

# Secondary Geochemical Dispersion of Cu, Ag, Pb, Zn around the Yanaquero intrusive - Michiquillay - Cajamarca

Jaime Abanto, Ing.<sup>1</sup>, Marie Sánchez, Ing.<sup>2</sup>, y Shonel Cáceres, Mg <sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, renato.abnovo@gmail.com, shonel.caceres@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, marianne23j@gmail.com

*Abstract: The main objective of this study was to know the Secondary Geochemical Dispersion of Copper, Silver, Lead and Zinc determined by the geochemical characterization in soils around the Yanaquero intrusive in the Michiquillay Sector; For this, 38 soil samples were collected from a rectangular sampling mesh with 200 m spacing, to which the pH and metal content (ppm) were identified, the latter through chemical digestion with Agua Regia, via Absorption. Atomic (EAA). All geochemical information was complemented with local mapping of the intrusive in question. With statistical characterization and data analysis, we were able to develop secondary geochemical dispersion schemes, allowing us to identify anomalies and recognize distribution trends of the four elements studied. Finally, due to the characteristics observed in the field and in the office, it was interpreted that the secondary geochemical dispersion of Copper, Silver, Lead and Zinc in soils around the Yanaquero intrusive - Michiquillay Sector, is related to theoretical mobility and geochemical zoning, in superficial environments of porphyry copper deposits.*

*Keywords: Secondary geochemical dispersion, Statistical characterization, Geochemical anomaly, Atomic absorption, Copper porphyry*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Dispersión Geoquímica Secundaria de Cu, Ag, Pb, Zn alrededor del intrusivo Yanaquero - Michiquillay - Cajamarca

Jaime Abanto, Ing.<sup>1</sup>, Marie Sánchez, Ing.<sup>2</sup>, y Shonel Cáceres, Mg.<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, renato.abnovo@gmail.com, shonel.caceres@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, marianne23j@gmail.com

**Resumen:** El objetivo principal de este estudio fue conocer la Dispersión Geoquímica Secundaria de Cobre, Plata, Plomo y Zinc determinada por la caracterización geoquímica en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero en el Sector Michiquillay; para ello se recolectó 38 muestras de suelos de una malla de muestreo rectangular con 200m de espaciamiento, a las que se les identificó el pH y contenido metálico (ppm), este último mediante la digestión química con Agua Regia, vía Absorción Atómica (AAS); toda la información geoquímica se complementó con el cartografiado local del intrusivo en mención. Con la caracterización estadística y el análisis de datos, logramos elaborar los esquemas de dispersión geoquímica secundaria, permitiéndonos identificar anomalías y reconocer las tendencias de distribución para los cuatro elementos estudiados. Por último, debido a las características observadas en campo y en gabinete, se interpretó que la dispersión geoquímica secundaria de Cobre, Plata, Plomo y Zinc en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero - Sector Michiquillay, se relaciona a la movilidad teórica y zoneamiento geoquímico, en ambientes superficiales de yacimientos tipo pórfido de Cobre.

**Palabras clave:** Dispersión geoquímica secundaria, Caracterización estadística, Anomalía geoquímica, Absorción Atómica, Pórfido de Cobre

## I. INTRODUCCIÓN

“Los métodos geoquímicos son importantes en la búsqueda de yacimientos minerales, y tienen una amplia aplicación práctica en los trabajos geológicos, además son los más económicos, eficientes, y en combinación con los métodos geofísicos, pueden revelar aquellos yacimientos que no afloran en la superficie terrestre” [1].

Al Noreste de la ciudad de Cajamarca en el distrito de la Encañada se ubica el Sector Michiquillay, esta zona alberga afloramientos de rocas intrusivas, dentro de estos cuerpos ígneos tenemos al Yanaquero, el cual tiene rasgos de ser parte de un pórfido cuprífero mineralizado. No se conoce a detalle cómo se han distribuido geoquímicamente los metales Cobre, Plata, Plomo y Zinc en los suelos alrededor del intrusivo Yanaquero, y tampoco se sabe si estos tenores geoquímicos guardan relación con la ubicación de este intrusivo [2].

En un estudio geoquímico integral, aplicado a la exploración, es conveniente realizar diversos estudios de sedimentos fluviales, suelos, y demás, aplicando técnicas analíticas como la espectrofotometría, el análisis espectral, los análisis de rayos X, la microscopia electrónica, la radiometría, el análisis isotópico, entre otras. Todo esto con la finalidad de encontrar anomalías que nos indiquen la presencia de nuevos yacimientos minerales aprovechables económicamente [3].

Se sabe que los cuerpos rocosos mineralizados generan aureolas y flujos de dispersión anómalos en un área definida, debido a que el material meteorizado es redepositado o transportado, a zonas relativamente cercanas [4]. Lo que quiere decir que la distribución de los elementos metálicos migra de la roca fuente hacia los exteriores del sistema [5].

Toda la información geoquímica recolectada en campo debe tener su caracterización estadística, la que se complementará con trabajos de campo, mapeos geológicos, entre otros. Es importante considerar lo mencionado anteriormente, debido a que con ello podemos confirmar o descartar la presencia de nuevos yacimientos minerales definiendo zonas de mayor interés para la exploración geológica [6].

Por último, esta investigación permitió conocer la dispersión secundaria de Cobre, Plata, Plomo y Zinc determinada por la caracterización geoquímica en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero en el Sector Michiquillay. Así mismo, el conocimiento obtenido en esta investigación jugaría un rol muy importante en la toma de decisiones al ser utilizado por las empresas que se dedican a realizar la exploración de la zona; y también servirá a la comunidad investigadora y público en general como base teórica para la exploración geológica relacionada a cuerpos intrusivos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se basó en el siguiente flujograma (Ver Fig. 1), realizándose principalmente en 3 etapas, las cuales se detallan a continuación.

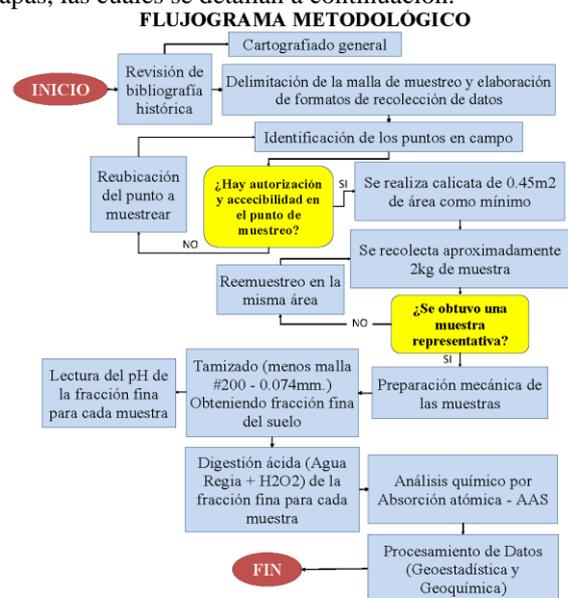


Fig. 1 Flujograma de la metodología empleada en toda la investigación

## A. Etapa Pre-Campo

Se inició revisando la información bibliográfica relacionada al tema de investigación y documentación histórica de la zona estudiada; asimismo se elaboró los formatos de recolección de datos e información complementaria los cuales se usaron para la etapa de campo y post campo.

De la misma manera se delimitó y elaboró la malla de muestreo, localizando un área favorable para muestrear suelos, dentro de los terrenos permitidos por la comunidad. La superficie designada tuvo un área de 3 km<sup>2</sup> (1.5 x 2 km de longitud).

Establecer un espaciamento en la red de muestreo es importante y muchas veces depende del tipo de estudio a realizar, se pueden utilizar las tendencias geológico-estructurales, movilidad geoquímica de los elementos a estudiar, la escala prospectiva, entre otros [7].

Debido a ello, en esta investigación se optó por muestreo sistemático, que consistió en obtener una muestra de suelo en cierto intervalo regular constante, con un espaciamento entre muestra de 200m aproximadamente con una tendencia N-S en la distribución de estas.

Inicialmente se planificó la recolección de por lo menos 38 muestras, considerándose esta cantidad debido a que estadísticamente se debe contar con un mínimo de  $40 \pm 2$  muestras (ver Fig. 2) con el fin de encontrar al menos una anomalía [8].

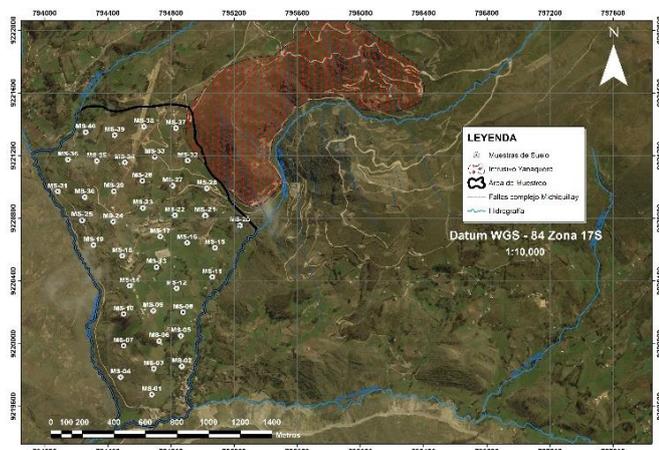


Fig. 2 El área de muestreo delimitado por la red de drenajes y el intrusivo Yanaguero, la tendencia de distribución de las muestras es N-S y 200m de espaciamento entre cada una de ellas aproximadamente.

## B. Etapa de Campo

Se subdividió en dos subetapas: Muestreo de suelos y Recolección de información geológica (cartografiado general).

### Muestreo de suelos

Para cada muestra se realizó una calicata de 0.45 m<sup>2</sup> aproximadamente (dependió la disposición del terreno insitu), la profundidad de esta calicata tuvo como máximo 1.3m. En cada calicata se recolectó una muestra de 2Kg de

suelo del Horizonte B; pero cuando el suelo presentó alto contenido de agua se adicionó ½ Kg más de suelo a la bolsa de muestreo. Antes de pasar al siguiente punto designado se recolectó la mayor cantidad de información y datos complementarios insitu registrándolos en la ficha de muestreo de suelos respectiva.

Si durante el proceso de muestreo se encontraría suelo no apto para muestrear, ese punto asignado se anularía y se continuaría con los demás.

### Recolección de datos geológicos

Para complementar la información geológica en la investigación se realizó un cartografiado general del intrusivo Yanaguero, este consistió en combinar información geológica preexistente con información geológica actual recopilada en campo.

El método utilizado para el cartografiado local fue el de “perfiles o transectas”, este consistió en describir la geología observada mientras se camina a lo largo de una ruta predeterminada. Los contactos y otros rasgos geológicos serán extrapolados entre las observaciones realizadas. Los itinerarios deben planificarse de tal manera que se corte lo más perpendicular posible la estructura geológica [9].

## C. Etapa Post Campo

En esta etapa se desarrolló dos actividades principalmente que fueron: el Análisis en laboratorio y el Procesamiento de datos en gabinete.

### Análisis en Laboratorio

En el laboratorio de mecánica de suelos, se realizó la preparación mecánica de todas las muestras, este proceso contempló el secado, pulverización y tamizado para cada de estas. Producto de ello se obtuvo una fracción fina del suelo (menos malla #200 - 0.074mm).

La fracción fina del suelo obtenida anteriormente se la subdividió en dos partes iguales de manera representativa. La primera se utilizó para calcular el pH de cada muestra, y segunda parte se la llevó al laboratorio químico para su respectiva digestión.

En el laboratorio químico se realizó la digestión de todas las muestras empleando el método analítico con Agua Regia, este método consistió utilizar la fracción fina del suelo (obtenido en proceso antes mencionado) para luego descomponerla a través del ataque químico con los ácidos HCl y HNO<sub>3</sub> y una solución oxidante de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Esto permitió la disolución de la muestra y su posterior lectura a través de espectrofotometría de absorción atómica (AAS) [10].

En el equipo de espectrofotometría de absorción atómica (AAS) se realizó la lectura del análisis químico, el cual nos dio a conocer el contenido metálico para cada una de las muestras recolectadas. Durante este proceso se preparó los estándares de calibración y muestras blancos respectivamente.

El equipo Agilent Technologies 240 FS con el que se trabajó, nos proporcionó los resultados en unidades de miligramos sobre litro (mg/l), los cuales fueron transformadas a partes por millón (ppm) usando la fórmula (1). Esto nos permitió tener todos los datos estandarizados [11].

$$\text{Elemento (ppm)} = \frac{\text{C.L. (mg/l)} \times \text{V.M. (ml)} \times \text{F.D.}}{\text{P.M. (g)}} \quad (1)$$

C.L. Concentración Leída  
 V.M. Volumen de la muestra  
 F.D. Factor de Dilución  
 P.M. Peso de la muestra

#### Procesamiento de datos

Conociendo el contenido metálico (ppm) de cada una de las muestras recolectadas, se procesó la información en los softwares Minitab 21 y Microsoft Excel 365, realizando así la Caracterización Estadística (CE) de todos estos.

En la (CE) primero se verificó que los valores del contenido metálico para cada elemento estén dentro de los límites de detección permisibles, proporcionados de acuerdo al método de análisis realizado (Ver tabla I).

TABLA I  
 TÉCNICAS ANALÍTICAS Y LÍMITES DE DETECCIÓN

Elemento	INAA	IPC-AES	AAS	ES	XRF	C
Ag	0,2	50*	0.00	0.05	8	0,05
Cu		1	0.005	0.5	5	0,02
Pb			0,01	5	18	0,06
Zn	2	1	0,002	100	3	1

AAS - Espectroscopia de Absorción Atómica. Unidades dadas ppm. y (\*) en ppb. [12].

Seguidamente con ayuda de las gráficas de control se identificó la existencia de altos erráticos o únicamente de valores altos, estos generalmente representan menos del 5% del total de la población y por ello merecen una atención y un tratamiento especial [13].

Luego de ello se realizó prueba estadística general, calculando las medidas de tendencia central y medidas de dispersión para cada elemento analizado. Además, para una mejor comprensión de los datos se aplicó la prueba de normalidad de Anderson Darling con la finalidad de comprobar la tendencia de distribución normal, que es lo ideal para un tratamiento estadístico de valores geoquímicos. Debido a la naturaleza de los datos, no siempre se cumple la condición de distribución normal idealizada, por ello es que se realizó un ajuste log-normal para trabajar con estos.

Así mismo, se calculó la estadística descriptiva bivariable o correlacional de los datos, pues se sabe que en algunos trabajos geológicos es necesario conocer y modelar como son las relaciones entre variables que son medidas en una misma unidad experimental.

Teóricamente, cuando dos variables están relacionadas o asociadas varían en forma conjunta, si el valor de una aumenta el de la otra crece o decrece de manera permanente; si las dos variables están funcionalmente relacionadas no sólo varían simultáneamente, sino que el valor de una de ellas permite predecir el valor de la otra [14].

En el análisis de datos existen tres métodos ampliamente utilizados para determinar la correlación entre variables, siendo estos los coeficientes: Pearson, Spearman y Kendall (ver Fig. 3), su estimación va a depender de la naturaleza de las variables utilizadas, si son cualitativas o cuantitativas.



Fig. 3. Tipos de Correlación Bivarial Pearson

Por último, para el análisis geoquímico consideraremos al Background, Threshold y Anomalías, como los parámetros geoquímicos principales.

#### Background ( $\bar{x}$ )

Se considero como Background ( $\bar{x}$ ) al promedio geométrico de la población de muestras, debido a que este no se deja influenciar por valores altos y bajos que pueda tener la población [15].

#### Threshold ( $\bar{x} + 2\sigma$ )

El “umbral” o “Threshold” ( $\bar{x} + 2\sigma$ ) lo definiremos como los límites de fluctuación local y regional del valor normal, siendo este el límite superior de la fluctuación del valor de fondo (Background) [16]. Para calcular este valor se empleó la formula (2).

$$\text{Threshold} = \text{Media geométrica } (\bar{x}) + 2 \text{ desviaciones estándar } (\sigma) \quad (2)$$

#### Anomalía ( $\bar{x} + 2\sigma$ )

En este estudio se considerará como anomalía geoquímica, al valor por encima del Threshold ( $\bar{x} + 2\sigma$ ).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Ubicación

La zona de estudio se encuentra ubicada aproximadamente a 48 km al Nor-Este de la ciudad de Cajamarca, con elevaciones que fluctúan entre los 3000 y los 3800 msnm. Pertenece al paraje de Michiquillay, distrito de La Encañada; provincia y departamento de Cajamarca, respectivamente [2].

#### B. Geología

La zona de estudio presenta una cobertura de depósitos fluvio-glaciares para las zonas más elevadas y aluviales en las faldas de cerros y laderas de valles, respectivamente. Los depósitos fluvio-glaciares constituidos por material fino areno-arcilloso en cambio los aluviales constituidos por gravas en matriz areno-arcillosa [17].

En el Pórfido de Michiquillay (19.77 ~ 0.05 Ma) se reconocen al menos dos fases intrusivas importantes, donde la litología más común es una diorita porfídica de grano medio, con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda; los fenocristales de cuarzo son redondeados, tienen poca abundancia.

La plagioclasa se presenta en fenocristales euhedrales ( $An_{42-52}$ ) de 3 a 5 mm, siendo este el mineral más abundante, los fenocristales euhedrales de biotita varían de 0.5 a 8 mm y contienen inclusiones menores de feldespato potásico, por último los fenocristales de hornblenda son aciculares 0.3 a 1 cm.



Fig. 4 Mirando al Noreste observamos al Intrusivo Yanaquero Denominado litológicamente como un Pórfido Diorítico de grano fino (NO: Noroeste, SE: Sureste).

Las secuencias sedimentarias del cretáceo se encuentra bordeando al intrusivo Michiquillay, el cual está alojado entre unidades de cuarcitas blancas masivas y areniscas generalmente de grano medio y color blanquecino, en la parte inferior, con intercalaciones delgadas de lutitas marrones y grises en la parte superior, por el sur se encuentran unidades de roca caliza de las formaciones Chúlec – Pariambo (Ki-Chu-Pt) indiviso, donde se describe a una secuencia de lutitas calcáreas, margas amarillentas y lechos de calizas que presentan color pardo por intemperismo [18].



Fig. 5 Mirando al Este se observamos las rocas sedimentarias químicas que conforman la formación Chúlec litológicamente se caracteriza por ser una caliza de color beige intercalado con margas amarillentas de 70cm de espesor en cada estrato aproximadamente (Vista al: N: Norte, S: Sur).

En la interpretación estructural Davies (2002), describe al complejo intrusivo de Michiquillay indicando que está ubicado en el bloque techo de una falla inversa con tendencia al NO [18].

La falla tiene un buzamiento de  $\sim 60^\circ$  hacia el NE, esta se la conoce como la Falla Michiquillay [19]. Se caracteriza por contener una brecha de matriz soportada, con fragmentos de cuarcita y caliza, aunque no se observaron fragmentos intrusivos [18].

En lo que respecta a la alteración y mineralización, es la alteración potásica la más fuerte en las partes noreste y suroeste de la perspectiva, pero se extiende solo unos pocos metros en la roca caja.

Las vetillas asociadas con la alteración potásica incluyen magnetita temprana (1-2 mm) y vetillas de biotita que son atravesadas por vetillas de cuarzo [18].

La alteración fílica intensa ha sobrepresionado destructivamente texturas más antiguas. Sin embargo, la intensidad de la alteración cuarzo-moscovita se debilita hacia los bordes del núcleo donde ha reemplazado parcialmente las rocas con alteración potásica. La parte central y el borde de la zona cuarzo sericita (alteración Fílica), se encuentra afectado por la alteración argílica.

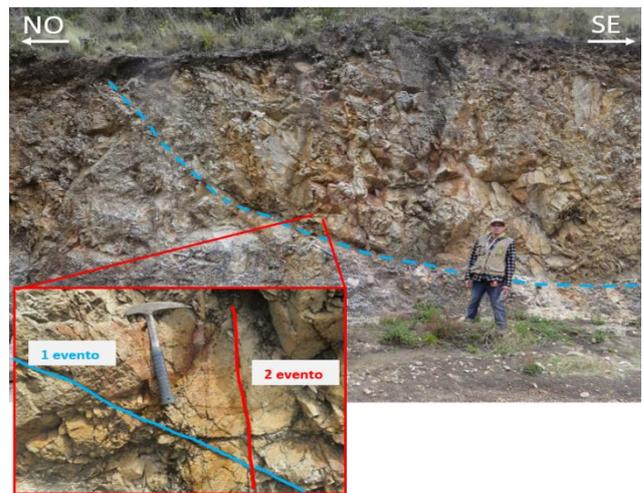


Fig. 6 Mirando al Norte observamos al macizo rocoso, completamente alterado, la alteración que presente es la Fílica, característico por presentar vetillas de Qz-sericita, y sin presencia de ferromagnesiano. Predominan las fracturas sub horizontales y sub verticales, teniendo relación de corte entre ambas. Así mismo una estructura sub vertical (falla) generando zona de daño (parte inferior de la foto), (Vista al: NO: Noroeste, SE: Sureste).

Los sulfuros hipógenos asociados con la alteración potásica incluyen Calcopirita, Molibdenita, Pirita y Bornita en menor proporción [18]. En otros estudios también identificó enargita, luzonita y tetrahedrita-tennantita dentro de las partes centrales superiores de la zona de alteración fílica.

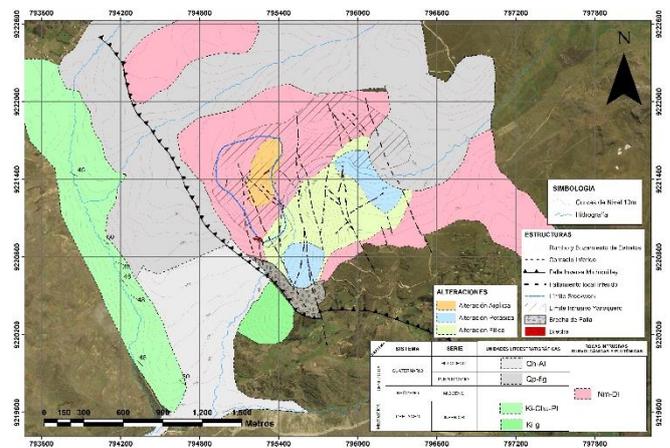


Fig. 7 Mapa litológico – estructura del área de estudio, elaborado en combinación de la información cartográfica histórica e información actual recolectada en campo.

### C. Tratamiento estadístico

A continuación, se muestra la concentración química en ppm y el valor del pH para las 38 muestras analizadas para cada elemento específicamente, en esta investigación (Ver tablas II y III).

TABLA II  
BASE DE DATOS DEL CONTENIDO METALICO PPM

Muestra	Cu	Ag	Pb	Zn	Muestra	Cu	Ag	Pb	Zn
MS-01	275	0.10	20	29	MS-21	NO SE ANALIZÓ			
MS-02	296	0.24	7	32	MS-22	149	0.24	13	62
MS-03	4156	0.10	97	187	MS-23	193	0.17	57	153
MS-04	90	0.31	10	70	MS-24	113	0.19	12	64
MS-05	554	0.36	8	53	MS-25	NO SE ANALIZÓ			
MS-06	181	0.71	7	64	MS-26	138	0.26	32	50
MS-07	764	0.17	70	83	MS-27	153	0.25	15	61
MS-08	65	0.43	17	60	MS-28	171	0.30	148	123
MS-09	187	0.23	23	89	MS-29	73	0.23	23	73
MS-10	36	0.81	12	65	MS-30	36	0.39	13	185
MS-11	112	0.48	12	82	MS-31	80	0.27	25	132
MS-12	132	0.12	43	153	MS-32	121	0.20	18	50
MS-13	207	0.82	52	181	MS-33	218	0.17	30	109
MS-14	50	0.63	18	80	MS-34	171	1.76	27	91
MS-15	101	0.15	10	40	MS-35	57	0.32	45	192
MS-16	127	0.27	12	89	MS-36	89	0.27	22	88
MS-17	217	1.15	80	253	MS-37	144	0.10	18	34
MS-18	429	0.23	30	77	MS-38	242	0.14	20	96
MS-19	55	0.25	13	90	MS-39	107	0.30	12	75
MS-20	354	0.21	47	69	MS-40	67	0.24	45	162

Las muestras MS-21 y MS-25 no se analizaron, puesto que no se encontró suelo favorable para muestrear.

TABLA III  
BASE DE DATOS DE LA CLASIFICACION DEL PH

Muestra	pH	Clasificación	Muestra	pH	Clasificación
MS-01	7.1	Básico	MS-21	NO SE ANALIZÓ	
MS-02	7.2	Básico	MS-22	5.3	Ácido
MS-03	7.5	Básico	MS-23	5.1	Ácido
MS-04	7.6	Básico	MS-24	5.2	Ácido
MS-05	5.4	Ácido	MS-25	NO SE ANALIZÓ	
MS-06	6.6	Neutro	MS-26	5	Ácido
MS-07	6.2	Neutro	MS-27	5.4	Ácido
MS-08	5.5	Neutro	MS-28	5.2	Ácido
MS-09	5.4	Ácido	MS-29	5.2	Ácido
MS-10	5.1	Ácido	MS-30	7.1	Básico
MS-11	5.6	Neutro	MS-31	5.3	Ácido
MS-12	5.2	Ácido	MS-32	5.6	Neutro
MS-13	5.8	Neutro	MS-33	5.5	Neutro
MS-14	5.4	Ácido	MS-34	5.1	Ácido
MS-15	5.4	Ácido	MS-35	5.4	Ácido
MS-16	5.3	Ácido	MS-36	5.3	Ácido
MS-17	5.3	Ácido	MS-37	5.1	Ácido
MS-18	5.6	Neutro	MS-38	5.5	Neutro
MS-19	5.1	Ácido	MS-39	5.2	Ácido
MS-20	4.6	Ácido	MS-40	5.4	Ácido

Clasificación del pH según [20], Ácido < 5.5, Neutro 5.5 – 7.0, Básico >7.0

#### Identificación de valores altos erráticos con Gráficas de Control

Consideramos altos erráticos a los valores que sobrepasan  $\bar{x}+3\sigma$  y no guardan relación gráfica con los valores de las otras muestras.

Los valores considerados como altos erráticos no fueron eliminados, solo se reemplazaron por la media ( $\bar{x}$ ) + 1, 2 o 3 desviaciones estándar ( $\sigma$ ) según correspondió, en base al criterio geológico empleado.

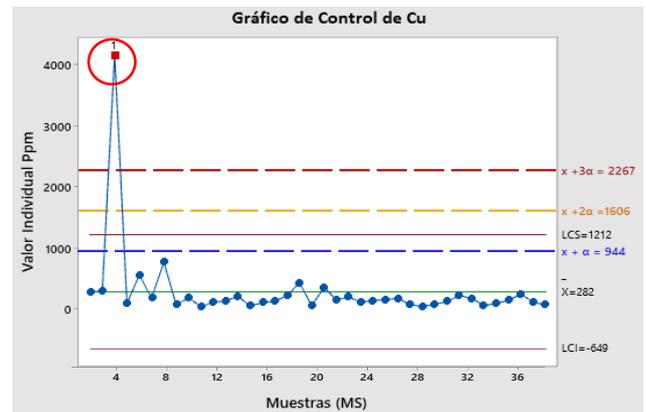


Fig. 8 El Cu, en la muestra Ms-03 alcanzó el valor máximo (4157ppm), considerándose alto errático, reemplazándose luego por  $\bar{x}+\sigma$  (944 ppm)

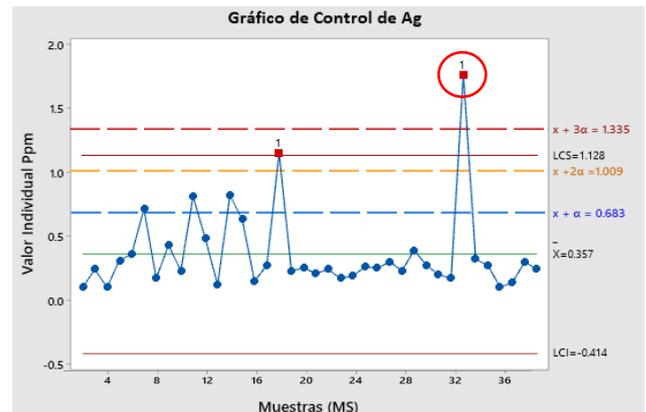


Fig. 9 La Ag, en la muestra Ms-34 alcanzó el valor máximo (1.764ppm), considerándose alto errático, reemplazándose luego por  $\bar{x}+3\sigma$  (1.335ppm)

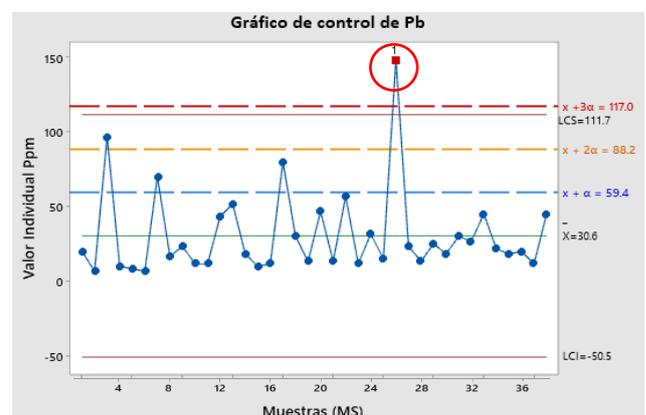


Fig. 10 El Pb, en la muestra Ms-28 alcanzó el valor máximo (148.3ppm), considerándose alto errático, reemplazándose luego por  $\bar{x}+3\sigma$  (117ppm).

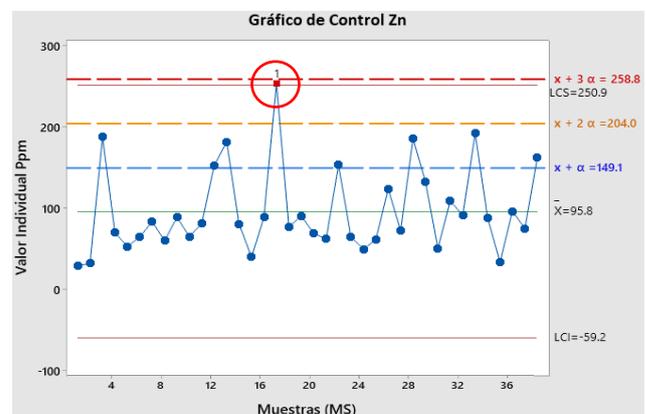


Fig. 11 El Zn, con la muestra Ms-17 (252.8ppm), no se reemplazará pues que, solo se la consideraría como valor alto debido a que está dentro de lo permitido (258.8ppm)

**Prueba de normalidad de Anderson Darling (AD)**

Se aplicó la prueba de normalidad de Anderson Darling, obteniendo los valores para cada uno de los elementos estudiados, Cu: 3.637, Ag: 3.767, Pb: 2.821 y Zn: 1.730. Asimismo observamos que el “valor p” para los 4 metales fue de <0.005. Gráficamente, algunos de los valores de las muestras (puntos azules) no se ajustan a las líneas idealizadas de regresión, como se muestra en las Fig. 12 – Fig. 15.

Debido a las condiciones antes mencionadas podemos decir que las distribuciones de los datos para los 4 metales no cumplen una tendencia de normalidad, por lo que se tuvo que realizar una transformación Logaritmo Natural (Ln).

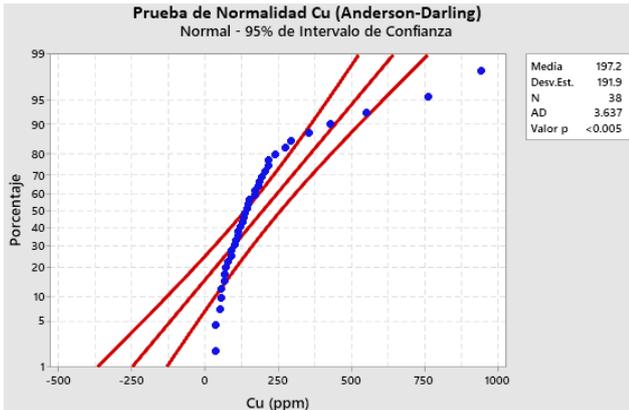


Fig. 12 Prueba de normalidad de AD para Cu, donde los puntos azules representan los valores de las muestras (MS) y las líneas rojas presentan el modelo idealizado para una Distribución Normal.

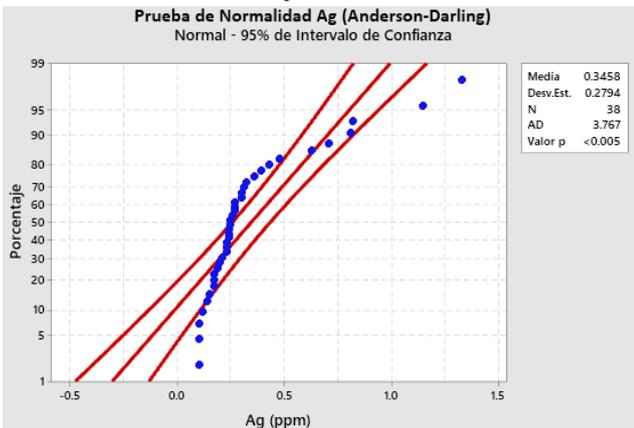


Fig. 13 Prueba de normalidad de AD para Ag, donde los puntos azules representan los valores de las muestras (MS) y las líneas rojas presentan el modelo idealizado para una Distribución Normal.

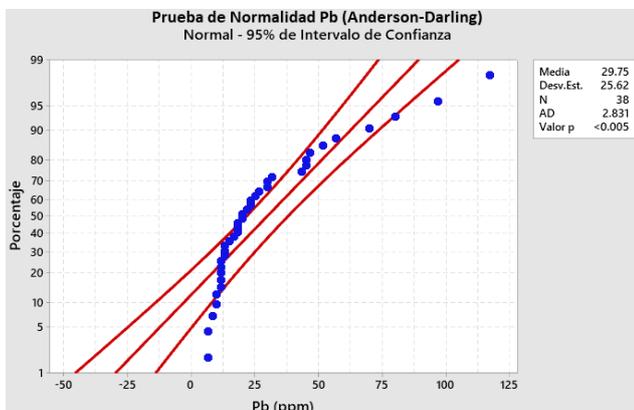


Fig. 14 Prueba de normalidad de AD para Ag, donde los puntos azules representan los valores de las muestras (MS) y las líneas rojas presentan el modelo idealizado para una Distribución Normal.

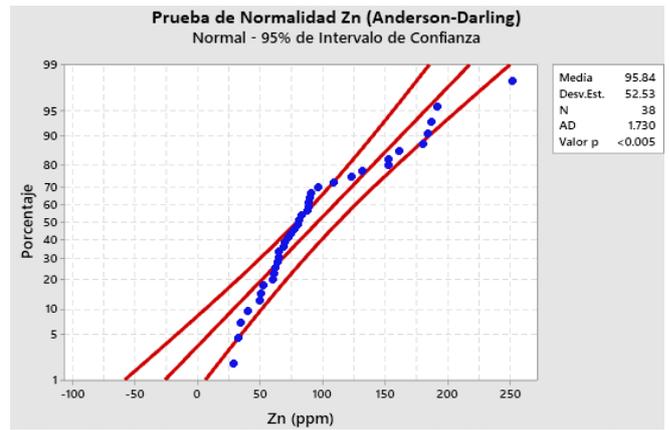


Fig. 15 Prueba de normalidad de AD para Ag, donde los puntos azules representan los valores de las muestras (MS) y las líneas rojas presentan el modelo idealizado para una Distribución Normal.

**Estadística descriptiva univariable**

Antes de calcular la estadística univariable se realizó la transformación Logaritmo Natural (Ln) a todos los datos, con la finalidad de que estos presenten una distribución Normalizada, (Ver Fig. 16 – Fig. 19).

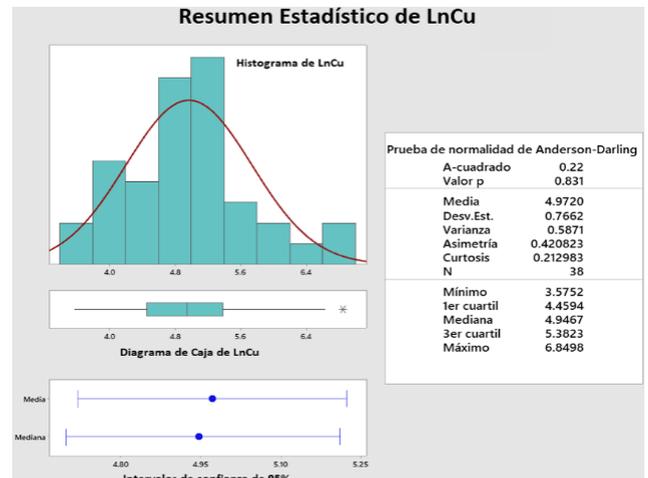


Fig. 16 Resumen estadístico final de Cu aplicando el Logaritmo Natural (LnCu).

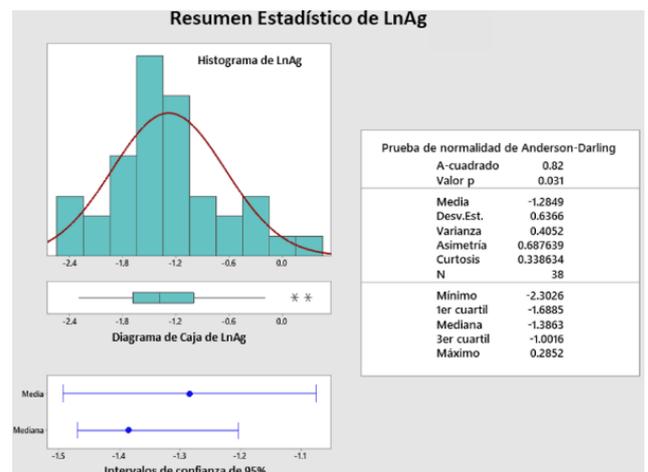


Fig. 17 Resumen estadístico final de Ag aplicando el Logaritmo Natural (LnAg).

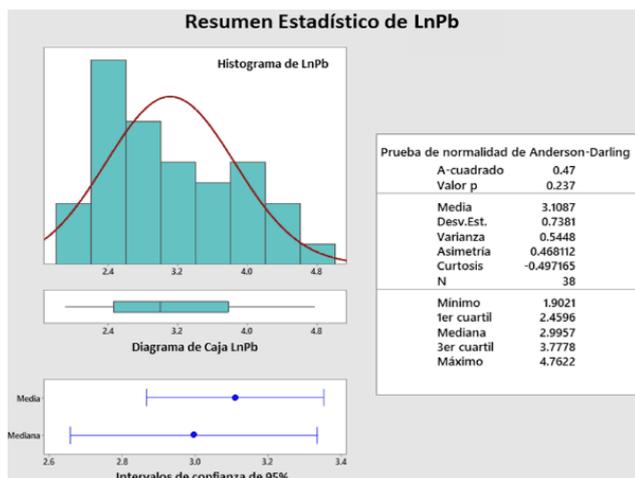


Fig. 18 Resumen estadístico final de Pb aplicando el Logaritmo Natural (LnPb).

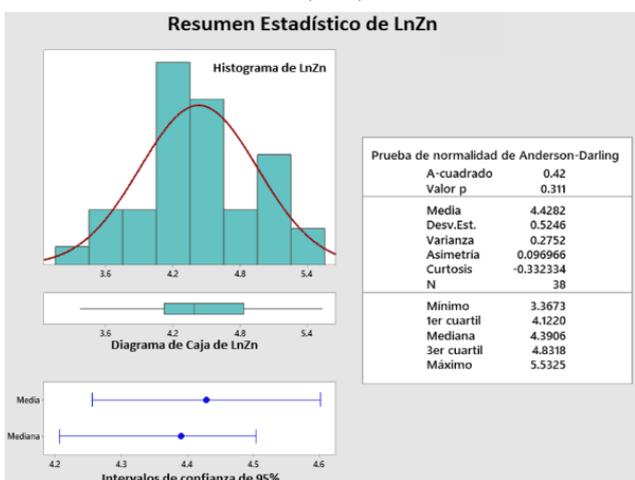


Fig. 19 Resumen estadístico final de Zn aplicando el Logaritmo Natural (LnZn).

### Estadística descriptiva bivariable – Correlación Pearson

En esta investigación optamos por usar el coeficiente de correlación de Pearson (Ver Fig. 20 y Tabla IV), debido a que la población muestral de los datos correlacionados ya presenta una distribución normal, además de ser de gran aplicación en las ciencias naturales ya que realiza una relación paramétrica de una población muestras.

Para el caso que las variables que no se distribuyan normalmente pueden utilizar el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman [21].

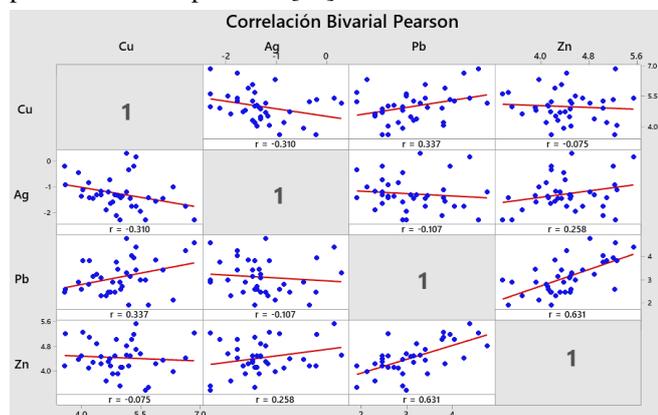


Fig. 20 Correlación bivariable Pearson entre Cu, Ag, Pb y Zn con valores en base (Ln), el valor “r” fluctúa entre  $-1 \leq r \leq 1$ .

TABLA IV  
VALORES POSITIVOS Y NEGATIVOS PARA LA CORRELACIÓN PEARSON

Valor positivo	Valor negativo	Correlación
0.01 – 0.29	-0.01 a -0.29	Baja correlación
0.30 – 0.49	-0.30 a -0.49	Mediana correlación
0.50 – 0.69	-0.50 a -0.69	Buena correlación
0.70 – 1.00	-0.70 a -1.00	Muy buena correlación

Si el valor “r” de correlación Pearson bivariable es 1 se consideran una muy buena correlación positiva o si es -1 se consideran una muy buena correlación negativa y si es 0 se considera una correlación nula. La tabla fue tomada [22] y [23].

De los valores obtenidos en la Fig. 20, consideraremos los valores a resaltar a los que poseen Mediana Correlación y Buena Correlación positiva. El Cu – Pb tienen mediana correlación directa (0.337), lo que quiere decir que a medida que el Cu se enriquece el Pb sigue la misma tendencia, este enriquecimiento se debe principalmente a una afinidad Calcófila que presentan estos metales, debido grandes anomalías de azufre, ante la presencia de un cuerpo intrusivo del tipo pórfidos cupríferos a distancia [24].

De la misma manera Pb – Zn poseen una buena correlación Positiva (0.631), a medida que el contenido metálico del Pb aumenta, en el Zn se sigue la misma tendencia; igualmente que para el caso anterior estos metales presentan una afinidad Calcófila (azufre), además esta asociación en particular se debe al zoneamiento característico de un sistema tipo pórfido de cobre, debido a que estos dos metales no se asocian a las zonas de alta temperatura, y por ello migran a hacia la parte externa del sistema [25].

### D. Dispersión Geoquímica Secundaria

#### Cobre

TABLA V  
PARÁMETROS GEOQUÍMICOS DE COBRE

Elemento Químico	Cu (ppm)	Ln <sub>Cu</sub>
Nº muestras	38	38
Valor Min	35.69	3.58
Valor Max	943.88	6.85
Desviación. Estándar ( $\sigma$ )	2.15	0.77
Background ( $\bar{x}$ )	144.32	4.97
Threshold ( $\bar{x}+2\sigma$ )	668.09	6.5
Nº Anomalías ( $>\bar{x}+2\sigma$ )	2	-----

Interpretamos que la dispersión geoquímica de Cobre, con valores de las muestras que sobrepasan al Background (144.32 ppm) tienen un zoneamiento de tendencia N-S a lo largo del área de estudio. La mayor concentración de Cobre que se observa en las muestras está ubicada al Sur del intrusivo Yanaquero, esto es característico debido a la alta movilidad del Cobre en ambientes superficiales [26]. Así mismo, identificamos un halo tipo anillo que bordea el intrusivo. Por otro lado, los valores inferiores al Background tienen se ubican al SO del intrusivo estudiado.

El pH predominante de las muestras analizadas es Ácido, esto se explica debido a que el Cobre tiene alta movilidad en ambientes ácidos, dispersándose a mayores distancias de la fuente principal, excepto para algunos casos que el pH es Neutro.

Por otra parte, a 1360 metros del intrusivo Yanaquero con dirección SSO aproximadamente, se ubican las muestras Ms-03 y Ms-07 las cuales tienen los mayores tenores geoquímicos (valores anómalos) de 943.7 ppm y 764.3 ppm respectivamente, estas muestras tienen un pH Básico y Neutro, además se sabe que cerca a estas muestras encontramos afloramientos sedimentarios (calizas).

De lo mencionado anteriormente podríamos interpretar que el afloramiento sedimentario está siendo una barrera geoquímica, neutralizando la movilidad del Cobre (Ácido) y haciendo precipitarlo con valores altos.

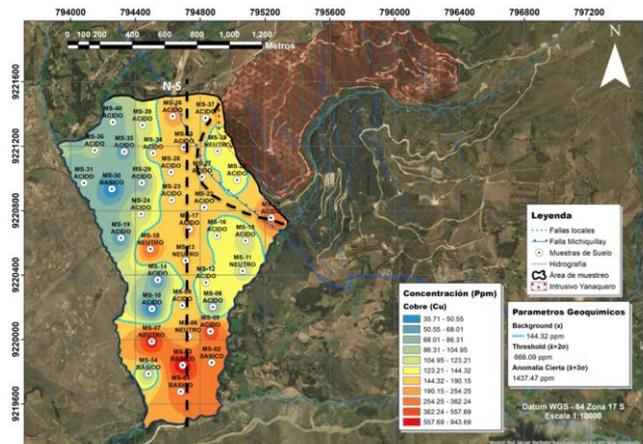


Fig. 21 Zoneamiento de la dispersión geoquímica de Cobre en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero.

### Plata

TABLA VI  
PARÁMETROS GEOQUÍMICOS DE PLATA

Elemento Químico	Ag (ppm)	Ln_Ag
N° muestras	38	38
Valor Min	0.1	-2.303
Valor Max	1.33	0.285
Desviación Estándar ( $\sigma$ )	1.891	0.637
Background ( $\bar{x}$ )	0.277	-1.285
Threshold ( $\bar{x}+2\sigma$ )	0.989	-0.011
N° Anomalías ( $>\bar{x}+2\sigma$ )	2	-----

Interpretamos que la dispersión geoquímica de Plata con valores que sobrepasan al Background (0.277 ppm), tienen un zoneamiento de tendencia NNE – SSO.

El pH predominante de las muestras analizadas con mayor tenor de Plata está relacionado a un ambiente Ácido y Neutro. Teóricamente se cumple con lo evidenciado en campo, pues la Plata tiene alta y media movilidad en un ambiente Ácido y Neutro y baja movilidad en ambiente Básico [20].

Por ello, es que las mayores concentraciones de Plata se dan en las muestras más alejadas del Intrusivo Yanaquero.

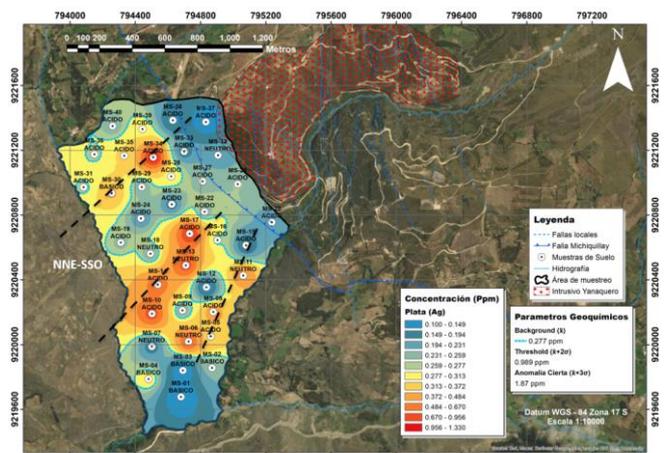


Fig. 22 Zoneamiento de la dispersión geoquímica de Plata en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero.

### Plomo

TABLA VII  
PARÁMETROS GEOQUÍMICOS DE PLOMO

Elemento Químico	Pb (ppm)	Ln_Pb
N° muestras	38	38
Valor Min	6.7	1.9
Valor Max	116.98	4.76
Desviación Estándar ( $\sigma$ )	2.09	0.74
Background ( $\bar{x}$ )	22.4	3.11
Threshold ( $\bar{x}+2\sigma$ )	98.03	4.59
N° Anomalías ( $>\bar{x}+2\sigma$ )	1	1

Interpretamos que la dispersión geoquímica de Plomo con valores que sobrepasan al Background (22.40ppm) tienen tres zoneamientos independientes, con tendencias NNO-SSE y NO-SE. La dispersión del Plomo en ambientes Porfíricos se localiza a las periferias del sistema, debido a que en esa zona la temperatura es menor [27].

El pH predominante de las muestras analizadas con mayor tenor de Plomo está relacionado a un ambiente Ácido, Neutro y en menor proporción Básico. Teóricamente el Plomo en un medio de pH Ácido, Neutro y Básico posee baja movilidad. Así mismo, Se puede notar que el contenido de Plomo para la zona donde se ubica el afloramiento sedimentario (SO del intrusivo Yanaquero) es menor, esto se debe a que el Plomo es un elemento insoluble en presencia de carbonatos en el ambiente [20].

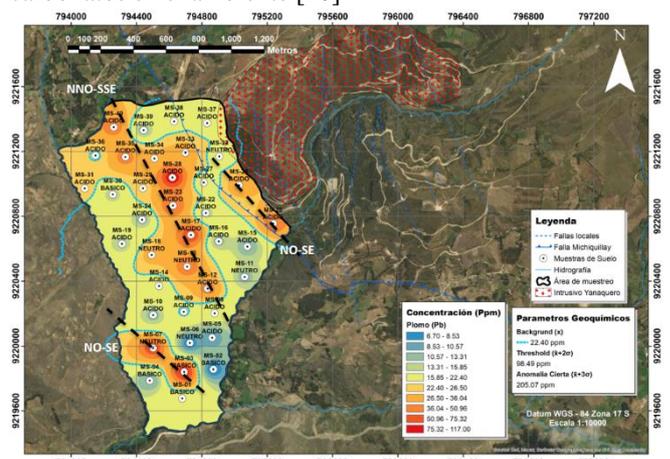


Fig. 23 Zoneamiento de la dispersión geoquímica de Plomo en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero

TABLA VIII  
PARÁMETROS GEOQUÍMICOS DEL ZINC

Elemento Químico	Zn (ppm)	Ln Zn
N° muestras	38	38
Valor Min	29	3.37
Valor Max	252.78	5.53
Desviación Estándar ( $\sigma$ )	1.69	0.52
Background ( $\bar{x}$ )	83.78	4.43
Threshold ( $\bar{x}+2\sigma$ )	239.22	5.48
N° Anomalías ( $>\bar{x}+2\sigma$ )	1	1

Interpretamos que la dispersión geoquímica de Zinc con valores que sobrepasan al Background (83.78 ppm) tienen un zoneamiento de tendencia NNO – SSE, de igual forma que con el Plomo la dispersión del Zinc en ambientes Porfíricos se localiza a las periferias del sistema, debido a que en esa zona la temperatura es menor [27].

El pH predominante de las muestras analizadas con mayor tenor de Zinc está relacionado a un ambiente Ácido y Neutro, coincidiendo teóricamente que el Zinc en un ambiente Ácido y Neutro posee movilidad alta y media.

Existe una peculiaridad en la concentración sobre el valor sobre el Threshold, al O del intrusivo Yanaquero en la muestra MS-03, puesto que cerca a la zona muestreada se pudo identificar algunos afloramientos sedimentarios (calizas), y teóricamente esto dice existe la posibilidad de precipitación del Zinc en presencia de un carbonato [20].

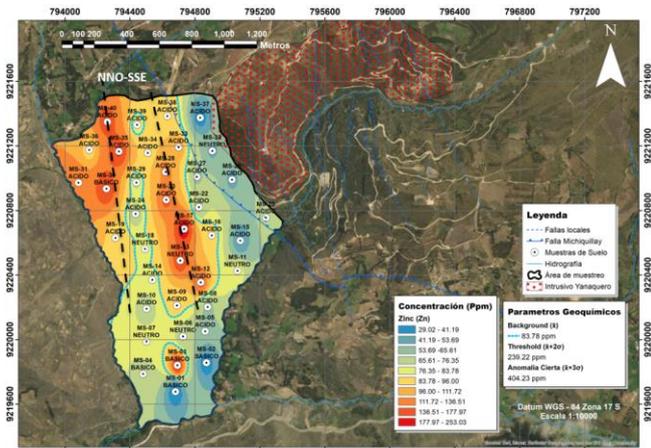


Fig. 24 Zoneamiento de la dispersión geoquímica de Zinc en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero

Según lo interpretado anteriormente, podemos plantear la hipótesis que las fallas locales del complejo Michiquillay también podrían estar influenciando en las tendencias de dispersión de Cobre, Plata, Plomo y Zinc en el área de estudio.

*Zoneamiento geoquímico de dispersión de Cu-Pb-Zn*

En base al análisis correlacional bivariable de Pearson Fig. 20 se escogió a los metales que poseían de mediana a buena correlación positiva, para establecer relaciones zonales entre los mismos y se obtuvo lo siguiente que al SO se ubican las asociaciones de Cu-Pb-Zn, éstas se debe principalmente a una afinidad Calcófila entre sí, lo que indicaría que cerca al área muestreada por donde se dispersan éstos existe una

fuerza con anomalías de azufre, por ello estos precipitan en cantidades sobre el valor de fondo, además, se sabe que teóricamente existen zoneamientos geoquímicos establecidos por [27], en el cual se considera que la correlación de Pb-Zn es un indicativo de un zoneamiento característico, que presenta un cuerpo intrusivo mineralizado de Cobre (Pórfido) en las zonas laterales del sistema, donde la temperatura es menor.

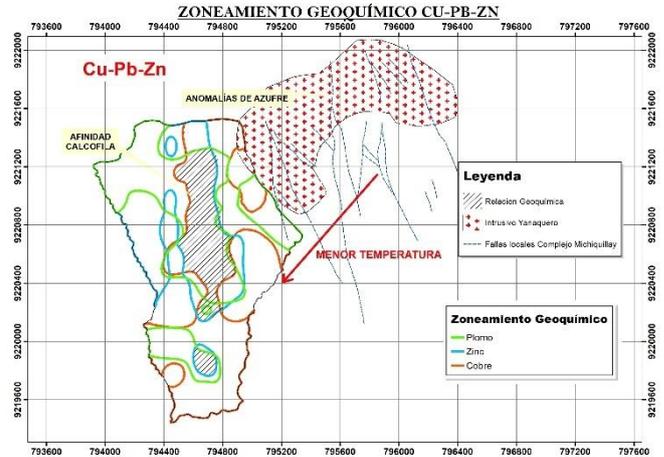


Fig. 25 Zoneamiento Geoquímico de Cu-Pb-Zn en suelos del área de estudio

IV. CONCLUSIONES

Se interpretó que la dispersión geoquímica secundaria de Cu, Ag, Pb y Zn en suelos alrededor del intrusivo Yanaquero - Sector Michiquillay, se relaciona a la movilidad teórica y zoneamiento geoquímico, en ambientes superficiales de yacimientos tipo pórfido de Cobre.

Con la caracterización estadística se calculó los estadígrafos descriptivos, los cuales nos permitieron elaborar los esquemas de dispersión geoquímica secundaria.

Con la transformación Log-Normal se identificó las anomalías ( $>$ Threshold) para cada metal analizado, distribuidas a lo largo del área muestreada, para Cu: 943.7 ppm y 764.3 ppm, para Ag 1.33ppm y 1.15ppm, para Pb: 117 pm y por último para Zn: 252.8ppm.

Al analizar la correlación bivariada a través del método de Pearson, se identificó una buena correlación positiva (0.631) para Pb-Zn y mediana correlación positiva (0.337) para Cu-Pb.

Se estableció las tendencias de dispersión geoquímica secundaria para cada metal analizado, obteniendo N-S para Cobre, NNE-SSO para Plata y NNO-SSE para Plomo y Zinc.

Por último, con los resultados obtenidos se recomendaría ampliar el área de muestreo, abarcando mayor área de terreno al alrededor los otros intrusivos en el Sector Michiquillay, aplicando una técnica de digestión multiactiva con lectura multielemental ICP-MS para tener mayor precisión, pues nos dará una mejor la interpretación de la dispersión geoquímica de la zona de estudio.

Esta investigación del tipo paper contiene información resumida presentada en el estudio de tesis de grado, titulado: “Caracterización geoquímica en suelos para determinar la dispersión secundaria de Cu, Ag, Pb, Zn alrededor del intrusivo Yanaquero - Sector Michiquillay 2020” presentada por los autores en cuestión. Por ende, no hay alguna diferencia sustancial entre ambos documentos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Privada del Norte por darnos la Oportunidad de trabajar este paper y poder presentarlo para su publicación.

#### REFERENCIAS

- [1] Nosach, S. Aplicación de los métodos geoquímicos en el estudio del yacimiento Mazur, Azov, Ucrania. Ingeniería Investigación Y Desarrollo, 9(2), 57-59. Recuperado a partir de [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/article/view/909](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/909). 2009.
- [2] Abanto, J., y Sánchez, M. (2021). Caracterización geoquímica en suelos para determinar la dispersión secundaria de Cu, Ag, Pb, Zn alrededor del intrusivo Yanaquero - Sector Michiquillay 2020 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].
- [3] SRK Consulting. Geoquímica de Exploraciones. Obtenido de: <https://www.srk.com/es/servicios/geoquimica-de-exploracion>. 2021.
- [4] Palomino, C. y Vásquez, R. Caracterización Geoquímica secundaria, asociada a los yacimientos de Magistral y Pasto Bueno. Lima: INGEMMET. 2012.
- [5] Acosta, J., Valencia, M., Rivera, R., Vargas, L. y Chira, L. Aplicación de la Dispersión mecánica y química en la Prospección de Pórfidos de Cobre: Ejemplo "La Granja" en el norte del Perú. Lima: Sociedad Geológica del Perú. 2006.
- [6] Trelles, G. (2021). Estudio de la dispersión geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica, Perú. Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [7] Siegel, F. Geoquímica Aplicada. Washington D.C, Estados Unidos de América: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. 1992.
- [8] Vásquez R. "Distribución de Tierras Raras y otros elementos traza en la franja Polimetálica 9°-10°S del Perú Central". Tesis, Universidad Nacional de Cajamarca, p. 54-55. 2009.
- [9] Echeveste, H. (2018). Manual de levantamiento geológico: una introducción a la geología de campo. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- [10] United State Environmental Protection Agency (1996). Method 3050B, Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. Revisión 2. Washington, DC.
- [11] Minera Yanacocha. (2016). Análisis de Cobre en muestras de mineral por digestión ácida y finalización Absorción Atómica. SMLA-PR-VH014.
- [12] Viladevall, M (2008). La Prospección Geoquímica (La Prospección Geoquímica y sus métodos). Barcelona.
- [13] Canchaya, S. (2012). Taller de Geoestadística Aplicada (Curso aplicado). Cajamarca, Perú.
- [14] Alperin, M. Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/34221>. 2013.
- [15] Calcina M. (2008) “Exploración geoquímica y determinación de elementos pathfinder - target proyecto: Achanizochaparra - Caravelí – Arequipa”. Puno. Investigación UNA.
- [16] Rivera, H., (2007). Introducción a la Geoquímica General y Aplicada. 2ª Edición. Lima. Perú. 475 pp.
- [17] Reyes, L. (1980). Boletín 31: Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Lima: INGEMMET, p.40-41.
- [18] Davies, R. (2002). Tectonic, Magmatic and Metallogenic evolution of the Cajamarca mining district, northern Perú (tesis de doctorado). Australia. James Cook University.
- [19] Hollister, V., y Sirvas, E. (1974). El Pórfido de Cobre Michiquillay. Boletín Sociedad Geológica del Perú, XLIV, 11-27p
- [20] Levinson, A. (1974). Introduction to Exploration Geochemistry. Illinois. Editorial: Applied Publishing Ltd.
- [21] Alperin, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/34221>.
- [22] Rivasplata, V. (2012). Geología y Geoquímica del Prospecto Andrea, área de exploración regional de Minera Yanacocha – Cajamarca (Tesis Pregrado). Cajamarca Perú. Universidad Nacional de Cajamarca.
- [23] Hernández, J., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S. y Bermúdez. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, 37 (5), 587-595.
- [24] Rojas, J. (2018). Evaluación De Índice De Trabajo, (Work Index); En Un Yacimiento Tipo Pórfido De Cobre Y Su Implicancia Geometalúrgica. Lima Perú. Pontificia universidad Católica del Perú.
- [25] Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. Society of economic Geologist. England. v. 105, pp 3 – 41.
- [26] Hoffman, S. (1986). Soil Sampling. Exploration Geochemistry: Design and Interpretation of Soil Surveys, 3, pp.39-77.
- [27] Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. Society of economic Geologist. England. v. 105, pp 3 – 41