, pp 687-698.
- TUREKIAN, K.K., AND WEDEPOHL, K.H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Bull. Geol. Soc. America*, v. 72, pp. 175-192.

- USA/EPA (1991). Criteria for sediment concentration of metals in: Heavy metal contamination of sediments in the upper connecting channels of the Great Lakes (Nichols, S. J. et al., 1991) *Hidrobiología*. 219, pp. 307-315.
- VILLASEÑOR, T. (2005). Estratigrafía del relleno sedimentario holoceno tardío y variabilidad climática durante los últimos 200 años en Bahía Mejillones (23°S), Norte de Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención, 135 p.
- WALKER, A.J., CROSS, S.S., HARRISON, R.F. (1999). Visualisation of biomedical datasets using growing cell structure networks: a novel diagnostic classification technique. *The Lancet*, vol. 354, pp. 1518–1521.
- WEBSTER, R. (2001). Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science* 52, pp. 331-340.
- WHITMORE, G.P., CROOK, K.A.W., JOHNSON, D. (2004). Grain size control of mineralogy and geochemistry in modern river sediment, New Guinea collision, Papua New Guinea. *Sedimentary Geology* 171, pp. 129–157.

ANEXOS

ANEXO A: Resultados del Análisis de FTIR.

Tabla A- 1. Porcentajes de minerales obtenidos mediante el análisis de FTIR en los sedimentos del testigo SJG.
Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo; Kao: caolinita.

TESTIGO SJ G												
Muestra	Profundidad [cm]	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Kao	Total	M.O./M.D.
		[%]										
329	0,51	1,5	2,5	22,2	4,9	3,5	2,5	4	5,2	8,5	46,3	53,7
331	1,53	0,8	3,5	28,5	3,9	2	0,5	5	4,4	9	48,6	51,4
333	2,56	0,3	3,5	25	5	1	1,5	3	4,3	2,5	43,6	56,4
335	3,58	0	3	26	6,5	1	2	3,9	4,9	6,1	47,3	52,7
337	4,60	0,7	3,5	24	4,5	1	1,5	3,4	4,2	2,6	42,8	57,2
339	5,62	0	3	25	11	0	1	4,9	4	9,5	48,9	51,1
341	6,64	1	3	25,9	8	2	1,5	4,9	5	9,5	51,3	48,7
343	7,67	3,5	3,4	23,4	2	1	0,5	3,4	4,6	2,5	41,8	58,2
345	8,69	0,5	3,6	21,9	7,5	1,5	0	3,4	4,8	5	43,2	56,8
347	9,71	1,3	3	23,3	8	2,5	0,5	4,9	4,1	11,9	47,6	52,4
349	10,22	0,5	4,3	26,3	7	1	1	5,4	4,7	9	50,2	49,8
350	11,24	1,3	3	26,8	7,5	1,5	1	5,9	4	10,7	51	49
351	12,27	0	2,8	23,4	6,5	0,5	1	4,4	5	7,5	43,6	56,4
352	13,29	0	3,8	28	7,5	0,5	1	4,4	4,5	4	49,7	50,3
353	14,31	0	3,3	26	6	0,5	0,5	3,4	4,5	3	44,2	55,8
354	15,33	0	3,5	28	5,5	0	1,5	5	3,5	2	47	53
355	16,36	0,2	5	24,5	6,5	0	1	3	4	3,5	44,2	55,8
356	17,38	0	3,5	30	6,5	0	1	6	3,5	4	50,5	49,5
357	18,40	0	7,5	27	8	0,5	2,5	4	3	1,5	52,5	47,5
358	19,42	0,3	2,7	23	15	0,5	0	6,5	3,6	12	51,6	48,4
Promedio	20,44	0,6	3,6	25,4	6,9	1,0	1,1	4,4	4,3	6,2	47,3	52,7
Std.D.		0,8	1,1	2,2	2,7	0,9	0,7	1,0	0,6	3,6	3,4	3,4

Tabla A- 2. Porcentajes de minerales obtenidos mediante el análisis de FTIR en los sedimentos del testigo 221G.
 Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo.

TESTIGO 221G											
Muestra	Profundidad [cm]	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Total	M.O./M.D.
		[%]									
185	0,6	0,5	2	5	5	2,5	0,5	9,5	14,5	39,5	60,5
187	1,8	0,5	2,3	10	9	2	2	4,5	14	44,3	55,7
189	3,0	0	2,2	8	8	4,5	1	9	13	45,7	54,3
191	4,2	0	2,8	8	4,5	1	0,5	7,5	23,5	47,8	52,2
193	5,4	1	0,9	5,5	9	4	0,5	4,5	18,5	43,9	56,1
195	6,7	0,8	3	7	6,7	4,4	2,5	8,9	21,1	54,4	45,6
197	7,9	0,8	1,7	11,5	6,7	1,9	1,5	10,4	18,6	53,1	46,9
199	9,1	2,4	1,9	5,5	3,7	1,4	0,5	7,4	19,1	41,9	58,1
201	10,3	0,9	3,9	4	5,2	1,9	0,5	4,4	20,1	40,9	59,1
203	11,5	0,4	2,4	5	7,7	1,9	2	8,4	18,3	46,1	53,9
205	13,3	0,9	1,4	6,5	8,7	0,4	1	7,9	20,3	47,1	52,9
206	14,5	0,9	3,3	8	8,7	0,4	1	8,4	18,3	49,0	51,0
207	15,7	0,5	3,4	4,5	4,7	0,9	0,5	6,4	17,3	38,2	61,8
208	16,9	0,5	4	7,5	5,7	1,4	2	11,9	12,3	45,3	54,7
209	18,2	0,5	2,5	9	9,7	1,9	2,5	14,9	13,8	54,8	45,2
210	19,4	0,5	4,9	10,5	10,7	2,4	2	15,9	13,3	60,2	39,8
211	20,6	0,5	3,4	10,5	7,2	3,9	0,5	11,9	15,8	53,7	46,3
212	21,8	0,5	2,7	7,5	5,2	2,9	1	8,4	22,3	50,5	49,5
213	23,0	0,5	1,2	4	5,7	0,9	1	5,4	26,3	45,0	55,0
214	24,2	0,5	2,2	4,5	4,7	0,4	0,5	7,4	25,8	46,0	54,0
Promedio		0,7	2,6	7,1	6,8	2,1	1,2	8,7	18,3	47,4	52,6
Std.D.		0,5	1,0	2,3	2,0	1,3	0,7	3,2	4,2	5,7	5,7

Tabla A- 3. Porcentajes de minerales obtenidos mediante el análisis de FTIR en los sedimentos del testigo 222G.
 Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo.

TESTIGO 222G											
Muestra	Profundidad [cm]	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Total	M.O./M.D.
		[%]									
233	0,6	1	3,1	23,5	6,5	5,5	0	6,5	8,5	54,6	45,4
235	1,7	3,3	2,2	9,5	14	6,5	1	5	8,5	50,0	50,0
237	2,9	2,8	2,7	7	14	6,5	0,5	4,5	7,5	45,5	54,5
239	4,1	4,8	1,9	3	6	3,5	0,5	4	8	31,7	68,3
241	5,2	4,3	2,4	11	11	3,5	1,5	3,5	9,5	46,7	53,3
243	6,4	1,5	2	17	7	6	2	4	8,5	48,0	52,0
245	7,6	2,5	1,9	12,5	6,5	10	1,5	5,5	8	48,4	51,6
246	8,1	3,8	1,5	11,5	13,5	6	1	6	8	51,3	48,7
247	8,7	4,3	1,8	12	15	7,5	0,5	5	9,5	55,6	44,4
248	9,3	2,9	1,7	13,4	14,1	7	1	4	7	51,1	48,9
249	9,9	2,3	2,4	14	15,5	4,5	1,5	7	9	56,2	43,8
251	12,8	1,8	2,2	15,5	13	4	1,5	10,5	6,5	55,0	45,0
253	14,0	0,3	2,7	21	7,5	3,5	2	9,5	5	51,5	48,5
254	15,1	0,3	2,4	17	8	3,5	2	10	5	48,2	51,8
255	16,3	0,3	3,9	15	7,5	6	2	9	5,5	49,2	50,8
256	17,4	0,3	3	19,5	11,5	6	1,5	7	6	54,8	45,2
257	18,6	0,3	3	18	10,5	3	2	6,5	5	48,3	51,7
258	19,8	0,3	2,7	19	12,5	3,5	1,5	7,5	7,5	54,5	45,5
259	20,9	0,3	2,7	14	14	4,5	1,5	8	7,5	52,5	47,5
260	22,1	0,3	3,2	15,5	16	4,5	1	7	6,5	50,2	49,8
261	23,3	0,3	2,7	19	16,5	7	0,5	8	9	5,5	5,5
262	12,8	0,8	2,3	11	13,5	9	0,5	9	7	53,1	46,9
Promedio		1,8	2,5	14,5	11,5	5,5	1,2	6,7	7,4	48,3	47,7
Std.D.		1,6	0,6	4,8	3,5	1,9	0,6	2,1	1,4	10,8	10,7

Tabla A- 4. Porcentajes de minerales obtenidos mediante el análisis de FTIR en los sedimentos del testigo 223G.
Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo.

TESTIGO 223G											
Muestra	Profundidad [cm]	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Total	M.O./M.D.
		[%]									
150	0,7	4,5	2,0	4,5	6,0	4,5	5,0	9,5	15,0	51,0	49,0
152	2,0	9,0	1,5	7,5	10,0	4,5	6,5	7,0	13,5	59,5	40,5
154	3,4	11,0	2,0	7,5	8,0	3,0	3,5	7,0	11,5	53,5	46,5
156	4,7	7,0	2,0	7,8	7,1	7,0	4,0	13,9	14,0	62,8	37,2
158	6,0	3,0	2,5	17,0	6,5	6,5	5,0	8,5	4,0	53,0	47,0
160	7,4	7,0	4,0	6,5	4,5	5,0	4,0	6,0	13,0	50,0	50,0
162	8,7	6,5	2,4	6,8	6,3	3,4	5,6	6,0	18,3	55,3	44,7
164	10,1	3,0	2,4	7,3	3,8	9,4	5,1	8,5	14,8	54,3	45,7
166	11,4	0,9	3,4	12,8	8,8	4,4	5,6	10,5	13,3	59,7	40,3
167	12,7	1,0	4,0	11,0	12,5	2,0	1,7	5,5	12,0	49,7	50,3
168	12,7	1,9	4,4	10,3	9,8	1,4	4,1	7,5	9,8	49,2	50,8
169	13,4	0,5	4,6	13,0	13,5	1,5	1,2	4,5	10,0	48,8	51,2
170	14,7	0,5	4,7	13,8	8,8	4,5	2,6	10,5	10,5	55,9	44,1
171	16,1	0,5	4,7	14,8	7,3	2,0	2,1	11,0	10,0	52,4	47,6
172	17,4	1,0	4,5	15,6	13,9	3,7	1,7	8,0	9,0	57,4	42,6
173	18,8	0,5	5,1	14,6	12,9	4,0	2,7	7,5	8,5	55,8	44,2
174	20,1	0,5	4,6	9,1	13,9	4,5	2,2	12,0	10,0	56,8	43,2
175	21,4	0,5	4,6	12,6	17,9	5,0	3,2	12,5	11,5	67,8	32,2
176	22,8	0,5	4,6	8,6	13,9	3,5	2,7	10,0	10,5	54,3	45,7
177	24,1	0,5	5,1	10,1	18,9	4,4	2,2	10,0	12,0	63,2	36,8
178	25,5	0,5	6,1	15,1	10,9	6,4	2,7	7,5	10,5	59,7	40,3
179	26,8	0,0	4,6	14,1	14,4	6,9	3,2	9,0	7,5	59,7	40,3
Promedio		2,7	3,8	10,9	10,4	4,4	3,5	8,7	11,3	55,9	44,1
Std.D.		3,3	1,3	3,6	4,2	2,0	1,5	2,4	3,0	5,0	5,0

Tabla A- 5- Porcentajes de minerales obtenidos mediante el análisis de FTIR en los sedimentos del testigo 213G.
 Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo.

TESTIGO 213G											
Muestra	Profundidad [cm]	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Total	M.O./M.D.
384	0,5	2,5	2	9,1	15,5	4,7	3,4	8,5	11	56,7	43,3
386	1,6	2	2,5	13,6	20	7,2	2,9	7	11	66,2	33,8
3883	2,7	3,5	2	14,1	6	6,2	1,9	7,5	10	51,2	48,8
390	3,8	0,2	2,7	17,7	3,6	3,6	1,7	3,4	11,7	44,6	55,4
392	4,9	2	3	12,1	7	5,7	2,9	13,5	11,5	57,7	42,3
394	6,0	1	3,9	17,8	4	9	1	4,5	9,5	50,7	49,3
396	7,1	0,4	3,5	11,4	7,6	13,9	3,4	1,7	8,1	50,0	50,0
398	8,2	0,5	3,7	20,4	4,6	6,9	2,9	2,7	7,1	48,8	51,2
400	9,2	0	4,1	16	4	7	0,5	5,5	8,5	45,6	54,4
402	9,8	0,5	2,7	22,3	3	4,2	1,9	2	7	43,6	56,4
404	12,0	1,5	3,7	24,8	3	2,7	2,4	2	8,5	48,6	51,4
405	13,1	0,5	4,2	14,8	8	9,2	1,4	3	7,5	48,6	51,4
406	14,1	2,5	4,2	16,3	7	8,2	1,9	3,5	7,5	51,1	48,9
407	15,2	0,5	4,7	20,8	6,5	7,2	1,4	2,5	7,5	51,1	48,9
408	16,3	0,5	5	21,5	5	7	0,5	2,5	6,9	48,9	51,1
401	17,4	0,4	5	25	4	5,5	1	3,5	6,4	50,8	49,2
410	18,5	0,5	4,7	26,5	3	5	1	3,5	6,9	51,1	48,9
411	19,6	0,5	4,2	26	2,5	3,5	0,5	2	6,4	45,6	54,4
412	20,7	0,5	3,7	25,5	1,5	4	1	3	4,4	43,6	56,4
413	21,8	0,5	4,9	24	0,5	2,5	1	3	5,4	41,8	58,2
Promedio		1,0	3,7	19,0	5,8	6,2	1,7	4,2	8,1	49,8	50,2
Std.D.		1,0	1,0	5,4	4,6	2,7	1,0	2,9	2,1	5,6	5,6

Anexo B: Matrices de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía.

Tabla B- 1. Matriz de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía de los sedimentos de los primeros 20 cm del testigo SJG. Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo. Minerales Félsicos=Qz+Byt+Alb; Líticos=Anf+Bt+Byt+Alb+Qz. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO SJG																		
	Agua	Densidad	Suscep. Vol.	Suscep. Másica	Media Gran.	Sed. Finos	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Arcillas	Mins. Félsicos	M.O./ M.D.	Líticos
Agua	1																	
Densidad	0,36	1																
Suscep. Vol.	0,45	0,97	1															
Suscep. Másica	0,52	0,22	0,43	1														
Media Gran.	0,38	0,52	0,60	0,48	1													
Sed. Finos	-0,33	-0,45	-0,54	-0,51	-0,97	1												
Anf	-0,16	-0,08	-0,15	-0,33	-0,27	0,27	1											
Cal	0,10	0,42	0,43	0,20	0,41	-0,38	-0,23	1										
Illita	0,28	0,28	0,33	0,28	0,25	-0,28	-0,37	0,28	1									
Mont	-0,14	-0,07	-0,11	-0,15	0,13	-0,11	-0,43	-0,05	-0,13	1								
Bt	-0,09	-0,33	-0,41	-0,46	-0,55	0,53	0,52	-0,33	-0,38	-0,23	1							
Byt	0,21	-0,06	-0,12	-0,27	-0,35	0,40	-0,14	0,33	0,17	-0,25	0,16	1						
Alb	0,17	-0,01	-0,05	-0,13	0,12	-0,15	-0,11	-0,25	0,37	0,56	-0,03	-0,23	1					
Qz	0,04	-0,40	-0,37	-0,01	-0,42	0,40	0,29	-0,53	-0,41	-0,33	0,54	-0,01	-0,33	1				
Arcillas	0,08	0,13	0,14	0,06	0,28	-0,28	-0,60	0,15	0,58	0,73	-0,45	-0,09	0,71	-0,56	1			
Félsicos	0,32	-0,27	-0,32	-0,30	-0,33	0,33	-0,03	-0,31	0,24	0,19	0,36	0,43	0,63	0,23	0,32	1		
M.O./ M.D.	-0,15	-0,07	-0,02	0,18	-0,07	0,07	0,27	-0,22	-0,52	-0,58	0,02	-0,16	-0,77	0,41	-0,84	-0,62	1	
Líticos	0,07	-0,32	-0,42	-0,50	-0,54	0,52	0,63	-0,41	-0,20	-0,18	0,86	0,24	0,27	0,48	-0,28	0,68	-0,21	1

Tabla B- 2. Matriz de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía de los sedimentos de los primeros 24 cm del testigo 221G. Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo. Minerales Félsicos=Qz+Byt+Alb; Líticos=Anf+Bt+Byt+Alb+Qz. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 221G																		
	Agua	Densidad	Suscep. Vol.	Suscep. Másica	Media Gran.	Sed. Finos	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Arcillas	Mins. Félsicos	M.O./ M.D.	Líticos
Agua	1																	
Densidad	-0,86	1																
Suscep. Vol.	-0,82	0,98	1															
Suscep. Másica	0,60	-0,52	-0,34	1														
Media Gran.	-0,85	0,72	0,63	-0,67	1													
Sed. Finos	0,89	-0,77	-0,69	0,67	-0,98	1												
Anf	-0,32	0,07	0,04	-0,15	0,19	-0,26	1											
Cal	0,48	-0,45	-0,44	0,32	-0,50	0,56	-0,20	1										
Illita	0,43	-0,50	-0,50	0,23	-0,38	0,47	-0,20	0,27	1									
Mont	0,46	-0,38	-0,28	0,59	-0,42	0,50	-0,19	0,07	0,53	1								
Bt	0,03	-0,13	-0,12	-0,02	-0,08	0,10	-0,14	0,01	0,27	0,25	1							
Byt	0,29	-0,28	-0,18	0,58	-0,31	0,40	-0,18	0,24	0,44	0,54	0,16	1						
Alb	0,56	-0,64	-0,63	0,46	-0,40	0,52	-0,19	0,47	0,59	0,39	0,15	0,50	1					
Qz	-0,81	0,77	0,68	-0,64	0,82	-0,83	0,11	-0,37	-0,48	-0,49	-0,35	-0,38	-0,52	1				
Arcillas	0,51	-0,51	-0,45	0,45	-0,46	0,55	-0,22	0,20	0,89	0,85	0,30	0,55	0,57	-0,55	1			
Félsicos	-0,37	0,26	0,19	-0,22	0,52	-0,40	-0,08	0,03	0,06	-0,11	-0,23	0,19	0,37	0,60	-0,02	1		
M.O./ M.D.	-0,16	0,28	0,28	-0,20	0,06	-0,20	0,18	-0,32	-0,73	-0,55	-0,27	-0,57	-0,73	0,11	-0,74	-0,60	1	-
Líticos	-0,41	0,23	0,16	-0,25	0,53	-0,42	0,01	0,01	0,13	-0,05	0,11	0,23	0,40	0,50	0,05	0,94	-0,69	1

Tabla B- 3. Matriz de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía de los sedimentos de los primeros 23 cm del testigo 222G. Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo. Minerales Félsicos=Qz+Byt+Alb; Líticos=Anf+Bt+Byt+Alb+Qz. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 222G																		
	Agua	Densidad	Suscep. Vol.	Suscep. Másica	Media Gran.	Sed. Finos	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Arcillas	Mins. Félsicos	M.O./ M.D.	Líticos
Agua	1																	
Densidad	-0,24	1																
Suscep. Vol.	-0,24	0,99	1															
Suscep. Másica	-0,01	0,08	0,21	1														
Media Gran.	-0,46	0,32	0,35	0,26	1													
Sed. Finos	0,50	-0,33	-0,35	-0,24	-0,98	1												
Anf	-0,32	0,48	0,49	0,13	0,79	-0,830	1											
Cal	0,08	-0,36	-0,38	-0,15	-0,46	0,501	-0,70	1										
Illita	0,22	-0,49	-0,46	0,15	-0,55	0,580	-0,75	0,48	1									
Mont	0,37	0,13	0,13	0,02	0,15	-0,108	0,05	-0,10	-0,14	1								
Bt	-0,07	0,27	0,31	0,21	0,35	-0,324	0,16	-0,28	-0,20	0,13	1							
Byt	0,06	0,05	0,01	-0,30	-0,58	0,581	-0,38	0,20	0,31	-0,32	-0,40	1						
Alb	0,47	-0,47	-0,44	0,12	-0,67	0,717	-0,71	0,43	0,49	0,02	-0,19	0,31	1					
Qz	-0,33	0,44	0,45	0,19	0,58	-0,650	0,619	-0,45	-0,33	0,28	0,32	-0,54	-0,60	1				
Arcillas	0,43	-0,34	-0,32	0,15	-0,38	0,433	-0,62	0,35	0,78	0,52	-0,09	0,07	0,44	-0,11	1			
Félsicos	0,31	-0,18	-0,15	0,19	-0,53	0,528	-0,48	0,21	0,43	0,14	-0,11	0,28	0,81	-0,09	0,46	1		
M.O./ M.D.	-0,34	0,04	-0,01	-0,35	0,21	-0,234	0,37	-0,15	-0,48	-0,49	-0,24	0,20	-0,33	-0,22	-0,72	-0,50	1	
Líticos	-0,04	0,37	0,42	0,36	0,38	-0,385	0,40	-0,49	-0,32	0,22	0,75	-0,34	-0,03	0,55	-0,13	0,30	-0,29	1

Tabla B- 4. Matriz de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía de los sedimentos de los primeros 27 cm del testigo 223G. Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo. Minerales Félsicos=Qz+Byt+Alb; Líticos=Anf+Bt+Byt+Alb+Qz. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 223G																		
	Agua	Densidad	Suscep. Vol.	Suscep. Másica	Media Gran.	Sed. Finos	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Arcillas	Mins. Félsicos	M.O./ M.D.	Líticos
Agua	1																	
Densidad	-0,67	1																
Suscep. Vol.	-0,61	0,96	1															
Suscep. Másica	0,21	-0,08	0,20	1														
Media Gran.	-0,51	0,37	0,17	-0,67	1													
Sed. Finos	0,52	-0,36	-0,17	0,65	-0,99	1												
Anf	-0,34	0,27	0,04	-0,83	0,68	-0,65	1											
Cal	0,40	-0,19	0,00	0,77	-0,59	0,56	-0,80	1										
Illita	0,31	-0,17	-0,02	0,61	-0,51	0,53	-0,65	0,59	1									
Mont	0,51	-0,31	-0,18	0,50	-0,58	0,56	-0,56	0,62	0,35	1								
Bt	-0,15	0,06	-0,01	-0,23	0,48	-0,42	0,08	-0,23	-0,05	-0,25	1							
Byt	-0,42	0,20	0,06	-0,56	0,71	-0,70	0,59	-0,75	-0,45	-0,60	0,38	1						
Alb	0,22	-0,32	-0,27	0,17	-0,11	0,08	-0,21	0,03	0,03	0,15	0,35	-0,01	1					
Qz	-0,23	0,24	0,14	-0,40	0,32	-0,34	0,47	-0,46	-0,77	-0,35	0,05	0,44	-0,03	1				
Arcillas	0,50	-0,30	-0,13	0,67	-0,66	0,67	-0,73	0,73	0,79	0,85	-0,19	-0,64	0,12	-0,66	1			
Félsicos	-0,17	0,05	-0,03	-0,35	0,39	-0,41	0,39	-0,53	-0,64	-0,34	0,34	0,62	0,51	0,79	-0,58	1		
M.O./ M.D.	-0,31	0,19	0,17	-0,11	0,01	-0,03	0,10	-0,10	-0,15	-0,47	-0,45	-0,08	-0,62	-0,08	-0,39	-0,41	1	
Líticos	-0,30	0,17	-0,01	-0,65	0,68	-0,66	0,71	-0,75	-0,70	-0,53	0,51	0,75	0,31	0,71	-0,74	0,88	-0,32	1

Tabla B- 5. Matriz de correlación de los parámetros físicos, sedimentológicos y mineralogía de los sedimentos de los primeros 22 cm del testigo 213G. Anf: anfíbola; Cal: calcita; Ill: Illita; Bt: biotita; Byt: bytownita; Alb: albita; Qz: cuarzo. Minerales Félsicos=Qz+Byt+Alb; Líticos=Anf+Bt+Byt+Alb+Qz. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 213G																		
	Agua	Densidad	Suscep. Vol.	Suscep. Másica	Media Gran.	Sed. Finos	Anf	Cal	Ill	Mont	Bt	Byt	Alb	Qz	Arcillas	Mins. Félsicos	M.O./ M.D.	Líticos
Agua	1																	
Densidad	-0,7	1																
Suscep. Vol.	-0,73	0,98	1															
Suscep. Másica	0,55	-0,78	-0,63	1														
Media Gran.	-0,42	0,34	0,29	-0,40	1													
Sed. Finos	0,65	-0,55	-0,49	0,57	-0,95	1												
Anf	-0,35	0,28	0,13	-0,61	0,38	-0,49	1											
Cal	0,80	-0,58	-0,51	0,57	-0,65	0,80	-0,60	1										
Illita	0,65	-0,61	-0,55	0,62	-0,36	0,52	-0,51	0,62	1									
Mont	-0,38	0,26	0,17	-0,47	0,460	-0,55	0,51	-0,51	-0,71	1								
Bt	-0,18	0,29	0,30	-0,19	-0,27	0,19	-0,01	0,05	-0,55	0,33	1							
Byt	-0,55	0,41	0,31	-0,55	0,34	-0,46	0,48	-0,66	-0,64	0,61	0,27	1						
Alb	-0,54	0,55	0,48	-0,57	0,60	-0,70	0,62	-0,52	-0,61	0,47	-0,04	0,39	1					
Qz	-0,78	0,65	0,57	-0,66	0,48	-0,69	0,52	-0,70	-0,74	0,59	0,12	0,55	0,68	1				
Arcillas	0,44	-0,54	-0,56	0,30	0,04	0,07	-0,11	0,25	0,55	0,20	-0,37	-0,16	-0,29	-0,32	1			
Félsicos	-0,73	0,65	0,56	-0,70	0,60	-0,77	0,65	-0,71	-0,77	0,62	0,08	0,63	0,92	0,89	-0,33	1		
M.O./ M.D.	0,36	-0,31	-0,20	0,52	-0,40	0,51	-0,58	0,38	0,56	-0,87	-0,29	-0,56	-0,63	-0,61	-0,25	-0,71	1	
Líticos	-0,69	0,67	0,58	-0,71	0,42	-0,59	0,65	-0,62	-0,90	0,70	0,47	0,67	0,79	0,82	-0,42	0,91	-0,76	1

Anexo C: Resultados geoquímica de elementos mayores y elementos trazas.

Tabla C- 1. Datos geoquímicos del testigo 221G.

TESTIGO 221G																										
Profundidad [cm]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
	[%]											[ppm]														
0,6	54,1	15,6	1,70	1,38	1,06	0,16	7,48	1,06	0,90	0,30	<2	440	<2	31	93	49	16	<2	50	9	25	183	22	120	408	190
1,2	50,0	15,9	1,57	1,35	1,03	0,16	7,70	0,94	0,91	0,33	<2	440	<2	31	94	53	16	<2	50	4	25	189	26	110	461	78
1,8	50,9	17,6	1,57	1,38	1,10	0,19	8,60	1,00	1,00	0,39	<2	507	<2	32	103	63	18	<2	55	9	30	226	25	125	443	100
2,4	47,0	16,9	1,45	1,36	1,08	0,18	8,24	0,97	1,00	0,41	<2	530	<2	33	102	66	18	<2	57	8	31	236	24	126	497	105
3,0	49,7	16,7	1,49	1,36	1,07	0,17	8,08	1,00	1,00	0,39	<2	519	<2	35	100	63	17	<2	58	14	30	228	24	122	476	77
3,6	52,0	16,6	1,53	1,38	1,08	0,18	8,03	1,05	0,98	0,35	<2	489	<2	33	100	57	17	<2	51	15	28	209	23	113	425	140
4,2	56,8	15,3	1,60	1,36	1,00	0,13	6,87	1,12	0,91	0,29	<2	443	<2	30	92	50	17	<2	47	8	25	188	21	102	400	80
4,8	57,0	14,4	1,58	1,25	0,97	0,13	6,65	1,13	0,89	0,26	<2	414	<2	28	90	46	17	<2	46	10	24	174	19	98	315	70
5,4	54,9	15,6	1,54	1,36	1,04	0,17	7,45	1,01	0,88	0,30	<2	414	<2	30	92	51	17	<2	49	11	25	188	22	103	377	165
6,1	54,3	15,4	1,61	1,36	1,01	0,17	7,52	0,92	0,87	0,31	<2	447	<2	30	95	53	17	<2	47	4	25	194	25	103	350	100
6,7	54,2	15,7	1,55	1,35	1,00	0,16	7,51	1,03	0,85	0,29	<2	436	<2	30	89	48	16	<2	47	8	25	175	22	100	395	110
7,3	50,0	15,6	1,51	1,36	0,99	0,18	7,54	0,97	0,81	0,31	<2	412	<2	30	90	50	15	<2	46	10	25	188	22	100	367	70
7,9	52,7	15,6	1,57	1,39	1,01	0,16	7,35	1,01	0,82	0,28	<2	400	<2	27	90	45	16	<2	46	7	25	182	22	105	330	85
8,5	57,0	15,0	1,70	1,39	0,98	0,15	7,00	1,14	0,83	0,25	<2	374	<2	28	85	41	17	<2	45	2	25	176	22	102	278	70
9,1	56,4	15,5	1,65	1,38	1,02	0,14	7,18	0,98	0,83	0,29	<2	424	<2	30	92	49	17	<2	50	4	25	199	21	110	333	75
9,7	52,1	15,7	1,51	1,39	1,00	0,17	7,40	1,00	0,88	0,33	<2	421	<2	30	90	53	17	<2	49	4	25	210	21	107	361	75
10,3	54,7	16,0	1,76	1,46	1,08	0,18	7,80	1,09	0,90	0,29	<2	400	<2	29	88	47	17	<2	48	2	25	198	21	120	322	95
10,9	55,7	15,5	1,72	1,38	1,04	0,21	7,85	0,90	0,80	0,26	<2	410	<2	30	80	45	15	<2	48	7	24	184	20	100	333	75
11,5	50,4	16,1	1,62	1,37	1,03	0,23	8,18	0,90	0,79	0,24	<2	401	<2	31	88	46	15	<2	47	6	24	168	25	92	372	185
12,1	55,2	15,5	1,85	1,46	1,06	0,17	7,67	0,92	0,80	0,26	<2	376	<2	30	88	48	14	<2	44	5	24	148	24	84	358	95
13,3	52,1	16,2	1,80	1,47	1,06	0,22	8,50	0,90	0,81	0,26	<2	394	<2	32	88	46	14	<2	48	4	24	168	24	94	413	235
14,5	48,9	16,2	1,65	1,40	1,01	0,26	8,55	0,92	0,87	0,31	<2	443	<2	31	90	47	15	<2	45	9	25	194	26	110	428	80
15,7	50,9	15,4	1,76	1,43	1,02	0,20	7,90	0,98	0,87	0,32	<2	450	<2	30	82	45	16	<2	46	8	25	195	22	113	466	85
18,2	47,3	16,7	1,56	1,41	1,06	0,18	8,12	0,82	0,79	0,36	<2	402	<2	30	90	48	14	<2	47	8	25	196	26	110	509	105
20,6	50,0	15,9	1,58	1,35	1,04	0,20	8,12	0,98	0,83	0,38	<2	490	<2	32	89	57	15	<2	48	6	28	193	20	92	438	80
23,0	65,3	14,6	1,86	1,44	1,01	0,12	6,43	1,16	0,87	0,22	<2	400	<2	33	80	43	16	<2	49	4	25	194	12	94	183	78
24,2	62,3	13,3	1,74	1,29	0,96	0,11	5,81	1,25	0,88	0,20	<2	381	<2	30	84	43	16	<2	50	6	25	192	19	95	196	70
25,4	64,4	14,8	1,88	1,46	1,06	0,12	6,69	1,23	0,88	0,20	<2	388	<2	30	90	42	16	<2	51	4	25	190	23	92	233	90
27,8	62,9	15,7	1,89	1,54	1,11	0,18	7,93	1,10	0,94	0,25	<2	444	<2	32	98	48	16	<2	49	2	25	188	27	95	244	80
29,1	52,5	16,4	1,59	1,38	1,11	0,28	9,99	0,85	0,93	0,35	<2	486	<2	37	100	59	16	<2	53	4	28	206	33	104	253	85
30,3	55,2	16,6	1,70	1,46	1,12	0,24	10,35	0,95	0,96	0,27	<2	492	<2	35	95	52	15	<2	51	10	27	185	21	97	162	135
32,7	52,0	15,8	1,53	1,36	1,05	0,16	8,41	1,00	1,04	0,26	<2	520	<2	33	98	58	16	<2	56	2	28	192	23	100	199	70
35,1	52,6	15,8	1,53	1,36	1,04	0,12	7,72	1,00	1,01	0,25	<2	500	<2	32	98	55	16	<2	52	2	27	187	23	88	233	80
37,5	51,0	16,1	1,52	1,38	1,08	0,12	7,98	0,88	1,01	0,30	<2	428	<2	34	100	59	16	<2	53	4	29	210	29	97	355	85
39,9	43,0	17,0	1,25	1,22	1,07	0,15	8,82	0,73	0,95	0,40	<2	520	<2	37	102	62	16	<2	59	8	30	210	31	118	380	105
42,2	49,1	15,5	1,41	1,27	1,00	0,22	9,06	0,81	0,87	0,29	<2	456	<2	35	98	50	15	<2	52	8	25	195	30	102	200	70
44,8	52,7	17,0	1,56	1,43	1,15	0,12	8,05	1,00	1,00	0,29	<2	500	<2	33	104	52	15	<2	54	3	25	201	26	103	322	80
46,0	52,8	18,2	1,59	1,52	1,24	0,13	8,81	1,02	1,01	0,29	<2	508	<2	33	105	54	16	<2	57	9	27	204	29	102	255	90

Tabla C- 2. Datos geoquímicos del testigo 222G.

TESTIGO 222G																										
Profundidad [cm]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
	[%]										[ppm]															
0,6	44,0	16,0	1,41	1,26	0,96	0,22	8,77	0,68	0,90	0,33	<2	400	<2	30	94	53	15	<2	47	11	25	188	24	126	732	165
1,2	44,8	16,1	1,45	1,27	0,97	0,21	8,76	0,67	0,88	0,29	<2	387	<2	28	99	50	14	<2	48	14	25	178	26	107	733	149
1,7	44,3	16,0	1,41	1,25	0,96	0,21	8,75	0,67	0,87	0,32	<2	402	<2	29	92	54	15	<2	49	2	26	187	25	109	558	129
2,3	44,5	16,2	1,44	1,25	0,98	0,21	8,87	0,69	0,88	0,33	<2	406	<2	31	99	57	15	<2	46	8	26	195	25	115	675	114
2,9	44,3	16,0	1,41	1,26	0,97	0,21	8,80	0,68	0,87	0,32	<2	387	<2	30	98	56	16	<2	47	6	26	187	24	109	800	122
3,5	44,4	16,0	1,40	1,24	0,97	0,20	8,71	0,70	0,88	0,32	<2	414	<2	30	93	55	16	<2	45	9	26	187	26	108	723	135
4,1	44,5	16,3	1,39	1,25	0,98	0,21	8,86	0,69	0,87	0,32	<2	421	<2	31	96	56	16	<2	48	8	26	189	26	109	740	185
4,7	44,5	16,3	1,40	1,25	0,98	0,21	8,93	0,70	0,86	0,32	<2	426	<2	31	94	57	16	<2	49	11	26	189	25	112	843	245
5,2	44,2	16,2	1,35	1,28	0,97	0,20	8,83	0,70	0,86	0,32	<2	417	<2	29	87	52	16	<2	47	5	26	187	24	110	747	275
5,8	44,8	16,5	1,37	1,28	0,98	0,19	8,91	0,69	0,87	0,32	<2	427	<2	30	85	56	16	<2	46	6	26	187	23	107	708	275
6,4	44,9	16,6	1,39	1,28	1,00	0,20	9,08	0,69	0,88	0,30	<2	400	<2	28	82	52	15	<2	45	8	25	173	23	110	663	220
7,0	44,7	16,7	1,40	1,28	1,02	0,20	9,21	0,70	0,87	0,31	<2	408	<2	29	91	54	16	<2	48	13	25	182	26	120	782	180
7,6	44,9	16,4	1,33	1,25	0,95	0,19	8,80	0,71	0,88	0,39	<2	402	<2	30	83	58	16	<2	49	10	25	178	24	120	768	275
8,1	44,9	16,7	1,35	1,25	1,00	0,20	8,99	0,70	0,89	0,39	<2	400	<2	31	81	58	15	<2	48	9	25	183	23	121	777	209
8,7	43,7	16,2	1,34	1,15	0,98	0,19	9,26	0,72	0,90	0,39	<2	403	<2	32	95	57,3	12	<2	48	11	25	190	29	119	965	240
9,3	44,6	16,7	1,33	1,24	1,00	0,23	9,30	0,71	0,82	0,41	<2	383	<2	30	86	57	16	<2	48	14	25	178	24	118	1003	185
9,9	44,9	16,9	1,29	1,23	1,00	0,28	9,63	0,69	0,80	0,42	<2	380	<2	31	89	56	16	<2	48	7	25	184	26	120	722	158
10,5	44,6	16,7	1,34	1,23	0,99	0,29	9,45	0,70	0,82	0,40	<2	390	<2	30	79	58	16	<2	47	3	25	178	21	110	940	175
11,0	44,2	16,5	1,29	1,20	0,98	0,28	9,32	0,68	0,82	0,41	<2	395	<2	32	79	59	16	<2	47	10	25	185	22	118	763	160
11,6	44,6	16,6	1,35	1,20	0,98	0,25	9,25	0,70	0,83	0,40	<2	420	<2	32	80	58	16	<2	48	11	25	190	19	128	723	245
12,8	44,0	16,3	1,25	1,19	0,98	0,26	9,34	0,73	0,80	0,41	<2	420	<2	31	80	58	16	<2	49	11	26	187	24	125	871	250
14,0	44,9	16,6	1,28	1,19	0,99	0,29	9,65	0,67	0,80	0,43	<2	380	<2	31	85	58	16	<2	48	7	25	184	26	115	700	163
16,3	44,9	16,2	1,24	1,18	0,95	0,29	9,21	0,70	0,80	0,42	<2	380	<2	30	85	57	18	<2	48	12	25	189	24	120	912	188
18,6	46,2	16,5	1,30	1,20	0,98	0,29	9,27	0,72	0,80	0,43	<2	401	<2	30	84	57	18	<2	48	10	25	190	23	125	852	290
20,9	44,2	15,5	1,27	1,18	0,90	0,29	8,94	0,71	0,82	0,42	<2	420	<2	32	80	58	17	<2	50	9	26	190	21	127	682	290
23,3	44,9	15,4	1,16	1,12	0,91	0,21	8,60	0,68	0,79	0,46	<2	420	<2	31	80	58	17	<2	49	10	25	193	22	124	973	245
25,6	39,9	13,3	0,81	0,86	0,79	0,19	7,83	0,42	0,50	0,42	<2	280	<2	29	61	48	16	<2	38	8	25	172	19	100	1285	482
27,9	44,0	14,7	0,93	0,95	0,85	0,29	8,61	0,58	0,60	0,51	<2	344	<2	31	82	58	18	<2	46	14	25	196	26	113	888	231
30,2	44,7	14,8	0,92	0,94	0,85	0,29	8,61	0,54	0,60	0,48	<2	340	<2	30	83	56	18	<2	46	11	25	196	27	113	775	250
31,4	44,3	14,9	0,89	0,90	0,84	0,36	8,91	0,52	0,62	0,51	<2	354	<2	32	89	59	17	<2	48	10	25	202	28	114	700	269
32,6	37,4	12,1	0,76	0,76	0,74	0,24	7,58	0,38	0,42	0,37	<2	266	<2	26	67	46	16	<2	37	13	19	166	20	85	612	245
33,7	43,5	15,0	0,81	0,85	0,80	0,26	8,04	0,50	0,60	0,50	<2	355	<2	30	71	112	16	<2	54	16	25	202	23	113	817	275
34,9	44,6	15,0	0,86	0,90	0,86	0,30	8,69	0,50	0,61	0,49	<2	378	<2	31	80	59	17	<2	46	14	26	205	23	107	740	200
37,2	45,6	15,1	0,88	0,91	0,85	0,30	8,86	0,50	0,60	0,48	<2	362	<2	33	82	58	17	<2	45	6	25	207	23	107	850	185
39,5	42,3	15,0	0,88	0,92	0,88	0,28	8,59	0,47	0,59	0,44	<2	360	<2	31	80	58	17	<2	45	8	25	199	25	103	738	270
40,7	44,3	15,6	0,92	0,94	0,90	0,30	8,84	0,47	0,59	0,45	<2	368	<2	30	79	57	16	<2	45	15	25	199	25	105	717	300

Tabla C- 3. Datos geoquímicos del testigo 223G.

TESTIGO 223G																										
Profundidad [cm]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
	[%]										[ppm]															
0,7	47,4	17,0	1,10	1,21	1,01	0,22	9,10	0,73	1,05	0,30	<2	454	<2	30	89	53	17	<2	54	22	26	196	26	110	693	181
1,3	47,9	16,5	1,11	1,16	1,01	0,21	8,74	0,78	1,02	0,29	<2	441	<2	28	100	50	17	<2	55	14	26	193	25	100	562	150
2,0	46,4	16,5	1,00	1,10	1,00	0,22	8,85	0,75	1,04	0,30	<2	442	<2	29	92	52	16	<2	55	12	26	197	24	100	500	375
2,7	47,0	16,7	1,00	1,14	1,03	0,23	9,01	0,79	1,08	0,30	<2	456	<2	30	89	53	17	<2	55	9	26	198	24	102	448	205
3,4	48,3	17,0	0,96	1,13	1,03	0,23	9,10	0,72	1,07	0,30	<2	448	<2	31	93	53	17	<2	54	8	27	194	24	103	483	195
4,0	46,5	16,9	0,93	1,10	1,02	0,23	8,94	0,72	1,05	0,30	<2	440	<2	30	91	53	16	<2	54	14	26	199	24	100	490	195
4,7	47,9	16,9	0,95	1,13	1,03	0,23	9,01	0,78	1,06	0,30	<2	449	<2	30	98	53	16	<2	56	11	26	201	24	103	358	225
5,4	47,3	16,5	0,92	1,09	1,00	0,22	8,83	0,79	1,08	0,31	<2	455	<2	30	91	54	16	<2	54	7	27	206	22	103	457	215
6,0	48,8	16,5	0,92	1,08	1,01	0,21	8,68	0,78	1,08	0,29	<2	470	<2	31	92	50	16	<2	55	14	26	198	21	100	490	250
6,7	48,6	16,7	0,95	1,10	1,02	0,21	8,72	0,79	1,09	0,31	<2	475	<2	31	85	52	16	<2	54	14	27	205	22	103	385	280
7,4	48,3	16,8	0,92	1,09	1,01	0,19	8,54	0,78	1,06	0,30	<2	470	<2	31	101	52	17	<2	55	11	27	196	23	100	590	205
8,0	48,9	17,0	0,94	1,08	1,01	0,22	8,74	0,75	1,06	0,31	<2	470	<2	30	90	52	17	<2	54	6	27	200	20	101	688	345
8,7	48,7	16,8	0,91	1,07	1,00	0,20	8,48	0,76	1,08	0,31	<2	483	<2	32	106	53	17	<2	53	12	27	204	26	100	592	335
9,4	46,0	17,2	0,89	1,07	1,03	0,27	9,16	0,66	0,98	0,37	<2	465	<2	34	106	57	17	<2	57	10	29	209	25	107	592	190
10,1	46,2	17,2	0,89	1,08	1,01	0,26	8,91	0,76	1,06	0,29	<2	481	<2	31	104	51	16	<2	56	12	27	197	25	99	618	410
10,7	46,4	17,1	0,92	1,07	1,03	0,25	9,08	0,69	1,00	0,25	<2	457	<2	33	106	55	16	<2	55	10	29	202	25	104	623	375
11,4	45,3	16,4	0,91	1,03	1,03	0,25	8,84	0,73	1,02	0,34	<2	457	<2	34	99	55	17	<2	54	11	28	197	25	104	635	450
12,1	45,2	18,5	0,89	1,09	1,12	0,27	9,95	0,69	1,05	0,35	<2	473	<2	35	111	57	17	<2	54	11	30	206	27	104	667	395
12,7	44,3	17,5	1,01	1,05	1,07	0,27	9,97	0,66	0,93	0,39	<2	486	<2	34	109	59	13	<2	53	9	30	210	25	102,6	743,5	475
13,4	46,2	18,1	0,89	1,10	1,16	0,29	10,50	0,68	1,10	0,37	<2	507	<2	36	111	62	17	<2	56	7	32	221	27	110	455	255
14,7	44,3	17,8	0,81	1,05	1,04	0,29	9,66	0,68	1,07	0,38	<2	500	<2	36	111	62	17	<2	56	7	32	211	26	110	560	220
16,1	45,1	18,2	0,83	1,09	1,05	0,27	9,66	0,70	1,04	0,40	<2	500	<2	37	102	61	17	<2	55	6	32	211	26	114	518	415
17,4	44,3	17,6	0,83	1,09	1,05	0,28	9,55	0,71	1,05	0,39	<2	497	<2	36	107	62	17	<2	55	12	32	213	25	113	492	460
18,8	43,7	17,6	0,84	1,06	1,02	0,28	9,30	0,72	1,03	0,40	<2	489	<2	36	105	61	17	<2	53	12	32	209	26	112	510	335
20,1	43,6	17,1	0,79	1,05	1,00	0,24	8,92	0,70	1,03	0,40	<2	490	<2	36	104	64	17	<2	55	9	30	223	25	115	792	320
21,4	45,5	17,3	0,81	1,05	1,04	0,26	9,10	0,72	1,13	0,40	<2	519	<2	36	105	64	17	<2	55	11	31	220	26	110	558	315
22,8	47,6	17,8	0,79	1,04	1,06	0,28	9,73	0,73	1,17	0,37	<2	528	<2	37	115	59	17	<2	55	8	31	216	26	110	709	435
24,1	47,0	17,7	0,78	1,05	1,06	0,28	9,69	0,71	1,11	0,37	<2	512	<2	37	106	59	17	<2	56	14	30	208	25	108	583	345
25,5	45,4	16,9	0,79	1,03	0,99	0,30	9,39	0,66	0,93	0,40	<2	432	<2	35	97	58	16	<2	50	8	29	200	21	108	473	263
26,8	45,1	16,7	0,80	1,02	0,98	0,31	9,14	0,64	0,89	0,41	<2	422	<2	34	83	56	16	<2	53	3	28	207	19	108	483	460
28,1	45,0	17,3	0,84	1,03	1,01	0,31	9,67	0,64	0,95	0,40	<2	434	<2	34	98	57	16	<2	54	7	30	205	26	103	611	327
29,5	44,2	17,6	0,80	1,02	1,05	0,31	10,11	0,62	0,98	0,39	<2	489	<2	35	98	57	16	<2	52	7	30	201	27	105	550	540
30,8	43,2	17,0	0,91	1,00	1,03	0,26	9,85	0,65	0,97	0,38	<2	451	<2	36	102	56	16	<2	48	8	29	202	26	103	670	280
32,2	43,3	17,4	0,82	1,01	1,03	0,29	9,73	0,61	0,91	0,39	<2	421	<2	33	98	56	16	<2	51	10	29	197	26	102	598	220
33,5	44,0	17,7	0,82	1,02	1,03	0,29	9,92	0,63	0,91	0,37	<2	426	<2	34	108	56	16	<2	47	5	30	198	26	100	555	423

Tabla C- 4. Datos geoquímicos del testigo 213G.

TESTIGO 213G																										
Profundidad [cm]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
	[%]										[ppm]															
0,5	44,0	17,5	0,68	0,89	0,99	0,36	10,20	0,47	1,15	0,30	<2	440	<2	43	98	42	17	<2	49	2	25	174	28	120	262	245
1,1	43,1	17,5	0,66	0,88	0,99	0,37	10,38	0,48	1,15	0,31	<2	461	<2	44	95	44	17	<2	48	12	26	181	28	120	223	85
1,6	43,1	17,4	0,64	0,87	0,98	0,35	10,16	0,48	1,14	0,31	<2	461	<2	44	98	43	18	<2	48	12	25	177	28	118	268	135
2,2	43,0	17,4	0,62	0,87	0,99	0,33	10,20	0,51	1,14	0,31	<2	457	<2	45	96	44	17	<2	49	10	25	179	29	118	145	140
2,7	43,8	17,9	0,62	0,86	1,02	0,34	10,45	0,52	1,17	0,32	<2	469	<2	44	90	44	17	<2	50	14	25	186	28	122	107	140
3,3	43,1	17,3	0,59	0,80	0,96	0,30	9,68	0,53	1,20	0,32	<2	477	<2	44	91	45	17	<2	51	14	25	188	26	122	266	85
3,8	43,3	17,8	0,62	0,80	0,98	0,35	10,17	0,47	1,17	0,32	<2	468	<2	45	96	44	16	<2	49	9	25	182	27	118	280	120
4,4	42,5	17,6	0,58	0,79	0,96	0,34	10,04	0,47	1,11	0,32	<2	456	<2	44	90	44	17	<2	49	11	25	180	27	120	260	85
4,9	41,6	17,3	0,56	0,78	0,95	0,34	9,87	0,46	1,13	0,32	<2	457	<2	44	96	44	16	<2	48	12	25	181	30	118	282	85
5,4	41,2	17,4	0,59	0,78	0,95	0,37	9,78	0,50	1,14	0,33	<2	468	<2	45	93	46	17	<2	50	12	25	186	29	120	323	87
6,0	43,7	18,5	0,61	0,78	1,02	0,42	10,50	0,51	1,09	0,34	<2	460	<2	45	93	46	17	<2	50	14	25	181	28	120	150	110
6,5	41,8	18,2	0,60	0,75	1,00	0,46	10,53	0,54	1,08	0,35	<2	464	<2	47	94	49	15	<2	53	9	27	192	29	125	142	190
7,1	39,7	17,4	0,52	0,76	0,92	0,42	9,55	0,46	1,09	0,36	<2	469	<2	49	95	48	17	<2	54	6	26	194	29	132	280	114
7,6	39,0	17,1	0,52	0,75	0,93	0,45	9,67	0,45	1,09	0,36	<2	446	<2	45	97	46	17	<2	49	10	26	183	29	129	272	110
8,2	39,0	17,8	0,54	0,75	0,95	0,47	9,88	0,45	1,08	0,36	<2	466	<2	47	92	48	17	<2	51	7	26	189	29	132	450	150
8,7	39,4	18,6	0,59	0,74	1,00	0,53	10,35	0,45	1,07	0,38	<2	464	<2	49	95	48	17	<2	52	7	27	189	29	130	498	105
9,2	39,6	18,9	0,59	0,77	1,01	0,47	10,25	0,48	1,09	0,37	<2	451	<2	46	96	48	17	<2	50	10	26	183	30	127	533	150
9,8	39,0	18,4	0,72	0,75	1,00	0,43	10,13	0,48	1,08	0,37	<2	445	<2	46	96	49	17	<2	52	7	27	183	30	128	327	123
10,3	39,2	18,5	0,71	0,78	1,01	0,42	10,11	0,47	1,09	0,37	<2	442	<2	46	92	47	18	<2	51	13	27	181	30	128	313	85
10,9	40,1	18,6	0,73	0,77	1,02	0,44	10,27	0,48	1,07	0,38	<2	452	<2	47	93	49	17	<2	52	11	27	186	30	130	361	145
12,0	40,0	18,7	0,73	0,76	1,03	0,46	10,37	0,47	1,05	0,39	<2	448	<2	53	92	49	17	<2	54	9	27	189	29	130	331	83
13,1	40,1	18,5	0,73	0,75	1,02	0,55	10,76	0,48	1,06	0,40	<2	451	<2	54	95	49	19	<2	53	8	27	191	28	130	282	120
14,1	40,3	18,5	0,72	0,75	1,02	0,60	10,95	0,49	1,05	0,41	<2	440	<2	56	96	54	18	<2	55	12	28	191	29	129	365	114
15,2	40,5	18,5	0,70	0,75	1,00	0,65	11,13	0,49	1,02	0,42	<2	440	<2	56	92	49	17	<2	52	5	27	191	29	128	300	114
16,3	40,2	18,0	0,69	0,75	0,99	0,71	11,07	0,42	1,01	0,44	<2	447	<2	50	92	48	17	<2	53	14	27	195	29	132	328	95
18,5	39,3	17,9	0,65	0,73	0,94	0,59	10,02	0,40	1,00	0,44	<2	451	<2	51	90	50	18	<2	50	14	27	194	29	130	650	155
20,7	38,5	18,7	0,71	0,75	1,00	0,60	10,45	0,47	1,00	0,42	<2	465	<2	52	90	49	18	<2	51	10	27	189	31	130	592	144
22,8	40,2	18,0	0,71	0,77	0,96	0,80	10,90	0,40	0,90	0,42	<2	438	<2	53	88	48	17	<2	52	11	27	190	29	128	480	177
25,0	37,4	18,0	0,66	0,74	0,95	0,95	11,17	0,40	0,92	0,43	<2	460	<2	54	89	49	15	<2	50	11	27	190	29	132	578	170
27,2	37,5	18,4	0,67	0,71	0,97	0,98	11,12	0,48	1,00	0,43	<2	477	<2	55	90	52	19	<2	52	11	28	196	30	130	450	150
29,4	36,7	17,8	0,63	0,70	0,94	0,78	10,57	0,40	1,00	0,41	<2	457	<2	51	88	48	17	<2	50	11	27	188	30	132	548	115
31,5	35,6	17,2	0,69	0,71	0,93	0,75	10,39	0,45	1,02	0,41	<2	453	<2	51	87	51	19	<2	52	12	27	187	30	130	563	140
33,7	36,2	16,7	0,55	0,70	0,87	0,66	9,88	0,39	0,92	0,38	<2	418	<2	50	85	50	16	<2	48	12	25	173	28	124	557	204
35,9	37,0	16,6	0,53	0,82	0,86	0,64	9,82	0,35	0,85	0,37	<2	387	<2	47	79	52	15	<2	48	14	25	166	28	115	588	217
38,1	39,2	16,3	0,54	0,70	0,85	0,55	9,61	0,40	0,90	0,39	<2	400	<2	53	75	51	15	<2	45	13	25	181	27	118	580	195
40,2	41,0	16,3	0,47	0,70	0,89	0,50	9,85	0,42	0,89	0,38	<2	395	<2	53	77	53	16	<2	48	7	25	171	27	114	800	250
42,4	40,2	17,6	0,48	0,72	0,91	0,65	10,42	0,43	0,92	0,38	<2	413	<2	57	82	54	16	<2	47	17	25	177	28	122	648	215
43,5	37,6	17,0	0,50	0,72	0,86	0,77	10,44	0,40	0,85	0,36	<2	404	<2	49	75	50	16	<2	51	12	25	192	28	112	508	165

Anexo D: Matrices de correlación de los elementos mayores y trazas.

Tabla D- 1. Matrices de correlación de los elementos mayores y trazas de los sedimentos del testigo 221G. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 221G																								
	Si	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	Fe	Na	K	P	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl	
Si	1																							
Al	-0,64	1																						
Ca	0,76	-0,43	1																					
Mg	0,37	0,25	0,69	1																				
Ti	-0,15	0,79	-0,01	0,55	1																			
Mn	-0,38	0,29	0,00	0,10	0,08	1																		
Fe	-0,57	0,73	-0,31	0,14	0,60	0,70	1																	
Na	0,79	-0,53	0,52	0,21	-0,20	-0,54	-0,69	1																
K	-0,14	0,47	-0,35	0,01	0,56	-0,24	0,32	0,07	1															
P	-0,76	0,64	-0,65	-0,28	0,24	0,29	0,44	-0,52	0,273	1														
Ba	-0,49	0,67	-0,57	-0,15	0,54	0,11	0,59	-0,30	0,783	0,61	1													
Co	-0,33	0,51	-0,38	-0,10	0,52	0,27	0,69	-0,46	0,581	0,38	0,70	1												
Cr	-0,42	0,70	-0,57	-0,06	0,65	-0,04	0,53	-0,30	0,787	0,49	0,78	0,63	1											
Cu	-0,60	0,66	-0,67	-0,26	0,44	0,10	0,52	-0,42	0,697	0,78	0,84	0,66	0,79	1										
Li	0,11	0,00	-0,23	-0,22	-0,06	-0,31	-0,26	0,40	0,448	0,28	0,27	-0,08	0,27	0,36	1									
Ni	-0,31	0,56	-0,50	-0,15	0,59	-0,16	0,41	-0,19	0,800	0,41	0,78	0,75	0,77	0,76	0,31	1								
Pb	-0,32	0,26	-0,36	-0,27	0,04	0,19	0,16	-0,10	0,073	0,43	0,26	0,13	0,16	0,25	0,12	0,12	1							
Sc	-0,46	0,57	-0,55	-0,21	0,42	0,02	0,44	-0,24	0,716	0,68	0,79	0,66	0,68	0,90	0,41	0,80	0,26	1						
V	-0,34	0,48	-0,49	-0,14	0,34	-0,03	0,24	-0,11	0,627	0,67	0,65	0,48	0,58	0,72	0,56	0,72	0,25	0,77	1					
Y	-0,55	0,58	-0,43	-0,04	0,48	0,32	0,64	-0,64	0,304	0,39	0,39	0,53	0,68	0,46	-0,15	0,43	-0,02	0,35	0,25	1				
Zn	-0,47	0,44	-0,40	-0,18	0,16	0,13	0,19	-0,16	0,311	0,72	0,41	0,14	0,34	0,47	0,54	0,40	0,39	0,47	0,70	0,18	1			
S	-0,59	0,35	-0,29	-0,13	-0,05	0,18	0,01	-0,32	-0,147	0,70	0,10	-0,16	0,04	0,31	0,10	-0,08	0,41	0,19	0,24	0,11	0,55	1		
Cl	-0,13	0,21	0,12	0,17	0,18	0,30	0,22	-0,18	-0,16	-0,01	-0,10	0,06	-0,02	-0,04	-0,20	-0,06	0,21	-0,11	-0,26	0,04	0,03	0,26	1	

Tabla D- 2. Matrices de correlación de los elementos mayores y trazas de los sedimentos del testigo 222G. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 222G																							
	Si	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	Fe	Na	K	P	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
Si	1																						
Al	0,80	1																					
Ca	0,51	0,82	1																				
Mg	0,57	0,87	0,99	1																			
Ti	0,65	0,95	0,92	0,94	1																		
Mn	0,14	-0,18	-0,53	-0,50	-0,35	1																	
Fe	0,72	0,86	0,61	0,65	0,81	0,20	1																
Na	0,64	0,87	0,93	0,94	0,90	-0,36	0,72	1															
K	0,60	0,86	0,97	0,97	0,92	-0,51	0,63	0,95	1														
P	-0,01	-0,38	-0,76	-0,72	-0,58	0,76	-0,09	-0,51	-0,67	1													
Ba	0,73	0,84	0,79	0,82	0,81	-0,28	0,64	0,85	0,87	-0,43	1												
Co	0,48	0,30	-0,01	0,01	0,14	0,41	0,45	0,19	0,11	0,46	0,36	1											
Cr	0,54	0,58	0,69	0,64	0,63	-0,25	0,44	0,59	0,70	-0,54	0,60	0,15	1										
Cu	0,13	0,01	-0,27	-0,26	-0,22	0,20	-0,14	-0,13	-0,15	0,41	0,01	0,22	-0,21	1									
Li	0,10	-0,26	-0,45	-0,37	-0,37	0,60	-0,10	-0,27	-0,46	0,56	-0,22	0,15	-0,35	0,08	1								
Ni	0,71	0,64	0,40	0,43	0,45	0,10	0,49	0,57	0,52	0,07	0,67	0,43	0,39	0,58	-0,02	1							
Pb	-0,14	-0,25	-0,35	-0,37	-0,31	0,17	-0,24	-0,27	-0,33	0,33	-0,24	-0,09	-0,18	0,31	0,10	0,07	1						
Sc	0,70	0,61	0,43	0,48	0,50	-0,08	0,44	0,50	0,53	-0,12	0,67	0,50	0,46	0,14	-0,01	0,56	-0,28	1					
V	0,39	-0,04	-0,37	-0,36	-0,24	0,53	0,02	-0,24	-0,24	0,56	0,13	0,66	0,13	0,44	0,35	0,37	0,15	0,41	1				
Y	0,36	0,26	0,15	0,14	0,24	0,07	0,29	0,16	0,21	-0,04	0,18	0,16	0,68	0,00	-0,18	0,31	0,08	0,29	0,32	1			
Zn	0,64	0,64	0,47	0,51	0,54	0,07	0,63	0,69	0,57	0,10	0,63	0,53	0,26	0,16	0,03	0,70	0,08	0,45	0,17	0,07	1		
S	-0,12	-0,14	-0,19	-0,16	-0,14	-0,10	-0,07	-0,06	-0,17	0,29	-0,24	0,13	-0,34	0,03	0,08	-0,15	0,12	0,09	-0,11	-0,22	0,09	1	
Cl	-0,41	-0,47	-0,52	-0,48	-0,51	0,04	-0,43	-0,44	-0,50	0,36	-0,38	-0,06	-0,68	0,06	0,22	-0,30	0,17	-0,13	-0,03	-0,36	-0,13	0,47	1

Tabla D- 3. Matrices de correlación de los elementos mayores y trazas de los sedimentos del testigo 223G. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 223G																							
	Si	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	Fe	Na	K	P	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
Si	1																						
Al	-0,45	1																					
Ca	0,50	-0,49	1																				
Mg	0,61	-0,22	0,76	1																			
Ti	-0,17	0,75	-0,11	0,01	1																		
Mn	-0,73	0,62	-0,69	-0,63	0,34	1																	
Fe	-0,62	0,80	-0,42	-0,39	0,72	0,80	1																
Na	0,77	-0,50	0,53	0,65	-0,23	-0,83	-0,74	1															
K	0,58	0,05	0,11	0,45	0,26	-0,46	-0,26	0,71	1														
P	-0,75	0,54	-0,71	-0,64	0,22	0,79	0,64	-0,71	-0,37	1													
Ba	0,03	0,52	-0,31	-0,03	0,50	0,08	0,23	0,16	0,67	0,24	1												
Co	-0,64	0,71	-0,78	-0,63	0,46	0,74	0,68	-0,61	-0,07	0,82	0,55	1											
Cr	-0,37	0,69	-0,38	-0,31	0,59	0,38	0,53	-0,30	0,13	0,35	0,58	0,64	1										
Cu	-0,65	0,66	-0,66	-0,42	0,44	0,64	0,60	-0,51	0,00	0,81	0,56	0,88	0,59	1									
Li	0,22	0,10	-0,16	0,26	0,04	-0,14	-0,20	0,26	0,50	-0,07	0,25	0,11	0,08	0,11	1								
Ni	0,43	0,00	0,17	0,49	0,17	-0,27	-0,30	0,50	0,62	-0,30	0,46	-0,14	0,07	0,03	0,31	1							
Pb	0,35	-0,25	0,52	0,59	-0,10	-0,51	-0,38	0,46	0,35	-0,46	0,06	-0,37	-0,13	-0,32	0,13	0,28	1						
Sc	-0,66	0,81	-0,69	-0,50	0,54	0,74	0,73	-0,58	-0,06	0,78	0,56	0,92	0,71	0,91	0,09	-0,06	-0,40	1					
V	-0,33	0,53	-0,53	-0,27	0,44	0,39	0,390	-0,22	0,264	0,61	0,70	0,72	0,51	0,86	0,11	0,28	-0,27	0,74	1				
Y	-0,44	0,61	-0,10	-0,05	0,56	0,30	0,55	-0,33	0,10	0,25	0,37	0,43	0,69	0,43	0,15	-0,01	0,14	0,51	0,27	1			
Zn	-0,41	0,49	-0,48	-0,08	0,25	0,45	0,36	-0,27	0,14	0,63	0,54	0,72	0,32	0,84	0,34	0,21	-0,09	0,71	0,75	0,24	1		
S	-0,27	0,22	-0,04	-0,25	0,06	0,08	0,14	-0,29	-0,12	0,18	0,21	0,27	0,41	0,21	-0,08	-0,09	0,04	0,21	0,17	0,33	0,11	1	
Cl	-0,39	0,36	-0,43	-0,51	0,18	0,48	0,36	-0,36	-0,21	0,39	0,29	0,48	0,28	0,31	-0,27	-0,189	-0,35	0,44	0,26	0,14	0,18	0,87	1

Tabla D- 4. Matrices de correlación de los elementos mayores y trazas de los sedimentos del testigo 213G. En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral $\alpha = 0,050$ (prueba bilateral).

TESTIGO 213G																							
	Si	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	Fe	Na	K	P	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Pb	Sc	V	Y	Zn	S	Cl
Si	1																						
Al	0,09	1																					
Ca	0,03	0,65	1																				
Mg	0,72	0,28	0,18	1																			
Ti	0,47	0,62	0,72	0,40	1																		
Mn	-0,74	-0,15	0,12	-0,62	-0,32	1																	
Fe	0,05	0,97	0,68	0,26	0,57	0,01	1																
Na	0,40	0,88	0,54	0,46	0,71	-0,44	0,83	1															
K	0,39	0,89	0,47	0,52	0,62	-0,50	0,83	0,95	1														
P	-0,39	0,80	0,63	-0,21	0,31	0,37	0,84	0,50	0,49	1													
Ba	0,33	0,64	0,39	0,29	0,65	-0,25	0,59	0,76	0,76	0,34	1												
Co	-0,53	-0,23	0,15	-0,68	-0,16	0,74	-0,13	-0,42	-0,54	0,29	-0,33	1											
Cr	0,45	0,69	0,47	0,50	0,77	-0,47	0,61	0,78	0,81	0,29	0,75	-0,42	1										
Cu	-0,67	-0,37	-0,09	-0,76	-0,36	0,65	-0,33	-0,54	-0,66	0,13	-0,53	0,81	-0,59	1									
Li	-0,05	0,34	0,55	0,05	0,46	0,04	0,31	0,34	0,33	0,33	0,44	0,11	0,41	-0,6	1								
Ni	-0,15	0,38	0,56	-0,18	0,54	0,19	0,36	0,34	0,23	0,45	0,40	0,27	0,37	0,20	0,44	1							
Pb	-0,08	-0,17	-0,15	-0,07	-0,23	0,14	-0,14	-0,19	-0,19	-0,06	-0,14	0,02	-0,35	0,17	-0,05	-0,29	1						
Sc	-0,45	0,45	0,69	-0,39	0,44	0,52	0,48	0,23	0,14	0,72	0,27	0,54	0,25	0,41	0,48	0,72	-0,17	1					
V	-0,18	0,32	0,39	-0,34	0,34	0,36	0,33	0,27	0,18	0,49	0,53	0,35	0,22	0,14	0,36	0,73	-0,08	0,67	1				
Y	-0,46	0,39	0,44	-0,22	0,33	0,30	0,36	0,22	0,18	0,50	0,28	0,16	0,31	0,17	0,35	0,42	-0,12	0,65	0,38	1			
Zn	-0,43	0,54	0,52	-0,37	0,40	0,37	0,53	0,32	0,30	0,75	0,44	0,39	0,37	0,24	0,44	0,65	-0,19	0,83	0,65	0,61	1		
S	-0,68	-0,47	-0,27	-0,65	-0,59	0,60	-0,44	-0,73	-0,70	0,02	-0,55	0,59	-0,67	0,70	-0,12	-0,23	0,12	0,14	-0,12	0,10	0,08	1	
Cl	-0,19	-0,51	-0,34	-0,15	-0,50	0,30	-0,44	-0,56	-0,60	-0,29	-0,63	0,26	-0,55	0,41	-0,41	-0,39	-0,12	-0,25	-0,43	-0,20	-0,30	0,53	1

Anexo E: Valores geoquímicos de referencia y concentraciones promedios de los elementos trazas fluvio-estuarinos analizados.

Tabla E- 1. Valores geoquímicos de referencia y concentraciones promedios de los elementos trazas en los sedimentos fluvio-estuarinos analizados. ¹ valores promedios según Turekian & Wedepohl (1961); ² valores promedios según el estudio de Díaz *et al.*, (1988); ³ valores de referencia recolectados por Callender (2003); * concentraciones promedios con los valores máximos obtenidos entre paréntesis.

Elemento	Litología				Material sedimentario			Criterio de calidad		Testigo			
	Lutita ¹	Arenisca ¹	Roca basáltica ¹	Esquistos de Bahía Mansa ²	Barro fluvial ³	Sedimentos estuarinos ³	Materia particulada en ríos ³	USA/EPA	Canada/OME	221G	222G	223G	213G
	[ppm]									[ppm]*			
Zn	95	16	105	112	78	136	250	90-200	100	104 (126)	114 (128)	105 (115)	125 (132)
Ba	500	10	330	547	-	-	-	-	-	445 (530)	386 (427)	468 (528)	448 (477)
Co	19	0.1	48	30	-	-	-	25-75	25	32 (37)	30 (33)	33 (37)	49 (57)
Cr	90	11	170	167	85	94	100	25-50	25	93 (105)	85 (99)	100 (115)	91 (98)
Cu	45	4	87	41	32	52	100	25-50	25	51 (66)	58 (112)	56 (64)	48 (54)
Li	66	5	17	-	-	-	-	-	-	16 (18)	16 (18)	16 (17)	17 (19)
Ni	68	20	130	84	32	35	90	20-50	25	50 (59)	47 (54)	54 (57)	50 (55)
Pb	20	9	6	10	23	54	68	40-60	50	7 (15)	10 (16)	10 (22)	11 (17)
Sc	13	1	30	-	-	-	-	-	-	26 (31)	25 (26)	29 (32)	26 (28)
V	130	20	250	162	-	-	-	-	-	193 (236)	188 (207)	204 (223)	185 (196)
Y	26	30	21	31	-	-	-	-	-	24 (33)	24 (29)	25 (27)	29 (31)
S	2400	240	300	-	-	-	-	-	-	344 (509)	791 (1285)	564 (792)	392 (800)
Cl	180	150	60	-	-	-	-	-	-	99 (235)	222 (482)	316 (540)	140 (250)