



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CORRELACIONES ENTRE ESPECTROMETRÍA DE
REFLECTANCIA, GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE
SEDIMENTOS FLUVIALES DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI,
IV REGIÓN, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

PABLO ROBINSON GÓMEZ SÁNCHEZ

PROFESOR GUÍA:

JUAN PABLO LACASSIE REYES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FRANCISCO HERVÉ ALLAMAND

JAVIER RUIZ DEL SOLAR SAN MARTÍN

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

POR: Pablo R. Gómez Sánchez

FECHA: Diciembre de 2014

PROFESOR GUÍA: Juan Pablo Lacassie Reyes

CORRELACIONES ENTRE ESPECTROMETRÍA DE REFLECTANCIA, GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE SEDIMENTOS FLUVIALES DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI, IV REGIÓN, CHILE

El objetivo de este trabajo es establecer correlaciones entre composición geoquímica, composición mineral y características espectrales de muestras de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región, Chile.

Para lo anterior se obtienen datos de espectrometría de reflectancia, en el rango visible-infrarrojo cercano (350-2500 nm), desde ochenta muestras de sedimento, distribuidas a lo largo de las principales redes de drenaje de la cuenca.

La medición se efectúa en condiciones de laboratorio, utilizando distintas fracciones granulométricas obtenidas a partir del tamizaje de las muestras. El conjunto de datos espectrales es analizado utilizando redes neuronales artificiales (RNA). Como resultado de este análisis se identifican seis grupos de muestras, cada uno con características espectrales distintivas. La proyección geográfica de estos resultados indica que, en términos generales, es posible identificar patrones espectrales específicos para los afluentes principales dentro de la cuenca.

En particular, en el río Turbio y sus afluentes, se observa una marcada coincidencia entre las distribuciones geográficas de los patrones espectrales y geoquímicos, caracterizados por presentar altos valores de Arsénico (As). Concordantemente, el estudio mineralógico de los sedimentos de este sector indica la presencia de Arsenolita (As_2O_3) como mineral característico.

Por otra parte, se han desarrollado modelos de regresión que permiten conocer la concentración química de ciertos elementos, con cierto margen de error, por medio del uso de RNA o de mínimos cuadrados parciales, sobre datos de reflectancia. En este caso se ha usado la fracción granulométrica $< 180 \mu\text{m}$ y los datos espectrales se han estandarizado por medio de su primera derivada. El mejor resultado corresponde a Uranio, con una precisión estadística R^2 de ~ 0.83 y un error cuadrático medio igual a ~ 0.01 , sobre diez muestras de validación.

La conjunción de estos resultados con el uso de sensores remotos, permite plantear las bases de una nueva metodología de exploración geoquímica, mediante la cual sería posible estudiar y caracterizar sedimentos en términos espectrales, geoquímicos y mineralógicos, in situ, con bajos costos en tiempo y capital.

AGRADECIMIENTOS

A mi Familia, a mis Abuelitas, a la Pauli, a los Animalitos, a mis Amigos y Compañeros de la U, de geo y de la vida.

A Juan Pablo Lacassie, por todo el conocimiento, paciencia y buena onda dispensados a lo largo de la memoria, fundamento de todo este trabajo.

A los profesores Francisco Hervé, por toda la sabiduría entregada a lo largo de la carrera, y Javier Ruíz Del Solar, por las valiosas palabras aportadas a lo largo de este estudio.

Al SERNAGEOMIN, por apoyar esta investigación y mi trabajo como memorista durante ocho buenos meses.

Y Finalmente a todos los que de algún modo u otro fueron parte de este estudio, en especial al equipo técnico de bodega y molienda del servicio.

¡Muchas gracias a todos!

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	2
1.4. MARCO TEÓRICO	3
1.4.1. ESPECTROSCOPIA Y ESPECTROMETRIA DE REFLECTANCIA	3
1.4.2. DIFRACCION DE RAYOS X	5
1.4.3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES	6
1.4.4. REGRESION DE MINIMOS CUADRADOS PARCIALES	8
1.4.5. QUIMIOMETRIA	10
2. AREA DE ESTUDIO	12
2.1. CONTEXTO REGIONAL	12
2.2. HIDROGRAFIA	13
2.3. GEOMORFOLOGIA	15
2.4. GEOLOGIA	17
2.4.1. UNIDADES GEOLÓGICAS	19
2.4.2. ESTRUCTURAS PRINCIPALES	26
2.5. MINERALIZACION	28
3. METODOLOGIA	38
3.1. MEDICION DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA	38
3.1.1. CONTROL DE CALIDAD DE DATOS	41
3.2. ESTANDARIZACION DE LOS ESPECTROS	41
3.3. APLICACION DE RNA	43
3.4. MINERALOGIA DRX	44
3.5. MINERALOGIA REFLECTANCIA VIC	44
3.6. IMAGENES SATELITALES	46
3.7. MODELO QUIMIOMETRICO	47
3.7.1. REGRESION MCP	47
3.7.2. RNA	49

4.	RESULTADOS.....	51
4.1.	ESPECTROS DE REFLECTANCIA.....	51
4.2.	ESTANDARIZACIÓN DE LOS ESPECTROS.....	52
4.3.	CLASIFICACIÓN RNA.....	52
4.4.	MINERALOGÍA DRX.....	57
4.5.	MINERALOGÍA REFLECTANCIA VIC.....	57
4.6.	IMÁGENES SATELITALES.....	61
4.7.	MODELO QUIMIOMÉTRICO.....	64
4.7.1.	REGRESIÓN MCP.....	64
4.7.2.	RNA.....	67
5.	DISCUSIONES.....	71
5.1.	ESPECTROS DE REFLECTANCIA.....	71
5.2.	ESTANDARIZACIÓN DE LOS ESPECTROS Y RESULTADOS DE LA RNA...71	71
5.3.	CLASIFICACIÓN RNA.....	72
5.3.1.	CORRELACIÓN CON CLASIFICACIÓN RNA GEOQUÍMICA.....	73
5.4.	MINERALOGÍA DRX.....	74
5.5.	MINERALOGÍA REFLECTANCIA VIC.....	75
5.6.	MINERALOGÍA DRX- REFLECTANCIA VIC.....	76
5.6.1.	SITUACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA DEL ELQUI.....	78
5.7.	IMÁGENES SATELITALES.....	79
5.8.	MODELO QUIMIOMÉTRICO.....	84
5.8.1.	REGRESIÓN MCP.....	84
5.8.2.	RNA.....	86
5.8.3.	OTRAS CONSIDERACIONES.....	87
5.9.	FACTORES DE CONTROL.....	88
6.	CONCLUSIONES.....	93
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	ANEXOS.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de las correlaciones principales investigadas en el estudio.	1
Figura 2 Espectro electromagnético y rango de medición del espectrómetro empleado en el estudio.	5
Figura 3 Resumen esquemático del método de regresión MCP (Randall, 2014).....	9
Figura 4 Producto interno bruto por clase de actividad económica y ocupación laboral por actividad económica, IV Región de Coquimbo (Fuente: Banco Central e INE).....	12
Figura 5 Hidrografía del área de estudio. Se muestran los límites de la cuenca del río Elqui, los drenajes principales y los dos embales de la zona.	14
Figura 6 Modelo de elevación digital con divisiones esquemáticas del área de estudio en dos unidades morfoestructurales principales separadas por la zona de falla Vicuña: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal, la última de ellas dividida a su vez en dos subunidades: Occidental y Oriental.....	16
Figura 7 Mapa litológico del área de estudio. Recopilado y digitalizado por (Miralles, 2013) a partir de las cartas geológicas vigentes correspondientes.	25
Figura 8 Estructuras principales dentro de la cuenca del río Elqui. Modificado de (Nasi, Moscoso, & Maksaev, Hoja Guanta. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. , 1990).	28
Figura 9 Distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal de la cuenca del río Elqui. La leyenda de la litología se observa en la Figura 7	31
Figura 10 Yacimientos metalíferos de la cuenca del Elqui.	37
Figura 11 Proyección de las ochenta muestras de sedimento fluvial en que se basa esta investigación.....	39
Figura 12 Influencia del tamaño de grano sobre la firma espectral. Se observa la misma muestra sin tamizar (O), y tamizada con malla #18 y #80.....	40
Figura 13 Ejemplo de estandarización de un espectro por medio de su primera derivada.	43
Figura 14 Normalización del espectro original mediante remoción de envolvente.	45
Figura 15 Esquema de pasos metodológicos para desarrollo de modelo quimiométrico. Modificado de (Shi et al, 2014).....	48
Figura 16 Ejemplo de análisis visual llevado a cabo para construir la regresión RNA. El elemento analizado es el Uranio.	50
Figura 17 Ochenta espectros de reflectancia correspondientes a la fracción más fina (tamizada con malla #80), sin procesar.....	51
Figura 18 Ochenta espectros originales derivados por medio de software <i>ViewSpec Pro</i>	52
Figura 19 Resultados entregados por la RNA mediante el programa GCSVIS y el modo de normalización 5 (primera derivada). Los números indican el número de nodo.	53
Figura 20 Espectros promedios de los seis nodos entregados por la RNA.....	54

Figura 21 Se muestran los promedios de las derivadas de reflectancia para los seis espectros promedio de cada nodo entregados por la RNA (Modo 5). Relaciones topológicas RNA de cercanía (negro) y distancia (rojo).	55
Figura 22 Proyección en planta de los resultados entregados por la RNA para la estandarización mediante Modo 4.....	56
Figura 23 Proyección en planta de los resultados entregados por la RNA para la estandarización mediante Modo 5.....	56
Figura 24 Resultados mineralogía reflectancia VIC.....	59
Figura 25 Resultados mineralogía reflectancia VIC (continuación).	60
Figura 26 Resultado de clasificación supervisada con algoritmo <i>Maximun Likelihood</i> y regiones de interés seleccionadas desde la propia imagen (sin uso de la información espectral de las muestras de terreno).	62
Figura 27 Resultado de matemática de bandas B5/B4 para el área de estudio. No se emplean los espectros representativos de cada nodo. Zona resaltada en el extremo NE de la cuenca corresponde a zona de alteración hidrotermal y mineralización El Indio-El Tambo.	63
Figura 28 Gráfica de Observados versus Predichos para LOG10(U), generada por el programa <i>STATGRAPHICS CENTURION</i>	66
Figura 29 Valores de Uranio medidos con ICP-MS y estimados con reflectancia VNIR.	66
Figura 30 Red de nodos espectrales generada por la RNA para el caso del Uranio, sobre un conjunto de 75 muestras de entrenamiento.	68
Figura 31 Modelo de regresión generado por RNA para correlación de nodos espectrales y concentraciones químicas, caso del Uranio.	68
Figura 32 Gráfico de máximo, mínimo y promedio de U (ppm), para los 6 nodos generados.	69
Figura 33 Resultados de clasificación por RNA de 126 muestras de la cuenca del río Elqui, a partir de la geoquímica de 61 elementos y compuestos (Miralles, 2013).	74
Figura 34 Ejemplo de pérdida de información al pasar de las más de dos mil bandas de Terraspec a las nueve bandas del rango VIC <i>ASTER</i>	80
Figura 35 Espectro de reflectancia VIC medido por el satélite <i>ASTER</i> de un modo remoto y el medido en laboratorio con Terraspec.	81
Figura 36 Continuación de Figura 35	82
Figura 37 Proyección de 5 Muestras anómalas según el modelo de regresión RNA.	87
Figura 38 Relación entre nodos espectrales y litología regional.....	89
Figura 39 Nodos espectrales, zonas de alteración hidrotermal y distritos mineros.	91
Figura 40 Mejores resultados estadísticos de modelos de regresión quimiométrica construidos por medio de MCP.	94
Figura 41 Esquema resumen del modelo de exploración geoquímica presentado en el presente estudio.....	95
Figura 42 Mapa de sedimentos con concentraciones por sobre el estándar PEC (MacDonald et al, 2000).	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen del control de calidad de datos.	41
Tabla 2 Relaciones topológicas entre los nodos entregados por la RNA (Modo 5)	53
Tabla 3 Resultados mineralogía DRX.	57
Tabla 4 Mineralogía a partir de algoritmo <i>sff</i> del espectro <i>VIC</i> usando biblioteca espectral <i>s06av95a del USGS</i> (Clark, y otros, 2003).	58
Tabla 5 Coeficientes de determinación R2 obtenidos usando solo bandas de reflexión. En rojo aquellos con R2 mayor a 70. R2 (LOG10) corresponde a regresión con concentraciones en base logarítmica.	64
Tabla 6 Coeficientes de determinación R2 obtenidos usando solo bandas de absorción. En rojo aquellos con R2 mayor a 70. R2 (LOG10) corresponde a regresión con concentraciones en base logarítmica.	65
Tabla 7 Se presentan los mejores resultados obtenidos mediante el modelamiento quimiométrico, en forma descendente en calidad estadística, en términos de su relación R2 versus ECM.	66
Tabla 8 Intervalos dentro del espectro donde se cumple una relación normal entre intensidad de reflectancia y concentración geoquímica.	67
Tabla 9 Distribución de nodos y rangos químicos entregada por la RNA, caso del Uranio.	69
Tabla 10 Validación del modelo de regresión RNA por medio de 10 nuevas muestras. U medido (ppm) corresponde al valor medido mediante ICP-MS.	70
Tabla 11 Relación entre los nodos clasificación a partir de espectro <i>VIC</i> y geoquímica.	73
Tabla 12 Mineralogía de los sedimentos en estudio basada en difracción de rayos X y reflectancia <i>VIC</i>	77
Tabla 13 Posibles relaciones entre mineralogía de nodos y unidades geológicas del área de estudio.	90
Tabla 14 Tipos de alteración y sus ensamblajes mineralógicos diagnósticos en sistemas de pórfidos cupríferos (Velde, 1995).	93

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Espectros Nodo 1	103
Anexo 2 Espectros Nodo 2	103
Anexo 3 Espectros Nodo 3	104
Anexo 4 Espectros Nodo 4	104
Anexo 5 Espectros Nodo 5	105
Anexo 6 Espectros Nodo 6	105
Anexo 7 Coordenadas geográficas de las muestras analizadas (WGS84 19S).	106

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

En el presente estudio se analizan las variadas relaciones existentes entre tres métodos analíticos usados en ciencias de la tierra: 1. espectrometría de reflectancia en el rango visible e infrarrojo cercano (VIC), metodología tradicionalmente usada para estudiar la composición mineral de una muestra y que también permitiría determinar la composición geoquímica para ciertos elementos, 2. difracción de rayos X; metodología empleada para conocer la composición mineral de una muestra y 3. espectrometría de masa y óptica (ICP-MS e ICP-ES por sus siglas en inglés), técnica analítica que permite conocer con gran precisión y exactitud la composición geoquímica de una muestra, para una gran gama de elementos y compuestos químicos.

La meta de la investigación es que las correlaciones generadas, esquematizadas en la siguiente **Figura 1**, puedan ser empleadas como elementos dentro de una nueva metodología de exploración geoquímica, que permita una buena caracterización geológica de una muestra de sedimento in situ, en tiempo real y con menores costos respecto a lo que actualmente se realiza. Adicionalmente se busca vincular estos resultados con el uso de sensores remotos, de tal forma de manejar la escala de la exploración desde el ámbito local, por ejemplo caracterización geoquímica de una quebrada, al ámbito regional.

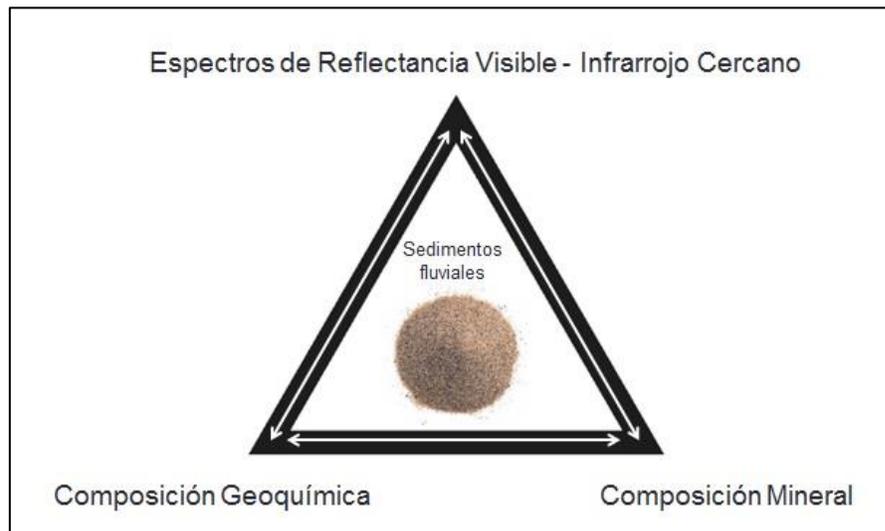


Figura 1 Esquema de las correlaciones principales investigadas en el estudio.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

Evaluar la existencia de correlaciones entre espectrometría de reflectancia, composición geoquímica y mineralogía, en sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar espectralmente los sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui.
2. Determinar las fases minerales asociadas tanto a la concentración geoquímica como al espectro de reflectancia de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui.
3. Establecer factores de control geoquímico, mineralógico y espectral sobre los sedimentos fluviales del río Elqui, contándose entre ellos litología, zonas de alteración hidrotermal y/o actividad minera, geomorfología e hidrodinámica, entre otros.
4. Desarrollar un modelo quimiométrico que permita predecir la concentración química de ciertos elementos a partir de su espectro de reflectancia visible-infrarrojo cercano.
5. Correlacionar información espectral, geoquímica y mineralógica obtenida con el uso de imágenes satelitales ASTER.
6. Generar una metodología de exploración geoquímica a partir de las correlaciones desarrolladas.

1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Es posible establecer correlaciones entre espectros de reflectancia y tanto composición geoquímica como mineralogía, en muestras de sedimento fluvial.

1.4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe de forma breve el marco teórico que fundamenta cada método utilizado. Se excluye el marco teórico del estudio geoquímico de las muestras, puesto que este se describe en (Miralles, 2013), en que se analizó la geoquímica de todas las muestras incluidas en la presente investigación por medio de ICP de masa y óptico.

Luego de fundamentar el uso de la espectrometría de reflectancia y de difracción de rayos X, se presenta el fundamento de las redes neuronales, usadas tanto en la clasificación espectral de las muestras como en la construcción de un modelo quimiométrico, y de la regresión por mínimos cuadrados parciales, método empleado para la construcción del modelo antes mencionado.

1.4.1. ESPECTROSCOPIA Y ESPECTROMETRÍA DE REFLECTANCIA

La espectroscopía es el estudio de la luz como función de la longitud de onda que ha sido emitida, reflejada o dispersada, desde un sólido, líquido o gas. La espectrometría, en tanto, corresponde a la medición de la distribución de esta luz emitida en un rango espectral determinado, es decir para un intervalo de longitud de onda dado. Por otra parte, la reflectancia se define como la tasa de energía reflejada desde un material con respecto a la energía incidente en el mismo. Espectrometría de reflectancia es la reflectancia como función de la longitud de onda. Por último, se obtiene la reflectancia relativa de un material dividiendo la energía reflejada desde el mismo por la energía reflejada por un estándar de referencia.

A medida que los fotones inciden en un mineral, algunos de ellos son reflejados desde la superficie de los granos, otros pasan a través de los granos y el resto son absorbidos. Aquellos fotones que son reflejados desde la superficie de los granos o difractados a través de una partícula son fotones dispersados. Una vez dispersados, pueden encontrar otro grano o bien alejarse de la superficie de tal forma que pueden ser detectados y medidos. Los fotones también pueden originarse desde una superficie, un proceso denominado emisión. Todas las superficies naturales emiten fotones cuando están por sobre el cero absoluto de temperatura.

Los fotones son absorbidos en los minerales de variadas formas. Esta variedad y su dependencia con la longitud de onda permiten deducir información sobre diversas propiedades del mineral en estudio, a partir de la luz reflejada, en particular información acerca de su composición química. Una característica distintiva de la espectroscopía es

su gran sensibilidad frente a pequeños cambios en la química y/o estructura de los materiales.

Con respecto a las causas que provocan absorción de la luz, se pueden distinguir dos procesos generales: electrónicos y vibracionales. Los procesos electrónicos se basan en cambios de los niveles energéticos de los átomos aislados o iones; Cuando estos absorben un fotón de una longitud de onda específica, se produce un aumento de su estado energético, mientras que ocurre emisión de un fotón como resultado de un descenso en el estado energético. En los sólidos los electrones pueden ser compartidos entre átomos individuales, de tal forma que el nivel de energía de un electrón compartido puede ser difuso sobre un rango de valores denominado “bandas de energía”. Dentro de los procesos electrónicos se distinguen los efectos de campo cristalino, absorciones de transferencia de carga, bandas de conducción y centros de color. Por otra parte los procesos vibracionales ocurren debido a que los enlaces en una molécula o red cristalina actúan como resortes con pesos adheridos, por lo que todo el sistema puede vibrar. La frecuencia de vibración depende de la fuerza de los enlaces y la masa de los elementos en cuestión.

Los fundamentos antes expuestos permiten el desarrollo de metodologías que por medio del uso de información espectrométrica entreguen información sobre la composición química y otras características propias de los materiales analizados. En particular, en geología, se han desarrollado modelos estadísticos para conocer la concentración química de ciertos elementos, que presentan interés desde un punto de vista tanto ambiental como económico, tales como As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn (Shi et al, 2014). Por otra parte es sabido que las absorciones en la región espectral visible e infrarrojo cercano (VIC) están asociadas primariamente a óxidos de Fe, arcillas, agua y materia orgánica, como consecuencia de transiciones en la energía vibracional de estos enlaces moleculares dominantes (Shi et al, 2014). La mayor parte de los óxidos de Fe en sedimentos (por ejemplo goethita α -FeOOH) tienen absorciones sobre el rango visible (350-780 nm) e infrarrojo de onda corta cercano (780-1100 nm) (Torren & Barrón, 2002). Las arcillas por su parte presentan rasgos distintivos en el infrarrojo cercano de onda larga (1100-2500 nm), debido a sobretonos y vibraciones combinadas de OH, H₂O y CO₃ (Clark, 1999). El agua tiene fuertes rasgos de absorción en el rango VIC, más claros entre los 1400 y 1900 nm, mientras que hay bandas de sobretono en todo el resto del espectro. La materia orgánica tiene rasgos distintivos en las región VIC, debido a variados enlaces químicos tales como C-H, C-C, C=C, C-N y O-H (He et al, 2009).

En el presente estudio se ha empleado el espectrómetro Terraspec 4 Hi-Res, cuyo rango espectral va desde lo 350 nm hasta los 2500 nm. Se divide este rango en tres intervalos denominados VNIR (*visible-near infrared*), entre 350 y 1000 nm, SWIR1 (*short wave infrared*) entre 1001 y 1800 nm, y finalmente SWIR2, entre 1801 y 2500 nm. Cabe mencionar que esta división se realiza con el fin de potenciar la resolución de

los datos obtenidos por medio del uso de distintos detectores. Esta resolución es de ± 3 nm a los 700 nm y ± 6 nm a los 1400 y 2100 nm. En la siguiente **Figura 2** se observa el campo electromagnético completo y el medido por el espectrómetro usado.

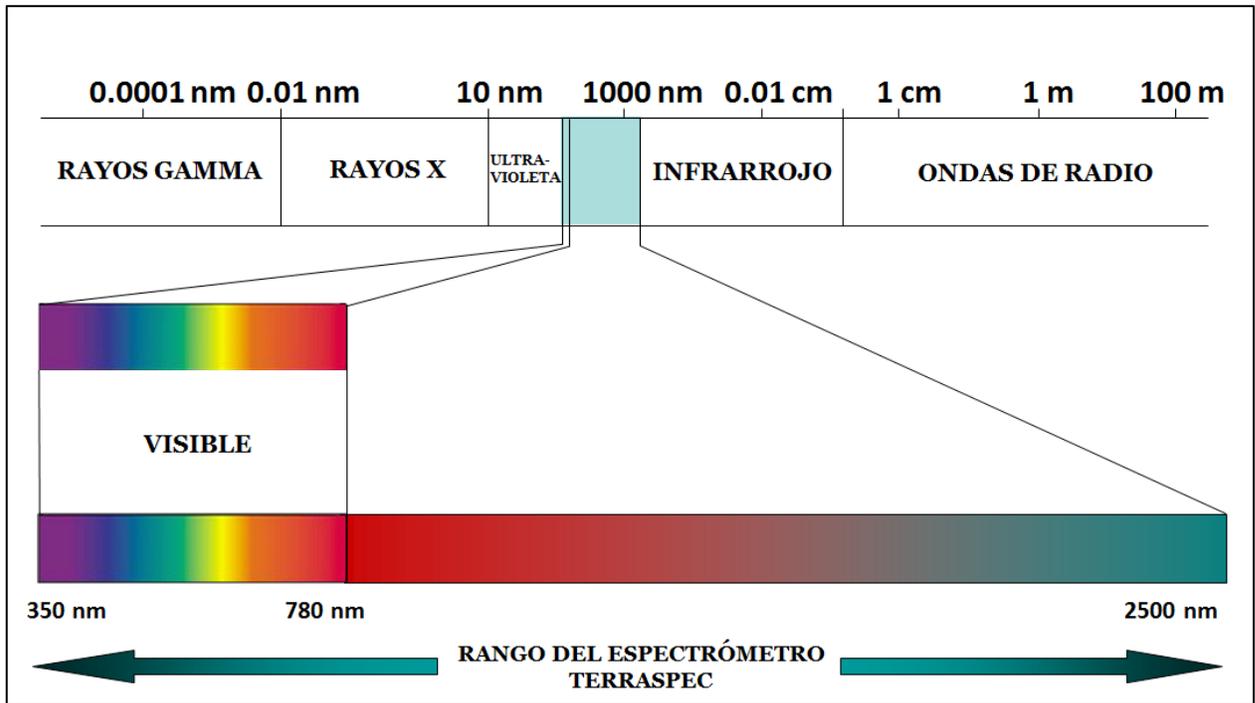


Figura 2 Espectro electromagnético y rango de medición del espectrómetro empleado en el estudio.

Con respecto a la referencia que el equipo toma al momento de realizar las mediciones de reflectancia, cabe mencionar lo siguiente: un material con 100% de reflectancia a lo largo de todo el espectro se denomina “panel o estándar de referencia blanca” (*white reference*). La medición realizada por el espectrómetro se ve influenciada tanto por la muestra como por la fuente de luz empleada. Por lo tanto se requiere una medición independiente de la fuente de luz sobre una referencia de reflectancia conocida para calcular la reflectancia de la muestra. El uso de un estándar de referencia blanca simplifica este cálculo. Para tales efectos, se emplea el estándar *Spectralon* de LabSphere.

1.4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X (DRX) en muestras pulverizadas es una técnica analítica rápida, principalmente utilizada para la identificación de fases de materiales cristalinos, y puede entregar información en dimensiones de celda unitaria. El material analizado es

finamente molido en mortero de ágata y homogenizado, de esta forma pudiéndose determinar la composición mineral de la muestra.

La técnica se basa en el hecho de que las sustancias cristalinas actúan como enrejados de difracción tridimensionales para longitudes de onda de rayos X (0.1 – 10 nm) similares al espaciamiento de los planos dentro de una red cristalina. La difracción de rayos X opera debido a la interferencia constructiva de rayos X monocromáticos generados a partir de un tubo catódico de rayos, filtrados para producir radiación monocromática, concentrados de forma colimada (paralelos entre sí) y dirigidos hacia la muestra. La interacción de los rayos incidentes con la muestra produce interferencia constructiva y un rayo difractado cuando las condiciones satisfacen la *Ley de Bragg* ($n\lambda = 2d \sin\theta$), donde n es un número entero, λ la longitud de onda de los rayos X, d la distancia entre los planos de la red cristalina y θ el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión. Por lo tanto esta ley establece una relación entre longitud de ondas electromagnéticas, ángulo de difracción y espaciamiento reticular de una muestra cristalina. Estos rayos difractados son luego detectados, procesados y contados. Escaneando la muestra a través de un rango de 2θ ángulos, todas las posibles direcciones de difracción del retículo deberían obtenerse, debido a la orientación aleatoria del material pulverizado. La conversión de los máximos de difracción a espaciamiento d permite la identificación del mineral debido a que cada mineral presenta un conjunto único de espaciamientos d . Típicamente esto se realiza comparando los espaciamientos con patrones estándares de referencia (Dutrow & Clark, 2013).

1.4.3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales (RNA) pueden ser adecuadamente caracterizadas como “modelos computacionales” con propiedades particulares tales como la habilidad de adaptarse o aprender, generalizar, o bien agrupar u organizar datos, cuya operación se basa en “procesamiento paralelo”, definido como la habilidad para llevar a cabo múltiples operaciones u objetivos simultáneamente (Kröse & van der Smagt, 1996). Difieren de los enfoques de modelamiento tradicional en que pueden ser entrenadas para aprender soluciones en lugar de ser programadas en un modelo específico, usando reglas complejas y rutinas matemáticas. La fuerza o ponderación de las conexiones entre los nodos interconectados se ajusta durante el proceso de entrenamiento u aprendizaje, de acuerdo a los datos de entrada. Consecuentemente las RNA son capaces de modelar funciones no lineales altamente complejas, y de identificar relaciones en los datos que no son evidenciadas por las técnicas analíticas comunes. Por último estas redes son no-paramétricas y por lo tanto no están

restringidas por el error en distribuciones de la población, como lo están los algoritmos de regresión (Lacassie et al, 2006).

Dentro de los variados modelos de RNA, se destaca el mapa auto organizado o SOM por sus siglas en inglés, que es una herramienta para la visualización de datos de alta dimensionalidad en un espacio de baja dimensionalidad. Por lo tanto es capaz de convertir relaciones estadísticas complejas y no lineales en relaciones geométricas simples. Debido a que comprime información y al mismo tiempo preserva las relaciones topológicas y métricas más importantes de los datos originales, puede considerarse que produce cierto tipo de abstracciones. Estos dos aspectos, visualización y abstracción, pueden utilizarse de variados modos en tareas complejas como análisis de procesamiento, percepción mecánica, control y comunicación (Kohonen, 1998). El SOM representa una distribución de datos de entrada usando un set finito de vectores, que son automáticamente asociados con los nodos de una grilla regular (usualmente bidimensional), de un modo ordenado de tal forma que los modelos más similares se asocian automáticamente con los nodos adyacentes en la grilla, mientras que los modelos menos similares se sitúan más alejados entre sí en la grilla. Esta organización permite revelar relaciones topográficas de los datos (Kohonen, 2013).

La red neuronal auto-organizada empleada en el presente estudio se denomina *growing cell structures* – GCS – (Fritzke, 1994), una extensión del algoritmo SOM, y se caracteriza por presentar dos variantes. La primera variante realiza aprendizaje no supervisado y puede ser usada para visualización de datos, agrupamiento y cuantización de vectores. La principal ventaja sobre otros modelos existentes (p.e. SOM), es la habilidad del modelo para automáticamente encontrar una adecuada estructura de red y tamaño. Esto se logra gracias a un proceso de crecimiento controlado que también incluye la remoción ocasional de unidades. La segunda variante del modelo es un método de aprendizaje supervisado que resulta de la combinación de la antes mencionada red auto-organizada con el enfoque de función de base radial (RBF por sus siglas en inglés), esto es una función real cuyo valor depende únicamente de la distancia del origen o bien de algún otro punto denominado centro. En este modelo es posible realizar el posicionamiento de las unidades de RBF y el entrenamiento supervisado de los ponderadores en paralelo. Por lo tanto, el error de clasificación presente puede ser usado para determinar dónde insertar nuevas unidades RBF. Esto da como resultado pequeñas redes que generalizan muy bien (Fritzke, 1994).

La aplicación de RNA en ciencias de la tierra surge por la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos, para lo cual las técnicas tradicionales se han vuelto inadecuadas. Por ello se requieren nuevas técnicas para aislamiento de correlaciones complejas entre variables, asociaciones entre muestras e identificación de anomalías (Lacassie et al, 2006). Ejemplos de aplicación de redes neuronales para procesamiento

de datos geoquímicos se encuentran en (Lacassie, 2003); (Astudillo, 2011) y (Miralles, 2013), y para procesamiento de datos espectrales en (Carrasco, 2013).

1.4.4. REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES

La regresión de mínimos cuadrados parciales (MCP), es un procedimiento diseñado para construir un modelo estadístico que relaciona múltiples variables independientes X (factores) con múltiples variables dependientes Y (variables de respuesta). Cuando el número de factores es muy elevado, por ejemplo mucho mayor que el número de observaciones, es probable generar un modelo que calza con los datos entregados, pero que sin embargo falla al momento de predecir nuevos datos, fenómeno denominado *over-fitting*. En tales casos, aún cuando haya muchos factores conocidos, puede ocurrir que sean solo unos pocos factores subyacentes o latentes los que expliquen satisfactoriamente las variaciones en las respuestas. La idea general de la regresión MCP es tratar de extraer estos factores latentes. La siguiente figura da una idea esquemática del método. La meta principal (mostrada en el cuadro inferior) es usar los factores para predecir las respuestas en la población. Esto se consigue indirectamente extrayendo variables latentes T y U desde factores y respuestas conocidos, respectivamente. Luego los factores extraídos T , también denominados coeficientes- X son usados para predecir los coeficientes- Y (respuestas U), y luego los coeficientes- Y predichos son usados para construir predicciones para las respuestas (Geladi & Kowalski, 1986).

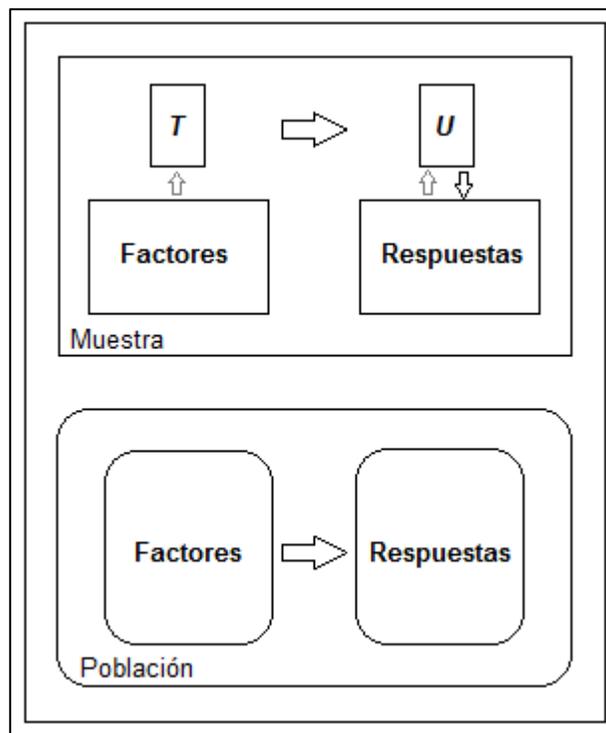


Figura 3 Resumen esquemático del método de regresión MCP (Randall, 2014)

1.4.4.1. MODELO ESTADÍSTICO

Al igual que en regresión múltiple, el objetivo de los Mínimos Cuadrados Parciales (MCP) es construir un modelo lineal de la forma

$$Y = X\beta + E \quad ec.1$$

donde Y es una matriz n por m que contiene los n valores estandarizados de las m variables dependientes, X es una matriz n por p que contiene los valores estandarizados de las p variables predictoras, β es una matriz p por m de parámetros del modelo, y E es una matriz n por m de errores. A diferencia de la regresión múltiple, el número de observaciones n puede ser menor que el número de variables independientes p .

No obstante, en vez de estimar β directamente, se extraen primero c componentes. Luego los coeficientes se calculan a partir del producto de dos matrices:

$$\beta = WQ \quad ec.2$$

donde W es una matriz p por c de pesos que transforman a X en una matriz T de valores de los factores de acuerdo con

$$T = XW \quad ec.3$$

y Q es una matriz de coeficientes de regresión (cargas) que expresan la dependencia entre Y y los valores de los factores:

$$Y = TQ + E \quad ec.4$$

La matriz de variables independientes también puede representarse en términos de P , una matriz c por p de cargas de factores como

$$X = TP + F \quad ec.5$$

donde F es una matriz n por p de desviaciones.

Parte de la tarea al realizar un análisis de MCP es determinar el número apropiado de componentes c . Si se establece c demasiado bajo o demasiado alto, el modelo puede no dar buenas predicciones para las futuras observaciones (Statgraphics, 2009).

1.4.5. QUIMIOMETRÍA

La quimiometría es la disciplina química que busca la medición de diversos parámetros o procesos relacionados a la química, mediante métodos matemático-estadísticos (Shepard, 1987).

La quimiometría aplicada a la geoquímica es bastante nueva, de hecho la primera publicación de estimación precisa de concentraciones de metales pesados en suelos, por medio del uso de reflectancia VIC, data recién del año 1997 (Malley & Williams, 1997). En general estos modelos han buscado estimar con alta precisión abundancias o concentraciones relativas o absolutas de una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos.

En general el desarrollo de estos modelos se basa en el procesamiento de las señales espectrales, que incluye todas las modificaciones necesarias para contar con los datos numéricos que corresponderán a variables de entrenamiento, variables independientes o factores, dependiendo del modelo matemático-estadístico utilizado. Una vez preprocesadas las señales espectrales, se procede a modelar la relación entre el espectro de reflectancia y la concentración geoquímica, que en general implica la selección de un número de bandas de longitud de onda menor al rango original medido. Luego se aplican diversos modelos matemático-estadísticos, entre los cuales la regresión MCP y las RNA han entregado los mejores resultados (Shi et al, 2014).

Una vez desarrollados los modelos, se realiza una validación que entrega un grado de certeza estadística, usualmente mediante el coeficiente de determinación R^2 , y de su error estadístico, por medio del error cuadrático medio (ECM) en este trabajo o error cuadrático medio relativo (ECMR) (Hong Ya et al, 2009).

De esta forma se desarrollan modelos que permiten conocer la concentración química de ciertos elementos o compuestos, solamente a partir de su espectro de reflectancia VIC.

Cabe destacar que en última instancia el modelo dependerá de dos factores esenciales: 1) capacidad de modelamiento de la relación espectro-química, y 2) conjunto de muestras de entrenamiento y conjunto de muestras de validación.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. CONTEXTO REGIONAL

La cuenca hidrográfica del río Elqui se ubica al norte de la IV Región de Coquimbo, que se extiende desde los 29.40° S hasta los 32.10° S, y limita al norte con la Región de Atacama, al este con Argentina, al oeste con el océano Pacífico y al sur con la cuenca del río Limarí (**Figura 5**).

La cuenca del Elqui presenta una superficie de 16.895,1 km² y se caracteriza por su clima mediterráneo árido, con lluvias invernales, temperaturas moderadas y una humedad relativa elevada en las comunas costeras. En términos de ordenamiento territorial está ubicada en la provincia de Elqui, que está integrada por seis comunas: La Serena, Coquimbo, Andacollo, La Higuera, Vicuña y Paihuano. Según el Censo del año 2012, la población total de la provincia del Elqui es de 459.946 personas,

En términos económicos, la principal actividad laboral dentro de la región de Coquimbo corresponde a Servicios Comunes, Sociales y Personales (64.434 personas), seguido de los rubros Agricultura, Caza y Pesca (60.148 personas), en tanto de acuerdo al índice PIB, la principal actividad económica corresponde a minería, con un 40% del PIB total regional (M\$ 1.272.000) **Figura 4**.

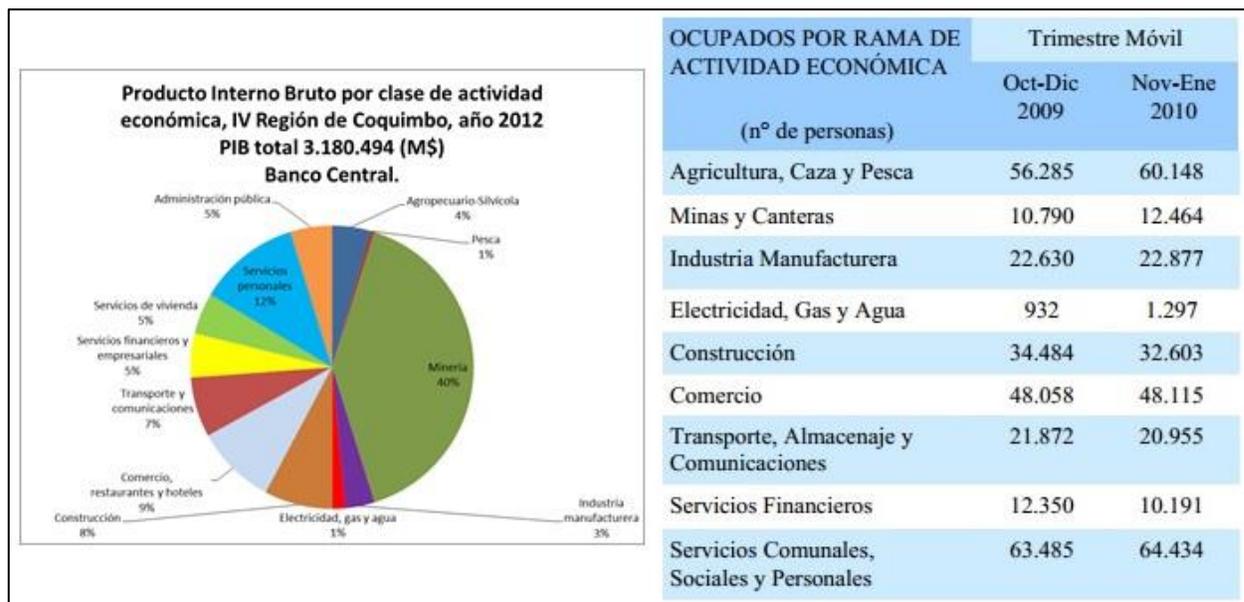


Figura 4 Producto interno bruto por clase de actividad económica y ocupación laboral por actividad económica, IV Región de Coquimbo (Fuente: Banco Central e INE).

2.2. HIDROGRAFÍA

La hoya hidrográfica del río Elqui corresponde a una de las tres cuencas principales de la región de Coquimbo, junto con las cuencas de los ríos Limarí y Choapa. La cuenca responde a un régimen de escurrimiento pluvionival mixto (Sanchez & Morales, 1993). con drenaje hacia el Océano Pacífico, con una longitud aproximada de 240 km, desde la divisoria de aguas en la Alta Cordillera y la comuna de La Serena, y presenta una pendiente media de 1,1%. No presenta rápidos ni saltos en su recorrido. Tal como se observa en la siguiente **Figura 5**, el río Elqui posee dos tributarios principales, los ríos Turbio y Claro. El primero de estos ríos corre a través de la Cordillera Principal, teniendo como tributarios principales los ríos Toro, Seco, La Laguna e Incaguaz. El río Claro en tanto recibe las aguas desde el río Cochiguaz, además de otros afluentes menores. La subcuenca del río Turbio aporta un área correspondiente al 44% del área total (4148 Km²) de la cuenca del Elqui, en tanto la del río Claro un 16% del total (1502 Km²) (Cepeda, 2008).

Aguas abajo desde el punto de confluencia de estos dos tributarios principales, en las cercanías del poblado de Rivadavia, se distinguen subcuencas tanto al norte como al sur del río Elqui, que en todo este tramo posee una orientación E-W, describiendo un valle transversal a la Depresión Intermedia y la Cordillera de la Costa. Las subcuencas del Norte más importantes son las quebradas Marquesa y Santa Gracia, mientras que las del Sur son las quebradas La Mollaca, La Calera, El Arrayán y Talca. El total de superficie de todas estas subcuencas corresponde a un 32,5% del total de la cuenca del Elqui (3062 Km²) (Cepeda, 2008).

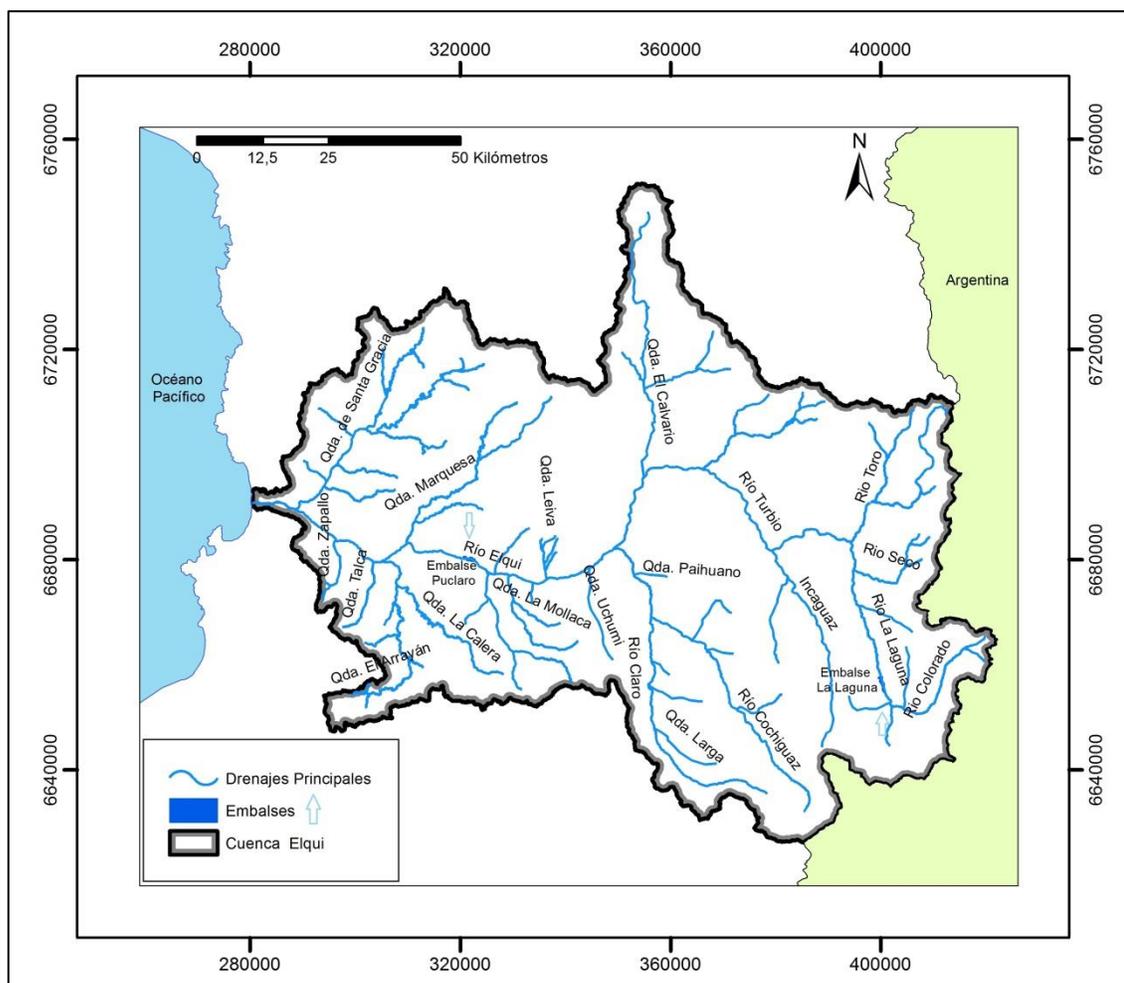


Figura 5 Hidrografía del área de estudio. Se muestran los límites de la cuenca del río Elqui, los drenajes principales y los dos embales de la zona.

El Río Elqui, cauce principal de la cuenca, tiene un caudal superficial promedio de $\sim 7,1 \text{ m}^3/\text{s}$, con una gran variabilidad interanual. Su régimen de crecidas depende de la altitud: en el tramo medio-alto, aguas arriba de la ciudad de Vicuña, predomina un régimen nival, y por lo tanto los mayores volúmenes y caudales máximos instantáneos ocurren durante primavera-verano. En tanto en el tramo medio-bajo, aguas abajo de la ciudad de Vicuña, el régimen predominante es pluvialnival, por lo que los caudales máximos instantáneos ocurren durante otoño-invierno y los mayores volúmenes máximos de crecida durante primavera-verano. Por su parte, los ríos Turbio y Claro tienen un caudal promedio de 4,3 y 3,0 m^3/s , respectivamente.

Dentro de la cuenca del Elqui existe solo un glaciar, denominado El Tapado, que se ubica en la parte alta de la sub-cuenca del río La Laguna y tiene una superficie de 3,6 km^2 . Finalmente existen dos embalses artificiales denominados La Laguna, en el río Homónimo, y Puclaro, en el río Elqui (**Figura 5**). Poseen una capacidad de almacenamiento de 40 y 200 M m^3 de agua, respectivamente (Cepeda, 2008).

2.3. GEOMORFOLOGÍA

En el siguiente modelo de elevación digital, generado a partir del modelo ASTER Global DEM, se muestran las principales unidades morfoestructurales dentro del área de estudio: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal (Charrier, Pinto, & Rodríguez, 2007), la última de ellas dividida a su vez en dos subunidades; Cordillera Principal Occidental y Cordillera Principal Oriental (Aguilar et al, 2013).

La Cordillera de la Costa se caracteriza por un paisaje maduro, con cumbres convexas de altitudes de hasta los 2.000 m.s.n.m. Los espolones que nacen de estas cumbres dan paso, hacia el oeste, a pedimentos que en sus partes más distales definen superficies planas con una ondulación dada por la coalescencia de abanicos aluviales. Los pedimentos en las cuencas del Elqui y Choapa son menos extensos en relación a los de las cuencas ubicadas más al norte (Huasco y Copiapó), lo que evidenciaría una mayor degradación del relieve de pedimentos en las primeras dos cuencas, dada por la densificación e incisión de la red de drenaje. El relieve de la cuenca del Elqui resulta de un mayor desarrollo de sierras en relación al norte, las que descienden como laderas cóncavas hacia amplias superficies formadas por lechos aluviales. Una probable explicación para la mayor incisión de la red de drenaje en esta cuenca es la presencia del embahiamiento en la línea de costa que permite una mayor influencia del ambiente costero hacia el continente, que resulta en un clima local relativamente más húmedo y en un relieve más susceptible a la incisión como resultado de cambios del nivel base del océano (Aguilar et al, 2013).

La Cordillera Principal, por su parte, preserva en sus interfluvios más altos superficies planas con rasgos definitorios de un pedimento. En la Cordillera Principal Occidental el rasgo geomorfológico principal es la presencia de profundos cañones, los que representan hasta 2.000 m de incisión y que dan paso, aguas arriba, a empinadas paredes. En la cuenca del Elqui las pendientes de las cuencas tributarias se mantienen constantes hacia el este, lo que indica que la incisión fluvial ha alcanzado las altas cumbres. En la sección Oriental, por otra parte, se exponen las mayores altitudes de la cordillera, con una geomorfología modelada tanto por la erosión fluvial como por la glacial, constituyendo esta última una etapa intermedia. Así, los glaciares habrían aprovechado valles fluviales, dándoles la clásica forma de artesas en U, para ser posteriormente remodelados por las corrientes fluviales, adquiriendo, al menos en parte, perfiles en V. Esto es especialmente evidente sobre los 4.000 m.s.n.m. en los valles del río Toro, de la quebrada del Toro Muerto, del río Malo y del río Las Vacas Heladas. Los sectores en U favorecen el desarrollo de vegas pantanosas en su planicie aluvial, dada la mayor amplitud y menor pendiente de esta última (Aguilar et al, 2013).

Cabe mencionar que el límite entre ambas unidades morfoestructurales está dado por el Sistema de Fallas Vicuña-San Félix (SFVSF), tal como se expone en la **Figura 86**.

En el área predominan las pendientes moderadas ($5,1^\circ - 15^\circ$), las que ocupan el 41% de la superficie total de la cuenca, principalmente desde la localidad de Rivadavia ($29^\circ 50' S, 70^\circ 34' O, 800 \text{ m.s.n.m.}$) hacia el oeste. Aguas arriba de este punto hay pendientes altas ($15,1^\circ - 25^\circ$), que ocupan un 30% de la superficie, sin embargo también existen pendientes muy altas, con un 8% del área total (Novoa & Nuñez, 1995).

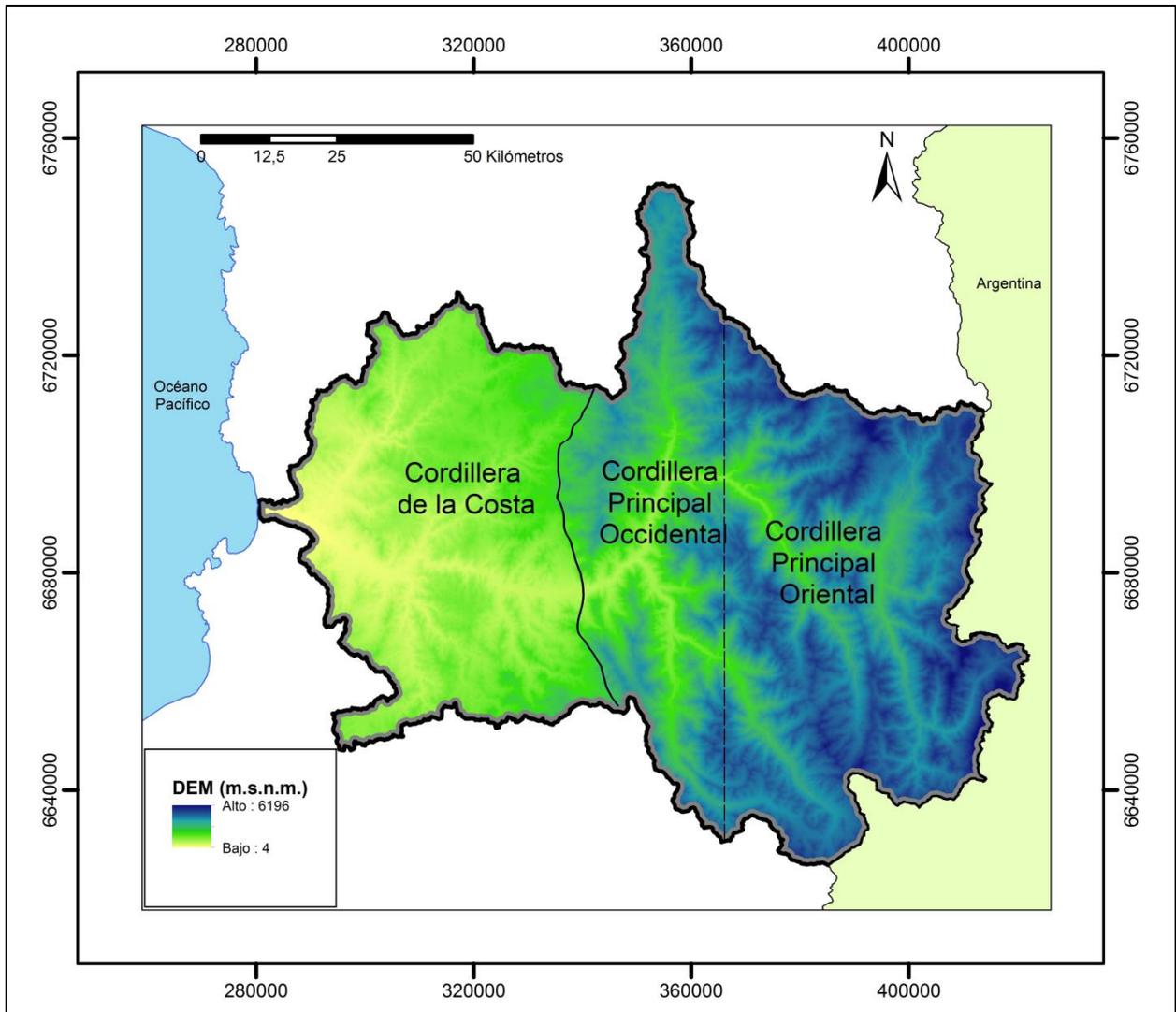


Figura 6 Modelo de elevación digital con divisiones esquemáticas del área de estudio en dos unidades morfoestructurales principales separadas por la zona de falla Vicuña: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal, la última de ellas dividida a su vez en dos subunidades: Occidental y Oriental.

2.4. GEOLOGÍA

La cuenca hidrográfica del río Elqui se ubica en un segmento de la cordillera andina con dos rasgos geológicos de primer orden: subducción plana de la placa tectónica de nazca bajo la placa sudamericana y ausencia de volcanismo reciente (Charrier et al, 2007). Dentro de la cuenca es posible distinguir dos segmentos principales con características geológicas contrastantes: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal, limitadas por el Sistema de Fallas Vicuña-San Félix (SFVSF). No obstante ambos segmentos se caracterizan morfoestructuralmente por la disposición de las unidades geológicas en franjas de orientación aproximada N-S.

Las unidades geológicas más antiguas corresponden a una serie de unidades metamórficas, plutónicas y volcansedimentarias, de edad paleozoica a triásica inferior, que, en conjunto, constituyen el basamento de las secuencias mesocenozoicas. En la Cordillera de la Costa afloran, en forma discontinua, rocas metamórficas y metasedimentarias del Paleozoico inferior al Carbonífero Inferior, que representan asociaciones de prisma de acreción y/o depósitos de antearco (Nasi et al, 1990).

Sobre el basamento se apoyan formaciones sedimentarias del Triásico Medio-Jurásico Inferior cubiertas, en discordancia, por una potente secuencia volcánica, principalmente andesítica, con intercalaciones de calizas marinas neocomianas (Grupo Bandurrias) que, al sur de los 29°30', se desarrolla en forma continua, excepto por el paso de intercalaciones sedimentarias de ambiente marino, en la Formación Arqueros, a intercalaciones de ambiente transicional a continental, en la suprayacente Formación Quebrada Marquesa.

En el área precordillerana, cubriendo a la serie volcansedimentaria del Cretácico Inferior, se disponen las secuencias volcansedimentarias atribuidas comúnmente al Cretácico Superior (formaciones Cerrillos y Viñita) y al Terciario Inferior (Formación Los Elquinos).

En la Alta Cordillera aflora un extenso macizo granítico, de edad paleozoica superior-triásica inferior (Batolito Elqui-Limarí), asociado a una cubierta de volcanitas ácidas contemporáneas (Formaciones Matahuaico y Pastos Blancos). Los granitoides intruyen a esquistos pelíticos y metabasitas (Complejo Metamórfico El Cepo) y a secuencias metasedimentarias marinas del Devónico-Carbonífero (Formaciones Hurtado y Las Placetas). Además intruyen a una unidad de ortoneises de edad silúrica y protolito granítico (Neises de La Pampa), que se han interpretado como representantes de un terreno alóctono (Chilenia) soldado al continente sudamericano en el Devónico. Estas unidades, en conjunto, representan la prolongación en territorio chileno de las unidades geológicas fundamentales de la Cordillera Frontal de San Juan y Mendoza,

que penetra en territorio chileno a la latitud 31°S, en la cordillera de Ovalle (nacientes del río Grande).

Las unidades meso-cenozoicas de la cobertura se disponen tanto en el flanco occidental como al este y también sobre el núcleo plutónico de la Cordillera Principal. La secuencia se inicia con depósitos sedimentarios del Triásico Medio-Superior, tanto marinos (Formación San Félix) como continentales (Formación Las Breas), cubiertas por rocas volcánicas andesíticas del Triásico Superior-Jurásico Inferior (Formación La Titora, Estratos del Verraco). Cubriendo y, en parte, también engranando con éstas, se disponen secuencias clásticas y carbonatadas del Jurásico Inferior-Medio Inferior (Formaciones Lautaro y Tres Cruces), depositadas en un ambiente marino de trasarco sobre una plataforma poco profunda. La secuencia triásico-jurásica culmina con depósitos sedimentarios continentales y volcanitas andesíticas y andesítico-basálticas del Jurásico Superior (formaciones Algarrobal, Mostazal, Picudo y Baños del Toro).

En el flanco occidental de la Cordillera Principal, sobre estas unidades, se disponen las formaciones sedimentarias marinas y continentales del Cretácico Inferior (Formaciones Río Tascadero y Pucalume). Las unidades sedimentarias del Cretácico Inferior de la Alta Cordillera ocuparían, al igual que el Grupo Chañarcillo, una posición de trasarco respecto de la serie volcánica contemporánea del sector costero y precordillerano. La sucesión de ambientes marinos y continentales, que caracteriza el lapso Triásico Medio-Cretácico Inferior, culmina en el Cretácico Superior, dando paso a un ambiente exclusivamente continental, representado en el borde occidental de la Cordillera Principal por los depósitos volcánicos del Cretácico Superior y Terciario Inferior, y al este del núcleo paleozoico por el volcanismo del Terciario Superior. En este último sector, las secuencias volcánicas del Oligo-Mioceno (formaciones Doña Ana, Cerro de Las Tórtolas y Vallecito), a las cuales se asocian numerosas zonas de alteración hidrotermal, se disponen directamente sobre el zócalo paleozoico y las unidades mesozoicas.

A partir del Mioceno Superior no existe actividad volcánica en este segmento de la Alta Cordillera, lo que estaría relacionado con el inicio de la segmentación de la placa de Nazca y una subsecuente disminución en la inclinación del plano de Benioff. Esta situación estaría ligada, además, al particular estilo tectónico, dominado por la presencia de fallas inversas de alto ángulo, así como a la ausencia de valle central. Por último otra característica notable de este sector del Norte Chico es la disposición de las rocas plutónicas mesozoicas en franjas de dirección aproximada N-S, progresivamente más jóvenes hacia el este (Nasi et al, 1990).

2.4.1. UNIDADES GEOLÓGICAS

A continuación se presenta una descripción somera de las unidades geológicas presentes en la cuenca en estudio, listadas por orden de aparición de Oeste a Este y de Norte a Sur.

Formación Coquimbo: Conjunto de sedimentos marinos que afloran en la zona costera. En su sección inferior incluye areniscas amarillas, de grano medio a grueso, en parte limosas, con niveles de coquinas y, en su parte superior, areniscas amarillentas y conglomerados (localmente bolones), con niveles carbonatados fosilíferos.

Gravas de Atacama: Conjunto de sedimentos, poco a medianamente consolidados, de origen aluvial, que incluye conglomerados de bolones, gravas, arenas y ripios, con intercalaciones limosas, acumulados sobre las unidades de roca preexistentes en la zona, y disectados por las quebradas modernas. Presentan calizas y yeso en algunas capas finas.

Grupo Bandurrias: Al sur de los 29°45' Lat. S, la secuencia denominada Grupo Bandurrias es dividida en dos unidades concordantes entre sí: la Formación Arqueros y la Formación Quebrada Marquesa. La Formación Arqueros es descrita como una secuencia de andesitas porfíricas y calizas marinas que lleva en su parte superior mantos de mangesocuya base no se observa, y cuyo techo lo constituye la Formación Quebrada Marquesa. La Formación Quebrada Marquesa es descrita como una secuencia de rocas sedimentarias clásticas de origen continental y lavas andesíticas de color gris rojizo. Esta formación contiene en su parte media, mantos de manganeso; en algunos lugares presenta, cerca de la base, lentes de arenisca calcárea con fauna fósil.

Intrusivos Cretácicos: Llamados "Franja Central" en la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, están constituidos por extensos plutones que incluyen desde granitos a dioritas.

Formación Confluencia: Se observa en la Hoja Andacollo-Puerto Aldea. Es una secuencia sedimentaria continental que comprende facies fluviales, constituidas por gravas gruesas con intercalaciones de areniscas y lentes de limos; y facies aluvionales, constituidas por brechas muy gruesas con abundante matriz limoarenosa.

Intrusivo de Tablalalume: Batolito presente en las cercanías de la ciudad de Andacollo. Consiste en rocas granodioríticas tonalíticas y dioríticas.

Intrusivos Terciarios: Denominados Franja Oriental en la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, están constituidos por numerosos plutones, principalmente granodioríticos y graníticos, y en forma subordinada por cuerpos tonalíticos, monzodioríticos y dioríticos. En las Hojas Pisco Elqui y Guanta son descritos con mayor detalle y separados en: Unidad Bocatoma, Unidad Infiernillo, como parte de la Superunidad Cogotí.

- **Unidad Infiernillo:** Formada por un rosario de pequeños stocks que afloran en las nacientes del río Ingaguás y en las cercanías del embalse La Laguna. La unidad infiernillo está formada por rocas calcoalcalinas. Sus características geoquímicas son parecidas a la Formación Doña Ana, sin embargo, la Unidad Infiernillo posee valores de U y Th muy elevados.
- **Unidad Bocatoma:** Está formada por tres plutones mayores, que presentan contactos tajantes y limpios con la roca de caja y escasos xenolitos o diques. El principal tipo petrográfico son granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.

Formación Cerrillos: Conjunto de rocas predominantemente epiclásticas (conglomerados, brechas y areniscas) en su sección inferior y volcánicoepi-piroclásticas (andesitas, brechas, conglomerados, con intercalaciones calcáreas, finas) en su sección superior.

Formación Los Elquinos: Conjunto de lavas y rocas piroclásticas (tobas y brechas). Las brechas riolíticas basales de la formación, conforman un nivel macizo, cuya petrografía es la de una toba de cristales brechosa, con fragmentos accidentales de andesitas, fenocristales de cuarzo y feldespato potásico, dispuestos sobre una matriz vitroclástica. Las tobas y brechas piroclásticas, de composición fundamentalmente andesítica, son intercaladas por areniscas y conglomerados (volcaruditas y volcarenitas andesíticas) que, en parte, poseen también clastos de tobas y escasos fragmentos de riolitas o cuarzo engolfado. Las lavas son relativamente escasas, encontrándose desde andesitas porfídicas hasta andesitas vesiculares y dacitas.

Formación Pucalume: En la Hoja Guanta y la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena es definida como una secuencia de origen continental, constituida principalmente por rocas sedimentarias clásticas (conglomerados, areniscas y lutitas) y, subordinadamente, por depósitos piroclásticos (tobas y brechas riolíticas) y lavas andesíticas. En la Hoja Pisco Elqui se la define como una secuencia finamente estratificada, de areniscas y conglomerados rojos, limolitas y calizas lagunares con ostrácodos.

Formación Algarrobal: Secuencia continental, formada por lavas y brechas, andesíticas, conglomerados, areniscas y lutitas, con intercalaciones de rocas piroclásticas.

Formación Las Breas: Secuencia sedimentaria continental, constituida por areniscas, conglomerados y lutitas carbonosas, con intercalaciones de tobas riolíticas y brechas tobáceas.

Formación Tres Cruces: Secuencia sedimentaria marina, constituida por conglomerados finos, areniscas cuarcíferas, areniscas calcáreas, calizas fosilíferas y lutitas.

Formación Matahuaico: Conjunto de brechas, lavas y tobas riolíticas, y niveles sedimentarios intercalados (areniscas, conglomerados, lutitas).

Formación San Félix: Secuencia sedimentaria formada por rocas clásticas gruesas (conglomerados), con intercalaciones de volcarenitas, grauvacas y lutitas, de origen marino.

Unidad Chollay (Superunidad Ingaguás): La Unidad Chollay está constituida por rocas de grano grueso y muy grueso, entre las que predominan monzogranitos y sienogranitos de biotita, con hornblenda muy subordinada o ausente, pero también se encuentran (en menor proporción y con menor frecuencia) facies de monzogranitos y granodioritas de hornblenda y biotita.

Estratos del Verraco: Secuencia de rocas volcánicas, principalmente andesíticas, de aspecto macizo y color verde oscuro, en la que se intercalan brechas, conglomerados, areniscas y calizas marinas fosilíferas.

Unidad El León (Superunidad Ingaguás): Numerosos cuerpos de monzogranitos y sienogranitos leucocráticos rosados de grano medio. No poseen inclusiones, ni están afectados por cataclasis, y es raro encontrar diques asociados a ellos.

Unidad Colorado (Superunidad Ingaguás): Es heterogénea, la forman desde monzogranitos y sienogranitos gráficos, de grano grueso, hasta granitos gráficos de grano fino y pórfidos riolíticos con "ojos" de cuarzo. Sin inclusiones, con escasos diques y efectos cataclásticos.

Unidad Guanta (Superunidad Elqui): Conjunto de plutones, formados por rocas leucocráticas de grano medio a grueso, y color verdoso a grisblanquecino, que corresponden principalmente a tonalitas y granodioritas de hornblenda y biotita y, en forma subordinada, a dioritas, dioritas cuarcíferas y gabros. En el sector norte de la Hoja Pisco Elqui (nacientes de la quebrada Paihuano, quebrada El pangué), se encuentra, dentro del Plutón Guanta, gran cantidad de inclusiones microdioríticas y abundantes xenolitos de esquistos pelíticos.

Unidad Cochiguás (Superunidad Elqui): Conjunto de plutones leucocráticos, de grano medio a grueso, constituidos por granodioritas y monzogranitos de biotita ± muscovita, que afloran en el curso inferior del río Cochiguás.

Formación Pastos Blancos: Potente secuencia volcánica formada por lavas y brechas piroclásticas de composición riolítica y dacítica, a las cuales se asocian pórfidos riolíticos, lavas andesíticas y rocas sedimentarias continentales. En algunas muestras de ignimbritas se han encontrado grandes cristales de granate.

Complejo Metamórfico El Cepo (CMC): Franja discontinua de rocas metasedimentarias. Muestran gran variabilidad litológica: desde metareniscas, con débil recristalización y estructuras sedimentarias primarias, hasta esquistos pelíticos de andalucita-cordierita y corneanas de biotita. Xenolitos de esquistos pelíticos, afines al CMC, son abundantes en granitoides carboníferos (Unidad EL Volcán) al norte del cerro El Volcán, en el valle del río Claro. Minerales de andalucita, en algunos casos,

presentan inclusiones carbonosas (quiasolita). Al sur del portezuelo El Cepo, en las nacientes de la quebrada El Hoyuelo, afluente del Ingaguás, existen algunos enclaves de esquistos, dentro de tonalitas foliadas, carboníferas. En ellos, además de la común asociación de cuarzo-albita-biotita, aparece granate junto a pequeños cristales de anfíbola.

Complejo Volcánico Cerro El Escuerzo: Complejo de lavas andesíticas e intrusivos sub-volcánicos. Formado por andesitas porfídicas con estructura columnar, dacitas y pórfidos dioríticos (diques y filones).

Formación Vallecito: Secuencia de brechas mal consolidadas, sedimentitas lacustres, yeso, e ignimbritas riolíticas.

Unidad El Volcán (Superunidad Elqui): Granodioritas y granitos de grano grueso a muy grueso. El Plutón El Volcán incluye, entre los ríos Cochiguás y Hurtado, numerosos xenolitos y roof pendants de esquistos pelíticos.

Formación Doña Ana: Secuencia volcánica constituida por dos miembros: el inferior (Miembro Tilito) formado por tobas ignimbríticas, riolíticas y dacíticas; y el superior (Miembro Escabroso), de lavas andesíticas y basálticas. El Miembro Escabroso incluye, a veces, fenocristales de augita y olivino (frecuentemente reemplazado por bowlingita).

Unidad Los Carricitos (Superunidad Ingaguás): Conjunto de granodioritas de biotita, que afloran típicamente en el valle del río Turbio. Poseen escasos xenolitos e inclusiones básicas y no están asociadas a los enjambres de diques que caracterizan a los granitoides más antiguos.

Formación Hurtado: Secuencia de areniscas y pizarras sub-verticales. Es una secuencia fundamentalmente pelítica, con intervalos recurrentes de cuarzarenitas y subfeldsarenitas, parte de cuya fracción detrítica (pertita, muscovita, cuarzo plutónico) deriva de la erosión de granitoides.

Formación Baños del Toro: Secuencia volcánica andesítica, con intercalaciones de conglomerados, areniscas y lutitas.

Gabros del río La Laguna (Superunidad Ingaguás): Forman sólo pequeños stocks, de algunas centenas de metros de diámetro, en el valle de La Laguna. El stock de la confluencia de la quebrada El Tapado con el río La Laguna es un monzogabro de clinopiroxeno de grano grueso.

Estratos de Río Seco: Secuencia de rocas volcánicas andesíticas de textura afanítica o porfídica, con fenocristales de plagioclasa, incluidos en una masa fundamental de microlitas de plagioclasa y minerales máficos oxidados, que presentan como minerales de alteración, clorita y calcita relleno vesículas y microvenillas.

Estratos Quebrada El Tapado: Secuencia sedimentaria marina, constituida por areniscas calcáreas, calizas, volcarenitas y conglomerados finos, con intercalaciones de limolitas yesíferas y niveles de limonitas.

Formación Cerro de Las Tórtolas: Secuencia de rocas volcánicas andesíticas. En su localidad tipo, está constituida por andesitas de anfíbola y biotita, aglomerados de bloques andesíticos con matriz tobácea, tobas de cristales andesíticos (en parte brechosas) y tobas silíceas; subordinadamente, se encuentran andesitas de augita.

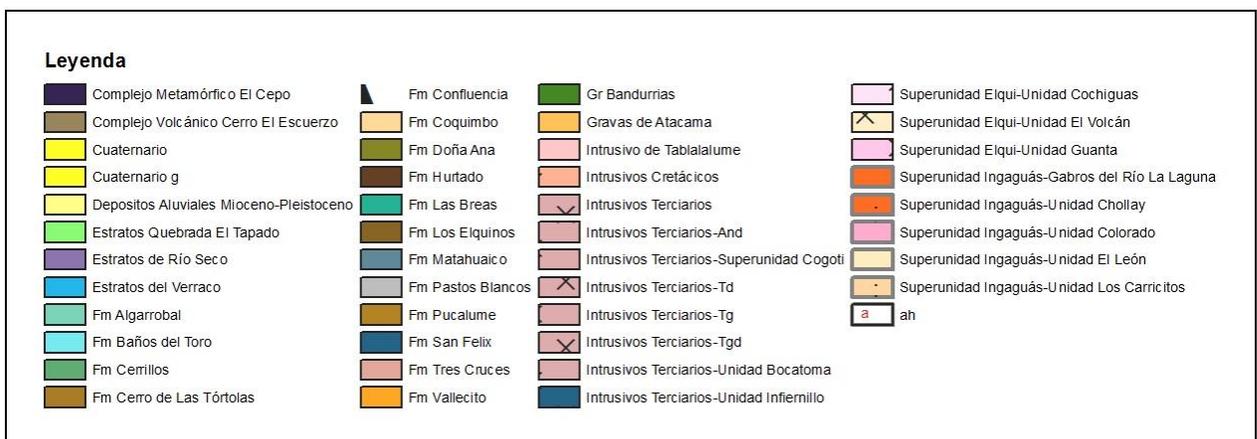
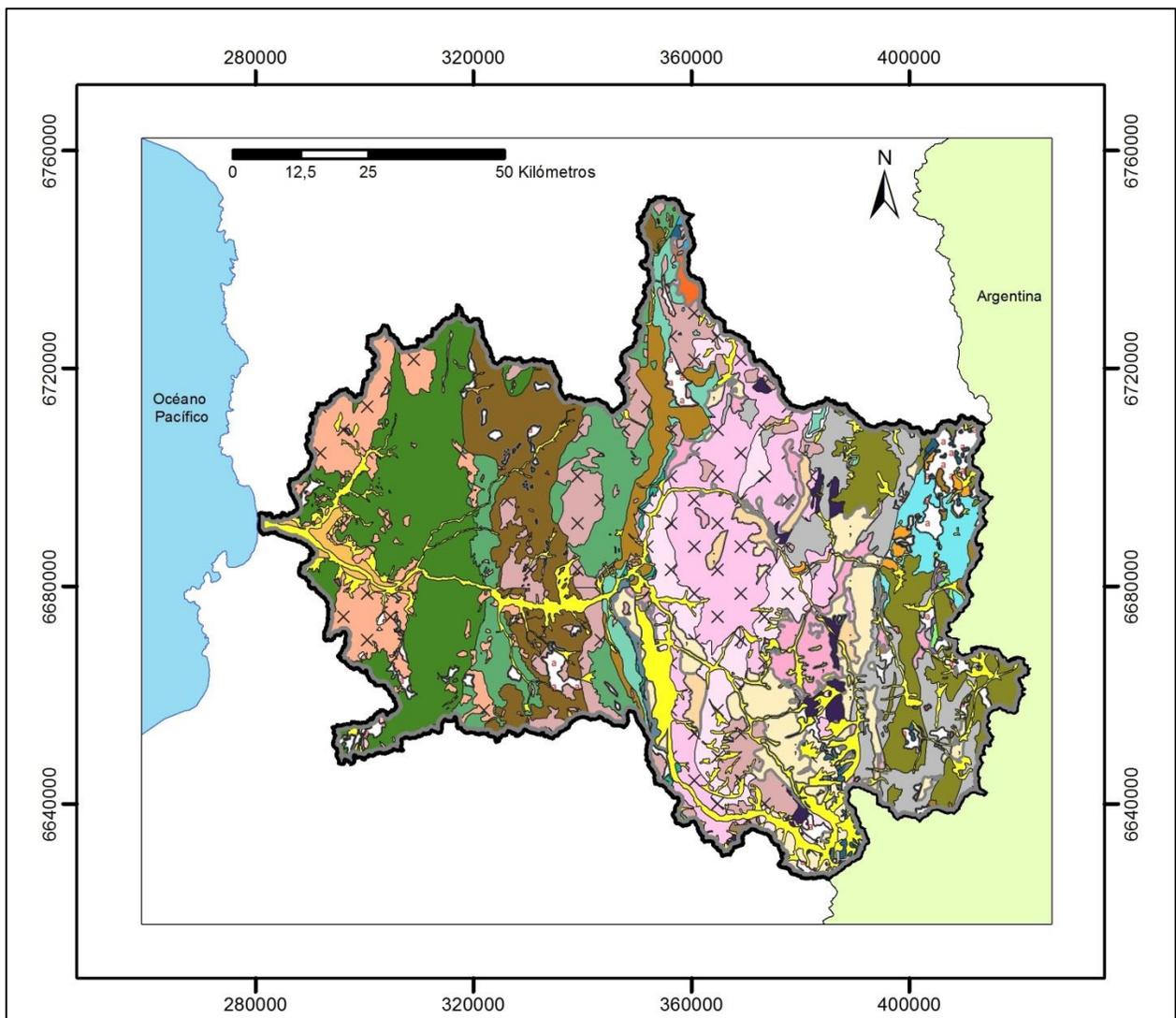


Figura 7 Mapa litológico del área de estudio. Recopilado y digitalizado por (Miralles, 2013) a partir de las cartas geológicas vigentes correspondientes.

2.4.2. ESTRUCTURAS PRINCIPALES

Con respecto a las estructuras principales de la zona (**Figura 8**), se presenta un resumen obtenido a partir de extraído de la Carta Geológica de Chile n° 67, Hoja Guanta (Nasi et al, 1990). Se describen las estructuras en orden de este a oeste y de sur a norte.

Adyacente a la ciudad de Andacollo, de rumbo NS, descrita como una falla “extensiva”. Se le ha asignado una actividad posenriquecimiento supérgeno del pórfido cuprífero de Andacollo. Aquí también se observa la Falla La Caldera, de rumbo variable entre N50°E a N75°E; concordante con la dirección de convergencia de la placa de Nazca (N78°E). Al norte de Andacollo se observa la Falla Lechuza, también de rumbo variable entre N50°E a N75°E. Estas dos fallas tienen componentes de rumbo y componentes normales.

Las unidades neocomianas, en tanto, se ven afectadas por fallas normales de carácter local, pero que en ocasiones tienen importancia económica ya que, en algunos casos, controlan la alteración hidrotermal y la mineralización. Al este de Andacollo se encuentra un sistema de fallas normales de rumbo NO e inclinación hacia el este. Estas estructuras, denominadas Sistema de Falla El Romero, parte sur-central de la Zona de Falla de Atacama, se reconocen por más de 50 km. Un segundo evento estructural se evidencia en la denominada Falla El Chape, de orientación NNE e inclinación hacia el este, que se extiende por aproximadamente 50 km. Esta estructura tiene un movimiento inicial normal, reactivado en forma inversa. Al oriente de esta zona, el rasgo estructural más significativo corresponde a una estructura semicircular de 18 km de diámetro y desplazamiento normal. Esta estructura alberga, en su interior, las ignimbritas de los Estratos de Quebrada Yungay.

Por otra parte en la Cordillera Principal se presenta un estilo estructural manifestado en una serie de pilares (*horst*) de basamento y depresiones (*graben*). Algunas de estas depresiones revisten gran importancia económica (Graben El Indio) pues en ellas se preserva de la erosión una serie de yacimientos con mineralización de metales preciosos (El Indio, Tambo y Sancarrón). Las principales fallas inversas, en la zona de estudio, son las fallas Vicuña, Rivadavia, Molino Yaco, Baños del Toro, La Laguna, Río Colorado y Olivares.

La falla Vicuña constituye una estructura regional que se reconoce por más de 180 km entre Vallenar y Ovalle. En el sector de Vicuña esta falla presenta un rumbo variable entre N-S. NNE y NNO y manteo de 45°E.

La falla Rivadavia, por su parte, corresponde a un conjunto de fallas inversas, de dirección NS-NNE, con inclinación hacia el oeste, que atraviesa la localidad del mismo

nombre. Debido a la ausencia de niveles estratificados marcadores de la deformación, la zona del Batolito Elqui-Limarí (BEL) ofrece un aspecto homogéneo y macizo. Sólo en el valle del Cochiguás, se observan fallas inversas de importancia (Falla Molino Yaco) que ponen en contacto diferentes unidades de rocas intrusivas (Nasi et al, 1990).

La falla Baños del Toro, inversa, con manteo al oeste, limita el BEL por el oriente, presenta manteos de 60°-80°W y rumbo NNE-NS, y se reconoce por aproximadamente 100 km en territorio chileno, desde las nacientes del río Ingaguás, hasta el río Potrerillos por el norte. Al este del bloque de basamento central, limitado por la falla Baños del Toro, se encuentra el graben de El Indio, en el cual se disponen los afloramientos de formaciones neógenas. Al interior de esta depresión tectónica relativa, se encuentran extensas zonas de alteración hidrotermal y los yacimientos auríferos más importantes, conocidos en esta región. La región del río La Laguna-Paso del Agua Negra, al este del BEL y de la falla Baños del Toro, presenta un estilo estructural dominado por fallas inversas de alto ángulo que, inclinadas al este y oeste, limitan bloques de basamento (*horst*).

En la parte alta de la cordillera, a lo largo del valle del río La Laguna, aparece todo un sistema de fallas inversas (fallas La Laguna, Río Colorado, Olivares, y otras), limitando pilares de zócalo de segundo orden, tales como el *horst* de La Laguna, que está limitado al este por la falla Río Colorado, donde aparece un estrecho *graben* (del río Colorado), bordeado al este por la falla inversa Olivares, con manteo al este (Nasi et al, 1990).

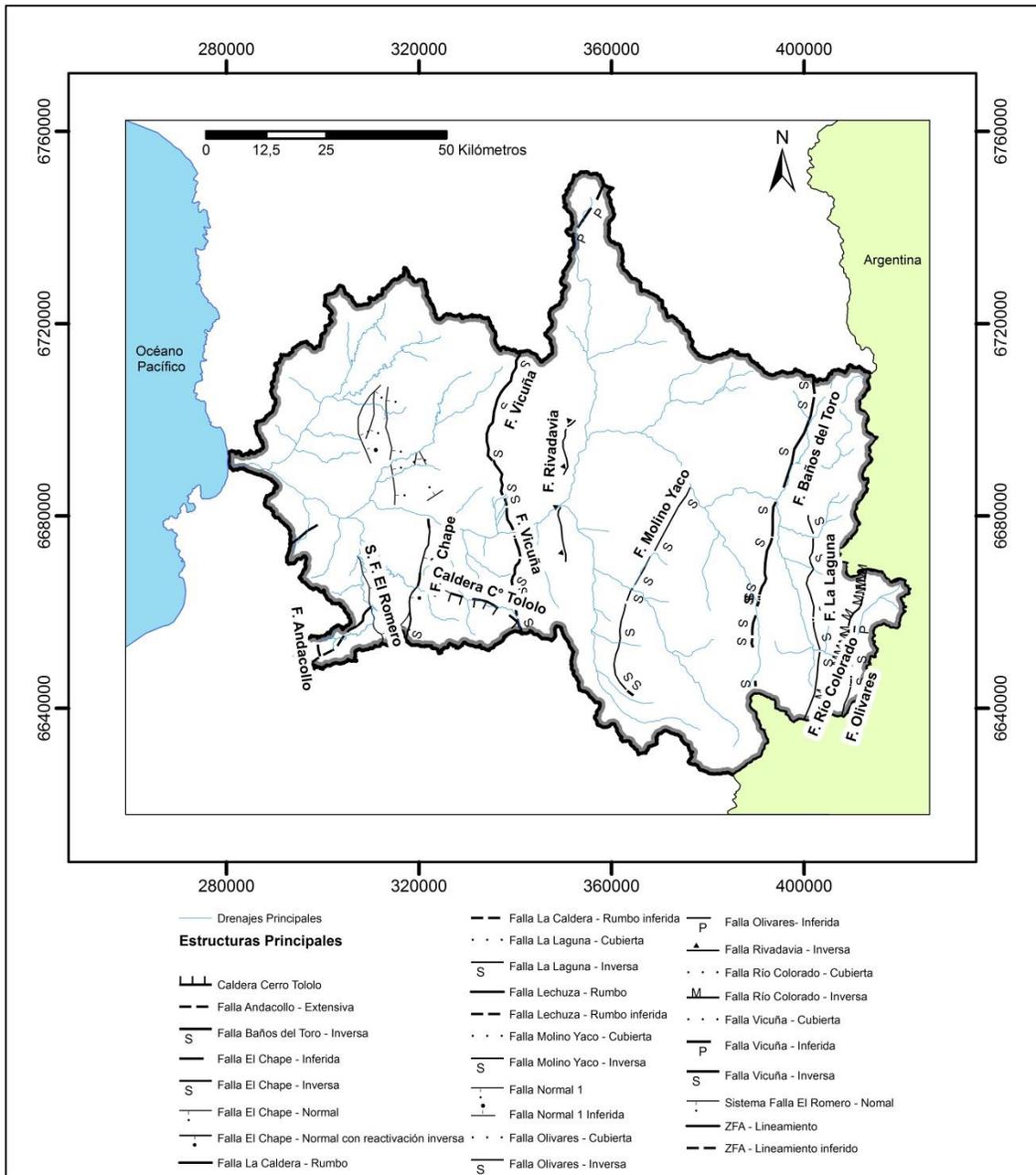


Figura 8 Estructuras principales dentro de la cuenca del río Elqui. Modificado de (Nasi, Moscoso, & MaksaeV, Hoja Guanta. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. , 1990).

2.5. MINERALIZACIÓN

Según datos del instituto nacional de estadísticas INE, durante el año 2010 los recursos de minería metálica explotados más relevantes fueron Cobre, Oro, Plata, Molibdeno, Hierro y Manganeso. Estos recursos se encuentran en yacimientos emplazados cuatro franjas N-S principales, que corresponden a las franjas

metalogénicas del Cretácico Inferior (Cordillera de la Costa), Cretácico Superior (Cordillera de la Costa - Falla Vicuña), Mesozoico-Paleógeno (Falla Vicuña, Batolito Elqui-Limarí (Cordillera Principal occidental) y Neógena (Cordillera Principal oriental), esta última franja es de particular importancia para los objetivos de esta investigación, debido a su probable influencia sobre las características espectrales, químicas y minerales del sistema hídrico conformado por los ríos Elqui-Turbio-Seco-La Laguna (**Figura 9** y **Figura 10**).

FRANJA METALOGÉNICA DEL CRETÁCICO INFERIOR (CORDILLERA DE LA COSTA)

Se encuentra a lo largo de la Cordillera de la Costa del norte de Chile, incluye algunos pórfidos cupríferos, la mayoría de los cuales son subeconómicos a excepción de Andacollo y Talcuna. Entre los 26° a 32°S existe una franja que se extiende por más de 600 km, agrupando muchos yacimientos de Fe (magnetita-apatito) hospedados en rocas volcánicas del Cretácico Inferior, afectadas por metamorfismo de contacto producido por intrusivos del Cretácico Superior-Terciario. Estos depósitos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama y forman lo que se conoce como la franja ferrífera chilena. Existen indicios menores de mineralización de cobre y de oro ligados al mismo contexto, particularmente en la periferia de los cuerpos ferríferos o en la zona de la Falla de Atacama. Existen, además, depósitos estratoligados de Cu hospedados por rocas volcánicas y volcanoclásticas, como Talcuna, y en zonas de contacto entre intrusivos del Albiano y calizas neocomianas existen skarns cupríferos **Figura 9**. A continuación se describen los distritos que presentan mineralización económica.

Andacollo: Este distrito se ubica en las nacientes de la quebrada Arrayán e incluye depósitos de Cu porfídico, Au epitermal en mantos y venas, o retrabajado en placeres, Cu y Hg en venas. Las venas y placeres han constituido la principal fuente de oro en Andacollo y han sido explotados desde tiempo prehispánicos. La mineralización de cobre en Andacollo fue descubierta por mineros de placeres hace 35-40 años. Aunque el Hg es raro en los depósitos de Cu porfídico, Andacollo es uno de los 3 depósitos en el mundo donde se ha reportado Hg (Higueras, Oyarzún, Oyarzún, Maturana, Lillo, & Morata, 2004). La mineralización del pórfido cuprífero de Andacollo se puede resumir como sigue: El sombrero contiene variadas cantidades de goethita, jarosita y hematita. El manto enriquecido presenta calcosina bordeando cantidades subordinadas de pirita y calcopirita. La mineralización hipógena consiste en pirita y calcopirita con cantidades moderadas de hematita, subordinadamente molibdenita y oro (Reyes, 1991). La

mineralización de Cu está asociada a alteración potásica acompañada de albitización (Marquardt J. , 1980). Las venas y mantos de Au, son periféricos al pórfido de Cu, a lo largo de su margen occidental. Los placeres se formaron principalmente por erosión de las venas y mantos, y están ubicados a decenas de metros o hasta 1 km desde la fuente aparente, en quebradas que cruzan el depósito porfídico de Cu. Las venas se asocian a adularia-hematita o halos de alteración clorítica. El sulfuro más común en los brotes de oro es la pirita (aurífera), que, cuando es de segunda generación, está acompañada por calcopirita, esfalerita, galena y cinabrio (Reyes, 1991). Los minerales de ganga son generalmente cuarzo y en menor ocurrencia calcita. La mineralización de oro está asociada principalmente a alteración potásica, presentando también alteraciones propilítica y argílica. La alteración potásica provoca la introducción de K₂O, el cual alcanza valores del 12-13% en algunas rocas (Reyes, 1991). Las venas de Hg contienen schwazita (tetraedrita de Hg), pirita, calcopirita, bornita y galena. Al norte y noreste de Andacollo, existen yacimientos auríferos en rocas de una unidad plutónica del Cretácico (minas Huancarará, La Monja, Iván, Las Mollaquitas). La erosión de los yacimientos de oro ha originado la formación de placeres auríferos en la quebrada Andacollo (en la naciente de la quebrada Arrayán, junto a la localidad de Andacollo) y quebrada de Talca.

Talcuna: Se ubica en el centro de la quebrada Marquesa. Los yacimientos del distrito Talcuna son vetas y mantos de sulfuros de Cu, con contenidos menores de Ag, los cuales se han trabajado desde el siglo pasado en una docena de minas independientes. Existe, además, un manto con mineralización de Mn. Al sur del distrito, este manto alcanza gran desarrollo y ha sido intensamente explotado. Los mantos cupríferos, que son los yacimientos de mayor potencial económico, se localizan en la Formación Quebrada Marquesa en dos Unidades. Los minerales de mena hipógenos incluyen: calcopirita, bornita, calcosina, galena y blenda. La ganga, también hipógena, es calcita, con cantidades menores de baritina, hematita, prehnita, albita, epidota y ceolita. La mineralización supérgena corresponde a: crisocola, malaquita, calcosina y covelina. Existe una veta, denominada Socorro, que se diferencia de las demás porque está formada por bandas simétricas de calcita y baritina, con una fina diseminación de calcopirita, bornita, galena y escasa calcosina. El manto con mineralización de Mn sobreyace directamente a los mantos cupríferos. La mineralización corresponde a: braunita, pirolusita, psilomelano, manganita y transmantita. En este horizonte se encuentran los yacimientos de Mn más importantes del país (Boric, 1985).

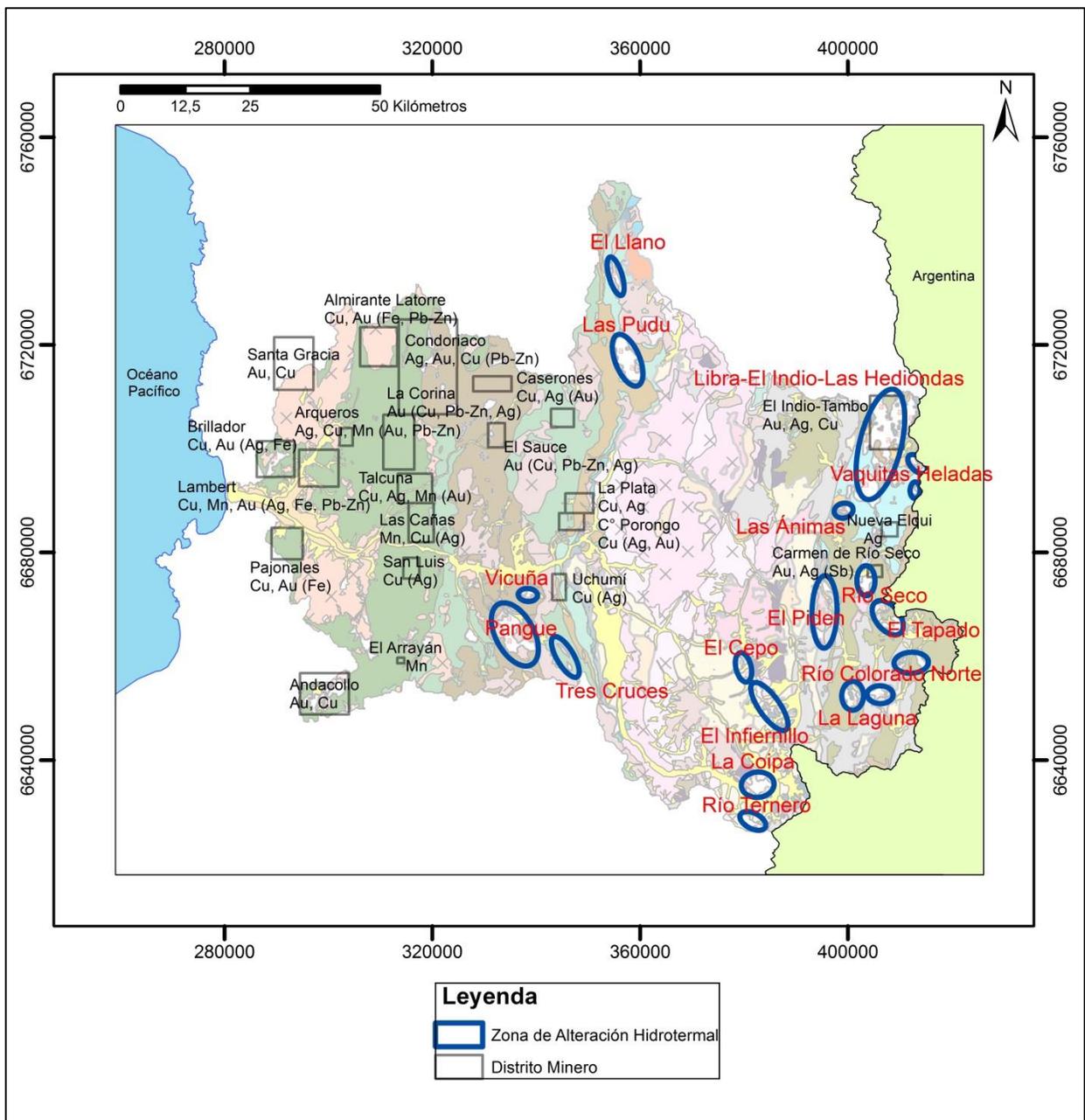


Figura 9 Distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal de la cuenca del río Elqui. La leyenda de la litología se observa en la **Figura 7**.

FRANJA METALOGÉNICA DEL CRETÁCICO SUPERIOR (CORDILLERA DE LA COSTA - FALLA VICUÑA)

Es una franja distribuida en la parte zona central de Chile, al menos entre Copiapó y Rancagua. Incluye vetas mesotermales a epitermales de oro y plata. La mayor parte de las vetas auríferas corresponden a sistemas de tipo cuarzo-sulfuros-oro

± cobre, sistemas de tipo carbonato-metales base-oro y depósitos epitermales. También se encuentran distritos clásicos de vetas mesotermiales argentíferas hospedadas en rocas carbonatadas neocomianas, tales como Arqueros.

Arqueros: Los depósitos epitermales tipo vena del distrito Arqueros se ubican 7 km al NW de Talcuna. El distrito Arqueros está actualmente inactivo, sus venas de plata fueron explotadas durante los años 1825-1881 y hasta hace algunos años se explotaba baritina. La mineralización ha sido descrita como arquerita, argentita, plata nativa, polibasita, cerargirita y pirargirita-proustita, con una ganga de baritina y calcita (Oyarzún et al, 1998).

FRANJA METALOGÉNICA DEL MESOZOICO - PALEÓGENO (CORDILLERA PRINCIPAL OCCIDENTAL)

Los depósitos minerales emplazados en rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico y Paleógeno, se ubican principalmente en la periferia de los plutones terciarios (Superunidad Cogotí). En ellos se encuentran yacimientos estratiformes de Cu (Distrito Uchumí) y vetiformes polimetálicos de Au, Ag y Pb (Mina San Miguel). La información de esta franja metalogénica se ha extrído de (Mpodozis & Cornejo, 1988)

Uchumí: El distrito Uchumí corresponde a un grupo de yacimientos de tipo manto, que fueron explotados, en pequeña escala, entre las décadas de 1920 y 1970. Los mantos mineralizados de las minas Yume, Esperanza y Santa María, se ubican en areniscas en los niveles superiores de la Formación Pucalume. La mineralización está formada por pirita, calcopirita, bornita, calcosina, malaquita, atacamita, azurita y crisocola. La ganga contiene calcita, clorita y cuarzo (Mpodozis & Cornejo, 1988).

Mina San Miguel: La mineralización presente en la Mina San Miguel, ubicada en la quebrada Dolores del río Claro, es una veta de Au, Ag y Pb, en calizas y areniscas de la Formación Tres Cruces. La mineralización contiene galena argentífera, pirita, blenda y oro en las limonitas; y está asociada a pequeños stocks terciarios (Superunidad Cogotí) expuestos en las cercanías. Las zonas de alteración hidrotermal más importantes presentes en las rocas mesozoicas son Tres Cruces, El Pangué, Las Pudú y Quebrada El Llano.

Tres Cruces: La zona de Tres Cruces se encuentra al este de la falla Vicuña, afecta a lavas de la Formación Cerrillos en las cercanías del Plutón Peralillo. La zona alterada presenta núcleos aislados de intensa silicificación y halos sericíticos periféricos. La mineralización es muy escasa, cuando está presente corresponde a sulfuros lixiviados y diseminación fina de hematita, en las zonas silicificadas. Se ha detectado diseminación de sulfuros en profundidad.

El Pangue: La zona de El Pangue está ubicada al oeste de la falla Vicuña al sur de Vicuña, y afecta a rocas de la Formación Los Elquinos. Se trata de tres áreas alteradas que muestran un modelo concéntrico de alteración sericítica en el borde, intensa caolinización en la zona central y núcleos silicificados dispersos.

Las Pudu: La zona de Las Pudu se ubica en la ladera oriental de la quebrada El Calvario, afecta a la Formación Algarrobal y la parte inferior de la Formación Pucalume. Los minerales de alteración son cuarzo, pirita, caolín, sericita, arcillas (montmorillonita), hematita y epidota. Se ha reconocido también la presencia de yeso.

El Llano: La zona de Quebrada El Llano se ubica 8 km al norte de Las Pudu, afecta a rocas intrusivas del Paleoceno-Eoceno y a la Formación Algarrobal. Las rocas se encuentran fuertemente silicificadas, con argilización de feldespatos, con pátinas de limonitas y sin manifestaciones de mineralización metálica.

MINERALIZACIÓN EN EL BATOLITO ELQUI-LIMARÍ (CORDILLERA PRINCIPAL OCCIDENTAL)

El Batolito Elqui-Limarí (BEL), de edad paleozoica, aflora en el lado este de la Falla Vicuña. Las áreas mineralizadas en el BEL son muy escasas, se restringen a pequeñas vetas de cuarzo-oro en las Unidades Guanta y Cochiguás. En esta última existen numerosas vetas pegmatíticas, cuarzofeldespáticas que, en Paihuano, están asociadas a mineralización de fluorita (Mina Mercedes).

Mina Lautaro: Se emplaza en la quebrada El Pangue. Su roca de caja corresponde a granodioritas con muscovita de la Unidad Cochiguás. Se reconocen un grupo de cuatro pequeñas vetas auríferas de rumbo norte-sur emplazadas en una zona de fracturas

paralelas a la Falla Molino Yaco, son rellenas por cuarzo lechoso, con mineralización primaria de piritita y arsenopiritita. Este tipo de vetas auríferas es de común ocurrencia en el BEL. Entre ellas se pueden mencionar, por ejemplo, las vetas que se encuentran en el valle del río Turbio o inmediatamente al este de Los Horcones.

Pegmatitas con Fluorita: En el valle del Elqui, existen dos pequeños yacimientos de fluorita: el primero, en Gualiguaica (Mina El Cine), y el segundo, en Paihuano (Mina Mercedes). La fluorita forma pequeños cuerpos lenticulares asociados a cuarzo, calcita, feldespatos potásicos, galena y blenda. Se ha señalado, además, la presencia de topacio.

FRANJA METALOGÉNICA DEL NEÓGENO (CORDILLERA PRINCIPAL ORIENTAL)

En la franja oriental de la zona de estudio, adyacente a la frontera con Argentina, se encuentra estas zonas de alteración hidrotermal, con un ancho promedio de 25-30 km, que se extienden por más de 250 km, entre los 28° y 31°S. Estas zonas se ubican en la mayoría de los casos en depresiones tectónicas al este de los sistemas de fallas Baños del Toro. Existen también zonas de alteración al occidente de la falla Baños del Toro. Los fenómenos de alteración hidrotermal afectan a rocas volcánicas de las formaciones Doña Ana y Baños del Toro y también a rocas del basamento paleozoico. Además, muestran una estrecha relación espacial con los intrusivos de la Unidad Infiernillo. Gran parte de las rocas alteradas presentan un fracturamiento moderado a intenso y es característica la presencia de sulfatos (yeso, alunita, anhidrita, jarosita). Al este de la falla Baños del Toro abundan las zonas con alteración argílica intermedia o avanzada, mientras al oeste predominan las rocas con alteración cuarzo-sericítica. Algunas zonas de alteración presentan, en los sectores más altos, depósitos fumarólicos de azufre nativo y sínteres silíceos. El caso más relevante está representado por las azufreras del Toro, en las cercanías de El Indio, además de pequeños depósitos de azufre en las alteraciones del cerro El Volcán. Asociados a esta franja de alteraciones, existe una serie de áreas con mineralización de metales preciosos. Al norte de los 30°S existen sectores con mineralización de oro-plata-cobre (El Indio, El Tambo) y de cobre (Las Hediondas), así como depósitos de plata, fuera de las áreas alteradas (Minas Nueva Elqui). Estos depósitos corresponden a yacimientos epitermales típicos, en los cuales la mineralización se dispone en vetas y/o sistemas de vetas, “clavos” y brechas hidrotermales, encajadas principalmente en rocas con alteración argílica avanzada y cuarzo-sericítica. Al sur de los 30°S existen zonas de alteración hidrotermal que han sido objeto de exploración: Río Seco, La Laguna, Colorado y El Tapado, en el río La Laguna; El Infiernillo, La Coipa y Río Ternero en las nacientes de los ríos Ingaguás y Claro.

Mina El Indio (Au-Ag-Cu): El yacimiento El Indio se ubica en las nacientes del río Malo. Hasta 1976 la única actividad minera fue la realizada por pirquineros, mineros independientes que trabajaban operaciones pequeñas durante los meses de verano. En 1978 comenzó la actividad de exploración y desarrollo de la propiedad por parte de empresas de mayores recursos. El área mineralizada se encuentra en la Formación Doña Ana. La mineralización primaria es de dos tipos: vetas macizas de sulfuros y vetas de cuarzo-oro que cortan a las primeras. La mineralización de las vetas macizas de sulfuros corresponde a un agregado cristalino de enargita y pirita de grano grueso, con cantidades subordinadas de tetraedrita, calcopirita, esfalerita y huebnerita. Parte del oro es nativo y se asocia a vetillas de cuarzo que cortan los sulfuros, pero también existe mineralización de Au asociada a la pirita. En superficie, las vetas de sulfuros se presentan lixiviadas, formando una masa silíceo porosa, con boxwork de enargita, con chalcantita, escorodita, jarosita, goethita y mackayita subordinadas. Las vetas de cuarzo-oro son vetas de relleno, con texturas de brechización, bandeamiento y depositación coloidal, formadas por sílice criptocristalina, en forma de cuarzo, que aparece junto a variedades amorfas como calcedonia, ópalo y jaspe. Las vetas contienen, además, fragmentos de las rocas de caja silicificadas con alunita, caolín y pirofilita. La mineralización principal consiste en oro nativo que se presenta finamente diseminado dentro del cuarzo, en cúmulos irregulares y en vetillas. Los principales minerales asociados al oro nativo son pirita y tenantita, encontrándose, en forma subordinada, esfalerita, huebnerita y calcopirita. Ocasionalmente, este metal se encuentra asociado a enargita, galena y digenita. En las partes superiores de las vetas, el oro muestra una asociación con telurios (hessita, sylvanita, petzita, calaverita, krenerita y telurio nativo) y también con arseniatos y sulfatos (escorodita, osarizawaita, beudantita, entre otros).

Mina El Tambo (Au-Ag-Cu): El Tambo se ubica 6 km al sureste de El Indio, dentro de la misma zona de alteración hidrotermal. El yacimiento se encuentra emplazado en rocas de la Formación Doña Ana, afectadas. La mineralización se encuentra en vetas y brechas hidrotermales. Las vetas están formadas por cuarzo, baritina y alunita. Localmente existen vetas de baritina de grano grueso y alunita intersticial, con oro visible en los planos de clivaje de la baritina, acompañado por telurio nativo. En profundidad, la alunita tiende a desaparecer, y la mineralización de oro se encuentra estrechamente relacionada a sectores silicificados, con enargita y pirita finamente diseminada.

Mina Las Hediondas (Cu): Se ubica en el extremo sur de la extensa zona de alteración de Libra-El Indio- Las Hediondas. La alteración afecta a rocas de la Formación Baños del Toro. El fracturamiento es intenso, encontrándose sectores brechizados, con una

matriz de arcillas y yeso entre los fragmentos angulosos silicificados. La mineralización primaria corresponde a venillas de enargita, pirita y arsenopirita, con una zona de sulfatos. La explotación se realizó principalmente en tajos superficiales, tanto en rocas como en escombros de falda, impregnadas con chalcantita.

Minas Nueva Elqui (Ag): Las minas Nueva Elqui se ubican fuera del área de alteración hidrotermal de Libra-El Indio-Las Hediondas. Corresponden a una serie de vetas argentíferas encajadas en rocas de la Formación Baños del Toro. Consisten en una serie de venillas de cuarzo, calcita y baritina, con galena argentífera, tetraedrita y plata nativa con escasa pirita y blenda. Otros yacimientos vetiformes menores con mineralización de plata se ubican al norte del cerro de Las Tórtolas, en la parte superior de la quebrada Barriquitas. Allí, la Formación Baños del Toro está atravesada por una serie de vetas verticales a subverticales formadas, en parte, por cuarzo y limonitas argentíferas (minas Barriquitas y Vacas Heladas).

Azufreras del Toro: Se ubican en Loma del Azufre (al sur de la mina El Tambo). El depósito está constituido, en su mayor parte, por una brecha maciza de fragmentos de rocas riolíticas fuertemente alteradas, con una matriz arcillosa amarilla y cementada por azufre nativo, el cual, localmente, también se encuentra en venillas y en bolsonadas irregulares. Sobre esta brecha, o bien, intercalada en la parte superior de ella, se encuentran niveles tobáceo-azufrosos finos y capas delgadas de sínter silíceo-arcilloso.

Río Seco: En esta zona se encuentran labores mineras antiguas, que explotaron algunas vetas de cuarzo con oro, adyacentes al cuerpo central de brechas. Inmediatamente al noreste de la zona de alteración, se ubica la mina Carmen, una veta emplazada en una zona de falla de rumbo con mineralización de oro y plata, ganga de cuarzo y baritina, y abundantes sulfuros (galena, estilbita y pirita).

El Pidén: En la ladera occidental del río La Laguna, se observan vetas con mineralización de Cu y Ag (Mina San Antonio), que conforman un sistema de vetas menores y diaclasas mineralizadas con calcopirita, bornita y calcosina, en la periferia de la zona de alteración El Piden.

Río Colorado: En Río Colorado Sur, en la Formación Pastos Blancos se encuentra pirita diseminada, "pebbles breccia", brechas hidrotermales y vetas de cuarzo con sulfuros lixiviados, bajo costras de sulfatos.

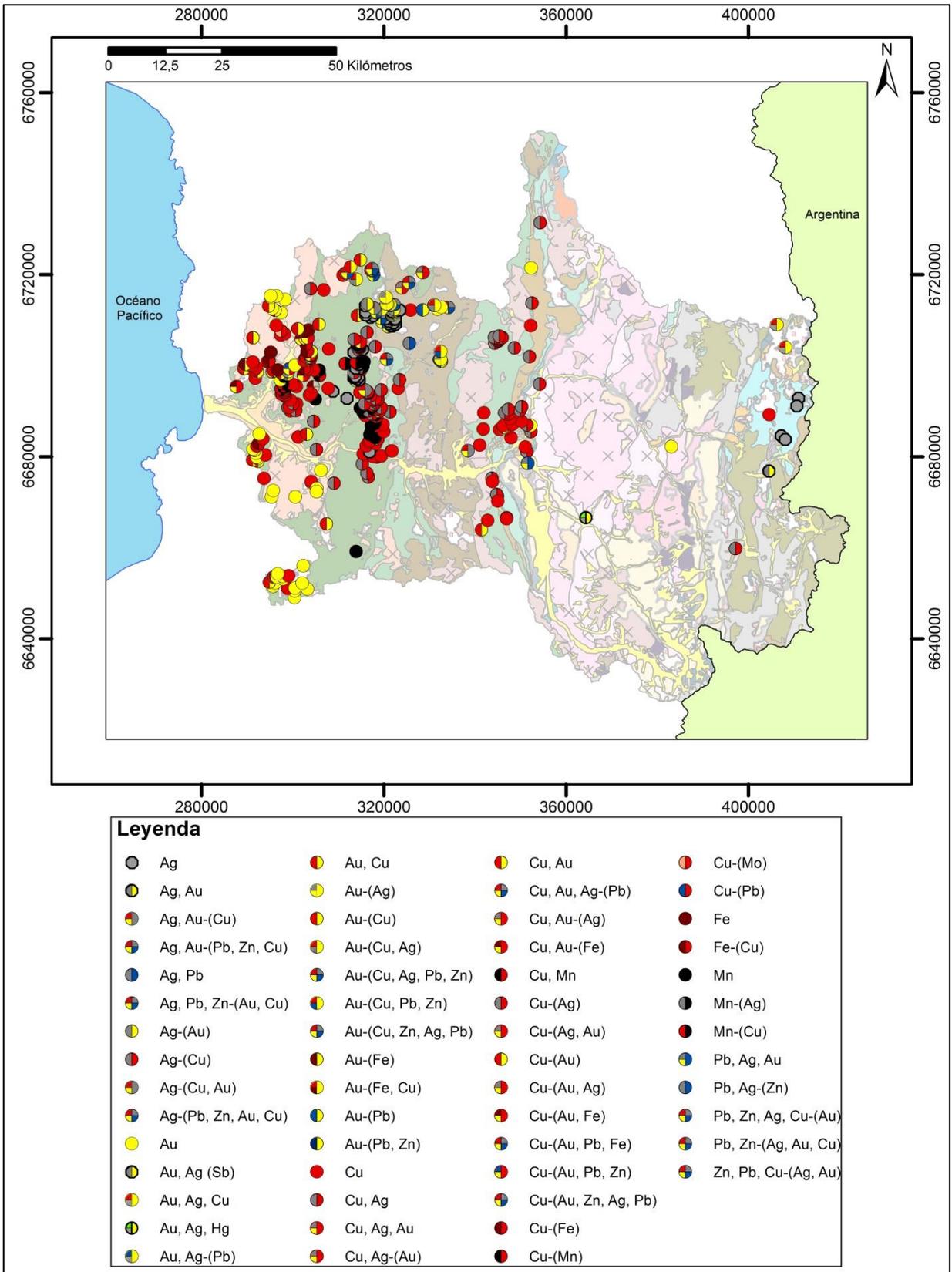


Figura 10 Yacimientos metalíferos de la cuenca del Elqui.

3. METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología empleada en esta investigación, tanto en la etapa de laboratorio (medición de espectros y análisis mineralógico) como en el posprocesamiento de los datos. Cabe mencionar que todas las muestras analizadas fueron recolectadas en campañas realizadas durante el año 2012 por la Unidad de Geoquímica del SERNAGEOMIN, correspondientes al programa de trabajo de la Carta Geoquímica de la Hoja La Serena. Del total de muestras recolectadas, un subconjunto de 126 fueron la base para la memoria de Carolina Miralles (Miralles, 2013), quien condujo el análisis geoquímico de las mismas, y un total de ochenta son la base para el presente estudio.

3.1. MEDICIÓN DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA

Las muestras son recolectadas desde el repositorio de muestras de la Unidad de Geoquímica del SERNAGEOMIN, ubicado en Av. Til Til 1993, comuna de Ñuñoa, Santiago. Se solicitan al personal correspondiente en grupos de veinte, siguiendo un orden que permite primero la medición de los ejemplares recolectados en la zona este del área de estudio, avanzando progresivamente hacia las muestras del oeste. Cada muestra corresponde a una bolsa de plástico polietileno que contiene en su interior el compósito de la muestra original – tomado desde el cauce muestreado – además de la fracción correspondiente al rechazo de la muestra tamizada con malla de acero inoxidable #80 para la obtención de la fracción fina menor a 180 μm (partículas tamaño arcilla según el sistema internacional de clasificación Atterberg (Norma ISO 14688-1)). El compósito original se tamiza con malla #18 que entrega partículas menores a 1 mm, es decir menores o iguales a tamaño de arena gruesa. Se procede a medir para cada muestra la fracción obtenida con malla #80 (ochenta muestras, **Figura 11**) y #18 (ochenta muestras), además de diez muestras en que también se mide el compósito original no tamizado. Por último se vuelve a medir un subconjunto de cerca del 10% de las muestras para cada tipo de tamaño de grano estudiado, con el propósito de realizar un test de calidad de los datos obtenidos.

Se determinó el espectro de reflectancia VIC de las muestras mediante el espectrómetro TerraSpec 4 Hi-Res, disponiendo un volumen arbitrario de compósito sobre una hoja de papel blanco. Se realizan tres mediciones por cada muestra, con una duración de 10 segundos cada una, y posteriormente se obtiene un único espectro a partir del promedio estadístico de las tres mediciones. Los datos son adquiridos mediante el programa RS3TM en formato “.asd” y luego procesados con el programa ASD ViewSpecProTM, de distribución gratuita en internet. Finalmente cada muestra promediada es exportada al programa Excel 2010. Se realiza una apropiada limpieza

del equipo entre cada muestra medida, así como también una calibración (optimización del espectrómetro y calibración del blanco de referencia) cada 20 minutos.

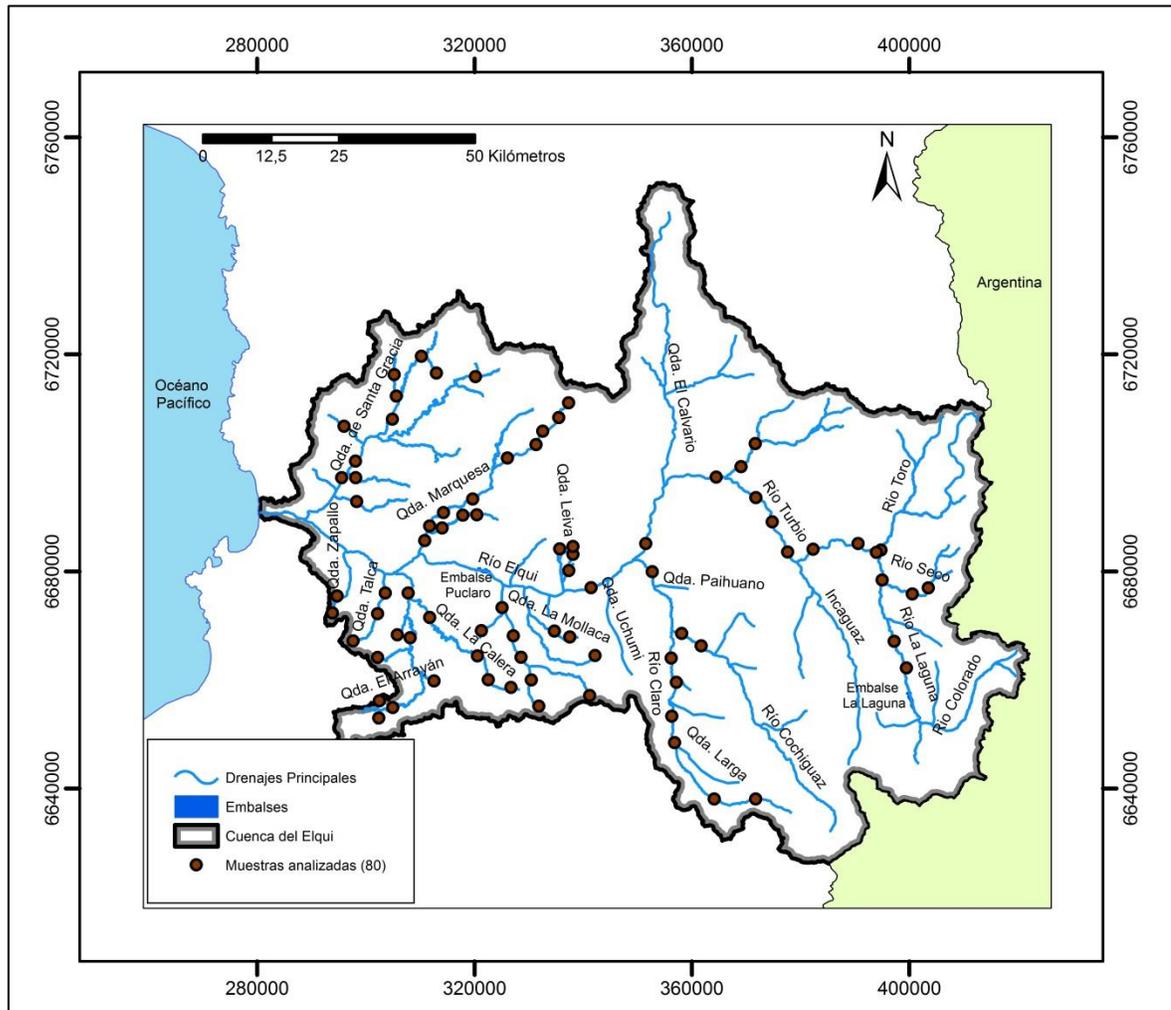


Figura 11 Proyección de las ochenta muestras de sedimento fluvial en que se basa esta investigación.

Con respecto a los cuidados a tener a la hora de realizar las mediciones, cabe mencionar los siguientes:

- Homogeneidad: es preciso que la muestra medida sea lo más homogénea posible, de tal modo de obtener una medida representativa de la mineralogía de la misma. Esto es particularmente importante al medir compósitos sin tamizar, puesto que son mucho más heterogéneos que los tamizados.
- Superficie: la muestra a medir debe ser plana, de modo tal de evitar la distorsión del espectro medido.
- Tamaño del grano: mientras más fino sea el sedimento medido, más lisa será la superficie escaneada, lo que provoca un aumento en la reflectancia de la muestra además de una firma espectral con rasgos en general más

acentuados. Lo anterior se aprecia en la **Figura 12**, donde se observa que para el mismo compuesto original la fracción sin tamizar presenta menor reflectancia que la tamizada con malla #18, y esta a su vez menor reflectancia que la fracción más fina (malla #80)

- Cantidad de material: debe ser suficiente para cubrir por completo el lente de la pistola de muestreo y de un espesor tal que impida la reflexión de luz desde el material sobre el cual se dispone el sedimento.
- Otros factores: contaminantes externos como grasa, aceite, tintas, materia orgánica, etc., provocan alteraciones significativas en los rasgos espectrales (Carrasco, 2013).

Finalmente cabe mencionar que todas las mediciones fueron realizadas sobre una hoja de papel blanco, empleándose una distinta para cada conjunto de tres mediciones.

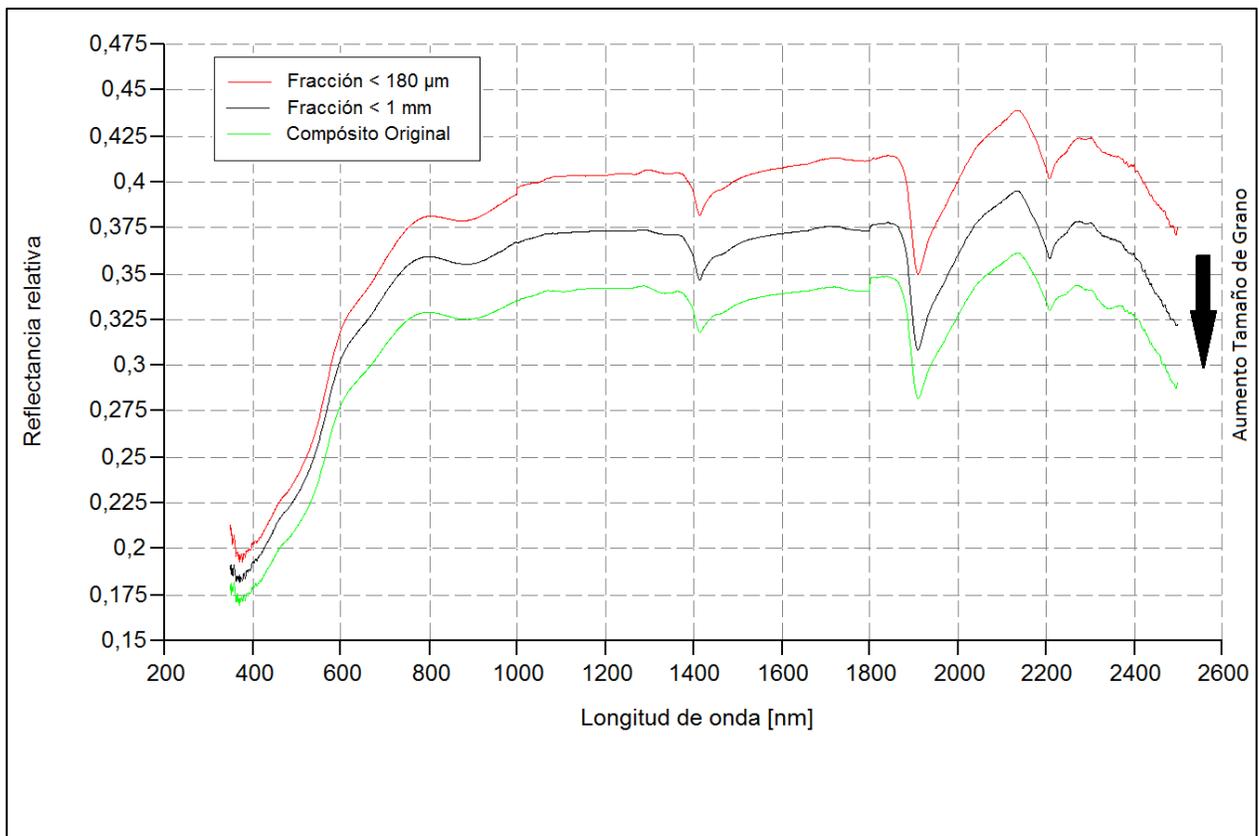


Figura 12 Influencia del tamaño de grano sobre la firma espectral. Se observa la misma muestra sin tamizar (O), y tamizada con malla #18 y #80.

3.1.1. CONTROL DE CALIDAD DE DATOS

Con el fin de estudiar estadísticamente la calidad de los datos obtenidos, se realizan un total de 29 mediciones duplicadas, 9 para las muestras de tamiz #80, 8 para las muestras de tamiz #18 y 2 para las muestras sin tamizar. Los datos obtenidos son comparados para cada par de muestras original-duplicado, por medio del coeficiente de determinación R^2 , el cual permite determinar la calidad de la metodología de medición en términos de la replicabilidad de los resultados, además de la proporción de variación de los resultados que puede explicarse mediante la metodología. En la siguiente se muestra un resumen del control de calidad realizado, donde es posible observar que los tres tipos de muestras presentan promedios del coeficiente R^2 mayores a 0.97, lo que representa valores más que satisfactorios en términos de calidad de datos. Adicionalmente, se aprecia que la calidad estadística es inversamente proporcional al tamaño de grano de las muestras (debido a la homogenización que ello implica).

Tabla 1 Resumen del control de calidad de datos.

Tipo de muestras	Tamiz #80	Tamiz #18	Sin tamizar	
Total de muestras	80	85	10	
Número de duplicados	9	8	2	
Porcentaje de duplicados	11,25	9,41	20,00	
Coefficiente de Correlación R2	Promedio	0,998	0,988	0,972
	Desviación estándar	0,002	0,015	0,027
	Varianza	0,111	0,000	0,001
	Mínimo	0,993	0,954	0,953
	Máximo	1,000	0,999	0,991

3.2. ESTANDARIZACIÓN DE LOS ESPECTROS

Los datos espectrales obtenidos pueden visualizarse y exportarse en diversos formatos, tales como DN (digital number), reflectancia absoluta, reflectancia relativa, primera derivada de la reflectancia, entre otros. El formato con el que se trabaja en este estudio es reflectancia relativa, concepto definido en el marco teórico correspondiente. No obstante, con el fin de aplicar correctamente tanto la Red Neuronal Artificial como la regresión de Mínimos Cuadrados Parciales es necesario estandarizar o normalizar los datos de tal forma de conservar las características espectrales distintivas de cada muestra, pero sin considerar variaciones en la intensidad de la reflectancia, que pueden estar dadas por diversos factores antes mencionados. Por esta razón se estudian cinco formas de presentar los datos, evaluando los resultados en términos de la calidad de

los grupos espectrales entregados por la RNA y por la robustez de los modelos de regresión generados a partir de mínimos cuadrados parciales, además de RNA.

- Modo 1: Reflectancia relativa sin procesar
- Modo 2: Reflectancia relativa segmentada en tres rangos: VNIR, SWIR1 y SWIR2.
- Modo 3: Reflectancia relativa estandarizada restando para todas las longitudes de onda el valor de reflectancia de la última longitud de onda (2500 nm), de modo tal de obtener curvas que mantienen la forma pero estandarizan la intensidad, con el mismo valor para todas las curvas en la longitud de onda 2500 nm igual a cero. Cabe destacar que esta forma de estandarización es igual a la empleada por (Carrasco, 2013).
- Modo 4: Reflectancia relativa usando la estandarización anterior en los tres rangos VNIR, SWIR1 Y SWIR2.
- Modo 5: Primera derivada de la reflectancia (**Figura 13**).

Cabe mencionar que este último modo de estandarización se realiza con el programa *ViewSpec Pro versión 6.0*, siendo necesaria la corrección de los “empalmes” entre los tres rangos de detección del instrumento Terraspec, para lo cual se aplica la función *splice correction* con gap igual a 5, y luego la aplicación de la primera derivada con gap derivativo igual a 5.

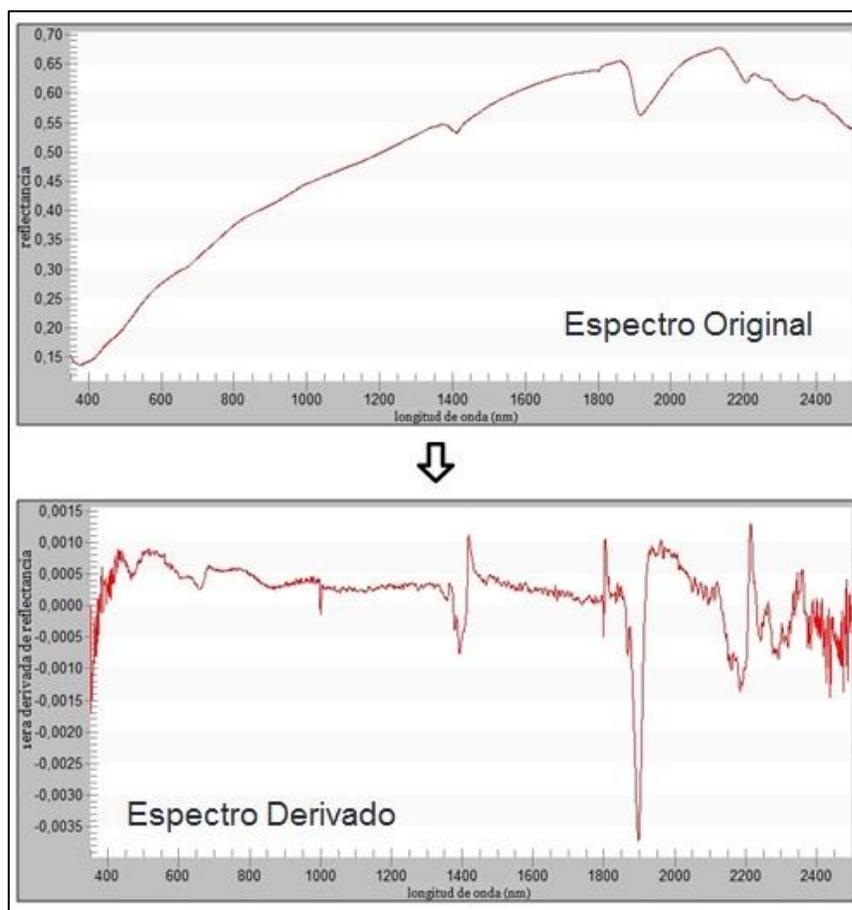


Figura 13 Ejemplo de estandarización de un espectro por medio de su primera derivada.

3.3. APLICACIÓN DE RNA

En esta etapa se presentan los datos de espectrometría estandarizados a una RNA del tipo Growing Cell Structures (Fritzke, 1994), por medio del programa Growing Cell Structures Visualization (GCSVIS) toolbox (Walker et al, 1999), de distribución gratuita en internet, conjuntamente con las modificaciones realizadas al mismo programa por (Lacassie, 2003). El programa se ejecuta a partir de la plataforma MATLAB.

Con el propósito de comparar los resultados entregados por la RNA, se realizan seis modelamientos, uno para cada modo de normalización de los datos, además de un modelamiento sobre los datos obtenidos a partir de los compósitos tamizados con malla #18, el cual fue realizado con los datos estandarizados mediante el modo 3.

Cabe mencionar que el programa antes mencionado permite definir el número de iteraciones a realizar (10 en el caso de este estudio), además de permitir definir el número máximo de nodos a agregar (15 en este estudio), lo que posibilita analizar los

resultados para cada número de nodos, debiendo el operador elegir la mejor configuración (número de nodos) a partir del análisis de la distribución de muestras por nodo, concordancia de los resultados con los objetivos del estudio y no redundancia de la información entregada, lo que usualmente ocurre en el caso de este estudio desde el octavo o noveno nodo agregado.

3.4. MINERALOGÍA DRX

Los resultados entregados por la RNA permiten dividir la población total en grupos con patrones espectrales similares. A partir de esta división se elijen doce muestras para analizar su composición mineral por medio del método de difracción de rayos X.

Para la elección de las muestras se obtiene el promedio de cada grupo espectral, comparando luego todas las muestras de cada grupo con este promedio grupal, seleccionando aquellas más parecidas a este promedio (minimización de la varianza total). De esta forma se elijen las muestras tomando un mayor número de especímenes desde aquellos grupos espectrales que presentan mayor interés, por mostrar patrones espaciales más definidos dentro de la cuenca de estudio.

3.5. MINERALOGÍA REFLECTANCIA VIC

Con el fin de determinar la composición mineral presente en las muestras analizadas, se utiliza la herramienta *spectral analyst*, presente en el programa *ENVI*. No se realiza la identificación de todas las muestras medidas, sino que de un subconjunto representativo de cada grupo espectral entregado por la RNA, en particular aquellas muestran también analizadas mediante difracción de rayos X.

De modo tal de comparar los espectros medidos con aquellos presentes en las distintas bibliotecas espectrales disponibles, es precisa la elección de algoritmos de comparación que detecten los rasgos distintivos presentes en los espectros, relegando a un segundo plano las bandas que no aportan información relevante, para efectos de clasificación.

Se prueban distintos algoritmos, entre ellos: *spectral feature fitting (sff)*, *spectral angle mapper (sam)*, *binary encoding (be)*, además del programa *SpecMin* de *Spectral International Inc.*

De todas estas opciones, se opta por el uso del primer algoritmo (*sff*), debido a que entrega los mejores resultados de acuerdo a una evaluación visual de los mismos.

Respecto a los fundamentos del método, cabe mencionar que las absorciones en un espectro tienen dos componentes: características de la envolvente o continuum y características individuales. La envolvente es la 'absorción de fondo' sobre la cual se superponen otros rasgos de absorción menores (Clark & Roush, Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications, 1984). Existe un proceso denominado remoción de la envolvente que aísla estas características espectrales, llevándolas a una base común de modo tal de poder establecer comparaciones entre ellas. Funciona dividiendo el espectro original (*S*) por la curva de su envolvente (*C*), obteniéndose el espectro con su envolvente removida (*S_{ev}*).

$$S_{ev} = \frac{S}{C} \quad (ec. 6)$$

El espectro resultante es igual a 1 cuando el espectro original y su envolvente coinciden, y menores a 1 cuando existen rasgos de absorción. Lo anterior se ejemplifica en la siguiente **Figura 14**. En ella es posible observar como los aparentemente nulos rasgos de absorción observados en el espectro original, entre los 500 y los ~1250 nm, se vuelven muy notorios en el espectro con envolvente removida, donde se observan con claridad cuatro valles de absorción.

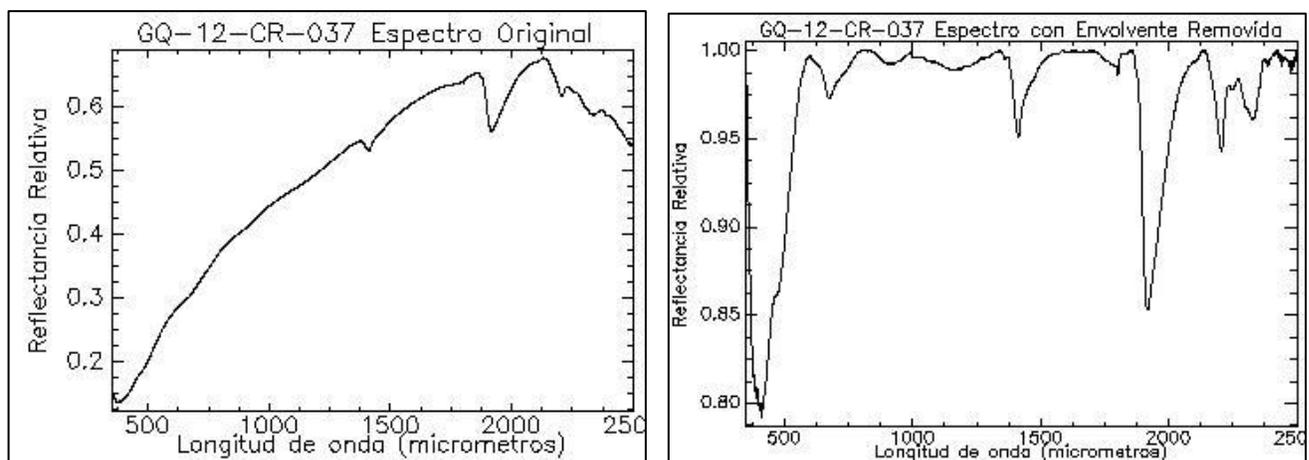


Figura 14 Normalización del espectro original mediante remoción de envolvente.

3.6. IMÁGENES SATELITALES

Por otra parte se aplicaron diversas técnicas de sensores remotos, empleando para ello el programa *ENVI* versión 5.0, de tal modo de evaluar la posibilidad de correlacionar los espectros de reflectancia medidos con la información espectral que presentan las imágenes satelitales *ASTER*, o bien extraer información de relevancia en términos espectrales y mineralógicos.

Debido a que el rango espectral usado es el visible e infrarrojo cercano, solo se trabaja con este rango (primeras 9 bandas), no usando las bandas del rango termal.

El procedimiento de trabajo empleado es selección del área de estudio, obtención de imágenes *ASTER*, unión de 9 primeras bandas con resolución de 15 metros para todas ellas, ortorrectificación y corrección atmosférica (*Dark Subtract* e *Internal Average Relative Reflectance*).

Por otra parte se procesan los seis espectros más representativos de cada nodo medidos con *Terraspec*, creando una biblioteca espectral, resampleando la información espectral desde las 2151 bandas de *Terraspec* a las 9 primeras bandas de *ASTER*.

De esta forma es posible aplicar una serie de algoritmos de clasificación sobre las imágenes satelitales, entre ellos *Spectral Angle Mapper (SAM)* (Kruse, y otros, 1993) y *Spectral Information Divergence (SID)* (Du et al, 2004), de tal forma de evaluar mediante sensores remotos las características espectrales, y por tanto geoquímicas y minerales, del área de estudio.

Alternativamente, se lleva a cabo otra metodología que involucra la siguiente estructura de información:

- a) Clasificación espectral del área de estudio, con RNA.
- b) Selección de regiones de interés (ROI por sus siglas en inglés), desde las imágenes satelitales, que se consideren representativas de los drenajes, asociados a cada nodo.
- c) Clasificación de las imágenes usando el algoritmo *Maximun Likelihood* (Richards, 1999), basado en el cálculo de la probabilidad de que un pixel dado pertenezca a una clase dada (por ejemplo una ROI), asumiendo una distribución normal para cada clase en cada banda.
- d) Posclasificación de las imágenes de clasificación (clasificador *rule*), determinando un umbral apropiado para representar de un modo satisfactorio tanto drenajes como áreas fuentes, en términos de sus rasgos espectrales.

3.7. MODELO QUIMIOMÉTRICO

De tal forma de establecer correlaciones entre la concentración geoquímica de distintos elementos y compuestos químicos, y su espectro de reflectancia VIC, se siguen los siguientes pasos metodológicos, divididos entre procesamiento de los espectros de reflectancia, procesamiento de la información geoquímica, aplicación de modelo de regresión y finalmente validación del modelo, pasos esquematizados en parte en la siguiente **Figura 15**.

Para el procesamiento de los espectros de reflectancia, se evalúan al igual que para la aplicación de la RNA distintas normalizaciones, siendo elegida la normalización por primera derivada porque: 1) permite separar los rasgos entre absorción y reflexión de la energía lumínica incidente y 2) se trata de una apropiada normalización de los espectros, despreciando diferencias en la intensidad de la reflectancia.

Una vez seleccionada la normalización, se procede a la selección de las bandas o rangos espectrales que se considera aportaran información relevante para la construcción del modelo de regresión, descartando aquellas bandas que no aporten información, puesto que podrían probablemente empeorar los resultados de la regresión. Este es un paso crucial puesto que cualquier regresión que se aplique (por ejemplo regresión MCP o RNA) se basará en la totalidad de la información entregada, es decir en todas las bandas de longitud de onda seleccionadas. Por lo tanto, un buen resultado dependerá en gran medida en la capacidad de modelamiento de la relación latente, es decir que se sabe que existe mas no se sabe cómo es, entre reflectancia y concentración geoquímica.

El modelamiento acá desarrollado es distinto del modelo de regresión empleado. A continuación se describen los pasos seguidos tanto para la regresión MCP y RNA.

3.7.1. REGRESIÓN MCP

El modelo se basa en las siguientes hipótesis, originales y no excluyentes:

- Hay ciertos elementos y compuestos químicos cuyas concentraciones están relacionadas de modo directo con la reflectancia, en particular con aquellas bandas que muestran siempre rasgos de reflexión.
- Hay ciertos elementos y compuestos químicos cuyas concentraciones están relacionadas de modo directo con la reflectancia, en particular con aquellas bandas que muestran siempre rasgos de absorción.

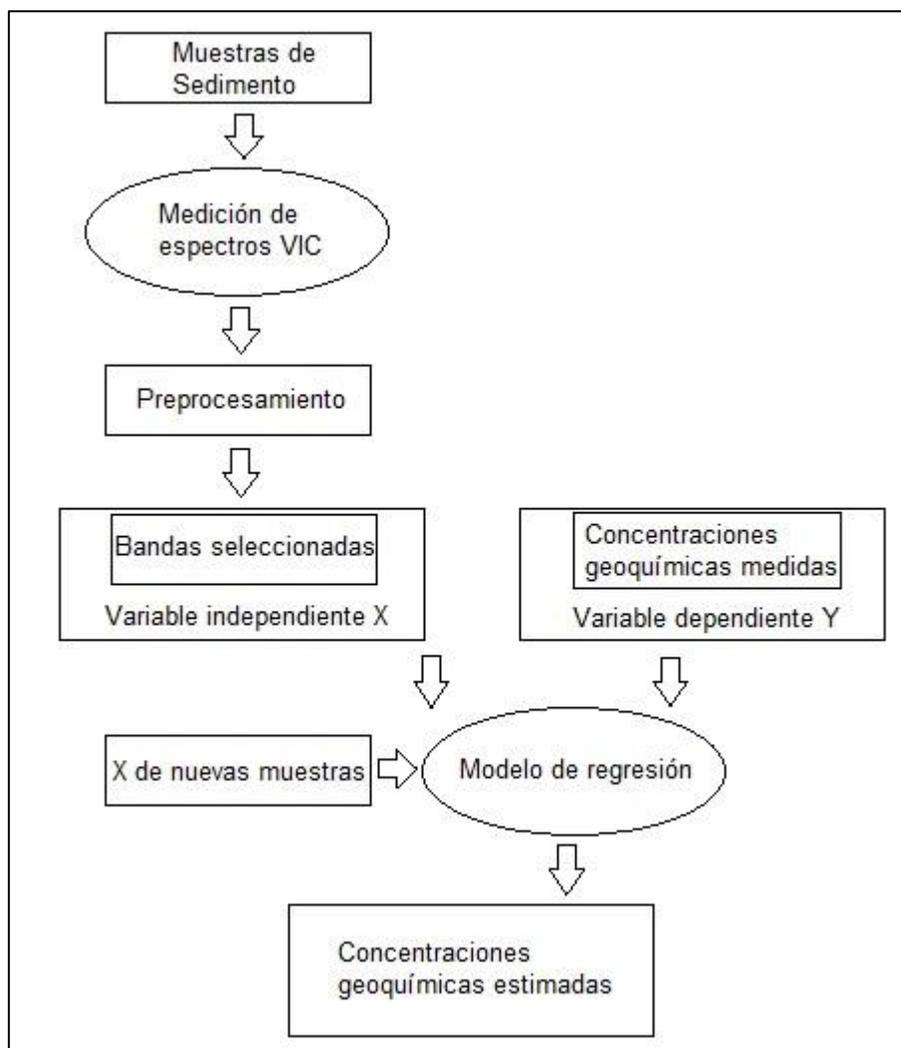


Figura 15 Esquema de pasos metodológicos para desarrollo de modelo quimiométrico. Modificado de (Shi et al, 2014).

De este modo se desarrollan dos modelamientos, uno que considera solo las bandas que muestran rasgos de reflexión (es decir derivada mayor a cero) para todas las muestras, y otro que considera solo las bandas que muestran rasgos de absorción (derivada menor a cero) para todas las muestras. El primer caso involucra la reducción del espectro original desde 2151 bandas hasta 616 bandas, bien distribuidas en todo el espectro VIC, mientras que el segundo caso reduce el espectro a solamente 121 bandas, prácticamente todas en el rango infrarrojo, salvo una banda del rango visible (352 nm). Gracias a este modelamiento se obtienen dos conjuntos de variables independientes X (bandas de reflexión o bandas de absorción).

Por otra parte se evalúa el procesamiento de las concentraciones geoquímicas medidas, en particular la necesidad de normalizar los valores. Se llevaron a cabo

pruebas con datos sin normalizar y normalizados con LOG_{10} . De este modo se obtienen las variables dependientes Y a introducir al modelo.

A continuación se realiza la regresión MCP usando el programa computacionales *STATGRAPHICS CENTURION* versión 16.2.04. Este programa entrega toda la información de interés para la construcción del modelo quimiométrico, en particular los ponderadores que multiplicados por cada valor de reflectancia en todas las longitudes de onda del modelo permiten obtener una concentración geoquímica estimada, con grados de certeza estadística determinados para cada modelo y elemento.

3.7.2. RNA

Por otra parte, la metodología llevada a cabo para la construcción de un modelo de regresión por medio del uso de RNA, también se basa en el uso de la red *SOM Growing Cell Structures*. Los pasos metodológicos son los siguientes:

1. Estandarización de los datos espectrales: al igual que para el caso de la clasificación por Nodos mediante RNA, en este caso se evalúan distintas estandarizaciones de tal modo de establecerse la mejor correlación numérica entre los datos espectrales y químicos. Se utiliza la estandarización por primera derivada de la reflectancia relativa (PD) puesto que permite la normalización de los espectros en base solamente a variaciones en la pendiente de la curva espectral original, no dependiendo de la intensidad de la reflectancia, y porque de esta forma es posible dividir el rango espectral original en tres grupos: bandas con primera derivada menor a cero, igual a cero y mayor a cero.
2. Selección de las bandas: Para seleccionar las bandas se realiza un análisis visual de los espectros derivados, de tal manera de establecer rangos espectrales en que se cumpla una relación directamente proporcional entre valor de la derivada y concentración química de cierto elemento. Para esto se promedian las concentraciones químicas de muestras con contenidos altos, medios y bajos del tal elemento. En la **Figura 16** se ejemplifica para el caso del Uranio, donde se dividen y promedian las muestras con valores en ppm menores a 1, entre 2.9 y 3.4, y mayores a 7 (cerca de ocho muestras para cada caso). De esta forma es posible determinar un conjunto de rangos, que son ingresados a la RNA.

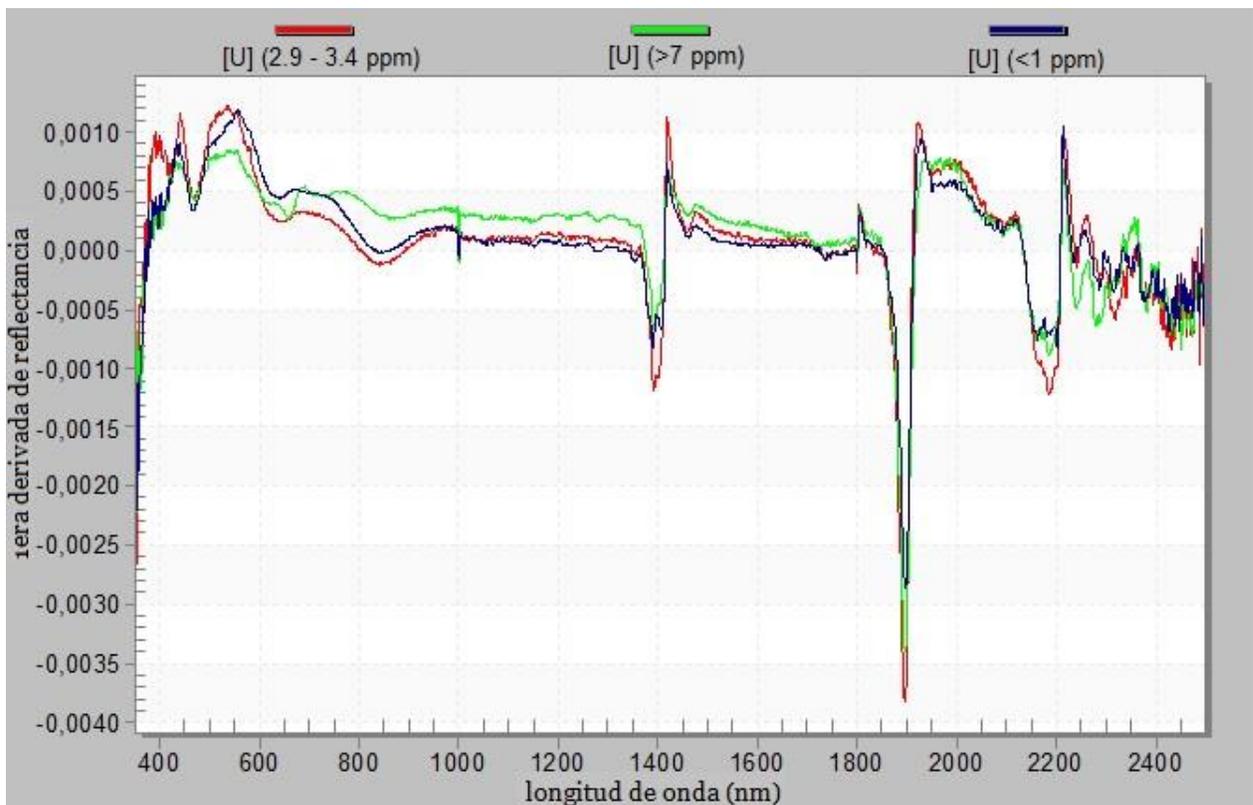


Figura 16 Ejemplo de análisis visual llevado a cabo para construir la regresión RNA. El elemento analizado es el Uranio.

3. Se analizan los datos usando la RNA utilizando solamente los datos espectrales, de tal manera de generar nodos cuyas muestras tengan concentraciones químicas dentro de un rango acotado, y que tales nodos puedan describir ordenadamente el mayor y más preciso rango de concentraciones químicas.
4. Análisis visual: con esta red de nodos generada, se evalúan casos que no cumplan la correlación esperada, reevaluando los rangos espectrales elegidos para entrar en la red, o bien eliminado tales muestras.
5. De este modo, se vuelve a correr la RNA, obteniéndose una red de muestras espectrales, que puede servir como base de clasificación para nuevas muestras con espectro de reflectancia conocido y concentración química incógnita.
6. Finalmente, se ingresan los datos espectrales derivados y seleccionados de la muestra incógnita a la RNA que es capaz de clasificar esta muestra en un nodo particular en base a su espectro de reflectancia, nodo que representa un rango de concentración química particular.

4. RESULTADOS

4.1. ESPECTROS DE REFLECTANCIA

Tal como se mencionó en la sección 3.1, se mide la reflectancia para tres tipos de muestras (sin tamizar, tamiz #18 y #80), obteniéndose tres conjuntos de datos que suman en total 175 espectros de reflectancia medidos (sin considerar duplicados ni muestras de validación) . En la **Figura 17** se muestran los ochenta espectros medidos, correspondientes a la fracción más fina (tamizada con malla #80).

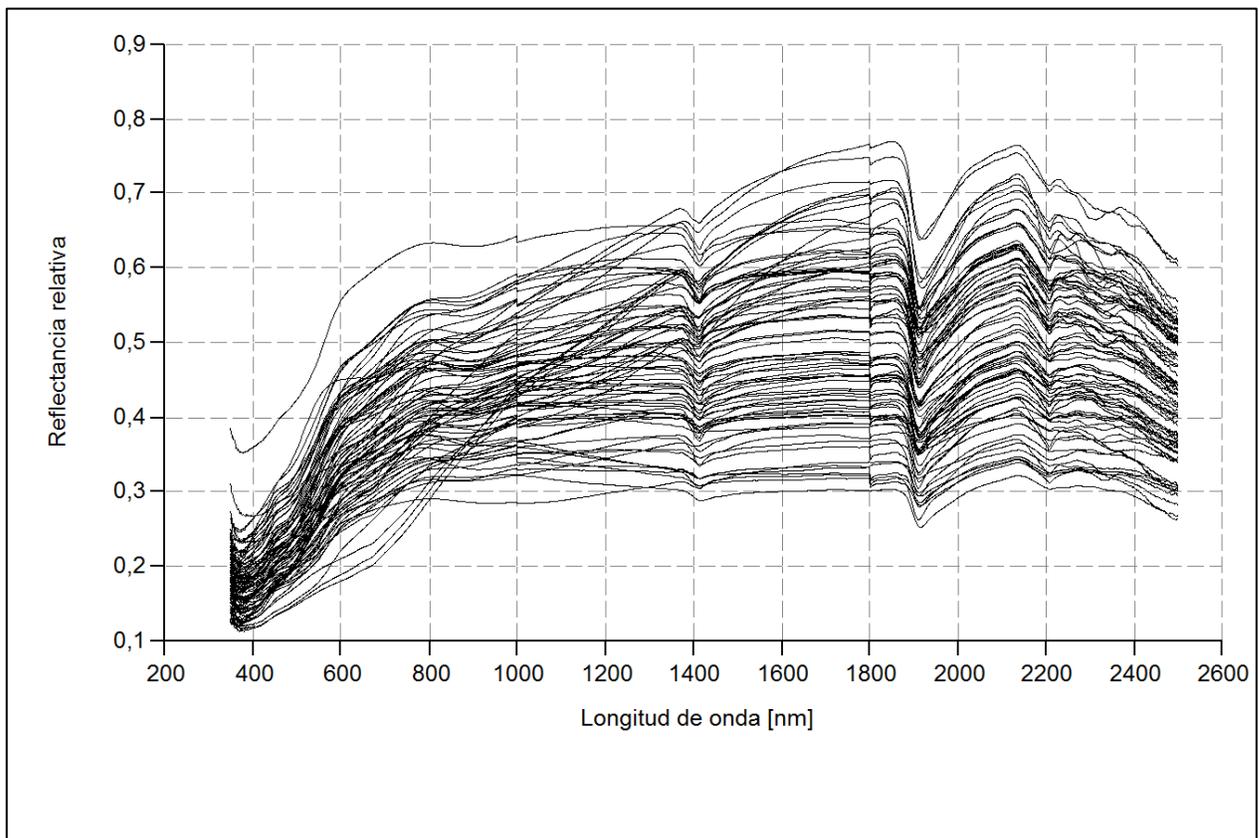


Figura 17 Ochenta espectros de reflectancia correspondientes a la fracción más fina (tamizada con malla #80), sin procesar.

4.2. ESTANDARIZACIÓN DE LOS ESPECTROS

A continuación se muestran los espectros normalizados según el modo de normalización que entrega los mejores resultados, primera derivada de la reflectancia relativa, tanto para clasificación RNA como para generación del modelo quimiométrico.

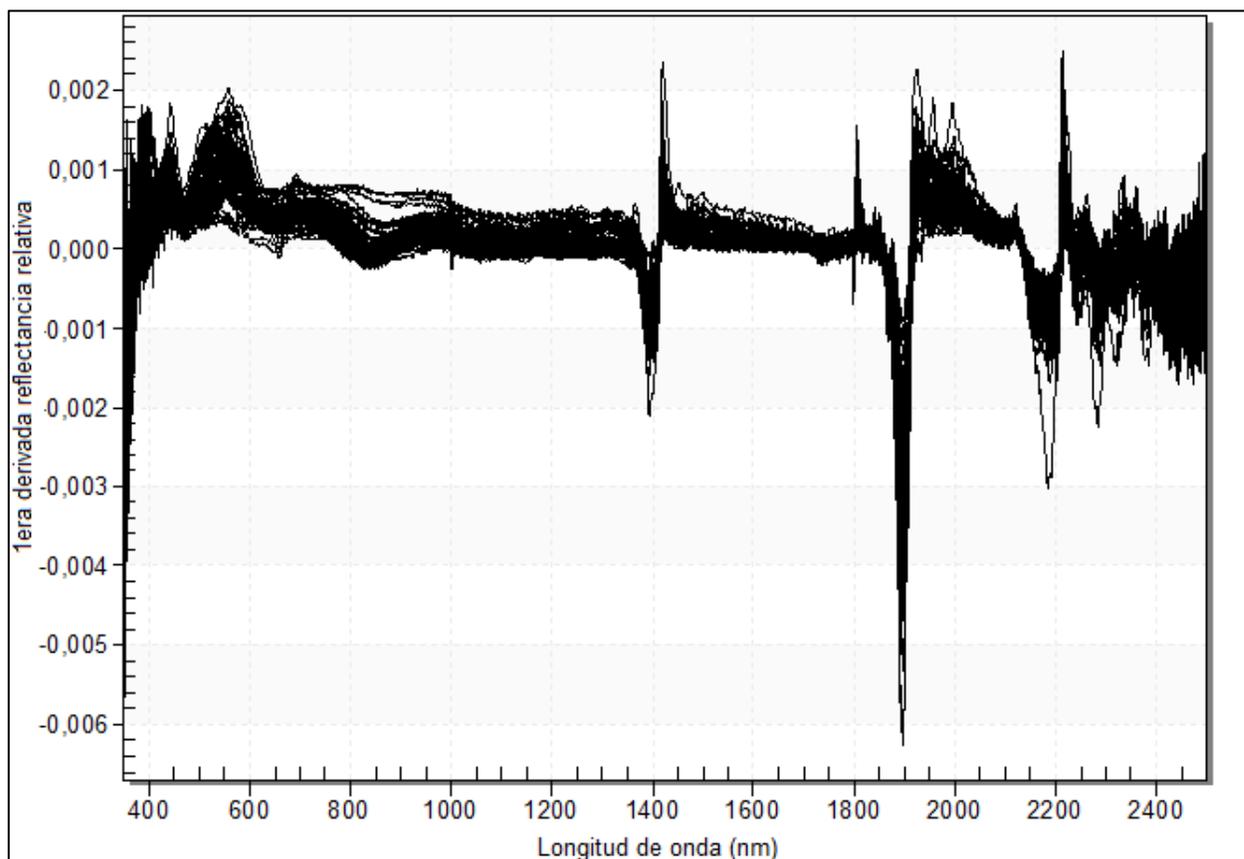


Figura 18 Ochenta espectros originales derivados por medio de software *ViewSpec Pro*.

4.3. CLASIFICACIÓN RNA

A continuación se presentan los resultados entregados por la RNA mediante el programa GCSVIS toolbox, que permiten dividir el conjunto de la población de datos en seis nodos con firmas de reflectancia distintivas además de presentar una buena distribución estadística.

De acuerdo con estos resultados es posible establecer relaciones de cercanía y distancia (relaciones topológicas) entre los distintos nodos espectrales, mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 2 Relaciones topológicas entre los nodos entregados por la RNA (Modo 5)

Nodo	Cercanía	Distancia
1	3 4 5 6	2
2	5 6	1 3 4
3	1 4	2 5 6
4	3 5	1 2 6
5	1 2 4 6	3
6	1 2 5	3 4

Un análisis visual de las proyecciones en planta generadas a partir de cada uno de los seis modelamientos permite establecer que los mejores resultados se obtienen con los modos de estandarización 4 y 5, siendo el resultado obtenido a partir de la primera derivada de los espectros el elegido para continuar con el estudio. En la **Figura 20** y **Figura 21** se observan el promedio de las muestras por nodo y la primera derivada del promedio de las muestras por nodo, respectivamente, para la estandarización 5, así como las proyecciones en planta para las estandarizaciones 4 y 5 (**Figura 22** y **Figura 23**, respectivamente).

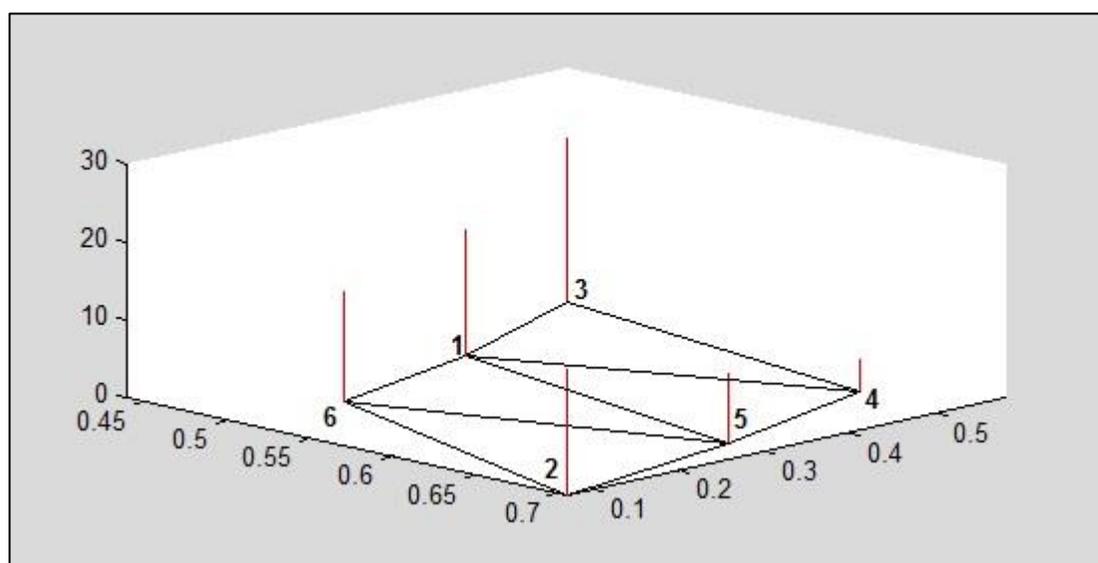


Figura 19 Resultados entregados por la RNA mediante el programa GCSVIS y el modo de normalización 5 (primera derivada). Los números indican el número de nodo.

En cuanto a los rasgos distintivos de cada nodo, es posible observar en la **Figura 20** que hay dos grupos que presentan firmas con morfologías planas y valores de reflectancia bajos, nodos 3 y 5, bastante semejantes en todo el rango VIC. Por otra parte los nodos 2 y 6 muestran firmas con alta pendiente en el rango visible, alcanzando altos valores de reflectancia a los ~2150 nm. Los nodos 4 y 6 presentan rasgos similares en el rango infrarrojo, sin embargo difieren notoriamente en el visible. Finalmente el nodo 1 se caracteriza por forma y valores de reflectancia intermedios.

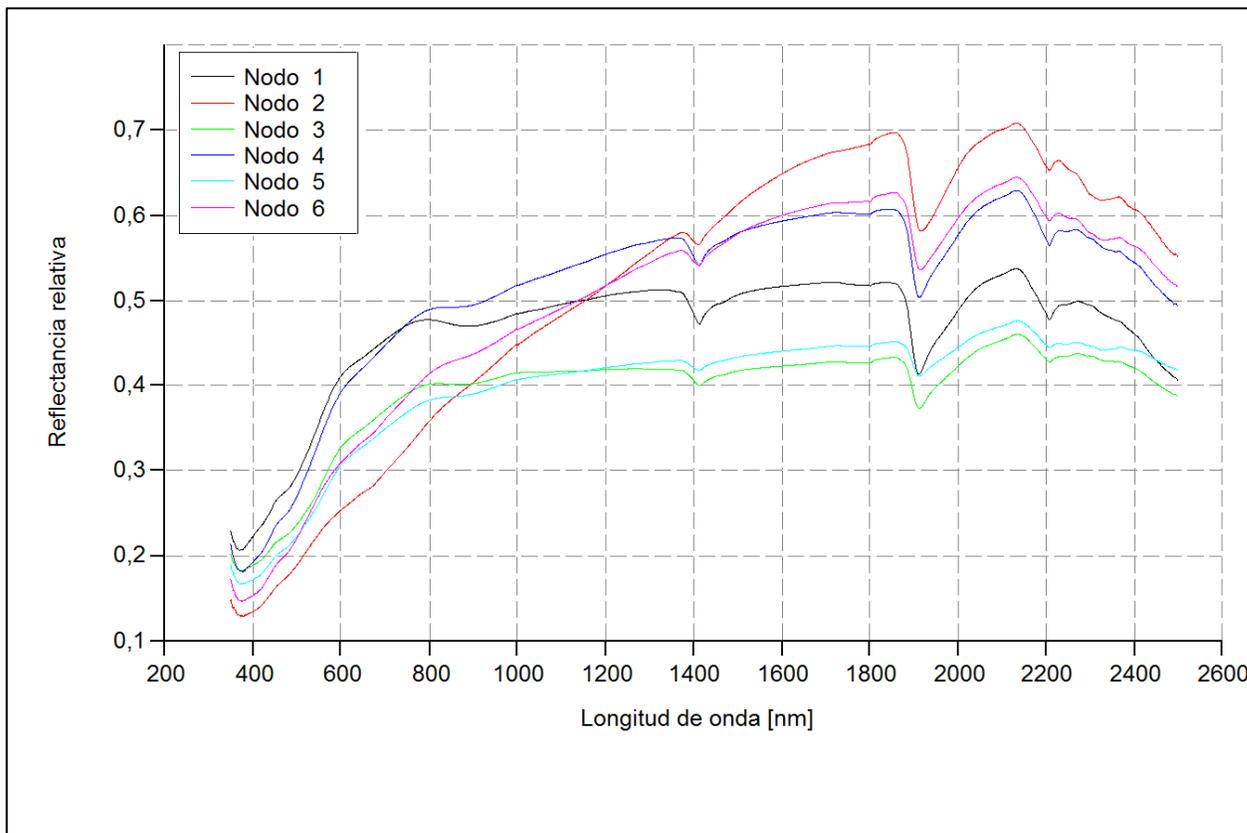


Figura 20 Espectros promedios de los seis nodos entregados por la RNA.

No obstante al derivar las firmas espectrales (**Figura 21**) se obtienen curvas que resaltan notoriamente los rasgos de absorción y reflexión, desestimando las diferencias en la intensidad de la reflectancia. Adicionalmente se obtiene un conjunto considerable de bandas (~700 bandas trabajando con 3 decimales de precisión) en que los valores son nulos para todas las muestras, lo que permite a la red centrarse exclusivamente en los rasgos distintivos.

Un análisis visual de cada grupo espectral (**Figura 21**), permite establecer que en el rango visible los nodos 1 y 2 son bastante coincidentes entre sí, el nodo 3 es ligeramente distinto a los dos nodos anteriores (segundo doble *peak* más pronunciado), los nodos 5 y 6 muestran una semejanza media entre ellos, y el nodo 4 presenta los

rasgos más distintivos, más bien planos. Por otra parte en el rango en la parte media del espectro (SWIR1) las formas no difieren notoriamente entre cada nodo, y finalmente en las mayores longitudes de onda (SWIR2) ocurren las mismas relaciones entre los nodos respecto al rango visible.

La comparación visual de los resultados entregados mediante los modos 4 y 5 de estandarización permite la elección del segundo modo como mejor resultado (**Figura 22** y **Figura 23**). La proyección mediante derivada permite la caracterización de los ríos Seco, Turbio y Elqui (Nodo 6), ríos La Laguna y quebrada La Marquesa (Nodo 3), río Claro (Nodos 4 y 5), quebrada La Mollaca (Nodo 1) y quebradas Santa Gracia y El Arrayán (Nodo 2) (**Figura 23**).

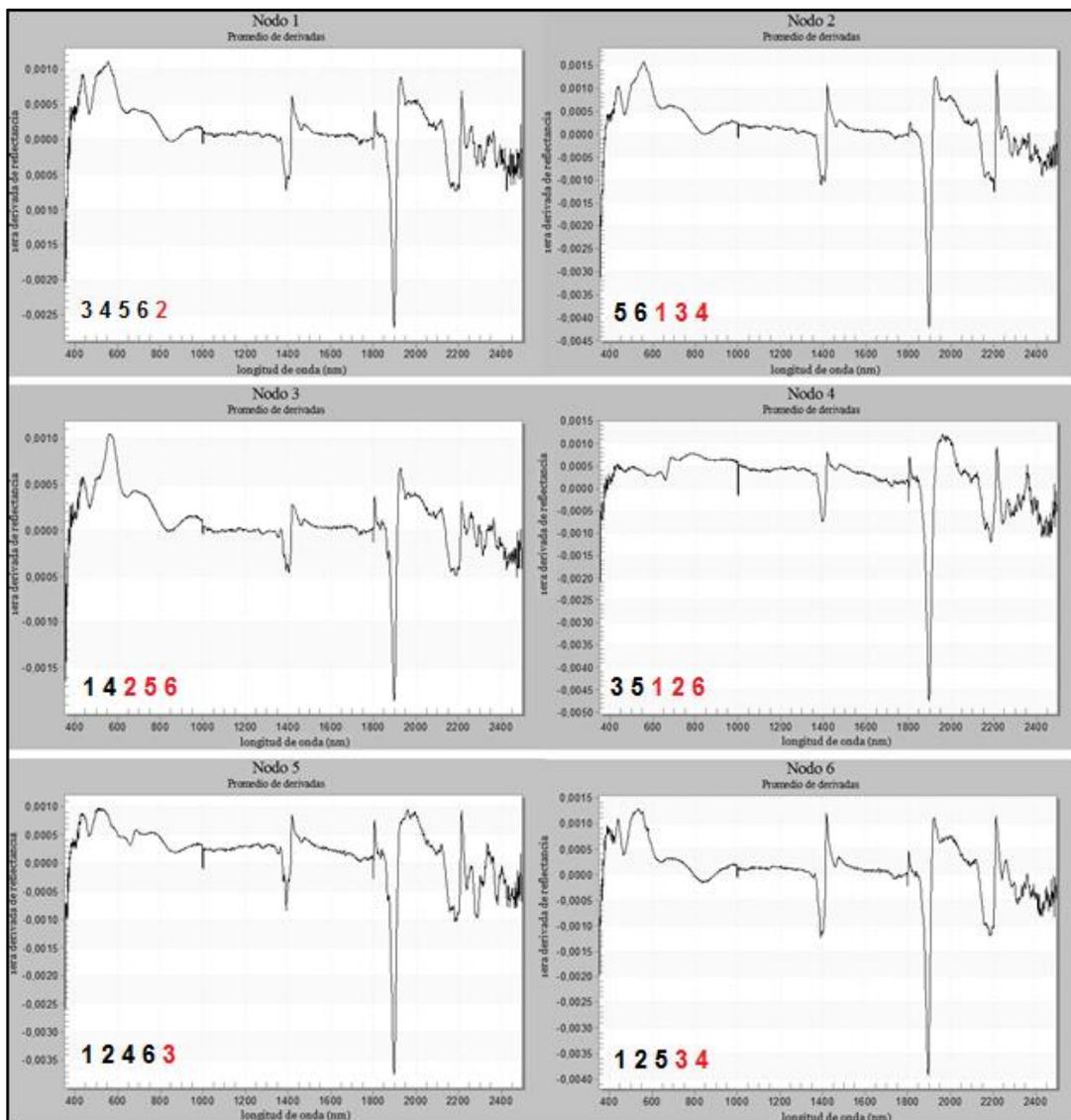


Figura 21 Se muestran los promedios de las derivadas de reflectancia para los seis espectros promedio de cada nodo entregados por la RNA (Modo 5). Relaciones topológicas RNA de cercanía (negro) y distancia (rojo).

4.4. MINERALOGÍA DRX

En la siguiente tabla se muestra la mineralogía de doce muestras de interés obtenida mediante difracción de rayos X. Las muestras se dividen en nodos de acuerdo a los resultados entregados por la RNA.

Tabla 3 Resultados mineralogía DRX.

Nodo	1	2	3			4
Muestra	GQ-12-CR-041	GQ-12-PC-138	GQ-12-CR-042	GQ-12-CR-045	GQ-12-PC-133	GQ-12-CM-193
Mineralogía	cuarzo	cuarzo	cuarzo	albita baja	albita	albita baja
	albita intermedia	calcita magnésica	albita baja	cuarzo	cuarzo	microclina intermedia
	chabazita	albita baja	calcita magnésica	ortoclasa	ortoclasa	magnesihornblenda
	clinocloro	clinocloro	clinocloro	hematita	richterita potásica	clinopiroxeno
	rambsbeckita	illita	muscovita	muscovita	biotita	muscovita
		montmorillonita	laumontita	escorodita	montmorillonita	clinocloro
				pirofillita	clorita-serpentinita	grosularia
				ferroactinolita		
			montmorillonita			
			caolinita			
			molibdenita			
Nodo	5			6		
Muestra	GQ-12-CM-144	GQ-12-CR-037	GQ-12-PC-137	GQ-12-CM-156	GQ-12-CM-157	GQ-12-CM-227
Mineralogía	albita baja	cuarzo	labradorita	cuarzo	cuarzo	albita baja
	microclina intermedia	albita baja	cuarzo	albita alta	andesina	calcita
	cuarzo	microclina intermedia	illita	illita	arsenolita	laumontita
	fluoroedenita	hornblenda	dickita	arsenolita	muscovita	goethita
	baritocalcita	muscovita	ferroactinolita	faujacita	rambsbeckita	pirofillita
	muscovita	corrensita	esfeno	rambsbeckita	chabazita	vermiculita
	corrensita	hidrobiotita		chabazita	montmorillonita-clorita	
		esfeno		tenardita	caolinita	
			clinoptilita potásica	tenardita		

Cabe mencionar que para la muestra GQ-12-CM-156, perteneciente al Nodo 6, la zeolita Faujacita corresponde a una variedad rica en Ag.

4.5. MINERALOGÍA REFLECTANCIA VIC

Los resultados obtenidos mediante el algoritmo *spectral feature fitting* son mostrados en la siguiente tabla. Las muestras estudiadas son las mismas que las analizadas mediante DRX. Para cada muestra, se analizan visualmente solo aquellos resultados con puntuación mayor a 0.8, eligiéndose solamente aquellos que muestran una notoria coincidencia en cuanto a rasgos de absorción-reflexión, despreciando las diferencias en la intensidad de estos rasgos.

A continuación se muestran en imágenes los mejores resultados para cada muestra estudiada. Dentro de estos resultados destaca la alta semejanza de la signatura espectral de la Montmorillonita Na con las muestras GQ-12-PC-138, GQ-12-PC-137, GQ-12-CR-037, GQ-12-CM-156 y GQ-12-CM-157.

De acuerdo a estos resultados, es posible caracterizar mineralógicamente los seis nodos de la siguiente forma:

Nodo 1: Sauconita, Microclina y Montmorillonita Na

Nodo 2: Montmorillonita Na, Erionita-Merlinoita

Nodo 3: Sauconita, Erionita-Merlinoita, Microclina, Montmorillonita Na

Nodo 4: Anhidrita

Nodo 5: Cuarzo, Montmorillonita Na, Caolinita-Muscovita, Erionita-Merlinoita, Sauconita

Nodo 6: Montmorillonita Na, Caolinita-Esmectita, Montmorillonita-Illita, Rectorita, Cuarzo, Erionita-Merlinoita

Tabla 4 Mineralogía a partir de algoritmo *sff* del espectro VIC usando biblioteca espectral *s06av95a del USGS* (Clark, y otros, 2003).

Nodo	1		2		3			4		
Muestra	GQ-12-CR-041		GQ-12-PC-138		GQ-12-CR-042	GQ-12-CR-045	GQ-12-PC-133		GQ-12-CM-193	
Mineralogía	sauconita	0.804 (spectral feature fitting)	montmorillonita Na	0.832	sauconita	0.807	microclina	0.802	sauconita	0.824
	microclina	0.803	erionita-merlinoita	0.799	erionita-merlinoita	0.805			microclina	0.822
	montmorillonita Na	0.800							erionita-merlinoita	0.822
									montmorillonita Na	0.817
Nodo	5				6					
Muestra	GQ-12-CM-144		GQ-12-CR-037	GQ-12-PC-137	GQ-12-CM-156	GQ-12-CM-157	GQ-12-CM-227			
Mineralogía	cuarzo	0.865	montmorillonita Na	0.883	montmorillonita Na	0.886	montmorillonita Na	0.887	montmorillonita-illita	0.850
	montmorillonita Na	0.851	caolinita-muscovita	0.854	erionita-merlinoita	0.878	caolinita-esmectita	0.867	caolinita-esmectita	0.834
			cuarzo	0.853	sauconita	0.863	montmorillonita-illita	0.862	montmorillonita Na	0.833
							rectorita	0.839	rectorita	0.816
						cuarzo	0.826			

Un análisis en detalle de los resultados permiten establecer que los mejores resultados se obtienen con Montmorillonita Na y Montmorillonita-Illita, existiendo alta semejanza tanto en rasgos de absorción como en intensidad de los mismos. Por otra parte para el caso de la Sauconita y la Erionita-Merlinoita, existen coincidencias en los rasgos de absorción, no obstante también hay diferencias, por ejemplo en el rasgo doble de la sauconita a los ~2450 nm que las muestras analizadas no presentan, así como también en las intensidades de los rasgos, casi siempre distintos. Por último en el caso de la Microclina, Anhidrita y Cuarzo, ocurren coincidencias en las formas generales del espectro y notorias diferencias a una escala menor, donde las muestras en estudio muestran una gran cantidad de rasgos menores que no son propios de los minerales antes mencionados.

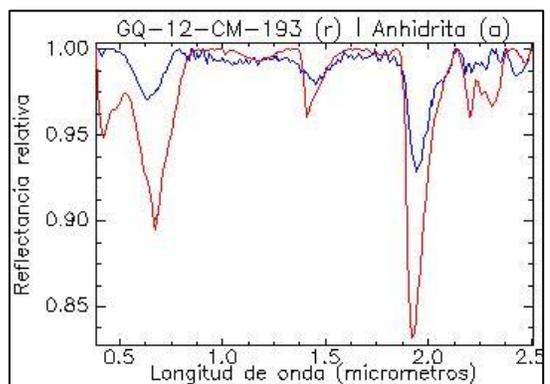
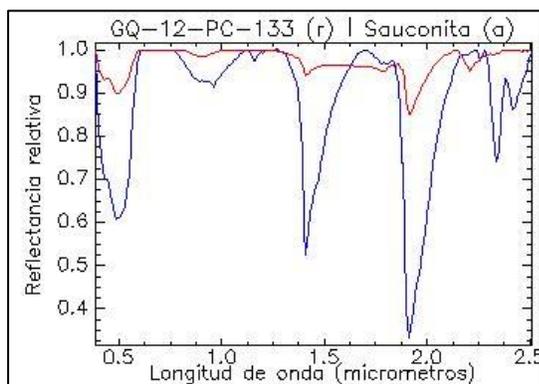
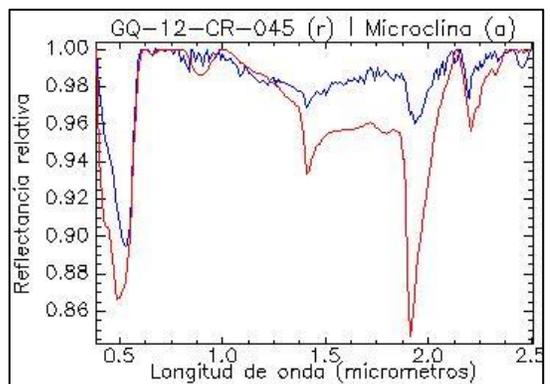
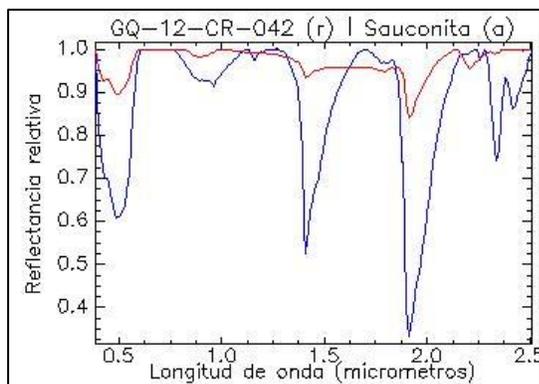
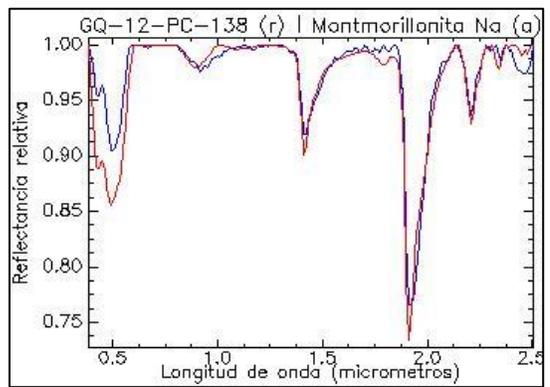
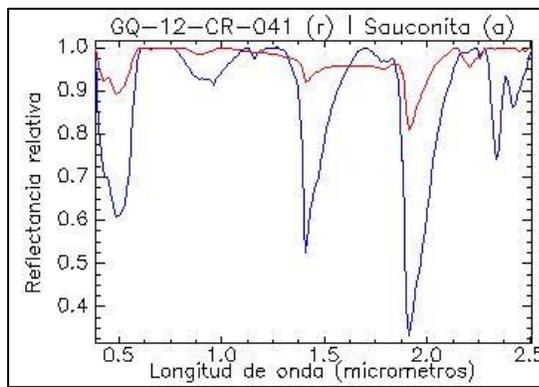


Figura 24 Resultados mineralogía reflectancia VIC.

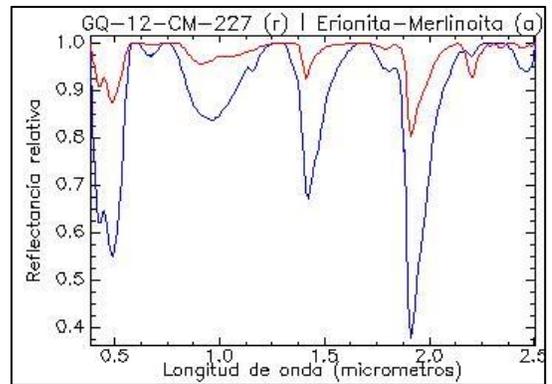
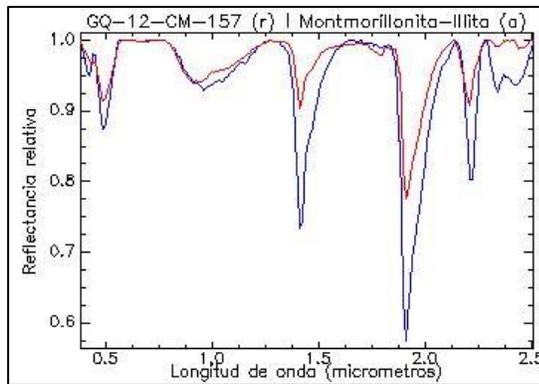
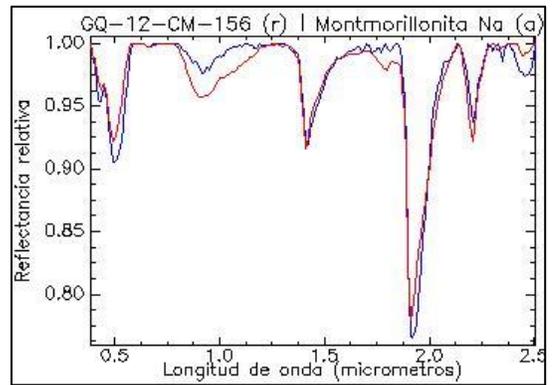
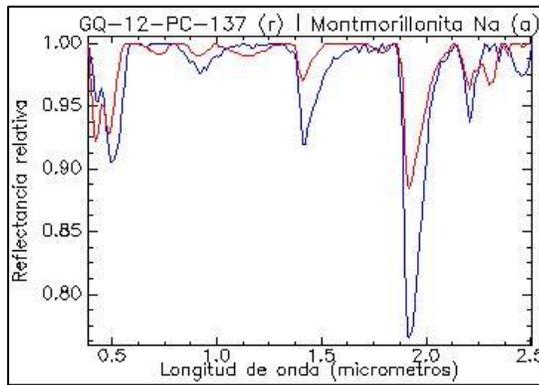
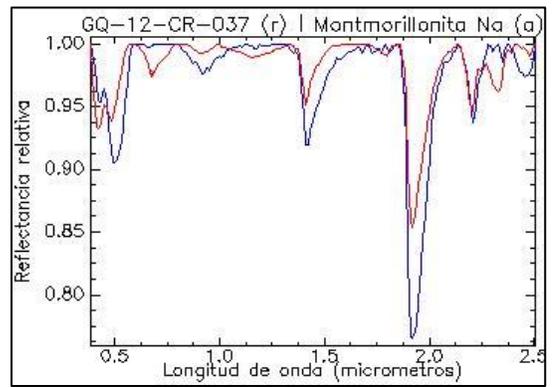
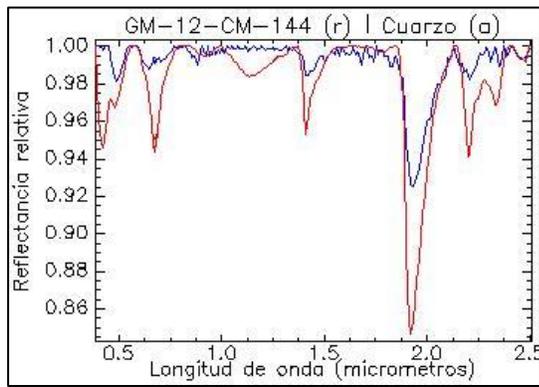


Figura 25 Resultados mineralogía reflectancia VIC (continuación).

4.6. IMÁGENES SATELITALES

Los resultados de la aplicación de técnicas de sensores remotos y la correlación entre imágenes satelitales y espectrometría de reflectancia se presentan a continuación. Esta parte del estudio se divide en clasificación de imágenes satelitales por medio de los espectros representativos de cada nodo y aplicación de matemática de bandas sin el uso de los espectros medidos.

Tal como se describirá en la sección de imágenes satelitales del capítulo de discusiones, los resultados obtenidos por medio del uso combinado de imágenes *ASTER* y espectros medidos con *Terraspec* no fueron satisfactorios. Se llevaron a cabo múltiples combinaciones para las clasificaciones supervisadas *SAM* y *SID*, y las clasificaciones no supervisadas *ISODATA* y *K-MEANS*.

Ante la imposibilidad de generar buenos resultados de la forma antes descrita, se desarrolló el análisis a partir de la definición de regiones de interés seleccionadas a partir de las propias imágenes. De este modo se obtuvo un resultado satisfactorio para el caso del Nodo 6, mostrado en la **Figura 26**. En ella es posible observar que esta signatura espectral se distribuye fuertemente desde el río Turbio hasta la unión de los ríos Seco y La Laguna al Sur, siguiendo por el río Turbio hasta cerca de la Falla Vicuña, donde se pierde tal signatura espectral. Cabe mencionar que este espectro no se presenta en ninguno de los tres distritos mineros de la Alta Cordillera, y que por otra parte también es posible observarlo desde la zona N-E de la cuenca en estudio, hacia Argentina.

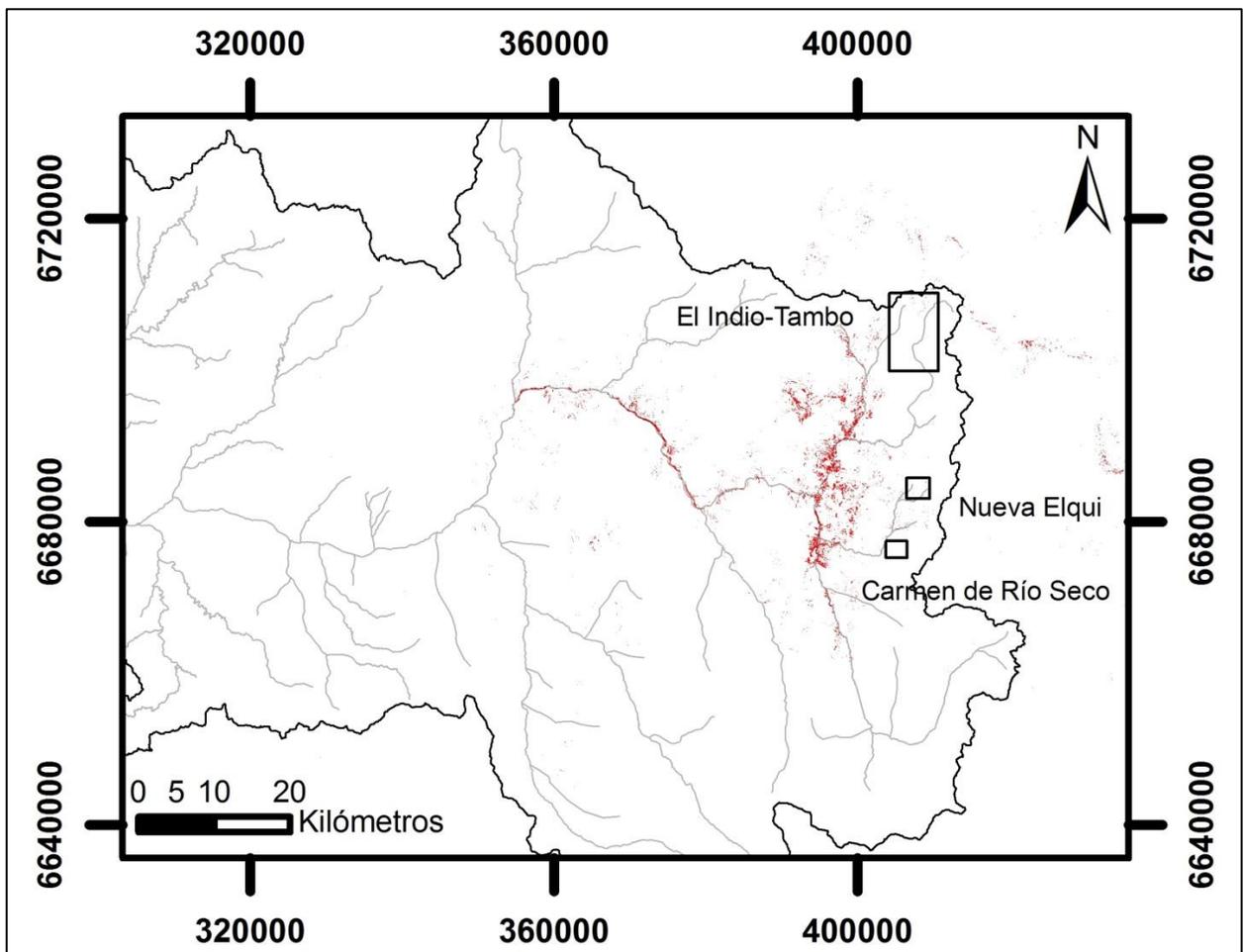


Figura 26 Resultado de clasificación supervisada con algoritmo *Maximum Likelihood* y regiones de interés seleccionadas desde la propia imagen (sin uso de la información espectral de las muestras de terreno).

Por último se busca resaltar ciertos rasgos espectrales, representativos de una mineralogía y geoquímica particular, dentro del área de estudio, por medio del uso de matemática de bandas conocidas desde la bibliografía. Por medio del uso de la razón $B5/B4$ se resalta la signatura espectral de la franja de mineralización y zona de alteración hidrotermal en la alta cordillera, que también se observa en el río Elqui, luego de la Falla Vicuña hacia el Oeste, y fuertemente en la zona de quebrada La Mollaca y río Claro, además de zonas menores en la quebrada La Marquesa (**Figura 27**).

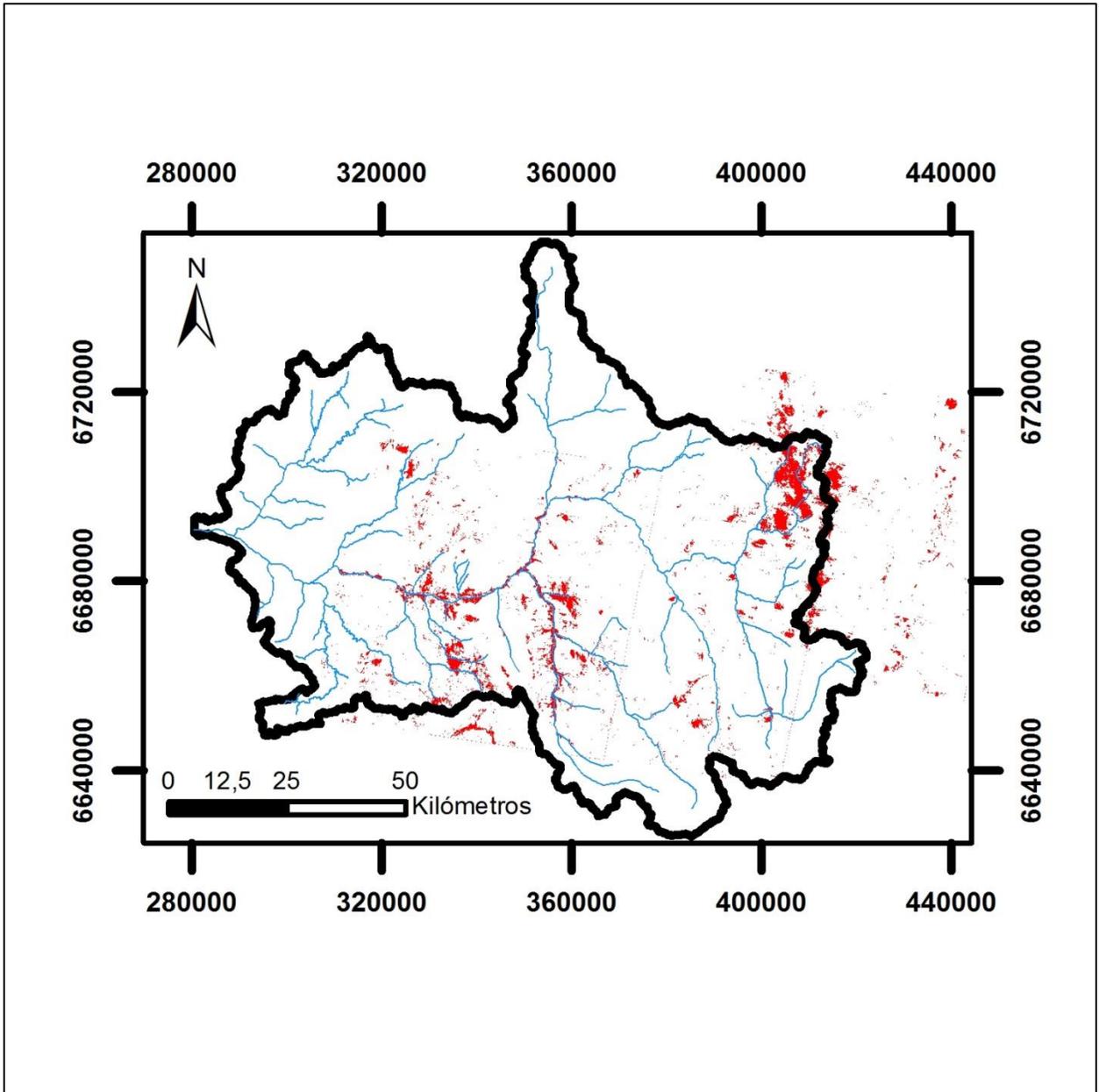


Figura 27 Resultado de matemática de bandas B5/B4 para el área de estudio. No se emplean los espectros representativos de cada nodo. Zona resaltada en el extremo NE de la cuenca corresponde a zona de alteración hidrotermal y mineralización El Indio-El Tambo.

Cabe mencionar que esta matemática de banda corresponde al Índice de Hierro Ferroso, solamente asociado a silicatos y carbonatos (no en óxidos ni sulfuros), representando minerales tales como actinolita, clorita, ankerita, piroxeno, olivino, dolomita ferrosa y siderita (Csiro, 2012).

4.7. MODELO QUIMIOMÉTRICO

4.7.1. REGRESIÓN MCP

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el modelamiento por regresión MCP, realizado para 59 compuestos y elementos químicos. La **Tabla 5** muestra el caso del modelamiento basado en bandas de reflexión, mientras que la **Tabla 6** el basado en bandas de absorción. En rojo se muestran aquellos elementos cuyos coeficientes de determinación superaron el 70%, de acuerdo a una autovalidación realizada por el programa *STATGRAPHICS CENTURION*. Finalmente los valores en blanco indican que no se realizó el modelamiento en esos casos.

Tabla 5 Coeficientes de determinación R2 obtenidos usando solo bandas de reflexión. En rojo aquellos con R2 mayor a 70. R2 (LOG10) corresponde a regresión con concentraciones en base logarítmica.

ELEMENTO	R2	R2 (Log10)	ELEMENTO	R2	R2 (Log10)
TOTAL_C	0,00	27,64	Y	50,65	65,67
TOTAL_S	46,51	33,29	La	61,90	64,72
SiO2	44,83		Ce	70,14	67,64
Al2O3	5,45		Pr	66,68	73,88
Fe2O3	0,00	0,00	Nd	65,35	67,90
MgO	39,07		Sm	53,19	64,67
CaO	61,21	63,72	Eu	0,00	
Na2O	24,83		Gd	42,96	
K2O	25,56		Tb	47,89	
TiO2	0,00	0,00	Dy	46,32	59,19
P2O5	25,26	15,33	Ho	52,88	
MnO	1,21	0,00	Er	67,43	
Cr2O3	26,42		Tm	55,27	64,13
Sc	0,00	0,00	Yb	63,83	63,45
Ba	3,35	16,91	Lu	58,73	73,05
Be	0,00		Mo	57,06	34,27
Co	24,87	14,58	Cu	51,80	51,39
Cs	0,00	5,25	Pb	0,00	0,00
Ga	0,00		Zn	0,00	
Hf	0,00	58,96	Ni	0,00	
Nb	66,12	63,69	As_	0,00	0,00
Rb	41,98	35,57	Cd	0,00	
Sn	53,05	69,32	Sb	46,41	50,55
Sr	57,49	70,82	Bi	60,01	48,40
Ta	64,71	67,92	Ag	9,67	
Th	0,00	58,96	Au	9,33	21,62
U	75,34	83,55	Hg	61,72	76,49
V	15,27	24,84	Tl	0,00	0,00
W	34,63		Se	0,00	
Zr	0,00	57,42			

De estos resultados destacan los elementos mostrados en la **Tabla 7**, donde además se muestran los valores de error cuadrático medio (ECM), destacando el caso del Uranio, con un coeficiente de determinación bueno ($R^2 \text{ LOG}(10) = 83,55$) y bajo ECM ($=0,00916$). Otros elementos con buenos resultados son el Azufre total, la tierra rara liviana Praseodimio y el Estroncio. El resto de los elementos presentan errores mayores, que implican modelos de peor calidad.

Los valores de R^2 de las tierras raras superan por lo general el 50%, para el caso del modelamiento según las bandas de reflexión. Por otra parte cabe destacar una gran cantidad de elementos y compuestos con valores superiores al 50% y 60% en R^2 , tales como el Cu, Bi, W, Cao, Zr, Sn y Nb, por nombrar solo algunos

Tabla 6 Coeficientes de determinación R^2 obtenidos usando solo bandas de absorción. En rojo aquellos con R^2 mayor a 70. R^2 (LOG10) corresponde a regresión con concentraciones en base logarítmica.

ELEMENTO	R2	R2 (Log10)	ELEMENTO	R2	R2 (Log10)
TOTAL_C	20,98	27,39	Y	31,96	
TOTAL_S	77,63	67,20	La	47,16	45,61
SiO2	44,82	41,78	Ce	41,85	
Al2O3	10,89		Pr	49,94	59,09
Fe2O3	0,00	27,34	Nd	46,57	55,07
MgO	0,00	0,00	Sm	41,83	
CaO	27,33	47,34	Eu	0,00	
Na2O	35,77	35,77	Gd	34,81	
K2O	16,52	17,10	Tb	36,25	
TiO2	0,00	0,00	Dy	29,99	46,47
P2O5	41,06		Ho	29,50	
MnO	24,18		Er	30,93	
Cr2O3	0,63		Tm	34,18	51,73
Sc	4,73	25,13	Yb	36,19	
Ba	0,00		Lu	34,95	52,09
Be	16,17		Mo	59,37	70,90
Co	2,72		Cu	51,13	37,18
Cs	0,00		Pb	0,00	0,00
Ga	0,00	1,89	Zn	0,00	0,00
Hf	0,00		Ni	0,76	29,26
Nb	28,97		As_	0,00	0,00
Rb	29,31		Cd	0,00	
Sn	38,53		Sb	33,54	
Sr	28,01	33,98	Bi	62,78	52,89
Ta	40,37		Ag	0,00	0,00
Th	0,00		Au	0,00	
U	10,47	45,19	Hg	37,97	54,11
V	7,35		Tl	0,00	
W	42,06	68,53	Se	0,00	0,00
Zr	0,00				

Tabla 7 Se presentan los mejores resultados obtenidos mediante el modelamiento quimiométrico, en forma descendente en calidad estadística, en términos de su relación R2 versus ECM.

ELEMENTO	R2	ECM
U	83,55	0,00916
Total S	77,63	0,00924
Pr	73,87	0,00773
Sr	70,82	0,00605
Lu	72,92	0,01286
Mo	70,90	0,10251
Hg	76,49	0,16310
Ce	70,14	205,13800

Finalmente se desarrolla el modelo del Uranio (en base logarítmica). En la **Figura 298** se muestra la validación llevada a cabo por el programa estadístico ya mencionado, mientras que en la **Figura 289** la aplicación y validación del modelo usando para ello 10 nuevas muestras de validación cuyas reflectancias fueron medidas en laboratorio.

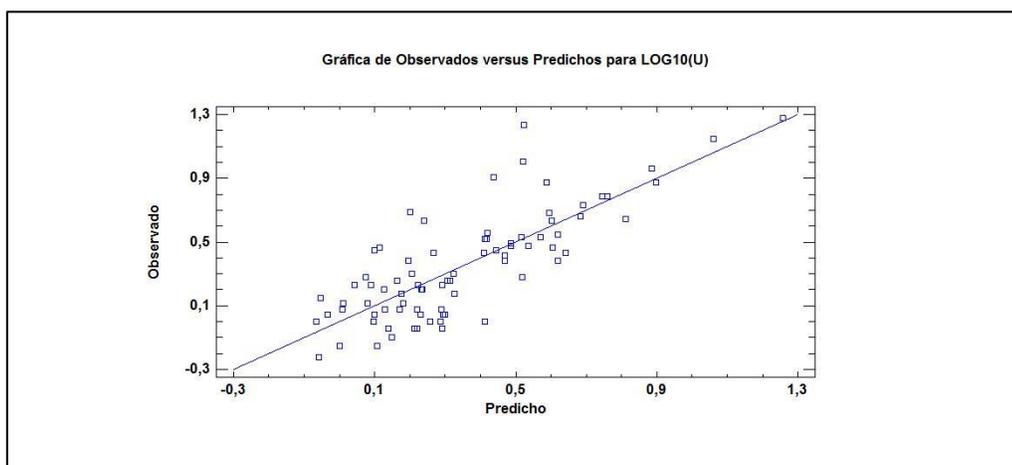


Figura 298 Gráfica de Observados versus Predichos para LOG10(U), generada por el programa *STATGRAPHICS CENTURION*.

MUESTRA	U MEDIDO (ppm)	U ESTIMADO (ppm)
GQ-13-FA-102	0,70000	0,73102
GQ-13-FA-106	1,90000	1,91170
GQ-13-FA-109	1,90000	2,10743
GQ-13-FE-060	2,00000	1,37539
GQ-13-FE-102	1,30000	1,31128
GQ-13-JP-068	1,70000	1,49986
GQ-13-JP-080	4,90000	3,31779
GQ-13-JP-082	3,80000	3,07809
GQ-13-LB-056	1,20000	0,78575
GQ-13-LB-108	3,00000	3,41669

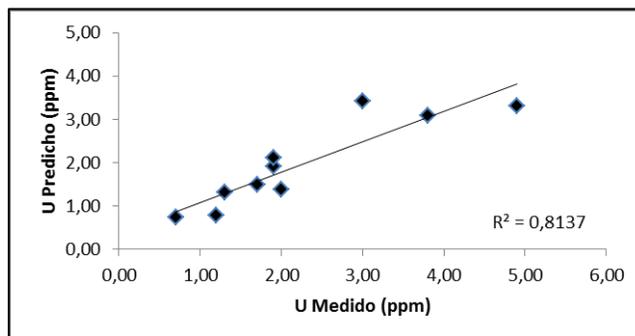


Figura 289 Valores de Uranio medidos con ICP-MS y estimados con reflectancia VNIR.

4.7.2. RNA

Con respecto a la RNA, se describen los resultados del modelo de regresión para el caso del Uranio.

En primer lugar, a partir del análisis visual de la **Figura 16** es posible determinar 6 rangos espectrales donde se cumple una relación directamente proporcional entre valor de la derivada de la reflectancia y concentración química. Estos rangos son mostrados en la siguiente **Tabla 8**

Tabla 8 Intervalos dentro del espectro donde se cumple una relación normal entre intensidad de reflectancia y concentración geoquímica.

Intervalo (nm)
1065-1070
1077-1085
1110-1380
1440-1710
1945-1970
2355-2363

Con estos rangos espectrales, se corre la RNA que entrega como mejor resultado una clasificación del espectro en 6 nodos, con una buena correlación química-espectral. No obstante se detectan 5 muestras anómalas en término de no cumplir la correlación esperada. Estas muestras son eliminadas del conjunto original de 80 muestras de entrenamiento, corriendo nuevamente la red con las 75 muestras restantes. Los resultados de esta clasificación son mostrados en la **Figura 30**, donde se observa la red de 6 nodos con concentraciones decrecientes en el siguiente orden: Nodo 2, 6, 5, 4, 3 y 1, en términos de la concentración química de Uranio en ppm, mostrado en la subsiguiente **Figura 31**, donde se observan los rangos decrecientes desde el Nodo 2, con un promedio de Uranio de 8,93 ppm, hasta el Nodo 1, con 1,44 ppm de Uranio en promedio.

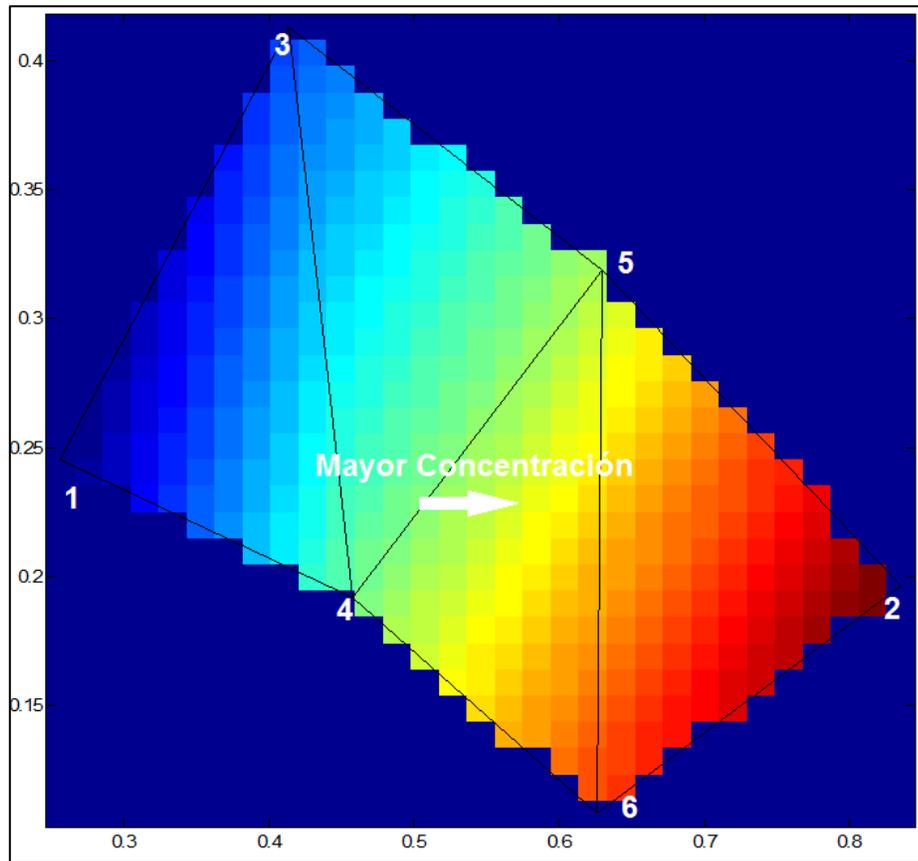


Figura 30 Red de nodos espectrales generada por la RNA para el caso del Uranio, sobre un conjunto de 75 muestras de entrenamiento.

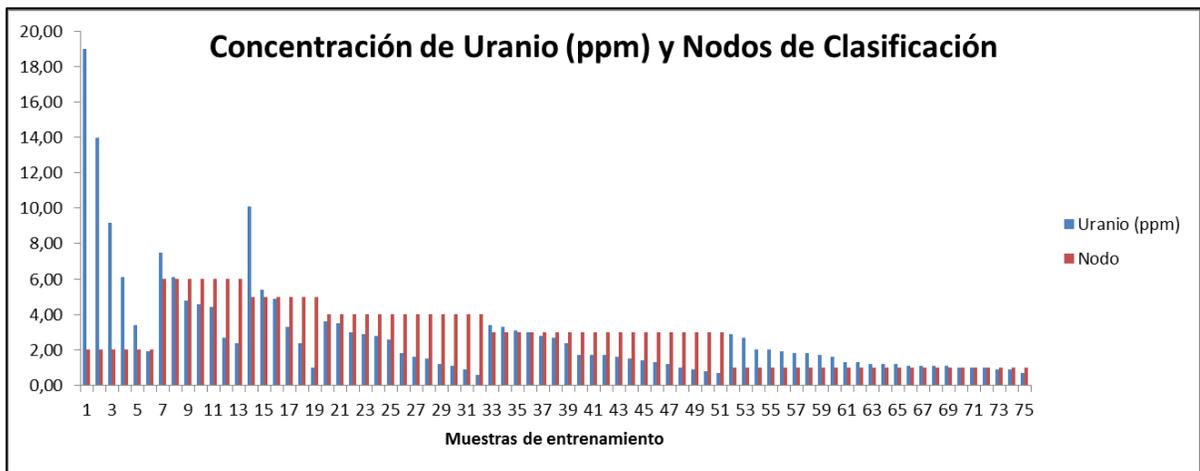


Figura 31 Modelo de regresión generado por RNA para correlación de nodos espectrales y concentraciones químicas, caso del Uranio.

La distribución de nodos y rangos químicos mostrada en la siguiente **Tabla 9**, que sirve como tabla de referencia para el proceso de clasificación, información

graficada en la **Figura 32**. De acuerdo a esta información, una muestra incógnita clasificada en el Nodo 6, por ejemplo, tendría un valor entre 2,4 y 7,5 ppm en concentración de Uranio.

Tabla 9 Distribución de nodos y rangos químicos entregada por la RNA, caso del Uranio.

Nodo	Promedio Uranio (ppm)	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Frecuencia
2	8,93	1,90	19,00	6
6	4,64	2,40	7,50	7
5	4,52	1,00	10,10	6
4	2,08	0,60	3,60	13
3	1,91	0,70	3,40	19
1	1,44	0,70	2,90	24

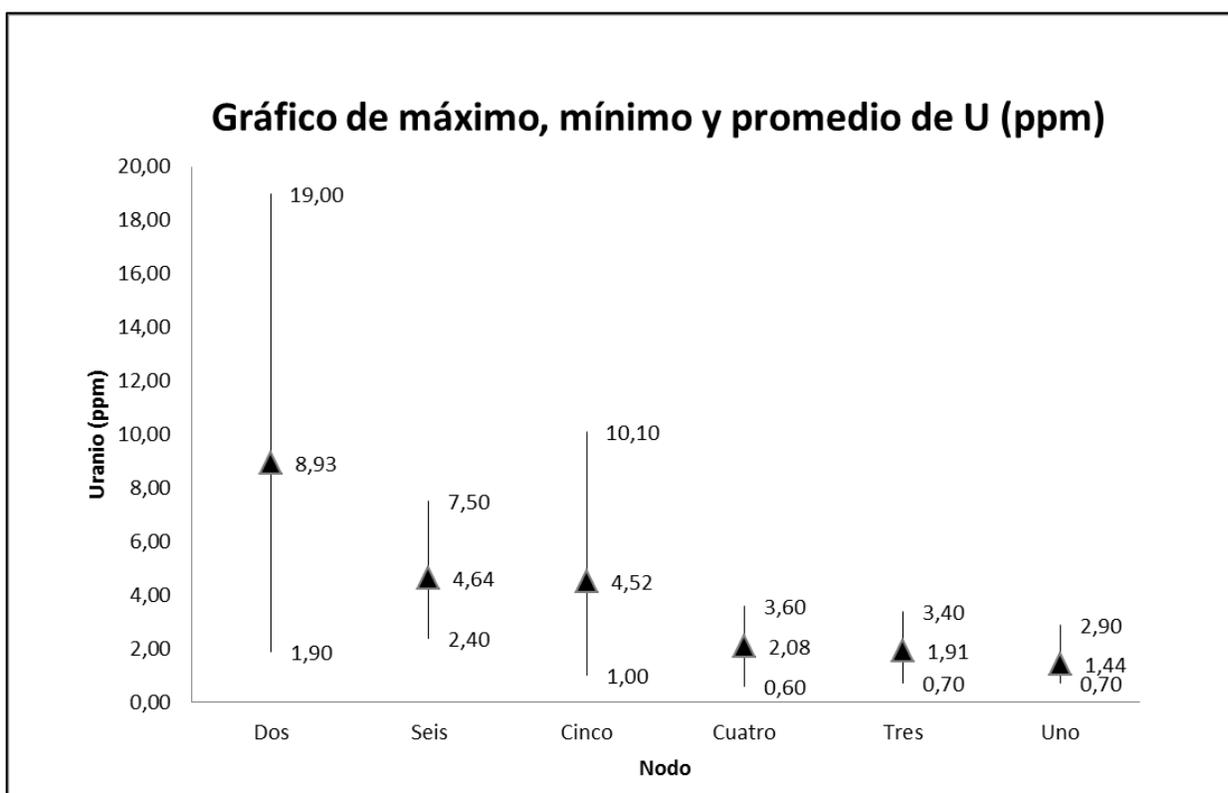


Figura 32 Gráfico de máximo, mínimo y promedio de U (ppm), para los 6 nodos generados.

Por último se realiza una validación de estos resultados tomando como base 10 nuevas muestras (las mismas empleadas en el caso de la regresión MCP), cuyos espectros son procesados e ingresados en la RNA, obteniéndose resultados correctos en todos los casos, en base a que los rangos de los nodos generados en la red de clasificación incluyen al valor de U medido mediante ICP-MS, información resumida en la **Tabla 10**.

Tabla 10 Validación del modelo de regresión RNA por medio de 10 nuevas muestras. U medido (ppm) corresponde al valor medido mediante ICP-MS.

Muestra	U medido (ppm)	Clasificación (Nodo)	Validación
GQ-13-FA-102	0,7	3	correcta
GQ-13-LB-056	1,2	1	correcta
GQ-13-FE-103	1,3	1	correcta
GQ-13-JP-068	1,7	1	correcta
GQ-13-FA-106	1,9	1	correcta
GQ-13-FA-109	1,9	1	correcta
GQ-13-FE-060	2	1	correcta
GQ-13-LB-108	3	4	correcta
GQ-13-JP-082	3,8	2	correcta
GQ-13-JP-081	4,9	2	correcta

5. DISCUSIONES

5.1. ESPECTROS DE REFLECTANCIA

A partir del análisis de los tres grupos de datos obtenidos se eligen los ochenta espectros medidos sobre sedimento tamizado con malla #80 (partículas inferiores en diámetro a 180 micrones). Las razones que explican esta elección son:

- Mayor calidad estadística de los datos: de acuerdo al testeo de la calidad de los datos, los espectros medidos sobre el sedimento tamaño arcilla están ligeramente mejor correlacionados, de acuerdo al coeficiente R^2 , que los sedimentos menores a 1 mm.
- Mejores resultados de la RNA: a partir de la comparación entre las muestras tamizadas con malla #18 y #80, usando el Modo 3 de estandarización, es posible observar que los agrupamientos entregados por la red son de mejor calidad para el caso del sedimento más fino.
- Tanto la fracción de sedimento tamaño arcilla como la inferior a 1 mm son compatibles con una metodología de exploración geoquímica basada en la medición de espectros de reflectancia de sedimentos fluviales in situ, en cuanto a la factibilidad de tamizaje en terreno.
- Puesto que es la fracción tamizada con malla #80 la que se emplea, luego de una molienda, en el análisis geoquímico del sedimento, es esperable que haya una mayor correlación geoquímica entre los datos espectrales obtenidos con este tamaño de sedimento, respecto a uno de mayor tamaño.

Cabe mencionar que los dos primeros puntos considerados se basan en el efecto que el tamaño del grano tiene sobre los espectros de reflectancia medidos, tal como se describió en la sección 3.1.

5.2. ESTANDARIZACIÓN DE LOS ESPECTROS Y RESULTADOS DE LA RNA

Una vez proyectados los grupos espectrales entregados por la RNA en conjunto con las redes de drenaje principales de la cuenca de estudio, es posible observar que la normalización de los datos por medio de la primera derivada de la reflectancia (Modo 5) entrega los mejores resultados, las razones que dan cuenta de ello son:

- Agrupamientos espaciales de los grupos espectrales más coherentes con los rasgos hidrográficos de la cuenca. En otras palabras los grupos espectrales

obtenidos representan de mejor forma las principales redes de drenaje de la cuenca.

Adicionalmente, este método permite descartar del espectro completo en estudio (2151 unidades enteras de longitud de onda entre los 350 nm y los 2500 nm), un 31.5% de estas unidades (678 unidades de longitud de onda), puesto que no entregan información relevante para efectos de la clasificación por medio de RNA, ya que en cada una de esas unidades los valores de reflectancia son iguales para todas las muestras, con valor nulo, que representa una pendiente plana de la signatura original de reflectancia, y que podría ser explicado por una combinación de tres factores:

- Cantidad de decimales significativos en los datos de reflectancia derivada. Se trabaja con 3 decimales significativos, anulándose un gran grupo de bandas.
- Resolución del espectrómetro: para el rango VNIR es en promedio de ± 3 nm y para los rangos SWIR de ± 6 nm, y
- Rangos espectrales con un comportamiento de absorción-reflexión similar dentro de una vecindad, fenómeno que podría estar ligado a la existencia de bandas de energía a nivel atómico (ver sección 1.4.1).

Se recomienda en investigaciones posteriores realizar esta clasificación usando una cantidad de decimales de la reflectancia derivada igual o superior a 6, puesto que a estas escalas todavía existen rasgos de absorción-reflexión que pueden ser de relevancia.

5.3. CLASIFICACIÓN RNA

Tal como se mencionó en la sección RESULTADOS – CLASIFICACIÓN RNA, las proyecciones geográficas de los nodos permiten una buena caracterización de los drenajes principales presentes en la cuenca. No obstante hay ciertas muestras o grupos de muestras que escapan a los resultados esperados, lo que puede deberse a las diversas causas:

- Muestras con distribuciones espaciales que no calzan con la distribución del nodo que la incluye, en cuyo caso podría deberse a rasgos geoquímicos y minerales particulares del área de muestreo de este espécimen, determinados por factores locales tales como presencia de tranques de relave.
- Muestras con signaturas espectrales diferentes del promedio de cada nodo, lo que podría representar falencias en alguna parte del procesamiento de los espectros de reflectancia (por ejemplo en normalización o elección del rango

espectral), o bien en el uso de la RNA (por ejemplo número de nodos elegidos incorrecto).

Independientemente de la calidad de los resultados obtenidos en el presente estudio, resulta evidente que la información espectral puede ser de gran utilidad para efectos de clasificación de muestras de sedimento fluvial.

5.3.1. CORRELACIÓN CON CLASIFICACIÓN RNA GEOQUÍMICA

Al igual que en el presente estudio, en (Miralles, 2013) se realiza una clasificación por RNA (*Growing Cell Structures*) de un conjunto de 126 muestras de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, que incluye a las 80 muestras acá analizadas, pero utilizando como información de clasificación las concentraciones químicas de 61 elementos y compuestos medidos mediante ICP-MS e ICP-ES. Estos resultados son mostrados en la **Figura 33**. A partir de la comparación de esta clasificación con la realizada a partir de los espectros de reflectancia VIC, es posible establecer las relaciones mostradas en la **Tabla 11**, que resume la relación entre las clasificaciones RNA realizadas a partir del espectro VIC y geoquímica. La relación más notoria se da para el caso del Nodo 6 de este estudio y Nodo 2 de (Miralles, 2013), o entre los Nodos espectrales 3 y 1 respecto al Nodo geoquímico 3, mientras que relaciones menos claras ocurren en los otros casos Nodos. No obstante en términos generales hay buena correlación, a pesar que tanto el número de Nodos empleados (6 en este estudio y 5 en el caso geoquímico) como el número de muestras (80 versus 126), difieren.

Tabla 11 Relación entre los nodos clasificación a partir de espectro VIC y geoquímica.

Nodo Clasificación RNA	
Espectro VIC	Geoquímica
1	3
2	1,3
3	3,4,5
4	4
5	4
6	2

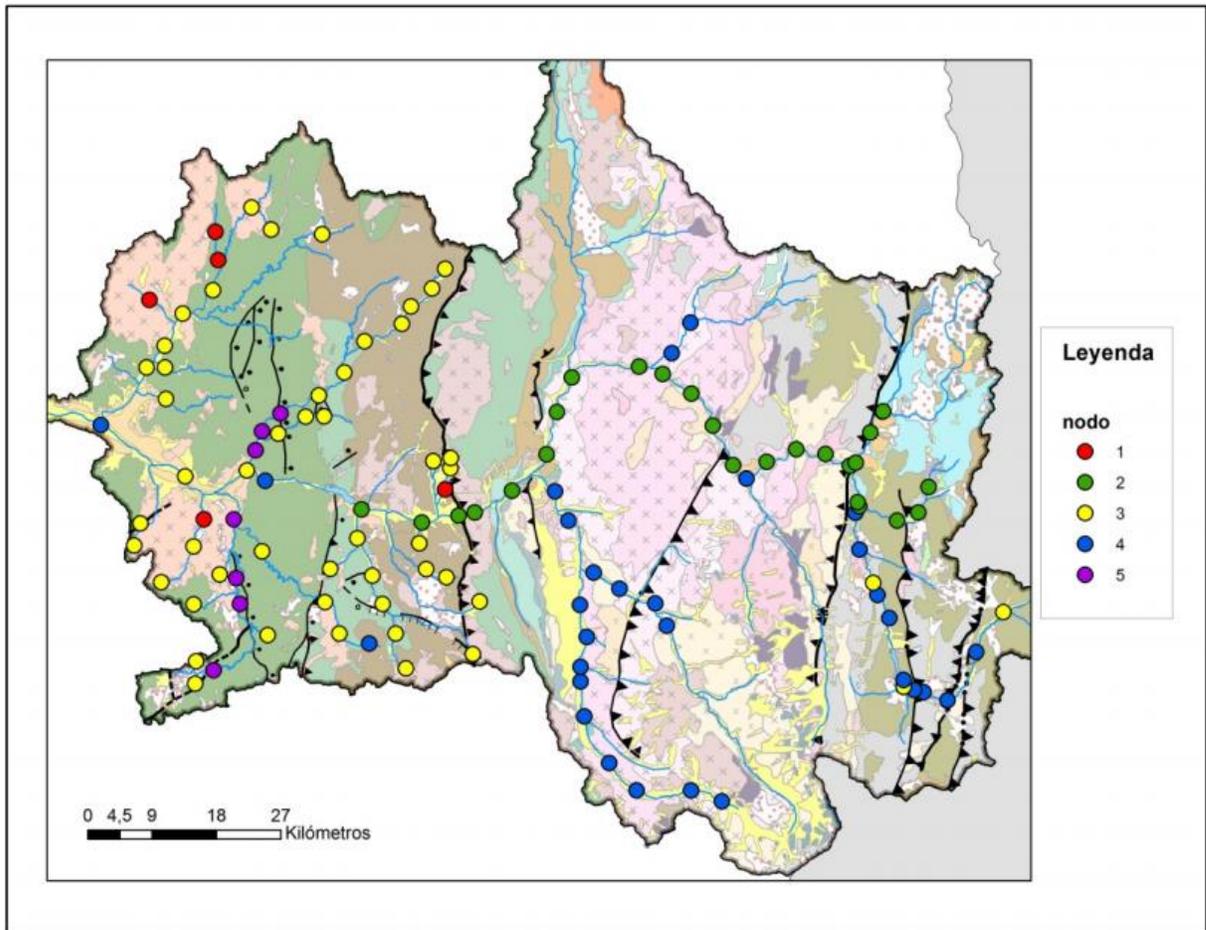


Figura 33 Resultados de clasificación por RNA de 126 muestras de la cuenca del río Elqui, a partir de la geoquímica de 61 elementos y compuestos (Miralles, 2013).

5.4. MINERALOGÍA DRX

Debido a que las doce muestras estudiadas son representativas de cada uno de los seis nodos entregados por la RNA, es de esperar que exista coincidencia entre la mineralogía de las muestras de cada nodo, además de existir similitudes entre las muestras pertenecientes a nodos cercanos (**Tabla 2**).

En este sentido destacan los resultados obtenidos para las muestras del Nodo 6, que en concordancia con la geoquímica que presenta altos niveles de As y Cu, exhiben en su mineralogía el óxido de arsénico Arsenolita (As_2O_3) y el sulfato de cobre Ramsbeckita ($\text{Cu}_{15}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{22} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Lo anterior ocurre para las muestras GQ-12-CM-156 y GQ-12-CM-157, ambas pertenecientes al río Turbio, no así para la muestra GQ-12-CM-227, tomada desde la quebrada de Santa Gracia.

Con respecto al resto de los nodos, destacan la mineralogía granítica de las muestras del Nodo 3, con Cuarzo, Albita, Ortoclasa, Muscovita y Biotita, además de minerales de alteración asociados a estos minerales (Clorita, Montmorillonita y Caolinita), mineralogía posiblemente determinada por la influencia de cuerpos plutónicos que intruyen las formaciones Los Equinos y Bandurrias de carácter regional en la quebrada La Marquesa. En este nodo destacan los minerales Molibdenita (MoS_2) y Escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en la muestra GQ-12-CR-045, que no se condicen con los bajos contenidos en Mo y As que presenta esta muestra (1.1 y 17,5 ppm respectivamente). El Nodo 5 por su parte muestra presenta Esfeno ($\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$) y Corrensita ($(\text{Mg,Fe})_9(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), además de cuarzo y feldespatos. El Nodo 1 también presenta Ramsbeckita en concordancia con altos contenidos de Cu en sus muestras. El Nodo 2 presenta Calcita Magnésica ($(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3$), concordante con la mineralogía sedimentaria marina del Grupo Bandurrias. Finalmente el Nodo 4 presenta Magnesihornblenda ($\{\text{Ca}_2\}\{\text{Mg}_4\text{Al}\}(\text{AlSi}_7\text{O}_{22})(\text{OH})_2$) y Grosularia ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), minerales posiblemente derivados de la litología fundamentalmente intrusiva en la zona del río Claro.

5.5. MINERALOGÍA REFLECTANCIA VIC

Los resultados obtenidos por medio del algoritmo *spectral feature fitting (sff)* permiten caracterizar mineralógicamente los seis nodos definidos, siempre tomando en cuenta que los resultados están sujetos a la interpretación de la coincidencia entre la forma del conjunto mineral desconocido y el mineral conocido. Adicionalmente es preciso tener en cuenta que cada algoritmo de comparación presenta virtudes y falencias, en particular para el caso del algoritmo *sff* se destaca su cualidad para normalizar los espectros a una misma base, resaltando solamente los rasgos distintivos de cada espectro. Este método parece ser correcto en esencia, no obstante presenta su mayor desventaja en la imposibilidad para ponderar de modo distinto ciertos rasgos relevantes, que podemos denominar de primer orden, tales como la doble absorción que caracteriza a la montmorillonita a las 400-500 nm, versus rasgos de carácter secundario como los determinados por la vibración de enlaces OH a las ~1900 nm, que la mayoría de las muestras presentan y que no entregan información relevante para conocer la composición mineral de una muestra, descontando el hecho de si presenta o no minerales hidratados.

Otro asunto de crucial importancia a la hora de estudiar la mineralogía de una muestra a partir de su espectro VIC es la base sobre la cual se comparará el espectro desconocido. En este sentido es una condición intrínseca al material acá analizado, sedimento de origen fluvial, el que sea un agregado multimineral, y que por lo tanto la curva espectral obtenida no representa un solo mineral, sino que una agrupación de

una o más fases que por su cuenta presentan firmas espectrales distintivas, pero que al ser sumadas en una proporción dada, producen una firma espectral completamente nueva y única.

De este modo se torna necesario el desarrollo de una biblioteca de sedimentos fluviales cuya mineralogía sea conocida, de tal modo de realizar comparaciones correctas. La construcción de tales bibliotecas permitiría realizar un estudio mineralógico a partir del espectro VIC mucho más confiable, toda vez que a pesar de la inmensa variabilidad mineral existente en la naturaleza, siempre serán ciertas agrupaciones minerales más probables en su ocurrencia (Por ejemplo presencia usual de cuarzo, minerales de alteración y arcillas).

El estudio de firmas espectrales uni, bi y multiminerales permitiría conocer el comportamiento de los rasgos de absorción-reflexión para distintas proporciones de las fases presentes en el sedimento. Actualmente es posible realizar este tipo de análisis con softwares especializados en espectrometría de reflectancia (Por ejemplo *Specmin_{TM}*), no obstante no son conocidas metodologías que no dependan casi exclusivamente del criterio del investigador, sin otro sustento que su experiencia.

5.6. MINERALOGÍA DRX- REFLECTANCIA VIC

El uso combinado de un método tradicional y robusto para estudiar la mineralogía de una muestra de sedimento, mineralogía DRX, con un método relativamente nuevo y poco usado, mineralogía reflectancia VIC, mejora el conocimiento de una muestra de sedimento, debido a que hay ciertos minerales y variaciones minerales que pueden ser conocidas por medio de análisis espectral y que los rayos X no pueden discernir. Un ejemplo clásico es el caso de las variedades de hierro y magnesio de la Clorita, que pueden ser fácilmente diferenciadas por medio de su firma espectral y no así por medio de difracción.

Adicionalmente la mineralogía VIC permite observar con un buen grado de certeza minerales con notables variaciones en su estructura molecular (Por ejemplo diferentes esmectitas y/o intercalaciones estructurales de distintos minerales) y también pseudominerales, puesto que este método no se basa en los parámetros geométricos de la difracción.

De esta forma es posible realizar una apropiada caracterización mineral de los sedimentos fluviales estudiados, información resumida en la siguiente **Tabla 12**.

Tabla 12 Mineralogía de los sedimentos en estudio basada en difracción de rayos X y reflectancia VIC.

Nodo	Mineralogía							
	cuarzo	albita intermedia	chabazita	clinocloro	rambsbeckita			
1	cuarzo	albita intermedia	chabazita	clinocloro	rambsbeckita			
	sauconita	microclina	montmorillonita Na					
2	cuarzo	calcita magnésica	albita baja	clinocloro	illita	montmorillonita		
	montmorillonita Na	erionita-merlinoita						
3	cuarzo	albita baja	calcita magnésica	clinocloro	muscovita	laumontita		
	ortoclasa	hematita	muscovita	escorodita	pirofilita	ferroactinolita		
	montmorillonita	caolinita	molibdenita	richterita potásica	biotita	clorita-serpentinita		
	sauconita	erionita-merlinoita	microclina	montmorillonita Na				
4	albita baja	microclina intermedia	magnesihornblenda	clinopiroxeno	muscovita	clinocloro	grosularia	
	anhidrita							
5	albita baja	microclina intermedia	cuarzo	fluoroedenita	baritocalcita	muscovita	corrensitita	albita baja
	hornblenda	hidrobiotita	esfeno	labradorita	illita	dickita	ferroactinolita	
	cuarzo	montmorillonita Na	caolinita-muscovita	erionita-merlinoita	sauconita			
6	cuarzo	albita alta	illita	arsenolita	faujacita	rambsbeckita	chabazita	
	tenardita	clinoptililita potásica	andesina	muscovita	montmorillonita-clorita	caolinita		
	calcita	laumontita	goethita	pirofilita	vermiculita			
	montmorillonita Na	caolinita-esmectita	montmorillonita-illita	rectorita	cuarzo	erionita-merlinoita		

De acuerdo con esta información mineralógica, los sedimentos de la cuenca del río Elqui se caracterizan por el siguiente ensamblaje de minerales o grupos minerales, de mayor a menor abundancia: Cuarzo-Albita-Cloritas-Micas-Arcillas-Zeolitas-Feldespatos K-Carbonatos-Anfíboles-Caolinitas/Serpentinatas y Otros.

El análisis de la mineralogía en correlación con la distribución espacial de los nodos, permite establecer lo siguiente:

- Quebradas La Mollaca y aledañas: Mineralogía primaria félsica-intermedia, con rasgos de alteración de minerales máficos (clinocloro), y productos de alteración de rocas volcánicas o tobas (esmectitas y zeolita). También se presenta un sulfato de cobre.
- Quebrada El Arrayán y parte alta de Quebrada de Santa Gracia: Mineralogía ígnea de baja temperatura, de composición intermedia con productos de alteración de minerales máficos (clinocloro) y de rocas volcánicas o tobas, o productos de alteración hidrotermal (mica, esmectita, zeolita y calcita)
- Quebrada La Marquesa y río La Laguna : Mineralogía ígnea félsica de baja temperatura, con alto contenido en hierro (hematita y ferroactinolita), aluminio (pirofilita, muscovita y caolinita) y minerales de alteración (micas, esmectitas y zeolitas). Destaca la presencia de un sulfuro de molibdeno.
- Río Claro: Mineralogía félsica-intermedia, de baja temperatura, minerales de alteración hidrotermal sobre material volcánico o volcano-sedimentario (fluoroedenita, baritocalcita), y alteración de metasomatismo de bajo grado (corrensitita, hidrobiotita, hornblenda, ferroactinolita), y finalmente productos de

alteración de minerales félsicos y/o productos volcánicos (esmectitas, micas y zeolitas).

- Ríos Seco-Turbio-Elqui: Mineralogía félsica de baja temperatura, importante presencia de sulfatos (tenardita y rambsbeckita), zeolitas (en especial faujacita, rica en Ag, clinoptilolita, chabacita, laumontita, erionita-merlinoita), micas primarias y de alteración, esmectitas, y óxidos de hierro y arsénico (goethita y arsenolita).

5.6.1. SITUACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA DEL ELQUI

De los resultados anteriores, es particularmente destacable lo que sucede con el Nodo 6, cuya geoquímica y mineralogía es difícil de explicar tan solo por una fuente natural, es decir por la combinación litología-alteración hidrotermal-mineralización, sin actividad humana de por medio. La presencia de sulfatos (de Cu), una gran variedad de zeolitas, en particular faujacita rica en Ag, y óxidos de Fe y As (Arsenolita), pueden ser signos indicativos de la influencia de la actividad minera del distrito El Indio-El Tambo sobre la geoquímica del río Elqui. Al respecto cabe mencionar que durante su explotación la mina El Indio fue trabajada tanto como mina a rajo abierto y en forma subterránea, mientras que El Tambo solo de forma superficial. La mena seca extraída, principalmente enargita (Cu_3AsS_4), era enviada a una planta de flotación y cianuración. El concentrado de Cu contenía 20% de Cu, 50 g/t de Au, 300 g/t de Ag, y 8% de As, el que era luego tratado en una caldera para remover el As, volatilizándolo y mezclándolo con aire para permitir la completa oxidación de As y S. Finalmente el gas era precipitado electrostáticamente y mezclado con aire frío, que lleva a la precipitación de Arsenolita (As_2O_3). Los relaves generados en esta primera etapa eran luego preparados para cianuración, para recuperar el oro y la plata (Oyarzun, Lillo, Higuera, Oyarzún, & Maturana, 2004).

La Arsenolita, forma mineral del óxido de As III, ocurre como resultado de oxidación de sulfuros ricos en As (por ejemplo enargita), sulfosales y/o arseniuros, los cuales son abundantes en yacimientos epitermales de oro, tal como El Indio-El Tambo. Se asocia a minerales de As como Claudetita (dimorfo de arsenolita), Rejalgar, Oropimente y Eritrita, ninguno de los cuales se observa en el análisis mineralógico.

Por otra parte la ocurrencia de forma natural de este mineral no está registrada en la bibliografía, no existiendo análisis químicos de muestras naturales, tan solo sintéticas (Anthony, Bideaux, Bladh, & Nichols, 2014). Sin embargo, en términos estrictamente teóricos, la ocurrencia de Arsenolita sería factible, debido a que corresponde a la natural alteración supérgena de sulfuros primarios (Enargita en este

caso) al ser expuestos por distintos procesos geológicos a las condiciones oxidantes de la parte más superficial de la corteza terrestre.

De tal forma de dilucidar el origen de la Arsenolita y su real impacto como mineral de As sobre la contaminación del río Elqui, se proponen las siguientes medidas:

1. Confirmación de presencia de Arsenolita en sedimentos por medio del uso de microscopía electrónica de barrido o *SEM (scanning electron microscope)* y luego pinchar los granos con espectroscopía energía-dispersiva de rayos X o *EDS* por sus siglas en inglés.
2. Una vez confirmada la presencia de Arsenolita, estudiar su presencia en depósitos de sedimentos datados con anterioridad al comienzo de la actividad minera en el distrito en cuestión, o bien
3. Rastrear espectrométrica y/o geoquímica y/o mineralógicamente la(s) fuente(s) responsable(s) de la presencia de Arsenolita (y otros minerales que probablemente estén representando contaminación tal como el sulfato Ramsbeckita y la zeolita Faujacita de Ag, sin perjuicio de que sea necesario confirmar su presencia o bien encontrar nueva mineralogía por medio de estudios más exhaustivos).
4. Determinar cuáles son las fases o complejos minerales responsables de los altos valores de As, y proponer un plan de mitigación.

Independientemente de las causas de la contaminación por As del río Elqui, se hace necesario la realización de estudios de geoquímica ambiental de tal forma de prevenir o revertir los posibles efectos nocivos sobre la salud de la población del Valle del Elqui.

5.7. IMÁGENES SATELITALES

Los resultados esperados a partir de la clasificación de imágenes satelitales por medio de los espectros medidos con Terraspec son imágenes satelitales que resaltan las redes de drenaje asociadas a cada nodo, por ejemplo río Elqui – río Turbio – río Malo representado por la signatura espectral del Nodo 6, y además que resaltan las posibles áreas fuente que determinen las signaturas espectrales observadas río abajo. En este sentido los resultados obtenidos son insatisfactorios, puesto que para ningún nodo definido se cumple lo anterior, observándose en cambio distribuciones espectrales con presencias a escala regional (y no local, asociadas a las redes de drenaje principalmente, como sería de esperar), que además guardan poco sentido geológico, tanto desde un punto de vista litológico, mineralógico y geoquímico. Adicionalmente ninguna de las herramientas de pre y posprocesamiento de imágenes satelitales con el programa *ENVI* permiten pulir los resultados preliminares siguiendo esta metodología.

Las razones que dan cuenta de esto se exponen a continuación.

1. Pérdida de información al pasar de 2151 bandas de Terraspec a 9 bandas de *ASTER*. Cualquier procesamiento que busque compatibilizar ambas informaciones de espectros de reflectancia debe transar la pérdida de información, puesto que los distintos algoritmos de clasificación (*SAM* y *SID*) requieren que los espectros tengan la misma cantidad de bandas, debido a la definición misma de los algoritmos. Esta pérdida de información implica la pérdida de rasgos relevantes de las firmas espectrales estudiadas, lo que se puede observar en la **Figura 34**, donde se observa con claridad la pérdida de valiosos rasgos de absorción-reflexión, por ejemplo a las ~700 nm, 1400 nm, 1750 nm y 1900 nm.

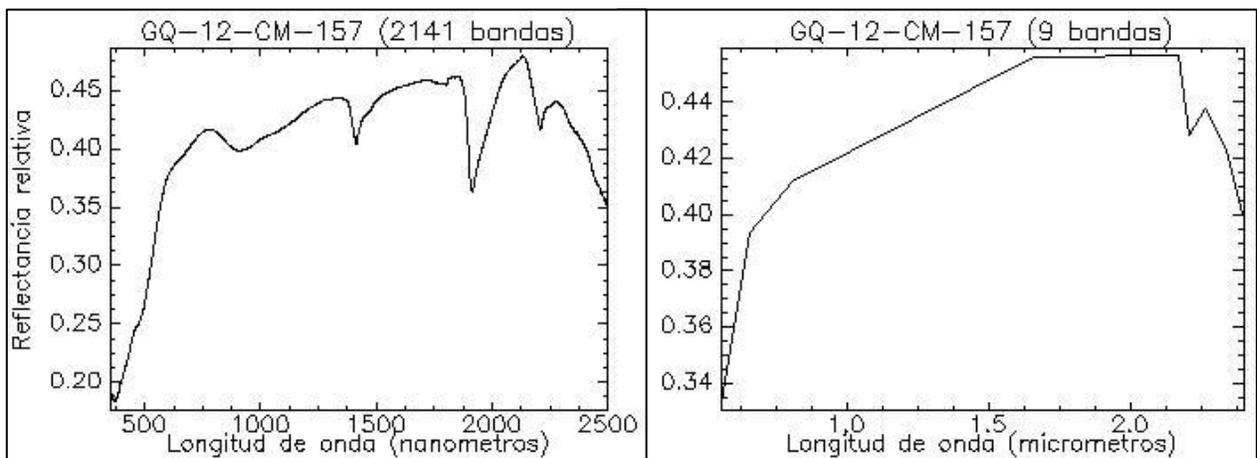


Figura 34 Ejemplo de pérdida de información al pasar de las más de dos mil bandas de Terraspec a las nueve bandas del rango VIC *ASTER*.

2. Diferencias entre los rasgos espectrales medidos por *ASTER* en cada pixel (de 15 metros de resolución en el rango visible y 30 metros en el infrarrojo cercano) en comparación con los medidos a partir de muestras de sedimento. Estas diferencias, que se exponen con claridad en los siguientes ejemplos (), pueden estar dadas por un sinnúmero de razones, entre las que se cuentan: a) distorsiones en la información espectral recolectada por el satélite, b) baja representatividad de las muestras de sedimento medidas con Terraspec dentro del pixel de 15 o 30 metros de *ASTER*, c) el sedimento medido no es representativo de la fracción superior de sedimento que el satélite capta, d) diferencias en los tiempos de medición, con cambios en las condiciones geoquímicas del drenaje en estudio.

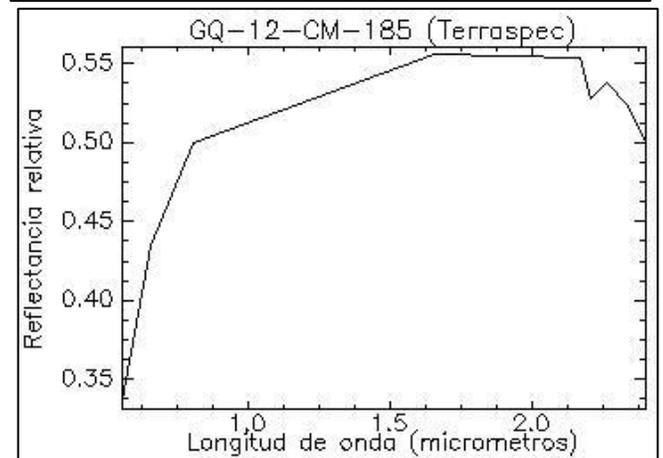
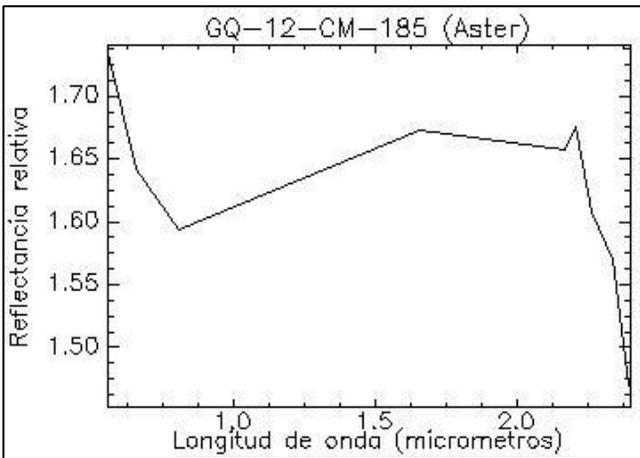
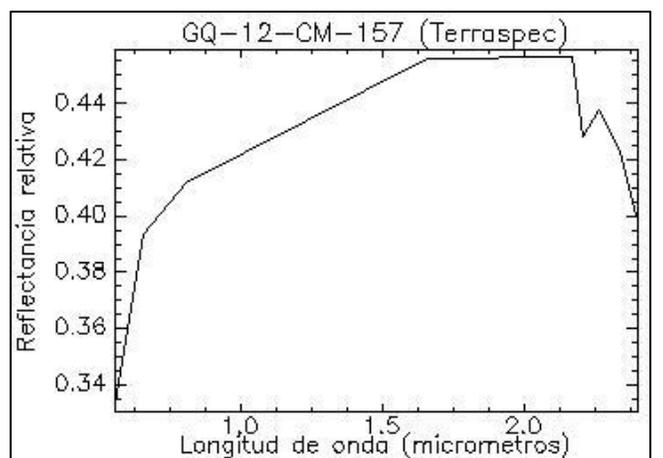
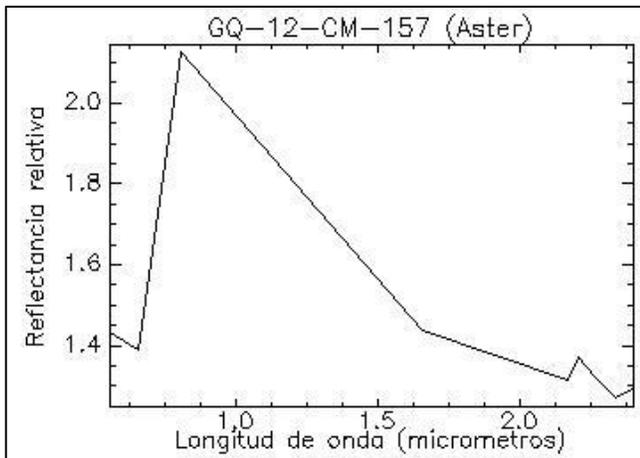
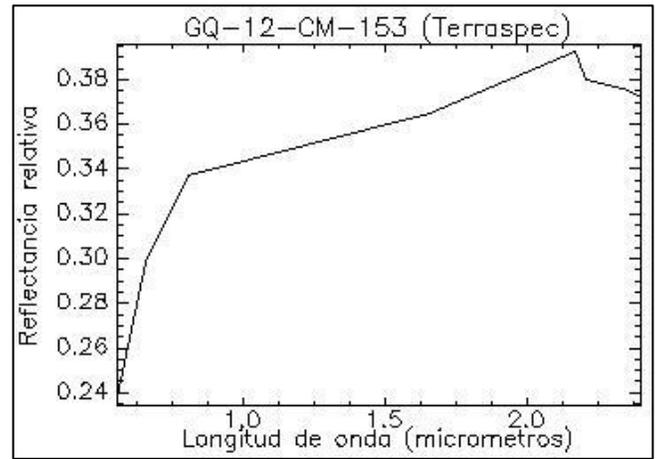
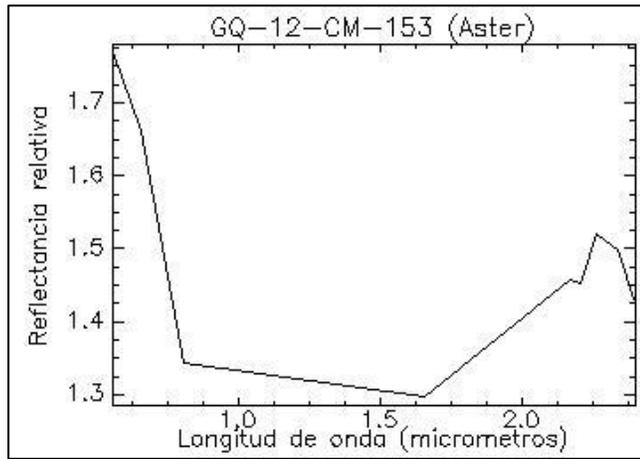


Figura 35 Espectro de reflectancia VIC medido por el satélite *ASTER* de un modo remoto y el medido en laboratorio con *Terraspec*.

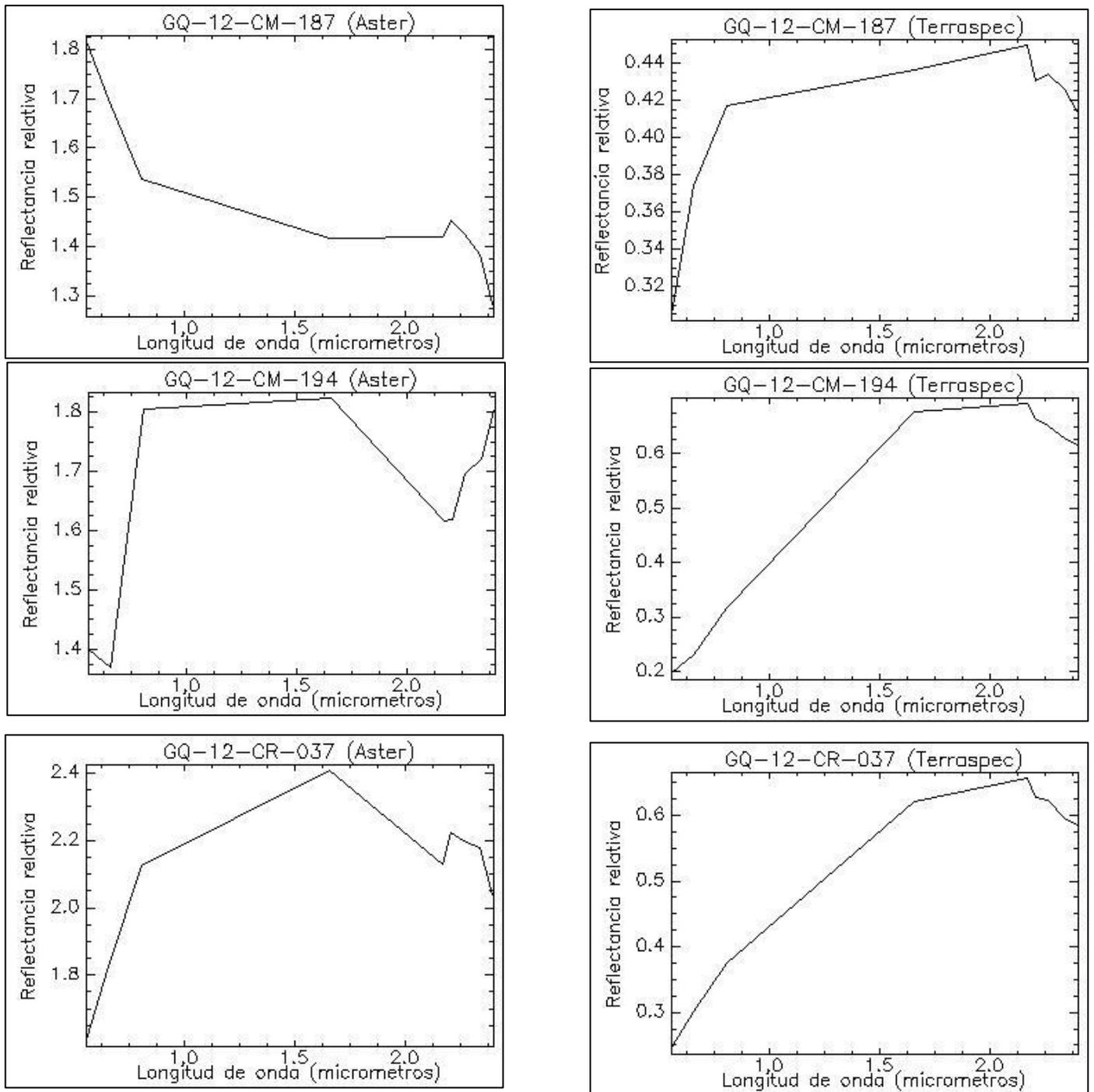


Figura 36 Continuación de Figura 35.

Independientemente de las causas de estas diferencias en cada caso, resulta evidente la disparidad en la información espectral, tanto así como el hecho de que para varias de estas muestras, para una misma longitud de onda, los rasgos sean de reflexión según *ASTER* y de absorción según *Terraspec*.

Por consiguiente es posible concluir que para generar una buena correlación entre la información espectral medida con espectrómetros satelitales y espectrómetros de terreno-laboratorio es necesario:

1. Trabajar con imágenes satelitales de mejor resolución espectral (Por ejemplo *AVIRIS* con 50 bandas en el rango VIC) y espacial.
2. Cerciorarse que lo que capta el satélite es efectivamente lo que se muestrea en terreno y mide en el laboratorio.
3. Desarrollar una metodología de pre y posprocesamiento de las imágenes satelitales que optimice los resultados obtenidos mediante algoritmos de clasificación supervisados.

Los resultados obtenidos mediante la selección de regiones de interés, en tanto, son satisfactorios, toda vez que permiten un correcto mapeo de las redes de drenaje en este caso de los ríos Turbio, Toro, Seco y La Laguna (**Figura 26**), además de permitir la clasificación de drenajes en base a sus rasgos espectrales. Sin embargo no es posible establecer posibles áreas fuentes de los sedimentos, lo que podría deberse a los siguientes casos, no excluyentes entre sí:

1. Diferencias significativas entre los espectros VIC de las áreas fuentes, por ejemplo formaciones geológicas, zonas de alteración hidrotermal, tranques de relave, etc., y de los sedimentos presentes en las redes de drenaje estudiadas. Este fenómeno podría estar relacionado a cambios en la composición mineral producidos durante las etapas de meteorización química y física del protolito, transporte de las partículas con el agua como agente de transporte principal, y finalmente reacciones de equilibrio químico y mineral de los sedimentos depositados en bancos de ríos con regímenes hidrológicos variables.
2. Área fuente no superficial y por lo tanto no detectable por el satélite.

Por otra parte el resultado obtenido mediante matemática de bandas B5/B4 resulta de interés geológico por cuanto relaciona la signatura espectral de la zona El Indio – El Tambo con los ríos Elqui desde la falla Vicuña, Claro, y cabeceras de quebradas La Mollaca y La Marquesa. No obstante los resultados deben ser evaluados con cuidado en términos de sus implicancias geoquímicas y mineralógicas, puesto que la aplicabilidad de esta matemática de bandas solo representa un índice de presencia de hierro ferroso sobre litologías caracterizadas por silicatos y carbonatos. De esta

forma parece ser más prudente establecer que en términos espectrales hay una relación geográfica de interés cuyas implicancias geoquímicas y mineralógicas deben ser evaluadas.

Por último no se desarrolló la posibilidad de obtener información geoquímica a partir del modelamiento de los datos espectrales de las imágenes *ASTER* puesto que se entiende que la resolución y precisión del espectrómetro deben ser muy altas, tanto en longitud de onda como en reflectancia relativa, absoluta o número digital, lo que no aplica en el caso de este espectrómetro satelital.

5.8. MODELO QUIMIOMÉTRICO

5.8.1. REGRESIÓN MCP

Se alcanzan buenos resultados en el desarrollo de modelos estadísticos para la estimación de concentraciones químicas, de acuerdo a los altos coeficientes de determinación y bajos errores cuadráticos medios, en particular para los elementos U, S total, Pr y Sr. No obstante hay ciertas consideraciones a tener en cuenta, de tal modo de optimizar estos resultados, además de poder desarrollar modelamientos para otros elementos de interés geoquímico. A continuación se describen los aspectos fundamentales a tener en cuenta para potenciar estos resultados.

- Tipo de muestra: Debido a que la información geoquímica de los sedimentos se obtiene a partir de espectrometría de masa y óptica, que trabaja con muestras de polvo molido en mortero de ágata, es esperable que esta información sea más correlacionable con espectros de reflectancia VIC medidos sobre muestras procesadas de igual modo. Adicionalmente, el proceso de molienda de muestras de sedimento permite la destrucción parcial de ciertos minerales, lo que permitiría una mejor estimación de la geoquímica de las muestras, al ser llevadas estas a un estado más elemental.
- Cantidad de muestras: Los modelos para la estimación de concentraciones geoquímicas se basan en grandes cantidades de datos, muchas veces superando el millar de muestras (Shi, Chen, Liu, & Wu, 2014), lo que determina en una importante medida la calidad de los modelos desarrollados. Este hecho puede ser entendido en el sentido de que a mayor cantidad de muestras de entrenamiento, mayor será la representatividad de este conjunto respecto a las condiciones geoquímicas de la región de muestreo, y por lo tanto mejores serán las estimaciones, independientemente del modelo de regresión utilizado (regresión MCP, RNA, etc.)

- Variedad de muestras: Adicionalmente, debe entenderse que un conjunto de muestras es representativo de la región desde donde fueron obtenidas estas muestras o bien de regiones con condiciones geoquímicas similares, y que por lo tanto las estimaciones no serán necesariamente extrapolables a otros ambientes geoquímicos. Más que una limitación de los modelos quimiométricos, este hecho representa la posibilidad de generar bases de datos que incluyan como subconjuntos diferentes regiones geoquímicas, desarrollándose de tal manera modelos con mayores rangos de aplicación.
- Precisión de la información espectral: Por otra parte la precisión de la información espectral debe ser lo más alta posible, tanto en longitud de onda como en la intensidad de la reflectancia, de tal modo de captar cambios mínimos en absorción o reflexión asociados a la concentración de elementos determinados. En este estudio se usaron seis decimales para la derivada de la reflectancia. Tres o menos decimales no son recomendados puesto que la derivada tiende a mostrar un comportamiento más bien ternario (-0.001, 0.000, 0.001).
- Regresiones: En cuanto a los mecanismos de regresión, está abierta la posibilidad del uso combinado de distintas herramientas, de forma sucesiva o consecutiva, tanto en los pasos de búsqueda de los rangos espectrales de interés, como en el desarrollo final del modelo de regresión. Las regresiones acá desarrolladas hasta el final (regresión MCP y RNA), muestran una alta complementariedad, en tanto que la primera regresión permitiría estimar con un alto grado de precisión la concentración química de ciertos elementos, mientras que la RNA permitiría la detección de anomalías geoquímicas.
- Transformaciones matemáticas: Adicionalmente, y a pesar de los buenos resultados obtenidos con la normalización por primera derivada de los espectros de reflectancia, sigue abierta la necesidad de estudiar mejores transformaciones matemáticas, de manera tal de establecer mejores correlaciones entre los datos espectrométricos y geoquímicos. En este sentido la transformadas de Hough o de Fourier aparecen como opciones a evaluar en la construcción de modelos futuros.
- Relación física subyacente: Por último, el desarrollo de modelos de regresión para una gran variedad de elementos y compuestos químicos, y bajo condiciones geoquímicas también variadas, podría permitir el esclarecimiento de la relación física subyacente entre la masa de los átomos que se buscan cuantificar y la energía electromagnética del haz de luz del espectrómetro.

5.8.2. RNA

Al igual que en el caso anterior, un aspecto determinante en la calidad de la regresión generada es la apropiada elección de un número acotado de bandas electromagnéticas. En este sentido, el proceso metodológico seguido se evalúa favorablemente, toda vez que se basa en la elección visual de aquellas bandas electromagnéticas donde se cumple una relación directamente proporcional valor de la primera derivada y concentración química. Otra alternativa a evaluar en futuros estudios consiste en elegir también aquellas bandas donde se cumple una relación inversamente proporcional entre los parámetros antes mencionados, que implicaría una tendencia de menor reflexión o mayor absorción asociada a mayores concentraciones químicas (o viceversa). Por otra parte es posible refinar esta selección por medio de un primer procesamiento con RNA, encontrando aquellas bandas con distribuciones anómalas, con comportamientos no correlacionables con la información química, o bien bandas con comportamientos muy polarizados, es decir bandas con rasgos fuertemente asociados a altas o bajas concentraciones químicas. Cabe mencionar que ambos casos fueron observados en el presente estudio, no obstante se optó por utilizar todas las bandas seleccionadas mediante análisis visual. En definitiva, un mayor refinamiento de la selección es posible, y de un modo altamente probable producirá mejores resultados de regresión.

Por otra parte es de suma relevancia el conjunto de datos sobre los cuales se genera la regresión, tanto en términos del tipo de relación química-espectral, que podría estar determinada fuertemente por la mineralogía explicativa de un elemento en cuestión en las muestras, como en términos de la variabilidad estadística del conjunto de muestras, factor asociado a la cantidad y representatividad del conjunto de muestras. En este sentido las 5 muestras eliminadas del conjunto de entrenamiento para el caso del Uranio podrían representar muestras con relaciones química-espectro diferentes de las 75 muestras restantes. De tal modo de evaluar esta opción se proyectan estas muestras en planta en la siguiente **Figura 37**.

Un análisis de esta información permite establecer que las 5 muestras en cuestión no presentan una distribución espacial similar, no están asociadas a algún distrito o yacimiento (proyectando esta información en el mapa pertinente), no pertenecen al mismo nodo, etc. En definitiva no es posible establecer, con la información disponible, la razón que explica su anomalía en cuanto a la regresión. Por otra parte se observa que alrededor de cada una de estas cinco muestras hay otros ejemplares que sí calzan dentro del modelo. En síntesis, cabría estudiar más en detalle estos casos, por ejemplo por medio de estudios mineralógicos por DRX, de tal modo de esclarecer este hecho.

como por ejemplo, la selección de rangos espectrales como variables de entrenamiento podría llevarse a cabo usando tanto el modelamiento empleado en MCP (modelo de relación física entre química y espectros) como el análisis visual (modelo empírico) usado junto con la RNA. Adicionalmente, ambos modelos son susceptibles de ser mejorados, afinando la selección de bandas y encontrando mejores estandarizaciones tanto para espectros como para química, entre otros factores.

Mención aparte merece la posibilidad de desarrollar estos modelos tomando como base otros tipos de muestras, tanto sólidas (rocas), como acuosas o gaseosas. El primer caso resulta bastante analogable al del sedimento. Cabría establecer la relación entre el espectro medido sobre una cara de la roca y sobre la roca molida, de tal forma de explorar la posibilidad de realizar estimaciones de geoquímica de rocas in-situ. Los casos de muestras acuosas o gaseosas presentan desafíos tanto en aspectos metodológicos, por ejemplo respecto a cómo realizar las mediciones o bien las precisiones necesarias para estimar concentraciones que pueden ser inferiores en varios órdenes de magnitud respecto al caso de muestras sólidas, como en aspectos propios del modelamiento de los espectros VIC y la generación de regresiones, tales como el rango de concentraciones en que el modelo sería aplicable, entre otros.

5.9. FACTORES DE CONTROL

Uno de los objetivos específicos de la presente investigación es determinar los factores que determinan las características espectrales, geoquímicas y minerales dentro de la cuenca del Elqui. A continuación se realiza un análisis estableciendo correlaciones entre diversos factores que probablemente controlan los rasgos de interés.

LITOLOGÍA

Un análisis de la siguiente **Figura 38**, que muestra los seis nodos espectrales proyectados sobre la litología, permite establecer las siguientes observaciones:

- El Nodo 1 se encuentra en el límite entre las formaciones Los Equinos y Cerrillos
- El Nodo 2 se asocia litológicamente al Grupo Bandurrias, y de menor forma a los Intrusivos Cretácicos de la Cordillera de la Costa.
- El Nodo 3 se observa en la Alta Cordillera, en particular en el río La Laguna, además de caracterizando a la quebrada La Marquesa, en la Cordillera de la Costa. En el primer caso distribuyéndose sobre las formaciones Doña Ana y

este modo sería posible establecer relaciones de evolución mineral a lo largo del cauce, además de determinar con un mayor grado de certeza las áreas fuente de los sedimentos.

- Por otra parte un análisis de la mineralogía medida mediante DRX y espectro VNIR permite establecer relaciones entre tipo de litología y nodos espectrales. En este sentido es posible plantear las siguientes hipótesis de relación **Tabla 13**:

Tabla 13 Posibles relaciones entre mineralogía de nodos y unidades geológicas del área de estudio.

Nodo	Mineral(es)	Unidad(es)	Litología(s)
1	Microclina	Formaciones Equinos y Cerrillos	Volcánica-piroclástica
2	Calcita magnésica	Grupo Bandurrias	Sedimentaria marina
3	Calcita magnésica	Grupo Bandurrias	Sedimentaria marina
4 y 5	Piroxéno-Anfíboles-Biotita-Albita	Superunidad Elqui - Intrusivos Terciarios	Intrusiva

Este es un análisis que puede ser refinado mediante estudios mineralógicos más exhaustivos, en particular determinando las condiciones de formación de los minerales indicativos de litología de protolito. Por último no se realiza el análisis para el Nodo 6, puesto que su mineralogía es fundamentalmente de alteración.

ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL, DISTRITOS Y YACIMIENTOS MINEROS

Por otra parte se evalúa la posible relación entre nodos espectrales y tanto zonas de alteración hidrotermal como distritos mineros **Figura 39**. Un análisis visual de esta figura permite establecer como posibles áreas fuentes de los 6 grupos espectrales definidos, las siguientes zonas:

- Nodo 1: Fuente indeterminada dentro del área de estudio.
- Nodo 2: Distritos Andacollo y Almirante Latorre, en las quebradas El Arrayán y Santa Gracia, respectivamente.
- Nodo 3: Fuentes diversas tanto en las quebradas La Marquesa como en la Alta Cordillera.
- Nodos 4 y 5: Zonas de alteración hidrotermal La Coipa y/o Río Ternero.

- Nodo 6: Zonas de alteración hidrotermal Libra-El Indio-Las Hediondas, Vaquitas Heladas, Las Ánimas y/o Río Seco, además de distritos mineros El Indio-Tambo, Nueva Elqui y Carmen de Río Seco.

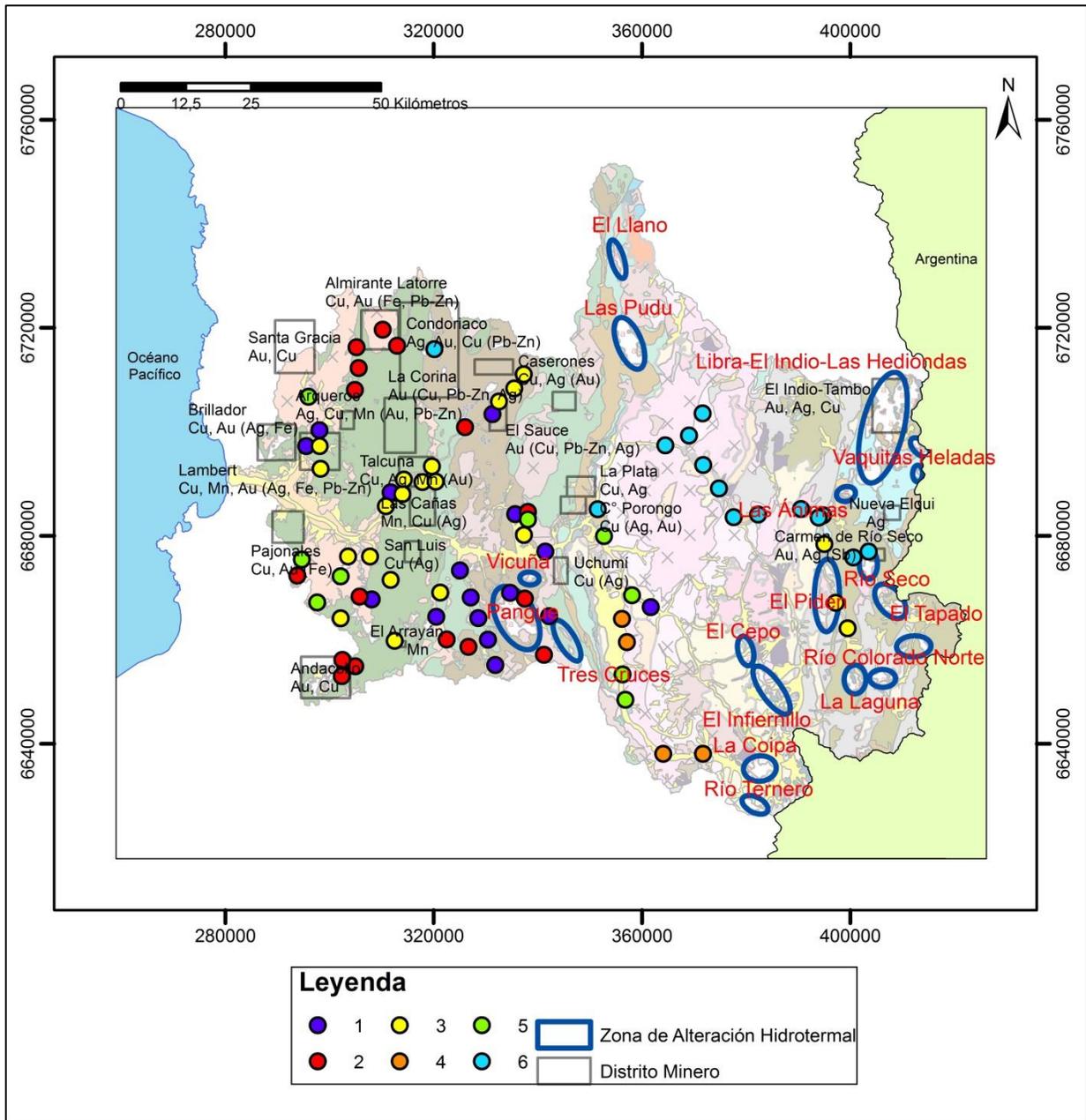


Figura 39 Nodos espectrales, zonas de alteración hidrotermal y distritos mineros.

Al igual que en el caso anterior, estas relaciones pueden ser aclaradas siguiendo metodologías que permitan la correlación certera entre las mineralogías observadas en el sedimentos, respecto a aquellas presentes en las posibles áreas fuente.

OTROS FACTORES

Por último, cabe evaluar otros factores determinantes de los rasgos espectrales, químicos y minerales dentro del área de estudio. Entre ellos se cuentan:

- Factores hidrológicos: El sedimento en estudio, menor a 180 μm , es transportado principalmente por el agua en suspensión y en menor medida de forma disuelta (partículas tamaño limo y arcilla). Es por esto que el tipo de régimen hidrológico dentro de la cuenca en estudio será de relevancia en términos del tipo, duración y distancia de transporte, además del tipo y lugar de deposición, desde donde los sedimentos son recolectados y medidos. En este sentido el rol que juegan los embalse en la zona, La Laguna y en especial Puclaro, debe ser evaluado, toda vez que en particular este último determina el cambio en el régimen hidrológico del río Elqui, desde escorrentía superficial aguas arriba del embalse, a canalización y flujo bajo tierra aguas abajo. Adicionalmente cabe evaluar la importancia de los ciclos climáticos dentro de la zona, en particular el efecto de la lluvia en años de precipitaciones, como por ejemplo en años influenciados por el fenómeno climático El Niño, sobre la movilización de sedimentos desde la Alta Cordillera hasta el mar.
- Condiciones de equilibrio químico: Adicionalmente, es preciso evaluar posibles cambios en la composición mineral producidos entre la deposición de los sedimentos y la medición de los mismos, en especial para minerales con cinéticas de transformación y reacciones progresivas conocidas, que pueden aportar valiosa información respecto de las condiciones químicas de los sedimentos en estudio. De particular importancia son las series de reacción esmectita \rightarrow illita, esmectita \rightarrow clorita, ceolita alcalina \rightarrow analcima \rightarrow ceolitas cálcicas, y caolinita \rightarrow pirofilita, todos estos minerales detectables mediante espectrometría de reflectancia.

6. CONCLUSIONES

METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA

A partir de las distintas relaciones evaluadas en este estudio entre espectrometría de reflectancia VIC, geoquímica, mineralogía DRX e imágenes satelitales, se han podido establecer las siguientes conclusiones, que pueden servir de base para el desarrollo de una nueva metodología de exploración geoquímica:

- Espectrometría de reflectancia VIC y mineralogía: la espectrometría VIC entregó buenos resultados mineralógicos, en particular para un conjunto de minerales no primarios de relevancia para exploración geoquímica, no obstante es preciso recalcar la necesidad de desarrollar bibliotecas de espectros de reflectancia, sobre sedimentos cuya mineralogía sea también conocida, por ejemplo por medio de DRX, de tal modo de disponer de una apropiada base de referencia, y con ello incrementar la aplicabilidad de la información espectral. El desarrollo de bibliotecas espectrales robustas permitiría realizar estudios en terreno que podrían aportar información de relevancia en una amplia gama de ámbitos de la geología. Por ejemplo, en estudios realizados en zonas de alteración hidrotermal sería posible conocer los minerales presentados en la siguiente **Tabla 14**, de interés en términos de la definición de tipos de alteración y ensamblajes minerales diagnósticos en sistemas de pórfidos cupríferos (Velde, 1995)

Tabla 14 Tipos de alteración y sus ensamblajes mineralógicos diagnósticos en sistemas de pórfidos cupríferos (Velde, 1995).

Tipo de alteración	Minerales diagnósticos
Potásica	Feldespato Potásico, Biotita, Sericita, Clorita , Cuarzo
Fílica	Cuarzo, Sericita , Pirita, Clorita, Illita/Esmeclita interestratificadas
Argílica	Caolinita, Montmorillonita, Clorita
Propilítica	Clorita , Epidota, Albita, Carbonatos

- Espectrometría de reflectancia VIC y geoquímica: por medio del uso de modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales se obtuvieron los mejores resultados, para los elementos de interés económico Uranio y la tierra rara Praseodimio, además de Azufre total y Estroncio (**Figura 40**). Cada uno de estos modelos es susceptible de ser usado en terreno con precisiones estadísticas por sobre el 70% y errores del orden de la milésima parte. Además estos modelos pueden ser mejorados aumentando el tamaño del conjunto de entrenamiento.

ELEMENTO	R2	ECM
U	83,55	0,00916
Total S	77,63	0,00924
Pr	73,87	0,00773
Sr	70,82	0,00605

Figura 40 Mejores resultados estadísticos de modelos de regresión quimiométrica construidos por medio de MCP.

- Espectrometría de reflectancia VIC y sensores remotos: en este punto, tal como se mencionó en la sección de discusión, no se obtuvieron buenos resultados, por lo que el uso de sensores remotos del tipo *ASTER* queda restringido solamente a una caracterización espectral preliminar del área de estudio. No obstante queda por evaluar el uso de imágenes satelitales de mayor resolución espacial y más bandas de longitud de onda, de la resolución espacial y espectral de *AVIRIS*, con 224 bandas espectrales en el rango visible-infrarrojo cercano (NASA, 2014).

Con estas relaciones generadas, es posible plantear las bases de una nueva metodología de exploración geoquímica, que constaría de los siguientes pasos:

1. **DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:** en esta etapa se realiza una caracterización geológica preliminar, en base a una revisión bibliográfica. Además se realiza una caracterización espectral preliminar por medio del uso de imágenes satelitales disponibles del área de estudio, desarrollándose un mapa espectral preliminar del área de estudio.
2. **TRABAJO DE TERRENO:** se realizan mediciones in-situ del espectro de reflectancia VIC de sedimentos fluviales, que de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, deberían corresponder a sedimentos secos (o bien encontrar la forma de corregir los efectos de la humedad en alguna etapa dentro del procesamiento de la información espectral), molidos con mortero de ágata o bien tamizados en mallas de luz igual o inferior a 0.180 mm (malla #80 usada en este estudio). Una vez medido el espectro es posible i. obtener información mineralógica en base al uso de bibliotecas espectrales, y ii. realizar clasificación y mapeo espectral, sin y con el uso de sensores remotos, por medio de la aplicación de una Red Neuronal Artificial. Por otra parte las muestras cuyos espectros han sido medidos son recolectadas para análisis en laboratorio.

3. **TRABAJO DE LABORATORIO:** permite realizar un análisis geoquímico altamente preciso, por medio del uso de métodos analíticos de robustez comprobada, tales como espectrometría de masa u óptica, además de análisis mineralógico por medio de difracción de rayos X u otros métodos más precisos, como por ejemplo SEM. Estas muestras de geoquímica, composición mineral y espectros VIC conocidos son la base para la construcción del modelo de regresión quimiométrico.
4. **CONSTRUCCIÓN DE MODELO QUIMIOMÉTRICO:** este paso involucra el preprocesamiento de la información espectral, donde se cuenta obtención de los datos con alta precisión numérica, estandarización de los espectros por primera derivada, clasificación espectral de tal modo de elegir dentro de la base de datos de la regresión un subconjunto acorde a la signature espectral medida, y finalmente aplicación del modelo de regresión, por medio de RNA y de MCP.
5. **(RE)DEFINICIÓN DE BLANCOS DE EXPLORACIÓN:** una nueva campaña de terreno permite la aplicación del modelo de regresión in-situ, en tiempo real y con costos reducidos mediante el uso combinado de espectrometría VIC, geoquímica y mineralogía. Nuevas estudios en laboratorio permitirían redefinir estos blancos y/o mejorar los modelos quimiométricos al contarse con un mejor conjunto de entrenamiento obtenido desde las diversas campañas de terreno.

La anterior metodología se esquematiza en la **Figura 41**.

1. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	
Revisión bibliográfica	Uso de sensores remotos
2. TRABAJO DE TERRENO	
Medición de espectros VIC	Toma de muestras para geoquímica y mineralogía
Información mineralógica y clasificación espectral in-situ	
3. TRABAJO DE LABORATORIO	
Estudio geoquímico (ICP) y mineralógico (DRX)	
4. CONSTRUCCIÓN DE MODELO QUIMIOMÉTRICO	
Modelo de regresión MCP y RNA	
5. (RE)DEFINICIÓN DE BLANCOS DE EXPLORACIÓN	

Figura 41 Esquema resumen del modelo de exploración geoquímica presentado en el presente estudio.

CASO DE ESTUDIO: CONTAMINACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO ELQUI

El uso combinado de espectrometría de reflectancia, geoquímica y mineralogía, permite el desarrollo de investigaciones geoquímicas con diversos enfoques, entre los

que se cuentan la exploración minera (descubrimiento de yacimientos) y la geoquímica ambiental (polución y contaminación ambiental).

Un ejemplo del segundo enfoque se ha abordado de modo somero en la presente investigación, en particular destaca dentro de la cuenca en estudio el caso del río Elqui y las altas concentraciones de As, además de la pregunta respecto a la o las posibles causas que expliquen este fenómeno.

Con respecto a este hecho, de relevancia para la salud de la población que habita poblados como Rivadavia, Cochiguaz y Vicuña, resultaría fundamental estudiar el rol que juega la forma mineral del Óxido de Arsénico III Arsenolita (As_2O_3), de manera tal de entender la anomalía de As, tanto desde un punto de vista geoquímico como también para establecer las causas del fenómeno, y a partir de ello desarrollar un plan de mitigación de la contaminación o polución. El hecho que de forma reconocida la actividad minera en el distrito El Indio-El Tambo haya producido Arsenolita como parte de su proceso de descomposición de Enargita para extracción de Cu, Au y Ag (Oyarzun et al, 2004), su escasa o nula ocurrencia natural reportada (Anthony et al, 2014), además de la información geoquímica aportada por (Miralles, 2013), que muestra con claridad que en la mayoría de los casos estudiados las concentraciones de As son notoriamente mayores en los sedimentos fluviales recientes respecto de los sedimentos de terrazas fluviales, que representarían en la mayoría de los casos sedimentos preindustriales, es decir previos a la actividad minera en la zona (lo que podría comprobarse con dataciones de los sedimentos), son argumentos geológicos que tienden a indicar como causa principal de las altas concentraciones de As en la cuenca del río Elqui, a la actividad minera en el distrito El Indio-El Tambo, no obstante más estudios deben llevarse a cabo para esclarecer esta situación de un modo riguroso.

En la **Figura 42** se presenta un mapa con todas las muestras analizadas en el presente trabajo cuyas concentraciones exceden el estándar internacional PEC, que representa un umbral de concentración de efecto probable sobre la salud humana (MacDonald et al, 2000). En este mapa es posible constatar que el río Seco también presenta altas concentraciones de As, que pueden estar asociadas a la actividad minera en los distritos Nueva Elqui y Carmen de Río Seco, que al igual que en el caso del distrito El Indio-El Tambo, están asociados a una zona de alteración hidrotermal neógena caracterizada por mineralización de arseniatos, principalmente enargita. Por otra parte una muestra tomada desde la unión del río Cochiguaz con el río Claro también presenta concentraciones de As probablemente nocivas para la salud humana. Cabe observar que el caso de la contaminación del río Elqui involucra una diversificación de los metales pesados contaminantes río abajo, pasando desde muestras con solo As, a la combinación As-Cu, y finalmente As-Cu-Zn.

Por otra parte se observa como principal contaminante de la cuenca en su segmento occidental al Cu, que contamina las quebradas El Arrayán (asociada a la

actividad minera en el distrito Andacollo), Talca, Santa Gracia y Marquesa. Destacan dentro de esta última quebrada dos muestras que además de Cu presentan As, lo que podría deberse a contaminación generada por procesos productivos de la minería, puesto que en esa zona no existen ocurrencias naturales de minerales de As, tal como ocurre en la alta cordillera.

La metodología de exploración geoquímica antes expuesta permitiría abordar en detalle estos casos de contaminación o polución ambiental de un modo integral. Un plan de acción a nivel regional involucraría los siguientes elementos:

- 0) Desarrollo de modelo de regresión para estimación precisa de metales pesados en terreno (As, Cu, Pb, Zn) a partir de las muestras de sedimento ya obtenidas desde el área de estudio.
- 1) Uso de sensores remotos para obtención de información espectral y mineralógica preliminar.
- 2) Medición y seguimiento en terreno de señales espectrales asociadas a altas concentraciones de metales pesados, hasta determinar probables fuentes de contaminación, que pueden ser de origen antropógeno (tranques de relave, botaderos, embalses de relave, yacimientos, etc.) o natural (formaciones geológicas, zonas de alteración hidrotermal, sistemas de vetas, etc.). Toma de muestras.
- 3) Análisis en laboratorio. Validación y ajuste del modelo de regresión.
- 4) Definición o redefinición de la fuente de contaminación.
- 5) Caracterización geoquímica y mineralógica del caso de estudio.
- 6) Desarrollo de plan de mitigación.

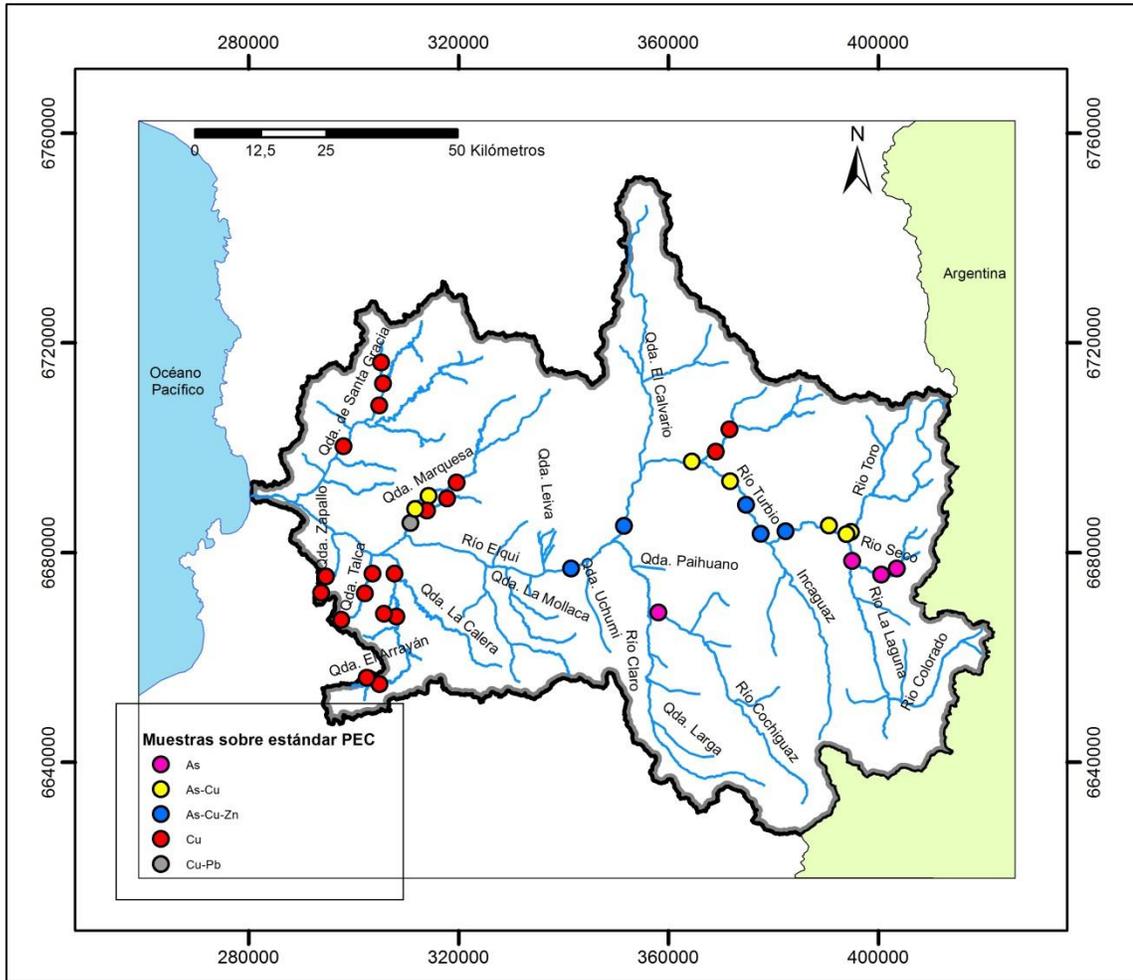


Figura 42 Mapa de sedimentos con concentraciones por sobre el estándar PEC (MacDonald et al, 2000).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, G., Riquelme, R., Martinod, J., & Darrozes, J. (2013). Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean Geology* 40 (1), 79-101.
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., & Nichols, M. C. (2014). *Handbook of Mineralogy, Mineralogical Society of America*. Recuperado el 24 de 6 de 2014, de <http://www.handbookofmineralogy.org/>
- Astudillo, F. (2011). Controles determinantes en la geoquímica y mineralogía de los sedimentos fluviales activos en la cuenca del río Limarí - IV Región de Coquimbo, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile*.
- Carrasco, F. (2013). Metodología de exploración minera mediante espectrometría de reflectancia en sedimentos activos fluviales, cuenca del río Limarí, IV Región, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile*.
- Cepeda, P. (. (2008). *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y cambio del clima*. La Serena, Chile: Universidad de La Serena.
- Charrier, R., Pinto, P., & Rodríguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile*, 1-94.
- Clark, R. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Man. Remote Sens.* 3, 3-58.
- Clark, R., & Roush, T. (1984). Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *J. Geophys. Res.*, 89, 6329- 6340.
- Clark, R., Swayze, G., Wise, R., Livo, K., Hoefen, T., Kokaly, R., y otros. (2003). USGS Digital Spectral Library splib05a. *USGS Open File Report 03-395*.
- Csiro. (7 de Agosto de 2012). Australian ASTER Geoscience Product Notes. ePublishNo. EP-30-07-12-44.
- Du, H., Chang, C., Ren, H., D'Amico, F., & Jensen, J. O. (2004). New Hyperspectral Discrimination Measure for Spectral Characterization. *Optical Engineering, Vol. 43, No. 8*, 1777-1786.
- Dutrow, B.L.; Clark, C.M. (10 de Febrero de 2013). Recuperado el 10 de Febrero de 2014, de Geochemical instrumentation and Analysis; X-Ray Powder Diffraction (XRD):

http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.htm
|

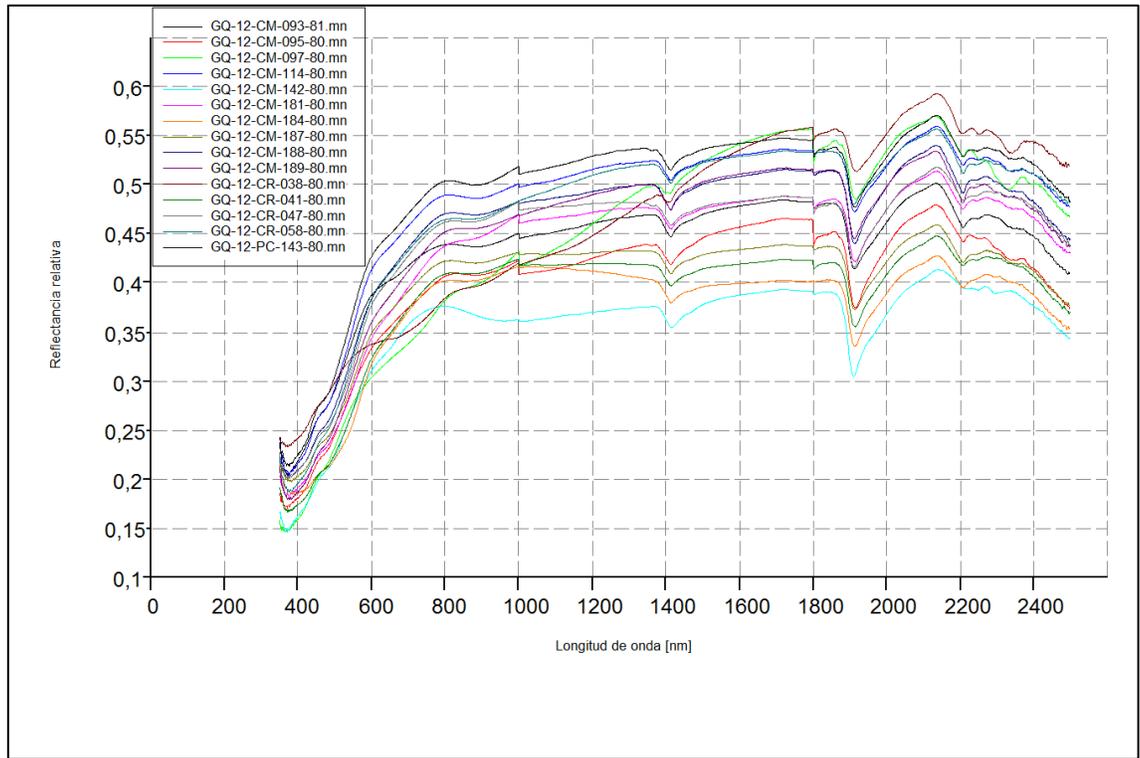
- Fritzke, B. (1994). Growing Cell Structures A Self-Organizing Network for Unsupervised and Supervised Learning. *Neural Networks, Volume 7, Issue 9*, 1441-1460.
- Geladi, P., & Kowalski, B. (1986). Partial least squares regression: A tutorial. *Analytica Chimica, 185*, 1-17.
- He, T., Wang, Z., Lin, Z., & Cheng, Y. (2009). Spectral features of soil organic matter. *Geo Spat. Inf. Sci. 12*, 33-40.
- Hong Yan, R., Da Fang, Z., A.N.Singh, Jian Jun, P., Dong Sheng, Q., & Run He, S. (2009). Estimation of As and Cu Contamination in Agricultural Soils Around a Mining Area by Reflectance Spectroscopy: A Case Study. *Pedosphere, 719-726*.
- Kohonen, T. (1998). The self-organizing map. *Neurocomputing, Volume 21, Issues 1-3*, 1-6.
- Kohonen, T. (2013). Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks, Volume 37*, 52-65.
- Kröse, B., & van der Smagt, P. (1996). An Introduction to Neural Networks. *The University of Amsterdam*, 135.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapir, A. T., P. J., y otros. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of the Environment, v. 44*, 145 - 163.
- Lacassie, J., Ruiz del Solar, J., Roser, B., & Hervé, F. (2006). Visualization of volcanic rock geochemical data and classification with artificial neural networks. *Mathematical Geology Vol.38 Issue 6*, 697-710.
- Lacassie, J.P. (2003). Estudio de la proveniencia sedimentaria de los complejos metamórficos de los Andes Patagónicos (46'- 51' LAT.S) mediante la aplicación de redes neuronales e isótopos estables. *Tesis (doctor en ciencias, mención geología) - Universidad de Chile*, 1-197.
- Lacassie, J.P.; Gutzmer, J.; McClung, C.; Bailie, R.; Ruiz-del-Solar, J. (2006). Geochemical patterns of schist from the Bushmanland Group: an artificial neural networks approach. *Journal of Geochemical Exploration 91*, 81-98.
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. *Arch. Environ. Contam. Toxicol. 39*, 20 -31.

- Malley, D., & Williams, P. (1997). Use of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy in Prediction of Heavy Metals in Freshwater Sediment by Their Association with Organic Matter. *Environ. Sci. Technol.* 31, 3461-3467.
- Miralles, C. (2013). Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile. *Memoria para optar al título de Geóloga, Universidad de Chile.*
- NASA. (29 de 12 de 2014). *AVIRIS, Jet Propulsion Laboratory*. Recuperado el 29 de 12 de 2014, de <http://aviris.jpl.nasa.gov/aviris/>
- Nasi, C., Moscoso D., R., & Maksaev, J. (1990). Hoja Guanta. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. *Carta Geológica de Chile, N° 67.*
- Nasi, C., Moscoso, D., & Maksaev, J. (1990). Hoja Guanta. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. . *Carta Geológica de Chile, N°67.*
- Novoa, E., & Nuñez, A. (1995). Aplicación metodológica para la jerarquización de planes de manejo en cuencas Hidrográficas (cuenca hidrográfica del Río Elqui, Chile semiárido). *Revista de Investigación y Desarrollo (2)*, 78-89.
- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J., & Maturana, H. (2004). Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic process. *Journal of Geochemical Exploration* 84, 53-64.
- Oyarzun, R.; Guevara, S.; Oyarzún, J.; Lillo, J.; Maturana, H.; Higuera, P. (2006). The As-contaminated Elqui river basin; a long lasting perspective (1975-1995) covering the initiation and development of Au-Cu-As mining in the Andes of northern Chile. *Environmental Geochemistry and Health* 28(5), 431-443.
- Randall, T. (2014). An Introduction to Partial Least Squares Regression. *SAS Institute Inc., Cary, NC.*
- Richards, J. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- Sanchez, A., & Morales, R. (1993). *Las Regiones de Chile. Espacio Físico y Humano-Económico*. Santiago: Editorial Universitaria.
- Shepard, P. (1987). Retrospective. *Journal of Chemometrics, Vol. 1, 3.*
- Shi, T., Chen, Y., Liu, Y., & Wu, G. (2014). Visible and near-infrared reflectance spectroscopy—An alternative for monitoring soil contamination by heavy metals. *Journal of Hazardous Materials* 265, 166-176.

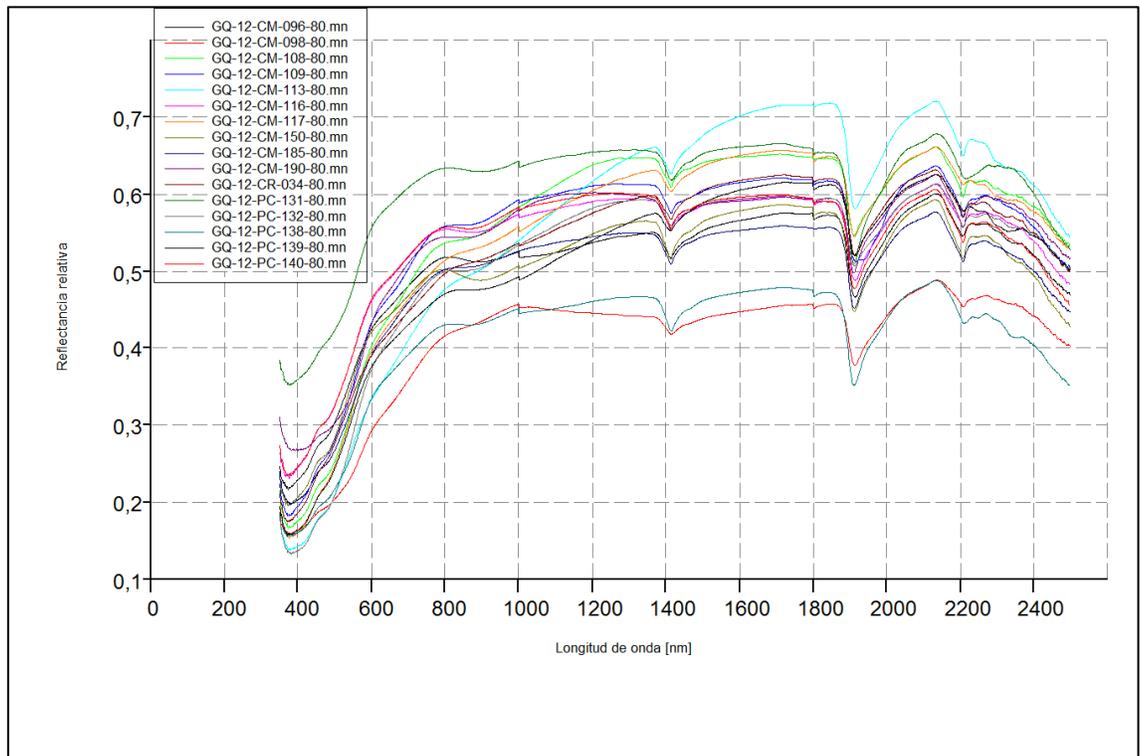
- Statgraphics. (2009). *Mínimos Cuadrados Parciales*. Statpoint Technologies, Inc.
- Torren, J., & Barrón, V. (2002). Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides. *Encycl. Surf. Colloid Sci.*, 1438-1446.
- Velde, B. (1995). *Origin and Mineralogy of Clays. Clays and the Environment*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer-Verlag.
- Walker, A.J.; Croos, S.S.; Harrison, R.F. (1999). Visualisation of biomedical datasets by use of growing cell structure networks: a novel diagnostic classification technique. *Lancet* 354, 1518-1521.

ANEXOS

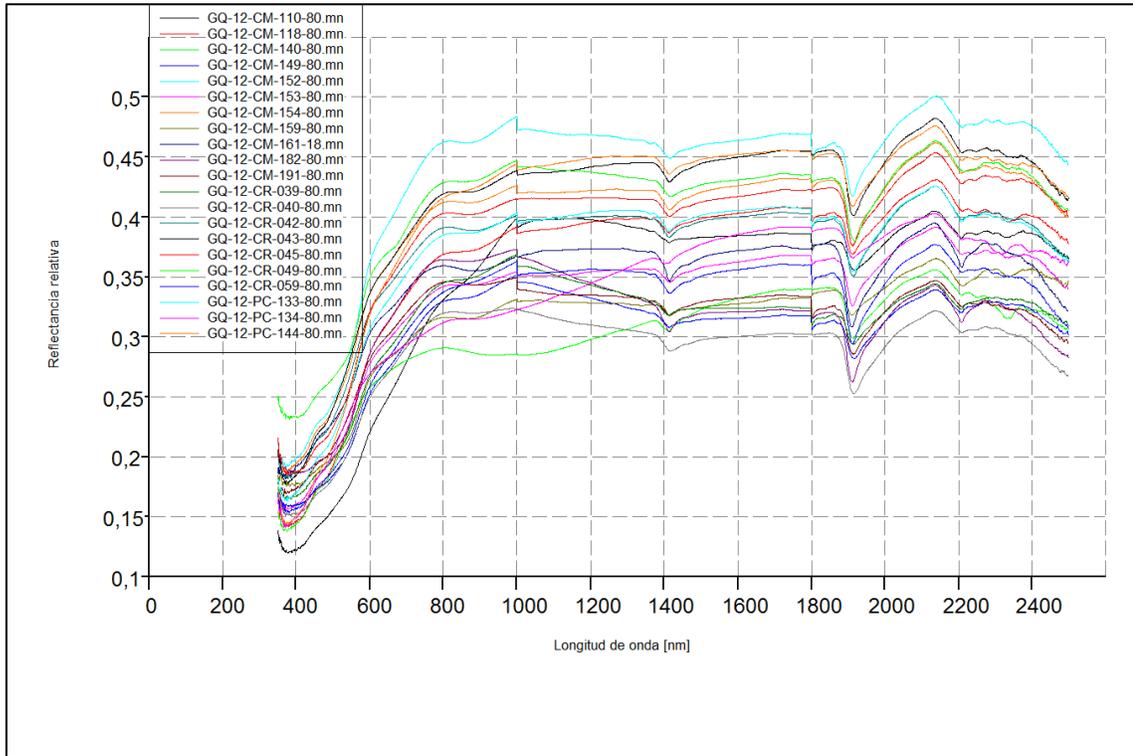
A. ESPECTROS DE REFLECTANCIA CLASIFICADOS CON RNA



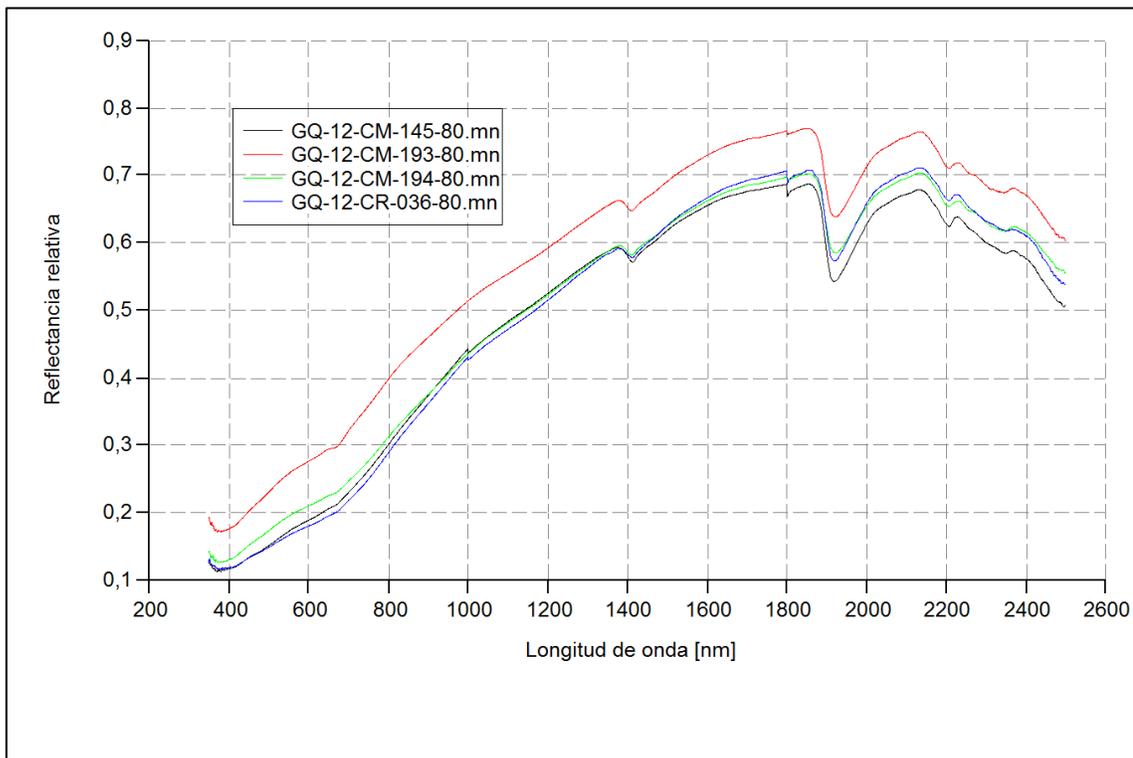
Anexo 1 Espectros Nodo 1



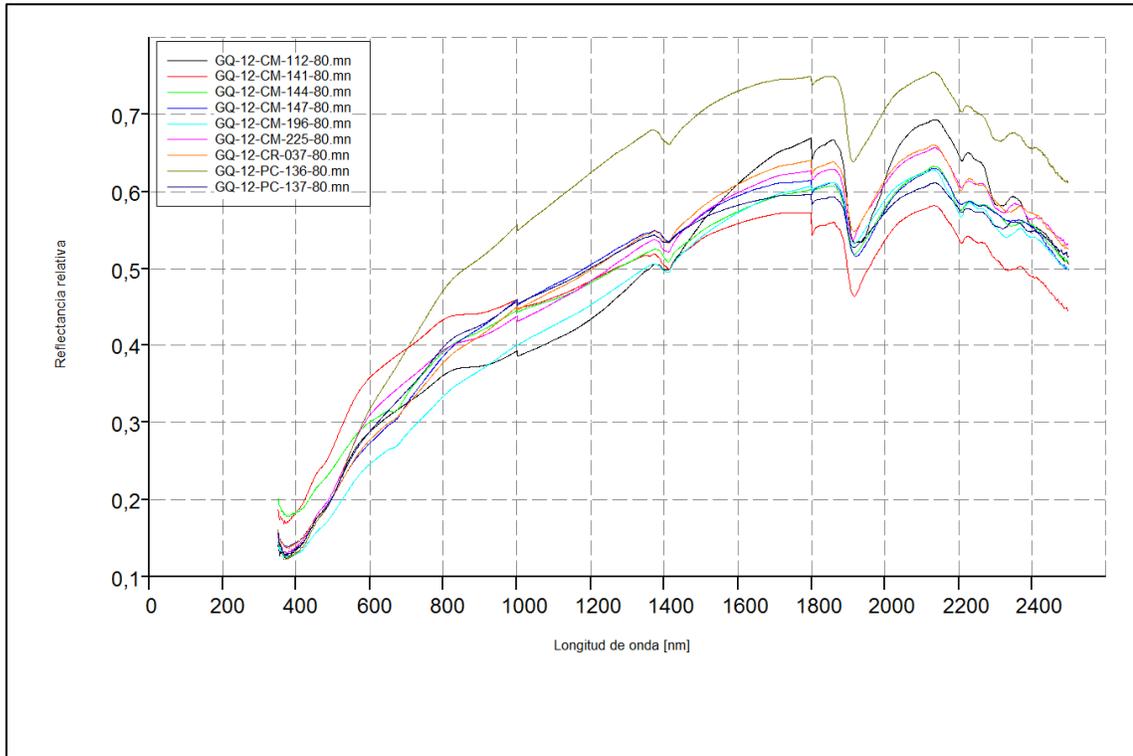
Anexo 2 Espectros Nodo 2



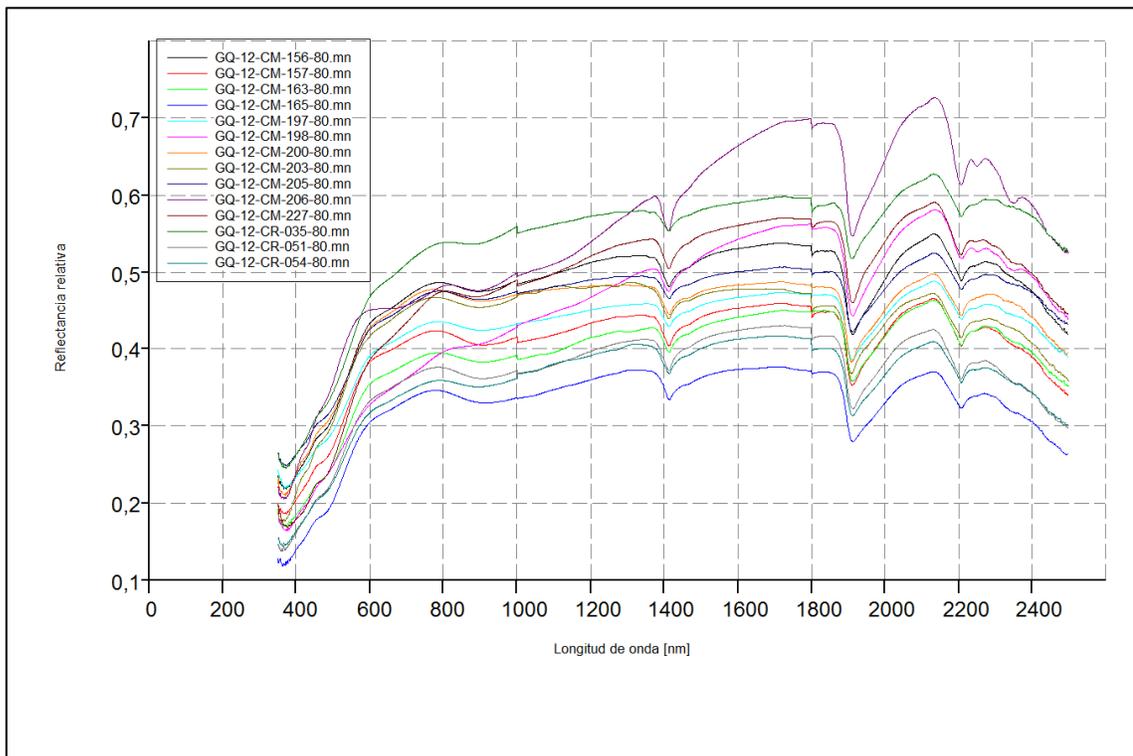
Anexo 3 Espectros Nodo 3



Anexo 4 Espectros Nodo 4



Anexo 5 Espectros Nodo 5



Anexo 6 Espectros Nodo 6

B. COORDENADAS DE MUESTRAS ANALIZADAS (Muestras de validación con fondo verde)

Muestra	UTM Este	UTM Norte	Muestra	UTM Este	UTM Norte
GQ-12-CM-093	341483	6676960	GQ-12-CM-198	371676	6703507
GQ-12-CM-095	334712	6669005	GQ-12-CM-200	400591	6675817
GQ-12-CM-096	337548	6667887	GQ-12-CM-203	403535	6676946
GQ-12-CM-097	342209	6664498	GQ-12-CM-205	371799	6693582
GQ-12-CM-098	341212	6657111	GQ-12-CM-206	364506	6697361
GQ-12-CM-108	302404	6652981	GQ-12-CM-225	295985	6706707
GQ-12-CM-109	304957	6654888	GQ-12-CM-227	320174	6715861
GQ-12-CM-110	302170	6664105	GQ-12-CR-034	338121	6684568
GQ-12-CM-112	302170	6672181	GQ-12-CR-035	351535	6685093
GQ-12-CM-113	293852	6672325	GQ-12-CR-036	356197	6664001
GQ-12-CM-114	295574	6697234	GQ-12-CR-037	356312	6653307
GQ-12-CM-116	310253	6719615	GQ-12-CR-038	361729	6666271
GQ-12-CM-117	305635	6712257	GQ-12-CR-039	337340	6711053
GQ-12-CM-118	298153	6697236	GQ-12-CR-040	332556	6705792
GQ-12-CM-140	337349	6680152	GQ-12-CR-041	331321	6703355
GQ-12-CM-141	338111	6683129	GQ-12-CR-042	319688	6693328
GQ-12-CM-142	335683	6684144	GQ-12-CR-043	320438	6690410
GQ-12-CM-144	352739	6679920	GQ-12-CR-045	314032	6687980
GQ-12-CM-145	357148	6659538	GQ-12-CR-047	311765	6688324
GQ-12-CM-147	358119	6668562	GQ-12-CR-049	397234	6667106
GQ-12-CM-149	335513	6708316	GQ-12-CR-051	393969	6683482
GQ-12-CM-150	326062	6700876	GQ-12-CR-054	377633	6683545
GQ-12-CM-152	317861	6690338	GQ-12-CR-058	308152	6667755
GQ-12-CM-153	310843	6685651	GQ-12-CR-059	312547	6659783
GQ-12-CM-154	314303	6690804	GQ-12-PC-131	302503	6656132
GQ-12-CM-156	374811	6689088	GQ-12-PC-132	305811	6668298
GQ-12-CM-157	390591	6685122	GQ-12-PC-133	307806	6675992
GQ-12-CM-159	399510	6662204	GQ-12-PC-134	303593	6675987
GQ-12-CM-161	395045	6678398	GQ-12-PC-136	297660	6667185
GQ-12-CM-163	382321	6684056	GQ-12-PC-137	294722	6675435
GQ-12-CM-165	394797	6683917	GQ-12-PC-138	313006	6716515
GQ-12-CM-181	325089	6673309	GQ-12-PC-139	305240	6716223
GQ-12-CM-182	321279	6669069	GQ-12-PC-140	304890	6708022
GQ-12-CM-184	320537	6664408	GQ-12-PC-143	298117	6700274
GQ-12-CM-185	322545	6660027	GQ-12-PC-144	298311	6692849
GQ-12-CM-186	331857	6655135	GQ-13-FA-102	312940	6723306
GQ-12-CM-187	327155	6668117	GQ-13-FA-106	346799	6681175
GQ-12-CM-188	328582	6664145	GQ-13-FA-109	351775	6687760
GQ-12-CM-189	330446	6659989	GQ-13-FE-060	309503	6661901
GQ-12-CM-190	326715	6658609	GQ-13-FE-103	312104	6690008
GQ-12-CM-191	311755	6671506	GQ-13-JP-068	318647	6680530
GQ-12-CM-193	371756	6638037	GQ-13-JP-081	355441	6662201
GQ-12-CM-194	364130	6638039	GQ-13-JP-082	355366	6666320
GQ-12-CM-196	356835	6648432	GQ-13-LB-056	322832	6697330
GQ-12-CM-197	369073	6699259	GQ-13-LB-108	299447	6652907

Anexo 7 Coordenadas geográficas de las muestras analizadas (WGS84 19S).