

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



**“MODELAMIENTO DE PROSPECTIVIDAD MINERAL DE
DEPÓSITOS TIPO PÓRFIDO DE CU-MO/AU EN LA FRANJA
ANDAHUAYLAS – YAURI, MEDIANTE EL USO DE LA
TÉCNICA DE PONDERACIÓN DE LAS EVIDENCIAS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR:
MIGUEL ANGEL ZAMORA SILVA**

**ASESOR
MSC. LIC. ATILIO MENDOZA APOLAYA**

**Lima – Perú
2014**

INDICE

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción.....	10
1.2. Planteamiento Del Problema	11
1.3. Objetivos.....	12
1.4. Metodología Del Trabajo	13
1.5. Antecedentes	13

CAPITULO II: CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL

2.1. Ubicación Geográfica	15
2.2. Geología Regional.....	17
2.2.1. Estratigrafía	20
2.2.2. Tectónica.....	28
2.2.3. Alteraciones Hidrotermales	30
2.2.4. Mineralización.....	30
2.3. Geología Económica	31

CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

3.1. Conceptos Generales	35
3.1.1. Estadística Bayesiana Y Ponderación De Las Evidencias O “Weight Of Evidences”	35
3.1.2. Clasificación de Yacimientos	51
3.2. Descripción de la Metodología	52

CAPITULO IV: DETERMINACION DE TARGET'S MEDIANTE PONDERACION DE LAS EVIDENCIAS

4.1. Modelo Conceptual.....	55
4.2. Información Geoespacial	56
4.2.1. Área de Estudio	56
4.2.2. Puntos de Entrenamiento (Ocurrencias mineras o Depósitos).....	57
4.2.3. Geología y Estructuras	57
4.2.4. Geoquímica.....	57
4.3. Procesamiento de la Información	58

4.3.1. Análisis Exploratorio de Datos	58
4.4. Generación de Mapas Probatorios.....	63
4.4.1. Calculo de los Pesos e Integración de los Datos con los Pesos	64
4.4.1.1. Mapa Probatorio de Geología.....	64
4.4.1.2. Mapa Probatorio Estructural	65
4.4.1.3. Mapas Probatorios Geoquímicos.....	66
4.5. Generación del Modelo de Prospectividad Mineral.....	68
CAPITULO V: INTERPRETACION DE RESULTADOS	
5.1. Resultados	71
5.1.1. Mapa de Prospectividad de la Franja Andahuaylas – Yauri	71
5.1.2. Inventario de Targets	73
CONCLUSIONES.....	75
RECOMENDACIONES.....	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Plano de Ubicación	16
FIGURA 2.2 Plano Geologico Regional	19
FIGURA 2.3 Columna Estratigrafica Regional	25
FIGURA 2.4 Franjas Metalogenéticas	34
FIGURA 3.1 Ejemplo de Probabilidad Previa	38
FIGURA 3.2 Probabilidad Posterior	39
FIGURA 3.3 Temas o Capas Binarias	46
FIGURA 3.4 Flujograma del proceso de generacion del modelo de prospectividad	54
FIGURA 4.1 Histogramas de Distribución de Frecuencias de las variables	60
FIGURA 4.2 Diagramas de Cajas para la determinacion de altos erraticos	61
FIGURA 4.3 Mapa Probatorio Litologico, luego de la reclasificacion binaria....	65
FIGURA 4.4 Mapa Probatorio Estructural, reclasificación binaria según distancia al alineamiento	66
FIGURA 4.5 Mapa Probatorio Geoquímico de Cu, reclasificado según el valor del Treshold	67
FIGURA 4.6 Mapa Probatorio Geoquímico de Mo	67
FIGURA 4.7 Mapa Probatorio Geoquímico de Au	68
FIGURA 5.1 Mapa de Potencial Mineral para yacimientos tipo Porfido de la Franja Andahuaylas - Yauri	72

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Edades K-Ar de varias fases intrusivas en el Batolito Andahuaylas - Yauri	28
TABLA 2.2 Recursos Geologicos Estimados de los Principales Depositos de la Frnaja	33
TABLA 3.1 Relaciones entre la Densidad Normalizada y los Pesos	51
TABLA 4.1 Estadisticas Basicas de las Variables Cu, Mo, Au	59
TABLA 4.2 Estadistica Final de los Datos Tratados	59
TABLA 4.3 Unidades Litologicas	62
TABLA 4.4 Tipos de Estructuras presentes en la Informacion Geoespacial	63
TABLA 4.5 Pesos de la Capa Probatoria Geologica	65
TABLA 4.6 Pesos de la Capa Probatoria Estructural	66
TABLA 4.7 Tabla de Condiciones Unicas	69

ANEXOS

ANEXO N° 1 Plano de Ubicaci3n	81
ANEXO N° 2 Plano Geologico Regional	82
ANEXO N° 3 Plano Metalogen3tico	83
ANEXO N° 4 Plano Geoqu3mica de Sedimentos de Cu	84
ANEXO N° 5 Plano Geoqu3mica de Sedimentos de Mo	85
ANEXO N° 6 Plano Geoqu3mica de Sedimentos de Au	86
ANEXO N° 7 Plano de Favorabilidad Minera	87

RESUMEN

La Franja Andahuaylas – Yauri, se encuentra situada al sur este del territorio peruano y se extiende aproximadamente unos 300 km, en dirección NO-SE, entre las localidades de Andahuaylas al NO y Yauri al SE, la franja cubre un área aproximada de 25,000 Km², y es conocida principalmente por su mineralización de cobre, molibdeno y oro, en yacimientos tipo pórfido y skarn principalmente.

Esta franja fue originalmente conocida por su mineralización tipo skarn de Fe –Cu, en los últimos tiempos se han realizado importantes descubrimientos que la sitúan como una importante franja metalogénica para yacimientos tipo pórfido.

La geología de la franja está representada por el batolito de Andahuaylas – Yauri, el cual está compuesto de una serie de complejos intrusivos de composición calco alcalina principalmente, emplazado dentro de secuencias sedimentarias clásticas y carbonáceas de edad Jurásica a Cretácica.

La franja está definida por 31 sistemas con alteración y mineralización tipo pórfido, incluyendo 19 sistemas agrupados en 5 clústeres principales más 12 centros separados, los stocks porfiríticos están dominados por intrusivos calco alcalinos con contenidos de biotita y anfíbol de composición granodiorítica. Sin embargo stocks monzograníticos, monzoníticos, cuarzo monzoníticos, y monzodioríticos ocurren localmente (Perello, 2003).

El termino prospectividad o favorabilidad mineral pueden ser vistos como sinónimos, y hacen referencia a la probabilidad de que tipo específicos de depósitos minerales

buscados puedan ser encontrados en un área de interés determinada (Carranza, 2009). El desarrollo de técnicas de modelamiento matemático apoyados en sistemas de información geográfica (SIG) han permitido que los mapas predictivos se vuelvan más objetivos y menos subjetivos.

La Ponderación de Evidencias (WofE, por sus siglas en inglés) es un método de toma de decisiones multicriterio cuantitativo para la correlación de evidencias en base a una hipótesis, las evidencias consiste en un conjunto de mapas con datos de exploratorios y la hipótesis “la ubicación favorable para la presencia de un tipo de depósito X”, al final se produce un mapa de potencial mineral en el que se combina las evidencias de varias capas del mapa.

ABSTRACT

The belt Andahuaylas - Yauri, is located south east of Peru and extends approximately 300 km NW-SE, between the towns of Andahuaylas to the NW and Yauri to the SE respectively, the belt covers an area of approximately 25,000 km² and is primarily known for its mainly, mineralization of copper, molybdenum and gold in porphyry and skarn deposits.

This belt was originally known for its skarn Fe-Cu mineralization, in recent times there have been important discoveries that place as an important metallogenic belt for porphyry deposits.

The geology of belt is represented by Andahuaylas - Yauri batholith, which is composed of a series of complex mainly calc alkaline intrusive composition emplaced within carbonaceous and clastic sedimentary sequences of Jurassic to Cretaceous age.

The belt is defined by 31 systems with porphyry alteration and mineralization style, including 19 grouped into 5 main clusters plus 12 separate systems centers, porphyritic stocks are dominated by calc alkaline intrusive with biotite and amphibole content of granodioritic composition. However monzogranítics stocks, monzonitic, quartz monzonitic and monzodioríticos occur locally (Perello, 2003).

The term mineral prospectivity or favorability can be seen as synonymous, and refer to the likelihood of specific types of mineral deposits searched can be found in an area of particular interest (Carranza, 2009). The development of mathematical modeling

techniques supported by geographic information systems (GIS) has allowed predictive maps become more objective and less subjective.

The Weight of Evidence (WofE) is a method of quantitative multicriteria decision making for the correlation of evidence based on a hypothesis, the evidence consists of a set of maps with data exploration and hypothesis is "the favorable for the presence of a type of X " at the end a map of mineral potential is produced in which the evidence of several map layers occurs combined deposit location.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

El presente informe de suficiencia profesional, denominado “Modelamiento de Prospectividad Mineral de Depósitos tipo Pórfido de Cu-Mo/Au en la Franja Andahuaylas – Yauri, mediante el uso de la técnica de Ponderación de las Evidencias”, se presenta como prueba de aptitud para la obtención del título profesional en Ingeniería Geológica mediante la modalidad de curso de actualización de conocimientos, realizado por la escuela de Ingeniería Geológica, del 9 de marzo al 2 de junio del presente año.

El presente estudio tiene como objetivo determinar zonas con mayor potencial de prospectividad en una determinada área mediante el uso de herramientas estadísticas, específicamente mediante la técnica de Ponderación de Evidencias o WofE por sus

siglas en inglés (Weight of Evidence), el cual es un método estadístico cuantitativo que combina evidencias o pruebas con la finalidad de comprobar una hipótesis o teoría (modelo conceptual), por ejemplo el depósito x presenta las características a, b, c, una más importante que otra, en la que la combinación de una o más de cada una de ellas, reflejara la mayor o menor favorabilidad de encontrar dicho tipo de depósito.

Esta favorabilidad es calculada utilizando estadística bayesiana de probabilidades, mediante el software llamado MI-SDM que funciona dentro del paquete SIG MapInfo, este programa es de libre acceso y puede ser descargado desde su página web, la información utilizada para el cálculo de la favorabilidad está en formato SIG y es de libre acceso y puede ser descargada directamente de la página web de INGEMMET o de su portal SIG, GEOCATMIN.

Como resultado final, luego de realizar el tratamiento, cálculo y ponderación de cada una de las capas o evidencias, se obtendrá un mapa que representara en escala de colores desde la mayor a menor probabilidad de ubicar un tipo de depósito determinado dentro de un área específica.

1.2. Planteamiento Del Problema

La zona de estudio se encuentra enmarcada en la región de Abancay, una de las regiones de Perú con mayor potencial económico atribuida principalmente a la actividad minera. En efecto, sus tierras albergan algunos de los yacimientos de cobre más importantes del Perú, y numerosos proyectos de cobre – molibdeno y oro de gran volumen como Las Bambas, Tintaya, Los Chancas, Haquira, entre otros.

Hoy en día las probabilidades de encontrar nuevos yacimientos con el uso de la picota y la brújula se han reducido, es por eso que se hace una necesidad el aprovechamiento de nuevas técnicas y las nuevas herramientas que nos permita hacer un mejor uso de la información conocida para la toma de mejores decisiones a la hora de decidir donde explorar.

1.3. Objetivos

El objetivo general de este estudio es la obtención de un mapa de prospectividad, o también llamado favorabilidad, mineral para depósitos del tipo pórfido de cobre en la franja Andahuaylas - Yauri.

Los objetivos específicos para la obtención del mapa de prospectividad son los siguientes:

- Definir los factores genéticos, criterios de reconocimiento y los parámetros intrínsecos para la creación de un modelo genético conceptual para la mineralización tipo pórfido de cobre en el área de estudio.
- Analizar e interpretar datos geológicos y geoquímicos, para el reconocimiento de regiones anómalas, en relación con la mineralización de pórfido de cobre.
- Generar los mapas probatorios a partir de la información previamente tratada, teniendo como base el modelo conceptual inicialmente definido.
- Calcular para cada capa probatoria las ponderaciones respectivas.
- Y finalmente definir un modelo de prospectividad del área en estudio.
- Cumplir con los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Geólogo.

1.4. Metodología Del Trabajo

El desarrollo del presente estudio ha sido realizado íntegramente en gabinete debido a la naturaleza de la metodología del análisis, sin embargo por experiencia en otros estudios del mismo tema, el trabajo de campo es de suma importancia para la determinación de un modelo de mayor confiabilidad y en la validación final del mismo.

El presente estudio se ha realizado en cinco fases:

- 1) Planteamiento del problema
- 2) Recopilación de la información
- 3) Tratamiento de los datos (Análisis exploratorio de datos)
- 4) Generación del modelo de prospectividad
- 5) Validación del modelo final

1.5. Antecedentes

Esta franja fue conocida originalmente por su mineralización tipo skarn de Fe – Cu, pero durante la última década ha emergido como una muy importante provincia cuprífera albergando importantes pórfidos de cobre.

En el área de estudio se han realizado principalmente estudios de geología regional; estudios del magmatismo y estratigrafía los que fueron realizados por INGEMMET durante las últimas dos décadas. Anteriormente se han realizado exploraciones geológicas en torno al descubrimiento del clúster Tintaya, los estudios más importantes relacionados a la geología económica de la franja han sido realizados por

Donal C. Noble (1994), “Age and Regional Tectonic and Metallogenic Implications of Igneous Activity and Mineralization in the Andahuaylas – Yauri Belt of Southern Peru”; y por Jose Perello (2003), Porphyry-Style Alteration and Mineralization of the Middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru.

CAPITULO II

CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL

2.1. Ubicación Geográfica

El área de estudio se encuentra ubicada al borde norte de la Cordillera Occidental de los Andes del sur peruano, entre las regiones Abancay y Cuzco.

La franja Andahuaylas – Yauri cubre un área aproximada de 25,000 km² en el sur del Perú y se extiende por al menos 300 km entre las localidades de Andahuaylas en el Noroeste y Yauri en el Sureste (Fig. 2.1).

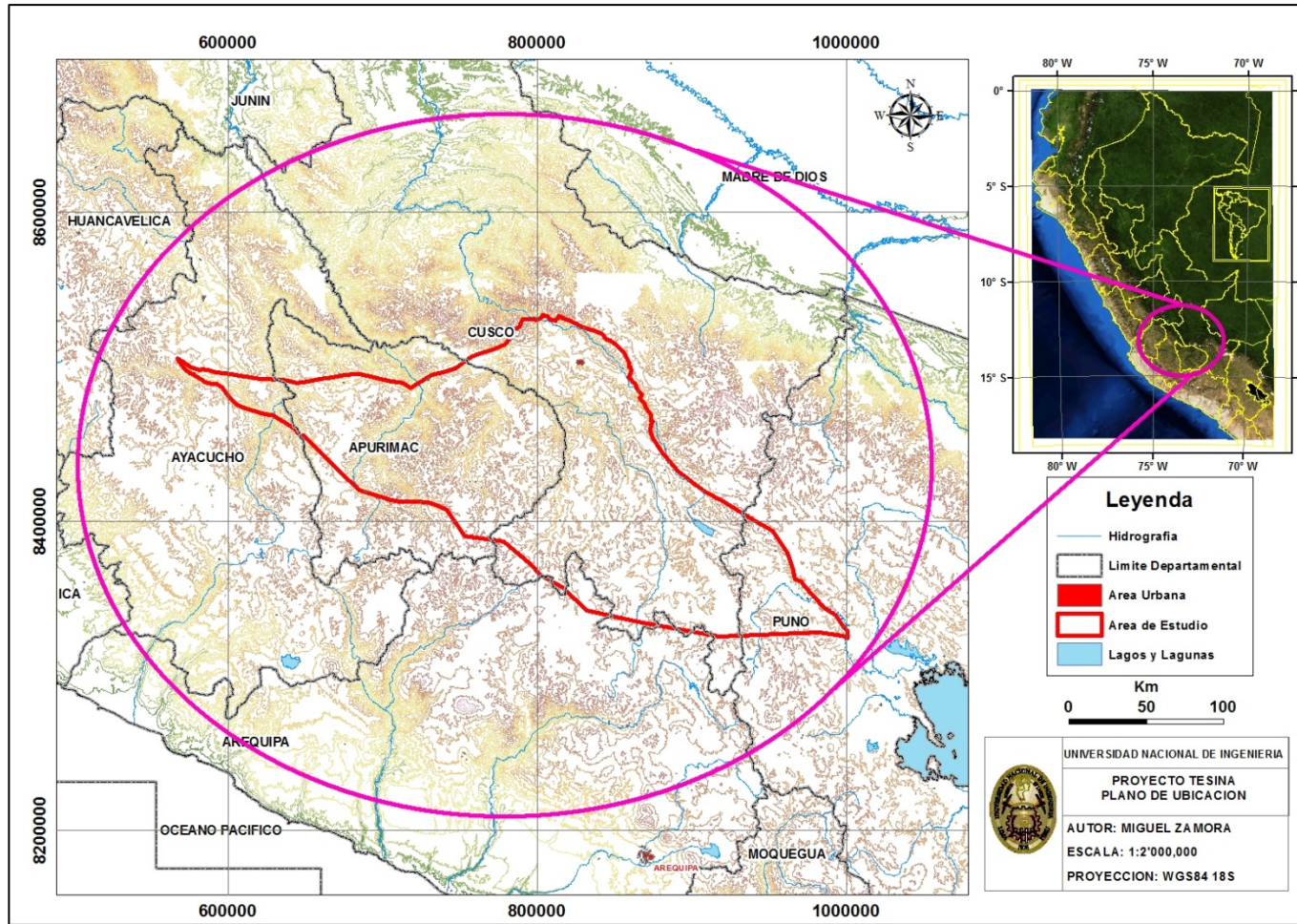


Figura 2. 1 Plano De Ubicación, Franja Andahuaylas - Yauri (Apurímac - Cuzco)

2.2. Geología Regional

La franja Andahuaylas – Yauri está localizada a una distancia de aproximadamente a 250 - 300 km hacia el continente de la actual fosa Perú – Chile, la región se encuentra sobre una delgada corteza siálica (50 – 60 km) y cabalga la zona de transición hacia el sur, régimen de subducción normal en el sur del Perú y norte de Chile y hacia el norte, zona de subducción plana del centro y norte del Perú. La franja se encuentra ubicada inmediatamente al sur de la deflexión de Abancay. La región comprende partes de las depresiones intermontañas entre el este y oeste de las cordilleras y el extremo norte del altiplano. La parte oeste de la franja está caracterizada por una topografía montañosa tosca, donde las partes más altas sobrepasan los 4500 msnm y son cortados por cañones que superan profundidades de más de 2000 m. estos cañones constituyen el principal sistema de drenajes de la región e incluye a los ríos Santo Tomas, Urubamba, Apurímac, Vilcabamba, Mollebamba y Antabamba, los cuales desembocan hacia la cuenca del Amazonas. Las partes este y sur de la región están caracterizadas por una suave y ondulada topografía de aproximadamente 4000 msnm, que se extiende hacia el altiplano Boliviano.

Trabajos de campo confirman que la mineralización presente en la franja se encuentra temporalmente asociada con el batolito de composición calco-alcalina del mioceno medio al oligoceno temprano (48-32 Ma), el cual es un compósito de cuerpos que se extiende aproximadamente de 300 x 130 km, emplazado dentro de

rocas estratificadas clásticas y carbonatadas (ej. Grupo Yura, Formación Ferrobamba) de edad Jurásica – Cretácica.

El emplazamiento del batolito incluye etapas tempranas máficas, de gabros a dioritas de entre 48 – 43 Ma, seguido por pulsos de granodioritas y cuarzo-monzodioritas de 40 – 32 Ma. Rocas volcánicas contemporáneas forman la Formación Anta de edad Eoceno intermedio al Oligoceno temprano, que corresponde a una secuencia de más de 1000 m de flujos de lavas andesíticas y flujos de piroclastos dacíticos con conglomerados interestratificados. Las rocas sedimentarias incluyen a las capas rojas del Eoceno al Oligoceno temprano del Grupo San Jerónimo y las formaciones post-mineralización del Oligoceno – Mioceno, formaciones Punacancha y Paruro. Se ha interpretado que los volcánicos y sedimentos del Eoceno – Oligoceno han sido acumuladas en gran parte tanto en cuencas sin-orogénicas transtensionales como contraccionales.

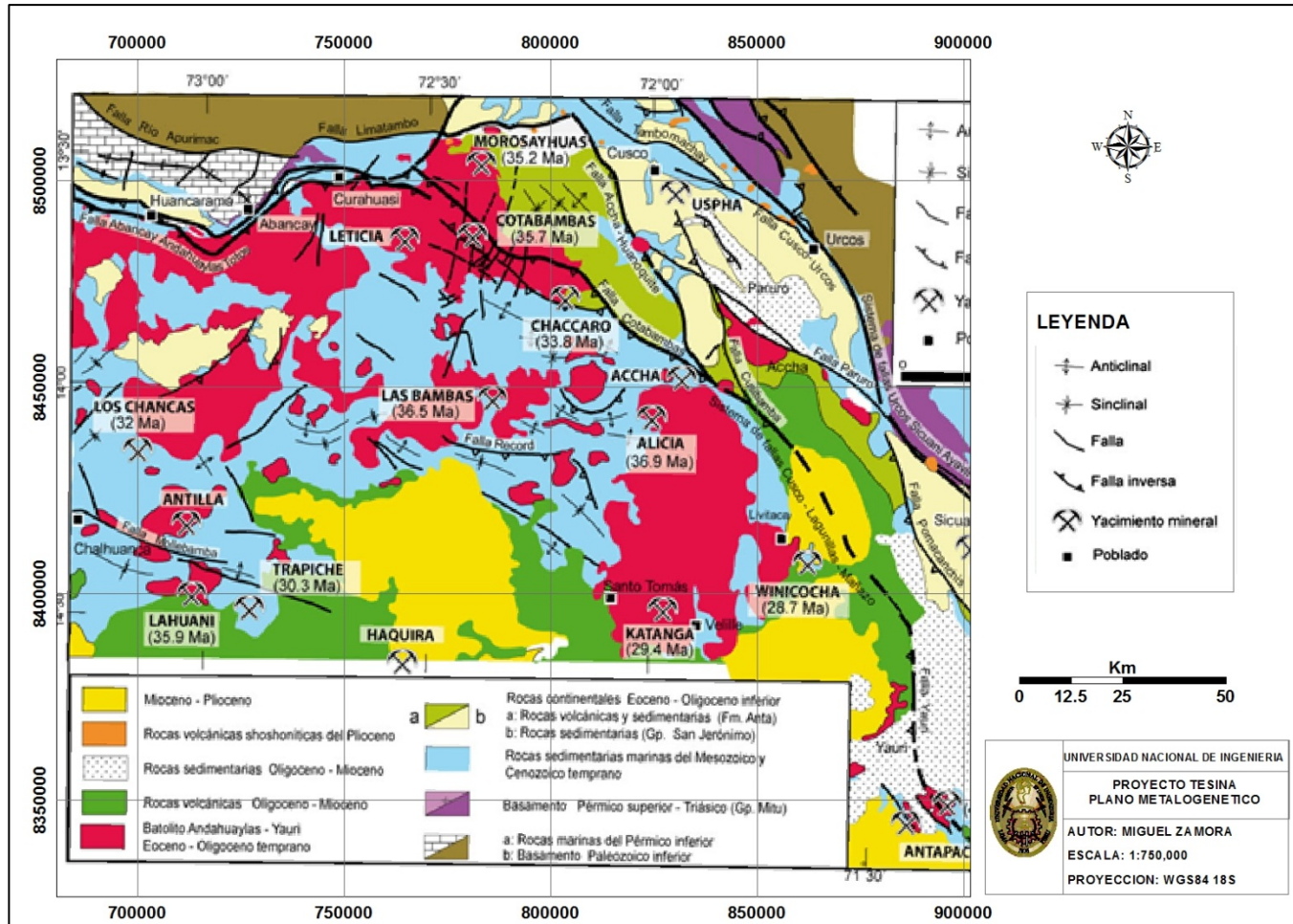


Figura 2. 2 Geología regional del Batolito de Andahuaylas-Yauri. Modificado de Carlotto (1998), Perelló et al (2003).

2.2.1. Estratigrafía

Basamento Precambriano Y Paleozoico

Los gneis precámbricos en el río Pichari, a aprox. 130 km al NW del Cuzco (Carlotto, 1998), corresponden a la probable extensión del macizo del Marañón expuestos más hacia el norte, y son interpretados por Ramos y Alema (2000) como remanentes de los terrenos perigondwanenses unidos al cratón amazónicos en el Paleozoico temprano. Las rocas Paleozoicas en la región incluyen más de 10000 m de rocas volcano-sedimentarias, tanto marinas como continentales de edad Cámbrico a comienzos del Pérmico (Marocco 1978, Carlotto et al., 1996^a; Carlotto et al., 1997). La parte superior del basamento preandino está dominado por más de 1000 m de rocas volcánicas y clásticas del Grupo Mitu (Pérmico a Triásico temprano).

Estratigrafía Mesozoica Y Cenozoica

La estratigrafía mesozoica y cenozoica de la región esta principalmente compuesta de secuencias sedimentarias Jurásicas y Cretácicas depositada en una configuración paleogeografica dominada por dos principales cuencas (Cuencas Oriental y Occidental Peruanas) separadas por el basamento altiplánico Cusco – Puno (Carlotto et al., 1993; Jaillard and Soler, 1996). La cuenca occidental, también conocida como la cuenca Arequipa (Vicente et al., 1982), corresponde a la cordillera occidental presente. Esta contiene una pila sedimentaria (del Jurásico medio al Cretácico tardío) con más de 4500 m de potencia, las partes inferiores se encuentran dominadas de turbiditas, la parte central de arenitas cuarzosas, hacia la parte superior de abundantes calizas (Vicente et al., 1982; Jaillard y Santander, 1992). El borde noreste de esta cuenca, coincidente con la franja Andahuaylas – Yauri, incluye los grupos Lagunillas

y Yura (Marocco, 1978), compuesta por calizas y lutitas del Jurásico temprano y cuarzo arenitas del Jurásico intermedio al tardío, con una potencia total de aproximadamente 800 m. El tope de la secuencia contiene calizas micriticas, lutitas negras, y nódulos de chert de la Formación Ferrobamba (Marocco, 1978; Pecho, 1981). El altiplano Cuzco – Puno incluye aproximadamente 900 m de capas rojas terrígenas interestratificadas con lutitas, calizas y yeso (Carlotto et al., 1993; Jaillard et al. 1994). Estas rocas son de edad Jurasico tardío a Paleoceno. La cuenca oriental, también conocida como la cuenca Putina (Jaillard, 1994), está formado por varias secuencias clásticas y calcáreas marinas del Cretáceo, con una profundidad total de aproximadamente de 2600 m (Jaillard et al., 1993; Jaillard, 1994; Cárdenas et al., 1997).

Estratigrafía Del Eoceno Al Oligoceno Temprano

Dos unidades principales caracterizan la estratigrafía del Eoceno al Oligoceno temprano en la región, los sedimentos del Grupo San Jerónimo y los volcánicos de la Formación Anta, estas unidades sobreyacen en discordancia a las secuencias mesozoicas y cenozoicas anteriormente descritas. El Grupo San Jerónimo comprende dos formaciones principales (Kayra y Soncco), con una profundidad total de aproximadamente 4500 m, compuesta por estratos de capas rojas terrígenas (areniscas, lutitas, areniscas pelíticas, y microconglomerados volcánicos) interestratificados con horizontes tufaceos hacia el tope. La edad del Grupo San Jerónimo es definida por sus relaciones estratificadas (este se superpone en discordancia a los estratos con fosiles de plantas del Paleoceno al Eoceno temprano) y en la edades del K – Ar y Ar – Ar de 29 ± 1.4 Ma y 30.84 ± 0.83 Ma, respectivamente. Se interpreta que la sedimentación tomo lugar inicialmente en un

ambiente fluvial que progresa dentro de un control estructural, Cuenca Pull – Apart (Córdova, 1986; Noblet et al., 1987; Marocco and Noblet, 1990; Chávez et al., 1996). Entre Cusco y Sicuani las areniscas basales de la Formación Soncco incluye horizontes de mineralización estratiforme de cobre, hasta varios metros de espesor, con calcocita y bornita hipógena, y óxidos de cobre supergenos (Cárdenas et al., 1999), los cuales tienen similitudes con las capas rojas del altiplano Boliviano (ejemplo Corocoro; Sillitoe, 1989) y en el Norte de Chile (San Bartolo; Travisany, 1979). El Grupo San Jerónimo es equivalente al Grupo Puno del altiplano Peruano al Sureste de la región estudiada, donde es sobreyacido por horizontes volcánicos del Grupo Tacaza (Klinck et al., 1986; Clark et al., 1990; Jaillard and Santander, 1992). Más al Sur, secuencias sedimentarias, conglomeráticas y de capas rojas son conocidas en el altiplano Boliviano (por ejemplo, los horizontes inferiores de la Formación Tiwanaku y las formaciones Berenguela y Turco; Héral et al., 1993), en la Puna del noroeste de Argentina (formaciones Geste and Quiñoa; Alonso, 1992; Kraemer et al., 1999; Coutand et al., 2001), y en el Salar de Atacama al norte de Chile (la parte superior del Grupo Purilactis; Mpodozis et al., 1999).

La Formación Anta es una secuencia que supera los 1000 m caracterizada por un miembro inferior con flujos de lava andesíticos y flujos piroclastos dacíticos localmente interestratificados con conglomerados aluviales, y en el miembro superior de conglomerados fluviales con flujos andesíticos y basalto andesíticos. Su edad está definida en Eoceno medio al Oligoceno temprano por relaciones estratificadas y geocronología de K – Ar (Carlier et al., 1996; Carlotto, 1998). Al suroeste de Cusco, dos flujos dacíticos ricos en biotita de la parte central de la Formación dieron edades para K- Ar de 38.4 ± 1.5 y 37.9 ± 1.4 Ma, y un horizonte basáltico de la parte

superior dio edades en K –Ar de 29.9 ± 1.1 Ma (Carlotto, 1998). Las andesitas y conglomerados de la Formación Anta han sido interpretados como equivalentes estratigráficos de las capas rojas del Grupo San Jerónimo, con los productos de la erosión de la Formación Anta alimentando la cuenca San Jerónimo ubicado al noreste. Las características granocrecientes de la secuencia, con conglomerados aluviales y fluviales dominados por clastos volcánicos y plutónicos en la parte superior, son interpretados como reflejo del rejuvenecimiento topográfico de las regiones de origen, en respuesta a la creciente elevación tectónica regional, con la sedimentación en un estilo piggy-back de la cuenca (Carlotto, 1998).

Estratigrafía Del Oligoceno Tardío Al Mioceno

Los depósitos sedimentarios del Oligoceno tardío al Mioceno de la región incluyen las formaciones Punacancha (de 1000 – 1500 m de espesor) y Paruro (mayor a 1100 m de espesor). Estas son dominadas por lutitas rojas granocrecientes y areniscas, con yeso y conglomerados siendo característicos en la partes superiores de la secuencia. Se interpreta que la sedimentación se llevó a cabo en un ambiente fluvial con ríos trezados, llanuras de inundación y abanicos fluviales en cuencas estructuralmente controladas (Carlotto et al., 1996a, 1997; Jaimes et al., 1997; Romero et al., 1997). Las edades de estas secuencias se basa en relaciones estratigráficas y flora fósil, así como en análisis de K – Ar da edades de 10.1 ± 0.5 Ma para horizontes tufaceos cerca a la base de la Formación Paruro (Carlotto et al., 1997).

Las rocas volcánicas en la región y en las áreas cercanas están largamente dominadas por secuencias calcoalcalinas de la cordillera occidental y el Altiplano, e incluye los grupos Tacaza (Oligoceno) y Sillapaca (Mioceno), además de estas, una serie de

pequeños centros volcánicos shoshoníticos de edad Pliocénica – Cuaternaria se presentan en la franja. El Grupo Tacaza está compuesto principalmente de tufos traquiandesíticos, andesíticos y riolíticos (Klinck et al., 1986; Wasteneys, 1990; Carlotto, 1986), con rocas shoshoníticas siendo importantes en el área de Santa Lucía, al sureste de Yauri (Clark et al., 1990; Sandeman et al., 1995), este vulcanismo shoshonítico se dio entre los 32 a 24 Ma (Clark et al., 1990; Sandeman et al., 1995), mientras que más lejos hacia el sur, a lo largo del arco frontal, el equivalente a los flujos piroclásticos Tacaza se encuentran intercalados con las molazas de la Formación Moquegua. En la región de Andahuaylas – Yauri, edades similares de rocas shoshoníticas se interpretan como parte de la parte superior de la Formación Anta, esto implica un solapamiento temporal con las rocas de la Formación Tacaza. Las rocas del Grupo Sillapaca incluyen principalmente flujos dacíticos con andesitas subordinadas hacia el sureste de la franja (Carlotto, 1998), pulsos subvolcánicos dacíticos y tufos de flujos de cenizas en el área de Santa Lucía (Clark et al., 1990). Las rocas de Santa Lucía comprenden edades entre los 22 a 14 Ma (Clark et al., 1990; Sandeman et al., 1995); además en la región Puno un segundo evento efusivo también asignado al Grupo Sillapaca, da edades entre 14 y 12 Ma (Klinck et al., 1986).

Si las correlaciones presentadas son correctas, se puede especular que la superposición temporal del vulcanismo del oligoceno al mioceno de la cordillera occidental, el Altiplano y la cordillera oriental (Sandeman et al., 1995) también aplicaría a la franja Andahuaylas – Yauri.

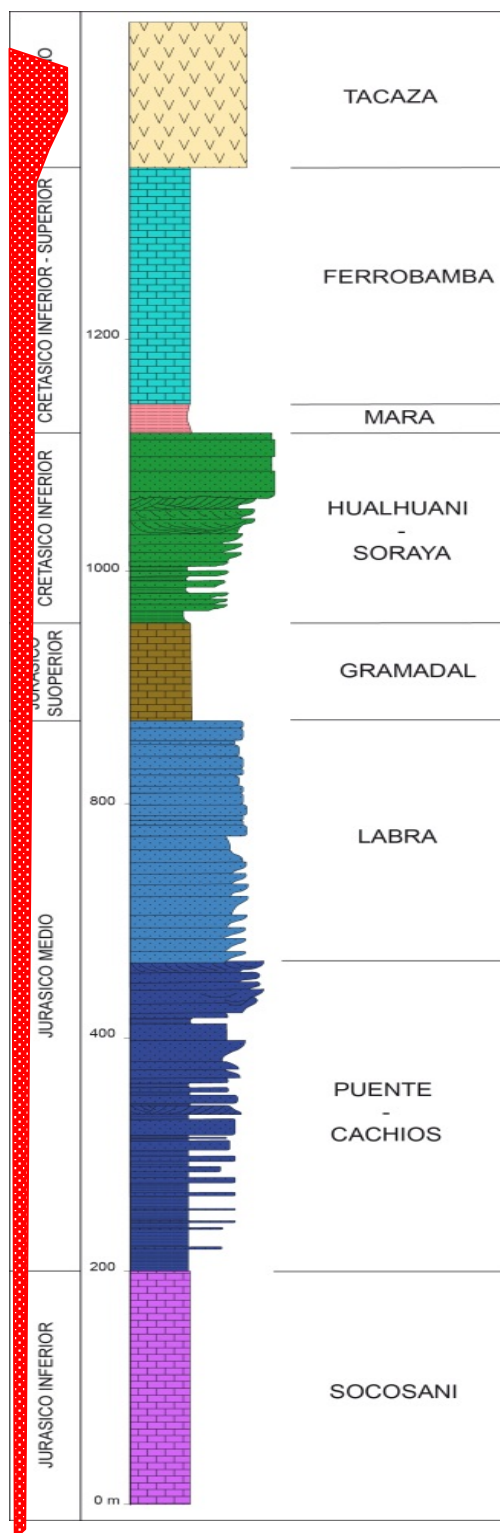


Figura 2. 3 Columnas Estratigráficas Regionales (Modificado de Carlotto et al. 2012)

Intrusivos o Magmatismo

Batolito Andahuaylas – Yauri

Hacia el borde noreste de la cordillera occidental afloran grandes cuerpos de rocas ígneas que en conjunto forman el batolito Andahuaylas – Yauri (Carlier et al., 1989; Bonhomme and Carlier, 1990), también conocido como el batolito de Abancay (Marocco, 1975, 1978) o Apurimac (Pecho, 1981; Mendivil & Davila, 1994). El batolito está compuesto de múltiples intrusivos que afloran esporádicamente por más de 300 km entre los pueblos de Andahuaylas en el noroeste y Yauri al sureste.

En términos generales, el batolito incluye intrusivos tempranos (gabro, troctolita, gabro olivino, gabro diorita y dioritas) seguido de rocas de composición intermedia (monzodioritas, cuarzo dioritas, cuarzo monzodioritas y granodioritas) (Carlier et al., 1989; Bonhomme and Carlier, 1990; Carlotto, 1998). Rocas subvolcánicas de composición predominantemente granodiorítica/dacítica, localmente asociados con mineralización estilo pórfido, que representan las fases terminales de intrusión. El cúmulo de rocas de las etapas tempranas son expuestas principalmente a lo largo del borde norte del batolito entre Curahuasi y Limatambo (Carlier et al., 1989; Ligarda et al., 1993) en donde los trabajos de petrología realizados por Carlier determinaron que estas rocas cristalizaron en el fondo de cámaras magmáticas someras, con temperaturas de emplazamiento de aproximadamente 1000°C y condiciones de presión de entre 2 a 3 kbars. Los intrusivos de las etapas intermedias son ligeramente grises en color, muestran un tamaño de grano de medio a grueso, y texturas equigranulares a ligeramente porfíricas, y en las fases ferromagnesianas dominantes tenemos más anfíboles que biotitas, con piroxenos en los miembros más máficas.

Estos intrusivos están distribuidos a lo largo de todo el batolito y constituyen la principal masa del batolito. Las aureolas de contacto dentro de las rocas locales son extremadamente irregulares en sus formas, tamaños y composiciones, aunque los skarn de granates son típicamente formados en rocas calcáreas (Formación Ferrobamba) y los hornfels de biotita y cordierita se desarrollan en áreas en las que se presentan facies más pelíticas de las formaciones mesozoicas (Carlotto, 1998).

La edad del batolito se ve determinada por las relaciones estratigráficas regionales y los datos geocronológicos (Tabla 2.1). Las rocas del batolito intruyen mayormente a las rocas mesozoicas y cenozoicas así como a la Formación Anta, del eoceno medio al oligoceno temprano. Además, varios estudios de K-Ar han sido realizado como reporta Carlier et al. (1996), Carlotto (1998), y Perello et al. (2002), junto con una serie de edades obtenidas durante el curso del presente estudio, confirman una edad Eoceno medio a Oligoceno temprano (48 – 32 Ma) para el batolito de Andahuaylas – Yauri.

Otros Intrusivos

La actividad intrusiva post batolito en la franja está caracterizada por una serie de pequeños stocks de composición sienítica que han sido datados por el método K – Ar y se obtuvieron edades de aproximadamente 28 Ma en el área de Curahuasi (Carlotto, 1998). Estas intrusiones son parte de una gran provincia magmática alcalina que también incluyen basanitas, fonotefritas y traquitas de la región de Ayaviri, con edades que van desde 29 a 26 Ma (Carlier et al., 1996, 2000).

N° Muestra	Latitud	Longitud	Mineral	K (%)	Ar Radiogenico (nl/g)	Ar (at. %)	Age $\pm 2\sigma$
LIVIKAR 02	14°18'58"	71°44'10"	biotita	7.041	11.155	31	40.3 \pm 1.0
PORKAR 02	14°29'34"	71°36'02"	biotita	7.212	10.1	25	35.7 \pm 0.9
KATKAR 05	14°26'28"	71°54'30"	biotita	5.066	6.278	13	31.6 \pm 0.8
COTKAR 01	13°45'03"	72°21'23"	biotita	7.556	1.335	17	43.2 \pm 1.1
COTKAR 02	13°41'11"	72°21'14"	Anfibol	0.812	1.271	34	39.8 \pm 1.5
PROGKAR 01	14°06'02"	72°28'35"	biotita	6.833	9.171	26	34.2 \pm 0.9
PROGKAR 02	14°00'54"	72°28'28"	Anfibol	0.331	0.516	53	39.7 \pm 1.9
LAHUKAR 01	14°25'08"	73°00'45"	biotita	7.493	10.544	27	35.8 \pm 0.9
CHALCOKAR 02	14°03'37"	72°18'21"	Anfibol	0.504	0.751	36	37.9 \pm 1.4

Tabla 2. 1 Edades K-Ar de varias fases intrusivas en el Batolito Andahuaylas – Yauri

2.2.2. Tectónica

Las Estructuras en la región, en términos generales, mal delimitado y entendido con algunas excepciones (Marocco, 1975; Pecho, 1981; Cabrera et al., 1991; Carlotto et al., 1996b; Carlotto, 1998), los mapas regionales carecen de detalle en los datos estructurales que nos ayuden a entender la tectónica regional como un todo, el borde noreste de la cordillera occidental es dominado por las secuencias mesozoicas y cenozoicas que han sido deformadas moderada a intensamente a lo en grandes pliegues, con tendencias de convergencia predominantemente norte (Fig 2.2). El plegamiento intenso en la región involucra secuencias carbonatadas y lutaceas (Formación Ferrobamba, y sus formaciones equivalentes) que se envuelven alrededor de núcleos de cuarzo arenita del Grupo Yura, fallas inversas de bajo y alto ángulo acompañan localmente las deformaciones y plegamientos más intensos, particularmente en los cuadrángulos sur de la franja (Pecho, 1981), con la mayoría de las fallas mapeadas mostrando una vergencia hacia el norte.

El límite entre la cordillera occidental y el altiplano está caracterizado por dos sistemas de fallas de tendencia noroeste (Limatambo – Ayaviri y Abancay – Yauri) con longitudes expuestas mayores a 300 km (Fig 2.1). Ambos sistemas están conformados por varios segmentos o pequeñas fallas con corridas individuales

mayores a 50 km que muestran movimientos inversos de alto ángulo y de desgarre. En la vecindad de la deflexión de Abancay (Marocco, 1978), estas estructuras sobreponen rocas plutónicas Paleozoicas sobre secuencias de cobertura más jóvenes. Más al este, cerca de Curahuasi, colocan facies profundas del batolito Andahuaylas – Yauri en el tope de intrusiones jóvenes del mismo batolito o sobre horizontes volcánicos de la Formación Anta (Carlotto, 1998). Más al Sureste, en el área de Santa Lucia, estructuras inversas de alto ángulo pertenecientes a la extensión sureste de la falla Abancay – Yauri ha sido interpretada como asociada con un evento de deformación mayor de plegamiento inverso (Jaillard and Santander, 1992). El corredor de 300 km de largo y 10 a 50 km de ancho definido por los sistemas de fallas Limatambo – Ayaviri y Abancay – Yauri está ocupado por rocas sinorogénicas de la Formación Anta y el Grupo San Jerónimo. Se infiere que los dos principales sistemas de fallas ha sido activo durante el mesozoico y de haber controlado en gran medida la forma y extensión del alto Cuzco-Puno en la región (Carlotto, 1998) por lo tanto, constituirían estructuras reactivadas durante la deformación andina (Jaillard and Santander, 1992; Benavides-Cáceres, 1999).

El Altiplano se caracteriza por las secuencias sinorogénicas que rellenaron las cuencas del Grupo San Jerónimo y las formaciones Punacancha y Paruro. Estas secuencias muestran intensas estructuras de deformación sinsedimentarias incluyendo plegamiento apretado y discordancias progresivas controladas por fallas (Carlotto, 1998).

2.2.3. Alteraciones Hidrotermales

Dentro de la franja Andahuaylas – Yauri se han reconocido seis diferentes tipos de alteración hidrotermal principalmente relacionados a sistemas porfiríticos, estos son, potásica, propilitica, sericitica (filica), argilica avanzada y calco silicatos, así como un tipo de alteración caracterizado por sericita, clorita, y arcillas (illita – smectita). Esta última fue inicialmente llamada alteración tipo SCC (sericite, chlorite, clays) por Sillitoe en los pórfidos que estudio en las filipinas y que hoy en día se conoce como alteración argilica intermedia (Sillitoe, 2000), como adicional a las alteraciones observadas se pueden encontrar en algunos prospectos una alteración mixta cálcica – potásica.

2.2.4. Mineralización

La mayoría de los depósitos de pórfidos y prospectos de Andahuaylas-Yauri poseen una mineralización que es variable, emplazada dentro los stocks porfiríticos y en las rocas adyacentes locales. Los siguientes ejemplos documentan la gran variedad observada en la franja.

1. Los skarns mineralizados están presente en las rocas locales donde los stocks porfiríticos han intruido rocas carbonatadas de la Formación Ferrobamba o alguna unidad equivalente, como en Tintaya, Alicia y Chalcobamba
2. Los stocks porfiríticos constituyen el principal hospedante del mineral en zonas donde las rocas de facies terrígenas dominan la litología por ejemplo en el Grupo Yura y sus unidades equivalentes, como en Lahuani, Cristo de los Andes, Los Chancas, y Los Quechua, o en los

volcanoclásticos y las capas rojas de la Formación Anta, como en el cluster Morosayhuas.

3. El mineral parece estar distribuido uniformemente entre stocks porfiríticos y rocas cajas, donde las intrusiones del batolito Andahuaylas - Yauri constituyen la roca local dominante, como en Cotabambas.

El cluster Tintaya ejemplifica muy bien la diversidad de estilos de mineralización y rocas mineralizadas presentes en la franja, skarns asociados a pórfidos de baja ley como Chabuca y Coroccohuayco; stocks porfiríticos con menor mineralización tipo skarn como en Los Quechua; y stocks porfiríticos y rocas dioríticas locales con pequeños desarrollos de mineralización tipo skarn en Antappaccay (Jones et al., 2000; Fierro et al., 2002).

2.3. Geología Económica

La franja está definida por 31 sistemas con estilos de alteración y mineralización tipo pórfido, incluyendo 19 sistemas agrupados en 5 clúster principales, además de 12 centros individuales y una centena de ocurrencias de mineralización de Fe-Cu tipo Skarn ricos en magnetita (Figura 2.4).

Los stocks porfiríticos están dominados por intrusivos de composición granodiorítica calco alcalinos con biotita y anfíbol, aunque localmente se presentan stocks monzograníticos, monzoníticos, cuarzo monzoníticos y monzodioríticos.

La alteración hidrotermal está representada por ensambles sericita – arcilla – clorita, potásico, cuarzo – sericita y propilitica; asociaciones de alteración cálcica – potásica y argillica avanzada se encuentran localmente representadas, y ensambles de

minerales calco – silicatados con mineralización tipo skarn ocurren en lugares donde predominan rocas carbonatadas.

Los depósitos y prospectos tipo Pórfido de Cobre de la franja van desde ricos en oro y pobres en molibdeno (ej. Cotabambas), pasando por los que presentan ambos elementos (ej. Tintaya, Los Chancas), a los relativamente ricos en molibdeno y pobres en oro (ej. Lahuani); también están presentes los sistemas porfiríticos de solo oro (ej. Morosayhuas). Los pórfidos de cobre ricos en oro son ricos en magnetita hidrotermal y muestran una correlación positiva entre el cobre y el oro en la alteración potásica. La mayoría de la mineralización hipógena de Cu (Au-Mo) se presenta como calcopirita – bornita, muy asociado a los estadios tempranos de la alteración potásica, la cual en muchos depósitos y prospectos esta variablemente sobreimpuesta por alteración sericita – arcilla – clorita con una reducción en el cobre.

Muchos sistemas porfiríticos de cobre de la franja carecen de zonas económicamente significantes de zonas de enriquecimiento supergeno. Esto debido a su bajo contenido de pirita, al desarrollo restringido de alteración cuarzo – sericita, y a las altas capacidades de neutralización de las zonas de alteración potásica y las rocas carbonatadas así como también a factores geomorfológicos, por ejemplo encapes lixiviados son irregulares, típicamente goetíticos, y con contenidos de óxidos de cobre, desarrollados por oxidación in situ de calcopirita (bornita) con baja pirita. Pórfidos de cobre emplazados en rocas clásticas del Grupo Yura y algunas fases del batolito pueden desarrollar enriquecimiento supergeno de calcocita apreciables en zonas favorables estructural y litológicamente.

Un modelo para la región sugiere que los magmas calco alcalinos del batolito y la subsecuente mineralización tipo pórfido fueron generados durante un evento de subducción plana, el cual activo el acortamiento cortical, el tectonismo y el levantamiento asignado a la orogenia Inca. El acortamiento de la corteza superior habría impedido el rápido ascenso del magma favoreciendo la acumulación del fluido en grandes cámaras las cuales, a profundidades apropiadas en la corteza superficial, han promovido el emplazamiento de pórfidos de cobre de gran escala. Reconstrucciones geodinámicas del periodo de subducción plana del Eoceno tardío y el Oligoceno temprano en los andes centrales sugieren que el emplazamiento del batolito se llevó a cabo en un corredor de inflexión en la zona de subducción ampliamente coincidente con la posición actual de la deflexión de Abancay. Similarmente, evidencias del sureste del Perú sugiere que la franja Andahuaylas – Yauri sea la continuación de la franja de pórfidos de cobre del Eoceno tardío – Oligoceno temprano del norte de Chile y que los procesos de subducción plana en el sur del Perú también han tenido lugar en el norte de Chile entre 45- 35 Ma.

Deposit	Tonnage(x10)	Cu (%)	Au(g/t)	Mo (%)
<u>Tintaya district</u>				
Antapaccay	383	0.89	0.16	n.a
Coroccohuayco	155	1.57	0.16	n.a
Ccatun Pucara	24	1.44	n.a	n.a
Quechua	300	0.68	n.a	n.a
Tintaya	139	1.39	0.23	n.a
<u>Cotabambas Area</u>				
Azulccacca	24	0.42	0.39	<0.01
Ccalla	112	0.62	0.36	<0.01
LosChancas	200	1	0.12	0.08

Tabla 2. 2 Recurso Geológicos Estimados De Los Principales Depósitos De La Franja Andahuaylas - Yauri (Perello, 2003).

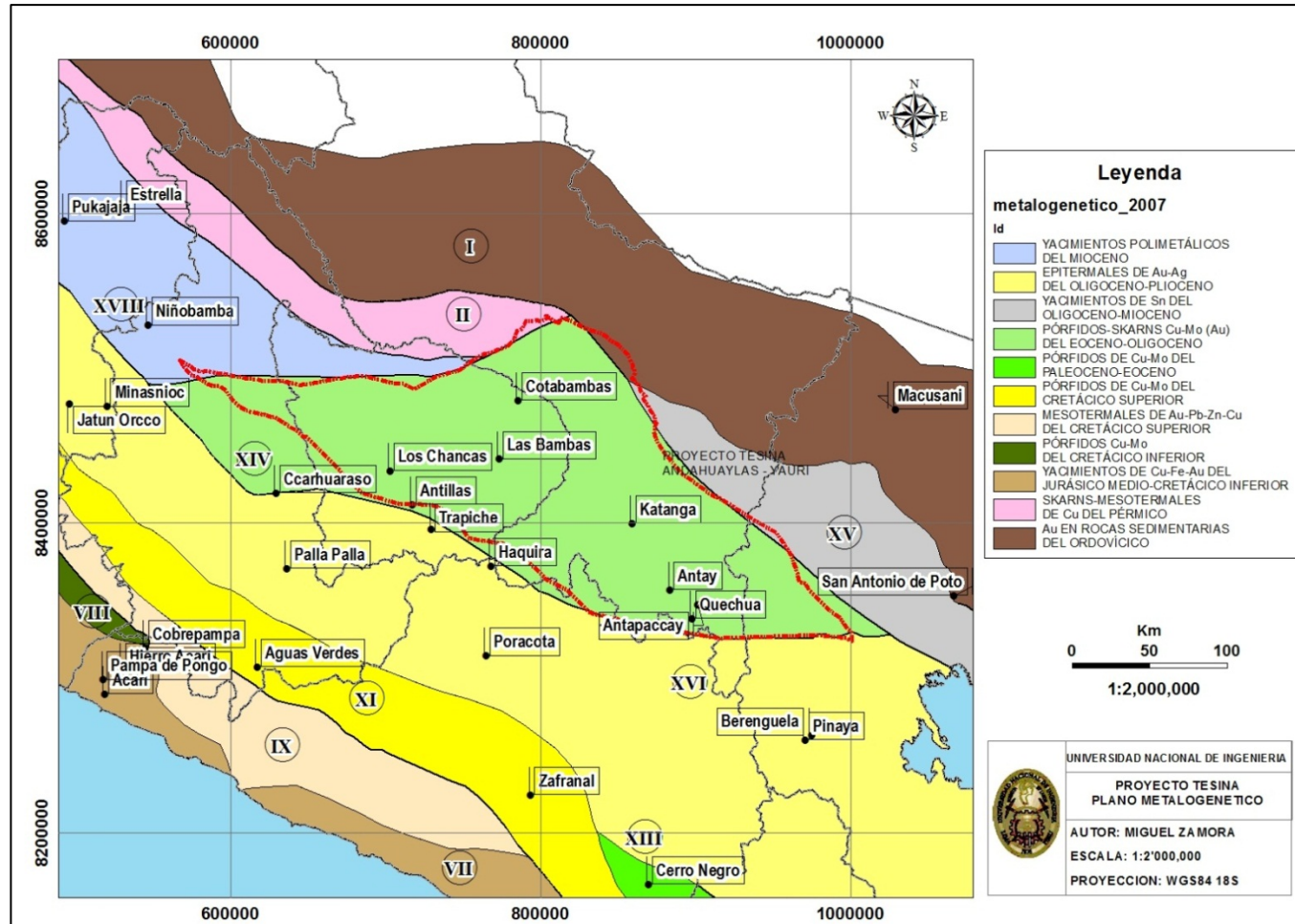


Figura 2.4 Franja Metalogénica XV - Pórfidos-Skarns Cu-Mo (Au) Del Eoceno-Oligoceno, dentro de la cual se encuentra enmarcada el área de estudio de este trabajo.

CAPITULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

3.1. Conceptos Generales

En este apartado, y con el fin de facilitar el entendimiento del presente trabajo, se ha considerado oportuno presentar una síntesis de los conceptos básicos acerca de la metodología empleada para la determinación de las zonas favorables para la exploración del tipo de yacimiento estudiado. Estos conceptos se refieren a las herramientas empleadas (los SIG) y metodología de ponderación de las evidencias (para la determinación de la favorabilidad mineral).

3.1.1. Estadística Bayesiana Y Ponderación De Las Evidencias O

“Weight Of Evidences”

Para un correcto entendimiento de la metodología utilizada para el análisis de prospectividad mineral, es apropiado describir algunos fundamentos básicos de la teoría de probabilidades y la estadística bayesiana que son los pilares sobre los cuales

se basan la metodología de la ponderación de la evidencias utilizado para el análisis de prospectividad.

Teoría de Probabilidades

La definición de probabilidad es una tarea complicada. Una forma es a través de la frecuencia relativa de resultados para una serie infinita de eventos. Según esta perspectiva la razón de considerar que la probabilidad de obtener cara al lanzar una moneda es 0.5, esto quiere decir que en una serie infinita de lanzamientos observaríamos este resultado el 50% de las veces. La definición anterior constituye la base de la estadística clásica.

Otra forma de definir la probabilidad es a través de la representación subjetiva de la incertidumbre sobre los eventos. Cuando se afirma que la probabilidad de obtener cara en una moneda es 0.5 se asume que la moneda es justa y que a partir de nuestra experiencia a priori sabemos que las caras se obtienen el 50 % de las veces. Esta última definición es la base del pensamiento Bayesiano el cual considera, que existen elementos subjetivos que juegan un rol importante en el análisis de la incertidumbre.

En cualquiera de las dos definiciones se requiere conocer los axiomas fundamentales de la probabilidad.

Se representa la probabilidad de un evento particular E como $\Pr(E)$. Todos los eventos posibles de un experimento constituyen el espacio muestral S, y la suma de las probabilidades de todos estos eventos definidos en S es 1.

$$\sum_{\forall E \in S} \Pr(E) = 1$$

Si el espacio muestral es continuo entonces debe integrarse en lugar de sumar. Si se está interesado en la ocurrencia del evento A o el evento B se usa la siguiente regla:

$$\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A \cap B)$$

Donde $\Pr(A \cap B)$ representa la probabilidad de ocurrencia del evento A y el evento B.

Existen dos reglas de probabilidad para probabilidades conjuntas. Primero:

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \Pr(B)$$

Si y solo si A y B son eventos independientes. Segundo, si A y B no son eventos independientes entonces:

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A|B) \Pr(B)$$

Que puede expresarse como:

$$\Pr(A|B) = \frac{\Pr(A \cap B)}{\Pr(B)}$$

Estadística Bayesiana

Supongamos que en un área (T) de 2 km x 2 km, existen 10 ocurrencias minerales de un tipo D (Figura 3.1), por lo tanto la probabilidad inicial de que en el área se presente un yacimiento del tipo D está dado por:

$$Pr\{D\} = N\{D\} / N\{T\}$$

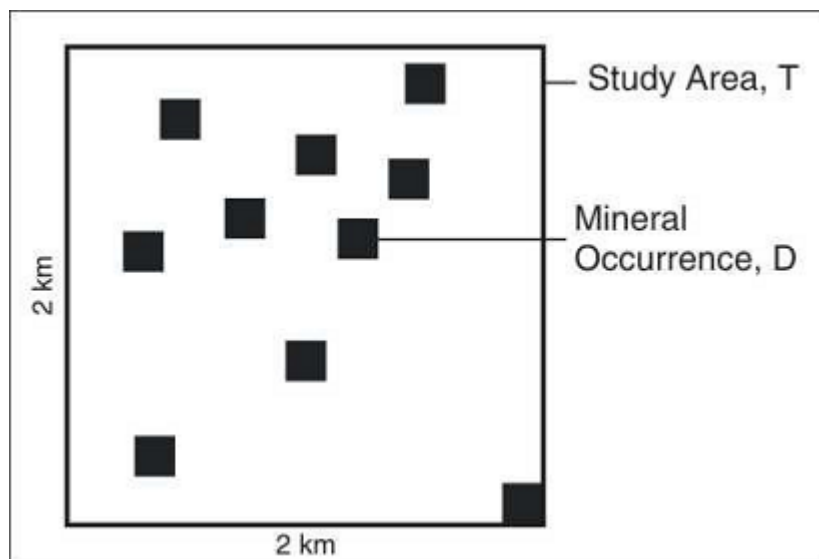


Figura 3.1 Ejemplo de Probabilidad Previa; Área de Estudio T de 2 x 2 km², dentro del cual se encuentra 10 ocurrencias minerales del tipo D (P. Honarvar and G. Squires, 2006).

Donde,

T= Área de Estudio

D= Ocurrencia mineral

N {D} = número de celdas unitarias que contienen un deposito u ocurrencia mineral.

N {T} = número de celdas unitarias dentro del área de estudio.

Consideraciones:

Celda unitaria= 0.1 km x0.1 km

$$Pr\{D\} = \frac{N\{D\}}{N\{T\}} = \frac{10}{400} = 2.5 \%$$

A esta llamada probabilidad inicial se le puede condicionar debido a la presencia de nuevas evidencias (Figura 3.2), lo que resultaría en una probabilidad posterior que está dada por:

$$Pr\{D|B\} = Pr\{D\} * Pr\{B|D\}/Pr\{B\}$$

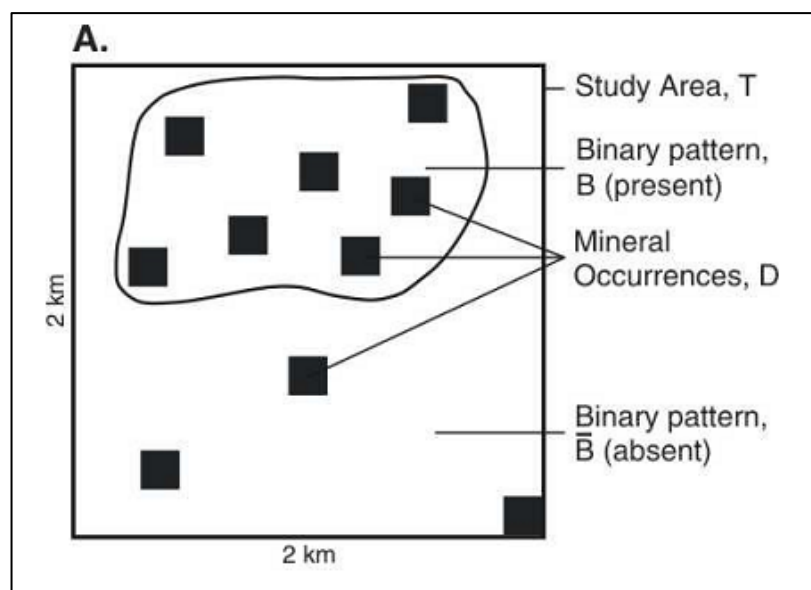


Figura 3.2 Probabilidad Posterior, La misma área de estudio T de 2 x 2 km², con las ocurrencias minerales del tipo D presenta un nuevo patrón binario que se utiliza como evidencia para el cálculo de la probabilidad posterior (P. Honarvar and G. Squires).

$$Pr\{B|D\} = Pr\{B \cap D\}/Pr\{D\}$$

$$Pr\{B|D\} = \frac{7}{10} = 70 \%$$

$$Pr\{B\} = \frac{N\{B\}}{N\{T\}} = \frac{100}{400} = 25 \%$$

Por lo tanto:

$$Pr\{D|B\} = Pr\{D\} * Pr\{B|D\}/Pr\{B\}$$

$$Pr\{D|B\} = 2.5 * \frac{70}{25} = 7 \%$$

En conclusión, Esto quiere decir que la probabilidad de encontrar una ocurrencia D se incrementa de 2.5 a 7 % debido a la evidencia B

Teorema de Bayes para Probabilidades Puntuales

El teorema de Bayes aplicado a las probabilidades puntuales es:

$$Pr(B|A) = \frac{Pr(A|B) Pr(B)}{Pr(A)}$$

En el denominador Pr (A) es la probabilidad marginal del evento A, también llamada probabilidad total. Si el espacio muestral es discreto:

$$Pr(A) = \sum_{B_i \in S_B} Pr(A|B_i) Pr(B_i)$$

Volviendo al ejemplo, Se tienen dos eventos: E1 = Presencia de la ocurrencia y E2 = La ausencia de dicha ocurrencia. Sin embargo, para calcular la probabilidad de interés para el geólogo de exploraciones se requiere cierta información a priori sobre la probabilidad de ocurrencia de un tipo de depósito específico.

La información a priori necesaria es la probabilidad marginal de ocurrencia del tipo de depósito sin saber nada más que en el lugar existen 10 ocurrencias del tipo buscado. Esta información es considerada a priori porque es la que se tiene antes de conocer el resultado de la prueba. Se podía considerar que sin ninguna información adicional la probabilidad de ocurrencia es aproximadamente 2.5 %. Usando el teorema de Bayes se obtiene que la probabilidad que se encuentre otro depósito dada la evidencia B sea 7%. Usando la terminología Bayesiana la probabilidad anterior es llamada a probabilidad posterior ya que es obtenida luego de observar la data (debido a la nueva evidencia presentada).

Suponga que debido a los estudios realizados en el área se presentan nueva evidencia. Se puede utilizar la probabilidad calculada en la primera prueba como probabilidad a priori para calcular la probabilidad posterior actualizada.

Este proceso de repetir la prueba y recalculando la probabilidad de interés es el proceso básico en la estadística Bayesiana. Desde esta perspectiva se puede tener cierta información inicial sobre algún evento que puede actualizarse con información nueva para obtener una probabilidad posterior. Esta probabilidad posterior puede ser utilizada como probabilidad a priori en un siguiente análisis. Desde el punto de vista Bayesiano se trata de una estrategia apropiada para conducir el análisis científico.

Ponderación de las Evidencias o “Weight of Evidences”

La ponderación de las evidencias o WofE, por sus siglas en inglés, es un método cuantitativo para la combinación de pruebas en apoyo de una hipótesis. El método fue desarrollado originalmente como una aplicación no espacial en el diagnóstico médico, en el que las pruebas consistía en un conjunto de síntomas y la hipótesis era del tipo "el paciente tiene la enfermedad x". Para cada síntoma, se calculó un par de pesos, uno para la presencia de los síntomas, uno para la ausencia del síntoma. La magnitud de los pesos dependía de la asociación medida entre el síntoma y el patrón de la enfermedad en un Grupo grande de pacientes. Los pesos se podrían utilizar entonces para estimar la probabilidad de que un nuevo paciente pueda tener determinada enfermedad, basándose en la presencia o ausencia de síntomas. La ponderación de las evidencias (WofE) fue adaptada a finales de 1980 para el análisis de recursos minerales con Sistemas de Información Geográfica. En este caso, la evidencia consiste de un conjunto de conjuntos de datos de exploración (mapas), y la hipótesis es "esta ubicación es favorable para la aparición de depósito de tipo x". Los pesos se estiman a partir de la asociación medida entre las ocurrencias minerales conocidas y los valores en los mapas que se utilizarán como predictores. A continuación la hipótesis se evalúa varias veces para todas las posibles ubicaciones en el mapa utilizando los pesos calculados, produciendo un mapa de potencial mineral en el que se combina la evidencia de varias capas del mapa. El método pertenece a un Grupo de métodos adecuados para toma de decisiones multicriterios.

Similar a los métodos de regresión múltiple en estadísticas, los modelos de ponderación de evidencias para la combinación de las pruebas implican la estimación de la variable de respuesta (favorabilidad de depósitos minerales) y un conjunto de

variables predictores (conjuntos de datos de exploración en forma de mapa). La terminología para la ponderación de evidencia ha variado poco en las diversas publicaciones escritas al respecto. En este documento, se utilizan los siguientes términos.

Mapas probatorios: Se trata mapas o áreas de capas, en formato raster o vector (archivo shp o grd). Utilizado para la predicción de los objetivos puntuales (ocurrencias minerales). Los polígonos o celdas del grid de los temas evidenciales tienen dos o más valores (valores de clase). Por ejemplo, un mapa geológico puede tener dos o más valores que representan las clases (unidades de mapa) presentes. Aunque la ponderación de las evidencias se define originalmente para los mapas probatorios binarios (también llamado patrones binarios en varias publicaciones), también se puede aplicar a mapas con más de dos clases. Con frecuencia, los mapas probatorios multiclase se puede generalizar (simplificado) mediante la combinación de clases en un pequeño número de valores, lo que facilita la interpretación.

Puntos de Entrenamiento: Esta es un layer de puntos que consta de las ubicaciones en las que se sabe que los objetivos puntuales ocurren. Así, en la exploración de minerales, los puntos son los depósitos de minerales (minas, proyectos, ocurrencias, etc.) previamente descubiertas. Sin embargo, para otros estudios, los objetivos puntuales pueden consistir en la ubicación de los eventos sísmicos, intersecciones de fallas, la ubicación de manantiales y otros tipos de datos. El conjunto de puntos de ubicación son utilizados para calcular los pesos para cada mapa probatorio, un peso por clase, utilizando las relaciones de superposición entre los puntos y las diversas clases sobre el tema. Las características de los puntos de entrenamiento se llevan a

cabo en una tabla de atributos. Subconjuntos de puntos pueden ser seleccionados utilizando los valores de los atributos, como el tamaño del depósito, o el tipo de depósito. Sin embargo, los puntos se tratan como presente o ausente en el modelo, y no son ponderados por características tales como tamaño del depósito.

Celda Unitaria: Se supone que cada punto de entrenamiento ocupa una pequeña unidad de área, llamada celda unitaria. Con el fin de calcular la probabilidad de ocurrencia de un punto, se debe seleccionar una unidad de área. El resultado de los pesos de evidencia es un mapa que muestra la probabilidad de que una unidad de área contenga un punto. Por lo tanto los valores de probabilidad cambiarán con la elección del área de la celda unitaria. La celda unitaria es definida como un valor constante al inicio del proceso, y es la misma para todos los puntos de entrenamiento y los mapas probatorios. El área de la celda unitaria no está relacionada con el tamaño físico o influencia de los puntos, en este caso de los depósitos, y es independiente del tamaño de la celda del grid de los datos raster utilizados. Los valores de los pesos son relativamente independientes del área de la celda unitaria, si la unidad de área es pequeña.

Mapa de Respuesta: Este es un mapa de salida, en el que se expresa la probabilidad de que una unidad de área contenga un punto, calculado mediante la combinación de los pesos de las variables predictoras (mapas probatorios). El mapa de respuesta se clasifica generalmente en un pequeño número de valores representando favorabilidad relativa. Si los puntos de entrenamiento son depósitos minerales de un tipo particular, entonces, el mapa de respuesta mostrara una estimación del potencial mineral (también conocido como prospectividad mineral).

Conjunto de Datos de Exploración: referido al conjunto de datos digitales, tales como mapas geológicos, imágenes, datos geofísicos y estudios geoquímicos, imágenes captadas por teledetección, a menudo empleados por los geólogos de exploración en el proceso de exploración de minerales. Siempre hay un proceso de extracción de pruebas de los datos en bruto para ser usados en la predicción. Este proceso depende en gran medida en el modelo de exploración que se utiliza.

Modelo de Exploración: Existe un gran número de que han sido definidos para los diversos tipos de depósitos minerales, sobre la base de las características de depósito. Estos modelos de depósito ayudan a clasificar e identificar nuevas apariciones, y conducirá a una mejor comprensión de cómo se formaron los yacimientos, y servirá como una ayuda a la exploración. Sin embargo, estos se basan por lo general en las características del depósito y de sus alrededores inmediatos, y muchos de los diagnósticos característicos de un tipo de depósito de minerales no se pueden utilizar con conjuntos de datos regionales de exploración. El modelo de exploración, por otro lado, se refiere a las características de un tipo de depósito que puede ser identificada en conjuntos de datos regionales, tal como se utiliza en el proceso de exploración. Es importante tener en cuenta que la ausencia de pruebas puede ser tan importante como la presencia de evidencias y datos sobre asociaciones negativas entre los depósitos y determinados tipos de datos a menudo están mal documentados.

Área de Estudio: el área de estudio es un mapa binario que define la región de interés. Actúa como una máscara, y las áreas de los mapas probatorios y los puntos de entrenamiento fuera de la zona de estudio son ignorados en los cálculos de pesos y los mapas de salida.

La metodología WofE puede ser aplicado a mapas probatorios de clases binarias (que clasifican la presencia o ausencia de una característica específica) o, a mapas multiclase. Las evidencias binarias son relativamente más fáciles de interpretar, y las primeras publicaciones sobre ponderación de las evidencias fueron utilizadas sobre mapas binarios.

La interpretación de pesos y la combinación de mapas probatorios son más fácil con datos binarios que con datos de varias clases. Además, los pesos calculados para un pequeño número de clases son más robustos que los calculados usando un gran número de clases, y esto es particularmente crítico cuando un número relativamente pequeño de datos son utilizados como puntos de entrenamiento. Los mapas binarios producen pesos con pequeñas variaciones, y por lo tanto son más estables.

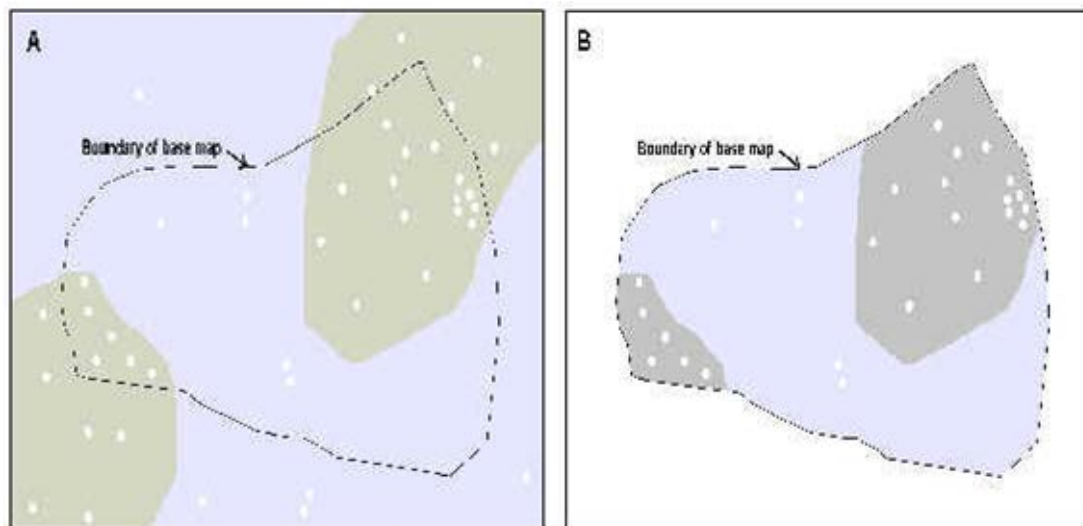


Figura 3.3 Área rectangular mostrando un tema binario, puntos de entrenamiento y el límite del área de estudio. (b) La misma área cortada por los límites del área de estudio, excluyendo los puntos y las áreas externas al área de estudio.

Dada un área cuya celda unitaria es $u \text{ km}^2$, el área del mapa base en celdas unitarias es:

$$A(T)/u = N(T)$$

Dónde:

- T es el mapa base
- $A()$ denota el área, y
- $N()$ denota la cantidad de celdas unitarias, no restringido a números enteros.

A continuación, dentro del mapa de base, el número de puntos de entrenamiento se denota como $N(D)$. En este ejemplo, $N(D)$ es siempre un número entero, e independiente de u .

Supongamos que el tema probatorio se denota con B , entonces $A(B)/u = N(B)$

Es el área en celdas unitarias de la región (polígonos vectoriales o celdas del grid), donde B está presente (el valor de clase = 2,). Del mismo modo,

$$A(\bar{B})/u = N(\bar{B})$$

Es la zona en celdas unitarias en la que B está ausente (valor de la clase = 1). Si no existen datos faltantes o vacíos, entonces;

$$N(B) + N(\bar{B}) = N(T)$$

Sin embargo, si hay regiones dentro de T donde B es desconocido (zonas sin estudios o con estudios incompletos), se emplea otra clase (con frecuencia el valor = 0) y por lo tanto

$$N(B) + N(\bar{B}) + N(\text{faltante}) = N(T)$$

Por el momento, vamos a suponer que $N(\text{faltante}) = 0$.

Mediante el uso de software de Sistemas de Información Geográfica, se puede fácilmente calcular $N(T)$, $N(B)$ y $N(\bar{B})$. También podemos contar el número de puntos de entrenamiento en B y en \bar{B} , denotado como $N(B \cap D)$ y $N(\bar{B} \cap D)$, respectivamente.

Los pesos proveen una medida de la asociación espacial entre los puntos y los mapas probatorios. El peso es calculado para cada clase de los temas probatorios. Un valor positivo del peso indica que hay más puntos de esa clase que ocurrirían debido a esa condición, por el contrario un valor negativo indica que se podrían encontrar menos puntos de lo esperado. El valor de 0, o cercanamente a 0, indicaría que los puntos de entrenamiento están distribuidos al azar con respecto a esas clases. Para temas binarios con solo dos clases (el etiquetamiento de clases es arbitrario), W^+ es usado para los pesos donde el mapa probatorio está presente (en este caso el valor = 2), mientras que el W^- es usado donde el patrón no está presente (valor =1).

La diferencia entre los pesos se conoce como contraste.

$$C = W^+ - W^-$$

El contraste es una medida general de la asociación entre los puntos de entrenamiento y las capas probatorias, combinando los efectos de ambos pesos. En algunos casos, el peso positivo W^+ puede ser muy cercano al cero, aunque W^- presenta un valor negativo importante. Esta situación surge si la presencia de la capa no es particularmente predictiva con los puntos de entrenamiento, pero la ausencia de

la capa provee una fuerte evidencia de que es poco probable que los depósitos puedan presentarse.

En general, los valores de los pesos absolutos entre 0 y 0.5 son levemente predictiva; valores entre 0,5 y 1 son moderadamente predictiva; valores entre 1 y 2 son altamente predictiva, y mayor que 2 son extremadamente predictiva.

Para la derivación de los pesos, nos podemos remitir al trabajo de Bonham – Carter (1994, capítulo 9).

En términos generales, para pesos de capas binarias están dados por la relación de las siguientes probabilidades condicionales:

$$W^+ = \ln \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})}$$

&

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})}$$

Donde P() denota probabilidad y ln denota logaritmo natural. Se asume que las probabilidades son estimadas como simples proporciones de área, por lo tanto;

$$P(B|D) = \frac{N(B \cap D)}{N(D)}$$

$$P(B|\bar{D}) = \frac{N(B \cap \bar{D})}{N(\bar{D})}$$

$$P(\bar{B}|D) = \frac{N(\bar{B} \cap D)}{N(D)}$$

$$P(\bar{B}|\bar{D}) = \frac{N(\bar{B} \cap \bar{D})}{N(\bar{D})}$$

Donde $N(B \cap D)$ es el número de puntos de entrenamiento D dentro del tema B.

Por lo tanto la fórmula para W_+ sería:

$$W^+ = \ln \frac{N(B \cap D)/N(D)}{[N(B) - N(B \cap D)]/[N(T) - N(D)]}$$

Similarmente para W_- . Es interesante notar que si el área para la celda unitaria es muy pequeña, esta expresión aproximadamente satisface:

$$W^{+*} = \ln \frac{N(B \cap D)/N(D)}{N(B)/N(T)}$$

Donde W^{+*} corresponde W_+ para una celda unitaria de área muy pequeña, ya que $N(B)$ y $N(T)$ son relativamente grandes en comparación con los puntos de entrenamiento. Así el valor W^{+*} es el logaritmo natural de lo que se ha denominado densidad normalizada de los puntos. En donde la densidad normalizada (ND) es el ratio:

$$ND = \frac{\text{Proporción de puntos de entrenamiento en el tema}}{\text{Proporción de área de estudio ocupado por el tema}}$$

Los valores de la densidad normalizada (porcentaje de puntos/ porcentaje de área) y el W^{+*} se muestran en la siguiente tabla.

Asociación Puntos -Tema	W+*	ND
Positivo	>0	>1
Ninguna	0	1
Negativa	<0	0-1

Tabla 3. 1 Relaciones entre la densidad normalizada (ND) y los pesos cuando el área de la celda unitaria es muy pequeña

3.1.2. Clasificación de Yacimientos

El propósito de clasificar depósitos dentro de tipos similares ayuda en la descripción de estos, permite generalizar ambientes de Formación y génesis, y mejora la capacidad científica para explorar y descubrir estos depósitos.

Se han hecho muchos intentos para clasificar tipos de depósitos desde los primeros intentos de Agrícola.

De las primeras clasificaciones realizadas la mejor de todas fue la de Lindgren en 1913, que fue periódicamente modificada por el mismo, fue la más usada por 20 años, especialmente en por los geólogos norteamericanos debido a su importancia en yacimientos vetiformes, los cuales fueron en su tiempo los principales tipos de yacimientos en Norte América y en el mundo.

El criterio de temperatura y profundidad de Formación presentada por Lindgren solo fueron aproximaciones, y en esta clasificación se dice poco acerca de la génesis y el ambiente de Formación. Luego en 1986 Guilbert y Park modificarían la clasificación de Lindgren actualizándolo al conocimiento y las ideas de su época, incluso añadirían tipos de depósitos no reconocidos en las primeras clasificaciones de los comienzos de 1900. La principal modificación fue añadir grupos relacionados a procesos, y más precisión en los criterios de temperatura y presión basados

parcialmente en los estudios de inclusiones fluidas, aquí puedo agregar que se han hecho muchos intentos en clasificar los tipos de depósitos en función a la configuración de las placas tectónicas. Sin embargo, sin descripciones geológicas precisas y el hecho de que muchos depósitos similares se presenten en ambientes tectónicos completamente diferentes, hace que esta clasificación no sea muy útil.

La clasificación utilizada en este trabajo es una modificación de la clasificación de Guilbert y Park de 1986, y está basada en descripciones geológicas y geoquímicas de campo de un depósito y junto con el ambiente de Formación. Al clasificar los depósitos de esta manera podemos darnos cuenta rápidamente que aunque no existen dos yacimientos exactamente iguales, mucho de ellos caen en un, relativamente, pequeño número de categorías. También vemos que cada una de estas categorías coincide muy bien con la hipótesis generalmente aceptada de como un Grupo de depósitos se formó. En otras palabras aunque empecemos con una clasificación descriptiva, en realidad terminaremos con analizando los procesos genéticos que forman un depósito.

3.2. Descripción de la Metodología

El proceso de generación de un modelo de prospectividad mineral mediante el uso de la ponderación de evidencias, utiliza depósitos conocidos y varias capas de datos de exploración, capas probatorias, para obtener la probabilidad de que un lugar determinado pueda hospedar un tipo de depósito específico.

El proceso para la creación del modelo, comienza con la selección de modelo conceptual para el tipo de depósito buscado y la definición del área de estudio.

Para el área de estudio se determinó la Franja XV del inventario metalogénico realizado por INGEMMET, Pórfidos – Skarn Cu-Mo (Au-Zn) relacionados con intrusivos de Eoceno – Oligoceno.

Luego de Definir el área de estudio y el modelo conceptual para pórfidos de cobre, se procede a recopilar la información geoespacial que será utilizada como evidencias para la predicción del modelo de prospectividad mineral. Litología, estructuras, geoquímica (Suelos, Sedimentos o Rocas), geofísica (Teledetección), etc. puede ser utilizada como capas probatorias para el cálculo de los pesos.

Esta información debe ser tratada y procesada para un mejor cálculo de los pesos, el procesamiento consiste en la interpolación y transformación en grids, posteriormente serán reclasificados para obtener mapas binarios, con los cuales se realizaran el cálculo de los pesos. Por otra parte la información geoquímica previamente debe ser tratada estadísticamente para determinar la normalidad de los datos, calcular y tratar los altos erráticos y determinar el treshold para cada variable.

Luego de tratar y procesar la información y con los grids clasificados creados, se procederá a calcular los pesos para cada evidencia en cada una de las capas evidenciales, para esto se hace uso del software MI-SDM, el cual nos permite fácilmente realizar este cálculo.

Con los pesos calculados se puede reclasificar cada mapa probatorio, para finalmente crear un único mapa condicional.

La figura 3.4 Muestra un flujo grama con los pasos realizados durante todo el proceso.

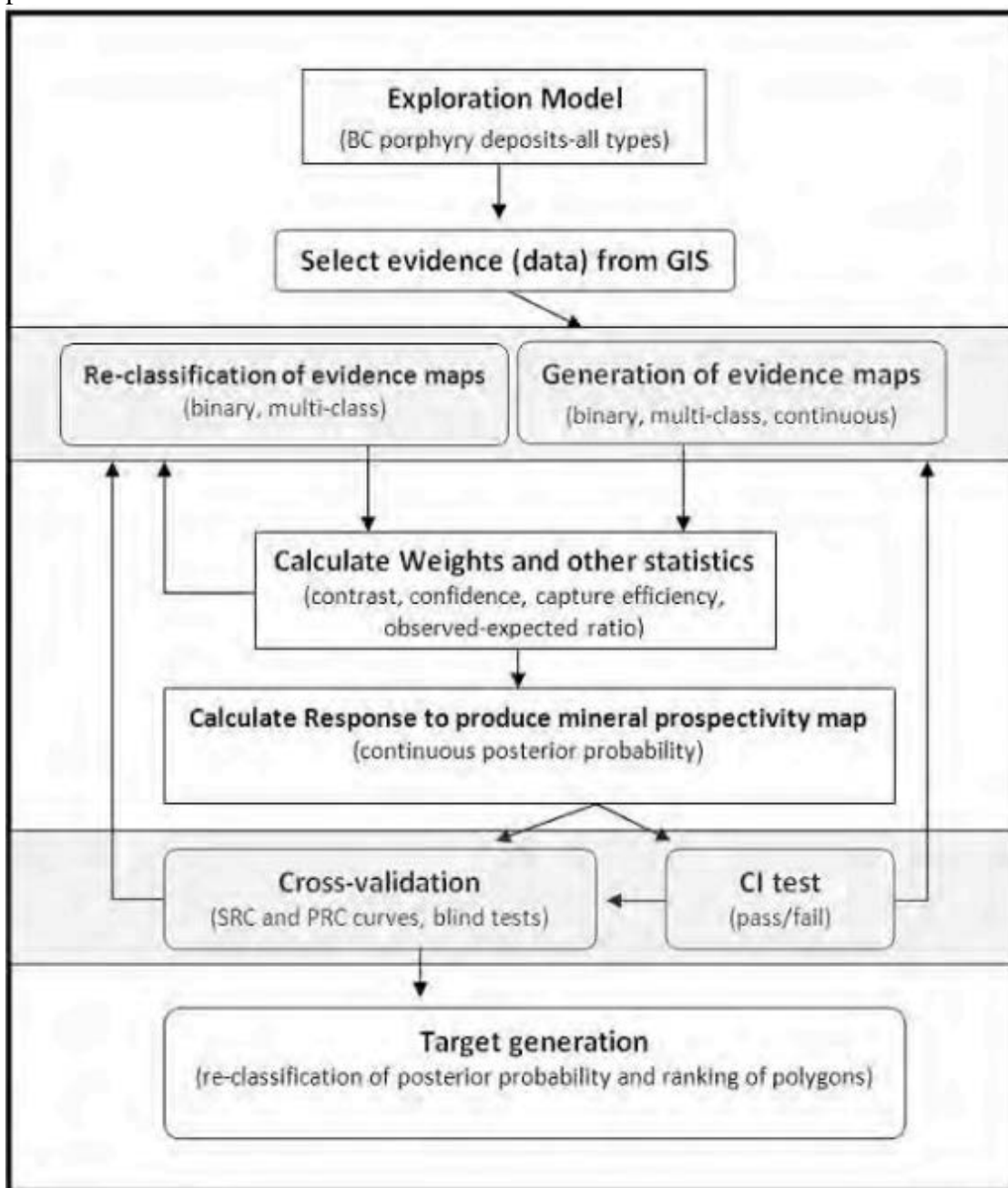


Figura 3. 4 Flujo grama del proceso de generación del modelo de prospectividad.
(Erich Schmitt, 2010)

CAPITULO IV

DETERMINACION DE TARGET'S MEDIANTE PONDERACION DE LAS EVIDENCIAS

4.1. Modelo Conceptual

Se refiere a las características de un tipo de depósito identificable en los conjuntos de datos regionales, tal como se utiliza en el proceso de exploración. Es importante tener en cuenta que la ausencia de pruebas puede ser tan importante como la presencia de evidencias y los datos sobre asociaciones negativas entre depósitos y ciertos tipos de datos a menudo están mal documentados.

La mayoría de los ejercicios de modelamiento de prospectividad comienzan con una revisión de la geología, la metalogénesis regional y quizá local, así como una discusión del modelo conceptual utilizado. En este paso, se desarrollará un modelo de reconocimiento para la ubicación de los depósitos de tipo de interés específico. Se puede enfocar este, centrándose en las variables que representan la fuente, el transporte, la trampa y la deposición. El objetivo es, pues, elaborar una lista de

"mapas probatorios", basada en este modelo. Esta lista inicial puede ser muy grande para empezar, y puede reducirse examinando la información disponible para su uso y la intensidad de la asociación con los puntos de entrenamiento.

Basado en el modelo de exploración de Sistemas Porfiríticos de Cobre, los criterios elegidos para la predicción de los depósitos de tipo pórfido en el área de estudio fueron:

- Proximidad o ubicación dentro de plutones edad Eoceno-Oligoceno
- Proximidad o ubicación dentro rocas de composición monzonítica.
- Proximidad a las principales fallas.
- Proximidad a las zonas de intersección de lineamientos.
- Zonas con anomalías geoquímicas de Cu, Mo, Au.

Los mapas prospectividad más fiables se producen de conjuntos de datos que contienen muchos mapas probatorios en comparación con los que solo utilizan algunos mapas probatorios. Se reconoce que este estudio puede beneficiarse de un mayor número de temas probatorios.

4.2. Información Geoespacial

4.2.1. Área de Estudio

El área de estudio utilizada para el presente estudio corresponde a la provincia metalogenética de Pórfidos de Cu – Mo en rocas intrusivas del Eoceno – Oligoceno. El archivo se encuentra en formato gis *.shp y corresponde a la base de datos de INGEMMET, del Mapa Metalogenético (2009).

Esta información se utilizara como límite para todos los cálculos que se realicen durante la generación de los mapas.

4.2.2. Puntos de Entrenamiento (Ocurrencias mineras o Depósitos)

La información utilizada corresponde al inventario Metalogenético del Perú de la base de datos del INGEMMET, esta información fue filtrada por tipo de depósito y área de interés y finalmente se obtuvieron 17 depósitos conocidos tipo Pórfido de Cu fueron usados como puntos de entrenamiento para el análisis de prospectividad.

4.2.3. Geología y Estructuras

Los datos de geología y estructuras han sido derivados del trabajo que realizo OLDHAM sobre la compilación y estandarización de la geología del Perú tomando como base la geología de INGEMMET a escala 1:100,000. Para la realización de este trabajo esta información cumple con la calidad y el detalle necesario para realizar un buen análisis, ya que cuenta con litología diferenciada por edad y tipo de roca, en especial las rocas intrusivas del eoceno – oligoceno.

4.2.4. Geoquímica

Para la capa probatoria geoquímica se utilizaron Cu, Mo, y Au estas variables fueron extraídas de la base de datos geoquímica de sedimento de quebradas de INGEMMET, la cual ha sido adquirida en diversas campañas realizadas en conjunto con otras instituciones internacionales mediante convenios de cooperación.

La selección de estas tres variables corresponde a que siempre están presentes por la naturaleza del mismo depósito.

4.3. Procesamiento de la Información

4.3.1. Análisis Exploratorio de Datos

- **Geoquímicos**

El análisis exploratorio de datos consiste en el uso de herramientas estadísticas y principalmente gráficas, con el objetivo de:

- I. Aprovechar al máximo el conjunto de datos.
- II. Explorar y descubrir la estructura de los datos (tipos de distribución, normal – log normal).
- III. Definir las variables significativas dentro del conjunto de datos.
- IV. Determinar altos erráticos dentro del conjunto de datos.
- V. Reconocer patrones dentro de los datos.

Si bien la base de datos geoquímica de sedimentos de quebrada que proporciona INGEMMET contiene más de 32 elementos analizados, para simplificar el análisis de modelamiento de prospectividad en el presente informe solo se utilizaran los elementos Cu, Mo, Au, que son los elementos de interés en los yacimientos porfiríticos presentes en la franja estudiada.

Se calcularon los estadígrafos básicos para los elementos mencionados (Ver tabla 4.1), así como los gráficos estadísticos de distribución, histogramas, en los cuales se pudo determinar que el Cu, muestra una distribución casi normal, mientras que el Mo y Au presentan una distribución con un sesgo positivo, cola hacia la derecha (Ver Figura 4.1).

Elemento	Min	Max	Media		DesvStd		Mediana		MAD
			raw	Ln	Raw	Ln	Raw	Ln	Raw
Cu_ppm	23	3889	47.58	3.439	145.17	0.699	30.2	3.408	11
Mo_ppm	0.9	60	2.3526	0.539	3.3151	0.688	1	0	0.1
Au_ppb	3	5330	46.93	2.479	273.7	0.996	9	2.197	0

Tabla 4. 1 Estadísticas Básicas de las variables Cu, Mo, Au.

Para la determinación de los altos erráticos se utiliza el diagrama de cajas en donde los valores que se encuentren por encima o por debajo de los bigotes superiores e inferiores respectivamente se consideran como altos y altos erráticos (Ver figura 4.2).

Del diagrama de caja de las variables analizadas se puede determinar:

- Altos erráticos para el Cu > 428.03 ppm, Mo > 15.6 ppm y Au > 13.72 ppb.

Estos valores fueron reemplazados por el método del $1/3 + 1/3 - 1/3$.

Luego de realizar el tratamiento de los altos erráticos se determinó los umbrales para las anomalía de cada elemento en base a la media + 2* desv std.

	CU_PPM*	MO_PPM*	AU_PPM*
MIN	2	0.9	3
MAX	1283.591	20.021	1759.121
MEDIA	40.924	2.175	20.074
MEDIANA	30.2	1	9
DESVSTD	56.44	1.904	89.711
THRESHOLD	153.804	5.983	199.497

Tabla 4. 2 Estadística Final de los datos tratados.

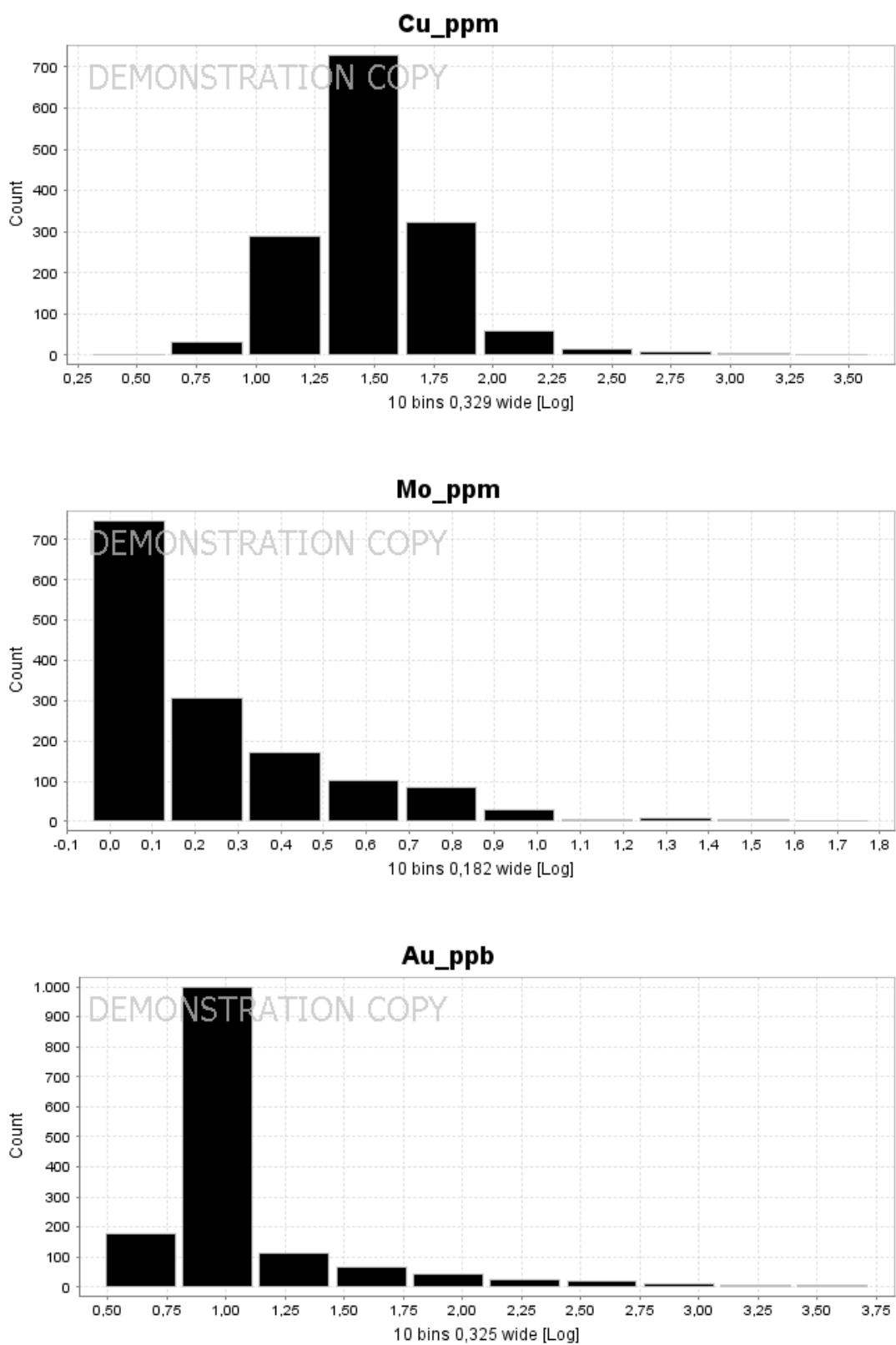


Figura 4. 1 Histogramas de Distribución de Frecuencias de las variables.

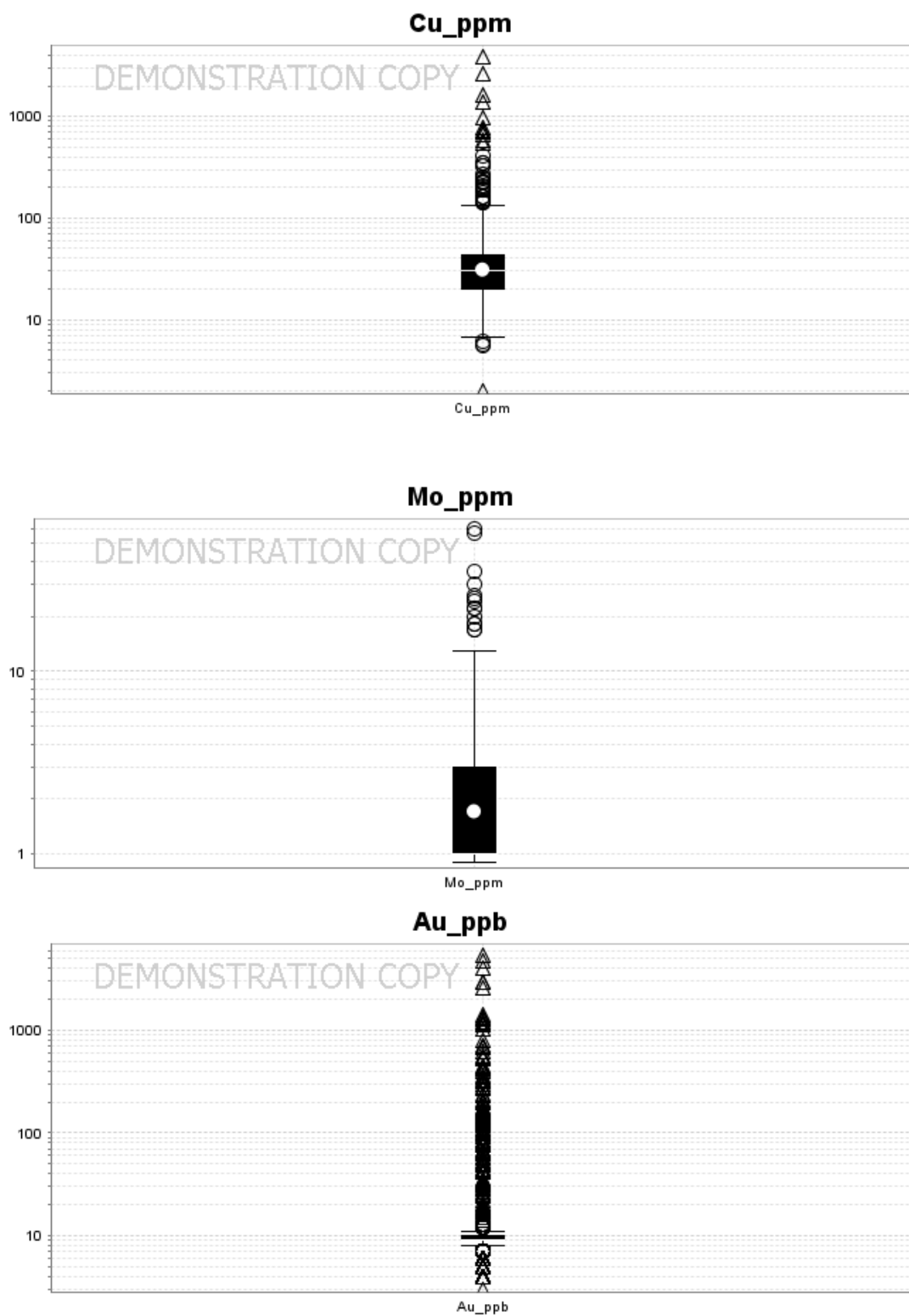


Figura 4. 2 Diagramas de Cajas de las variables, para la determinación de altos erráticos.

- **Litología**

El análisis exploratorio de la información geológica consistió en la depuración de las unidades litológicas favorables para la presencia de los yacimientos tipo pórfido de acuerdo al modelo propuesto estas corresponde a unidades intrusivas de edad eoceno – oligoceno principalmente.

Dentro del área de estudio, según la información con la que se cuenta, existen 72 unidades litológicas diferentes, luego de la depuración el número de estas se redujo a una sola unidad litológica, los intrusivos del Batolito de Abancay, con 13 diferentes tipos de intrusivos.

NOMENCLA	NOMBR_TRAD	D_ERA	D_T_ROCA	L_LITOLOGI
PgNi-gd-asm	Abancay-San Miguel	Cenozoico	Plutonica	Granodiorita
PgNi-d-asm	Abancay-San Miguel	Cenozoico	Plutonica	Diorita
PgNi-t-asm	Abancay-San Miguel	Cenozoico	Plutonica	Tonalita
PgNi-mz-asm	Abancay-San Miguel	Cenozoico	Plutonica	Monzonita
PgNi-dgdt-asm	Abancay-San Miguel	Cenozoico	Plutonica	Diorita granodiorita tonalita
N-mzg	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Monzogranito
Pg-ggd	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Granito granodiorita
Pg-gdt	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Granodiorita Tonalita
N-md	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Microdiorita
Pg-g	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Granito
KPg-dgd	Roca ignea	Mesozoico Cenozoico	Plutonica	Diorita Granodiorita
T-mzgd	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Monzogranodiorita
Ns-tr	Roca ignea	Cenozoico	Plutonica	Traquita

Tabla 4. 3 Unidades Litológicas correspondientes a intrusivos de edad Terciaria, favorables para la mineralización de yacimientos tipo pórfido de cobre en el área de estudio, la franja Andahuaylas – Yauri

- **Estructuras**

El tratamiento de las estructuras consistió principalmente de la creación de los radios de influencia para cada falla se determinaron radios de 1, 2 y 3 km para cada una de las estructuras, de acuerdo al modelo propuesto la mayoría de los depósitos presentes

en la zona de estudio se encuentran asociados a lineamientos y estructuras de rumbo NW-SE.

Dentro del área se encuentran identificadas 1088 estructuras, dentro de las cuales tenemos; Fallas dextrales, sinestrales, inferidas, lineamientos y sobreescurrimientos.

Tipo de Estructura	Cantidad
Dextral	3
Falla	771
Falla inferida	172
Lineamientos	7
Sinestral	4
Sobreescurrimiento	124
Sobreescurrimiento inferido	7
Total general	1088

Tabla 4. 4 Tipos de estructuras presentes en la información geoespacial.

4.4. Generación de Mapas Probatorios

Un gran número de posibles mapas probatorios pueden ser incluidos dentro de los cálculos para el modelamiento de prospectividad mineral mediante pesos de las evidencias (geología regional, geoquímica de suelos, sedimentos, geofísica, etc.). Sin embargo el manejo del modelo conceptual de depósitos tipo pórfido de cobre, es usado para reducir el número de mapas probatorios a aquellos que pueden tener una relación directa con procesos de Formación del depósito de interés, tales como geología favorable, estructuras que hayan permitido el emplazamiento de estos, etc.

La ocurrencia de pórfidos de cobre en esta área, de acuerdo a la bibliografía y tomando como modelo algunos de los depósitos conocidos, con frecuencia ocurren,

asociados a intrusivos de edad eoceno – oligoceno, en la proximidad de estructuras con rumbo NW-SE, en la intersección de estructuras principales.

Antes de generar los mapas probatorios binarios, cada capa probatoria (litología, estructuras, geoquímica) fue compilada y analizada en un procedimiento de varias etapas.

El primer paso fue comparar la data cruda con las ocurrencias minerales (puntos de entrenamiento) para determinar si existe alguna relación espacial entre los valores de las capas en cada punto de ocurrencia.

Los valores en el caso de las unidades geológicas deben ser categóricos o continuo en el caso de los valores geoquímicos o geofísicos. Si los pesos indican alguna relación espacial entre la data, geoquímica, y las ocurrencias se procede a realizar la generalización binaria para ese mapa probatorio.

4.4.1. Cálculo de los Pesos e Integración de los Datos con los Pesos

Una vez analizada, tratada y depurada la información, el siguiente paso para el modelamiento de un mapa de favorabilidad es la integración de la información mediante el cálculo de los pesos de cada uno de los mapas probatorios, para esto se hace uso de las ecuaciones desarrolladas en el capítulo correspondiente al marco teórico para el cálculo de los pesos de las evidencias, para esto se hace uso del software MI-SDM.

4.4.1.1. Mapa Probatorio de Geología

Como ya se mencionó, como capa probatoria se utilizó la geología de INGEMMET a escala 1:100,000, de acuerdo al modelo propuesto se seleccionaron rocas intrusivas

de edad terciaria relacionadas a mineralización tipo pórfido de cobre en la zona de estudio, posteriormente se realizó el cálculo de los pesos para dicha capa probatoria, el cual finalmente fue reclasificado para contar con un mapa binario que represente la presencia o ausencia del depósitos dentro de dicha unidad litológica.

N° de Celdas	Unidad Litologica	Tipo de Peso	Area km2	Ocurrencias	Wplus	Wminus	Contrast	Confidence
47742	Abancay-San Miguel	Categorical	2982	6	-0.086643	0.19969	-0.286333	-0.403444
7192	Abancay-San Miguel	Categorical	447	1	0.020068	-0.00248	0.022548	0.021187
681	Roca ignea	Categorical	42	1	2.45233	-0.108171	2.5605	2.33481
704	Roca ignea	Categorical	42	1	2.45233	-0.108171	2.5605	2.33481

Tabla 4. 5 Pesos de la capa probatoria geológica, el contraste muestra el grado de asociación espacial entre la capa y los puntos de entrenamiento (Ocurrencias mineras).

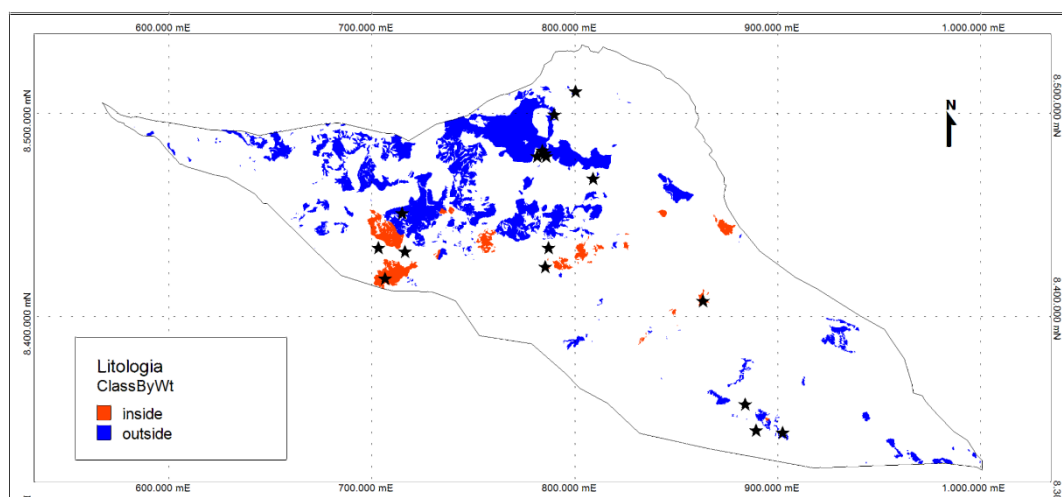


Figura 4. 3 Mapa Probatorio Litológico, luego de realizar la reclasificación binaria.

4.4.1.2. Mapa Probatorio Estructural

El modelo conceptual para el tipo de depósito analizado presume que la proximidad a los lineamientos principales puede haber favorecido a la mineralización, por lo tanto se realizó un buffer de las fallas principales, y se definió empíricamente una distancia favorable para la mineralización de 1.25 km como mínimo y como máximo 2.5 km.

Se categorizo el mapa con estos parámetros y se definió el mapa probatorio binario.

N° de Celdas	Estructura Influencia	Tipo de Peso	Area km2	Ocurrencias	Wplus	Wminus	Contrast	Confidence
8523	<1.25	Categorical	8523	2	-0.620802	0.42185	-1.04265	-1.24554
7522	<2.5	Categorical	7521	5	0.42185	-0.620802	1.04265	1.24554

Tabla 4. 6 Pesos de la capa probatoria de la información estructural (lineamientos y fallas).

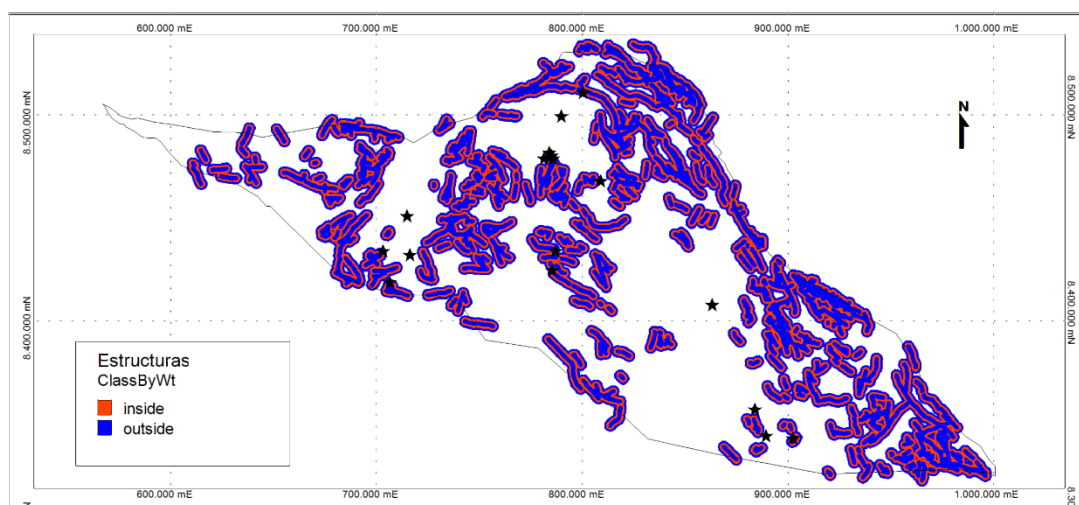


Figura 4. 4 Mapa Probatorio Estructural, Reclasificación binaria según distancia al lineamiento.

4.4.1.3. Mapas Probatorios Geoquímicos

La capa probatoria geoquímica fue interpolada para cada uno de las variables utilizadas en el análisis de prospectividad, se aplicó el método del vecino más cercano para realizar la interpolación, posteriormente estas capas interpoladas fueron clasificadas en diferentes rangos, con lo cual se realizó el cálculo de los pesos, utilizando los puntos de entrenamiento (ocurrencias), una vez calculados estos se procedió a reclasificar la capa, con lo que finalmente se tiene una mapa probatorio binario, para la clasificación de los rangos fue utilizado el valor del threshold como valor límite para áreas anómalas de interés.

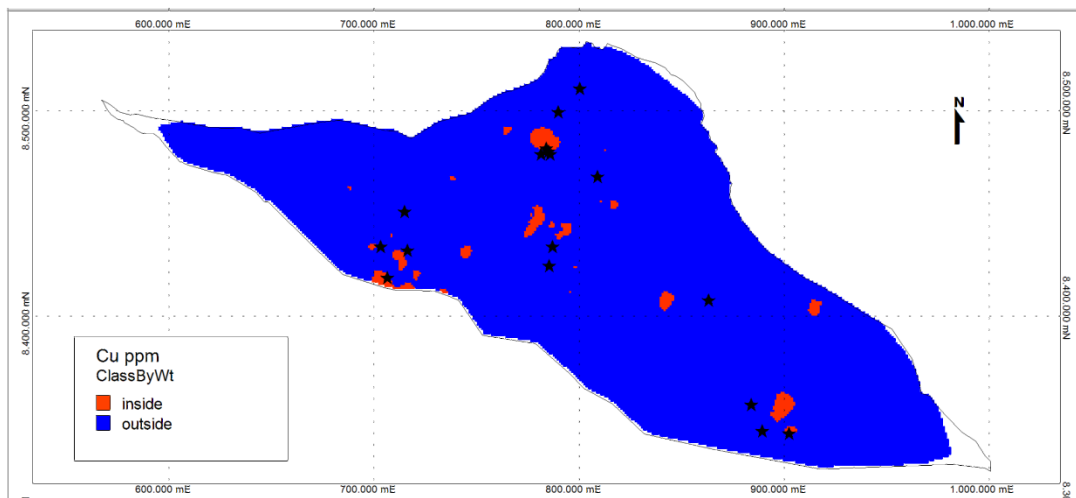


Figura 4. 5 Mapa Probatorio Geoquímico de Cu, reclasificado según el valor del Threshold.

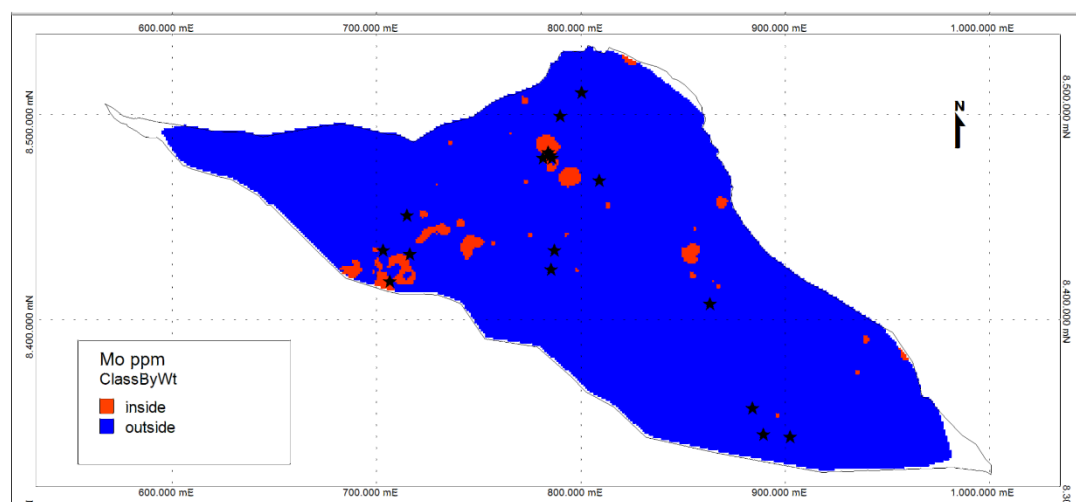


Figura 4. 6 Mapa Probatorio Geoquímico Mo.

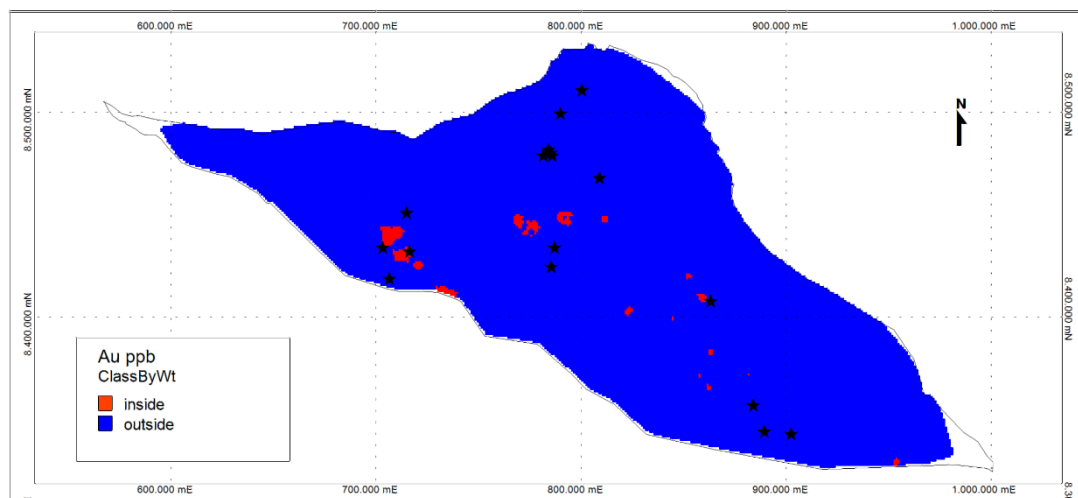


Figura 4. 7 Mapa Probatorio Geoquímico Au.

4.5. Generación del Modelo de Prospectividad Mineral.

Para la generación del mapa de prospectividad, cada capa probatoria es combinada una a otra para calcular la probabilidad de que cada celda unitaria pueda contener el tipo de depósito buscado a partir de las pruebas generadas dependiendo de los pesos generados a partir de cada capa.

Un concepto importante en la metodología de los pesos de las evidencias es el de las tablas de “Condiciones Únicas” y el correspondiente mapa asociado de “Condiciones Únicas” que vendría a ser el producto final para este trabajo conocido como el mapa de favorabilidad mineral. La tabla y el mapa de condiciones únicas son producidos por la superposición de los temas probatorios elegidos para la predicción de la hipótesis.

El grid de condiciones únicas es generado por la combinación de los valores de clase de todas las capas probatorias de entrada seleccionadas, para dar un conjunto de condiciones únicas que representan todas las combinaciones posibles de las capas

probatorias de entrada. Luego a cada ubicación de una celda unitaria dentro del área de estudio se le asigna un valor de condición única según sea determinado por las capas de entrada en esa ubicación.

El número de condiciones únicas aumenta marcadamente si una de las capas probatorias es muticlase. Sin embargo es muy común el caso de que muchas de las posibles condiciones únicas nunca ocurran, por ejemplo la clase 1 en la capa 1 puede que nunca ocurra en la misma ubicación que la clase 3 en la capa 3.

En el tema de estudio de este trabajo cinco capas probatorias fueron analizadas mediante el método de los pesos de las evidencias para determinar si existe alguna asociación espacial con las ocurrencias de depósitos tipo pórfido de cobre. Estas cinco capas están significativamente asociadas a las ocurrencias de pórfidos de cobre dentro de la franja de estudio y por lo tanto han sido consideradas como temas probatorios para el cálculo de la probabilidad, estos temas consisten de la geología regional, geología estructural y la geoquímica de Cu, Mo y Au de sedimentos de quebradas.

Clase	N° Celdas	Unit	Litología	Estructuras	Cu ppm	Mo ppm	Au ppb	Area km2	N° Ocurrencias	WofE_	PosteriorProbability
1	12205	1	1	1	1	1	1	764.692	1		0.000480861
15	32934	1	-	1	1	1	1	2063.45	3		0.00111315
20	1162	1	-	2	2	1	1	72.8039	2		0.140882
33	62	2	2	2	1	1	1	3.88455	1		0.11632
34	121	2	2	2	2	1	1	7.58113	1		0.541262
36	3416	2	-	1	1	1	1	214.026	1		0.00377887
44	149097	-	1	1	1	1	1	9341.52	2		0.000628816
52	76846	-	2	1	1	1	1	4814.71	2		0.00307142
61	257756	-	-	1	1	1	1	16149.44	3		0.00145537
62	1495	-	-	1	1	2	1	93.6677	1		0.00942745

Tabla 4. 7 Tabla de condiciones únicas para los temas probatorios, el valor 2 para la presencia del tema y el valor 1 para la ausencia.

A partir de esta tabla de condiciones únicas, por lo tanto se genera un mapa de condiciones únicas o conocido para nosotros como mapa de favorabilidad mineral, en el que cada celda unitaria contara con una probabilidad, calculada a partir de la combinación de las capas probatorias que se superpongan sobre dicha celda unitaria.

CAPITULO V

INTERPRETACION DE RESULTADOS

5.1. Resultados

5.1.1. Mapa de Prospectividad de la Franja Andahuaylas – Yauri

El mapa de potencial mineral final es generado a partir de la tabla de condiciones únicas, el cual es calculado de la combinación espacial de cada una de las capas probatorias, dentro de la cuales cada una de las celdas unitarias cuenta con una probabilidad y pesos calculados por su relación espacial con los puntos de entrenamiento (ocurrencias).

Finalmente el mapa de prospectividad mineral presenta siete áreas con un relativo alto potencial para la ocurrencia de pórfidos de cobre dentro de la franja Andahuaylas - Yauri.

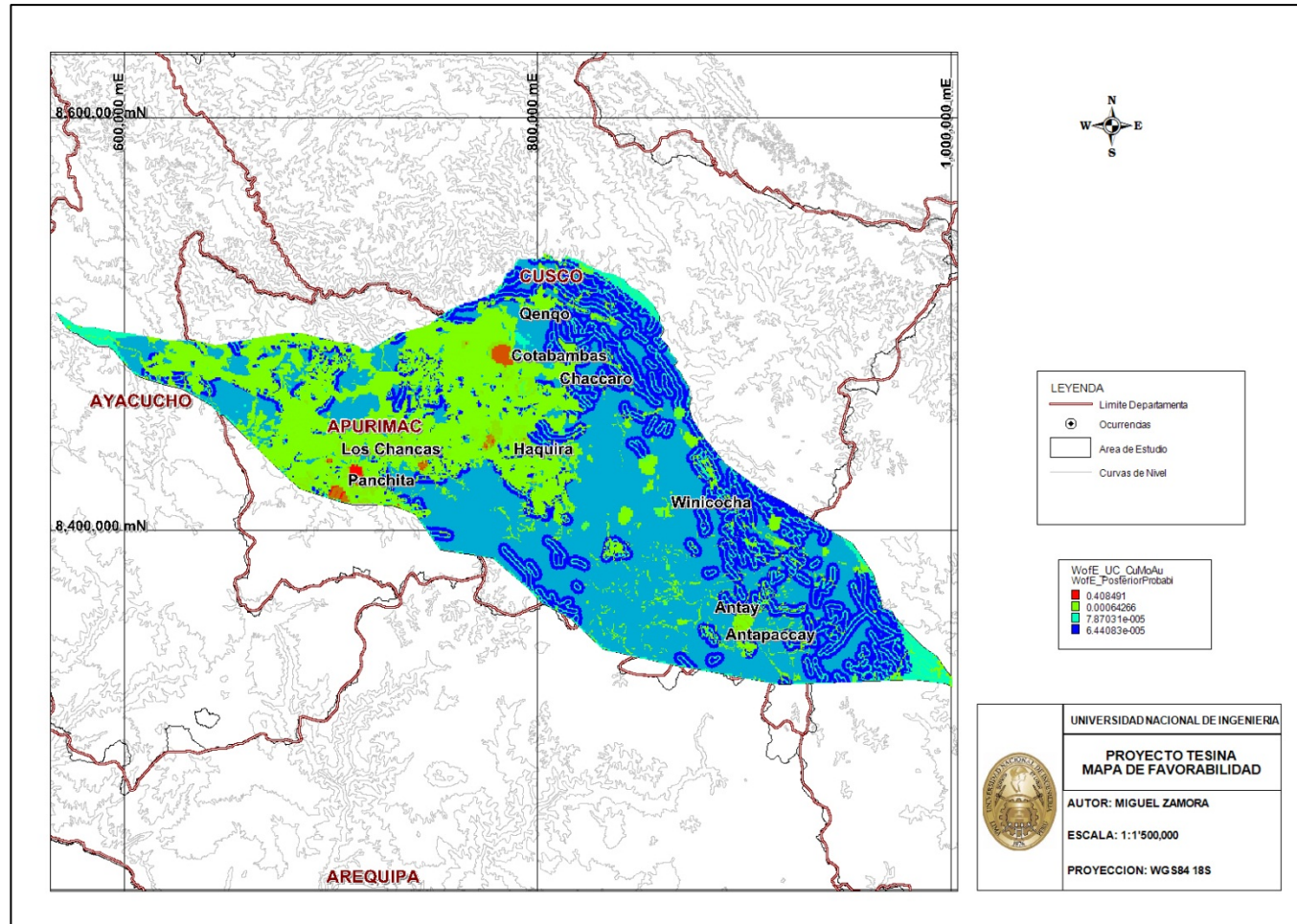


Figura 5. 1 Mapa de potencia mineral para yacimiento tipo pórfido de la franja Andahuaylas - Yauri.

5.1.2. Inventario de Targets

El mapa final de prospectividad mineral presenta siete áreas con un relativamente alto potencial para la ocurrencia de depósitos tipo pórfido, cuatro de las cuales están relacionadas a depósitos conocidos, Los Chancas, Panchita y Peña Alta, Cotabambas.

Los otros dos targets, corresponden a áreas prospectivas basada en los mapas probatorios.

- Área Panchita; corresponde al prospecto de Cu-Mo tipo pórfido del mismo nombre, esta área abarca aproximadamente un área de 50.5 km², las evidencias favorables corresponden a la litología y a la geoquímica de Cu y Mo.
- Área Peña Alta; corresponde al prospecto del mismo nombre ubicado al borde Oeste de la franja, corresponde a un área de aproximada de 46 km², presenta evidencias favorables en Litología y Geoquímica de Cu, Mo, Au.
- Área Los Chancas; anomalía de aproximadamente 6 km², asociada al depósito conocido Los Chancas. Se soporta en evidencias litológicas, y geoquímicas de Cu, Mo.
- Área Cotabambas; anomalía asociada al cluster Cotabambas, de 87 km² aproximadamente y una alta probabilidad relativa.
- Target 1; Área de 16 km², con anomalías litológicas, y geoquímicas de Cu, Mo.
- Target 2; Área de aproximadamente 10 km², ubicado casi en el centro de la franja de estudio, se soporta en anomalías de Litología y geoquímicas de Cu, Mo.

- Target 3; Área ubicada al Norte del depósito Haqira, cuenta con evidencias favorables de litología, Cu, Mo, área aproximada de 3 km².

CONCLUSIONES

1. El mapa de prospectividad final es la combinación de cinco mapas probatorios que muestran una asociación favorable con respecto a las ocurrencias de depósitos pórfido de cobre en el área de estudio.
2. Se han determinado siete áreas con alto potencial mineral, cinco de estas áreas están relacionadas a yacimientos ya conocidos, mientras que solo una de estas áreas podría ser considerada como nueva.
3. El uso de este tipo de metodologías para el análisis de áreas prospectivas permite el aprovechamiento de la información y una mejor correlación espacial entre los diferentes tipos de datos.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda validar cada una de las de las capas probatorias con el objetivo de tener un alto grado de fiabilidad, esto es importante para no generar mapas de prospectividad sesgados.
2. El análisis exploratorio de datos es de suma importancia para la determinación de errores, estructura y altos erráticos, el tratamiento de los datos nos permitirá determinar el threshold para la determinación de anomalías importantes.
3. Es recomendable contar con la mayor cantidad de capas probatorias posibles, esto permitiría aumentar el grado de probabilidad de las áreas generadas.
4. La fase siguiente al estudio de prospectividad sería la verificación en campo de cada una de las anomalías definidas, para posteriormente definir campañas de prospección más avanzadas hasta llegar a la delimitación del yacimiento mediante perforaciones diamantinas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARRANZA, J. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Edición 2009, Editorial Elsevier – Holanda, pp 347.

PERELLO, J., CARLOTTO, V., ET AL. Porphyry-Style Alteration and Mineralization of the Middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru. *Economic Geology*. Vol. 98, 2003, pp. 1575–1605.

NOBLE, D., ET AL. Age and Regional Tectonic and Metallogenic Implications of Igneous Activity and Mineralization in the Andahuaylas-Yauri Belt of Southern Peru. *Economic Geology*. Vol. 79. 1984, pp. 172-176.

WEISE, S. The Andahuaylas-Yauri belt of southeastern Peru and its extension to the Chilean porphyry copper province. Alemania, pp 11.

PORWAL, A., KREUSER, O. Introduction to the Special Issue: Mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation. Edición 2010, Editorial Elsevier – Holanda, pp 127 – 127.

BONHAM-CARTER, G., AGTERBERG, F. Arc-WofE: a GIS tool for statistical integration of mineral exploration datasets, Canada, pp 4.

AGTERBERG, F., QIUMING, CH. Conditional Independence Test for Weight s of Evidences Modelling. *Natural Resources Research*, Vol. 11, No. 4, December 2002, pp 7.

WANG, H., CAI, G., QIUMING, CH. Data Integration Using Weights of Evidence Model: Applications in Mapping Mineral Resource Potentials. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002, pp 6.

SCHMITT, E. Weights of Evidence Mineral Prospectivity Modelling with ArcGIS. British Columbia, 2010, pp 69.

LOPEZ DE CASTILLA, C. Estadística Bayesiana. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2011, pp 54.

DAVIS, J. Statistics and Data Analysis in Geology. 3rd Edition 2002, John Wiley & Sons, Inc. Pp 621.

HONARVAR, P., SQUIRES, G. Preliminary Analysis of Mineral Potential Modelling of the Victoria Lake Supergroup Volcanic Rocks: A Weight of Evidence Approach. Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources Geological Survey, 2006, pp 20.

RAINES, G. A Tutorial Guide to Using MI-SDM v2.50, Avantra Geosystems, 2006, pp25.

Web

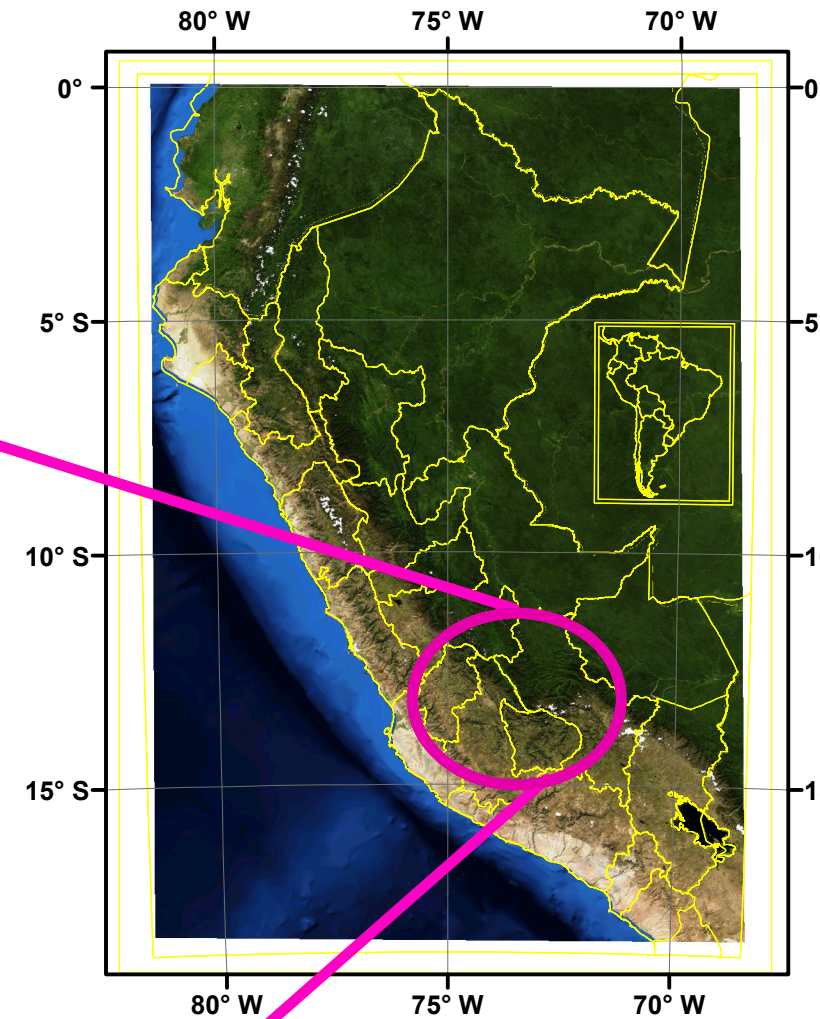
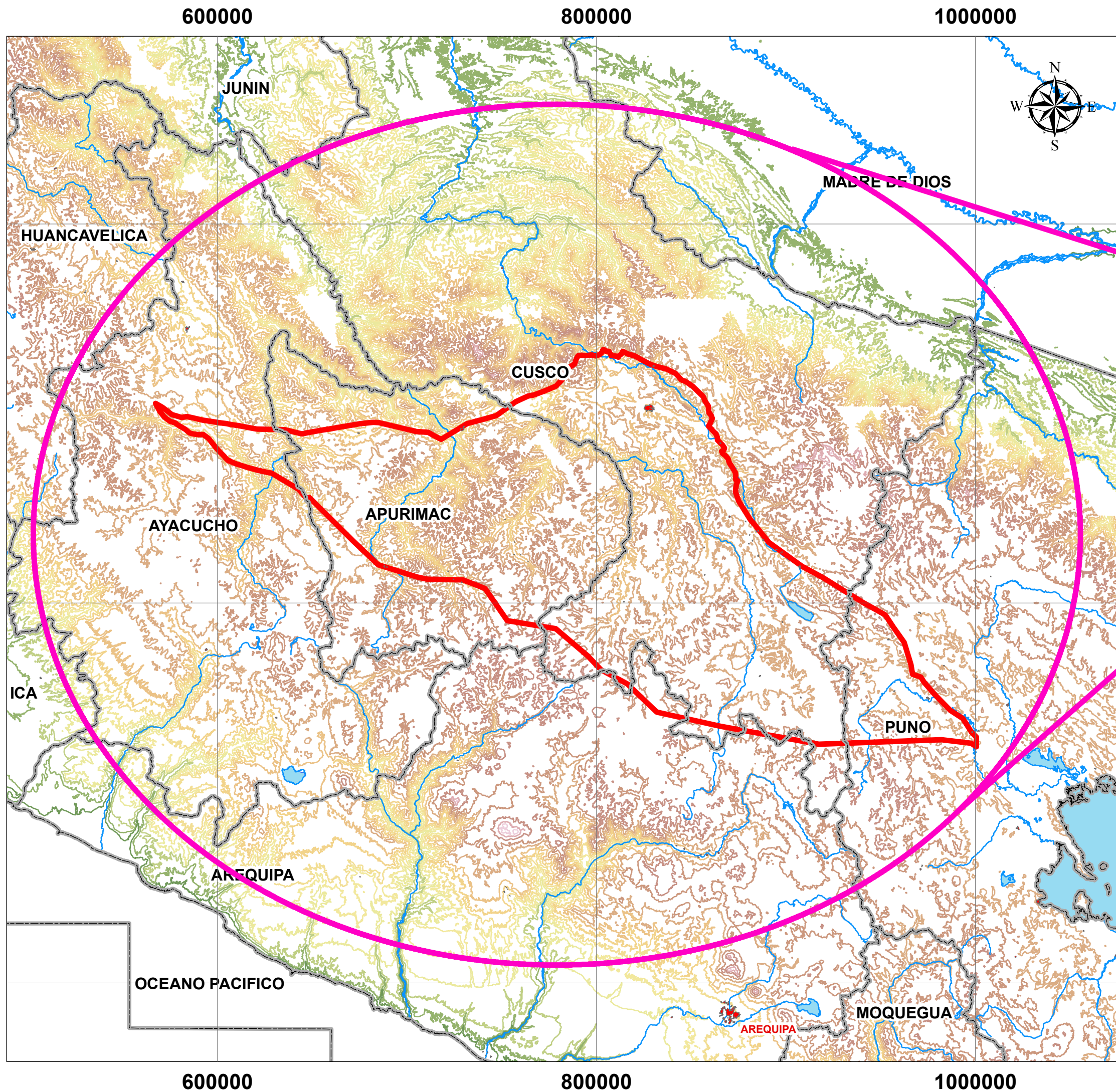
www.ingemmet.gob.pe (portal del Instituto Nacional Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú).

www.geocatmin.ingemmet.gob.pe (Sistema de Información Geológico Catastral Minero del Perú).

<http://www.avantra.com.au> (Avantra Geosystems, aplicaciones y herramientas para MapInfo).

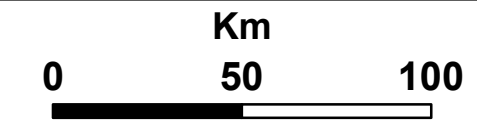
<http://www.ige.unicamp.br/wofe/documentation/wofeintr.htm> (UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, Introduccion a la metodologia de los Pesos de las Evidencias).


ANEXOS



Leyenda

-  Hidrografia
-  Limite Departamental
-  Area Urbana
-  Area de Estudio
-  Lagos y Lagunas



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	PROYECTO TESINA PLANO DE UBICACION	
	AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°
	ESCALA: 1:2'000,000	1
PROYECCION: WGS84 18S		

700000

750000

800000

850000

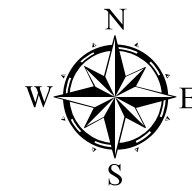
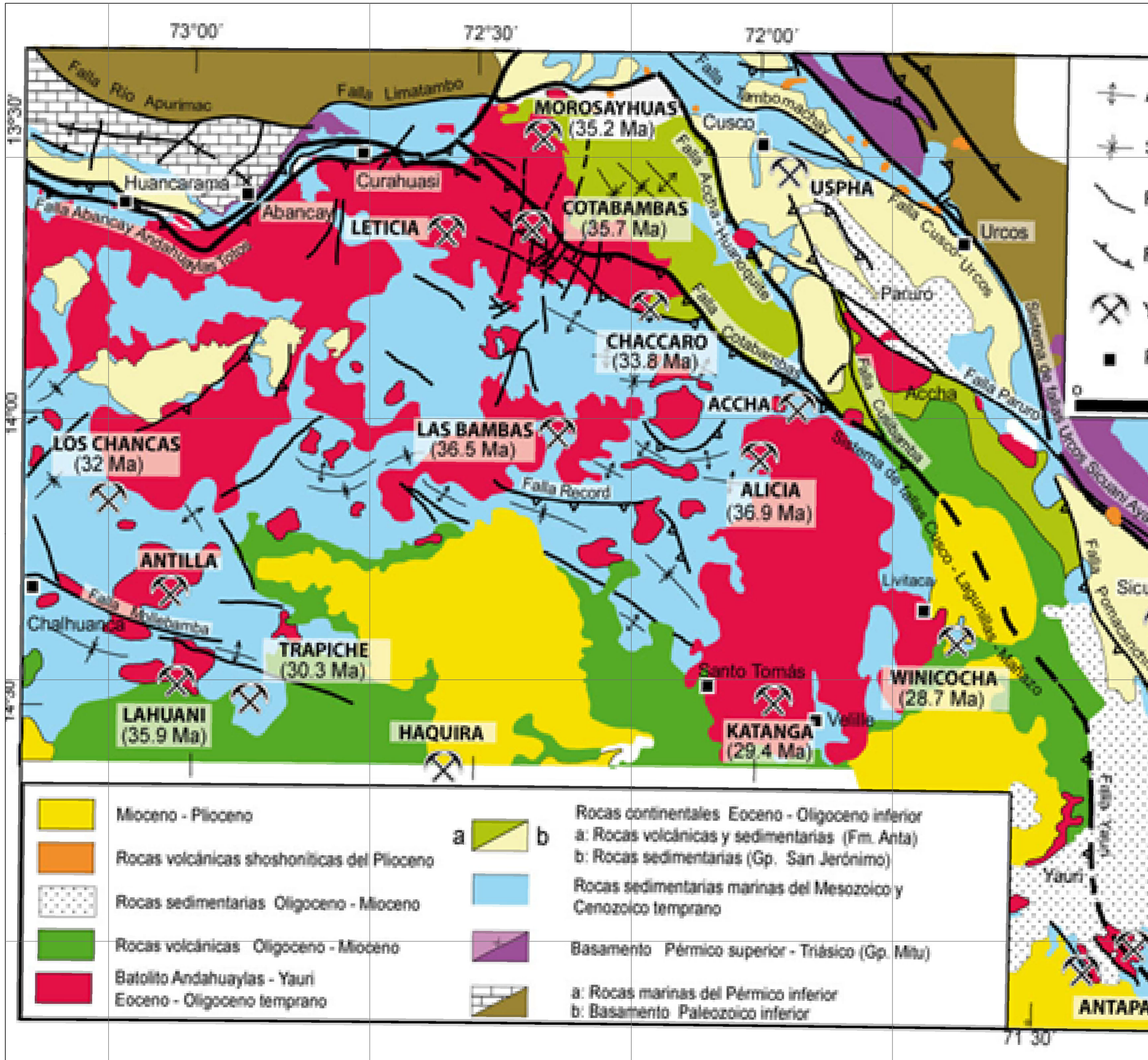
900000

8500000

8450000

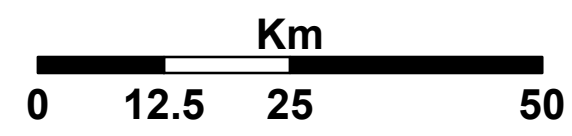
8400000

8350000



LEYENDA

- Anticlinal
- Sinclinal
- Falla
- Falla inversa
- Yacimiento mineral
- Poblado



	Mioceno - Plioceno		Rocas continentales Eoceno - Oligoceno inferior
	Rocas volcánicas shoshoníticas del Plioceno		a: Rocas volcánicas y sedimentarias (Fm. Anta)
	Rocas sedimentarias Oligoceno - Mioceno		b: Rocas sedimentarias (Gp. San Jerónimo)
	Rocas volcánicas Oligoceno - Mioceno		Rocas sedimentarias marinas del Mesozoico y Cenozoico temprano
	Batolito Andahuaylas - Yauri Eoceno - Oligoceno temprano		Basamento Pérmico superior - Triásico (Gp. Mita)
			a: Rocas marinas del Pérmico inferior
			b: Basamento Paleozoico inferior



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
PROYECTO TESINA PLANO GEOLOGICO REGIONAL	
AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°
ESCALA: 1:750,000	2
PROYECCION: WGS84 18S	

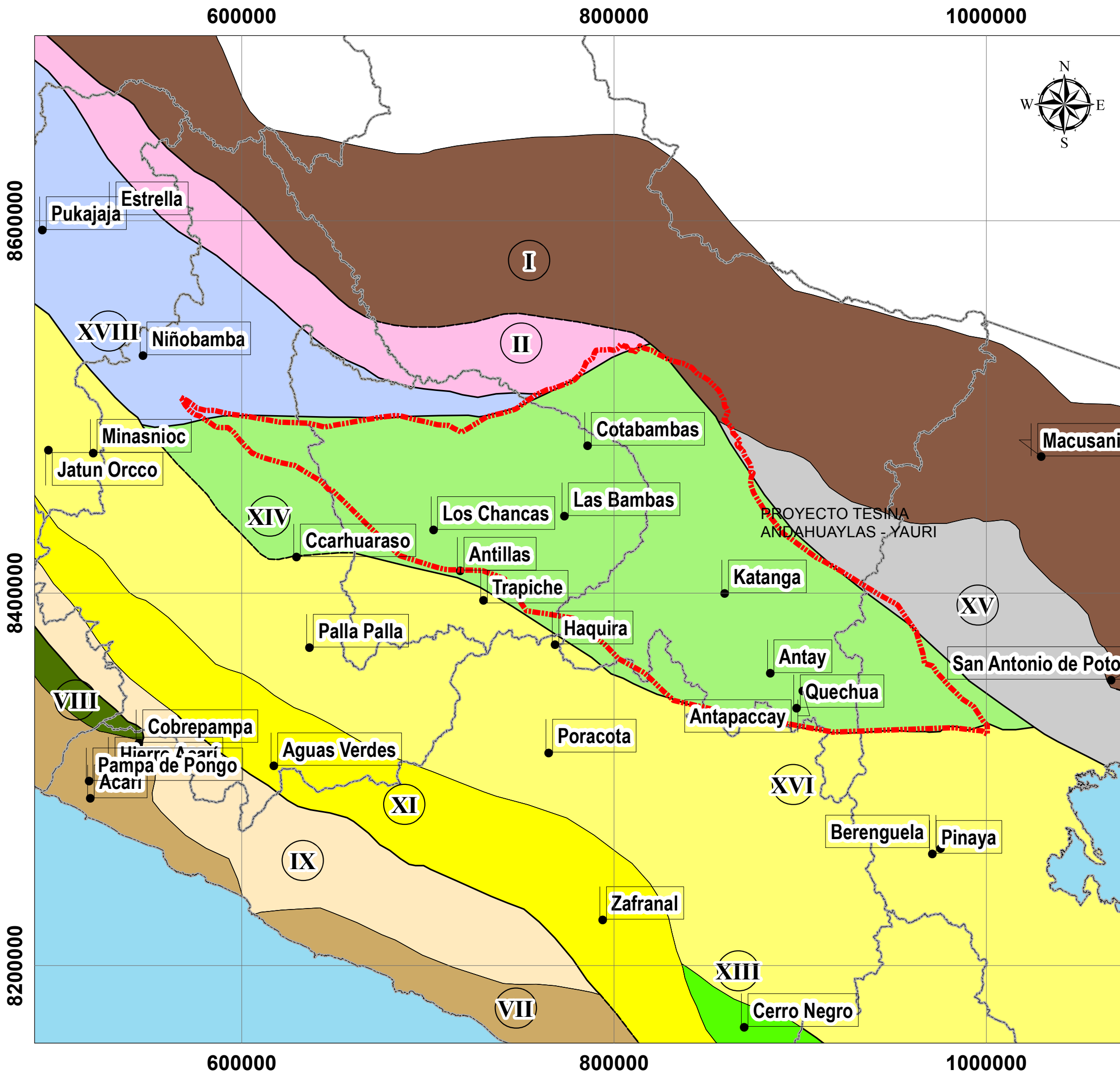
700000

750000

800000

850000

900000

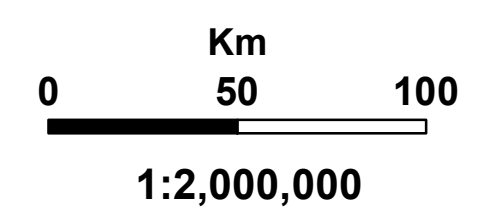


Leyenda

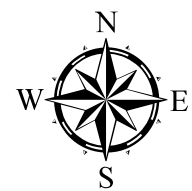
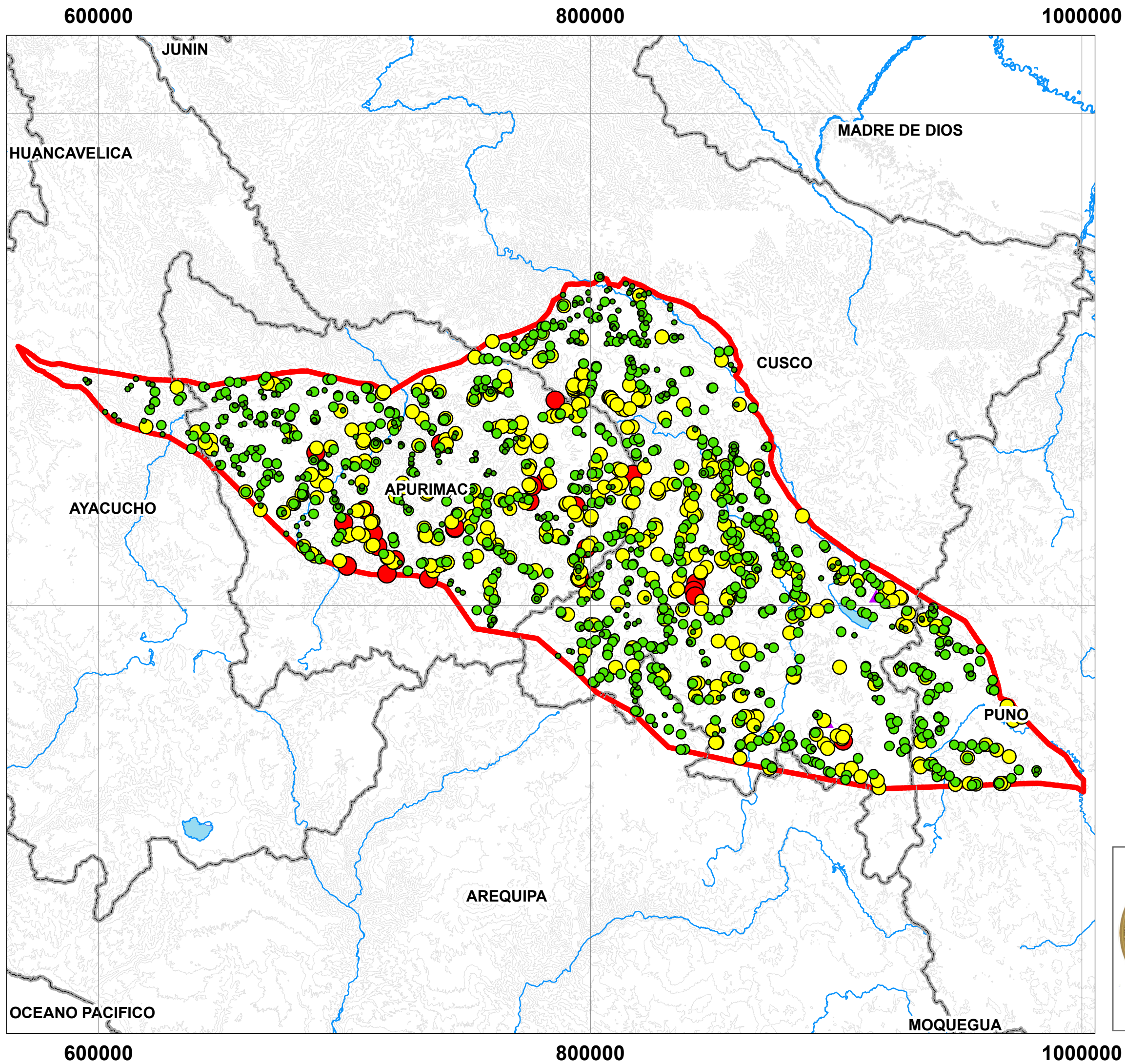
metalogenetico_2007

Id

- YACIMIENTOS POLIMETÁLICOS DEL MIOCENO
- EPITERMALES DE Au-Ag DEL OLIGOCENO-PLIOCENO
- YACIMIENTOS DE Sn DEL OLIGOCENO-MIOCENO
- PÓRFIDOS-SKARNS Cu-Mo (Au) DEL EOCENO-OLIGOCENO
- PÓRFIDOS DE Cu-Mo DEL PALEOCENO-EOCENO
- PÓRFIDOS DE Cu-Mo DEL CRETÁCICO SUPERIOR
- MESOTERMALES DE Au-Pb-Zn-Cu DEL CRETÁCICO SUPERIOR
- PÓRFIDOS Cu-Mo DEL CRETÁCICO INFERIOR
- YACIMIENTOS DE Cu-Fe-Au DEL JURÁSICO MEDIO-CRETÁCICO INFERIOR
- SKARNS-MESOTERMALES DE Cu DEL PÉRMICO
- Au EN ROCAS SEDIMENTARIAS DEL ORDOVÍCICO



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	PROYECTO TESINA PLANO METALOGENETICO	
	AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°
	ESCALA: 1:2'000,000	3
PROYECCION: WGS84 18S		

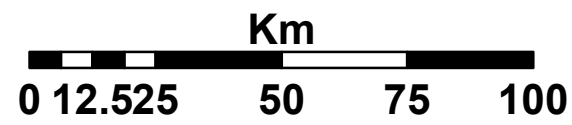


Legend

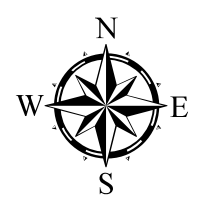
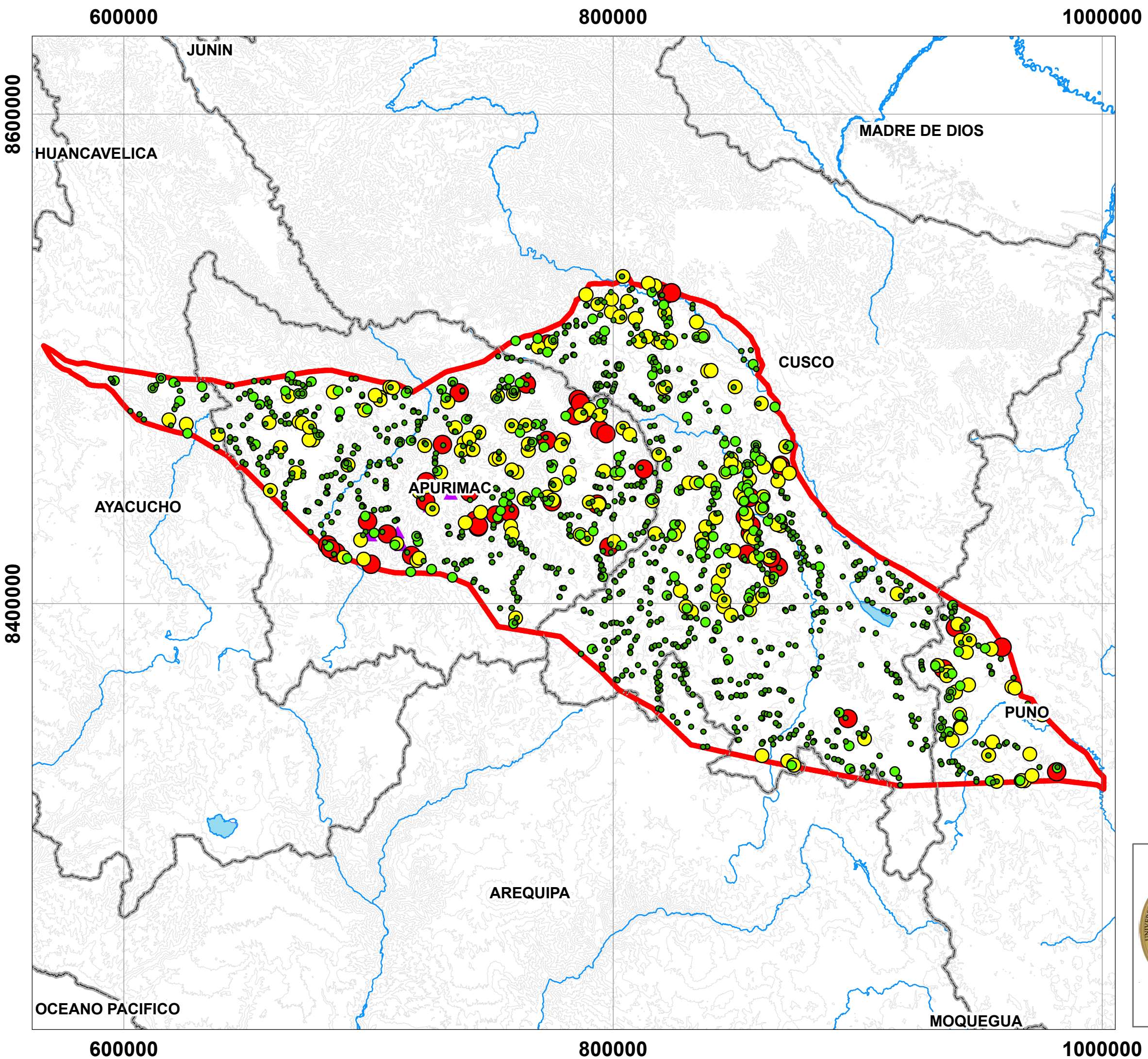
Geoquimica

CU_PPM_

- 2.0 - 20.0
- 20.0 - 40.0
- 40.0 - 160.0
- 160.0 - 400.0
- ▲ 400.0 - 1284.0



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	PROYECTO TESINA PLANO GEOQUIMICA DE CU ppm	
	AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°
	ESCALA: 1:1'500,000	4
PROYECCION: WGS84 18S		

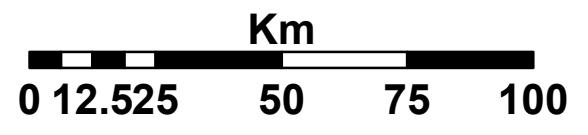


Legend

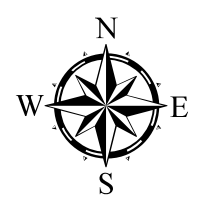
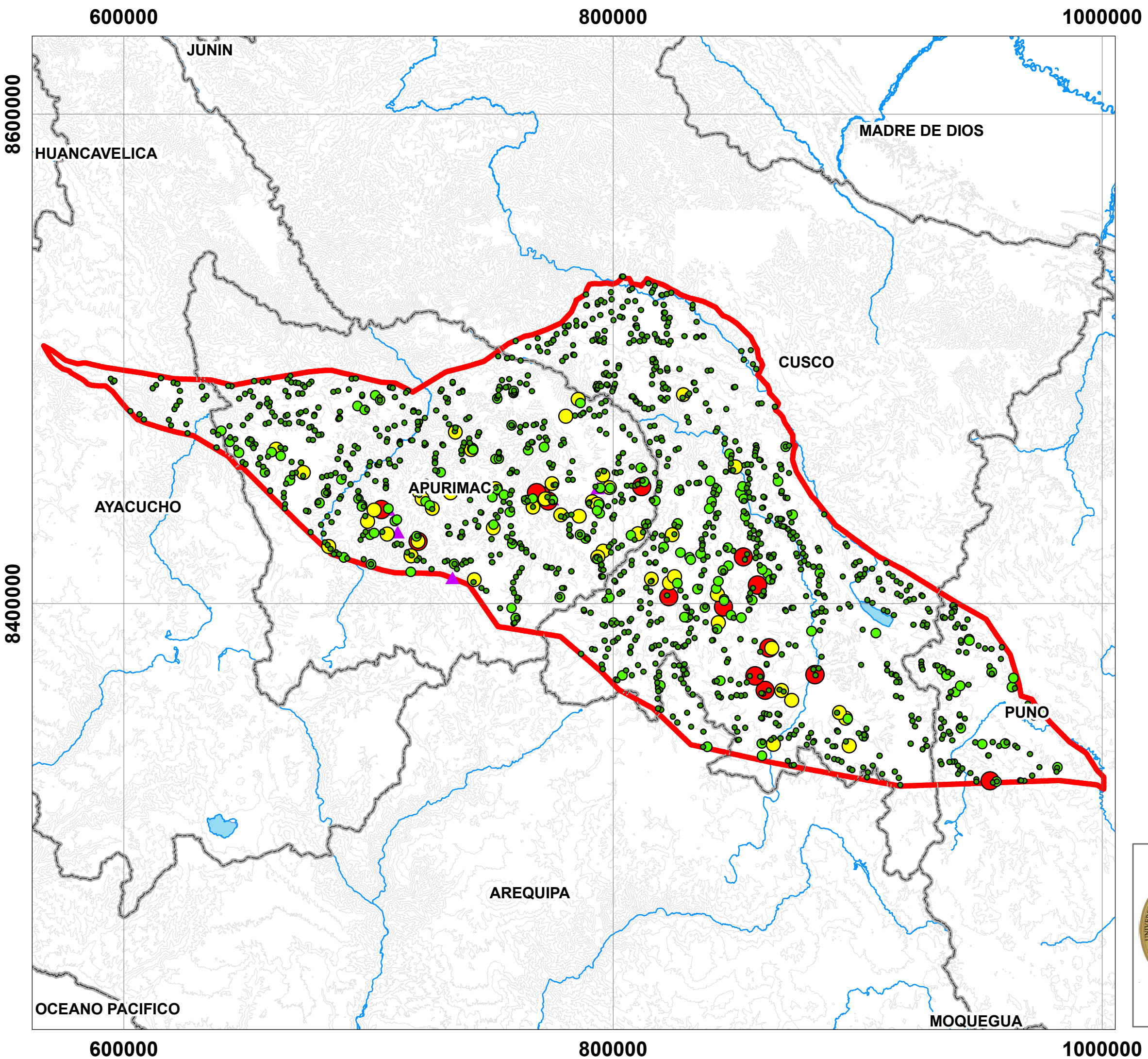
Geoquimica

MO_PPM_

- 0.9 - 2.0
- 2.0 - 3.0
- 3.0 - 6.0
- 6.0 - 10.0
- ▲ 10.0 - 21.0



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	PROYECTO TESINA PLANO GEOQUIMICA DE Mo ppm	
	AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°
	ESCALA: 1:1'500,000	5
PROYECCION: WGS84 18S		

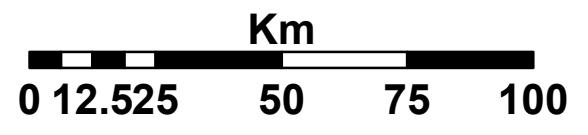


Legend

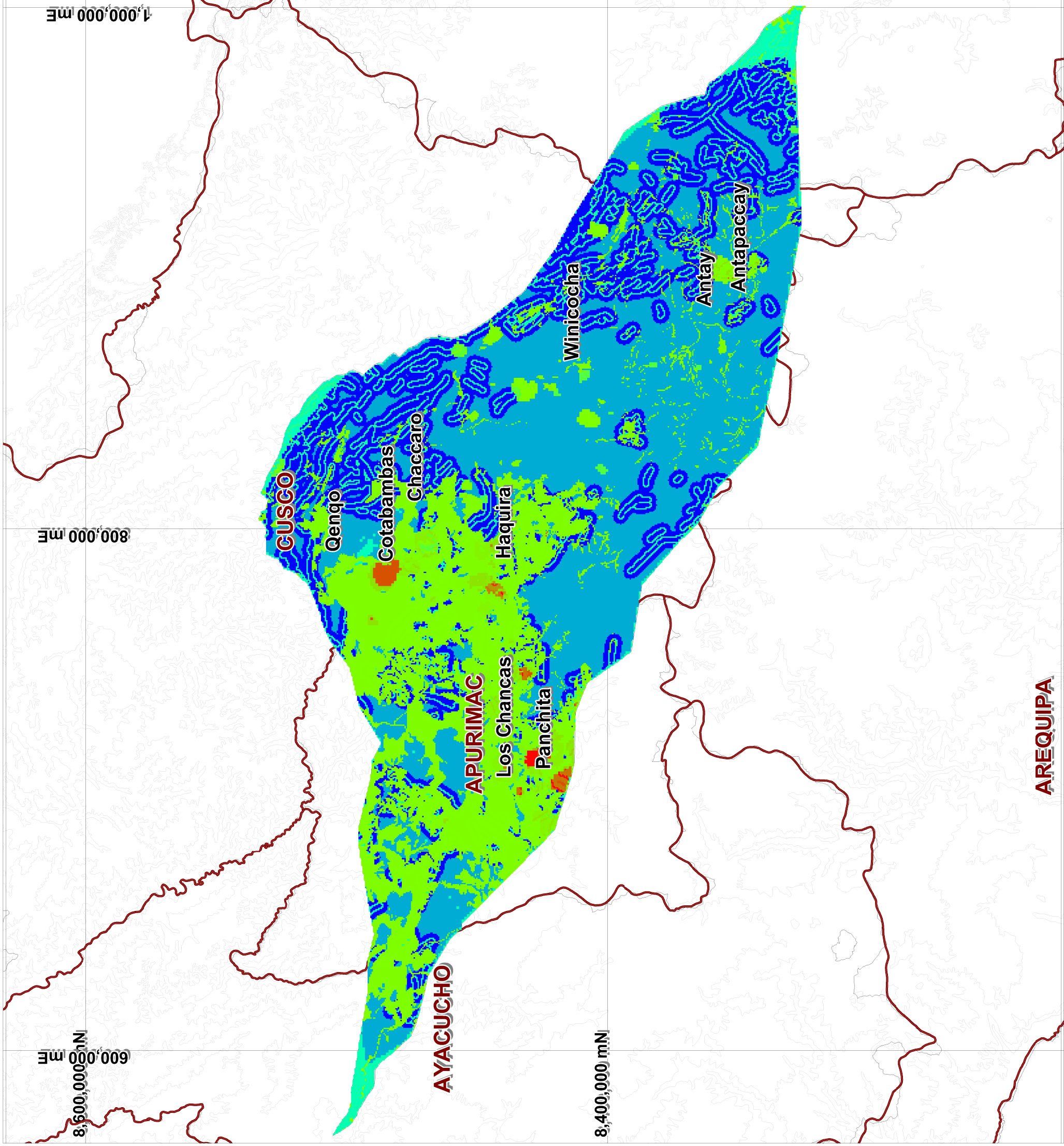
Geoquimica

AU_PPb_

- 3.0 - 10.0
- 10.0 - 40.0
- 40.0 - 200.0
- 200.0 - 500.0
- ▲ 500.0 - 1760.0



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	PROYECTO TESINA PLANO GEOQUIMICA DE Au ppb	
	AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°
	ESCALA: 1:1'500,000	6
PROYECCION: WGS84 18S		



LEYENDA

- Limite Departamenta
- ◆ Ocurrencias
- Area de Estudio
- Curvas de Nivel

WofE_UC_CuMoAu
WofE_PosteriorProbability

- 0.408491
- 0.00064266
- 7.87031e-005
- 6.44083e-005

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	PROYECTO TESINA MAPA DE FAVORABILIDAD	
AUTOR: MIGUEL ZAMORA	N°	7
ESCALA: 1:1'500,000		PROYECCION: WGS84 18S