



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

METODOLOGÍA PARA ORDENAR INTERÉS EN UN PORTAFOLIO DE
PROSPECTOS MINEROS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ANDRÉS NICOLÁS OÑATE CHAMBLAS

PROFESOR GUÍA:

WINSTON ROCHER ANDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MANUEL REYES JARA

XAVIER EMERY

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE:** Ingeniero Civil De Minas.
POR: Andrés Nicolás Oñate Chamblas.
FECHA: 20/07/2016
PROFESOR GUÍA: Winston Rocher Anda.

METODOLOGÍA PARA ORDENAR INTERÉS EN UN PORTAFOLIO DE PROSPECTOS MINEROS.

Teniendo como motivación, la inherente historia de bajas tasas de éxito en la exploración minera temprana, la necesidad de mejorar el uso de recursos destinados a exploración avanzada, y teniendo como agravante un escenario económico adverso a raíz de una baja en los precios de los metales. En esta memoria se desarrolla una metodología para priorizar prospectos mineros en etapas tempranas de exploración estudiando de forma, conjunta, información geocientífica y factores no geológicos, comúnmente son considerados, pero no ordenan interés tempranas de exploración.

Para esto, se desarrolla la metodología la cual consiste en identificar, parametrizar y posteriormente segmentar la información geológica, de los principales yacimientos minerales relativos a los metales de cobre, hierro, oro y plata con ocurrencia en Chile, con el propósito de simplificar y estandarizar la forma en que se evalúa esta información en el proceso de exploración. Además, para robustecer los resultados y discriminar la información teórica, se utiliza información empírica con la cual se priorizan los parámetros o características con mayores frecuencias.

De forma similar, se identifican y parametrizan los factores no geológicos más relevantes que afectan al momento de desarrollar un prospecto minero a una mina operativa. Esto con el fin de evaluar que tan favorable son las condiciones del prospecto considerándolo como un potencial proyecto minero futuro-

Finalmente se muestra un ejemplo de aplicación comparando tres casos con características aleatorias y otro ejemplo con información de dos minas pasadas con ocurrencia en Chile.

ABSTRACT

Having as motivation, the inherent history of low success rates in early mining exploration, the need to improve the use of resources for advanced exploration, and taking as an aggravating an adverse economic scenario caused by a drop in metal prices. In this thesis develops a methodology to prioritize mining prospects in early stages of exploration studying form, together, geoscientific information and geological factors not commonly are considered, but do not order early exploration interest.

For this, the methodology which is to identify, parameterize and then segment the geological, major mineral deposits related to metals copper, iron, gold and silver occurrence in Chile, in order to simplify develop and standardize the way this information is evaluated in the scanning process. In addition, to strengthen the results and discriminate theoretical information, empirical information with which parameters or characteristics are prioritized higher frequencies used.

Similarly, they identify and parameterize the most important non-geological factors affecting the time to develop a mining prospect to an operating mine. This in order to assess how favorable are the conditions of the prospectus regarding it as a potential mining project future-

Finally an application example comparing three cases with random characteristics and another with information of two pass mines in Chile occurrence is shown.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer enormemente a toda mi familia, la cual que siempre me apoyó durante todo el proceso universitario y jamás dudaron de mí.

A mi polola por hacerme enormemente feliz.

A mis queridos amigos y compañeros.

A mis profesores guías por su gran disposición a pesar de las dificultades.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción y motivación	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivo Específico	2
1.2 Alcances.....	3
1.3 Metodología	4
1.3.1 Caracterización de modelos geológicos	4
1.3.2 Parametrización de modelos geológicos	4
1.3.3 Segmentación de modelos geológicos usando Clústeres Jerárquicos	5
1.3.4 Enriquecimiento de grupos conformados usando base de datos	5
1.3.5 Caracterización de Factores no geológicos	5
1.3.6 Parametrización de factores no geológicos	5
1.3.7 Esquema de metodología	6
Capítulo 2. Antecedentes	7
2.1 Depósitos minerales.....	7
2.2 Exploración minera.....	8
2.2.1 Etapa de exploración geológica.....	9
2.3 Modelos geológicos.....	10
2.3.1 Pórfidos cupríferos.....	10

2.3.2	Skarns	14
2.3.3	Depósitos epitermales	17
2.3.4	Depósitos estratoligados	20
2.3.5	Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) y Iron Oxide Apatite (IOA)	23
2.3.6	Sulfuros Masivos Volcanogénicos	24
2.4	Modelos de segmentación	27
2.4.1	Métodos Jerárquicos de Análisis de Clústeres	29
2.4.2	Árboles de regresión y clasificación.....	33
Capítulo 3.	Caracterización de modelos geológicos.....	35
3.1	Resumen de características por depósito	37
3.1.1	Pórfidos cobre(Au-Mo).....	37
3.1.2	Skarn de cobre	37
3.1.3	Skarn de hierro	38
3.1.4	Skarn de zinc – plomo	38
3.1.5	VMS de cobre.....	39
3.1.6	VMS polimetálico (Au-Ag).....	39
3.1.7	Sedex de plata.....	40
3.1.8	Estratoligado de cobre.....	40
3.1.9	Estratoligado de hierro.....	41
3.1.10	Estratoligado de plata.....	41

3.1.11	Epitermal de oro	42
3.1.12	Epitermal de plata	42
3.1.13	Tipo Carlin de oro	43
3.1.14	IOCG de cobre	44
3.1.15	IOCG y IOA de hierro	45
3.1.16	IOCG de oro	46
Capítulo 4.	Parametrización de modelos geológicos	47
Capítulo 5.	Segmentación de modelos geológicos	56
5.1	Ponderación de parámetros	60
Capítulo 6.	Enriquecimiento empírico de grupos	61
6.1	Preparación de datos	61
Capítulo 7.	Caracterización de factores no geológicos	66
7.1	Condiciones geográficas	68
7.2	Infraestructura	68
7.3	Contexto social	69
7.4	Legalidad	70
7.5	Económicos	70
Capítulo 8.	Parametrización de factores no geológicos	71
8.1	Condiciones geográficas	71
8.1.1	Lejanía o Cercanía	71

8.1.2	Altura sobre el nivel de mar	72
8.1.3	Clima	73
8.2	Infraestructura	74
8.2.1	Facilidad de acceso y disponibilidad de terreno para instalaciones.....	74
8.2.2	Disponibilidad de recursos energéticos y hídricos	74
8.3	Legalidad.....	75
8.4	Contexto social.....	75
8.4.1	Disponibilidad de recursos humanos	76
8.4.2	Trabajo de sociabilización previo con comunidades.....	76
8.5	Económicos.....	77
8.5.1	Estabilidad económica de la zona	77
Capítulo 9.	Ejemplo de Aplicación, evaluación geológica.....	78
Capítulo 10.	Conclusiones y Recomendaciones	81
10.1	Recomendaciones	83
Capítulo 11.	Bibliografía	84
Anexos A:	Valores finales asignados por grupo y tipos de variables	87
11.1	Grupo 1: Pórfidos.....	87
11.2	Grupo 2: SME	88
11.3	Grupo 3: IOCG-IOA	91
11.4	Grupo 4: Epitermales	93

Anexos B: Árboles de regresión	95
11.5 Depósitos vs Mineralogía.....	95
11.6 Depósitos vs alteraciones hidrotermales.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Organigrama típico de una empresa junior de exploración y esquematización del flujo de información.	1
Figura 2: Esquema gráfico de la metodología desarrollada	6
Figura 3: Zonación de alteraciones (izquierda) y mineralización (derecha) típicas. Lowell & Guilbert (1970)	12
Figura 4: Perfil típico de una zona de enriquecimiento supérgeno.....	13
Figura 5 De izquierda a derecha Skarn masivo pervasivo, Skarn asociado a vetas y Skarn estratiforme (Ray and Webster,1991).	14
Figura 6: Esquema de depósitos epitermales de baja y alta sulfuración.....	20
Figura 7: Esquema mostrando el sistema de circulación de aguas marinas que dan origen a depósitos de sulfuros masivos en los fondos oceánicos.	25
Figura 8: Representación gráfica de la segmentación de dato	27
Figura 9: Ejemplo de estructura de un Dendograma.....	29
Figura 10 Dendograma resultante para el ejemplo anterior.	32
Figura 11: esquema de división de datos en árboles de clasificación	33
Figura 12: Dendograma resultante de los depósitos minerales trabajados.....	56
Figura 13: Dendograma de los depósitos con línea indicando los grupos	58
Figura 14 : frecuencia de minerales. Porcentaje(naranja) N° Reportes (azul).....	63
Figura 15 Representación de nodos en árbol de clasificación	65
Figura 16: Árbol de clasificación de factores no geológicos.....	67
Figura 17 Árbol de regresión de pórfidos cupríferos vs minerales.	95

Figura 18 Árbol de regresión de Cobre en sedimentos (Estratoligado de Cu) vs minerales.	96
Figura 19 Árbol de regresión de skarns de cobre vs minerales.....	97
Figura 20 Árbol de regresión de skarns de hierro vs minerales.	98
Figura 21 Árbol de regresión de vetas epitermales vs minerales.	99
Figura 22 Árbol de regresión de vetas polimetálicas (epitermales) vs minerales.	100
Figura 23 Árbol de regresión de VMS vs minerales.	101
Figura 24 Árbol de regresión de pórfidos de cobre vs alteraciones.....	102
Figura 25 Árbol de regresión de cobre en sedimentos vs alteraciones.	103
Figura 26 Árbol de regresión de Skarns de cobre vs alteraciones.	104
Figura 27 Árbol de regresión de Skarns de hierro vs alteraciones.	105
Figura 28 Árbol de regresión de vetas epitermales vs alteraciones.	106
Figura 29 Árbol de regresión de vetas polimetálicas vs alteraciones.	107
Figura 30: Árbol de regresión de VMS vs alteraciones.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ejemplo simplificado del tipo de parametrización realizada para cada tipo de yacimiento	4
Tabla 2 Definición de las etapas de exploración (modificado de Lord et al,2001)	8
Tabla 3: Matriz de distancias iniciales, nivel K=1.	30
Tabla 4 Matriz de distancias, nivel K=2.	31
Tabla 5 Matriz de distancias, nivel K=3.	31
Tabla 6 Matriz de distancias, nivel K=4.	31
Tabla 7 Matriz de distancias, nivel K=5.	32
Tabla 8 Matriz de distancias, nivel K=6 (final).	32
Tabla 9: Resumen de principales metales de producción por tipo de yacimiento	35
Tabla 10: Resumen de número tipos de variables estudiadas	36
Tabla 11:Resumen de características de pórfidos cupríferos	37
Tabla 12: Resumen de características skarns de cobre.....	37
Tabla 13:Resumen de características skarns de hierro	38
Tabla 14: Resumen de características skarns de zinc-plomo	38
Tabla 15: Resumen características VMS de Cobre.....	39
Tabla 16: Resumen características VMS polimetálicos.....	39
Tabla 17: Resumen características depósitos Sedex de plata	40
Tabla 18: Resumen características Estratoligados de Cobre.....	40
Tabla 19: Resumen características Estratoligados de Hierro.....	41

Tabla 20: Resumen características Estratoligados de Plata	41
Tabla 21: Resumen características Epitermales de Oro	42
Tabla 22: Resumen características Epitermales de Plata	42
Tabla 23: Resumen características Carlin de Oro	43
Tabla 24: Resumen características IOCG de Cobre	44
Tabla 25: Resumen características IOCG-IOA de Hierro	45
Tabla 26: Resumen características IOCG de Oro	46
Tabla 27 Valores designados por variable según grado de correlación	47
Tabla 28: Simbología de Depósitos.....	47
Tabla 29: Parametrización de Minerales	48
Tabla 30: Parametrización de Minerales	49
Tabla 31: Parametrización de Minerales	50
Tabla 32: Parametrización de tipos de rocas	51
Tabla 33: Parametrización de alteraciones hidrotermales.....	52
Tabla 34 Parametrización de formas de mineralización	53
Tabla 35: Parametrización de estilos de mineralización.....	53
Tabla 36: Parametrización de firmas geoquímicas.....	54
Tabla 37: Parametrización de geografías y fajas metalogénicas	54
Tabla 38: Parametrización tamaño.....	55
Tabla 39 Historial de conglomeración de grupos indicando la distancia de unión (o coeficiente de disimilaridad)	57

Tabla 40: Resumen de grupos conformados.....	59
Tabla 41 Ejemplo de ponderación para cuatro minerales del grupo de Epitermales-	60
Tabla 42: Ejemplo de formato original la base de datos de la USGS. Comm=commoditie y Dep_id= número de depósito	61
Tabla 43: Ejemplo de tabla luego del manejo de datos.....	61
Tabla 44 Resumen del número de datos y variables trabajadas.....	62
Tabla 45: Resumen de número de depósitos encontrados y grupo al que pertenecen..	62
Tabla 46: Valores asignados según porcentaje de ocurrencia	63
Tabla 47: Ejemplo de aumento de valor de ponderadores según frecuencia en datos ..	64
Tabla 48: Distancia al mar de distintas minas en Chile	71
Tabla 49: Ponderación de lejanía/cercanía	72
Tabla 50 Altura(msnm) de distintas en Chile.....	72
Tabla 51: Ponderación de altura	73
Tabla 52: Ponderación actividad climática	73
Tabla 53: Ponderación de irregularidad topográfica.....	74
Tabla 54: Ponderación disponibilidad de recursos energéticos.....	74
Tabla 55 Ponderación disponibilidad de recursos hídricos.	75
Tabla 56: Densidad poblacional y porcentaje de participación de la minería por región	75
Tabla 57: Parametrización de disponibilidad de RRHH.....	76
Tabla 58: Parametrización de cantidad de trabajo previo con comunidades	76
Tabla 59 Clasificaciones de riesgo de Standard and Poor's	77

Tabla 60 Parametrización de estabilidad económica	77
Tabla 61: Resumen características de prospectos a evaluar	78
Tabla 62: Ponderación de parámetros para prospecto A	78
Tabla 63 Ponderación de parámetros para prospecto B	79
Tabla 64 Ponderación de parámetros para prospecto C	79
Tabla 65: Ubicación y nombre de depósitos pasados de Chile.	80
Tabla 66 Características reportadas y ponderaciones para cada uno de los grupos.	80
Tabla 67: Ponderación de minerales para el grupo Pórfidos.....	87
Tabla 68 Ponderación de tipos de roca para grupo Pórfidos.	87
Tabla 69: Ponderación alteraciones hidrotermales para grupo Pórfidos.	88
Tabla 70: Ponderación de geografía/faja, forma y estilo de mineralización para grupo Pórfidos.	88
Tabla 71: Ponderación de minerales para grupo SME (1/2).	88
Tabla 72: Ponderación de minerales para grupo SME (2/2).	89
Tabla 73 Ponderación de tipos de roca para grupo SME.	89
Tabla 74 Ponderación alteraciones hidrotermales para grupo SME.	90
Tabla 75: Ponderación forma de mineralización para grupo SME.	90
Tabla 76: Ponderación estilo de mineralización, geoquímica y geografía/faja para grupo SME.	90
Tabla 77: Ponderación minerales para grupo IOCG-IOA.	91
Tabla 78: Ponderación tipo de rocas para grupo IOCG-IOA.	91

Tabla 79 Ponderación alteraciones hidrotermales para grupo IOCG-IOA.....	92
Tabla 80: Ponderación de geoquímica para grupo IOCG-IOA.	92
Tabla 81: Ponderación geografía/faja, forma y estilo de mineralización para grupo IOCG-IOA.	93
Tabla 82 Parametrización minerales para grupo Epitermales.	93
Tabla 83 Ponderación tipos de rocas y alteraciones hidrotermales para grupo Epitermales.	94
Tabla 84: Ponderación geografía/faja, forma y estilo de mineralización para grupo Epitermales.	94
Tabla 85: Ponderación geoquímica para grupo Epitermales.....	94
Tabla 86:Clasificación pórfidos cupríferos vs minerales.....	95
Tabla 87 Clasificación cobre en sedimentos vs minerales.	96
Tabla 88 clasificación skarns de cobre vs minerales.....	97
Tabla 89 clasificación skarns de hierro vs minerales.	98
Tabla 90 Clasificación vetas epitermales vs minerales.	99
Tabla 91 Clasificación de vetas polimetálicas vs minerales.	100
Tabla 92 Clasificación VMS vs minerales.	101
Tabla 93 Clasificación pórfidos de cobre vs alteraciones.....	102
Tabla 94 Clasificación cobre en sedimentos vs alteraciones.	103
Tabla 95: Clasificación skarns de cobre vs alteraciones.	104
Tabla 96 Clasificación skarns de hierro vs alteraciones.	105
Tabla 97 Clasificación vetas epitermales vs alteraciones.	106

Tabla 98 Clasificación vetas polimetálicas vs alteraciones.	107
Tabla 99 Clasificación VMS vs alteraciones.....	108

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

La exploración minera temprana es una actividad de alto riesgo en donde la decisión de continuar con una exploración más avanzada involucra inversiones del orden de los millones de dólares (Allais, 1957). Actualmente los procesos de evaluación y toma de decisiones en una empresa junior de exploración (Figura 1) se basan, por lo general, únicamente en la confianza existente entre los inversores y geólogos experimentados, lo que se origina por la poca comprensión de los aspectos geológicos por parte de los inversores. Estos criterios basados en información geocientífica, pueden diferir entre distintos evaluadores, lo que genera incertidumbre adicional al momento de hacer la toma de decisión.

Adicionalmente, estos procesos de evaluación, en etapas tempranas, no consideran aspectos no-geológicos, tales como, el contexto social, las condiciones geográficas, legislación, etc. Los cuales son muy relevantes al momento de desarrollar un prospecto minero y de gran impacto en la inversión requerida.

A causa de lo anterior, en esta memoria se trabaja en el desarrollo de una metodología para ordenar interés de inversión dentro de una cartera de prospectos mineros en etapas tempranas de exploración, utilizando la parametrización de datos empíricos (datos reales de depósitos de todo el mundo), herramientas de segmentación de datos, estadística e información disponible en la literatura geológica

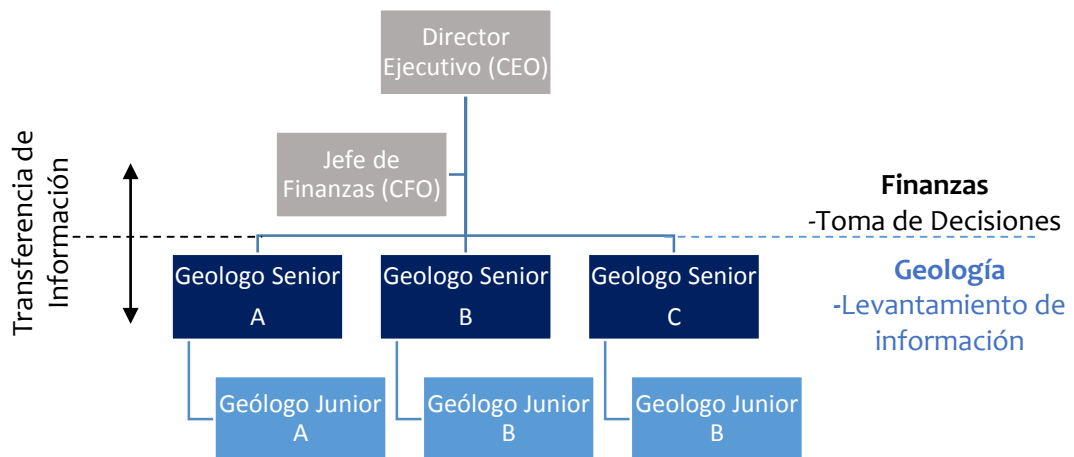


Figura 1: Organigrama típico de una empresa junior de exploración y esquematización del flujo de información.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para ordenar interés de forma estandarizada y trazable, dentro de una cartera de prospectos mineros en etapas tempranas de exploración.

1.1.2 Objetivo Específico

Identificar, parametrizar y segmentar aspectos geológicos y no geológicos relevantes en la exploración minera temprana con el propósito de obtener un sistema de evaluación conjunta.

1.2 ALCANCES

1. Los parámetros o variables a evaluar pueden ser tanto de tipo cualitativo como cuantitativo.
2. Solo se estudian a los depósitos minerales relativos a los metales de Cobre, Oro, Plata y Hierro, con ocurrencia en Chile.
3. Se enfoca a la exploración minera temprana en donde no se tiene certidumbre sobre el tipo de yacimiento en cuestión, ni volúmenes o concentraciones de mineral, es decir, no es posible generar *economics* (curvas tonelaje-ley, reservas, etc.)
4. La segmentación o agregación de modelos geológicos se realiza a través de métodos de segmentación no supervisados.
5. Para efecto de la caracterización geológica, sólo se considera información geológica validada por la comunidad científica.

1.3 METODOLOGÍA

A continuación, se describen las etapas de la metodología propuesta para la priorización de prospectos mineros.

1.3.1 Caracterización de modelos geológicos

En primer lugar y con el propósito de conformar una base teórica sólida, se realiza una investigación de los principales modelos geológicos relativos a los elementos de cobre, hierro, oro y plata con ocurrencia en Chile.

Se estudian con mayor énfasis, aspectos mineralógicos, tipos de rocas asociados, alteraciones hidrotermales asociadas, forma del cuerpo mineral, estilos de mineralización, geoquímica característica, geografía o faja metalogénica asociada y tonelajes típicos.

1.3.2 Parametrización de modelos geológicos

Luego de recopilar y caracterizar la información geológica más relevante de cada uno de los modelos, se procede a parametrizar sus características asignando valores, según su correlación con los modelos, a cada una de sus variables (minerales, tipos de roca, alteraciones hidrotermales, etc.)

Esta parametrización cuantitativa de la información se realiza con el propósito de, en primer lugar, poder hacer la posterior segmentación numérica de los yacimientos, y por otro, para poder estandarizar la forma en que se valoriza la información geológica levantada en terreno.

Tabla 1 Ejemplo simplificado del tipo de parametrización realizada para cada tipo de yacimiento

T.Yacimiento	Min1	Min2	...	T. Roca1	T. Roca2	..	Alteración 1	...
Skarn(Cu)	0	0		3	0		1	
Skarn(Fe)	1	2		0	0		2	
Estratoligado(Fe)	0	1		0	3		3	
Estratoligado(Ag)	0	3		3	0		0	
Epitermal(Ag)	1	2		0	3		0	
Epitermal(Au)	3	0		0	0		1	

1.3.3 Segmentación de modelos geológicos usando Clústeres Jerárquicos

Considerando que en etapas tempranas de exploración se posee información limitada, con la cual no es posible definir con suficiente certeza el tipo de yacimiento específico en cuestión, se propone agrupar matemáticamente los distintos modelos geológicos que posean características similares utilizando el algoritmo de clústeres jerárquicos. Los grupos conformados permiten una simplificación del análisis comparativo con un error no mayor al de muestreo en terreno.

1.3.4 Enriquecimiento de grupos conformados usando base de datos

En esta etapa se trabaja con una base de datos de la USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) con información de más de cien mil depósitos y ocurrencias reales de todo el mundo. Se estudian las frecuencias mineralógicas, tipos de roca y alteraciones hidrotermales para cada uno de los tipos de yacimientos identificados, aplicando ponderaciones positivas a las variables con mayores frecuencias. Se realizan además árboles de regresión que permiten observar relaciones entre las variables (minerales o alteraciones) que expliquen de mejor forma la ocurrencia o no ocurrencia de un depósito mineral.

1.3.5 Caracterización de Factores no geológicos

Adicionalmente a la información geológica previamente estudiada se añaden parámetros no relacionados con información geocientífica pero que son de vital importancia para el desarrollo futuro de un proyecto minero.

Se consideran factores relativos a condiciones geográficas, contexto social, infraestructura y legislación.

1.3.6 Parametrización de factores no geológicos

Luego de identificados los factores más relevantes, observables en etapas tempranas de exploración, estos son parametrizados usando rangos y límites adecuados en base a datos estadísticos y minas nacionales.

1.3.7 Esquema de metodología

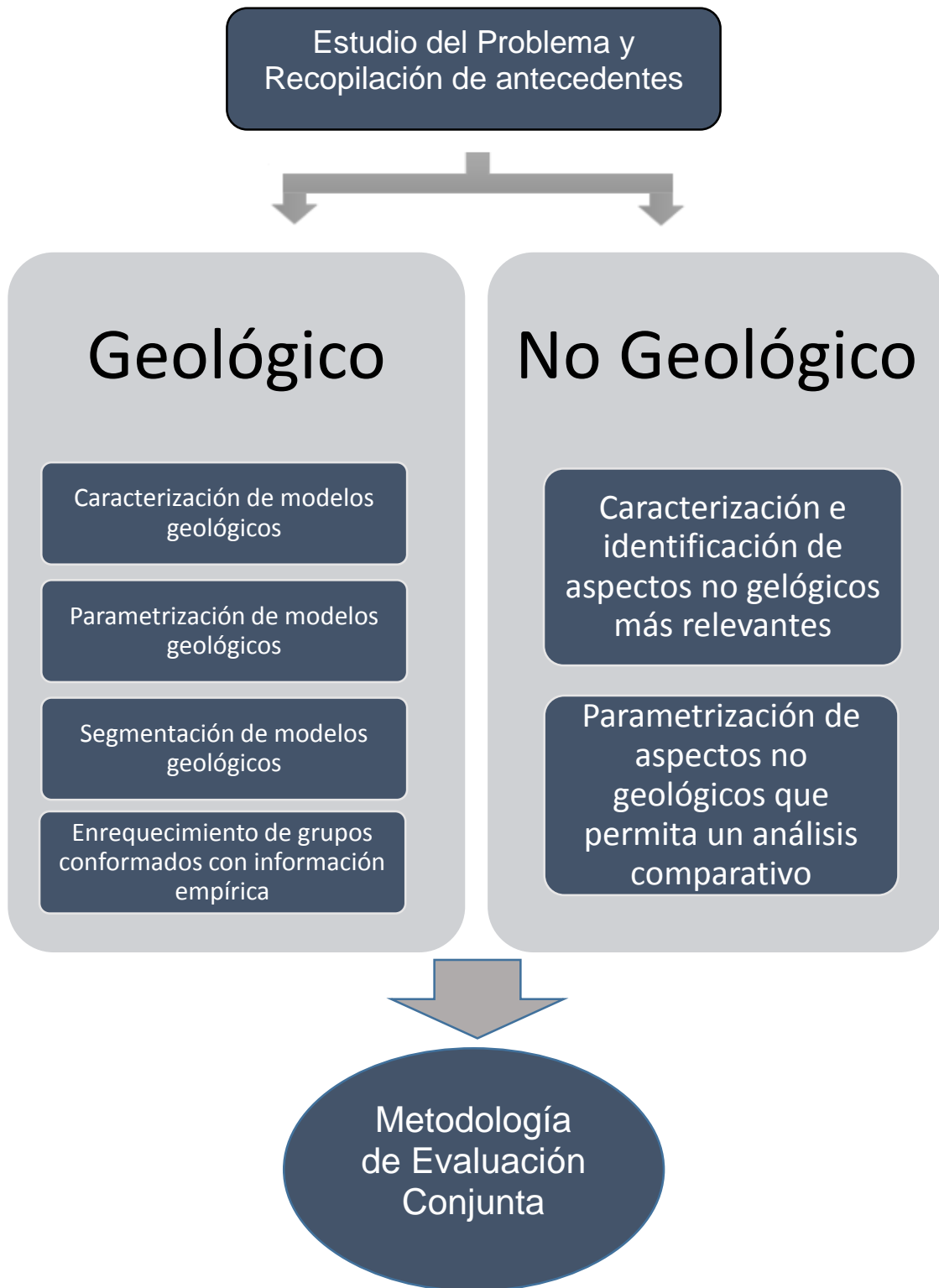


Figura 2: Esquema gráfico de la metodología desarrollada

Capítulo 2. ANTECEDENTES

2.1 DEPÓSITOS MINERALES

Los depósitos minerales (económicos) son concentraciones anómalas, de metales rocas o minerales útiles que pueden ser extraídos de forma rentable. Concentraciones que son demasiado pequeñas o de muy baja ley son simplemente llamadas ocurrencias o mineralizaciones (no económicos). Es relevante notar que no todos los depósitos tienen ocurrencia natural, es muy común encontrar que el material de descarte de mineros en generaciones anteriores se vuelve mineral rentable para las generaciones siguientes. Desde una perspectiva geológica un depósito mineral es un enriquecimiento geoquímico de elementos o compuestos en la corteza terrestre, determinada por las propiedades químicas de ésta.

El origen de los depósitos minerales es a menudo debido a una compleja combinación de muchos procesos, condiciones de borde y factores modificadores, que colectivamente forman los sistemas metalogenéticos o mineralogenéticos. A modo general los procesos críticos que originan depósitos minerales son (Kreuzer et al, 2008):

1. Extracción de los componentes que conforman mineral de mena (líquidos, metales y ligandos) a partir de la corteza y/o manto terrestre.
2. El transporte a través de fluidos o una fase fundida de los componentes, desde la fuente a zonas de depositación.
3. Formación de zonas de depositación que puedan concentrar el fluido o fase fundida y almacenar grandes cantidades de metal.
4. Ocurrencia de procesos fisicoquímicos que promuevan y mantengan la depositación de metal desde un fluido o fase fundida que estén pasando a través de una zona de depositación.

2.2 EXPLORACIÓN MINERA

Se muestran a continuación una tabla mostrando las principales etapas y actividades en un proyecto de exploración minera.

Tabla 2 Definición de las etapas de exploración (modificado de Lord et al,2001)

Etapa	Objetivo	Actividades
A	Generación del proyecto	Seleccionar y adquirir terreno en un sector bien definido
		Establecer una base de datos y un sistema de gestión
		Conformar un equipo de expertos para el terreno
B	Definición del prospecto	Generar conocimiento de la zona
		Comprobar la presencia de sistemas de mineralización
		Definir los riegos del proyecto
		Definir los objetivos de perforación
C	Perforación sistemática de los objetivos	Establecer potencial de tamaño y leyes (curva tonelaje-ley)
		Comprobar el potencial del sistema de mineralización
		Comprobar la información geológica
		Comprobar los modelos geológicos y de mineralización
D	Delineación de recursos	Comprobar la continuidad del proyecto
		Establecer los controles sobre la distribución de leyes
E	Factibilidad	Establecer parámetros económicos y metalúrgicos
		Determinar el valor presente neto (VAN)
		Determinar los costos del proyecto

Para efectos de esta memoria se le considerará la etapa A como la etapa de pre-exploración, la etapa B como exploración y la etapa C y D como exploración avanzada. Como se menciona anteriormente, el enfoque de este trabajo está en la etapa de pre exploración, en donde aún no se realizan perforaciones.

La búsqueda de cualquier tipo de depósito mineral comienza con la acumulación e interpretación de información existente en relación a la geología y los antecedentes mineros. Los mapas geológicos son recursos indispensables, ya que para expertos ellos tienen el potencial de revelar la ocurrencia de depósitos. La elección de regiones objetivo para exploración es a menudo basada en modelos geológicos a gran escala que usan información publicada en el dominio científico.

Muchos de los éxitos de exploración, incluso los más recientes, fueron basados en una reinterpretación de mapas geológicos públicos y una lectura cuidadosa de notas explicativas. Por ejemplo, una incidental referencia a una ocurrencia de alunita en la isla Lihir en Papua Nueva Guinea, en un reporte de mapeo indujo la búsqueda de mineralización epitermal de oro. Lihir es ahora uno de los depósitos más grandes de oro en el mundo, con un contenido total de oro mayor a 1300 toneladas (Pohl, 2011).

El estudio teórico pre-exploración presenta un concepto propuesto de trabajo futuro, incluyendo componentes geo científicos, logísticos, jurídicos y financieros, así como las revisiones previas del entorno físico y social. Es importante recordar que la exploración no sólo es una empresa científica y técnica, sino que además una no despreciable inversión y al igual que con cualquier inversión, se deben definir e identificar continuamente los beneficios y riesgos potenciales (Kreuzer et al, 2008).

2.2.1 Etapa de exploración geológica

Hoy en día, una práctica habitual en exploración minera es analizar los datos en dos dimensiones utilizando mapas y secciones transversales en Sistemas de Información Geográfica (SIG) e identificar objetivos por medios empíricos. Además, se está usando de forma creciente modelamiento de tres y cuatro dimensiones (se incluye el factor tiempo) utilizando la geología, geofísica, geoquímica e información proveniente de sondajes. Por ejemplo, modelos numéricos tridimensionales acoplados de flujos de fluido acoplado y la deformación ayudan en la exploración de oro orogénico (Potma et al, 2008).

Las estrategias fundamentales para la exploración geológica minerales incluyen:

- Explorar grandes áreas de forma sistemática, ya sea para buscar la ocurrencia de cualquier tipo de metal o mineral (exploración greenfield) o más comúnmente para solo algunos pocos tipos de recursos.
- Seleccionar regiones específicas por su similitud geológica a provincias o regiones con mineralogía conocidas.
- Investigar distritos que albergan mineralización y minas conocidas, motivadas por entendimiento geológico mejorado que sugiere la presencia de mineral no descubierto.
- Exploración para materiales brutos específicos (mármol de alta pureza, por ejemplo) guiada por propiedades geológicas que se asemejan a depósitos comercialmente viables.

Adicionalmente a la exploración del tipo netamente geológica existen métodos tales como:

- Teledetección geológica: Consiste en las técnicas de exploración que se basan principalmente en las radiaciones electromagnéticas naturales que se emiten desde la superficie de la tierra. Diferentes minerales, rocas, suelos y plantas reflejan en energía en longitudes de ondas específicas. Las principales bases de observación se hacen desde aviones y satélites.

- Exploración geoquímica: Los métodos de exploración geoquímicas están basados en la observación de que las mayorías de los depósitos minerales están rodeados por zonas o “halos”, los cuales difieren químicamente de las rocas originales. Esta diferencia química puede ser expresada por el enriquecimiento o empobrecimiento de ciertos minerales, elementos, isótopos u otras diferencias sistemáticas. Varios tipos de yacimientos de mineral muestran halos característicos, que se pueden encontrar mediante el análisis de muestreo en rocas, suelo, plantas, agua, gas del suelo y sedimentos en ríos o lagos.

2.3 MODELOS GEOLÓGICOS

Un modelo geológico o modelo descriptivo de yacimiento mineral es un término colectivo para yacimientos minerales que comparten una serie de atributos geológicos y contienen un mineral particular o combinación de ellos, de manera tal que estas dos características lo distinguen de otros tipos de yacimientos minerales (Eckstrand et al, 1996). Es decir, si están cuidadosamente definidos, representan bases de datos de información continuamente crecientes, lo que los hace sólidos y con prolongada expectativa de actualidad.

Según *Cox & Singer* (1986), un modelo de yacimiento mineral se define como la información sistemáticamente ordenada que describe los atributos esenciales (propiedades) de una clase de yacimiento mineral. Asimismo, *Henley & Berger* (1993) lo define como un esquema preliminar que sirve de plan a partir del cual es posible el descubrimiento de estilos específicos de yacimientos.

En esta sección se resumirán los datos y características de los principales tipos de modelos geológicos relativos a los elementos metálicos de cobre(Cu), hierro(Fe), oro(Au) y plata (Ag) con ocurrencia en Chile.

2.3.1 Pórfidos cupríferos

Los depósitos del tipo pórfido cuprífero comprenden yacimientos de gran volumen de mineralización primaria de sulfuros de cobre-hierro y hierro. A grandes rasgos, existe una sub-clasificación dentro de estos depósitos: Pórfidos de cobre-molibdeno (Cu-Mo), Pórfidos de cobre-oro (Cu-Au) y Pórfidos de oro (Au).

2.3.1.1 *Geografía y ubicación*

Este tipo de yacimientos están asociados a arcos magmáticos de márgenes continentales activos, como el tipo ‘Andino’ en el caso de Chile. Aquí, la placa de Nazca (oceánica) y la placa Sudamericana (continental) convergen, y al ser la primera más joven, caliente y densa que la segunda, subduce en el manto terrestre.

Sin embargo, hay segmentos en la cordillera que son más ricos que otros, en relación a la concentración de cobre. Así, los Andes Centrales (latitud, 5°S–36°S) poseen mayor mineralización de cobre en comparación a los Andes del Norte y del Sur.

Los pórfidos cupríferos presentes en los Andes Centrales se encuentran en ciertas fajas metalogénicas longitudinales, paralelas al orógeno y algunas de cientos de kilómetros(Km) de largo (Sillitoe, 2009).

2.3.1.2 *Tamaño y forma*

Los pórfidos cupríferos están definidos como grandes volúmenes de roca con alteración hidrotermal ($10 - 100 \text{ Km}^3$) centrados en cuerpos intrusivos que varían en tamaño. Estos intrusivos y diques (rocas volcánicas) presentan un diámetro y largo, respectivamente, menor a 1 km, pero pueden alcanzar los 14 km de largo. En la literatura se menciona que su tonelaje varía típicamente entre 50 millones de toneladas (Mton) y 500 Mton (Markasev, 2004), pero teniendo en cuenta que en Chile existen depósitos que superan enormemente este rango (Ej. Chuquicamata, El Teniente, Radomiro Tomic), se considera más adecuado un rango de tonelaje un rango entre 50 Mton y 1000 Mton.

2.3.1.3 *Tipo de Roca asociada y litologías*

Las rocas huésped de pórfidos cupríferos (Au-Mo) son poco profundas (<4000 metros), y en su mayoría intrusiones cilíndricas subvolcánicas. Corresponde típicamente a granodiorita, diorita, cuarzo-monzonita (monzo-granito), pórfido andesítico y, con menor frecuencia, sienitas, asociados al emplazamiento multifase de rocas intrusivas de composición intermedia, comúnmente relacionado con etapas tardías de la evolución magmática (Markasev, 2004).

Además, presentan una compleja gama de tapones volcánicos, diatremas, brechas y diques, de pequeña extensión superficial ($0,5$ a 2 Km^2) pero grandes dimensiones verticales.

2.3.1.4 *Mineralogía*

La mineralogía primaria de los pórfidos cupríferos consiste principalmente en pirita y calcopirita, conformando casi el 90% de los sulfuros totales, con menor bornita, enargita, tetraedrita, y trazas de molibdenita y esfalerita. En líneas generales, el cobre se presenta en bajas leyes ($0,5$ - $1,5\%$ Cu), el molibdeno en leyes del orden de $0,01$ - $0,04\%$ Mo, y el oro en leyes de hasta $1,5$ gramos por tonelada (g/T).

La mineralogía supérgena, generada por procesos de enriquecimiento supérgeno, consiste principalmente en calcosina y covelina, y en minerales oxidados de cobre como malaquita, crisocola, atacamita, copper Wad y copper Pitch, entre otros.

De haber brechas magmático hidrotermales asociadas, las más tempranas pueden contener biotita (secundaria), magnetita y calcopirita como cementos, mientras que las tardías comúnmente se encuentran sericitizadas y contienen importante cuarzo, turmalina, especularita, calcopirita y/o pirita como cementos (Sillitoe, 2009).

2.3.1.5 Alteraciones asociadas

La alteración hidrotermal se presenta normalmente zonada, afectando a varios Km³ de roca. Sin embargo, se debe mencionar que los tipos de alteraciones son dependientes del tipo de roca huésped, por lo que puede no darse una zonación.

A grandes rasgos, existe un núcleo de alteración potásica, sobrepuesto un halo de alteración fílica con bordes laterales de alteración argílica y un halo externo de alteración Propílica. Externo a ésta ocurre normalmente un anillo con mineralización en vetas de esfalerita, galena, calcopirita, oro, plata y pirita. En algunos sistemas de pórfido cuprífero se reconoce en su zona superior alta o periférica una alteración argílica avanzada.

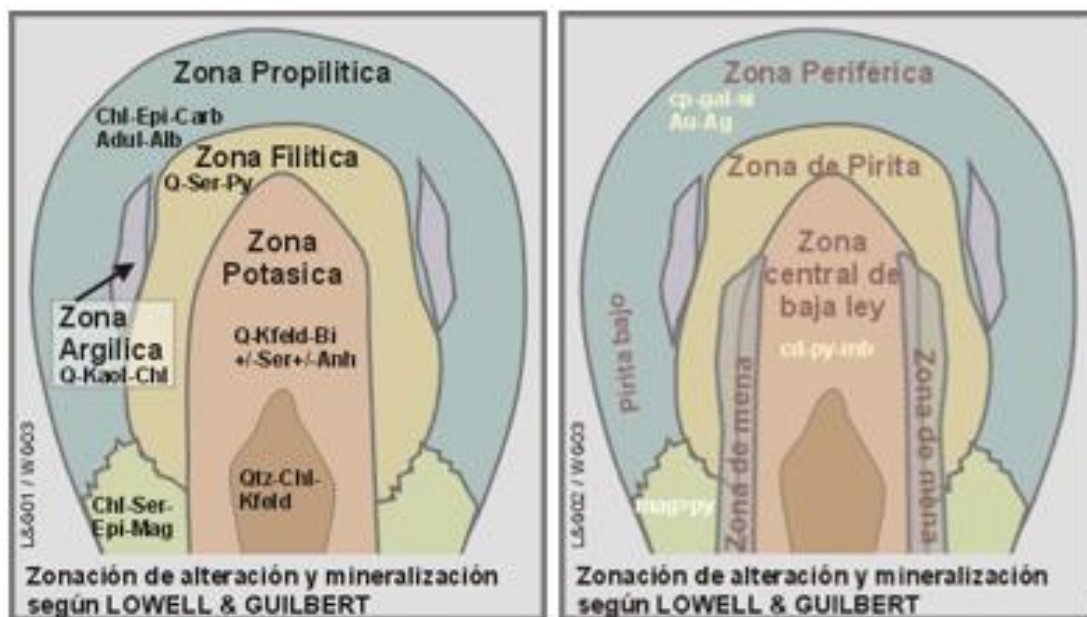


Figura 3: Zonación de alteraciones (izquierda) y mineralización (derecha) típicas. Lowell & Guilbert (1970)

- La zona central de baja ley presenta un bajo contenido de calcopirita, pirita y molibdenita. En su porción más profunda existe magnetita.
- En la zona de mena se observa calcopirita, pirita y molibdenita.
- La zona de pirita posee pirita, calcopirita y trazas de molibdenita.
- La zona de baja pirita posee una menor proporción de este sulfuro.
- La zona periférica se caracteriza por tener calcopirita, galena, esfalerita, oro y plata.

Adicionalmente a las alteraciones previas ocurren procesos supérgenos que se desarrollan en períodos cortos de tiempo, se inician una vez que los depósitos hidrotermales primarios son descubiertos hasta la zona por encima del nivel de aguas subterráneas. La mayoría de los sulfuros primarios son inestables en las condiciones oxidantes cerca de la superficie, y se descomponen formando una nueva mineralogía estable a tales condiciones.

Ocurre entonces la oxidación de los sulfuros, liberando cationes metálicos y aniones sulfato. Los sulfatos de Cu y Ag son solubles, y son transportados hacia abajo por aguas meteóricas percolantes. Son redepositados por reacción con iones carbonato, silicato, sulfato o sulfuro, pudiendo formar minerales oxidados o bien precipitar por debajo del nivel de aguas subterráneas como sulfuros enriquecido en Cu.

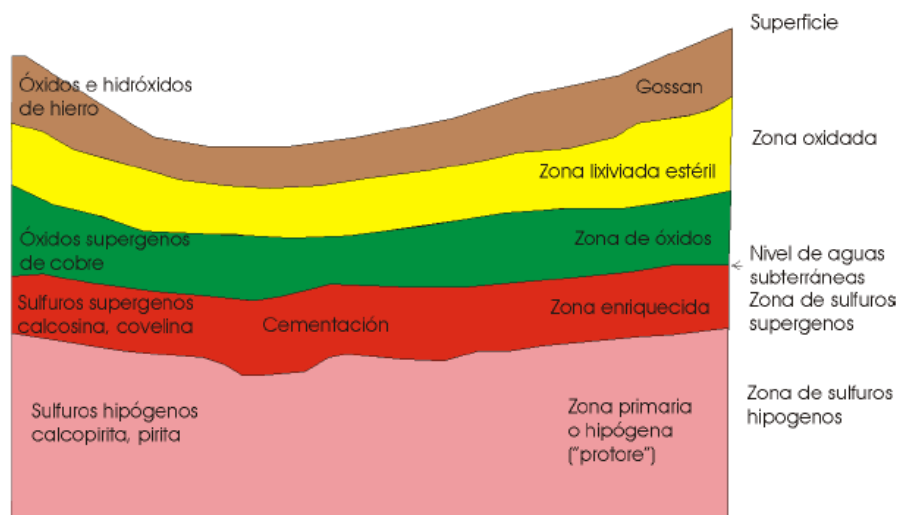


Figura 4: Perfil típico de una zona de enriquecimiento supérgeno

2.3.2 Skarns

En este tipo de yacimientos, las rocas están dominadas por minerales calco-silicatados de calcio, magnesio y hierro, formados por reemplazo de carbonatos durante procesos de metamorfismo regional o de contacto metasomático, asociados a intrusiones ígneas. Están presentes en casi todos los continentes y en rocas de casi todas las edades (Meinert et al,2005). Algunas características particulares son la alteración distal como blanqueamiento, estructuras de escape de fluidos y halos isotópicos pueden ser muy importantes en exploración.

Se pueden subclasificar en (Einaudi, 1982):

- Skarns de reacción: De extensión limitada a lo largo de contactos de lutitas o calizas durante el metamorfismo.
- Skarns de mena: Contienen mineralización y se forman como resultado de infiltraciones de fluidos provenientes de intrusiones ígneas.

Adicionalmente se han definido dos términos, según la localización:

- Exoskarn: Ocurrencia en rocas carbonatadas.
- Endoskarn: Ocurrencia en rocas ígneas.

En esta memoria solo se considerarán los skarns con ocurrencia de mineralización y se les distingue únicamente por su principal metal de producción, es decir, Skarn de Fe, Skarn de Cu y Skarn de Zn-Pb (Considerado por tener Cu, Au y Ag como subproducto).

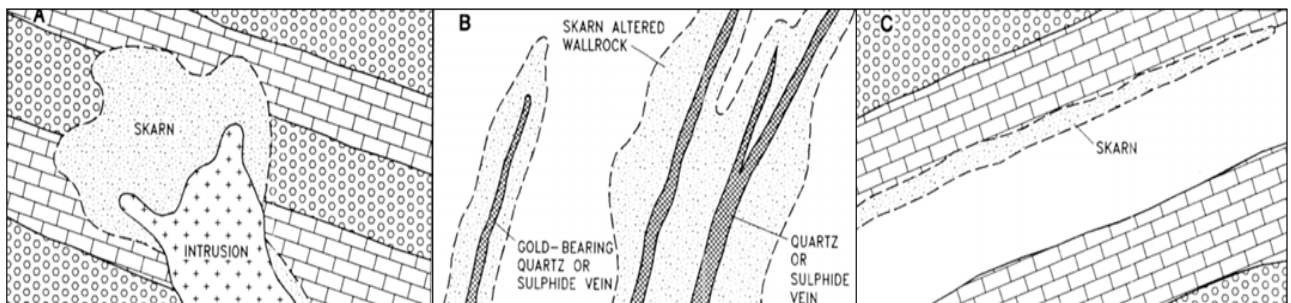


Figura 5 De izquierda a derecha Skarn masivo pervasivo, Skarn asociado a vetas y Skarn estratiforme (Ray and Webster, 1991).

2.3.2.1 Geografía y ubicación

Ocurren en la mayoría de ambientes tectónicos donde haya magmatismo y desarrollo de litologías carbonáticas, entre las cuales se consideran:

1. **Subducción oceánica:** tienden a producir Skarn de Fe, Cu y Au, asociados a plutones dioríticos a granodioríticos.
2. **Transición a subducción de bajo ángulo:** puede emplazar Skarn de Mo, W-Mo, asociados a plutones monzoníticos y graníticos.
3. **Subducción continental:** hospeda a la gran mayoría, incluyendo Skarn de Zn-Pb, Cu, Au, W, Mo, generalmente asociados a plutones granodioríticos y graníticos.
4. **Rifting continental:** emplaza Skarn de Sn-W y plutones graníticos.

En Chile, la mayor parte de los Skarns son cupríferos, y todos están asociados a secuencias calcáreas del Cretácico Inferior que han sido intruidas por plutones del Cretácico o Terciario.

2.3.2.2 Tamaño y forma

El tamaño, la geometría y alteración de un depósito tipo Skarn vienen determinados en gran parte por la profundidad de su formación. Los Skarns profundos tienden a ser pequeños y con una geometría vertical con respecto a los más superficiales.

- Los **Skarns de Cu** son el subtipo más abundante del mundo, y la mayoría de ellos son casi siempre parte de sistemas de pórfidos cupríferos mineralizados. Si están asociados a estos sistemas, el depósito puede alcanzar tamaños de entre 50 a 500 Mt; en caso contrario, el tamaño varía entre 1 y 50 Mt.
- Los **Skarns de Fe** son los más grandes, típicamente entre 5 y 200 Mt, aunque algunos depósitos pueden alcanzar hasta 1000 Mt. Algunos pueden ser una transición hacia Skarns de Cu.
- Los **Skarns de Zn-Pb** tienden a ser pequeños, generalmente < 3 Mt.

2.3.2.3 Tipo de Roca asociada y litologías

Los skarns se encuentran en litologías que contienen al menos algo de caliza, pero pueden formarse en casi cualquier tipo de roca durante metamorfismo regional o de contacto, y a partir de una gran variedad de procesos metasomáticos, involucrando fluidos de origen metamórfico, magmático, meteórico y/o marino (Ray and Webster, 1991).

- **Skarn de Fe:** Magnésicos de tipo Cordillerano, están asociados a diversos plutones félsicos hipabisales (granodiorita, cuarzo-monzonita, monzo-granito, granito) que intruyen a secuencias de rocas dolomíticas.
- **Skarn de Cu:** En su mayoría, están asociados a intrusivos calco-alcalinios tipo I, porfíricos, de la serie magnetita (granodiorita, cuarzo-monzonita) muchos de ellos relacionados genéticamente con rocas volcánicas, stockwork, fracturamiento y brechización, indicando un ambiente de formación somero. Se forman próximos al intrusivo, y la presencia de rocas de caja dolomíticas coincide con las vetas de magnetita. También se hospedan en calizas.
- **Skarn de Zn – Pb:** Están asociados a rocas ígneas que abarcan un amplio rango de composiciones, desde diorita hasta granodiorita, granito y sienogranito. También abarcan diversos ambientes geológicos, desde batolitos emplazados en profundidad, complejos de sills y diques someros hasta extrusiones volcánicas superficiales.

2.3.2.4 *Mineralogía y alteraciones*

La mayoría de los depósitos están zonados, y el patrón general es granate proximal, piroxeno distal, y minerales como vesuvianita (o un piroxenoide como wollastonita, bustamita o rodonita) en el contacto entre el Skarn y mármol.

Además, algunos minerales pueden mostrar variaciones sistemáticas de color o composición dentro de un gran patrón de zonación. Por ejemplo, el granate proximal es comúnmente de color rojo oscuro a pardo, pasando a un pardo más claro y finalmente a un amarillo pálido – verdoso cerca del frente del mármol.

- **Skarn de Fe**

Los principales minerales de Skarn son forsterita, diópsido, periclasa, talco, serpentina, que no contienen mucho Fe, pues éste en solución tiende a formar magnetita en lugar de andradita o hedenbergita. Una asociación típica es espinela-piroxeno-forsterita ± calcita. Muchos están caracterizados por una asociación de ganga que incluye clinopiroxeno, olivino, espinela, flogopita, xanthophyllita, pargasita, tremolita, brucita y serpentina.

Algunos contienen importantes sulfuros como pirrotina, esfalerita, bornita y molibdenita, así como minerales accesorios como escapolita y boratos como ludwigita, szaibelita, fluor-borita y kotoita, todos ellos en general posterior a la mineralización de la magnetita.

- **Skarn de Cu**

Son del tipo cálcico, la mineralización consiste en sulfuros (2 a 15%) y óxidos de Fe (~10%), y se hallan próximos o en contacto con el cuerpo intrusivo. La skarnificación prógrada (formada a mayor temperatura) se correlaciona con la alteración potásica en el plutón, mientras que la destrucción del Skarn o el reemplazo sílice-pirita de la caliza se relaciona con la alteración sericitica en el plutón.

Estos Skarns están dominados por una mineralogía prógrada de granate andradita, diópsido y wollastonita. Hematita y magnetita pueden estar presentes en altos contenidos y formar localmente filones masivos. La alteración retrógrada se caracteriza por tremolita-actinolita, vesuvianita, smectita, siderita, calcita, talco, epidota, clorita, óxidos y sulfuros de Fe. Están zonados, con alto contenido de granates cerca del plutón, seguido por un aumento en la cantidad de clinopiroxeno y vesuvianita y/o wollastonita en la vecindad del contacto con mármol. Pirita, calcopirita y menor bornita y esfalerita son los sulfuros más abundantes, aumentan alejándose del plutón. Indican un moderado grado de sulfuración.

- **Skarn de Zn-Pb**

Se explotan por Zn, Pb y Ag, aunque Zn es usualmente el dominante. Son ricos en sulfuros, y los piroxenos dominan, es decir, poseen una baja razón granate/piroxeno.

Entre los minerales prógrados se hallan piroxenos (hedenbergita-johansenita), granate (andradita-almandino-espesartina), wollastonita, rodonita y bustamita. Entre los minerales retrógrados (originados a menor temperatura) que han sido documentados, se encuentran anfíbol (actinolita-tremolita), epidota, fluorita, ilvita, clorita, rodocrosita y axinita. Junto a esfalerita y galena, otros opacos pueden incluir pirita, pirrotina, con cantidades menores de calcopirita, arsenopirita, hematita, magnetita y molibdenita.

2.3.3 Depósitos epitermales

En estos depósitos, la mineralización ocurrió cercana a la superficie terrestre (0.5 – 2 km de profundidad) a partir de fluidos hidrotermales calientes, y generalmente asociados a actividad volcánica. Son yacimientos asociados a una mineralización principal de oro y plata, con presencia mayor o menor de sulfuros de metales base, en general, cobre, plomo, zinc, bismuto, etc.

La mineralización epitermal de metales preciosos puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos, dando origen a los depósitos de baja sulfuración y de alta sulfuración, haciendo alusión al estado de oxidación del azufre.

2.3.3.1 *Geografía y ubicación*

Se presentan en muchos países incluyendo Japón, Indonesia, Chile y el oeste de Estados Unidos, los que se encuentran en el 'Anillo de Fuego' del Pacífico, que corresponde al área de volcanismo que rodea al Océano Pacífico desde Asia del Sur hasta el Oeste de Sudamérica.

En general se dan en zonas de borde continental activo con zonas de subducción, en donde el relieve es fuerte y elevado, con volcanismo, lo cual tiene un efecto sobre las soluciones hidrotermales ascendentes.

- **Franja de Maricunga** (III región de Atacama) de aproximadamente 200 km de largo y 20 km de ancho, hospeda tanto depósitos epitermales de oro y plata asociados a volcanismo (La Coipa, Esperanza y Arqueros) como pórfidos auríferos (Refugio, Marte y Cerro Casale), que en conjunto tienen recursos estimados en 400 toneladas de oro y 14.000 toneladas de plata.
- **Franja de El Indio** (III – IV región) también hospeda algunos depósitos epitermales de oro (Nevada, Sancarrón, El Indio-Tambo).
- En la **Cordillera de Domeyko** (II región de Antofagasta), caracterizada por su baja tasa de erosión y asociada a complejos de domos y grandes calderas volcánicas formadoras de ignimbritas de gran volumen de 50 a 60 millones de años (Ma) (Paleoceno-Eoceno), también se presentan depósitos epitermales de oro y plata (El Guanaco, Faride, San Cristóbal).

2.3.3.2 *Tamaño y forma*

Aquellos del tipo alta sulfuración son de tamaño relativamente pequeño, con una razón largo/ancho similar a 1:1 y variando de 2 a 25 Mt.

La forma de los depósitos corresponde a vetas, brechas con oquedades, bolsones y lentes de reemplazos masivos de sulfuros, stockworks y brechas. Son irregulares, comúnmente determinados por la permeabilidad de las rocas de caja y la geometría de las estructuras controladoras de la mineralización. Son comunes vetas compuestas que se cortan unas a otras (Sillitoe, 1993).

Los del tipo baja sulfuración son de tamaño variable, siendo algunos muy grandes, con una razón de largo/ancho de 3:1 o mayor.

La forma de los depósitos corresponde a sistemas de vetas que pueden ser extensos lateralmente, y en bolsoneadas de mena de extensión vertical relativamente restringida.

2.3.3.3 *Tipo de Roca asociada y litología*

Los sistemas epitermales, al igual que los pórfidos, están temporal y genéticamente relacionados a actividad volcánica de afinidad calco-alcalina en márgenes convergentes.

La roca de caja suele tratarse de pilas volcánicas terciarias inferior a superior, calco-alcalinas, consistentes en:

- Aglomerados de andesitas, diques, brechas y flujos piroclásticos.
- Tobas piroclásticas, diques, pequeños filones manto y domos extrusivos.
- Lutitas y dacitas en flujos y brechas.
- Sedimentos lacustres volcanogénicos, areniscas y lutitas.

En los depósitos epitermales de alta sulfuración, la roca huésped corresponde a rocas volcánicas piroclásticas y de flujos, comúnmente andesita, dacita a riocacita sub-aérea y sus equivalentes intrusivos sub-volcánicos (diorita y granodiorita). Algunas unidades sedimentarias permeables inter-volcánicas pueden estar mineralizadas.

En los depósitos epitermales de baja sulfuración, la roca huésped corresponde a rocas volcánicas de distinto tipo, predominando aquellas de tipo calco-alcalino, ácido a intermedio. Algunos depósitos se presentan en áreas de volcanismo bimodal (félsico y máfico) y de extensos depósitos de flujos piroclásticos sub-aéreos, como ignimbritas. Existe una asociación menos común con rocas alcalinas y shoshoníticas. También se asocia mineralización a sedimentos clásticos y epiclásticos en cuencas intra-volcánicas y depresiones estructurales.

2.3.3.4 *Mineralogía y alteraciones*

- **Epitermales de alta sulfuración:** comúnmente contienen minerales de mena de Cu-As, como enargita o luzonita, pirita. El electrum no es común, como sí lo es el oro nativo. También hay presencia de sulfuros de metales base, minerales de Mn, a veces bismutina y escasa clorita.

La zona de mena está caracterizada por sílice oqueroso residual, debido a la fuerte lixiviación. La mineralogía de alteración está compuesta de caolinita y alunita hipógenas extensiva, baritina, dickita, pirofilita y diásporo. Presentan alteración argílica avanzada a moderada, con mayor o menor sericitización. También se observa silicificación y propilitización (Sillitoe, 1993).

- **Epitermales de baja sulfuración:** en general son pobres en Cu y otros metales base, pero poseen una mineralogía de mena y ganga que incluye piritita, arsenopiritita, esfalerita, galena, oro y plata nativa, electrum, argentita, tennantita-tetraedrita, cuarzo, calcedonia, calcita, alunita, adularia, illita y baritina. La clorita es común, hay seleniuros y ganga de Mn presente con caolinita ocasional.

La alteración es sericitica a argílica. También se observa alteración potásica (adularia) y clorítica. Se presenta una zonación: la parte más profunda está afectada por una alteración de cuarzo-clorita, avanza a una alteración cuarzo-illita, con adularia variable, y hacia la superficie una silicificación.

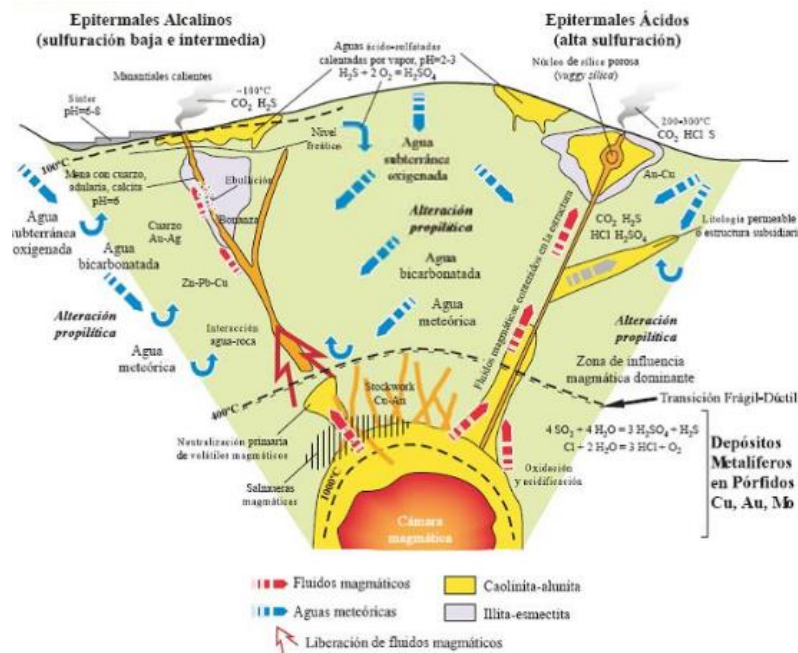


Figura 6: Esquema de depósitos epitermales de baja y alta sulfuración

2.3.4 Depósitos estratoligados

Los yacimientos estratoligados de cobre, con plata subordinada, hospedados en rocas volcánicas han sido tradicionalmente la segunda fuente de cobre producido en Chile (Camus, 1990). Sin embargo, el hallazgo a mediados de los 80 de grandes yacimientos de óxidos de hierro Cu-Au (IOCG) los ha desplazado en importancia económica a un tercer lugar.

Se les denomina estratoligados pues corresponden a cuerpos irregulares subhorizontales tipo manto o a cuerpos/chimeneas de brecha y veta con mineralización importante de sulfuros de cobre, comúnmente asociados, limitados y hospedados en secuencias de rocas volcánicas, ya sea en lavas o en sedimentos volcánicos. Se les clasifica comúnmente, según el tipo de roca que hospeda la mineralogía.

2.3.4.1 *Geografía y ubicación*

Estos yacimientos ocurren en cuencas tectónicas o sedimentarias de subsidencia a lo largo de cinturones volcánicos calco-alcalinos en corteza continental, en la periferia de batolitos emplazados en las secuencias volcánicas.

Interpretaciones más recientes apuntan a que las rocas volcánicas hospedantes están asociadas a un arco magmático desarrollado en un marco tectónico extensional. Aparecen ligados principalmente a tres fajas de arco volcánico (Maksaev y Zentilli, 2002):

- Faja del Jurásico: Cordillera de la Costa, II Región de Antofagasta.
- Faja del Cretácico inferior: porción central de Chile, III Región de Atacama-XV Región Metropolitana. En menor medida, en rocas piroclásticas o sedimentarias con aporte volcánico del Cretácico Inferior.
- Faja del Cretácico superior-Paleoceno, II Región de Antofagasta-XV Región Metropolitana.

2.3.4.2 *Tamaño y forma*

Los cuerpos mineralizados en general son compuestos, incluyendo cuerpos irregulares, tabulares, estratiformes, lentes y chimeneas de brecha. Pueden ser concordantes o discordantes con la estratificación, existiendo morfologías simples o compuestas (estratiforme-chimenea de brecha, estratiforme-irregular, etc.). El tamaño de los depósitos es muy variable, entre los cuales destacan:

- Mantos Blancos (120 Mt extraídas entre 1960 y 1995): 0.86 % Cu (óxidos), 1.18 % Cu (sulfuros), 12 g/t Ag
- El Soldado (>200 Mt): 1.35 % Cu
- Mantos de la Luna (>40.5 Mt): 1.39 % Cu
- Carolina de Michilla (>17 Mt): 1.76 % Cu
- Lince (16 Mt): 1.56 % Cu
- Buena Esperanza (5 Mt): 1.6 % Cu
- Lo Aguirre (11.1 Mt): 2.14 % Cu
- Cerro Negro (6 Mt): 1-3 % Cu, 25 g/t Ag

El tonelaje promedio de otros depósitos es de aproximadamente 2 Mt.

Las vetas cupríferas de depósitos hospedados en rocas plutónicas presentan corridas variables desde decenas de metros hasta 2 kilómetros, espesores entre 1 y 12 metros y profundidades cercanas a los 700 metros como máximo.

2.3.4.3 *Tipo de roca asociada y litología*

En los depósitos estratoligados hospedados en rocas volcánicas, éstas consisten en lavas y brechas andesíticas y basálticas, de afinidad calco-alcalina. La mineralización ocurre en los estratos volcánicos y en brechas hidrotermales, y está espacialmente asociada a diques, cuellos volcánicos y filones gabro-dioríticos.

Los depósitos estratoligados hospedados en rocas plutónicas, del *tipo Montecristo*, con ocurrencia en zonas de falla, están asociados a diques diabásicos que cortan los cuerpos vetiformes o constituyen algunas de sus rocas huésped.

En los depósitos estratoligados hospedados en rocas sedimentarias, la mineralización ocurre a lo largo de una interface de rocas sedimentarias como calizas, y sedimentos como lutitas lacustres y areniscas marinas. Estas secuencias aparecen intercaladas dentro de secuencias volcánicas.

2.3.4.4 *Mineralogía y alteraciones*

Aquellos hospedados en rocas volcánicas, la mena dominante consiste en bornita, calcosina con cantidades menores de covelina y digenita, además de pirita, hematita y/o magnetita. En la parte superior se observan variados grados de oxidación, producto de procesos supérgenos, con atacamita, menor antlerita, brochantita, malaquita, crisocola y hematita (especular) en el techo.

Las rocas volcánicas hospedantes están afectadas por un metamorfismo/alteración regional de bajo a muy bajo grado, que se caracteriza por la presencia de minerales secundarios tales como: prehnita, pumpellita, epidota, clorita, calcita, cuarzo, albita. En general estos minerales secundarios se concentran en las porciones vesiculares y brechosas de las rocas volcánicas, y la textura original de las mismas está preservada.

La alteración hidrotermal es en general de carácter débil, casi indistinguible de las asociaciones de metamorfismo regional de la roca huésped. Sin embargo, puede observarse albitización, alteración sericítica o argílica débil y propilítica. La presencia de granates también ha sido reportada. La alteración sódica y propilítica viene dada por la presencia de albita, clorita, hematita, cuarzo, sericita (escasa, selectiva de plagioclasas), calcita, epidota, esfeno, escapolita y anatasa.

Los hospedados en rocas plutónicas, presentan alteraciones de albitización, cloritización y cuarzo-sericita. Su mineralización está en vetas mesotermales consistentes en calcosina-covelina en su parte superior, seguido en profundidad por una zona de calcopirita – bornita. En superficie ocurre una zona de minerales oxidados de cobre. Aquellos hospedados en rocas sedimentarias no difieren en gran medida de los anteriores, sólo en el emplazamiento de la mineralización.

2.3.5 Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) y Iron Oxide Apatite (IOA)

Estos depósitos han sido clasificados de esta manera debido a una serie de características geoquímicas, pues poseen (Williams, 2005):

1. Cu, con o sin Au, como metales económicos.
2. Estilos de menas hidrotermales (veta, brecha, reemplazo) con fuerte control estructural.
3. Abundante magnetita y/o hematita.
4. Óxidos de Fe con razón Fe/Ti mayor que en la mayoría de las rocas ígneas y la corteza terrestre.
5. Asociaciones espaciales poco claras con intrusivos, a diferencia de depósitos como pórfidos o skarns.

Además, poseen comúnmente una asociación espacio temporal con los depósitos IOA, los cuales contienen óxidos de Fe portadores de apatito y muchos ejemplos contienen sulfuros, Cu, y Au como subproducto. Pueden contener Co, U, REE, Mo, Zn, Ag, entre otros. Se plantea que los depósitos de Fe-apatito y los IOCG pertenecen a un mismo clan de depósitos en el que los de Fe-apatito representan un miembro extremo deficiente en Cu (Sillitoe, 2003).

2.3.5.1 Geografía y ubicación

En Chile, los depósitos están ligados a un arco magmático relacionado a subducción del Cretácico Inferior y a volcanismo del Neógeno. Algunos, como Candelaria, están en áreas de tras arco (cuencas formadas detrás de arcos magmáticos).

La faja más joven de estos depósitos está en la Cordillera de la Costa del norte de Chile (II-IV Región) y sur de Perú, de edad Jurásico y Cretácico inferior en donde definen una faja mineralizada discontinua de aproximadamente 5 kilómetros de ancho por 20 kilómetros de largo a través del margen este del batolito Copiapó.

2.3.5.2 *Tipo de Roca asociada y litología*

Los cuerpos de mena están hospedados principalmente en rocas volcánicas y volcánico-clásticas de la parte superior de la Formación Punta del Cobre (Grupo Bandurrias) o, localmente, también en la parte inferior de la Formación Abundancia (Grupo Chañarcillo), que sobreyace a la anterior.

En la mina Candelaria, porciones de la mena ocurren en rocas foliadas biotitizadas de una zona de cizalle NNE con un manteo al W de casi 50°. En Manto Verde, los sulfuros están hospedados en andesitas volcánicas y rocas volcánico-clásticas deformadas, en el bloque yacente de la Falla Manto Verde.

2.3.5.3 *Mineralogía y alteraciones*

La mena de Cu-Au contiene magnetita y/o hematita, calcopirita y pirita. Localmente, hay pirrotina, esfalerita, trazas de molibdenita, arsenopirita, y elevadas concentraciones de LREE. El oro se presenta en granos cuyo tamaño es de pocos micrones de electrum rico en oro contenido en la estructura interna de la calcopirita y en menor medida en pirita.

En profundidad, la calcopirita está asociada espacialmente con anfíbol cálcico con cantidades variables de epidota, biotita, feldespato potásico y plagioclasa sódica, dependiendo de la roca huésped. La magnetita es omnipresente y ocurre como cuerpos masivos mientras que la hematita es escasa. Las vetas de cuarzo diseminado son generalizadas, la calcita es poco común en profundidad, mientras que la anhidrita ocurre localmente en vetas y vetillas. En los niveles intermedios, están caracterizadas por alteración potásica, con biotita y/o feldespato potásico, y localmente anfíbol cálcico, epidota, plagioclasa sódica y/o anhidrita.

En las porciones más distales o superficiales la clorita se forma a expensas de la biotita y anfíbol. Albitización, cloritización y carbonatización aumentan en intensidad. Se caracterizan por una asociación albita-clorita, con cantidades variables de sericita. Las vetas de calcita son comunes, mientras que la anhidrita está ausente. La hematita es el óxido de hierro predominante, mientras que la magnetita es escasa o sólo localmente importante.

2.3.6 *Sulfuros Masivos Volcanogénicos*

Los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (conocidos como depósitos VMS; de "volcanogenic massive sulfide") corresponden a cuerpos estratiformes o lenticulares de sulfuros presentes en unidades volcánicas o en interfaces volcánico-sedimentarias depositadas originalmente en fondos oceánicos (Galley et al. 2007). A menudo, los depósitos consisten en un 90% en pirita masiva, aunque con pirrotina presente en algunos de ellos. Contienen cantidades variables de Cu, Pb, Zn, Ba, Au y Ag; siendo típicamente depósitos polimetálicos.

Desde el punto de vista económico, existen esencialmente sólo dos grupos: los de Cu-Zn y los de Zn-Pb-Cu. Si bien en términos generales existen esos dos grupos principales de sulfuros masivos, existen varios tipos en la literatura dependiendo del marco tectónico y las rocas volcánicas asociadas. Entre estos se encuentran los tipos Chipre, Besshi, Kuroko, Normanda y tipo SEDEX. En esta memoria solo se trabajarán con las subclasificaciones de VMS de cobre(Cu), VMS oro-plata(Au-Ag) y SEDEX de Plata(Ag).

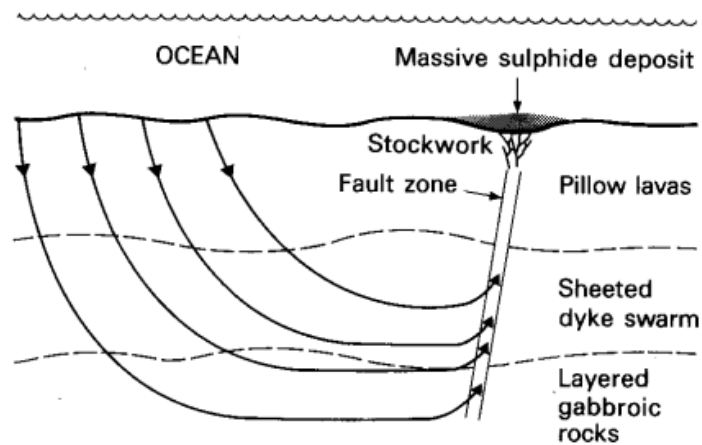


Figura 7: Esquema mostrando el sistema de circulación de aguas marinas que dan origen a depósitos de sulfuros masivos en los fondos oceánicos.

2.3.6.1 Geografía y ubicación

Han sido descritos mantos con pirita, pirrotina, calcopirita y esfalerita intercalados en esquistos verdes de la Cordillera de la Costa de Valdivia, como Tirúa, Casa de Piedra, Hueñalihuen, Trovolhue, Pirén y Corral (Alfaro y Collao, 2000).

También existen cuerpos de sulfuros masivos cupríferos en esquistos y metabasaltos de la zona costera de la XII Región, como La Serena y Cutter Cove. En Copiapó, está presente el depósito Punta del Cobre.

2.3.6.2 Tamaño y forma

Corresponden a cuerpos estratiformes o lenticulares de sulfuros, y la mayoría son relativamente pequeños, pues el 80% de los depósitos conocidos está en el rango de 0.1 a 10 Mt. De estos, la mitad contiene menos de 1 Mt de mineral. Sin embargo, estos depósitos pueden ser grandes o muy ricos (de alta ley) o ambos y su explotación puede ser muy rentable, sobre todo cuando se explotan distritos en que existen numerosos cuerpos mineralizados formando grupos compactos.

La zona de alteración tiene una forma general de chimenea, cuyo diámetro aumenta hacia arriba (forma de cono invertido) y su porción más ancha coincide con la mena masiva.

2.3.6.3 *Tipo de roca asociada y litología*

Están presentes en unidades volcánicas o en interfaces volcánico – sedimentarias depositadas originalmente en fondos oceánicos.

Se presentan en grupos y en áreas específicas o distritos, estando restringidos a un nivel o a cierto número limitado de niveles estratigráficos. Estos horizontes pueden representar cambios en la composición de las rocas volcánicas, un cambio desde volcanismo a sedimentación o simplemente a pausas en actividad volcánica submarina. Existe una asociación con rocas volcanoclásticas y muchos cuerpos de mena sobreyacen productos explosivos en domos riolíticos.

Los tipos sedex están asociados a rocas sedimentarias como lutitas negras carbonosas, areniscas y rocas carbonatadas.

2.3.6.4 *Mineralogía y alteraciones*

La mineralogía de los depósitos VMS corresponde a una mezcla de sulfuros metálicos dominados por pirita y/o pirrotina, con cantidades variables de calcopirita, esfalerita y galena. Algunos pueden contener cantidades importantes de Ag y/o Au.

Dependiendo del tipo de depósito, la bornita y calcosina pueden ser constituyentes importantes, y pueden estar presentes cantidades menores de arsenopirita, magnetita y tennantita-tetraedrita. Con el aumento del contenido de magnetita estos depósitos gradan a menas masivas de óxidos. La ganga es principalmente cuarzo y baritina, pero ocasionalmente se presenta carbonato, clorita y sericita.

La mayoría están zonados, ubicándose la galena y esfalerita en la mitad superior de los depósitos, mientras que la calcopirita se concentra en la porción inferior y gradan hacia abajo a un stockwork de venillas.

La alteración hidrotermal normalmente se restringe a las rocas subyacentes, siendo la sericitización y cloritización los tipos más comunes.

2.4 MODELOS DE SEGMENTACIÓN

El propósito de la segmentación de datos es encontrar grupos (también llamados conglomerados o clústeres) en donde sus elementos sean lo más heterogéneos posible respecto a los elementos pertenecientes a los otros grupos y lo más homogéneos posible respecto a los elementos que pertenecen al mismo grupo (Fritis et al. 2006).

Adicionalmente estos grupos deben ser:

- Significativos, de tamaño justificable.
- Alcanzables, accesibles para la compañía de acuerdo a sus recursos y experiencia.
- Identificables, que sean posibles de interpretar.

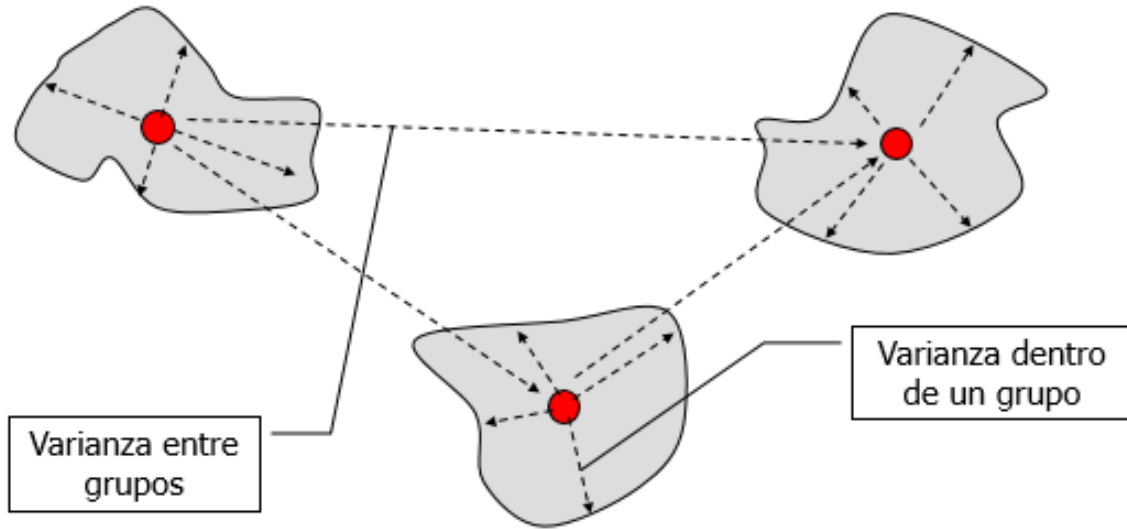


Figura 8: Representación gráfica de la segmentación de dato

Existen dos grandes tipos de métodos de agrupación:

- Métodos jerárquicos: Los objetos se agrupan (o dividen) por partes hasta clasificar todos los objetos.
 - De una iteración a otra, se modifica el valor de pertenencia a grupos de un único objeto.
 - No requiere a priori fijar el número de clústeres.

- Métodos no jerárquicos (de partición): Se tiene un número de grupos predefinidos y cada objeto se ubica en un grupo hasta alcanzar la estabilidad.
 - De una iteración a otra, se puede modificar el valor de pertenencia a grupos de todos los objetos.
 - Requiere a priori fijar un número de clústeres.

Se describen continuación los principales tipos de análisis de clústeres:

- **Análisis de conglomerados de bietápico:** El clúster en dos etapas está pensado para la minería de datos, es decir para estudios con un número de individuos grande que pueden tener problemas de clasificación con los otros procedimientos. Se puede utilizar tanto cuando el número de clústeres es conocido a priori y cuando es desconocido. Permite trabajar conjuntamente con variables de tipo misto (cualitativas y cuantitativas).
- **Análisis de conglomerados de K medias:** Es un método de clasificación No jerárquico. Como se menciona anteriormente, los números de clústeres que se va a formar es fijado de antemano y se agrupan los objetos para obtener esos grupos. Comienza con una solución inicial y los objetos se reagrupan de acuerdo con algún criterio de optimalidad. El clúster no jerárquico solo puede ser aplicado a variables cuantitativas. Puede analizar grandes bases de datos.
- **Análisis de conglomerados jerárquicos:** En el método de clasificación jerárquico en cada paso del algoritmo sólo un objeto cambia de grupo y los grupos están anidados en etapas anteriores. Si un objeto ha sido asignado a un grupo ya no cambia más de grupo. El método de jerárquico es idóneo para determinar el número de conglomerados existentes en los datos y el contenido de los mismos. Se utiliza cuando el número de objetos no es muy grande y permite trabajar conjuntamente con variables del tipo mixto (cualitativas y cuantitativas). Siempre que todas las variables sean del mismo tipo, este procedimiento podrá analizar variables continuas, de recuento o binarias.

Para nuestro caso de estudio se utiliza el método de clústeres jerárquicos ya que es un buen método de segmentación no subordinado (sin una variable a predecir), explicativo al momento de mostrar cómo se conforman los grupos y es compatible para el número de datos y tipos de variables utilizadas (en nuestro caso ordinales categóricas). Además, no requiere fijar a priori el número de clústeres.

2.4.1 Métodos Jerárquicos de Análisis de Clústeres

Los llamados métodos jerárquicos tienen por objetivo agrupar clústeres para formar uno nuevo o bien separar alguno ya existente para dar origen a otros dos, de tal forma que, si sucesivamente se va efectuando este proceso de aglomeración o división, se minimice alguna distancia o bien se maximice alguna medida de similitud.

Los métodos jerárquicos se subdividen en aglomerativos y disociativos. Cada una de estas categorías presenta una gran diversidad de variantes.

1. Los métodos aglomerativos, también conocidos como ascendentes, comienzan el análisis con tantos grupos como individuos haya. A partir de estas unidades iniciales se van formando grupos, de forma ascendente, hasta que al final del proceso todos los casos tratados están englobados en un mismo conglomerado.
2. Los métodos disociativos, también llamados descendentes, constituyen el proceso inverso al anterior. Comienzan con un conglomerado que engloba a todos los casos tratados y, a partir de este grupo inicial, a través de sucesivas divisiones, se van formando grupos cada vez más pequeños. Al final del proceso se tienen tantas agrupaciones como casos han sido tratados.

En nuestro caso se utiliza el método aglomerativo ya que se parte con un conjunto de datos mayor (Tipos de Yacimientos) los cuales se quieren juntar (aglomerar) en subconjuntos.

Los métodos jerárquicos permiten la construcción de un árbol de clasificación, que recibe el nombre de dendrograma, en el cual se puede seguir de forma gráfica el procedimiento de unión, mostrando que grupos se van uniendo, en qué nivel concreto lo hacen, así como el valor de la medida de asociación entre los grupos cuando estos se agrupan. El largo de las ramas está asociado inversamente a la fortaleza de la relación.

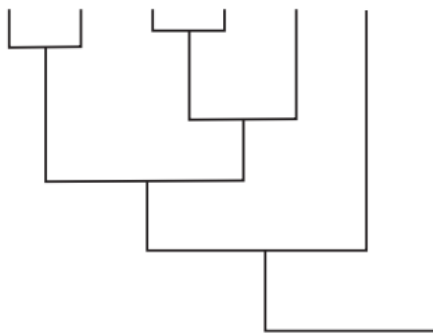


Figura 9: Ejemplo de estructura de un Dendrograma

En nuestro caso se utiliza el método aglomerativo, ya que se parte con un conjunto de datos mayor (Tipos de Yacimientos) los cuales se quieren juntar (aglomerar) en subconjuntos.

Básicamente el algoritmo es:

Sea n el conjunto de individuos de la muestra, y K el nivel o iteración del algoritmo.

- En $K=0$, el número de grupos es igual al de individuos, es decir, n grupos.
- En $K=1$ se agrupan los dos individuos que tengan mayor similitud o menor distancia, por lo que se tienen $n-1$ grupos.
- Siguiendo con la misma estrategia, en el nivel $K=L$ se tendrán $n-L$ grupos.
- Se continúa agrupando hasta el nivel en que solo hay un grupo, formado por todos los individuos de la muestra (n).

Se presenta a continuación un ejemplo simplificado del algoritmo utilizado, para 7 individuos (A, B, C, D, E, F y G). Se parte con la matriz de distancias iniciales entre los individuos. En nuestro caso se utiliza la distancia euclidiana al cuadrado.

Tabla 3: Matriz de distancias iniciales, nivel $K=1$.

	A	B	C	D	E	F	G
A	0						
B	2.15	0					
C	0.7	1.53	0				
D	1.07	1.14	0.43	0			
E	0.85	1.38	0.21	0.29	0		
F	1.16	1.01	0.55	0.22	0.41	0	
G	1.56	2.83	1.86	2.04	2.02	2.05	0

1. Nivel $K=1$

$\text{Min}\{d(C_i, C_j)\} = d(C, E) = 0.21$. Por lo que el primer cluster (o grupo) que se forma es el C con E, denotado como (C, E).

2. Nivel $K=2$

La matriz de distancias en este paso es:

Tabla 4 Matriz de distancias, nivel K=2.

	A	B	(C, E)	D	F	G
A	0					
B	2.15	0				
(C, E)	0.7	1.38	0			
D	1.07	1.14	0.29	0		
F	1.16	1.01	0.41	0.22	0	
G	1.56	2.83	1.86	2.04	2.05	0

Ahora, $\text{Min}\{d(C_i, C_j)\} = d(D, F) = 0.22$. Por lo que se forma el cluster (D, F).

3. Nivel K=3

La matriz de distancias en este paso es:

Tabla 5 Matriz de distancias, nivel K=3.

	A	B	(C, E)	(D, F)	G
A	0				
B	2.15	0			
(C, E)	0.7	1.38	0		
(D, F)	1.07	1.01	0.29	0	
G	1.56	2.83	1.86	2.04	0

En este caso, $\text{Min}\{d(C_i, C_j)\} = d\{(C, E), (D, F)\} = 0.29$. Se forma el cluster ((C, E), (D, F)).

4. Nivel K=4

La matriz de distancias en este paso es:

Tabla 6 Matriz de distancias, nivel K=4.

	A	B	((C, E), (D, F))	G
A	0			
B	2.15	0		
((C, E), (D, F))	0.7	1.01	0	
G	1.56	2.83	1.86	0

En este caso, $\text{Min}\{d(C_i, C_j)\} = d\{A, ((C, E), (D, F))\} = 0.7$. Por lo que se forma el cluster (A, ((C, E), (D, F))).

5. Nivel K=5

La matriz de distancias en este paso es:

Tabla 7 Matriz de distancias, nivel K=5.

	(A, ((C, E), (D, F)))	B	G
(A, ((C, E), (D, F)))	0		
B	1.01	0	
G	1.56	2.83	0

En este caso, $\text{Min}\{d(C_i, C_j)\} = d\{B, (A, ((C, E), (D, F)))\} = 1.01$. Formándose el cluster (B, (A, ((C, E), (D, F)))).

6. Nivel K=6

La matriz de distancias en este paso es:

Tabla 8 Matriz de distancias, nivel K=6 (final).

	(B, (A, ((C, E), (D, F))))	G
(B, (A, ((C, E), (D, F))))	0	
G	1.56	0

Este es el último paso, en el cual, se tendrá un único cluster formado por los 7 individuos. El Dendograma asociado es el de la Figura 10.

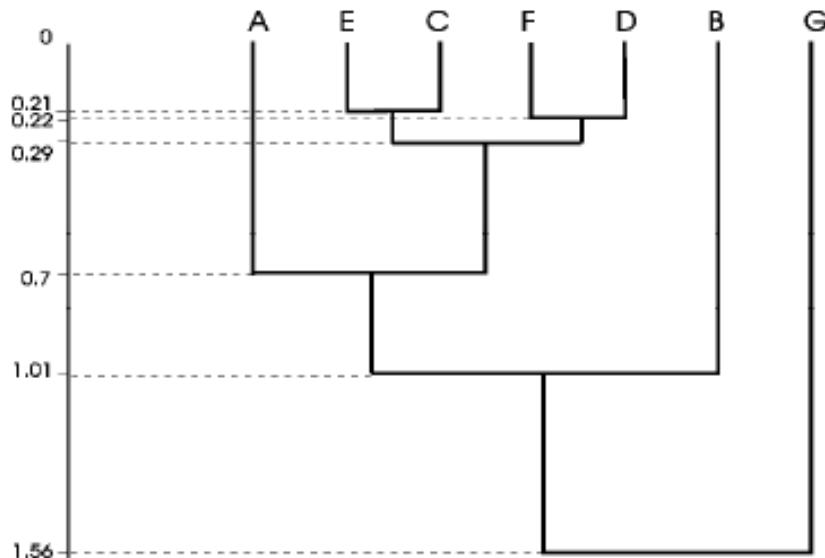


Figura 10 Dendograma resultante para el ejemplo anterior.

2.4.2 Árboles de regresión y clasificación

Los árboles de clasificación y regresión o CART (*classification and regression trees*), Son métodos para construir modelos predictivos (supervisados) a partir de datos. Los modelos se obtienen particionando recursivamente los datos y la instalación de un modelo predictivo simple (por ejemplo, ¿hay presencia de calcopirita?) dentro de cada partición. Como resultado, el particionamiento de datos puede ser representado gráficamente como un árbol de decisión. Cuando la variable a predecir (dependiente) puede tomar un número finito de valores, se les denomina árboles de clasificación. Cuando la variable a predecir puede tomar un rango continuo de valores, se les llama árboles de regresión (Loh, 2011).

Dicho de otro modo, en un problema de clasificación, se posee una muestra de entrenamiento (datos de yacimientos para esta memoria) con n observaciones de una variable a predecir Y (tipo de yacimiento en este caso) y p variables predictoras X (mineralogía y alteraciones hidrotermales). El objetivo es encontrar un modelo para predecir los valores de Y con nuevos valores de X . En nuestro caso corresponden a árboles de clasificación ya que nuestra variable dependiente solo toma los valores de 1 o 0, en donde 1 equivale a que pertenece al tipo de yacimiento y 0 equivale a que no pertenece al tipo de yacimiento.

Los árboles de decisión están representados por un set de preguntas que dividen la muestra de entrenamiento en partes cada vez más pequeñas. La metodología CART solo preguntas que pueden ser respondidas por sí o no (por ejemplo, ¿Existe presencia de calcopirita?). Entonces el algoritmo buscará para todas las posibles variables y todos los posibles valores con el propósito de encontrar la mejor partición (particiones que tengan la máxima homogeneidad). El proceso se repite para cada uno de los fragmentos resultantes (Timofeev, 2004). Como ejemplo, se muestra el siguiente esquema, en donde, t_{parent} es el nodo "padre" y t_{left} , t_{right} son los nodos "hijos" de izquierdo y derecho respectivamente. Como se mencionó estos nodos hijos se originan a partir de preguntas con respuesta si/no.

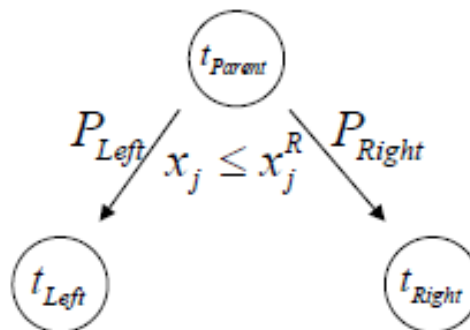


Figura 11: esquema de división de datos en árboles de clasificación

Ventajas de los Árboles de regresión y clasificación (Rokach y Maimon. 2008):

- **Simple de entender e interpretar:** Es simple para terceros entender modelos de árboles tras una breve explicación.
- **Requieren poca preparación de los datos:** Otras técnicas a menudo requieren la normalización de la información, creación de variables ficticias y eliminar los datos en blanco.
- **Capaces de manejar datos tanto numéricos como categóricos:** Otras técnicas están usualmente especializadas en el análisis de bases de datos que tienen un solo tipo de variable. (Por ejemplo, las reglas de relación solo pueden ser usadas con variables nominales mientras que las redes neuronales solo pueden ser usadas con variables numéricas)
- **Usa un modelo de caja blanca:** Si una situación dada es observable en el modelo, la explicación es fácilmente inferida por la estructura lógica del árbol. Por el contrario, en un modelo de caja negra, la explicación de los resultados es comúnmente difícil de comprender o encontrar, como por ejemplo con una red neuronal.
- **Posible de validar un modelo usando test estadísticos:** Eso hace que sea posible probar la fiabilidad del modelo.
- **Funciona bien con grandes bases de datos:** Grandes cantidades de datos pueden ser analizados utilizando los recursos informáticos estándares y en un tiempo razonable.

Capítulo 3. CARACTERIZACIÓN DE MODELOS GEOLÓGICOS

Para los elementos metálicos de interés de Cobre(Cu), Oro(Au), Hierro(Fe) y Plata(Ag) se identificaron, a partir de los anteriormente expuesto en el capítulo anterior, que los siguientes tipos de modelos geológico (Tabla 9) son los que poseen una mayor ocurrencia en Chile.

Tabla 9: Resumen de principales metales de producción por tipo de yacimiento

Tipos de Yacimientos	Cobre	Oro	Plata	Hierro
Pórfidos de Cobre (Au-Mo)	X	X	X	
Skarns	X	X	X	X
IOCG/IOA	X	X		X
VMS	X	X	X	
Estratoligados	X		X	X
Epitermal		X	X	
Depósitos tipo Carlin de Oro		X		

A partir de los anterior, se identificaron las variables más relevantes para cada uno de los 16 tipos de depósitos: Pórfidos Cu, Skarns (Cu, Fe y Zn-Pb), IOCG/IOA (Cu, Au y Fe), VMS (Cu, Polimetálicos, Sedex), Estratoligados (Cu, Ag y Fe), Epitermales (Au y Ag) y Depósitos tipo Carlin (resumido en la tabla 10).

Las variables que se estudian para cada tipo de yacimiento son:

- **Minerales:** Se incluyen en esta sección todos los minerales con ocurrencia en el tipo de depósito, sin distinción de si se consideran minerales de mena, ganga o asociado a alguna alteración hidrotermal. La razón de lo anterior es que la categoría de mena, ganga o asociado a alteración depende del tipo específico de yacimiento. Se analiza la ocurrencia y correlación para 131 minerales distintos.
- **Tipos de Roca:** Se incluyen en este tipo de variable, todas las rocas o litologías relacionadas de algún modo al tipo de yacimiento, ya sea la roca de caja, roca asociada a la mineralización o información estratigráfica. Se analiza la ocurrencia y correlación para 45 tipos de rocas distintos.
- **Alteraciones hidrotermales:** Se analiza la ocurrencia y correlación para 23 tipos de alteraciones hidrotermales distintas.
- **Forma de Mineralización:** En este tipo de variable se indica la morfología en que se encuentra el volumen mineralizado. Se analiza la ocurrencia para 16 formas de mineralización distintas.

- **Estilo de mineralización:** En esta variable se describe la forma en que ocurre la mineralización a nivel local. Se analiza la ocurrencia para 16 estilos de mineralización distintos
- **Geoquímica:** En esta variable se estudia la correlación de los tipos de yacimientos a concentraciones anómalas de distintos elementos en el terreno, denominado como la signatura geoquímica. Se estudian la ocurrencia anómala de 25 elementos distintos.
- **Geografía/ Faja Metalogénica:** En esta variable se incluyen las fajas metalogénicas asociadas a los yacimientos y los sectores geográficos generales relativos. Se estudian 9 casos distintos entre fajas metalogénicas y sectores geográficos.
- **Tonelajes:** En esta variable se describen el orden de magnitud para cada tipo de yacimiento.

Tabla 10: Resumen de número tipos de variables estudiadas

Variables Estudiadas	Nº de Variables
Minerales	131
Tipos de Rocas	45
Alteraciones	23
Forma mineralización	16
Estilo mineralización	16
Geoquímica	25
Geografía/Faja	9
Tonelajes típicos	Máximos y Mínimos en MTon

3.1 RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS POR DEPÓSITO

3.1.1 Pórfidos cobre(Au-Mo)

Tabla 11: Resumen de características de pórfidos cupríferos

Minerales:						
actinolita	albita	alunita	anhidrita	ankerita	atacamita	azurita
bornita	brochantita	calcita	calcopirita	calcosina	clorita	covelina
cuarzo	diagenita	diásporo	dickita	epidota	esfalerita	especularita
hematita	hornblenda	illita	kaolinita	magnetita	malaquita	martita
oligoclasa	oro	pirita	pirofilita	sericita	tenorita	turmalina
Molibdeni:ta	sheelita	montmorillonita	galena	biotita	crisocola	feldespatoK
T. de Rocas						
adamelitas	andesita	arcilla	carbonatos	cuarzo_monzonita	diorita	granito
monzo_granito	monzonita	riolitas	sienita	latitas		
Alteraciones:						
argílica_avanzada	fílica	potásica	propilítica	silícica		
Forma mineralización:						
concentrica	elongada					
Estilo mineralización:						
stockwork	diseminado	vetas_stockwork	fracturas			
Geografía/Faja:						
Cretásica	C.Andes	F.Maricunga				
Tonelaje Máximo/ Mínimo		50	1000			

3.1.2 Skarn de cobre

Tabla 12: Resumen de características skarns de cobre

Minerales:						
andradita	bornita	calcita	calcopirita	calcosina	clorita	diópsido
hematita	molibdenita	montmorillonita	pirita	pirrotina	siderita	smectita
vesuvianita	wollastonita	esfalerita	tennantita			
T. de Rocas:						
cuarzo_monzonita	dacita	granate	granodioritas	piroxeno		
Alteraciones:						
calco-silicatada						
Geografía/Faja:						
cretásica	C.costa					
Tonelaje Máximo/ Mínimo		1	50			

3.1.3 Skarn de hierro

Tabla 13: Resumen de características skarns de hierro

Minerales:								
anfíbol	bornita	calcita	calcopirita	clorita	diópsido	epidota	esfalerita	espinela
ferrosalita	forsterita	grandita	hematita	ilvaita	magnetita	molibdenita	periclasa	pirita
pirrotina	serpentina	talco	tremolita					
T. de Rocas:								
carbonatita	granate	granito	granodioritas	monzo_granito	monzonita	piroxeno	sienita	
Alteraciones:								
calco-silicatada								
Forma mineralización:								
estratiforme								
Geografía/Faja:								
C.costa								
Tonelaje Máximo/ Mínimo		5	200					

3.1.4 Skarn de zinc – plomo

Tabla 14: Resumen de características skarns de zinc-plomo

Minerales:								
actinolita	almandino	andradita	arsenopirita	bustamita	calcopirita	esfalerita	espesartina	
hedenbergita	hematita	ilvaita	johansenita	magnetita	molibdenita	pirita	pirrotina	
tremolita	wollastonita	oro	galena	rodonita				
T. de Rocas:								
cuarzo_monzonita	diorita	granito	granodioritas	jasperoide	piroxeno	sienita	sienogranito	
Alteraciones:								
calco-silicatada								
Estilo mineralización:								
estratiforme	chimeneas_brecha							
Geografía/Faja:								
C.costa	C.patagónica							
Tonelaje Máximo/ Mínimo		0.1	3					

3.1.5 VMS de cobre

Tabla 15: Resumen características VMS de Cobre

Minerales:						
calcedonia	calcopirita	calcosina	ceolita	clorita	crisocola	cuarzo
malaquita	montmorillonita	pirita	sericita	smectita	yeso	acantita
argentita	baritina	bornita	calcita	celadonita	electrum	esfalerita
germantita	isocubanita	magnetita	marcasita	molibdenita	oro	pirrotina
tennantita	tetraedrita	wurtzita	epidota	anhidrita	galena	talco
T. de Rocas:						
andesita	ankerita	arenisca	barita	basalto	brecha_piroclástica	carbonatos
dolomitas	esquistos	granate	lavas	metapelítica	riolitas	dacita
Alteraciones:						
cloritización	filica	propilítica	sericita-clorita-arcilla		sericítica	silificación
Forma mineralización:						
lenticular	platiforme	tabular				
Estilo mineralización:						
vetillas	estratiforme	chimeneas_brecha				
Geoquímica:						
Cu	Pb	Ag	Au	Co	Mo	Sn
Zn	W					
Geografía/Faja:						
C.costas						
Tonelaje Máximo/ Mínimo		0.1	60			

3.1.6 VMS polimetálico (Au-Ag)

Tabla 16: Resumen características VMS polimetálicos

Minerales:							
ankerita	calcopirita	casiterita	ceolita	clorita	crisocola	cuarzo	dolomita
esfalerita	malaquita	montmorillonita	pirita	sericita	siderita	smectita	acantita
argentita	baritina	bornita	calcita	electrum	galena	germantita	isocubanita
marcasita	molibdenita	oro	pirrotina	talco	tennantita	tetraedrita	wurtzita
epidota	anhidrita	magnetita					
T. de Rocas:							
andesita	brecha	carbonatos	chert	dacita	metapelítica	riolitas	toba
Alteraciones:							
cloritización	filica	sericítica	silificación				
Forma mineralización:							
cilíndrico	concentrica	lenticular	tabular	vaina			
stockwork	diseminado	vetillas	estratiforme				
Geoquímica:							
Cu	Pb	Zn	Ag	Au	Co	Mo	Sn
W							
Geografía/Faja:							
C.costas							
Tonelaje Máximo/ Mínimo		0.1	60				

3.1.7 Sedex de plata

Tabla 17: Resumen características depósitos Sedex de plata

Minerales:						
albita	ankerita	baritina	calcita	clorita	cuarzo	dolomita
fluorapatito	galena	pirita	pirrotina	siderita	turmalina	arsenopirita
calcopirita	casiterita	cobaltita	enargita	freibergita	marcasita	melnicknovita
molibdenita	esfalerita	bismutinita	millerita			
T. de Rocas:						
arenisca	caliza	chert	limolita	lutita	turbidita	
Alteraciones:						
albitización	alteración-Fe-Mn		turmalinización			
Forma mineralización:						
cilíndrico	lenticular	tabular	vaina			
Estilo mineralización						
diseminado	laminaciones					
Geoquímica:						
Ag	Pb	Zn				
Geografía/Faja:						
C.costas						
Tonelaje Máximo/ Mínimo		15	155			

3.1.8 Estratoligado de cobre

Tabla 18: Resumen características Estratoligados de Cobre

Minerales:						
actinolita	albita	anatasa	atacamita	brochantita	calcopirita	calcosina
epidota	escapolita	esfeno	hematita	magnetita	malaquita	sericita
antlerita	apatito	bornita	calcita	clorita	cobre	covelina
cuprita	digenita	esfalerita	feldespatoK	galena	oro	pirita
tetraedrita	turmalina	yeso	arsenopirita	cloantita	cobaltita	molibdenita
uranita	crisocola	anhidrita	cuarzo	plata	niquelina	
T. de Rocas:						
andesita	basalto	brecha	dacita	diabasas	gabro	granodioritas
riolitas	toba	tonalitas	lavas			
Alteraciones:						
actinolización	albitización	cloritización	filica	propilítica	sericítica	silícica
Forma mineralización:						
chimenea_brecha	estratiforme	lenticular	tabular	vetiforme		
Estilo mineralización						
diseminado	fracuras	brecha	vetas			
Geografía/Faja:						
jurásica	cretásica					
Tonelaje Máximo/ Mínimo		2	200			

3.1.9 Estratoligado de hierro

Tabla 19: Resumen características Estratoligados de Hierro

Minerales:						
actinolita	albita	bornita	calcopirita	calcosina	clorita	covelina
magnetita	pirita	sericita	anhidrita	apatito	calcita	cuarzo
oro	plata	turmalina	arsenopirita	cloantita	cobaltita	molibdenita
uranita	hematita	feldespatoK	niquelina			
T. de Rocas:						
diabasas	diorita	gabro	granodioritas	tonalitas		
Alteraciones:						
actinolización	albitización	cloritización	fílica	silícica		
Forma mineralización:						
vetiforme						
Estilo mineralización						
diseminado		vetas				
Geografía/Faja:						
jurásica		cretásica				
Tonelaje Máximo/ Mínimo		2	200			

3.1.10 Estratoligado de plata

Tabla 20: Resumen características Estratoligados de Plata

Minerales:							
actinolita	albita	atacamita	bornita	calcopirita	calcosina	crisocola	especularita
hematita	magnetita	sericita	anhidrita	antlerita	apatito	brochantita	calcita
clorita	cobre	covelina	cuarzo	cuprita	digenita	esfalerita	feldespatoK
galena	oro	pirita	plata	tetraedrita	turmalina	yeso	arsenopirita
cloantita	cobaltita	molibdenita	niquelina	uranita			
T. de Rocas:							
diabasas	diorita	gabro	granito	granodioritas	tonalitas		
Alteraciones:							
actinolización	albitización	cloritización	fílica	silificación			
Forma mineralización:							
vetiforme							
Estilo mineralización							
diseminado		vetas					
Geografía/Faja:							
jurásica		cretásica					
Tonelaje Máximo/ Mínimo		2	200				

3.1.11 Epitermal de oro

Tabla 21: Resumen características Epitermales de Oro

Minerales:							
ankerita	arsenopirita	calcita	carlinita	cinabrio	cuarzo	dickita	dolomita
estibina	illita	kaolinita	marcasita	muscovita	oro	oropimente	pirita
rejalgar	smectita	baritina	calcopirita	esfalerita	galena	molibdenita	
T. de Rocas:							
caliza	dolomitas	limolita	lutita				
Alteraciones:							
argílica	arsénica-anómala		descalcificación	dolomitización	piritización	silificación	
Forma mineralización:							
"zanahoria"	de_"T"	estratiforme	irregular	tabular			
Estilo mineralización							
diseminado	vetas	inclusiones	encapsulado				
Geoquímica:							
Ag	As	Au	Hg	Sb	Te	Ti	W
Geografía/Faja:							
F.El Indio	F.Atacama						
Tonelaje Máximo/ Mínimo		1	100				

3.1.12 Epitermal de plata

Tabla 22: Resumen características Epitermales de Plata

Minerales:							
albita	alunita	amatista	andalusita	argentita	azufre	calcedonia	calcita
corindón	cuarzo	dickita	dumortierita	electrum	epidota	illita	jarosita
kaolinita	montmorillonita	pirita	pirofilita	smectita	topacio	turmalina	zunyita
adularia	arsenopirita	baritina	calcopirita	cinabrio	clorita	covelina	digenita
esfalerita	estibina	fluorita	galena	goldfieldita	hematita	lollingita	marcasita
oropimente	pirargirita	pirrotina	selionuros(Ag)	sericita	sulfosales(Ag)	tennantita	tetraedrita
diásporo	oro						
T. de Rocas:							
andesita	carbonatos	dacita	diorita	dolomitas	granodioritas	riodacita	
Alteraciones:							
argílica	argílica avanzada	kaolinita	potásica	propilítica	sericítica	silificación	
Estilo mineralización							
stockwork	brecha	vetas					
Geoquímica:							
As	Au	Fe	Sn	Ag	Ba	Bi	Cu
F	Hg	Mn	Mo	Pb	Sb	Se	Te
W	Zn						
Geografía/Faja:							
C.Andes	F.maricunga	F.El Indio	El Teniente				
Tonelaje Máximo/ Mínimo		1	100				

3.1.13 Tipo Carlin de oro

Tabla 23: Resumen características Carlin de Oro

Minerales:						
albita	alunita	amatista	argentita	calcedonia	calcita	cuarzo
enargita	epidota	illita	kaolinita	luzonita	montmorillonita	pirita
adularia	arsenopirita	azufre	baritina	calcopirita	cinabrio	clorita
diagenita	dumortierita	esfalerita	estibina	fluorita	galena	goldfieldita
jarosita	lollingita	marcasita	oropimente	pirargirita	pirrotina	selionuros(Ag)
sulfosales(Ag)	tennantita	tetraedrita	topacio	zunyita	diásporo	oro
electrum	smectita	covelina	hematita	sericita		
T. de Rocas:						
andesita	carbonatos	dacita	diorita	granodioritas	ignimbrita	riodacita
riolitas						
Alteraciones:						
argílica	argílica_avanzada	potásica	propilítica	sericítica	silícica	
Geoquímica:						
As	Au	Sn	Ag	Ba	Bi	Cu
Hg	Mn	Mo	Pb	Sb	Se	Te
Zn	F	W				
Geografía/Faja:						
C.Andes	F.maricunga	F.El Indio	El Teniente			
Tonelaje Máximo/ Mínimo		0.1	100			

3.1.14 IOCG de cobre

Tabla 24: Resumen características IOCG de Cobre

Minerales:						
actinolita	albita	antlerita	atacamita	biotita	brochantita	calcopirita
crisocola	cuarzo	cuprita	enargita	epidota	escapolita	feldespatoK
hematita	hornblenda	magnetita	malaquita	pirita	sericita	siderita
anhidrita	apatito	arsenopirita	calcita	cubanita	esfalerita	galena
marcasita	molibdenita	neotocita	oro	pirrotina	turmalina	clorita
hedenbergita	talco	LREE				
T. de Rocas:						
andesita	brecha	carbonatos	dacita	granito	toba	
Alteraciones:						
albitización	cálcica	carbonatización	cloritización	fílica	potásica	propilítica
sericita-clorita-arcilla		sódica				
Forma mineralización:						
chimenea_brecha	lenticular	mantiforme	tabular	vetiforme		
Estilo mineralización						
stockwork	diseminado	chimeneas_brecha	brecha			
Geoquímica:						
Ag	As	Au	Ba	Co	Cu	Fe
Mo	Ni	P	U	LREE(G)		
Geografía/Faja:						
jurásica	cretásica	C.costal				
Tonelaje Máximo/ Mínimo		120	470			

3.1.15 IOCG y IOA de hierro

Tabla 25: Resumen características IOCG-IOA de Hierro

Minerales:					
actinolita	albita	alunita	antlerita	apatito	atacamita
biotita	brochantita	clorita	crisocola	cuarzo	epidota
esfeno	feldespatoK	hedenbergita	hornblenda	magnetita	sericita
anhidrita	arsenopirita	calcita	calcopirita	cubanita	cuprita
especularita	galena	granate	hematita	LREE	malaquita
molibdenita	neotocita	oro	pirita	pirrotina	titanita
azufre	escapolita	yeso	esfalerita	marcasita	turmalina
T. de Rocas:					
andesita	anfibolita	arcilla	brecha	brecha_piroclástica	dacita
foliadas_biotizadas	toba	diorita			
Alteraciones:					
actinización	albitización	argílica_avanzada	cálcica	potásica	silificación
sódica	turmalinización	sericita-clorita-arcilla			
Forma mineralización:					
bolsonada_irregular	concentrica	lenticular	mantiforme	vetiforme	
Estilo mineralización					
vetas_stockwork	vetillas	masivo			
Geoquímica:					
Ag	As	Au	Ba	Co	F
LREE(G)	Mo	Ni	P	S	Ti
Cu	Fe	U			
Geografía/Faja					
jurásica	cretásica	C.costal			
Tonelaje Máximo/ Mínimo		120	470		

3.1.16 IOCG de oro

Tabla 26: Resumen características IOCG de Oro

Minerales:						
actinolita	albita	antlerita	atacamita	biotita	brochantita	calcopirita
crisocola	cuarzo	electrum	epidota	escapolita	hedenbergita	hornblenda
pirita	sericita	siderita	anhidrita	apatito	arsenopirita	calcita
cuprita	esfalerita	galena	LREE	malaquita	marcasita	molibdenita
oro	pirrotina	turmalina	clorita	magnetita	cubanita	neotocita
T. de Rocas:						
andesita	carbonatos	dacita	foliadas_biotizadas	granito	toba	
Alteraciones:						
albitización	carbonatización	cloritización	fílica	potásica	propilítica	sericítica
sódica						
Forma mineralización:						
lenticular	mantiforme	skarn	tabular	vetiforme		
Estilo mineralización						
stockwork	diseminado	brecha	chimeneas_brecha			
Geoquímica:						
Ag	As	Au	Ba	Co	Cu	F
LREE(G)	Mo	Ni	P	U	Fe	
Geografía/Faja						
jurásica	cretásica	C.costas				
Tonelaje Máximo/ Mínimo		120	470			

Capítulo 4. PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS GEOLÓGICOS

Una vez identificadas las principales características relacionadas con los distintos tipos de yacimientos trabajados, se procede a parametrizar numéricamente cada una de estas variables, de acuerdo al grado de correlación que tengan estas al depósito en particular (Tabla 27).

Se usa:

Tabla 27 Valores designados por variable según grado de correlación

Grado de Correlación	Valor
Nula o muy baja correlación	0
Baja correlación	1
Correlación media	2
Correlacionados	3

Estos valores, al ser crecientes se modelaron como una variable de tipo ordinal y son adecuadas para la forma en que opera el método de clústeres jerárquicos usado para la posterior segmentación de los yacimientos. Adicionalmente, estos valores también indican una normalización de importancia pues todas las características están con la misma regla

Adicionalmente se usa la siguiente simbología mostrada en la Tabla 28, para efectos de presentación y se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 28: Simbología de Depósitos

N°	Depósito	N°	Depósito	N°	Depósito	N°	Depósito
1	Pórfido_Cu(Mo,AU)	5	Skarn(Cu)	9	IOCG(Au)	13	VMS(Ag_Au)
2	IOCG(Cu)	6	Skarn(Fe)	10	T.Carlin(Au)	14	Epitermal(Ag)
3	Estratoligado(Cu)	7	IOCG_IOA(Fe)	11	Epitermal(Au)	15	Sedex(Ag)
4	VMS(Cu)	8	Estratoligado(Fe)	12	Skarn_Zn-Pb(Ag)	16	Estratoligado(Ag)

Tabla 29: Parametrización de Minerales

MINERALES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
acantita	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
actinolita	3	3	3	0	0	0	3	3	3	0	0	3	0	0	0	3
adularia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
albita	3	3	3	0	0	0	3	3	3	0	3	0	0	3	3	3
almandino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
alunita	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0
amatista	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0
anatasa	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
andalusita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
andradita	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
anfíbol	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
anhidrita	3	2	2	2	0	0	2	2	2	0	0	0	2	0	0	2
ankerita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0
antlerita	0	3	2	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	2
apatito	0	2	2	0	0	0	3	2	2	0	0	0	0	0	0	2
argentita	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	2	3	0	0
arsenopirita	0	2	1	0	0	0	2	1	2	3	2	3	0	2	2	1
atacamita	3	3	3	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	3
azufre	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	3	0	0
azurita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
baritina	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	2	2	3	0
biotita	3	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0
bismutinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
bornita	3	0	2	2	3	3	0	3	0	0	0	0	2	0	0	3
brochantita	3	3	3	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	2
bustamita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
calcedonia	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0
calcita	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	0	2	3	3	2
calcopirita	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3
calcosina	3	0	3	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
carlinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
casiterita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0
celadonita	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ceolita	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
cinabrio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0	0
cloantita	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
clorita	3	3	2	3	3	3	3	3	3	0	2	0	3	2	3	2
cobaltita	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1
cobre	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
corindón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
covelina	3	0	2	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	2	0	2
crisocola	3	3	3	3	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	3
cuarzo	3	3	2	3	0	0	3	2	3	3	3	0	3	3	3	2
cubanita	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 30: Parametrización de Minerales

MINERALES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
cuprita	0	3	2	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2
diagenita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
diásporo	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
dickita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0
digenita	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
diópsido	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dolomita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0
dumortierita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0
electrum	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	3	0	2	3	0	0
enargita	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0
epidota	3	3	3	3	3	3	3	0	3	0	3	0	3	3	0	0
escapolita	0	3	3	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0
esfalerita	3	2	2	2	3	3	2	0	2	2	2	3	3	2	3	2
esfeno	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
especularita	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
espesartina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
espinela	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
estibina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0	0
famatinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
feldespatok	3	3	2	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	2
ferrosalita	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fluorapatito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
fluorita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
forsterita	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
freibergita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
galena	2	2	2	2	0	0	2	0	2	2	2	3	2	2	3	2
germantita	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
goetita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
goldfieldita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
granate	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
grandita	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hedenbergita	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	0	0
hematita	3	3	3	0	3	3	2	3	0	0	2	3	0	2	0	3
hornblenda	3	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0
illita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0
ilmenita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ilvaita	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
isocubanita	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
jarosita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0
johansenita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
kaolinita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0
lollingita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
LREE	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
luzonita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0

Tabla 31: Parametrización de Minerales

MINERALES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
magnetita	3	3	3	2	0	3	3	3	3	0	0	3	2	0	0	3
malaquita	3	3	3	3	0	0	2	0	2	0	0	0	3	0	0	0
marcasita	0	2	0	2	0	0	2	0	2	3	2	0	2	2	2	0
martita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
melnickovita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
millerita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
molibdenita	2	2	1	2	3	3	2	1	2	2	0	3	2	0	2	1
montmorillonita	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	3	3	0	0
muscovita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
neotocita	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
niquelina	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
oligoclasa	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
oro	3	2	2	2	0	0	2	2	2	3	1	2	2	1	0	2
oropimente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0	0
periclasa	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
pirargirita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
pirita	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2
pirofilita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
pirrotina	0	2	0	2	3	3	2	0	2	0	2	3	2	2	3	0
plata	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2
rejalgar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
rodonita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
selionuros(Ag)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
sericita	3	3	3	3	0	0	3	3	3	0	2	0	3	2	0	3
serpentina	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sheelita	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
siderita	0	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0
smectita	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0	3	3	0	0
sulfosales(Ag)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
talco	0	3	0	2	3	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
tennantita	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	0
tenorita	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tetraedrita	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	2
titanita	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
topacio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0
tremolita	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
turmalina	3	2	2	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	3	3	2
uranita	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
vesuvianita	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wollastonita	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
wurtzita	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
yeso	0	0	2	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2
zunyita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0

Tabla 32: Parametrización de tipos de rocas

T. ROCAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
adamelitas	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
andesita	3	3	3	3	0	0	3	0	3	0	3	0	3	3	0	0
anfibolita	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ankerita	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
arcilla	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
arenisca	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
barita	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
basalto	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
brecha	0	3	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0
brecha_piroclástica	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
caliza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0
carbonatita	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
carbonatos	3	3	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	3	3	0	0
chert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0
cuarzo_monzonita	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
dacita	0	3	3	3	3	0	3	0	3	0	3	0	3	3	0	0
diabasas	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
diorita	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	3	0	3
dolomitas	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0
esquisto	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
foliadas_biotizadas	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0
gabro	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
gneiss	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
goetita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
granate	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
granito	3	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
granodioritas	0	0	3	0	3	3	0	3	0	0	3	3	0	3	0	3
ignimbrita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
jasperoide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
latitas	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
lavas	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
limolita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0
lutita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0
metapelítica	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
monzo_granito	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
monzonita	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
norita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
piroxeno	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
riodacita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0
riolitas	3	0	3	3	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0
sienita	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
sienogranito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
toba	0	3	3	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0
tonalitas	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3

Tabla 33: Parametrización de alteraciones hidrotermales

ALTERACIONES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
actinolización	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3
albitización	0	3	3	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	3	3
alteración-Fe-Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
argílica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0
argílica_avanzada	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0
arsénica-anómala	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
cálcica	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
calco-silicatada	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
carbonatización	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
cloritización	0	3	3	3	0	0	0	3	3	0	0	0	3	0	0	3
descalcificación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
dolomitización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
fílica	3	3	3	3	0	0	0	3	3	0	0	0	3	0	0	3
kaolinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
piritización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
potásica	3	3	0	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0	3	0	0
propilítica	3	3	3	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0
sericita-clorita-arcilla	0	3	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sericítica	0	0	3	3	0	0	0	0	3	0	3	0	3	3	0	0
silícica	3	0	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0
silificación	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	3	0	3
sódica	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0
turmalinización	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0

Tabla 34 Parametrización de formas de mineralización

F.Mineralización	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
"zanahoria"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
bolsonada_irregular	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
chimenea_brecha	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
cilíndrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0
concentrica	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0
de_"T"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
elongada	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
estratiforme	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
irregular	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
lenticular	0	3	3	3	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	3	0
mantiforme	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0
plataforme	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
skarn	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
tabular	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	3	0
vaina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0
vetiforme	0	3	3	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3

Tabla 35: Parametrización de estilos de mineralización

E. MINERALIZACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
stockwork	3	3	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0
diseminado	3	3	0	3	0	0	0	3	3	3	0	0	3	0	3	3
vetas_stockwork	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fracuras	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
chimeneas_brecha	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
brecha	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0
vesículas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
vetas	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	3
vetas_stockwork	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
vetillas	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0
masivo	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
estratiforme	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0
inclusiones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
chimeneas_brecha	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0
encapsulado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
laminaciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0

Tabla 36: Parametrización de firmas geoquímicas

GEOQUIMICA	2	4	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ag	3	2	3	0	3	3	2	0	2	2	3
As	3	0	3	0	3	3	3	0	0	3	0
Au	3	2	3	0	3	3	3	0	2	3	0
Ba	3	0	3	0	3	0	2	0	0	2	0
Bi	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0
Co	3	2	3	0	3	0	0	0	2	0	0
Cu	3	3	2	0	3	0	2	0	3	2	0
F	0	0	3	0	3	0	2	0	0	2	0
Fe	3	0	3	0	3	0	0	0	0	3	0
Hg	0	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0
LREE(G)	3	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0
Mo	3	2	3	0	3	0	2	0	2	2	0
Ni	3	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0
P	3	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0
Pb	0	3	0	0	0	0	2	0	3	2	3
S	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0
Se	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0
Sn	0	2	0	0	0	0	3	0	2	3	0
Te	0	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0
Ti	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0
U	3	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0
W	0	2	0	0	0	3	2	0	2	2	0
Zn	0	2	0	0	0	0	2	0	3	2	3

Tabla 37: Parametrización de geografías y fajas metalogénicas

Geografía/Faja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
F.Jurásica	0	3	3	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3
F.Cretásica	3	3	3	0	3	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3
C.costa	0	3	0	3	3	3	3	0	3	0	0	3	3	0	3	0
C.Andes	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0
C.patagónica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
F.maricunga	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0
F.El Indio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0
El Teniente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0
F.Atacama	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0

Adicionalmente se parametrizan los tonelajes típicos, a los cuales se le asignan valores de 1 a 3 según el rango de millones de toneladas(Mt) de cada uno de los depósitos. La razón por la que se utiliza un rango de 1 a 3 en vez del tamaño mínimo y máximo directamente, es que el método de clústeres jerárquicos utilizado para la posterior segmentación es muy sensible a valores “outliers”, lo que provocaría una distorsión en los resultados de la segmentación.

Tabla 38: Parametrización tamaño

Tipo de Depósito	min(Mt)	max(Mt)	Variable Tamaño
Pórfido_Cu(Mo,AU)	50	1000	3
IOCG(Cu)	120	470	2
IOCG_IOA(Fe)	120	470	2
IOCG(Au)	120	470	2
Estratoligado(Cu)	2	200	2
Skarn(Fe)	5	200	2
Estratoligado(Fe)	2	200	2
Estratoligado(Ag)	2	200	2
Sedex(Ag)	15	155	2
T.Carlin(Au)	0.1	100	1
Epitermal(Au)	1	100	1
Epitermal(Ag)	1	100	1
VMS(Cu)	0.1	60	1
VMS(Ag_Au)	0.1	60	1
Skarn(Cu)	1	50	1
Skarn_Zn-Pb(Ag)	0.1	3	1

Capítulo 5. SEGMENTACIÓN DE MODELOS GEOLÓGICOS

Luego de parametrizadas cada una de las variables relacionadas con cada uno de los depósitos, se realiza la segmentación de estos.

Se utiliza el método de clústeres jerárquicos debido a que el método es apto para cantidades no muy grandes de datos, permite el uso de variables categóricas en su análisis y no exige fijar a priori el número de grupos.

Se utiliza la estrategia de la mínima distancia entre grupos y como medida de distancia se utiliza la euclidiana al cuadrado. Se utilizan estos parámetros, básicamente por su simplicidad y porque con estrategias distintas se obtienen resultados equivalentes.

A continuación, se muestra en la siguiente figura el Dendrograma resultante del método de clústeres jerárquicos.

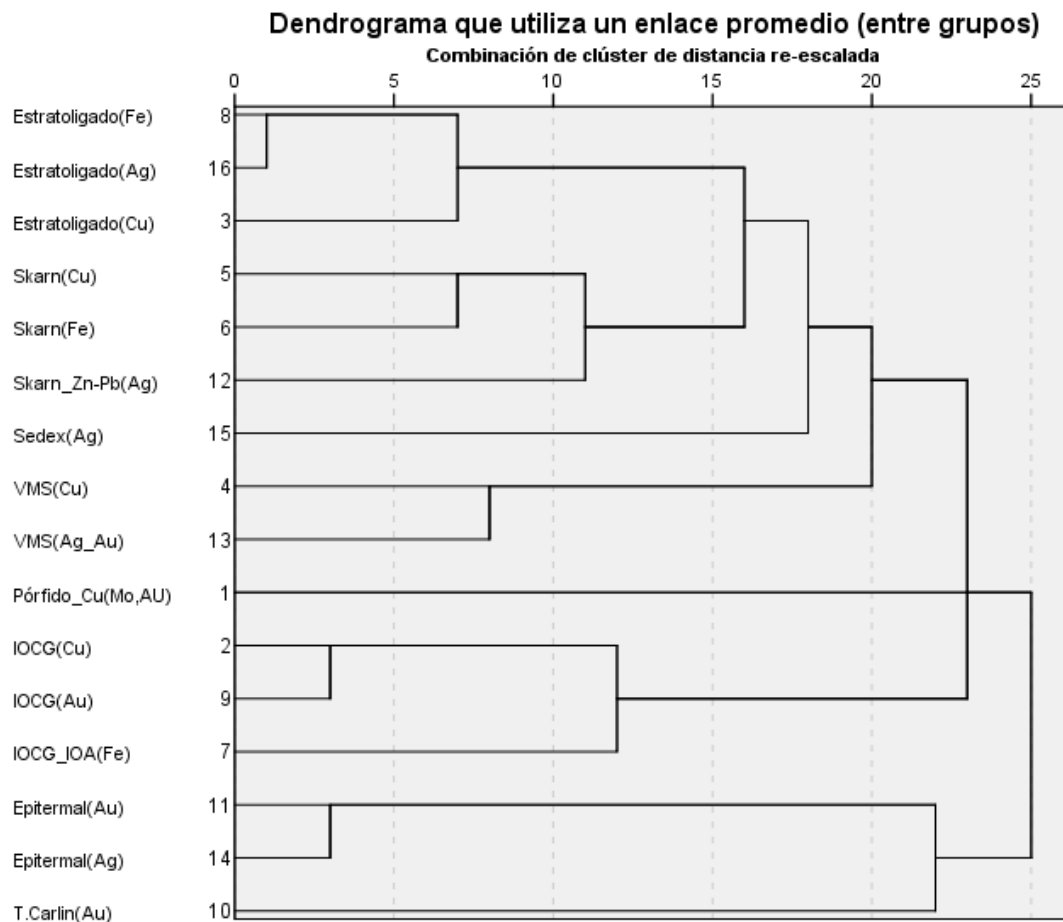


Figura 12: Dendrograma resultante de los depósitos minerales trabajados

Como se observa en la figura anterior el número de clústeres depende del lugar en donde cortemos el dendograma, por lo tanto, la decisión sobre el número “óptimo” de clusters es subjetiva. En esta memoria se utilizan los siguientes criterios para determinar este número:

- **Que se conformen grupos no triviales:** Se busca que los grupos conformados no correspondan únicamente a yacimientos del mismo tipo, pero con distinta mena predominante de producción (ej. Estratoligados de cobre con estratoligados de hierro o epitermales de oro con epitermales de plata), ya que para esto solo se necesitaría el sentido común y no el análisis jerárquico de clústeres.
- **Se busca un número reducido de clusters:** Una de las principales razones por la que se realiza la segmentación de los depósitos minerales, es para simplificar el análisis en etapas tempranas de exploración en donde la información disponible es escasa y no se pueden alcanzar grandes niveles de precisión. Un gran número de grupos no cumpliría este propósito ya que se entraría a un nivel de detalle que no es adecuado para la escasa información que se tiene en estas etapas tempranas de exploración.
- **En lo posible, grupos de más de un elemento:** Idealmente, para que la conformación de grupos tenga sentido, se busca que los grupos contengan más de un solo elemento.
- **Que sean interpretables:** Para que la agrupación tenga utilidad, los grupos formados tienen que ser posibles de nombrar o interpretar en algún grado.

Tabla 39 Historial de conglomeración de grupos indicando la distancia de unión (o coeficiente de disimilaridad)

Etapa	Clúster combinado		Coeficientes Disimilaridad	Porcentaje (%)
	Clúster 1	Clúster 2		
1	8	16	76.000	3.2
2	2	9	137.000	5.7
3	11	14	148.000	6.1
4	3	8	231.000	9.6
5	5	6	243.000	10.1
6	4	13	250.000	10.4
7	5	12	324.500	13.5
8	2	7	352.500	14.6
9	3	5	469.444	19.5
10	3	15	507.833	21.1
11	3	4	556.286	23.1
12	10	11	611.000	25.3
13	1	3	625.667	25.9
14	1	2	638.167	26.5
15	1	10	693.590	28.8
			Disimilitud Máxima	2412

Adicionalmente a los argumentos presentados se busca que los elementos dentro de los grupos no sean demasiado disímiles. Por lo que se establece que la disimilitud entre grupos (distancia euclídea al cuadrado) no se mucho mayor que el 25% de la distancia máxima posible entre grupos suponiendo uno con solo valores 3 y el otro con solo 0, como se muestra en la siguiente ecuación

$$\text{Disimilitud Máxima} = 268 (N^{\circ} \text{parámetros distintos}) * 3^2 - 0 = 2412$$

Considerando los criterios previos se decide trabajar con cuatro grupos, ya que corresponde a una cantidad no muy grande de grupos. Incorpora a los depósitos tipo Carlin, los cuales se mantienen aislados a lo largo de casi todo el dendrograma. Conforma grupos no triviales y es conforman grupos los con elementos lo suficientemente homogéneos (véase en Tabla 39).

Notar que el grupo 1 contiene un solo elemento, la razón a esto se puede observar en el dendrograma que muestra que los Pórfidos de Cu se mantienen aislados a lo largo de todo el dendrograma, y solo se unen en la última etapa. Esto se puede interpretar como que los pórfidos cupríferos son lo suficientemente distintos a los demás tipos de yacimientos como para conformar su propia categoría.

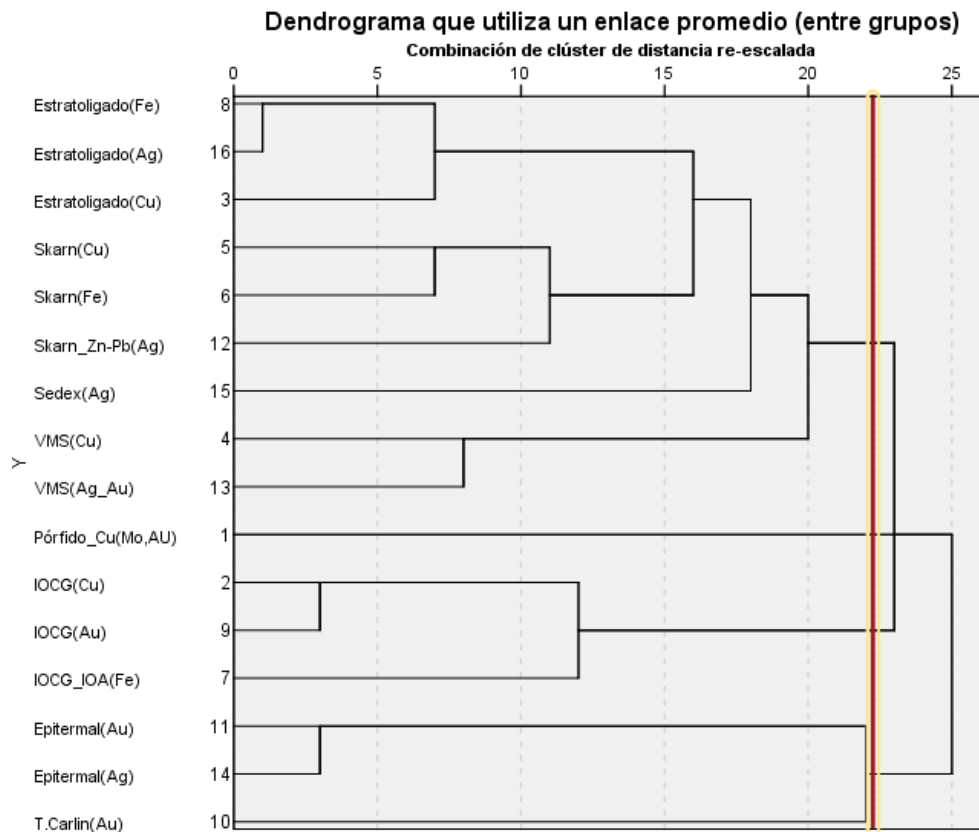


Figura 13: Dendrograma de los depósitos con línea indicando los grupos

En la figura anterior se muestra el dendograma resultante con una línea roja cortando las “ramas” que conforman los grupos escogidos. En resumen, los grupos y los nombres dados a cada uno de estos son:

Tabla 40: Resumen de grupos conformados

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Pórfidos	Sulfuros Metamórficos o Estratoligados (SME)	IOCG-IOA	Epitermales
Pórfido_Cu(Mo,AU)	Estratoligado(Cu)	IOCG(Cu)	T.Carlin(Au)
	VMS(Cu)	IOCG_IOA(Fe)	Epitermal(Au)
	Skarn(Cu)	IOCG(Au)	Epitermal(Ag)
	Skarn(Fe)		
	Skarn_Zn-Pb(Ag)		
	VMS(Ag_Au)		
	Sedex(Ag)		
	Estratoligado(Ag)		

5.1 PONDERACIÓN DE PARÁMETROS

Para poder crear un sistema o metodología para ordenar interés dentro de una cartera de depósitos minerales en etapas tempranas de exploración, debemos ser capaces de ponderar cada parámetro en relación a nuestros grupos definidos, es decir, que tanto está correlacionado a tal o cual grupo. En primera instancia se piensa en asignar probabilidades a cada parámetro (ya sea mineral, tipo de roca, etc...), pero esto implicaría trabajar con números muy pequeños (multiplicación de muchos valores menores a 1), además del problema no trivial de asignarlas de manera confiable.

Se decide entonces, asignar valores o “puntajes” a cada uno de los parámetros, para esto se usan los valores previamente establecidos promediados entre cada uno de los depósitos que conforman el grupo y se les multiplica por 10 por comodidad en su manejo, es decir, $\left(\frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n}\right) * 10$.

Se muestra en la siguiente tabla, un ejemplo de cálculo para los valores asignados.

Tabla 41 Ejemplo de ponderación para cuatro minerales del grupo de Epitermales-

MINERALES	Epitermal Au	Carlin Au	Epitermal Ag	Ponderación
adularia	0	2	2	13.3
albita	0	3	3	20.0
almandino	0	0	0	0.0
alunita	0	3	3	20.0

Capítulo 6. ENRIQUECIMIENTO EMPÍRICO DE GRUPOS

Luego de conformados los grupos se procede a enriquecer y, asimismo, validar la información geológica previamente recolectada de la literatura, usando una base de datos de minas y ocurrencias reales compilada por la U.S. Geological Survey (USGS).

Esta etapa se realiza después de la etapa de segmentación de modelos geológicos principalmente porque el método de clusters jerárquicos requiere que la parametrización de las variables esté en la misma escala, por lo que agregar una ponderación antes generaría una distorsión en el resultado. Adicionalmente, la base carece información estadística sobre todos los tipos de parámetros utilizados en la caracterización en base a la literatura, lo que también generaría distorsión en los resultados de la segmentación.

6.1 PREPARACIÓN DE DATOS

Originalmente esta base de datos estaba estructurada de la forma en que cada fila corresponde a una mina u ocurrencia mineral y cada columna era un tipo de variable (minerales, tipo de roca, alteraciones, etc....). En cada casilla los datos se prestan como palabras separadas por comas (ej. “calcopirita, bornita”).

Tabla 42: Ejemplo de formato original la base de datos de la USGS. Comm=commodity y Dep_id= número de depósito

Dep_id	Comm	Mena	Ganga	Otros Minerales	Alteraciones
1	min1		min2, min4		Alt1, Alt2
2		min2	min5	min6, min7,	
3	min1, min3				Alt3
...					

Esta estructura no permite obtener estadísticas ni análisis de forma simple, ya que toda la información se encuentra como palabras y separada por comas dentro de una misma celda. Por lo que, luego de filtrar los casos según nuestro alcance, se debe transformar a un formato del tipo usado en las tablas del capítulo anterior, y en cada celda se asigna un 1 o 0 según la presencia o no presencia del parámetro. Con lo cual es posible hacer las siguientes estadísticas.

Tabla 43: Ejemplo de tabla luego del manejo de datos

Dep_id	min1	min2	min3	alt1	alt2
1	0	0	0	1	0
2	0	1	0	1	0
3	1	0	0	0	1
...

En la base datos existen muchos tipos de datos, pero solo unos cuantos se reportan de forma estandarizada, apta para realizar estadística. En la siguiente tabla se muestran los tipos de variables rescatadas y el número de datos distintos en cada categoría.

Tabla 44 Resumen del número de datos y variables trabajadas

Nº Datos originales	304.636
Nº Datos filtrados	102.957
Minerales	440
T. Rocas	135
Commodities	74
Alteraciones	27
Forma mineralización	41

A continuación, también se muestran los tipos de depósitos encontrados, el número de ocurrencias en la base de datos y al grupo de depósitos previamente definidos.

Tabla 45: Resumen de número de depósitos encontrados y grupo al que pertenecen

Grupo	Depósitos	Frecuencia en base de datos
1	Porphyry Cu	413
1	Porphyry Cu-Au	63
1	Porphyry Cu-Mo	91
1	Porphyry Mo	11
3	Skarn Cu	195
3	Skarn Fe	152
3	Skarn Au	26
3	Skarn Zn-Pb	46
3	Massive sulfide(VMS)	308
4	Polymetallic veins	1.498
4	Epithermal vein	720
3	Stratabound	13
3	Sediment-hosted Cu	230

Con el propósito de priorizar los distintos parámetros geológicos que definen nuestros grupos, se procede a identificar los parámetros con mayores frecuencias para cada uno de los tipos de yacimientos identificados (Tabla 45). Con esta información se establece una nueva ponderación, la cual se suma a la previamente establecida en la parametrización de información geológica.

A modo de ejemplo. en el siguiente gráfico (Figura 14) se muestran los 27 minerales (27 de 152 reportados) con mayores frecuencias.

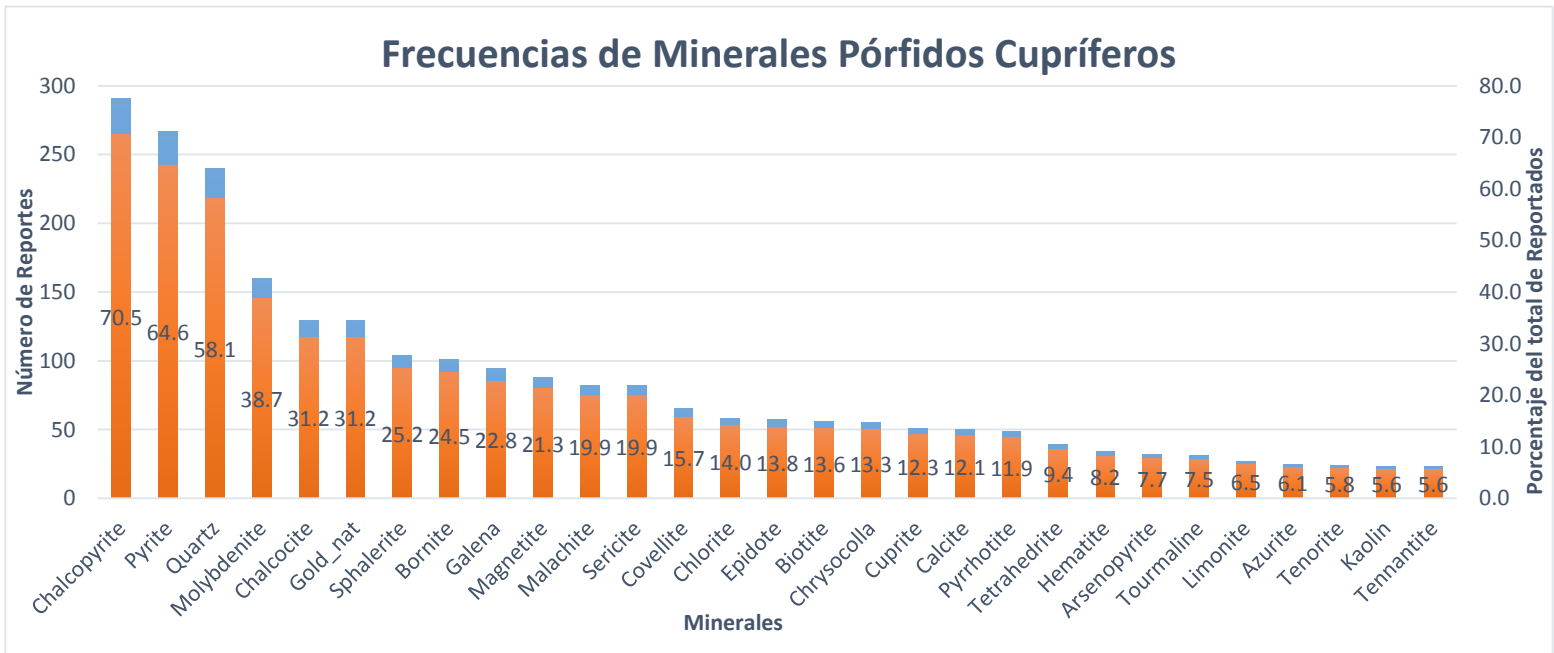


Figura 14 : frecuencia de minerales. Porcentaje(naranja) N° Reportes (azul)

El algoritmo definido se basa en los porcentajes de ocurrencia con respecto al número total de casos encontrados y se agregan valores de 0 a 30 (con pasos de 5) que están pensados de esta forma, para que estén en concordancia con la parametrización del modelo.

Tabla 46: Valores asignados según porcentaje de ocurrencia

Porcentaje (%)	Valor
80-100	30
60-80	20
50-60	15
30-50	10
10-30	5
0-10	0

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo resultaron estos aumentos de valor según los porcentajes de ocurrencia. Se utilizan los primeros 25 minerales para los depósitos de pórfidos cupríferos en orden alfabético. Es bueno notar que este aumento de valor se establece para facilitar la suma y estandarizar los valores, lo que implica que se le otorga igual peso a lo teórico y a lo empírico (ambos con rango de 0 a 30).

Tabla 47: Ejemplo de aumento de valor de ponderadores según frecuencia en datos

MINERALES	Parametrización original	Ponderación	Ponderadores por frecuencia	Ponderación Final
actinolita	3	30	0	30
albita	3	30	0	30
alunita	3	30	0	30
anhidrita	3	30	0	30
ankerita	3	30	0	30
atacamita	3	30	0	30
azurita	3	30	0	30
biotita	3	30	5	35
bornita	3	30	5	35
brochantita	3	30	0	30
calcita	3	30	5	35
calcopirita	3	30	30	60
calcosina	3	30	10	40
clorita	3	30	5	35
covelina	3	30	5	35
crisocola	3	30	5	35
cuarzo	3	30	20	50
diagenita	3	30	0	30
diásporo	3	30	0	30
dickita	3	30	0	30
epidota	3	30	5	35
esfalerita	3	30	10	40
especularita	3	30	0	30
feldespatoK	3	30	0	30
hematita	3	30	0	30

Luego de esta etapa las ponderaciones, o escala de valores, puede tomar valores entre 0 y 60. En el capítulo de anexos se adjuntan todas las tablas con las ponderaciones finales, para cada uno de los grupos y todas sus respectivas variables.

Como se menciona en el capítulo de antecedentes, se realizan también, arboles de regresión utilizando como variable objetivo o a predecir, la ocurrencia o no ocurrencia de los tipos de yacimiento para cada uno de los depósitos identificados (Tabla 45).

Adicionalmente, a pesar de que los árboles de regresión son una herramienta poderosa al momento de explicar una variable objetivo (ocurrencia o no ocurrencia de algún tipo de depósito) en función de otro conjunto de variables o muestra de aprendizaje (minerales o alteraciones hidrotermales en nuestro caso), no se utilizan directamente en el método de evaluación. La razón a esto, es que es un método que tiene buenos resultados cuando se tienen grandes cantidades de datos, cosa que no ocurre para todos los depósitos identificados y no siempre los resultados son fáciles de aplicar o interpretar.

De todas formas, se presentan los mejores resultados obtenidos en el capítulo de anexos B, para ilustrar su potencial utilidad en líneas similares de estudio. En la siguiente Figura se muestra la forma en que se despliega la información en los árboles de clasificación

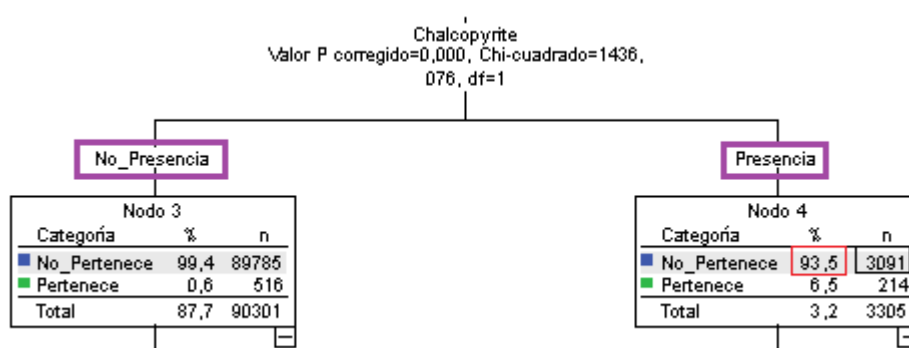


Figura 15 Representación de nodos en árbol de clasificación

En cada nodo se muestra se muestra el porcentaje (rectángulo rojo) y el número de datos de cada subclasificación. Se dividen según la presencia o no presencia del parámetro (rectángulos púrpuras), el que en este ejemplo es la calcopirita.

Capítulo 7. CARACTERIZACIÓN DE FACTORES NO GEOLÓGICOS

El éxito de cualquier proyecto minero no depende únicamente de que la información geológica recolectada sea favorable. Aspectos como las áreas disponibles para botaderos e instalaciones, facilidad de acceso, disponibilidad de insumos, entre otros, son cruciales y de gran impacto en la inversión requerida para llevar a cabo el proyecto. En esta memoria se consideran cuatro principales aspectos:

- **Condiciones geográficas:**
 - Lejanía o cercanía (con respecto al mar)
 - Altura (nivel del mar)
 - Clima

- **Infraestructura:**
 - Facilidad de acceso
 - Disponibilidad de insumos o recursos.
 - Disponibilidad de área para botaderos e instalaciones

- **Contexto social:**
 - Densidad poblacional
 - Sociabilización del proyecto

- **Legales:**
 - Estabilidad legislativa y/o Evaluación de impacto ambiental
 - Áreas protegidas

- **Económicos:**
 - Estabilidad económica del entorno
 - Precio del elemento de interés (commodity)

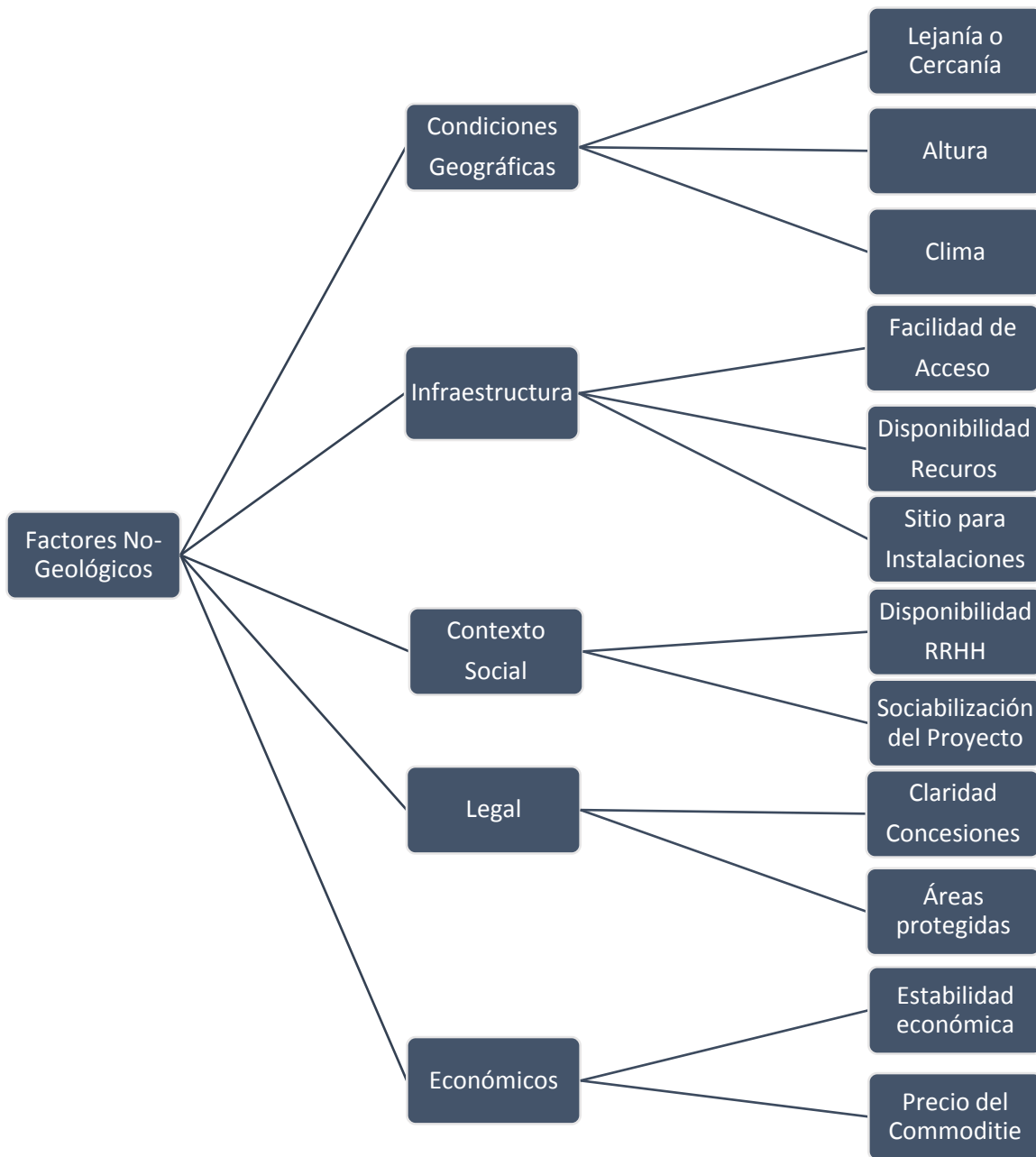


Figura 16: Árbol de clasificación de factores no geológicos

7.1 CONDICIONES GEOGRÁFICAS

Dentro de los aspectos geográficos relativos a la ubicación de algún prospecto minero se consideran principalmente, la lejanía o cercanía de nuestro prospecto, la altura y el clima.

- **Lejanía/Cercanía:** Que tan remoto se encuentre el prospecto (usando como referencia la costa), influye directamente en los gastos logísticos relativos a todos los movimientos de materiales de insumo o productos (concentrado o cátodos que deben llegar a puerto) y sin mencionar el aumento de inversión para habilitar el acceso. Es por esto, que entre más lejano se encuentre el prospecto estudiado más desfavorable será para el proyecto.
- **Altura sobre el nivel del mar:** Prospectos mineros o minas con elevadas alturas, lo que suele ocurrir en Chile, conlleva problemas logísticos como previamente se mencionó (dado que la zona es más inaccesible), además de condiciones que pudiesen afectar la salud ocupacional de los trabajadores (enfermedad aguda de altura) y en consecuencia su productividad. Se considera entonces que entre mayor sea la altura del prospecto más desfavorable será para el proyecto minero.
- **Clima:** Es importante notar el clima y temperaturas de la zona que se está estudiando. Condiciones climáticas adversas, es decir, ocurrencia excesiva de lluvias, nevazones o vientos, puede significar grandes pérdidas en tiempos operativos y además riesgos para los trabajadores y la maquinaria. En consecuencia, historiales de actividad climática extrema se consideran desfavorables para el proyecto minero.

7.2 INFRAESTRUCTURA

En infraestructura se consideran principalmente la facilidad de acceso, disponibilidad de sitio para botaderos y la disponibilidad de recursos como agua y energía eléctrica, esenciales para el desarrollo de cualquier proyecto minero.

- **Facilidad de acceso:** El desarrollo y diseño del camino principal para el acceso a un cuerpo mineralizado no es un aspecto trivial en un proyecto minero y muchas veces significa un porcentaje importante del capital para desarrollar un proyecto. El poco cuidado en su diseño puede conllevar a gastos no previstos y en retrasos en el inicio del proyecto, impactando directamente en los indicadores económicos del proyecto.

- **Disponibilidad de recursos hídricos:** La actividad minera requiere cantidades no menores de agua para sus operaciones ya sea en las áreas del agua mina, procesamiento de concentrados, lixiviación, obtención de cátodos SxEw y fundición. El año 2015 se consumieron 15,8 m³/s de agua (13,3 m³/s fresca y 2,5 m³/s de mar) y se proyecta para el 2026 21,5 m³/s (10,8 fresca y 10,7 de mar). Si el prospecto carece de cualquier mecanismo para abastecerse de agua puede significar la inversión en su propia planta desalinizadora (Cochilco. 2015).
- **Disponibilidad de recursos energéticos:** Al igual como sucede con el agua, las operaciones mineras son de uso muy intensivo en energía eléctrica. En el año 2015 el consumo de energía eléctrica por la minería del cobre fue de 22,2 TWh y su costo de 143 USD/MWh (2015) es comparativamente mucho mayor que el de nuestros países vecinos (Perú, 74 USD/MWh) y el promedio mundial 86 USD/MWh). En el caso de un nuevo proyecto minero, entre mayor sea la distancia a un punto de generación o distribución de energía eléctrica, mayor será la inversión que tendrá realizar en obras para abastecerse de ésta (Cochilco. 2015).
- **Disponibilidad de terrenos para instalaciones:** Debe existir disponibilidad de terrenos adecuados para la construcción de instalaciones, ya sean plantas de procesamiento, centros de operaciones, oficinas, etc. Adicionalmente, un buen terreno para botadero debe cumplir idealmente las siguientes características.
 - Poca distancia entre la mina y el sitio de las instalaciones.
 - Debe carecer de importancia económica en el presente y en un futuro para otros giros económicos en la zona.

7.3 CONTEXTO SOCIAL

Es sabido la gran importancia tienen hoy en día las comunidades o pueblos originarios cercanos a cualquier proyecto minero, debido a sus mayores expectativas y empoderamiento para exigir sus derechos. Un buen proyecto minero y de exploración, debe considerar con anticipación este aspecto si desea obtener y preservar una licencia social para operar. Se consideran los siguientes aspectos

- **Disponibilidad de Recursos Humanos:** La cantidad de población cercana a un prospecto minero se utiliza como indicador de la potencial fuerza laboral en la zona. Se considera que entre mayor densidad poblacional mayor será la posible cantidad de recursos humanos disponibles, por lo que a mayor densidad poblacional de la región más favorable será para el proyecto.
- **Sociabilización del proyecto:** Corresponde al trabajo con las comunidades requerido para cualquier proyecto de minería. Se utiliza como indicador el porcentaje de la fuerza laboral relacionada con la minería: A mayor porcentaje de participación en el trabajo se considera más favorable para el proyecto.

7.4 LEGALIDAD

Es esencial para cualquier proyecto y en particular los mineros que se cumpla con toda la normativa vigente que se opere dentro de este marco. Se consideran en este aspecto la claridad sobre las concesiones de explotación o exploración vigentes en la zona y que no se encuentre en zonas protegidas, con el propósito de asegurarse de que el terreno en donde se está explorando no tenga problemas en este aspecto.

7.5 ECONÓMICOS

En la minería y al igual que en cualquier otra actividad económica, el nivel de rentabilidad es uno de los principales aspectos que se debe tener en consideración al momento de decidir si llevar a cabo el proyecto. En la minería, la valorización de un nuevo proyecto y sus retornos esperados son en gran medida, dependientes del precio del elemento de interés. Dentro de los factores económicos se consideran.

- **Estabilidad económica de la zona:** Cuando se habla de estabilidad económica, básicamente se considera que los indicadores económicos relevantes al momento de evaluar un proyecto (tipo de cambio, impuestos, empleo, etc.), no fluctúen de manera abrupta en el tiempo. Esto es relevante para los proyectos mineros principalmente por dos características que se refieren a los altos montos de inversión involucrados y la gran cantidad de años que se requieren para materializar dichos montos (Cochilco, 2013).
- **Precios de los elementos de interés:** Como se mencionó anteriormente el precio de los commodities o elementos de interés es fundamental en la evaluación de cualquier proyecto minero, por lo que se debe considerar en etapas tempranas de exploración. Sin perjuicio de lo anterior, este aspecto no se parametrizará debido a que todos los prospectos estarán bajo un mismo marco de precios, por lo que no permite hacer una diferenciación entre estos y porque no se conoce a priori todos los commodities o metales que se encuentren en el potencial yacimiento, por lo que su evaluación en etapas tempranas sería sesgada.

Capítulo 8. PARAMETRIZACIÓN DE FACTORES NO GEOLÓGICOS

Con el fin de poder evaluar los factores no geológicos de forma cuantitativa para proyectos de exploración temprana, se realiza la parametrización de estos en usando datos demográficos de Chile e información geográfica de distintas minas del país.

Se utiliza una valorización distinta que la de factores geológicos ya que esta evaluación, se analiza por separado a la evaluación geológica principalmente porque un ponderar conjunto (geológico y no-geológico) ocultaría demasiada información en un solo número (o ponderación). La valorización utilizada corresponde a valores entre 0 y 100, en donde mayor es el número asignado por categoría, se considera más favorable para el desarrollo del futuro proyecto de prospección minera.

8.1 CONDICIONES GEOGRÁFICAS

8.1.1 Lejanía o Cercanía

Como indicador de cercanía o lejanía de un prospecto minero se utiliza la distancia desde el mar a la mina (medida perpendicular al norte). Se midió esta distancia para 12 minas, principalmente porque que abarcan los valores extremos y medios de Chile (usando herramientas del programa Google Earth) para definir un rango adecuado, mostrado en la Tabla 48.

Tabla 48: Distancia al mar de distintas minas en Chile

Mina	Distancia desde el mar (Km)
Gaby	184,3
Catedral	168,6
Collahuasi	151,5
La Escondida	150
EL Teniente	148,7
El Abra	140
Chuquicamata	137,2
El Indio	131,5
Los pelambres	103,4
Cerro Blanco	89,1
El Soldado	30,7
Cerro Blanco	27,3

Utilizando entonces, como guía la tabla anterior se establecen las siguientes ponderaciones según el rango de en qué se encuentre el prospecto a evaluar. Entre mayor el número, más favorable es para el prospecto (Tabla 49).

Tabla 49: Ponderación de lejanía/cercanía

Distancia desde el mar (Km)	
Rangos	Ponderación
<50	100
50-100	70
100-150	40
150-170	10
>170	0

8.1.2 Altura sobre el nivel de mar

De la misma forma que con la lejanía o cercanía del prospecto, se observa la altura con respecto al nivel del mar de 21 minas distintas que abarquen los valores extremos medios en Chile, para poder establecer un rango adecuado.

Tabla 50 Altura(msnm) de distintas en Chile

Mina	Altitud (msnm)
El Romeral	300
La Candelaria	5.50
El Soldado	1.000
Andacollo	1.100
El Salvador	2.600
Escondida	3.025
Andina	3.100
Zaldívar	3.200
Los Pelambres	3.200
Los Bronces (Disputada)	3.200
Mina Can Can	3.500
El Abra	3.900
Sociedad Chilena del Litio	3.900
SQM Salar	3.900
Carbonato de Litio SQM	3.900
El Indio	4.100
Quebrada Blanca	4.200
Salar Surire	4.250
Collahuasi	4.500
Maricunga	4.600
Nevada	4.800

Se establece, a partir de las alturas observadas en Chile, la ponderación por rangos de altura para prospectos mineros.

Tabla 51: Ponderación de altura

Altura(MSNM)	Ponderación
0-1000	100
1000-2000	70
2000-3000	40
3000-4000	10
>4000	0

8.1.3 Clima

Para la ponderación del factor climático se usa entonces el juicio experto para poder clasificar su magnitud.

Sin embargo, se propone para este análisis considerar variables como, la cantidad de lluvia y nieve caída en la zona (historial de milímetros por año), además de las temperaturas máximas y mínimas registradas.

Tabla 52: Ponderación actividad climática

Grado de actividad climática	Ponderación
Muy baja	100
Baja	70
Media	40
Alta	10
Muy Alta	0

8.2 INFRAESTRUCTURA

En el aspecto de infraestructura se incluyen la facilidad de acceso, espacio para instalaciones y la disponibilidad de recursos (agua y energía).

8.2.1 Facilidad de acceso y disponibilidad de terreno para instalaciones

Para la facilidad de acceso y la disponibilidad de espacio para las instalaciones, se propone considerar la irregularidad topográfica de la zona como indicador. Se debe utilizar el juicio experto para estimar su magnitud.

Tabla 53: Ponderación de irregularidad topográfica

Irregularidad Topográfica	
Grado	Ponderación
Muy baja	100
Baja	70
Media	40
Alta	10
Muy Alta	0

8.2.2 Disponibilidad de recursos energéticos y hídricos

Como indicador de disponibilidad de recursos energéticos se usa la distancia (relativa) a algún punto de distribución eléctrica. Para los recursos hídricos se usó que tipo de fuente de agua se encuentra en el sector del prospecto, en donde las fuentes con mayores costos asociados de operación y menos usadas tienen menos ponderación con respecto a las con menores costos y más usadas en Chile (Cochilco 2015)

Tabla 54: Ponderación disponibilidad de recursos energéticos

Distancia a punto de distribución eléctrica		
Grado	Distancia(Km)	Ponderación
Muy cercano	<5	100
Cercano	05-10	70
Medio	15-20	40
Lejano	20-25	10
Muy lejano	>25	0

Tabla 55 Ponderación disponibilidad de recursos hídricos.

Disponibilidad de aguas	
Grado	Ponderación
Presencia agua superficial y subterránea	100
Solo agua superficial	70
Solo agua subterránea	40
Solo fuentes de privados	10
Sin fuentes de agua	0

8.3 LEGALIDAD

El aspecto legal del prospecto mineral, ya sea por el lado de las concesiones o las zonas protegidas, se debe considerar como un discriminante inmediato del prospecto a evaluar. Si nuestro proyecto no cumple con ambas consideraciones, debe ser descartado de proseguir con exploración más avanzada o regularizado en el aspecto que no cumpla.

8.4 CONTEXTO SOCIAL

Como se mencionó anteriormente, se considera la disponibilidad de recursos humanos y la cantidad de sociabilización del futuro proyecto. Para esto se utilizaron datos de densidad poblacional (INE, 2010) por región y el porcentaje de participación en el empleo de la región en la Tabla 56 (Seminario Ministerio de Minería-Cochilco. 2013).

Tabla 56: Densidad poblacional y porcentaje de participación de la minería por región

Región	Densidad (Hab/Km ²)	Participación en Empleo (%)
Metropolitana	446,9	0,6
V-Valparaíso	107,3	3,4
VIII-Biobío	54,9	1,1
VI-O'Higgins	53,9	4,6
VII-Maule	33,3	0,5
IX-Araucanía	30,5	0,7
XIV-Ríos	20,6	0,2
IV-Coquimbo	17,7	10,2
X-Lagos	17,2	0,2
XV-Arica y Parinacota	11,0	5,3
I-Tarapacá	7,4	6,9
II-Antofagasta	4,6	22,2
III-Atacama	3,7	23,3
XI-Aisén	1,0	2,2
XII-Magallanes Antártica	0,1	2,5

8.4.1 Disponibilidad de recursos humanos

Se utiliza la densidad poblacional, como indicador indirecto de la disponibilidad de recursos humanos en la zona del prospecto minero. Entre mayor la densidad poblacional se considera más favorable para el proyecto (Tabla 57).

Tabla 57: Parametrización de disponibilidad de RRHH

Densidad (Hab/Km2)	Categoría	Ponderación
0-20	Muy baja	100
20-40	Baja	70
40-60	Media	40
60-100	Alta	10
>100	Muy Alta	0

8.4.2 Trabajo de sociabilización previo con comunidades

Se utiliza como indicador, el porcentaje de participación de la minería en el empleo de la región, para cuantificar este aspecto. Básicamente, la lógica es que entre más cantidad de gente trabaje en minería en la región, menos ajeno a su estilo de vida será la actividad minera y, en consecuencia, se deben realizar menores esfuerzos para comunicar las características del proyecto a las comunidades involucradas (Tabla 58).

Tabla 58: Parametrización de cantidad de trabajo previo con comunidades

Participación en Empleo (%)	Ponderación
0-4%	0
4%-8%	10
8%-12%	40
12%-16%	70
>16%	100

8.5 ECONÓMICOS

8.5.1 Estabilidad económica de la zona

Para parametrizar la estabilidad económica del prospecto se decide utilizar las clasificaciones de riesgo crediticio de la institución *Standard and Poor's*, ya que esta clasificación indica de forma que tan inestable económicamente el lugar en donde se evalúa nuestro prospecto. Naturalmente este factor tiene uso si es que se comparan prospectos mineros en distintos países con distintas clasificaciones.

Tabla 59 Clasificaciones de riesgo de Standard and Poor's

Clasificación	Definición (simplificada)
AAA	Capacidad extremadamente fuerte para cumplir los compromisos financieros
AA	Capacidad muy fuerte para cumplir compromisos financieros
A	Capacidad fuerte para cumplir compromisos financieros, pero algo susceptible a condiciones económicas adversas
BBB	Capacidad adecuada para cumplir compromisos financieros, pero más sujeto a condiciones económicas adversas
BB	Menos vulnerable en el corto plazo, pero se enfrenta a constantes incertidumbres para condiciones de negocios, financieras y económicas adversas
B	Más vulnerable para condiciones de negocios, financieras y económicas adversas, pero actualmente con la capacidad de cumplir sus obligaciones financieras
CCC	Actualmente vulnerable y dependiente de condiciones de negocios, financieras y económicas favorables para cumplir con sus obligaciones financieras
CC	Altamente vulnerable; el cese de pago aún no ocurre, pero es virtualmente seguro
C	Actualmente altamente vulnerable al no pago, y su recuperación se espera que el de las obligaciones con calificaciones más elevadas
D	Cese de pago o incumplimiento de compromiso

Se establece entonces la ponderación en la siguiente Tabla.

Tabla 60 Parametrización de estabilidad económica

Clasificación crediticia	Ponderación
AAA-AA	100
A-BBB	70
BB-B	40
CCC-CC	10
C-D	0

Finalmente se obtiene un sistema de evaluación de los factores no geológicos, en donde se pueden obtener valores de 0 a 900. En donde el 0 corresponde a condiciones de proyecto extremadamente adversas, asociado a grandes inversiones y 900 corresponde a condiciones muy favorables, asociadas a bajos requerimientos de inversión.

Capítulo 9. EJEMPLO DE APLICACIÓN, EVALUACIÓN GEOLÓGICA

Como ejemplo primer de aplicación, se presentan tres casos (ficticios) con información de ocurrencia de 7 minerales, 3 tipos de roca y 2 alteraciones hidrotermales cada uno. La información de cada uno de los casos se genera aleatoriamente del listado de todos los casos estudiados (131 minerales, 45 tipos de roca y 23 alteraciones).

1. **Identificación de la información geológica:** Como primer paso, se resumen las principales características de los prospectos a estudiar.

Tabla 61: Resumen características de prospectos a evaluar

Prospecto A			Prospecto B			Prospecto C		
Minerales	T. Roca	Alteraciones	Minerales	T. Roca	Alteraciones	Minerales	T. Roca	Alteraciones
oligoclasa	chert	propilítica	brochantita	ankerita	Arsénica anómala	pirrotina	monzonita	Argílica avanzada
cubanita	limolita	sódica	LREE	andesita	sericítica	oro	ignimbrita	cálcica
anfíbol	arenisca		feldespatoK	riodacita		periclasa	brecha	
digenita			freibergita			hornblenda		
fluorapatito			acantita			turmalina		
baritina			carlinita			dolomita		
calcopirita			baritina			tenorita		

2. **Parametrización de la información según grupos definidos:** Luego se le asignan a cada parámetro las ponderaciones definidas (tablas 58 a 76), para cada uno de los grupos de yacimientos.

Tabla 62: Ponderación de parámetros para prospecto A

Prospecto A				
Parámetro	Pórfidos	SME	IOCG/IOA	Epitermales
oligoclasa	30	0	0	0
cubanita	0	0	20	0
anfíbol	0	3.3	0	0
digenita	30	4.4	0	6.7
fluorapatito	0	3.3	0	0
baritina	0	7.8	0	20
calcopirita	60	48.9	26.7	30
chert	0	6.7	0	0
limolita	0	8.3	0	10
arenisca	0	21.7	0	0
propilítica	35	6.7	20	20
sódica	0	0	30	0
TOTAL	155	111.1	96.7	86.7

Tabla 63 Ponderación de parámetros para prospecto B

Prospecto B				
Parámetro	Pórfidos	SME	IOCG/IOA	Epitermales
brochantita	30	5.6	30	0
LREE	0	0	20	0
feldespatoK	30	11.7	20	0
freibergita	0	2.2	0	0
acantita	0	4.4	0	0
carlinita	0	0	0	10
baritina	0	7.8	0	20
ankerita	0	3.3	0	0
andesita	35	10	30	30
riodacita	0	0	0	20
arsénica-anómala	0	0	0	10
sericítica	10	10	10	20
TOTAL	105	55	110	110

Tabla 64 Ponderación de parámetros para prospecto C

Prospecto C				
Parámetro	Pórfidos	SME	IOCG/IOA	Epitermales
pirrotina	5	27.8	20	13.3
oro	40	23.3	20	46.7
periclasa	0	3.3	0	0
hornblenda	30	5	30	0
turmalina	35	10	20	10
dolomita	0	6.7	0	10
tenorita	30	0	0	0
monzonita	35	18.3	0	0
ignimbrita	0	0	0	10
brecha	0	11.7	20	0
argílica avanzada	30	0	10	20
cálcica	0	0	20	0
TOTAL	205	106.1	140	110

De las tablas anteriores y considerando solo la información geológica, se observa que la mayor ponderación (205) la tiene el Prospecto C para el grupo de los pórfidos cupríferos. Por lo que el Prospecto C sería el prospecto más atractivo en relación con los otros (prospectos A y B), dado que posee mayor certeza, en particular, para el grupo de Pórfidos.

Sin embargo, para una mejor decisión se deben evaluar, paralelamente, los aspectos no geológicos asociados a cada prospecto. Como, por ejemplo, depósitos minerales con mayores tonelajes asociados (Tabla 45), tienden a “soportar” peores condiciones no geológicas, ya que los ingresos futuros justificarían las mayores inversiones requeridas por causa de las dificultades del proyecto.

Como ejemplo adicional se usan los datos de 2 minas con producción pasada de Chile.

Tabla 65: Ubicación y nombre de depósitos pasados de Chile.

Nombre	Latitud (WGS84)	Longitud (WGS84)
Dos Hermanas	-1828765	-6972122
Lucita	-1842764	-6975622

Tabla 66 Características reportadas y ponderaciones para cada uno de los grupos.

Dos Hermanas					Lucita				
Parámetro	Pórfidos	SME	IOCG/IOA	Epitermales	Parámetro	Pórfidos	SME	IOCG/IOA	Epitermales
Bornita	35	25	0	0	Calcocina	40	26.7	0	0
Calcopirita	60	48.9	26.7	30	Crisicola	35	18.3	30	0
Molibdenita	40	25	20	6.7	Malaquita	35	25	23.3	0
Pirita	50	42.8	26.7	45	Cuarzo	50	46.7	30	45
Turquesa	0	0	0	0	Limonita	0	8.3	0	10
Diorita	35	30	10	25	Diorita	35	30	10	25
Fílica	30	16.7	20	0	Fílica	30	16.7	20	0
Argílica	5	5	0	35	Argílica	5	5	0	35
Propilítica	35	6.7	20	20					
Sílica	35	11.7	0	15					
TOTAL	325	211.8	123.4	176.7	TOTAL	230	176.7	113.3	115

Como se puede ver de la tabla anterior la información reportada para el depósito “Dos Hermanas” presenta la mayor ponderación para el grupo de Pórfidos, por lo que sería el más “atractivo” a desarrollar si es que se tratara de información de prospectos mineros, puesto que el depósito “Dos Hermanas” disponía de mayor cantidad de información geológica.

Capítulo 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Actualmente en la mayoría de las empresas junior de exploración minera, las decisiones tomadas por sus directores ejecutivos se basan enteramente en la confianza hacia los estudios y criterios del o los geólogos senior de la compañía. Adicionalmente, para estas decisiones, por lo general, no se consideran factores no geológicos, los que tienen gran impacto al momento de estimar las inversiones de capital, necesarias para llevar a cabo el proyecto como tal.

En esta memoria se desarrolló una metodología, para priorizar prospectos mineros en etapas tempranas de exploración incorporando información geológica como no geológica. En primer lugar, se recopila información desde la literatura geológica, de los principales tipos de depósitos de cobre, hierro, plata y oro con ocurrencia en Chile. Esta información se categoriza según minerales, tipos de rocas asociados, alteraciones hidrotermales, tonelajes típicos, geografía/faja metalogénica, formas y estilos.

Posteriormente, en base a la literatura, se asignan valores (o ponderaciones) según qué tan correlacionado esté al tipo de yacimiento. Una vez asignados los valores, se realiza un estudio de análisis jerárquico, con el propósito de generar grupos de yacimientos con características similares. De este estudio jerárquico, se conforman los grupos de Pórfidos, SME (Sulfuros Metamórficos y Estratoligados), IOCG-IOA y Epitermales. Con los grupos ya definidos, se promedian los valores asignados a los parámetros de los yacimientos que los conforman y se les agrega una nueva valorización a los parámetros utilizando la información empírica de depósitos y ocurrencias minerales reales.

De forma paralela al análisis geológico, se desarrolla un sistema para evaluar que tan favorables o desfavorables son las condiciones para desarrollar un proyecto minero en el prospecto, siendo evaluado en función de los aspectos relativos a la ubicación geográfica, infraestructura, contexto social, legalidad y económicos.

En relación a la etapa de caracterización de los modelos geológicos, se concluye que, a pesar de que la cantidad de literatura existente, relativa a los modelos geológicos es muy amplia, se logra identificar, con profundidad suficiente, las características que definen cada uno de los modelos geológicos a estudiar.

Con respecto a la parametrización de los aspectos geológicos, se logra establecer una base numérica que permite estandarizar la información geológica. Esta parametrización, si bien, corresponde solo una aproximación del modelo geológico ya que no incorpora la totalidad de sus características (por ejemplo, la presencia de fallas o estructuras que controlen la mineralización), permite abarcar características con el detalle suficiente, teniendo en consideración que está orientado a etapas con información geológica limitada.

En la etapa de segmentación de los modelos geológicos, se logra con éxito establecer cuatro grupos, utilizando el método de clusters jerárquicos, los cuales cumplen aceptablemente los criterios planteados y poseen un nivel de “disimilaridad” levemente superior al 25% (con respecto a la disimilaridad máxima posible).

Con respecto a la etapa de enriquecimiento empírico de los grupos, se consigue extraer estadísticas desde la base de datos con yacimientos reales y establecer un algoritmo que permiten priorizar parámetros geológicos. Sin embargo, se debe notar que los resultados de esta etapa se vieron limitados por la calidad de la información en la base de datos ya que muchos de los casos de yacimientos se encontraban sin información en uno o más de los campos (mineralogía, alteraciones, tipo de yacimiento, etc.). Adicionalmente al enriquecimiento empírico, se realiza un estudio utilizando árboles de clasificación, pero no se logran obtener resultados lo suficientemente consistentes e interpretables como para incorporarlo a la metodología para ordenar interés.

En relación a la etapa de identificación y parametrización no geológica, se considera que se pudo generar un mecanismo para evaluar los principales aspectos que impactan en el instante de materializar el proyecto minero, pero se debe notar que esta evaluación se debe realizar de forma paralela a la realizada con información geológica, por lo que debe utilizar el criterio experto para poder conjugar ambas herramientas de forma simultánea y conseguir así un ordenamiento de prospectos considerando ambos aspectos.

Finalmente, considerando la problemática actual de bajas tasas de éxito en la exploración temprana, se considera que la metodología desarrollada en esta memoria permite evaluar de forma estandarizada los aspectos geológicos y no geológicos relativos a prospectos mineros en etapas temprana, logrando así una utilización fundamentada y auditable de los capitales destinados a la exploración avanzada.

Adicionalmente se sientan las bases para poder desarrollar un sistema de evaluación general, incorporando mayor cantidad de modelos geológicos, más calidad y cantidad de información empírica de yacimientos y una evaluación más acabada de los parámetros no geológicos que afectan al proyecto.

10.1 RECOMENDACIONES

El método no considera la abundancia o concentración en que se encuentren los parámetros geológicos (minerales, tipos de roca, etc.), lo que es relevante al momento de estimar la extensión del prospecto. Por lo que se aconseja usar criterio al momento decidir si parámetro tiene una presencia significativa como para considerarse en análisis.

Al momento de enriquecer la información parametrizada, no se encontró ningún tipo de yacimiento clasificado como IOCG o IOA en la base de datos de la USGS, por lo que se generó que las ponderaciones asociadas a este grupo no aumentasen, como sucedió con los otros grupos.

Cuando se realiza el ejemplo de aplicación con información generada al azar, se considera implícitamente que los parámetros (minerales, tipos de roca, etc.), se comportan de forma independiente, lo que no es cierto considerando que los procesos geológicos son complejos e interrelacionados.

Para que el sistema de priorización funcione de manera adecuada, se deben idealmente comparar prospectos con cantidades similares de información geológica. Esto es porque, al ser un sistema principalmente aditivo, entre más información geológica, mayor será la ponderación del prospecto, lo que implicaría que solo se priorizaría por la cantidad de parámetros.

En general, los ponderadores asociados al grupo de Pórfidos son mayores que los de los demás grupos. Esto se debe principalmente a que el grupo de Pórfidos contiene un solo elemento, por lo que sus ponderaciones no se encuentran promediadas entre un mayor número de depósitos.

En los aspectos no geológicos, no se considera la disponibilidad de espacio apto para la disposición de botaderos. Principalmente porque no fue posible de traducir a un índice, que pudiera ser observado con facilidad en etapas tempranas de exploración.

Se propone como investigación futura, cuantificar o evaluar el impacto económico de cada uno de los distintos factores no geológicos en la inversión inicial de un proyecto minero, ya que en esta memoria se asume igual peso (valor de 0 a 100) para cada uno de estos factores, lo que puede no ser cierto al momento de llevar a cabo el proyecto.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Aldenderfer, M.S. y Blashfield, R.K.** (1989). *Cluster Analysis. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences*. Sage University Paper.
- [2] **Anderberg, M.R.** (1973). *Cluster Analysis for applications*. Academic Press.
- [3] **Camus, F** (1990). *Stratabound Ore Deposits in the Andes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [4] **Cochilco** (2013). *Chile: País atractivo para las inversiones mineras*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- [5] **Cochilco** (2015). *Proyección del consumo de electricidad en la minería del cobre 2015-2026*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- [6] **Cochilco**. (2013). *Efecto Macroeconómico y el Aporte al desarrollo Nacional*. Seminario Ministerio de Minería. 17 diciembre 2013. Hotel W.
- [7] **Cochilco**. (2015). *Consumo de agua en la minería del cobre al 2015*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- [8] **Collao, S. & Alfaro, G.** (2000). *Paleozoic massive sulphide orebodies of the Nahuelbuta and Queule mountains, south-central Chile: Results of geothermobarometry and sulphur isotope studies*.ed., Sherlock, R.L. and Logan, M.A. Volcanogenic massive sulphide deposits of Latin America. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication N° 2, p. 629-641.
- [9] **Cox, D. P. Y D. P. Singer**, (1986). eds.: Mineral deposits models, USGS Bulletin 1693.
- [10] **Donald A. Singer; Ryoichi Kouda** (1996). *Classification of Mineral Deposits into Types Using Mineralogy with a Probabilistic Neural Network*. Nonrenewable Resources, Vol. 6, No 1, 1997.
- [11] **Eckstrand, O. R., W. D. Sinclair y R. I. Thorpe**, (1996). eds.: "Geology of Canadian Mineral Deposit Types", Geological Survey of Canada, 8:1-7.
- [12] **Einaudi, M.T.**, (1982). *Descriptions of skarn associated with porphyry copper plutons, southwestern North America*, in Titley, S.R., ed., *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*: Tucson, University of Arizona Press, p. 139–184.

- [13] **Fritis, Nicolás et al.** Diapositivas “*Modelos de Segmentación*” del curso Ingeniería de Marketing. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial.
- [14] **Galley, A.G, Hannington, M.D. and Jonasson, I.R.** (2007). *Volcanogenic massive sulphide deposits*. ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 141-161.
- [15] **Henley, R. W. Y B. R. Berger:** (1993). “*What is an exploration model anyway? An analysis of the cognitive development and use of models in mineral exploration*”, en: R.V. Kirkham, W. D. Sinclair, R. I. Thorpe Y J. M. Duke: Mineral Deposit Modelling, GAC, Special Paper 40: 41-45.
- [16] **INE** (2010). *Estadísticas Demográficas*. Compendio estadístico
- [17] **Kreuzer, O.P., Etheridge, M.A., Guj, P., McMahon, M.E. & Holden, D.J.** (2008) *Linking mineral deposit models to quantitative risk analysis and decision-making in exploration*. Economic Geol. 103, 829–850.
- [18] **Loh, Wei-Yin** (2011). *Clasificación and regresión tres*. 2011 John Wiley & Sons, Inc. WIREs Data Mining Knowl Discov 2011 1 14-23 DOI: 10.1002/widm.8.
- [19] **M. Allais.** (1957) *Method of Appraising Economic Prospects of Mining Exploration over Large Territories: Algerian Sahara Case Study*. Management Science 3(4):285-347.
- [20] **Maksaev, V. and Zentilli, M.** (2002). *Chilean strata-bound Cu- (Ag) deposits: An Overview*. In - Porter, T.M. (Editor), 2002 - Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, volume 2; PGC Publishing, Adelaide, Australia, pp. 185-205.
- [21] **Maskaev, Victor.** (2004). Apuntes curso Metalogénesis. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.
- [22] **Meinert, Lawrence D.** (2005). *World Skarn. Deposits*. Economic Geology 100th Anniversary Volume pp. 299-336.
- [23] **Patricio Leddy.** (2010). *Análisis de Riesgo de Inversión de un Proyecto de Exploración de Vetas Angostas de Oro*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería en Minas.
- [24] **Patrick J. Williams** (2005). *Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin*. Economic Geology 100th Anniversary Volume pp. 371-405.

- [25] **Pohl, Walter L.** (2011). *Economic Geology Principles and Practice_ Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons - Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits.* Wiley-Blackwell.
- [26] **Potma, W., Roberts, P.A., Schaub, P.M., et al.** (2008) *Predictive targeting in Australian orogenic-gold systems at the deposit to district scale using numerical modelling.* Australian J. Earth Sci. 55, 101–122.
- [27] **Robb, L.J.** (2005). *Introduction To Ore-Forming Processes*, 373 pp. Blackwell.
- [28] **Rodolfo Lagos** (2014). *Exploración Minera del Proyecto Chimberos Este.* Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería en Minas.
- [29] **Rokach, Lior. Maimon, O.** (2008). *Data mining with decisión tres: theory and applications.* World Scientific Pub Co Inc.
- [30] **Sillitoe, R.H.** (1993). *Epithermal Models: Genetic Types, Geometrical Controls and Shallow Features;* in *Mineral Deposit Modeling*, Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., Editors, Geological Society of Canada, Special Paper 40, pp. 403-417.
- [31] **Sillitoe, R.H.** (2003). *IOCG deposits: An Andean view: Mineralium Deposita.* Australian Journal of Earth Sciences. v. 38, p. 787–812.
- [32] **Sillitoe, Richard H** (2009). *Porphyry Copper Systems.* *Economic Geology*, v. 105, pp. 3-41.
- [33] **Timofeev Roman** (2004). *Clasificación and Regression Trees (CART) Theory and Applications.* Center of Applied Statistics and Economics (CASE), Humboldt University, Berlin.
- [34] **Townley, Brian** (2006). *Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos.* Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.
- [35] **Townley, Brian** (2015). *Diapositivas del curso Metalogénesis.* Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.
- [36] **Williams, Patrick J.** (2005). *Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin.* *Economic Geology 100th Anniversary Volume* pp. 371-405.

ANEXOS A: VALORES FINALES ASIGNADOS POR GRUPO Y TIPOS DE VARIABLES

11.1 GRUPO 1: PÓRFIDOS

Tabla 67: Ponderación de minerales para el grupo Pórfidos.

MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación
calcopirita	60	ankerita	30
cuarzo	50	atacamita	30
pirita	50	azurita	30
calcosina	40	brochantita	30
esfalerita	40	diagenita	30
oro	40	diásporo	30
molibdenita	40	dickita	30
biotita	35	especularita	30
bornita	35	feldespatoK	30
calcita	35	hematita	30
clorita	35	hornblenda	30
covelina	35	illita	30
crisocola	35	martita	30
epidota	35	montmorillonita	30
kaolinita	35	oligoclasa	30
magnetita	35	pirofilita	30
malaquita	35	tenorita	30
sericita	35	galena	25
turmalina	35	sheelita	20
actinolita	30	arsenopirita	5
albita	30	cuprita	5
alunita	30	pirrotina	5
anhidrita	30	tetraedrita	5

Tabla 68 Ponderación de tipos de roca para grupo Pórfidos.

T. ROCAS	Ponderación	T. ROCAS	Ponderación
andesita	35	carbonatos	30
Cuarzo-monzonita	35	latitas	30
diorita	35	monzo_granito	30
granito	35	riolitas	30
monzonita	35	sienita	30
adamelitas	30	caliza	5
arcilla	30		

Tabla 69: Ponderación alteraciones hidrotermales para grupo Pórfidos.

ALTERACIONES	Ponderación
potásica	35
propilítica	35
silícica	35
argílica_avanzada	30
fílica	30
sericítica	10
argílica	5
cloritización	5

Tabla 70: Ponderación de geografía/faja, forma y estilo de mineralización para grupo Pórfidos.

F. MINERALIZACIÓN	Ponderación	E. MINERALIZACIÓN	Ponderación	GEOGRAFÍA/FAJA	Ponderación
concentrica	30	stockwork	30	Cretásico	30
elongada	30	diseminado	30	C.Andes	30
		vetas-stockwork	30	F.maricunga	30
		fracuras	30		

11.2 GRUPO 2: SME

Tabla 71: Ponderación de minerales para grupo SME (1/2).

MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación
magnetita	51.1	malaquita	25.0	espinela	13.3	baritina	7.8
calcopirita	48.9	molibdenita	25.0	covelina	12.8	tennantita	7.8
cuarzo	46.7	oro	23.3	yeso	12.8	andradita	6.7
pirita	42.8	sericita	21.7	diópsido	11.7	ankerita	6.7
esfalerita	38.3	biotita	20.0	feldespatoK	11.7	apatito	6.7
galena	35.6	hematita	20.0	anhidrita	11.1	atacamita	6.7
calcita	31.1	actinolita	18.3	talco	11.1	ceolita	6.7
clorita	29.4	crisocola	18.3	montmorillonita	10.0	dolomita	6.7
pirrotina	27.8	kaolinita	15.0	siderita	10.0	ilvaita	6.7
calcosina	26.7	arsenopirita	13.9	smectita	10.0	marcasita	6.7
epidota	26.7	tetraedrita	13.9	turmalina	10.0	plata	6.7
bornita	25.0	albita	13.3	cuprita	9.4	tremolita	6.7

Tabla 72: Ponderación de minerales para grupo SME (2/2).

MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación
wollastonita	6.7	germantita	4.4	espesartina	3.3	vesuvianita	3.3
brochantita	5.6	isocubanita	4.4	ferrosalita	3.3	bismutinita	2.2
casiterita	5.6	wurtzita	4.4	fluorapatito	3.3	celadonita	2.2
cobaltita	5.6	almandino	3.3	forsterita	3.3	enargita	2.2
hornblenda	5.0	anatasa	3.3	grandita	3.3	freibergita	2.2
muscovita	5.0	anfíbol	3.3	hedenbergita	3.3	melnickovita	2.2
acantita	4.4	bustamita	3.3	johansenita	3.3	millerita	2.2
antlerita	4.4	calcedonia	3.3	niquelina	3.3		
argentita	4.4	cloantita	3.3	periclasa	3.3		
cobre	4.4	escapolita	3.3	rodonita	3.3		
digenita	4.4	esfeno	3.3	serpentina	3.3		
electrum	4.4	especularita	3.3	uranita	3.3		

Tabla 73 Ponderación de tipos de roca para grupo SME.

T. ROCAS	Ponderación	T. ROCAS	Ponderación
diorita	30.0	limolita	8.3
gneiss	30.0	monzo_granito	8.3
granito	30.0	basalto	6.7
granodioritas	25.0	carbonatos	6.7
caliza	23.3	chert	6.7
esquisto	23.3	lavas	6.7
arenisca	21.7	metapelítica	6.7
cuarzo_monzonita	21.7	sienita	6.7
monzonita	18.3	toba	6.7
gabro	15.0	anfíbolita	5.0
riolitas	15.0	ankerita	3.3
dacita	13.3	barita	3.3
brecha	11.7	brecha_piroclástica	3.3
andesita	10.0	carbonatita	3.3
diabasas	10.0	jasperoide	3.3
granate	10.0	lutita	3.3
piroxeno	10.0	sienogranito	3.3
tonalitas	10.0	turbidita	3.3
dolomitas	8.3		

Tabla 74 Ponderación alteraciones hidrotermales para grupo SME.

ALTERACIONES	Ponderación
cloritización	21.7
fílica	16.7
kaolinita	15.0
albitización	13.3
silícica	11.7
actinolización	10.0
calco-silicatada	10.0
sericítica	10.0
silificación	10.0
propilítica	6.7
argílica	5.0
potásica	5.0
alteración-Fe-Mn	3.3
sericita-clorita-arcilla	3.3
turmalinización	3.3

Tabla 75: Ponderación forma de mineralización para grupo SME.

F. MINERALIZACIÓN	Ponderación
lenticular	17.1
tabular	17.1
vetiforme	12.9
cilíndrico	8.6
estratiforme	8.6
vaina	8.6
chimenea_brecha	4.3
concentrica	4.3
platiforme	4.3

Tabla 76: Ponderación estilo de mineralización, geoquímica y geografía/faja para grupo SME.

E. MINERALIZACIÓN	Ponderación	GEOQUÍMICA	Ponderación	GEOGRAFÍA/FAJA	Ponderación
diseminado	7.2	Pb	30.0	C.costa	20.0
estratiforme	5.4	Zn	26.7	Cretásico	13.3
vetas	3.6	Ag	23.3	jurásica	10.0
vetillas	3.6	Cu	20.0	C.patagónica	3.3
chimeneas_brecha	3.6	Au	13.3		
stockwork	1.8	Co	13.3		
laminaciones	1.8	Mo	13.3		
		Sn	13.3		
		W	13.3		

11.3 GRUPO 3: IOCG-IOA

Tabla 77: Ponderación minerales para grupo IOCG-IOA.

MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación
actinolita	30.0	cubanita	20.0
albita	30.0	esfalerita	20.0
antlerita	30.0	feldespatoK	20.0
atacamita	30.0	galena	20.0
biotita	30.0	LREE	20.0
brochantita	30.0	marcasita	20.0
clorita	30.0	molibdenita	20.0
crisocola	30.0	neotocita	20.0
cuarzo	30.0	oro	20.0
epidota	30.0	pirrotina	20.0
escapolita	30.0	siderita	20.0
hedenbergita	30.0	turmalina	20.0
hornblenda	30.0	hematita	16.7
magnetita	30.0	alunita	10.0
sericita	30.0	azufre	10.0
calcopirita	26.7	electrum	10.0
pirita	26.7	enargita	10.0
apatito	23.3	esfeno	10.0
cuprita	23.3	talco	10.0
malaquita	23.3	yeso	10.0
anhidrita	20.0	especularita	6.7
arsenopirita	20.0	granate	6.7
calcita	20.0	titanita	6.7

Tabla 78: Ponderación tipo de rocas para grupo IOCG-IOA.

T. ROCAS	Ponderación
andesita	30
dacita	30
toba	30
brecha	20
carbonatos	20
foliadas_biotizadas	20
granito	20
anfibolita	10
arcilla	10
brecha_piroclástica	10
diorita	10

Tabla 79 Ponderación alteraciones hidrotermales para grupo IOCG-IOA.

ALTERACIONES	Ponderación
albitización	30
potásica	30
sódica	30
cálcica	20
carbonatización	20
cloritización	20
fílica	20
propilítica	20
sericita-clorita-arcilla	20
actinolización	10
argílica_avanzada	10
sericítica	10
silificación	10
turmalinización	10

Tabla 80: Ponderación de geoquímica para grupo IOCG-IOA.

GEOQUIMICA	Ponderación
Ag	30.0
As	30.0
Au	30.0
Ba	30.0
Co	30.0
Fe	30.0
LREE(G)	30.0
Mo	30.0
Ni	30.0
P	30.0
U	30.0
Cu	26.7
F	20.0
S	10.0
Ti	10.0

Tabla 81: Ponderación geografía/faja, forma y estilo de mineralización para grupo IOCG-IOA.

F. MINERALIZACIÓN	Ponderación	E. MINERALIZACIÓN	Ponderación	GEOGRAFÍA/FAJA	Ponderación
lenticular	30	stockwork	20	jurásica	30
mantiforme	30	diseminado	20	Cretácico	30
vetiforme	30	brecha	20	C.costa	30
tabular	20	chimeneas_brecha	10		
bolsonada_irregular	10	vetas_stockwork	10		
chimenea_brecha	10	vetillas	10		
concentrica	10	masivo	10		
skarn	10	chimeneas_brecha	10		

11.4 GRUPO 4: EPITERMALES

Tabla 82 Parametrización minerales para grupo Epitermales.

MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación	MINERALES	Ponderación
oro	46.7	dickita	20.0	tennantita	13.3
cuarzo	45.0	electrum	20.0	tetraedrita	13.3
pirita	45.0	epidota	20.0	andalusita	10.0
calcita	35.0	montmorillonita	20.0	ankerita	10.0
calcopirita	30.0	azufre	16.7	carlinita	10.0
esfalerita	30.0	dumortierita	16.7	corindón	10.0
galena	30.0	jarosita	16.7	dolomita	10.0
illita	30.0	topacio	16.7	enargita	10.0
kaolinita	30.0	zunyita	16.7	luzonita	10.0
smectita	30.0	adularia	13.3	muscovita	10.0
argentita	25.0	clorita	13.3	pirofilita	10.0
arsenopirita	23.3	covelina	13.3	rejalgar	10.0
cinabrio	23.3	fluorita	13.3	turmalina	10.0
estibina	23.3	goldfieldita	13.3	diagenita	6.7
marcasita	23.3	hematita	13.3	diásporo	6.7
oropimente	23.3	lollingita	13.3	digenita	6.7
albita	20.0	pirargirita	13.3	molibdenita	6.7
alunita	20.0	pirrotina	13.3		
amatista	20.0	selionuros(Ag)	13.3		
baritina	20.0	sericita	13.3		
calcedonia	20.0	sulfosales(Ag)	13.3		

Tabla 83 Ponderación tipos de rocas y alteraciones hidrotermales para grupo Epitermales.

T. ROCAS	Ponderación	ALTERACIONES	Ponderación
andesita	30	argílica	35
diorita	25	argílica_avanzada	20
carbonatos	20	potásica	20
dacita	20	propíltica	20
dolomitas	20	sericítica	20
granodioritas	20	silificación	20
riodacita	20	silícica	15
riolitas	20	arsénica-anómala	10
caliza	10	descalcificación	10
ignimbrita	10	dolomitización	10
limolita	10	kaolinita	10
lutita	10	piritización	10

Tabla 84: Ponderación geografía/faja, forma y estilo de mineralización para grupo Epitermales.

F. MINERALIZACIÓN	Ponderación	E. MINERALIZACIÓN	Ponderación	GEOGRAFÍA/FAJA	Ponderación
"zanahoria"	10	vetas	20	F.El Indio	30
de_"T"	10	stockwork	10	C.Andes	20
estratiforme	10	diseminado	10	F.maricunga	20
irregular	10	brecha	10	El Teniente	20
tabular	10	inclusiones	10	F.Atacama	10
		encapsulado	10		

Tabla 85: Ponderación geoquímica para grupo Epitermales.

GEOQUÍMICA	Ponderación	GEOQUÍMICA	Ponderación
As	30.0	Cu	13.3
Au	30.0	F	13.3
Ag	23.3	Mn	13.3
Hg	23.3	Mo	13.3
Sb	23.3	Pb	13.3
Te	23.3	Se	13.3
W	23.3	Zn	13.3
Sn	20.0	Fe	10.0
Ba	13.3	Ti	10.0
Bi	13.3		

ANEXOS B: ÁRBOLES DE REGRESIÓN

En esta sección, se presentan los resultados de todos los árboles de regresión realizados con el programa SPSS. Se utiliza como variable a predecir la ocurrencia o no ocurrencia del tipo de depósito en función de solamente la mineralogía y posteriormente, en función de las alteraciones hidrotermales. Solo se presentan los resultados de los depósitos con las mayores cantidades de datos.

11.5 DEPÓSITOS VS MINERALOGÍA

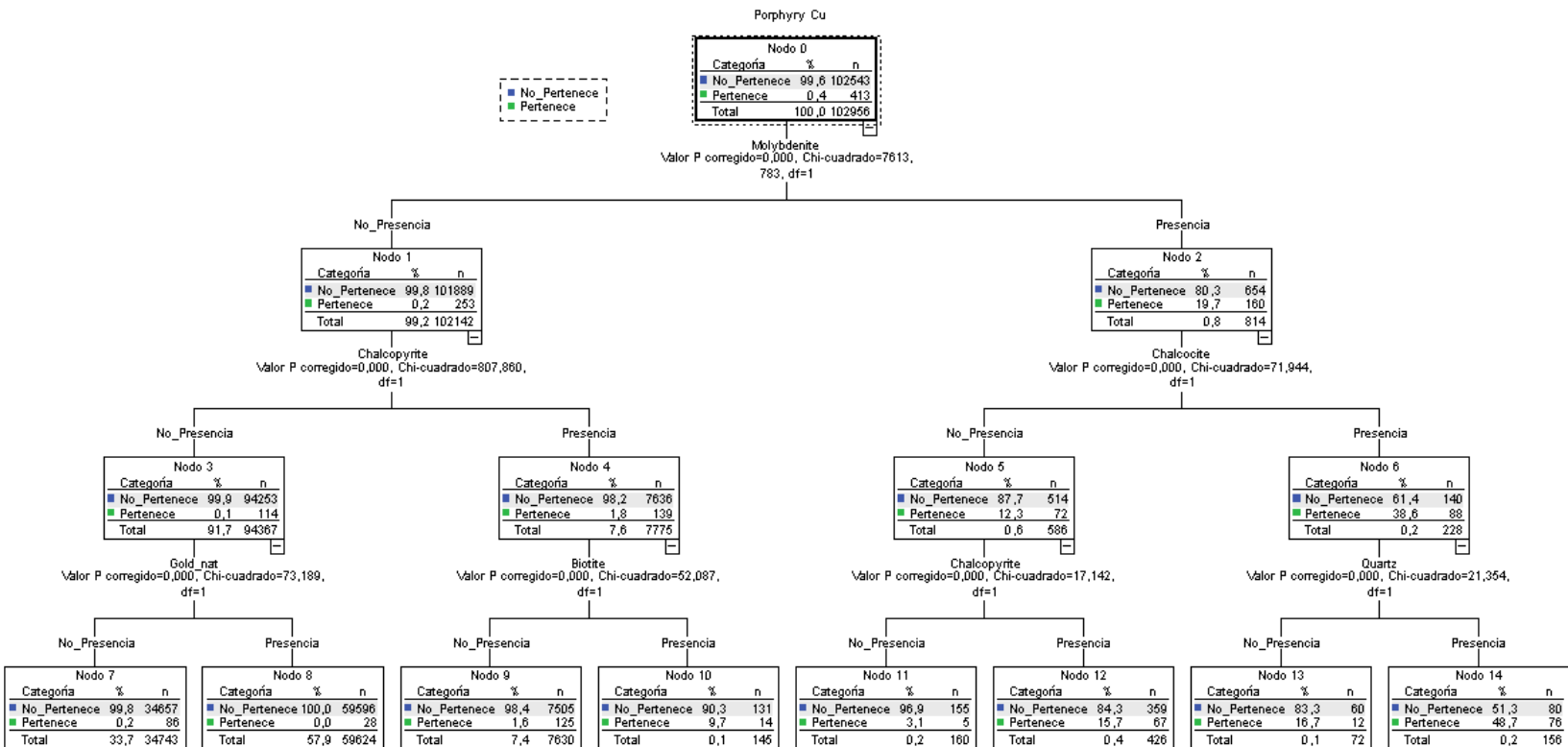


Figura 17 Árbol de regresión de pórfidos cupríferos vs minerales.

Tabla 86: Clasificación pórfidos cupríferos vs minerales

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102543	0	100.0%
Pertenece	413	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.6%

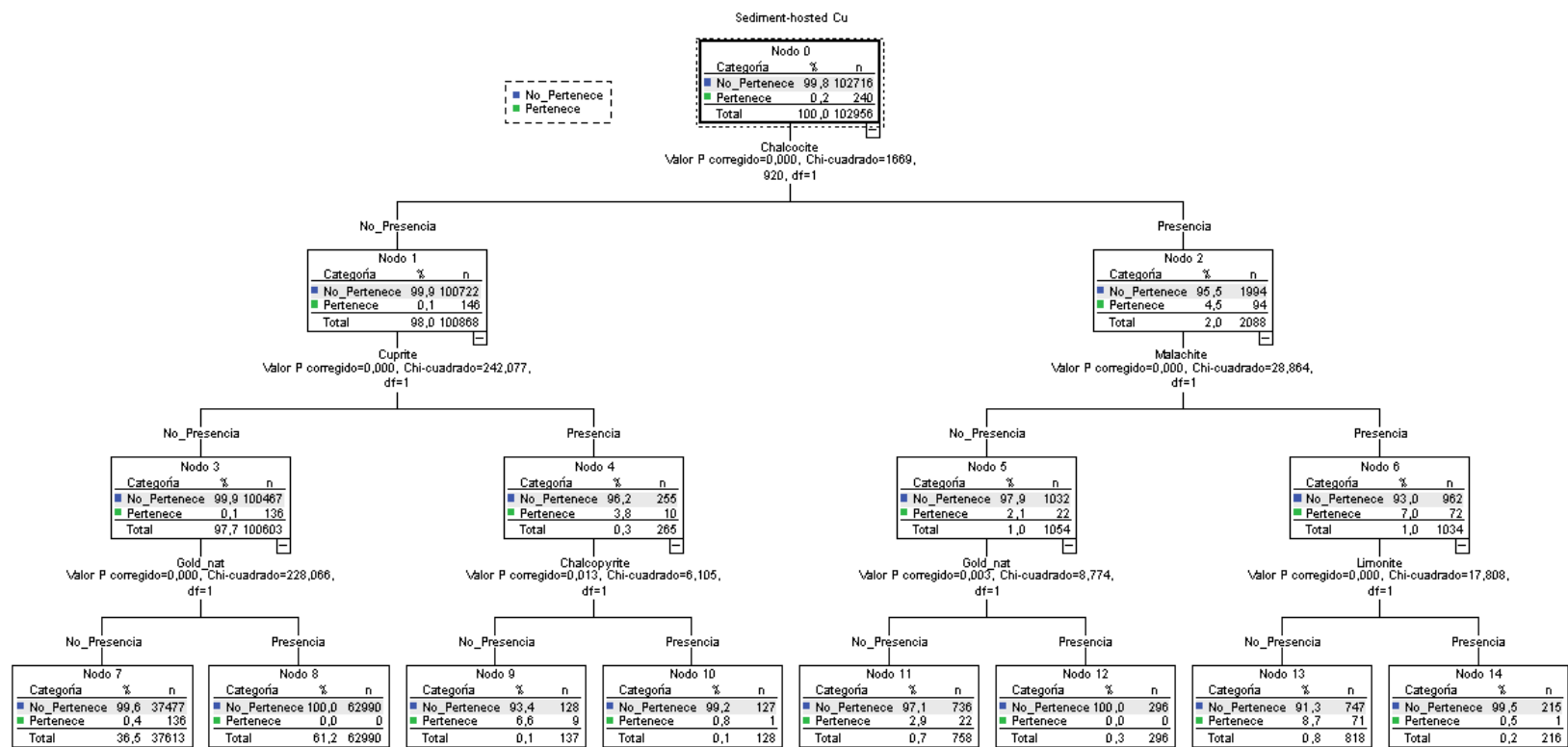


Figura 18 Árbol de regresión de Cobre en sedimentos (Estratoligado de Cu) vs minerales.

Tabla 87 Clasificación cobre en sedimentos vs minerales.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102716	0	100.0%
Pertenece	240	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.8%

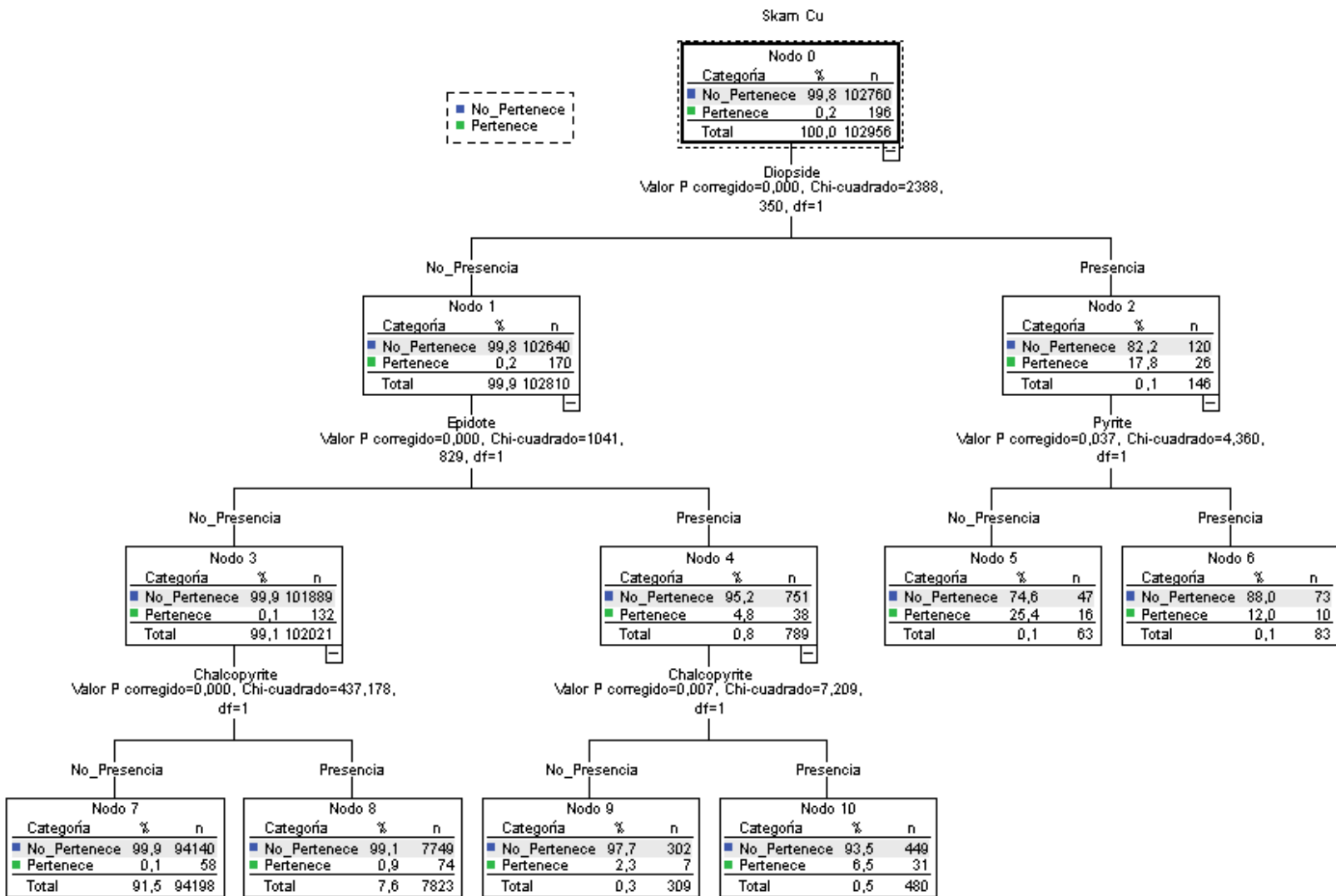


Figura 19 Árbol de regresión de skarns de cobre vs minerales.

Tabla 88 clasificación skarns de cobre vs minerales.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102760	0	100.0%
Pertenece	196	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.8%

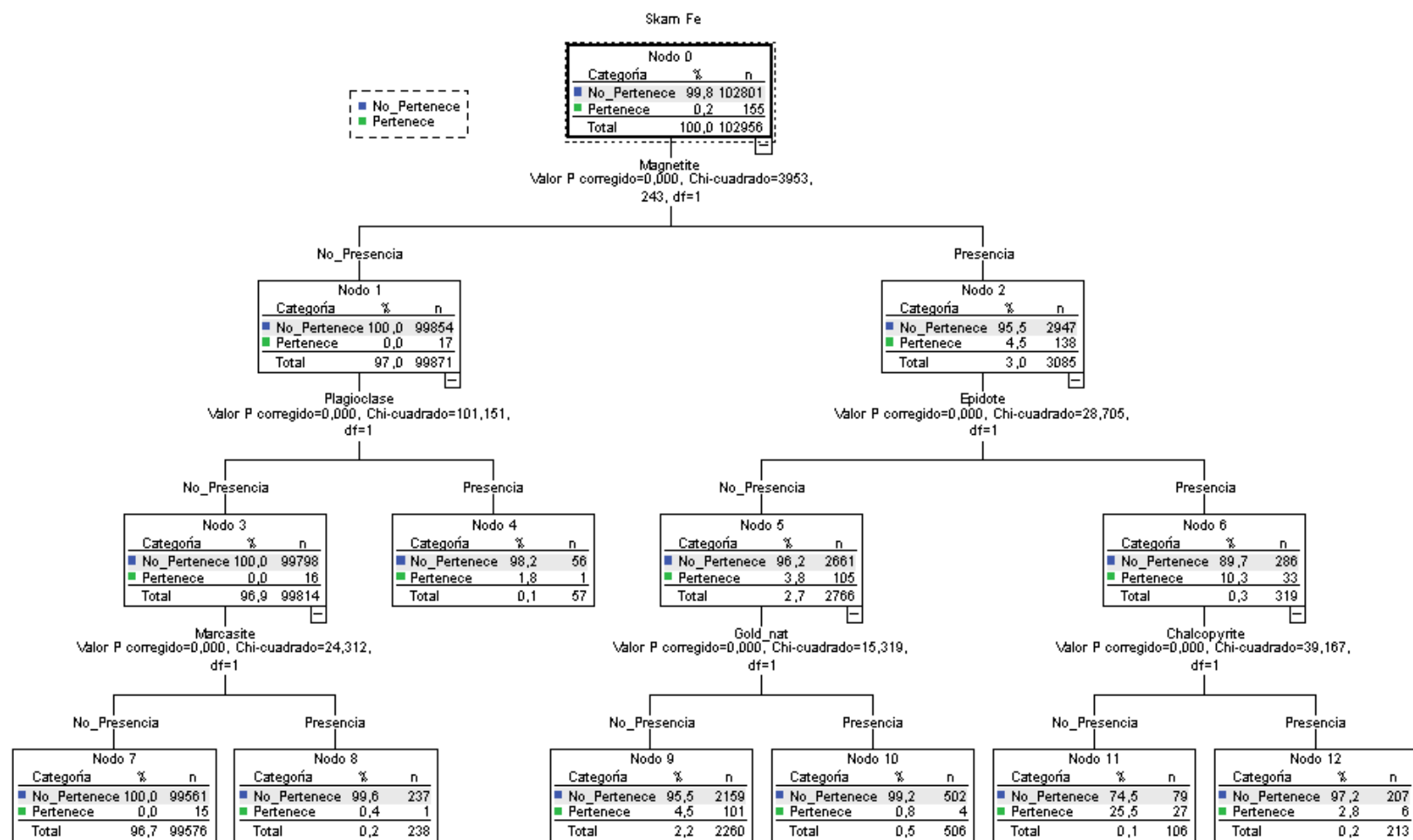


Figura 20 Árbol de regresión de skarns de hierro vs minerales.

Tabla 89 clasificación skarns de hierro vs minerales.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102801	0	100.0%
Pertenece	155	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.8%

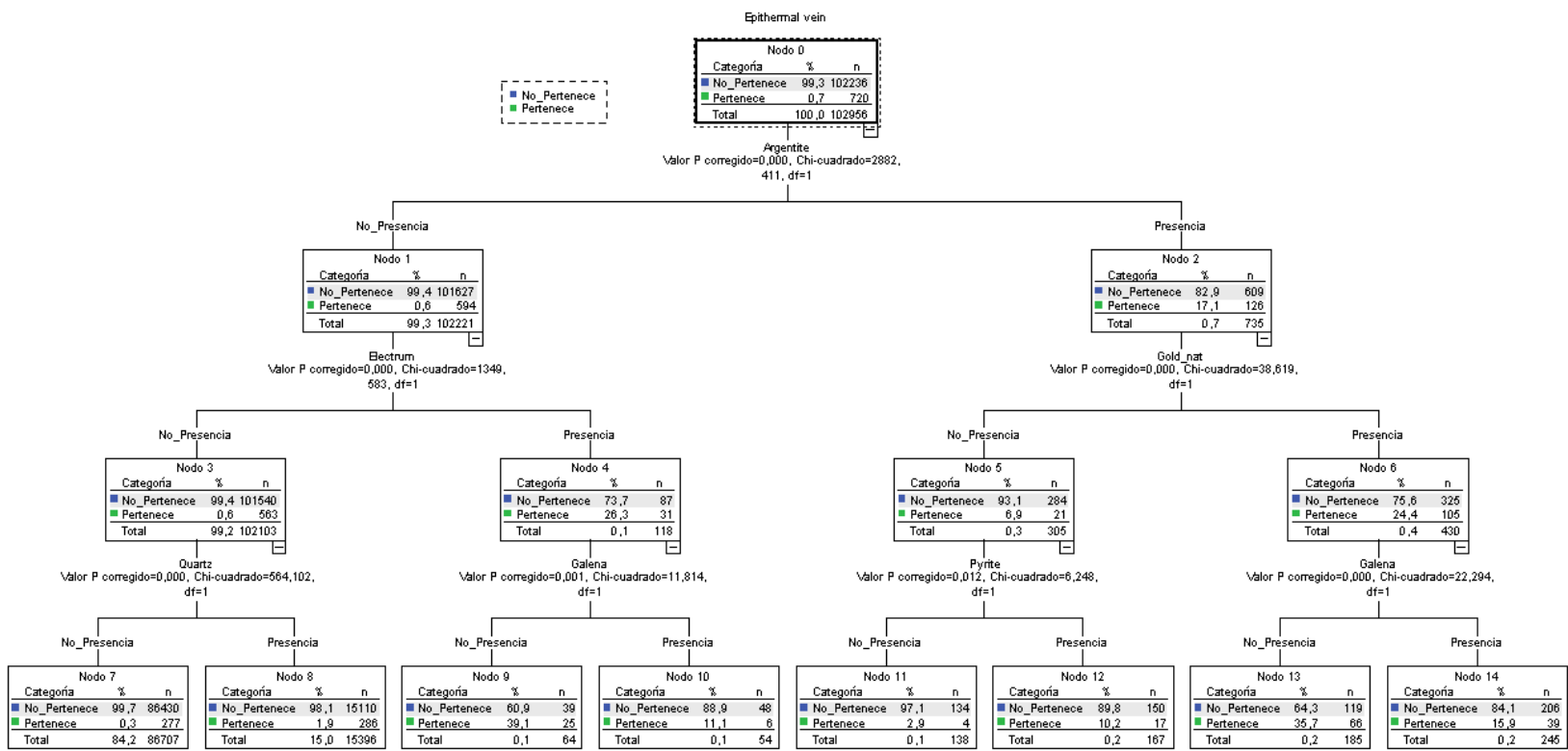
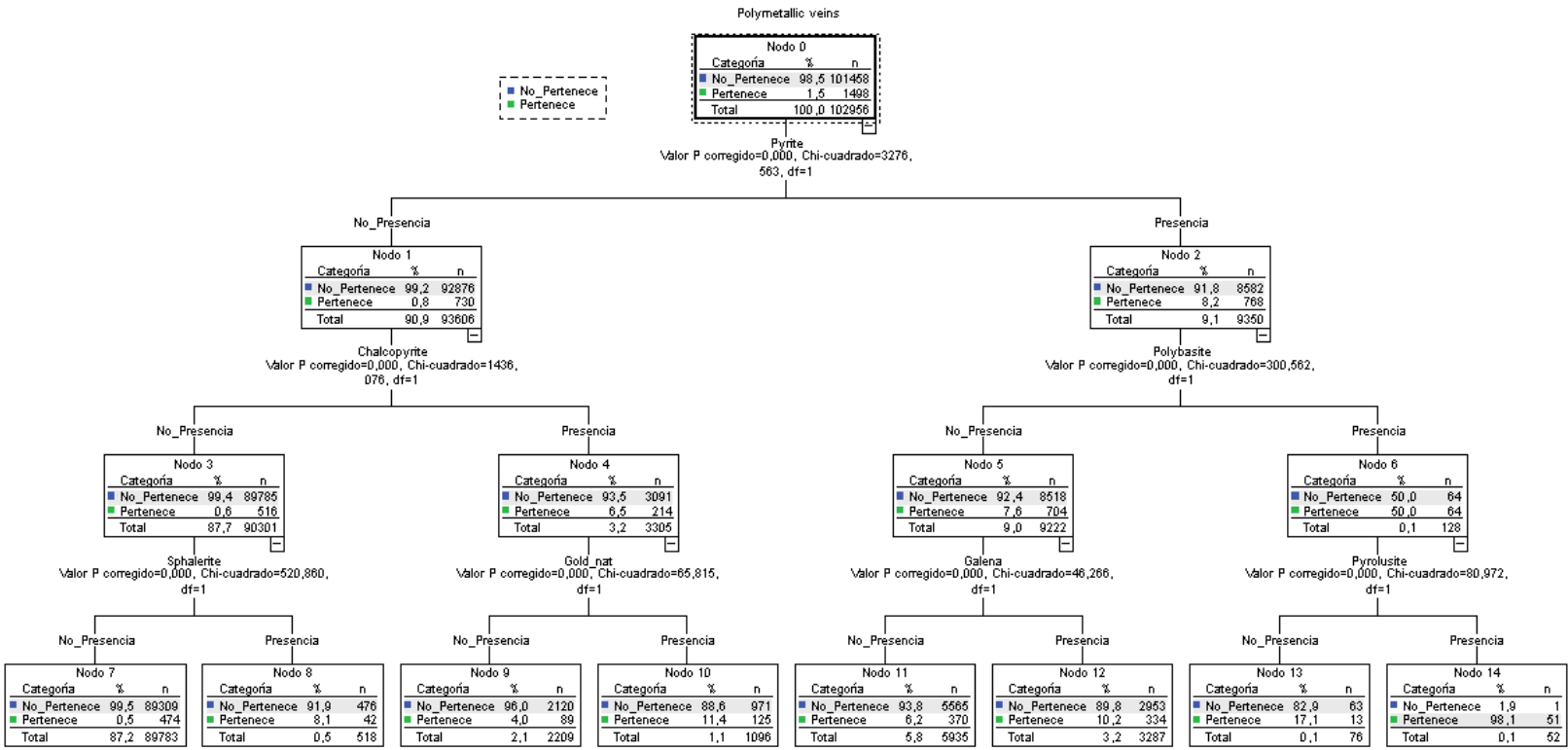


Figura 21 Árbol de regresión de vetas epitermales vs minerales.

Tabla 90 Clasificación vetas epitermales vs minerales.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102236	0	100.00%
Pertenece	720	0	0.00%
Porcentaje global	100.00%	0.00%	99.30%



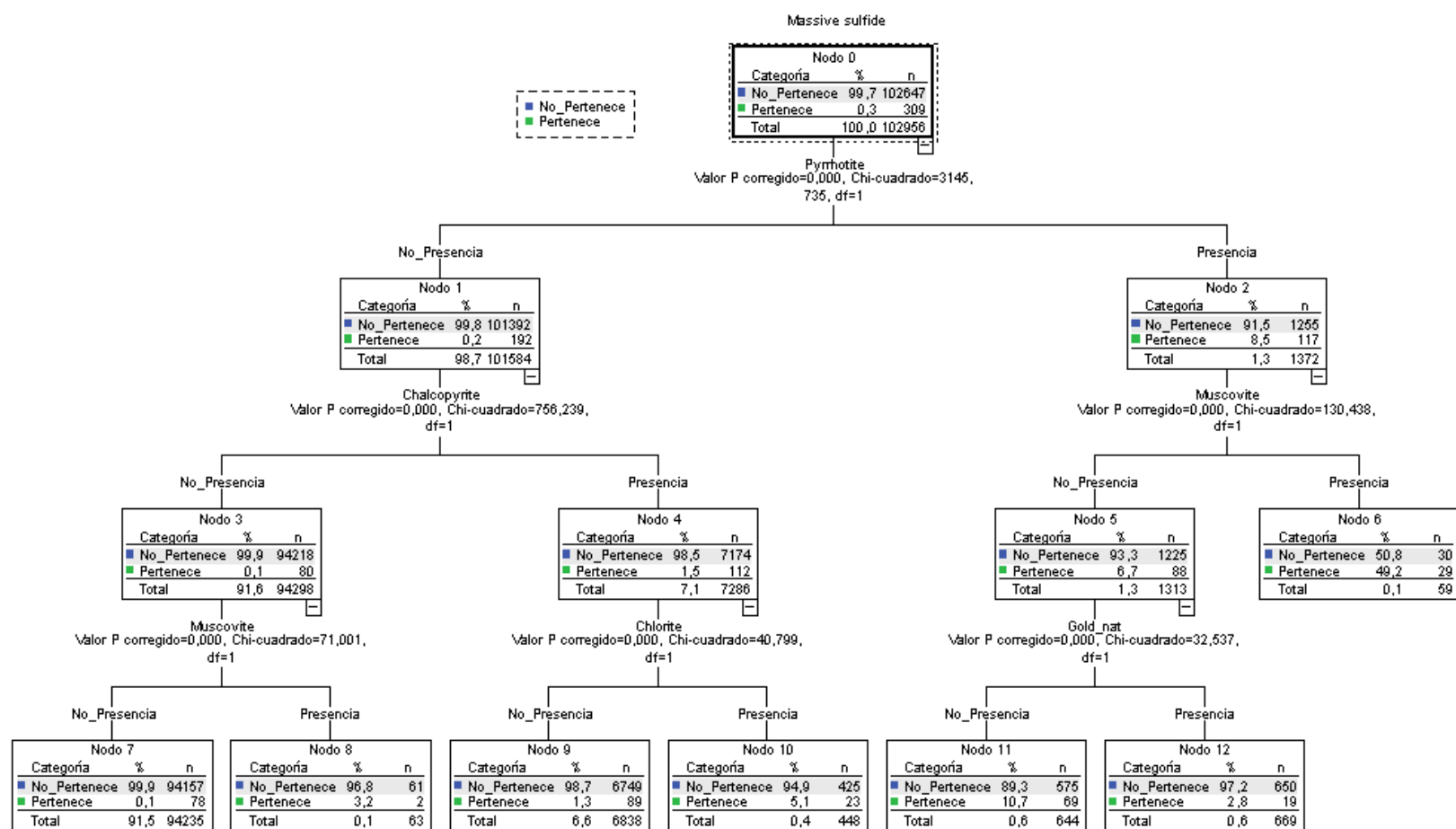


Figura 23 Árbol de regresión de VMS vs minerales.

Tabla 92 Clasificación VMS vs minerales.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102647	0	100.0%
Pertenece	309	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.7%

11.6 DEPÓSITOS VS ALTERACIONES HIDROTERMALES

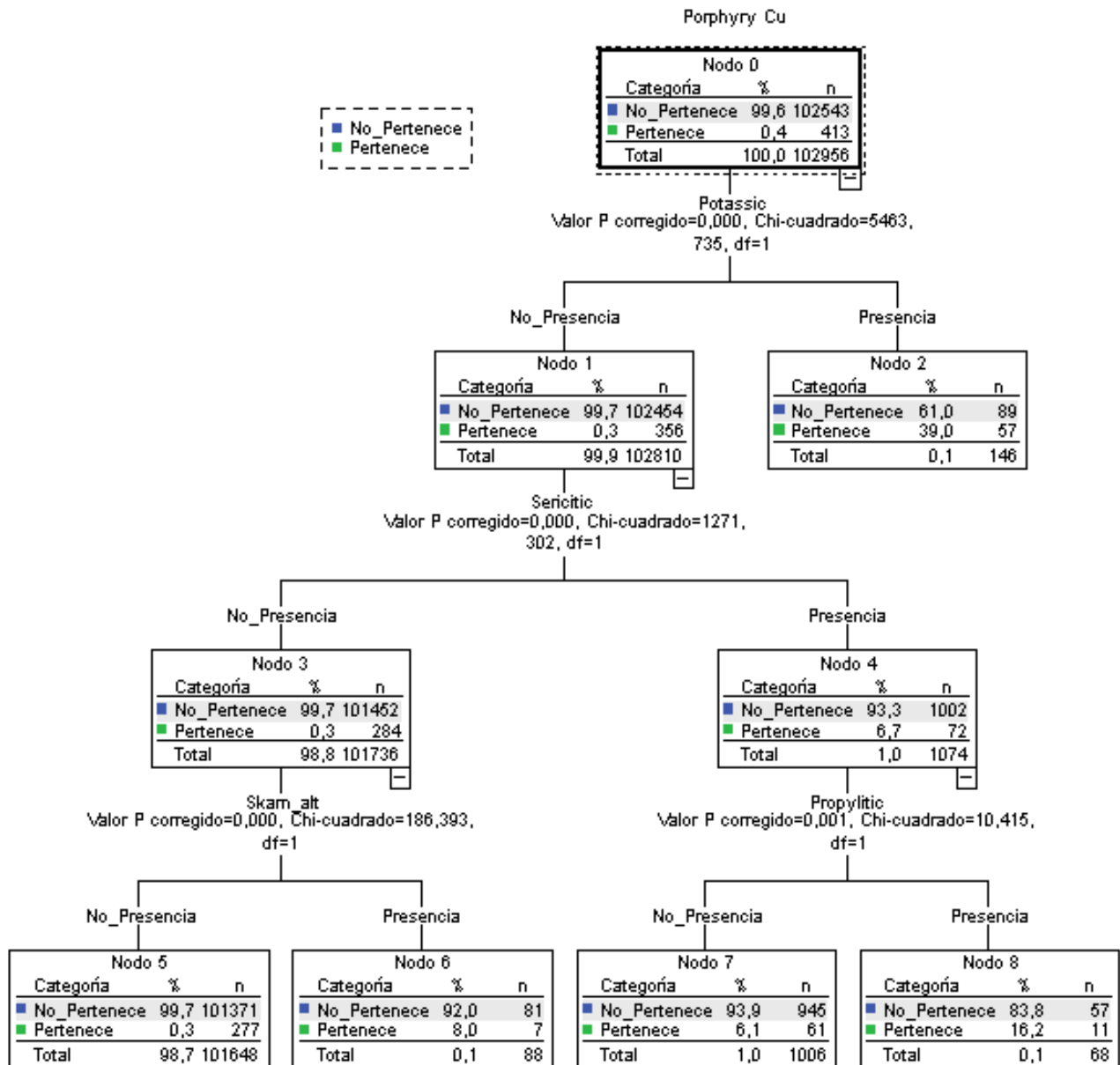


Figura 24 Árbol de regresión de pórfidos de cobre vs alteraciones.

Tabla 93 Clasificación pórfidos de cobre vs alteraciones.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102543	0	100.0%
Pertenece	413	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.6%

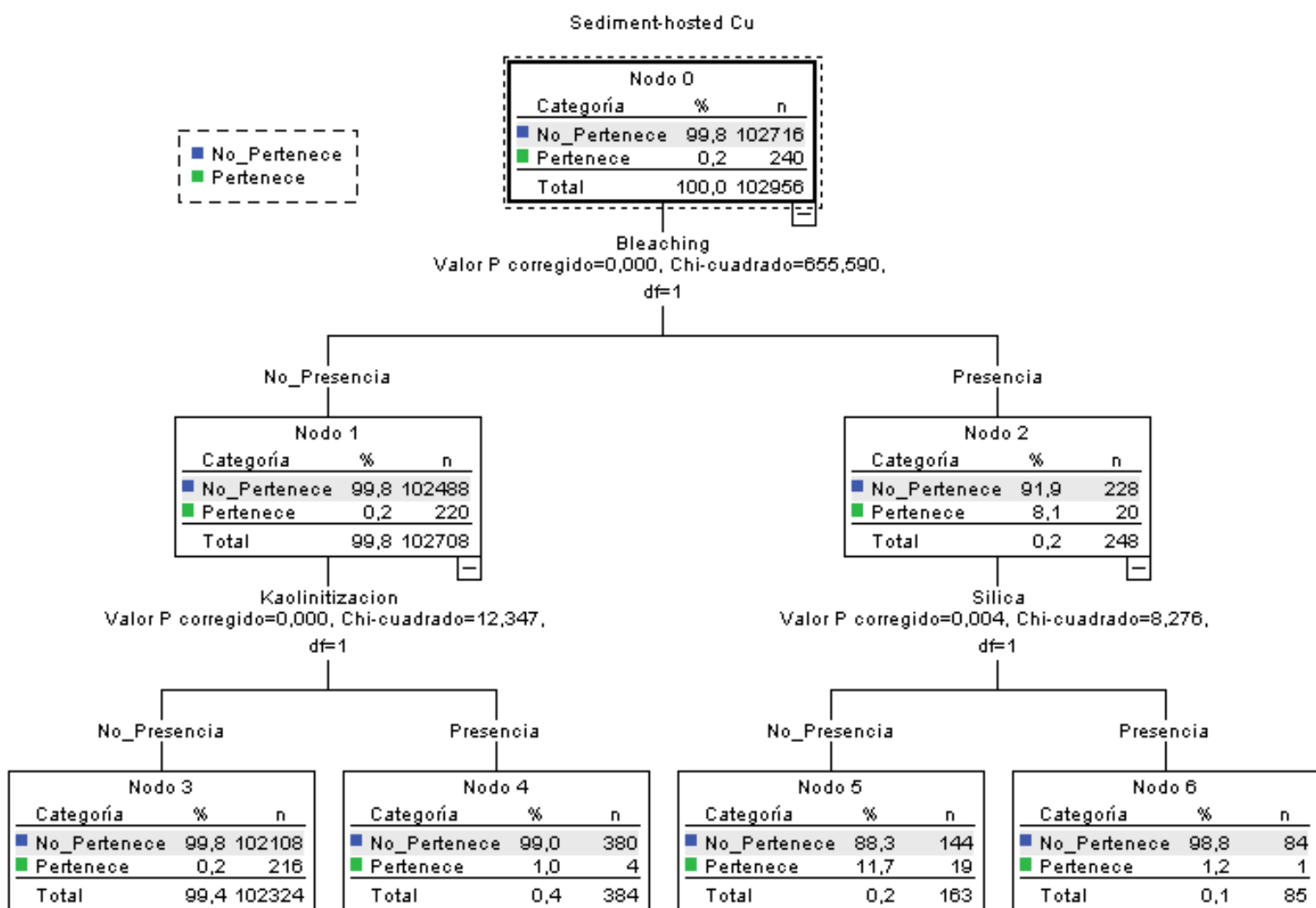


Figura 25 Árbol de regresión de cobre en sedimentos vs alteraciones.

Tabla 94 Clasificación cobre en sedimentos vs alteraciones.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102716	0	100.0%
Pertenece	240	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.8%

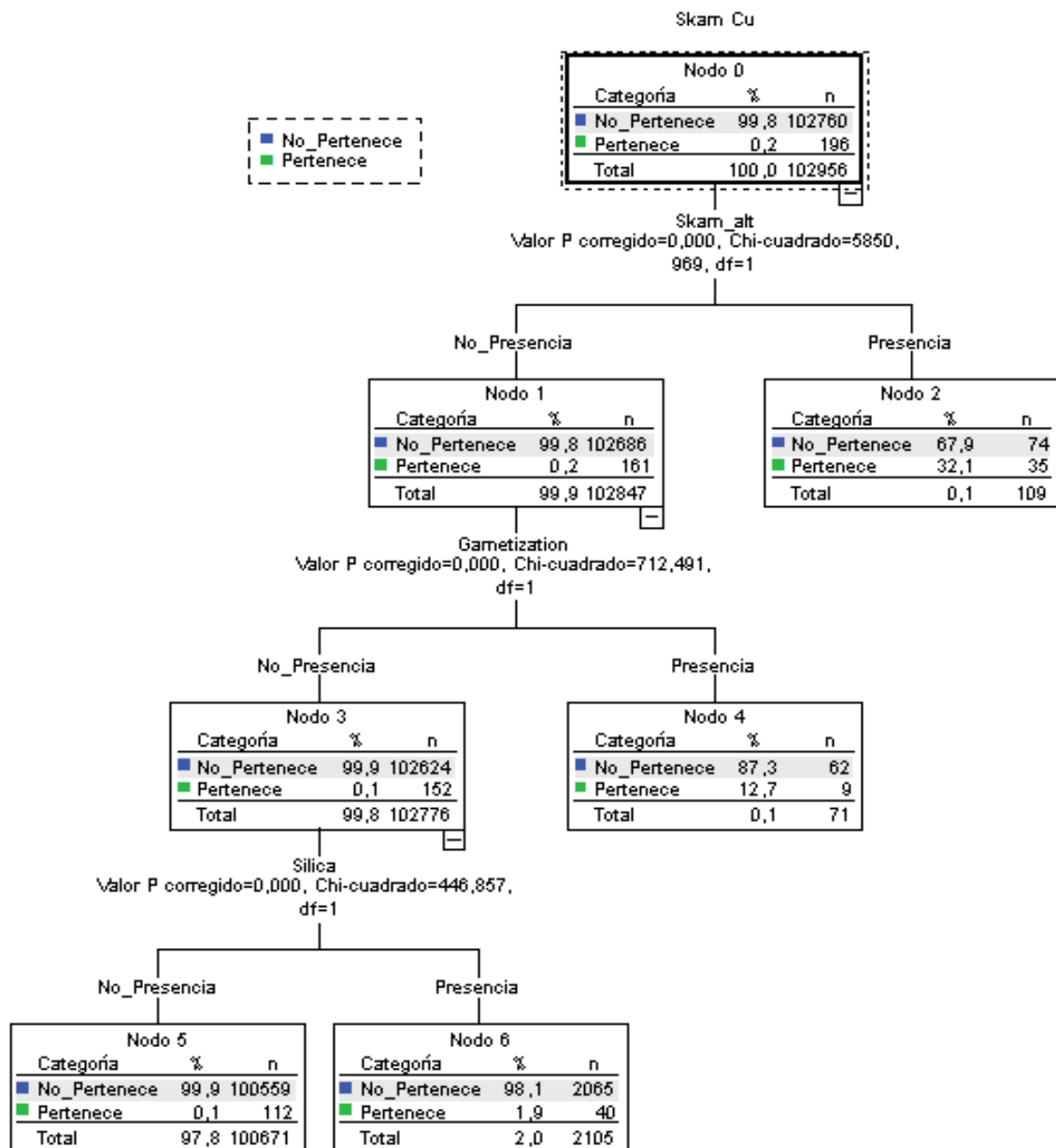


Figura 26 Árbol de regresión de Skarns de cobre vs alteraciones.

Tabla 95: Clasificación skarns de cobre vs alteraciones.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102760	0	100.0%
Pertenece	196	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.8%

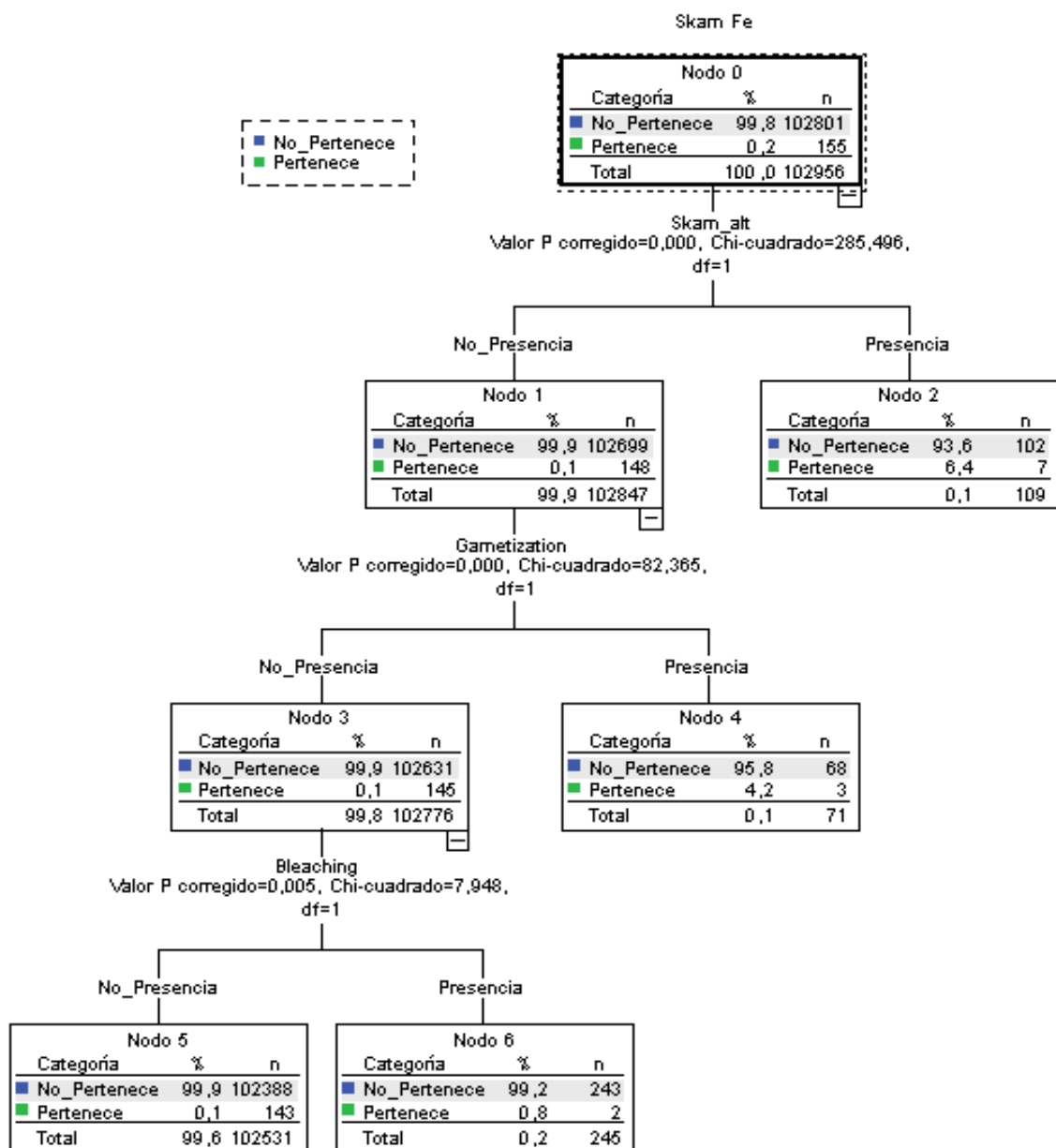
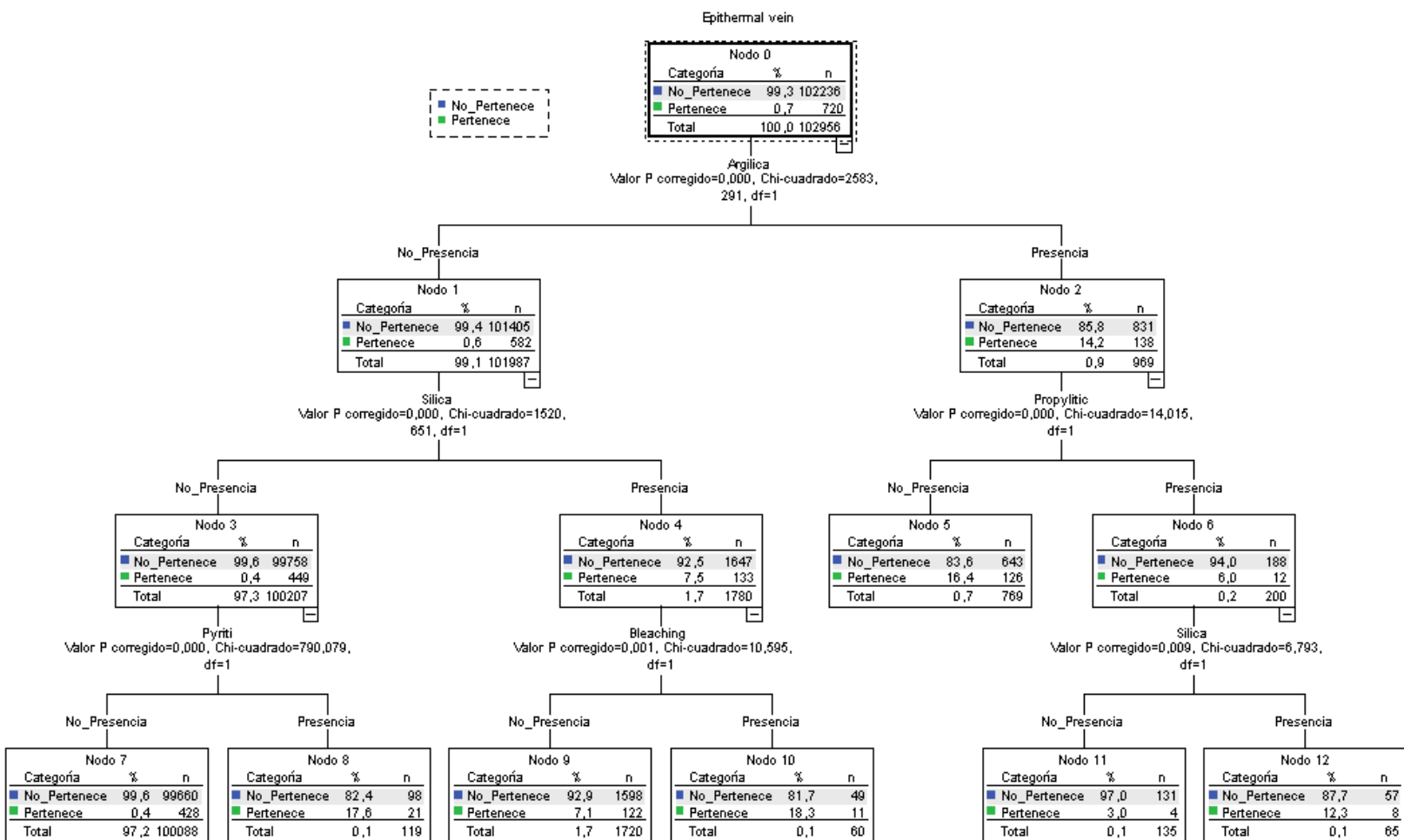


Figura 27 Árbol de regresión de Skarns de hierro vs alteraciones.

Tabla 96 Clasificación skarns de hierro vs alteraciones.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102801	0	100.0%
Pertenece	155	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.8%



Polymetallic veins

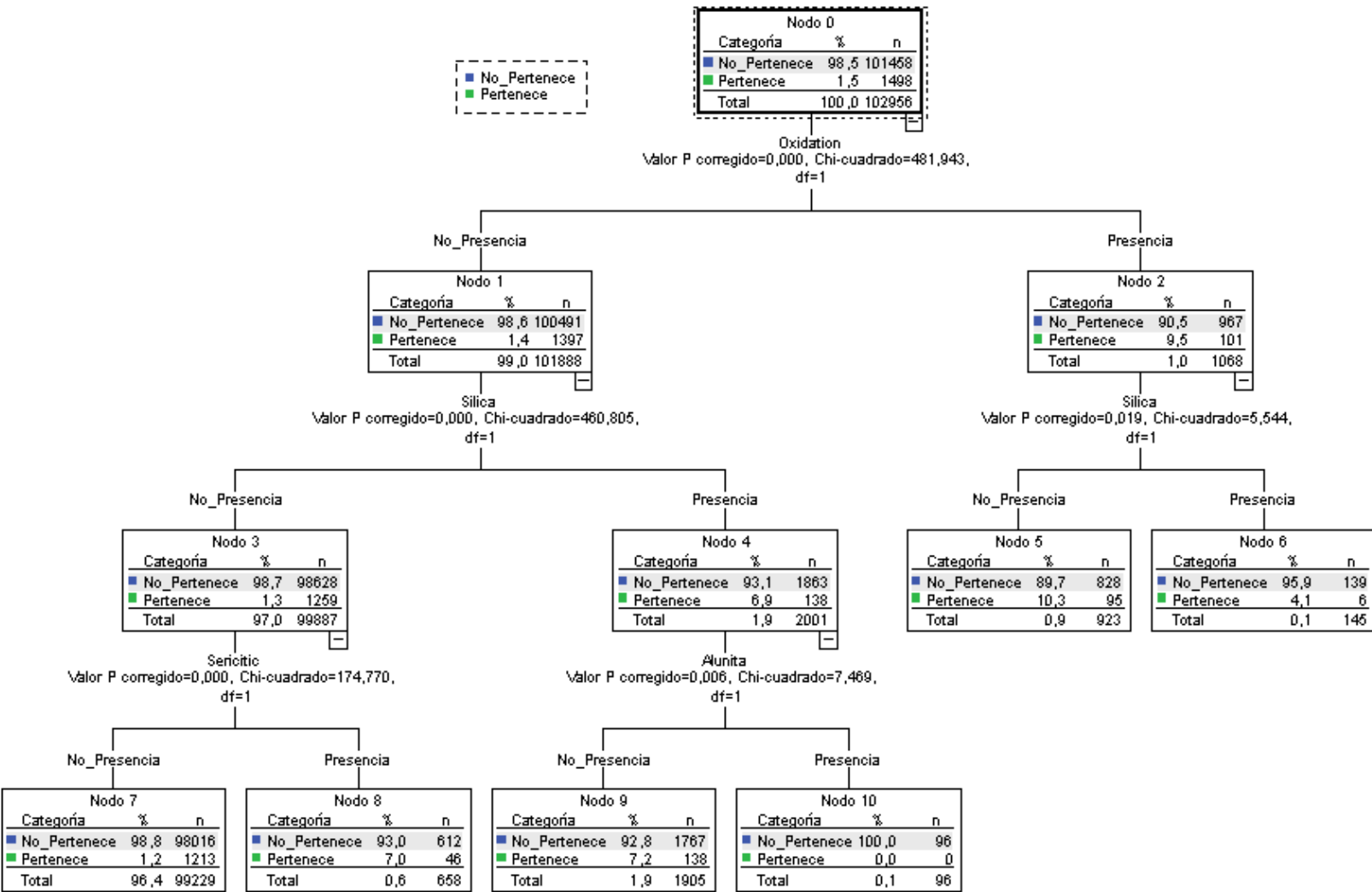


Figura 29 Árbol de regresión de vetas polimetálicas vs alteraciones.

Tabla 98 Clasificación vetas polimetálicas vs alteraciones.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	101458	0	100.0%
Pertenece	1498	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	98.5%

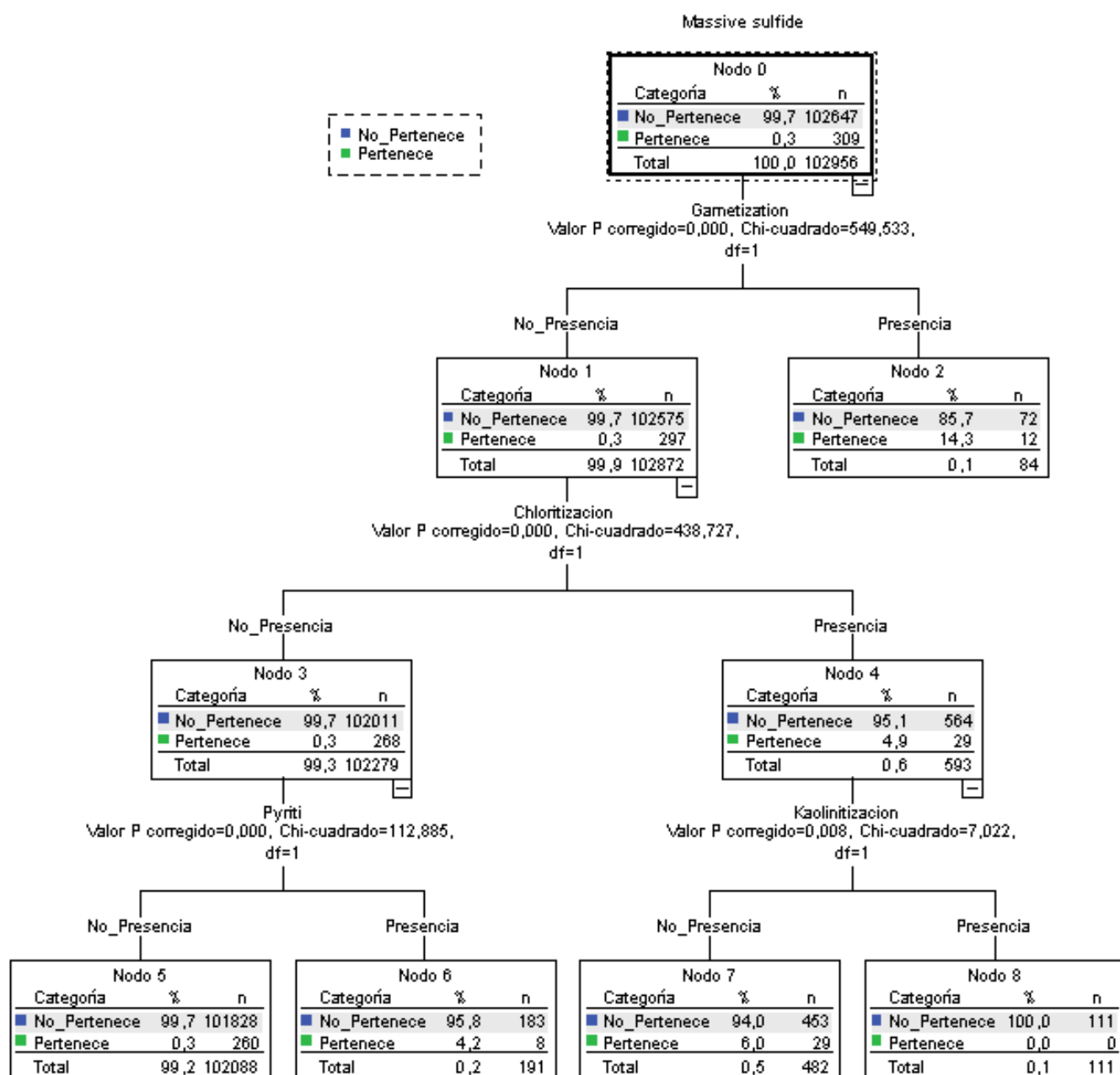


Figura 30: Árbol de regresión de VMS vs alteraciones.

Tabla 99 Clasificación VMS vs alteraciones.

Observado	No Pertenece	Pertenece	Porcentaje correcto
No Pertenece	102647	0	100.0%
Pertenece	309	0	0.0%
Porcentaje global	100.0%	0.0%	99.7%

