

Estudio de Zonas de Alteración Hidrotermal en los cerros Zaruma Urcu y Santa Bárbara usando imágenes satelitales ASTER. Provincia El Oro, Cantón Zaruma

Study of Zones of Hydrothermal Alteration in the Zaruma Urcu and Santa Bárbara hill using ASTER satellite images. Province El Oro, Canton Zaruma.

Thalía Alexandra Santillán Tapia¹

¹ Profesional Insependiente. Quito – Ecuador. E-mail: thaliasantillan.ts@gmail.com

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 06-01-2022

Fecha de aceptación: 14-09-2022

Resumen

El presente estudio se enfoca en la identificación de zonas de alteración hidrotermal cuyos centros se considera que pudieran estar asociados a los cerros Zaruma Urcu y Santa Bárbara localizados en el distrito minero Zaruma-Portovelo, en la provincia de El Oro, con una metodología que comprende el procesamiento de imágenes ASTER y trabajos de campos complementarios. Para la discriminación de zonas con minerales de alteraciones se aplicaron distintas técnicas espectrales definidas por diversos autores como las combinaciones, cocientes de bandas e índices definidos por Ninomiya, posteriormente se aplicó la supresión de vegetación empleando el cociente de vegetación 3/2. Las técnicas fueron comprobadas en el campo con el análisis TerraSpec de donde se consideró 19 firmas espectrales para realizar el método SAM. Fueron definidas cuatro tipos de alteraciones hidrotermales acorde al ambiente metalogénico y tipo de depósito mineral en donde se encuentra el área de estudio, estas fueron la alteración propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada y argílica a filica.

Palabras clave: alteración argílica avanzada, alteración argílica intermedia, alteración argílica a filica, alteración propilítica, ASTER.

Abstract

This study focuses on the identification of hydrothermal alteration zones whose centers are associated with the Zaruma Urcu, and Santa Bárbara hills located in the Zaruma-Portovelo, mining district, Province El Oro, with a methodology that includes the processing of ASTER images and works of complementary fields. For the discrimination of zones with alteration minerals, different spectral techniques defined by various authors were applied, such as combinations, band ratios and indices defined by Ninomiya, later the vegetation suppression was applied using the vegetation ratio 3/2. The techniques were verified in the field with the TerraSpec analysis, from which 19 spectral signatures were considered to perform the SAM method. Four types of hydrothermal alterations were defined according to the metallogenetic environment and type of mineral deposit where the study area is located, these were propylitic, intermediate argillic, advanced argillic, and argillic to phyllic alteration.

Keywords: Advanced argillic alteration, intermediate argillic alteration, argillic to phyllic alteration, propylitic alteration, ASTER.

1. INTRODUCCIÓN

El área de interés, ubicada en la zona minera Zaruma-Portovelo, cuenta con numerosos trabajos geológicos y estructurales enfocados a la caracterización de la mineralización aurífera allí presente, sin embargo, el estudio y ubicación real de las alteraciones hidrotermales que acompañan a este sistema mineralizado ha sido poco estudiado a escala local (ver Figura A1). Es por ello que se tiene como objetivo identificar zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal mediante el procesamiento de imágenes satelitales ASTER. Para esto, además del procesamiento de las imágenes ASTER, se realizó el reconocimiento en campo y la comprobación de las alteraciones mediante el análisis TerraSpec en laboratorio, lo cual propició disponer de una cartografía de alteraciones hidrotermales; en otras palabras, se definió la zonalidad de las alteraciones, permitiendo registrar donde están localizadas las alteraciones en el área.

Es necesario mencionar que en el SE de la faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo se encuentra el área de interés conformado por la unidad geológica denominada Portovelo, la cual pertenece a la división inferior de los volcánicos Saraguro (E-Ms) ya que esta consta de dos divisiones (la división inferior y superior). En relación a lo mencionado en la unidad Portovelo (O?Pv) estudiada por Billingsley en 1926 y definida por Pratt et al. (1997) se registra actividad magmática plutónica y volcanso efusiva del terciario, conformándose por tres series de este a oeste [1]: serie Muluncay formada por brechas volcánicas, tobas, flujos de lava y en menor cantidad ignimbritas [2]. La serie Portovelo consta de lavas andesíticas y basalto-andesíticas. La serie Faique está formada por rocas volcánicas semejantes a las de la serie Muluncay con la diferencia en que esta serie consta de mayor cantidad de tobas y menor de lavas andesíticas [1].

Siendo la serie Portovelo superpuesta por la serie Faique las que se encuentran de forma local en el presente estudio.

La mineralización se encuentra como Piritización diseminada y en stockwork en los alrededores de los cerros Zaruma Urcu y Santa Bárbara y en los bordes de las vetas Portovelo-Zaruma, también está en forma de vetas en el eje Portovelo-Zaruma y al NE del cerro Santa Bárbara [3]. Respecto a las alteraciones hidrotermales, se ha descrito de forma general que la propilítica es la más prolongada rodeando las alteraciones argílicas, mientras que la alteración filica, argílica intermedia, avanzada se encuentran desde Portovelo hacia Arcapamba [3] y, sobre la silicificación de esta última, existen referencias de que tanto en el cerro Zaruma Urcu como el cerro Santa Bárbara ubicado 2.5 km al NO de este último, se encuentran rocas silicificadas [1].

Por tal motivo, se infirió como hipótesis de trabajo que ambos cerros pudieran constituir la parte central de un conjunto de zonas de alteración hidrotermal que podría extenderse por fuera de los cerros y a gran distancia, lo cual se pudo ver expuesto en afloramientos artificiales de los taludes de caminos y carreteras que circundan a estos cerros.

Cabe indicar que trabajos de investigación respecto a la discriminación de minerales de alteración empleando imágenes ASTER no han sido realizados en el área de estudio.

2. METODOLOGÍA

Como parte inicial se realizó la búsqueda y compilación de información geológica, metalogénica consiguiendo mapas geológicos, metalogénicos y topográficos tal como el mapa metalogénico de la República del Ecuador, escala 1:1000 000 [4], mapa geológico del distrito minero Zaruma-Portovelo [3], mapa topográfico de Zaruma. escala 1:5000. Cabe destacar que estos dos últimos han sido utilizados en la elaboración del mapa base de la zona de estudio.

Se realizó la adquisición de la imagen satelital ASTER del Centro de Datos de Ciencias de la Tierra en la página Earthdata de la Nasa, en donde se optó por el tipo de dato ASTER LIB de 2003/09/13. Se tuvo en cuenta una temporada en donde las lluvias son muy escasas, correspondiendo al mes de septiembre, con el fin de tener menos influencia con la vegetación, asimismo la cantidad de nubosidad que fue de un 8 % en la imagen adquirida.

Con el fin de obtener mejores resultados, se suprimió en los cocientes e índices los píxeles que representaban vegetación, debido a su gran difusión, lo cual es característico del Ecuador, por último, se empleó el método SAM con las firmas espectrales obtenidas de las muestras tomadas en campo; esta última, comparada con las técnicas de combinaciones, cocientes, índices y la supresión mencionada permitió obtener las zonas de minerales de alteración. Es así como en el área de estudio, la cual fue dividida en cuatro zonas, se definió la alteración propilítica en mayor medida al suroeste de los cerros Santa Bárbara, Zaruma Urcu y, en las zonas restantes, en menor medida. La alteración argílica intermedia, argílica a filica y argílica avanzada se presentan en los cerros mencionados como también en las zonas restantes.

En relación con el procesamiento de la imagen ASTER consistió en los distintos procesos que fueron seguidos de la realización de los mapas respectivos:

2.1 Preprocesamiento de la Imagen Satelital ASTER

La imagen adquirida se encuentra con valores crudos, por ende, se procedió a una preparación previo a la aplicación de técnicas espectrales con el objeto de tener

una imagen apta para identificar las distintas zonas de alteraciones hidrotermales. A continuación los pasos empleados:

2.1.1 Creación de Layer Stacking

Mediante esta técnica se unió solo las bandas a utilizar que son las que pertenecen a los subsistemas VNIR y SWIR; además, uno de los parámetros considerados en esta técnica fue el tamaño del píxel el cual se ajustó a 10 m, ya que este está relacionado con la escala de trabajo.

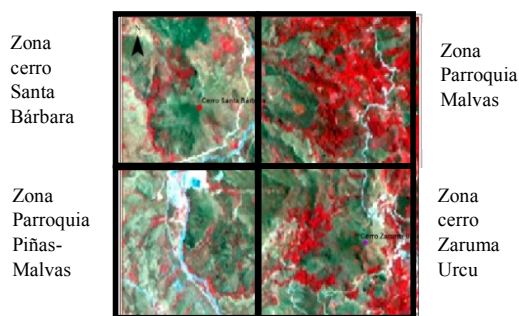


Figura 1: Imagen satelital ASTER tipo LIB del área de estudio con las zonas en que fue dividida.

Aunado a esto, la escala de una imagen depende del tamaño del píxel con el que se va a representar no obstante el terreno que cubre el píxel es el mismo, debido a esto, hay situaciones donde las imágenes necesitan un aumento o disminución del tamaño del píxel en el monitor [5]. El área de estudio fue dividida en cuatro zonas: cerro Zaruma Urcu, parroquia Malvas, parroquia Piñas-Malvas, cerro Santa Bárbara

2.1.2 Corrección radiométrica y atmosférica

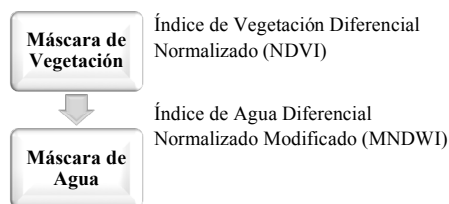
Se transformó mediante la corrección radiométrica los datos originales de niveles digitales (ND) a radiancia espectral mediante la herramienta Radiometric Calibration. Posteriormente se aplicó la corrección atmosférica mediante la herramienta IAR Reflectance Correction, obteniendo el parámetro reflectancia. (Figuras A2 y A3)

Es importante indicar que debido al tipo de imagen empleada como ASTER del tipo de dato Nivel LIB, no es necesario realizar corrección geométrica ya que estos datos son datos L1A con coeficientes radiométricos y geométricos aplicados en la escena [6]

2.1.3 Aplicación de Índices Espectrales, elaboración y aplicación de máscaras.

La elaboración de máscaras de las diferentes coberturas como la vegetación, agua, nieve incluye aplicación de índices espectrales, para que el estudio de las

alteraciones hidrotermales no se vea afectado, de esta manera se aplicaron las siguientes máscaras:



2.2 Procesamiento de la imagen satelital ASTER

Se aplicaron cinco diferentes técnicas espectrales desarrolladas por varios autores. En etapa precampo se empleó cuatro diferentes técnicas con un total de 9 bandas; es decir, tres bandas (banda 1,2,3) del VNIR y seis bandas del SWIR (banda 4,5,6,7,8,9). En etapa poscampo se aplicó la quinta técnica.

Las bandas del SWIR se utilizaron principalmente porque en las longitudes de ondas del subsistema mencionado tienen absorción los minerales de alteración, teniendo en cuenta que estos rasgos de absorción son relacionados a las bandas de ASTER, se detalla lo mencionado:

La alunita y pirofilita presentan absorción en los rangos 2.145-2.185 μm perteneciendo a la Banda 5 [7].

La moscovita, illita, montmorillonita presenta rangos de absorción en los rangos 2.185-2.225 μm perteneciendo a la Banda 6 [8] y [9].

La epidota, clorita y calcita tienen rasgos de absorción en los rangos 2.295-2.365 perteneciendo a la Banda 8 μm [10].

Los óxidos e hidróxidos de Fe presentan absorción en 0.52-0.60 μm perteneciendo a la Banda 1 [11].

A continuación las técnicas aplicadas:

2.2.1 Método de combinaciones de bandas

Como primera técnica se empleó combinaciones de bandas del VNIR y SWIR (Tabla 1) que permitió representar gráficamente y localizar de forma general aquellas zonas con presencia de minerales arcillosos y óxidos.

Tabla 1: Composiciones de bandas para la detección de zonas de alteraciones hidrotermales

Composiciones			Mapeo de: Arcillas	Definido Por:
R	G	B	Coloraciones:	
4	6	1	morada	[11]
4	6	8	magenta	[12]
6	4	1	verdosa	[13]
5	3	1	verde claro	[14]

2.2.2 Método de cocientes de bandas

Los minerales característicos de las alteraciones hidrotermales registran sus rasgos de absorción representativos, sin dejar a un lado los valores de reflectancia en las longitudes de ondas de las bandas del SWIR; así mismo, se localizó las zonas de óxidos (tabla 2). Reforzando los datos obtenidos de las composiciones de bandas.

Tabla 2: Cocientes de bandas para la detección de zonas de alteraciones hidrotermales

Alteración hidrotermal	Cocientes de bandas	Definido por:
Argílica a filica	4/6	[7]
Argílica avanzada	4/5	[8] y [9]
Propilítica	5/8	[10]
Jarosita	4/7	[11]

2.2.3 Método de índices de identificación litológica SWIR

Se empleó índices definidos por Ninomiya (tabla 3) como tercera técnica con el fin de reforzar los datos obtenidos de las técnicas anteriores.

Tabla 3: Índices de minerales de alteración hidrotermal definidos por Ninomiya (2003-2004) [16] y [17]

Índices de minerales definidos por Ninomiya	Minerales de alteración hidrotermal
Índices de minerales alterados que contienen OH	OH _a
Índices de minerales alterados que contienen OH	OH _b
Índice de Alunita	ALI
Índice de Caolinita	KLI
Índice de Calcita	CI _{SWR}

2.2.4 Supresión de la vegetación en los cocientes e índices.

En lugares cubiertos de una densa vegetación, como lo es característico en Ecuador, se consideró aplicar la supresión de la vegetación con el cociente de vegetación 3/2 [18], método diferente al NDVI. La supresión consiste en que los píxeles que representen vegetación se “apagan”, resaltando los que representen minerales de alteraciones en color brillante “blanco”, lo cual ayuda a que no se pierda información que pudo haber pasado al enmascarar la vegetación en zonas que posiblemente contengan minerales de alteraciones.

2.2.5 Método de Spectral Angle Mapper

En etapa poscampo se determinó y analizó la respuesta de la imagen satelital a los espectros obtenidos mediante el análisis TerraSpec de las muestras tomadas en campo; se seleccionaron 19 espectros como espectros de referencia, estos representaron mezclas de minerales y se realizó la clasificación de los minerales de alteración presentes en la zona de estudio por medio del método Spectral Angle Mapper (SAM).

2.2.6 Preparación y realización de mapas con presencia de alteración hidrotermal.

Cada una de las técnicas descritas y realizadas se comparó a fin de ratificar cada método ya realizado y así afinar las zonas de alteraciones. Los tres primeros métodos y la supresión de vegetación, constituyeron una base una vez comparadas para realizar la validación de campo y posteriormente el método SAM, se comparó con las técnicas anteriores donde se observó una mejor zonificación de las zonas de alteración considerando mezclas de minerales del área representativos de cada tipo de alteración hidrotermal

2.2.7 Comparación y realización de mapas con presencia de alteración hidrotermal.

Cada una de las técnicas descritas y realizadas se comparó a fin de ratificar cada método ya realizado y así afinar las zonas de alteraciones. Los tres primeros métodos y la supresión de vegetación constituyeron una base una vez comparadas para realizar la validación de campo y posteriormente, el método SAM se comparó con las técnicas anteriores donde se observó una mejor zonificación de las zonas de alteración, considerando mezclas de minerales del área representativos de cada tipo de alteración hidrotermal.

2.3 Datos obtenidos del procesamiento de la imagen Satelital ASTER.

2.3.1 Combinaciones de bandas aplicados

Las combinaciones RGB: 461, 468, 641 y 531 permitieron discriminar de forma general zonas de minerales arcillosos, debido a que en las longitudes de onda 2.185-2.225 μm (B6) presentan absorción característica la illita, moscovita, montmorillonita, caolinita por lo tanto estas zonas arcillosas reflejan en la primera y tercera banda (B4, B1) para el RGB 461 y para el RGB 468 presentaron una débil reflectancia (B4, B8), mientras que con el RGB 641 las zonas alteradas reflejan en la segunda y tercera banda (B4, B1), además, los minerales arcillosos tienen una acentuada absorción en el rango espectral 2.145-2.185 (B5) que para el RGB 531 estas zonas reflejan en la

segunda y tercera banda (B3, B1) y zonas que reflejan en exceso y absorben fuertemente en las bandas mencionadas presentan color magenta, rosado claro, cian.

Por medio de las cuatro diferentes combinaciones las zonas alteradas se presentaron con mayor distribución al SE del cerro Santa Bárbara, en el O de la parroquia Malvas y al E en menores proporciones, como también en el NE y SE del cerro Zaruma Urcu y en el E de la parroquia Piñas-Malvas. (Figura A4)

2.3.2 Cocientes de bandas y supresión de vegetación aplicados

Con el fin de precisar zonas de alteración hidrotermal se emplearon cocientes de bandas, en concordancia, la moscovita, illita y montmorillonita, reconocidos mediante el cociente 4/6, se presentaron dominando en sentido N-S y al O del cerro Zaruma Urcu. La pirofilita, alunita, caolinita y dickita localizados mediante el cociente 4/5 se obtuvo en partes muy dispersas en sentido O-E a lo largo de la zona de estudio, presentando mayor manifestación al N. La calcita, epidota y clorita mediante el cociente 5/8 se mostraron dispersos con concentraciones en el NO de la Parroquia Malvas y al E de la Parroquia Piñas-Malvas. Uno de los minerales relacionados con la alteración argílica avanzada como la jarosita fue localizado por el cociente 4/7 presentándose al N del área de estudio.

Resumiendo lo planteado, las alteraciones hidrotermales en la superficie del área de estudio se identificaron mayormente al E del río Calera, con diferentes concentraciones en cada una de las zonas en que fue dividida el área.

Acorde con esta técnica espectral la alteración que se presentó en mayores zonas es la argílica a fílica seguida por la argílica avanzada, la jarosita coincide espacialmente con la argílica avanzada y en menor proporción la propilítica.

- **Comparación con los datos obtenidos de la supresión:**

Posteriormente se aplicó la supresión de vegetación en cada cociente mencionado, de donde además de obtenerse nuevas zonas, se obtuvo zonas que coinciden con la técnica aplicada anteriormente, es decir, con el NDVI. Comparando ambas técnicas se llegó a obtener los siguientes datos:

Se puede apreciar en las figuras A5 y A6, en cada mapa, dos colores para cada alteración, en el que se puede notar en qué lugares coinciden los cocientes aplicados de dos formas (con el NDVI y con la supresión). De esta manera se localizó mediante la

supresión aplicada en los cocientes, que la moscovita, illita, montmorillonita coincide al E del río Calera en sentido N-S, en menores concentraciones al O del cerro Zaruma Urcu, por consiguiente, se afinaron estas zonas con la supresión, obteniéndose otras zonas como al O de la Parroquia Piñas-Malvas (Fig. A5 a).

La pirofilita, alunita, caolinita y dickita se localizaron al O de la parroquia Malvas, al E de la parroquia Piñas-Malvas y en menores proporciones en la zona del cerro Zaruma Urcu, las mismas coinciden con la técnica anterior. Cabe recalcar que hay zonas en las que no hay coincidencia como al SE del cerro Santa Bárbara (Fig. A5 b) en vista de que al haber enmascarado la vegetación se cubrieron zonas que tal vez contengan los minerales mencionados.

Respecto a la calcita, epidota y clorita se presentaron generalmente al E del río Calera. La jarosita además de presentarse al N del área en mayor concentración se discriminó al S del área (Fig. 6A b). Aludido los minerales de alteraciones de forma resumida se discriminaron mayormente al E del río Calera.

2.3.3 Índices de identificación litológica SWIR y la supresión de vegetación Aplicados

Las técnicas anteriores han sido reforzadas con los índices definidos por Ninomiya, por ende, la moscovita, illita y montmorillonita, fueron localizados esparcidamente con concentraciones al E del río Calera mediante el índice OH1a, de la misma manera la pirofilita mediante el índice OH1b. La alunita se presentó de forma esparcida mayormente en el NE y SO del área de estudio, la caolinita se mostró al E del río Calera y al O del cerro Zaruma Urcu. La calcita se localizó en zonas pequeñas al O del área discriminada por medio del índice CI_{SWIR}.

En efecto se obtuvo que la distribución de los minerales mencionados es mayormente al E del río Calera y pequeñas zonas al O del Cerro Santa Bárbara a excepción de la calcita.

De acuerdo con esta tercera técnica la alunita se presentó mayormente seguida por la moscovita, montmorillonita, illita, pirofilita y en menores zonas la caolinita la cual se presenta de manera más precisa mediante el índice, en último lugar la calcita.

- **Comparación con los datos obtenidos de la supresión:**

Los minerales de alteración localizados mediante los índices aplicados con la vegetación enmascarada, se mostraron en zonas que coinciden con los datos obtenidos de los índices con la supresión aplicada, en donde se discriminó que la moscovita, illita y

montmorillonita, coincide generalmente al E del río Calera, mayormente en la zona del cerro Santa Bárbara al SO y SE (Fig. A7 a).

La pirofilita (Fig. A7 b) coincide al E del río Calera mayormente al SE y E del cerro Santa Bárbara, al O de la parroquia Malvas. La caolinita (Fig. A7 c) se localizó coincidiendo al E del río Calera correspondiendo en la zona del Cerro Santa Bárbara, Cerro Zaruma Urcu y parroquia Malvas. La alunita (Fig. A7 d) se presentó mayormente al SO del área de estudio. La calcita (Fig. A8) se presentó mayormente al O del área.

Es así como las zonas que presentaron minerales de alteración han sido reforzadas con el fin de comprobarlas en campo como también con las zonas que no mostraron coincidencia. Esta condición refleja que con la aplicación del NDVI posiblemente se pudo perder información ya que se obtuvieron nuevas zonas, por lo cual resulta ineludible realizar la supresión que no es una máscara.

2.3.4 Método de Spectral Angle Mapper (SAM)

Se ratificaron las zonas de alteración obtenidas de las técnicas anteriores mediante la etapa de campo y el análisis TerraSpec, por consiguiente, con las firmas espectrales de las muestras se procedió a realizar, en una etapa poscampo, la quinta técnica espectral que es el método SAM, el cual permite realizar un mapeo en donde la base es la comparación considerando ángulos más pequeños entre los espectros de la imagen ASTER y los de referencia, por ello, se emplearon como espectros de referencias las firmas espectrales obtenidas de las muestras tomadas en campo.

En efecto se determinó y analizó la respuesta espectral con cada una de las firmas espectrales obtenidas de las muestras de campo comparando los espectros de cada píxel de la imagen con los obtenidos de las muestras de campo [15], la comparación se realiza en términos de la diferencia angular, denominado ángulo espectral, que hay entre los vectores de la imagen y referencia (firma espectral de las muestras), lo cual se calcula con la siguiente ecuación [19].

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i+1}^n t_i \cdot r_i}{\sqrt{\sum_{i+1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i+1}^n r_i^2}} \right)$$

De este modo, de un total de 81 firmas espectrales se seleccionaron 19 firmas espectrales para realizar el método SAM, las 19 firmas seleccionadas fueron consideradas en base al ángulo en radianes, considerando que el ángulo que va de 0 a 0.10 radianes es el más real ante la respuesta espectral de los píxeles de la imagen, por ende, las firmas seleccionadas

presentaron ángulos desde 0.06 radianes, no obstante, para aquellas firmas que no respondían al ángulo máximo de 0.10 radianes [19], se consideró un ángulo que no sea inmoderado, llegando máximo hasta 0.196 (tabla 4).

Tabla 4: Ángulos en radianes considerados para el mapeo SAM de cada firma espectral que representan mezclas de minerales

Código de Muestras	ángulo (radianes)	Mezclas de minerales
M-095	0.115	illita 80%, montmorillonita 20%
M-040	0.10	montmorillonita 80%
M-065	0.10	illita 100%
M-090	0.10	moscovita 80%, illita 20%
M-062	0.11	caolinita Px 100 %
M-016	0.09	caolinita Wx 80%, illita 20%
M-082	0.10	caolinita Px 80%, montmorillonita 20%
M-058	0.07	Illita 80%, jarosita 20%
M-086	0.14	montmorillonita 70%, jarosita 30%
M-041	0.09	montmorillonita 80%, caolinita 20%
M-026	0.09	montmorillonita 80%, halloysita 20%
M-002.1	0.195	dickita 100%
M-059	0.196	dickita 70%, caolinita Px 30%
M-004	0.12	dickita 70%, pirofilita 30%
M-044	0.10	pirofilita 90%, alunita 10%
M-060	0.18	jarosita
M-069	0.15	Montmorillonita 90%, clorita 10%
M-105	0.07	Clorita 70%, montmorillonita 30%
M-106	0.06	Chamosita 80%, montmorillonita 20%

Se presentan los minerales característicos de la alteración argílica a filica en el área de estudio con sus respectivas firmas espectrales, que fueron ajustados a la resolución espectral de la imagen satelital, sus rasgos de absorción cercanos e iguales (ver Anexo Tabla A1), es decir, los rasgos que se obtuvieron mediante análisis TerraSpec con los píxeles de la imagen, teniendo en cuenta que así se hizo con cada firma que definen distintas alteraciones.

Las firmas espectrales fueron agrupadas de acuerdo con los minerales que representaron un tipo de alteración diferente, acorde al ambiente metalogénico, tipo de depósito mineral en el área de estudio el cual ha sido catalogado como un epitermal de LS [3] y [20] e IS [21] y, [1] para lo cual, se utilizó el modelo de Buchanan 1981, considerando además las diferentes asociaciones de minerales de la alteración argílica avanzada planteadas por [22].

Posteriormente obtenido los píxeles que representaron los minerales de alteración se consideraron aquellas zonas que presentaron mayor agrupación de los píxeles con el fin de definir zonas de alteraciones. (Figura A9)

La alteración argílica a filica se presentó con mayor distribución al SE de la parroquia Piñas-Malvas, al N de la parroquia Malvas en menores proporciones en el cerro Zaruma Urcu y Santa Bárbara. (Figura A10)

La alteración argílica intermedia se presentó en mayor agrupación al SE de la parroquia Piñas-Malvas y parroquia Malvas y menores proporciones en el cerro Zaruma Urcu y Santa Bárbara. La alteración argílica avanzada se mostró al NO de la parroquia Malvas y en el S del área de estudio. La alteración propilítica se presentó mayormente en el S del área y pequeñas zonas al N del área.

2.3.5 Comparación de las técnicas espectrales.

Se puede apreciar en la fig. A15 la comparación desde la técnica de combinaciones hasta la supresión aplicada en los índices, de esta manera las zonas de alteraciones han sido reforzadas en una etapa precampo y poscampo para definir el mapa final de alteraciones con minerales propios del área.

Es decir, cada una de estas técnicas realizadas se compararon con el fin de comprobar cada método ya realizado, de esta manera, sectorizar las zonas con minerales de alteración. En efecto, los tres primeros métodos junto con el cuarto que es la supresión de vegetación fueron una base una vez comparadas para validar en campo dichas zonas.

3 RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE ANOMALIAS ESPECTRALES

Las muestras tomadas en campo fueron en las zonas de alteraciones que se obtuvo con el procesamiento de ASTER en los lugares accesibles, las muestras fueron tomadas en fragmentos de rocas y afloramientos. A continuación se presenta los mapas con las ubicaciones de los puntos de muestreo (ver Anexo Figura A11 y A12).

Considerando sectores donde hay mayor agrupación de píxeles, se presenta uno de los tantos afloramientos de donde han sido tomadas las muestras. Tal como se expone en la figura (A13 a), se observa el reconocimiento en campo de la alteración argílica a filica obtenida del cociente 4/6 se aprecia el afloramiento y la muestra tomada M-041

En la figura 2 se observa el reconocimiento en campo donde fue tomada la muestra M-060 que fue mapeado previamente mediante el cociente 4/7 validando la presencia de jarosita.



Figura 2 Lugar de la toma de muestra M-060.

La muestra M-059 (figura A14 b) obtenida del afloramiento observado en la (figura A10 a) permitió validar la presencia de caolinita y dickita que fue obtenida mediante la supresión aplicada en los cocientes, en este caso, el cociente 4/5 y el índice KLI.

Los resultados obtenidos de las muestras de campo en las zonas mapeadas previamente mediante la imagen ASTER se describe de manera en cada zona en que fue dividida el área de estudio, a continuación lo mencionado:

3.1 Zona Cerro Zaruma Urcu (Zona 1)

Cabe indicar que en cada figura de las curvas espectrales en el eje de las x las longitudes de ondas (wevelenght) estan en μm .

3.1.1 Minerales localizados aplicado el NDVI

La caolinita, alunita, pirofilita y dickita seguidos por illita, moscovita, montmorillonita y alteración propilítica fueron comprobados en la etapa de campo en lugares de posible acceso.

Figura 13 Lugar de la toma de muestra M-060.

3.1.1.1 Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:

- **argílica avanzada**

Los minerales de la alteración argílica avanzada fueron ratificados en campo mediante las firmas espectrales de las muestras M-030, M-031.2, M-044, esta última presentó rasgos de absorción profundo en $2.17 \mu\text{m}$ perteneciente a la B5 y alta reflectancia en la B4 identificando la pirofilita, alunita y dickita.

- **Argílica a filica**

Con el fin de validar se obtuvo que las muestras M-001, M-005, M-016 M-018, M-027, M-034, M-035, M-089 y M-102 presentaron absorción de OH+H₂O en 1.415, 1.408 μm y absorción de AL-OH en 2.207, 2.208 y

2.209 μm (B6), como también alta reflectancia en el rango 1.6-1.7 μm . Estas ratificaron la presencia de montmorillonita e illita que han sido mapeados por el índice OHla. Observándose que se encuentran acompañados de caolinita en variables concentraciones. (Figura A16)

3.1.2 *Minerales localizados aplicada la supresión*

Con la supresión se localizaron nuevas zonas de caolinita, alunita, seguidos por illita, moscovita y montmorillonita al O del cerro Zaruma Urcu (figura 6 a) mediante los cocientes, mientras con los índices la alunita está seguida por pirofilita, caolinita, precisando más la alunita y alteración propilítica.

3.1.2.1 *Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:*

- *Argílica avanzada*

Nuevas zonas de dickita, pirofilita y caolinita fueron validadas mediante las muestras M-002.1, M-004, M-031.2 esta última también ratificó en zonas obtenidas con la máscara aplicada, además la M-003 fue tomada en zona previamente mapeada mediante el índice KLI, confirmando la presencia de caolinita.

- *Argílica a filica*

La montmorillonita, illita, moscovita han sido validadas mediante las muestras M-005, M-006, M-014, M-015, M-027, M-035, M-036 y M-103, minerales que han sido discriminados mediante el índice OHla y el cociente 4/6 y se validó la caolinita localizada mediante el índice KLI. En efecto, las firmas espectrales presentaron rasgos de absorción de AL-OH en 2.201, 2.207, 2.208, 2.209 y 2.212 μm (B6) y por OH+H₂O en 1.413, 1.414, 1.415 μm con alta reflectancia en 1.610 μm (B4) (Figura A17)

3.2 *Zona Parroquia Malvas (Zona 2)*

3.2.1 *Minerales localizados aplicado el NDVI*

La montmorillonita, illita, moscovita, seguido por la caolinita, alunita, pirofilita y calcita, clorita, epidota finalizando con jarosita han sido los minerales localizados en esta zona.

3.2.1.1 *Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:*

- *Argílica a filica*

Las firmas espectrales obtenidas de las muestras validaron la presencia de montmorillonita, illita y caolinita en menor proporción, por ende, las firmas espectrales presentaron rasgos de absorción de AL-OH en 2.201, 2.207 a 2.209 μm (B6), en 1.411 a 1.415 μm de OH+H₂O, y alta reflectancia en 1.6 a 1.7 μm ,

mediante las muestras M-022 a M-024, M-045, M-098 y M-100. (Figura A18)

3.2.2 *Minerales localizados aplicada la supresión*

Acorde con la supresión aplicada en mayor proporción se presenta la clorita, epidota, calcita seguidos por la montmorillonita, illita, moscovita y en pequeñas zonas se presentó la caolinita, pirofilita, alunita y jarosita. Haciéndose más evidente las zonas de montmorillonita, illita y moscovita seguidos por caolinita ya que coinciden con la técnica anterior.

3.2.2.1 *Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:*

- *Argílica a filica*

El análisis TerraSpec reportó la presencia de montmorillonita, illita y caolinita de las muestras M-021, M-023, M-052 y M-098 las cuales presentaron firmas espectrales con rasgos de absorción de AL-OH en los rangos 2.208, 2.211 μm (B6) y una alta reflectancia en 1.601 μm (B4). (Figura A19)

3.3 *Zona Parroquia Piñas-Malvas (Zona 3)*

3.3.1 *Minerales localizados aplicado el NDVI*

Se obtuvo que los minerales más abundantes en este sector son la illita, montmorillonita y moscovita seguidos por caolinita, pirofilita, alunita y pobres zonas de clorita, epidota y calcita. De esta forma subordinada se contó con la jarosita. La presencia de óxidos férricos prevaleció con respecto a los óxidos ferrosos.

3.3.1.1 *Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:*

- *Argílica a filica*

Las firmas espectrales de la muestra M-040 a M-043 y M-065 presentaron rasgos de absorción de AL-OH en 2.209, 2.195 μm (B6) y alta reflectancia en la B4 por lo tanto la montmorillonita, illita acompañados de caolinita han sido ratificados. (Figura A20)

3.3.2 *Minerales localizados aplicada la supresión*

Nuevas zonas de calcita y jarosita han sido discriminadas, seguidos en mayor proporción por la montmorillonita, illita, moscovita y en menor cuantía la caolinita, alunita y pirofilita.

Zonas de montmorillonita, illita, moscovita y caolinita coincidieron con el NDVI ratificándose mediante las muestras M-040 a M-045 y M-065.

3.3.2.1 *Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:*

- *Argílica a filica y mineral jarosita*

Las muestras (Fig. 23) de las áreas validadas en campo presentaron firmas espectrales que ratificaron la montmorillonita, illita acompañados de caolinita y jarosita, por tal razón, sus rasgos de absorción de AL-OH en 2.209, 2.211 μm y alta reflectancia en 1.647 μm , significativos. En la M-105 se observó un rasgo de absorción en 2.19 μm característico de AL-OH y alta reflectancia en 1.60 a 1.70 μm indicando la presencia de montmorillonita; además, presentó rasgo de absorción profundo de MgOH en 2.336 μm particular de la clorita, cabe señalar que este último no fue discriminado mediante las técnicas espectrales probablemente por la alta reflectancia de la montmorillonita. Tanto las muestras 105 y 106 con rasgo de absorción en 2.336 μm fueron consideradas para definir la alteración propilítica, obtenidas de bloques de rocas angulosas transportadas. En este sector la jarosita fue ratificada en la muestra 060. (Figura A21)

3.4 Zona Cerro Santa Bárbara (Zona 4)

3.4.1 Minerales localizados aplicado el NDVI

Los minerales más abundantes en esta zona fueron la caolinita, dickita, alunita y pirofilita seguidos por illita, montmorillonita, moscovita, clorita, epidota y calcita. Respecto a los óxidos ferrosos se presentaron más que los férricos.

3.4.1.1 Identificación de minerales que pertenecen a las alteraciones:

- *Argílica avanzada*

Mediante las muestras M-054 y M-073 se corroboró la presencia de dickita. (Figura A22)

- *Argílica a filica*

La montmorillonita, illita y caolinita han sido corroboradas mediante las muestras (fig. 25) por ende sus firmas espectrales presentaron rasgos de absorción de AL-OH en 2.208 μm con alta reflectancia en 1.619 μm . (Figura A23)

3.4.2 Minerales localizados aplicada la supresión

La caolinita, alunita, pirofilita y dickita se presentaron en nuevas zonas, seguidos por montmorillonita, illita y moscovita y, en menor cuantía, la jarosita y los propios de la alteración propilítica. Respecto a los óxidos los ferrosos están en más zonas que los férricos.

Se consideró zonas que han coincidido con la técnica del NDVI las cuales han sido ratificadas mediante las muestras M-053 a la M-057 y M-066.

3.4.2.1 Identificación de minerales de alteración

Las firmas espectrales de las muestras ratificaron la dickita y caolinita, asimismo las firmas espectrales revelan rasgos de absorción de AL-OH en 2.208, 2.205, 2.193 y absorción de OH+H₂O en 1.4, con alta reflectancia en 1.640 μm , particulares de montmorillonita e illita, acompañados de caolinita menormente. (Figura A24 y A25)

Para concluir, se presenta cómo se ha comparado los espectros obtenidos de las muestras de campo con los de la imagen mediante el Spectral Angle Mapper. En relación con lo mencionado, ploteando las firmas espectrales al software se fue determinando acorde al ángulo en radianes, de esta manera se presenta dos ejemplos:

La firma espectral de la muestra M-090 ploteada en Envi mediante el método Spectral Angle Mapper con con un ángulo de 0.10 radianes y comparada con los espectros de la imagen dio lugar a los píxeles de color rojo indicando que en esos lugares hay los minerales (moscovita 80 %, illita 20 %) independientemente del porcentaje contenidos en la muestra mencionada (Fig. A26).

En la figura A27 se puede observar que tanto la firma obtenida de TerraSpec (muestra M-090) como la de la imagen tienen rasgos de absorción en la longitud de onda 2.208 μm en el eje x correspondiendo a la banda 6 (2.185-2.225) de la imagen ASTER

La firma espectral de la muestra M-105 ploteada en Envi mediante el método Spectral Angle Mapper con con un ángulo de 0.07 radianes y comparada con los espectros de la imagen dio como resultado los píxeles de color rojo indicando que en esos lugares hay los minerales (clorita 70 %, montmorillonita 30 %) independientemente del contenidos en la muestra mencionada (Fig. A28).

En la figura A29 se puede observar que tanto la firma obtenida de TerraSpec (muestra M-105) como la de la imagen tienen rasgos de absorción en la longitud de onda 2.336 μm en el eje x correspondiendo a la banda 8 (2.295-2.365) de la imagen ASTER.

Cabe indicar que una vez obtenido los resultados de estos píxeles se realizó una depuración en Arcgis 10.5 de los píxeles con las diferentes capas tales como, vías, poblados, ríos con el fin de tener un mapa final confiable.

Cada una de las alteraciones fueron contorneadas en Arcgis considerando la mayor agrupación de píxeles (Tabla A2) de tal manera que las zonas con presencia de minerales de alteración fueron definidas con

diferentes agrupaciones de las mezclas de minerales creando polígonos en el software Arcgis de acuerdo con el ambiente metalogénico y tipo de depósito obtenido las zonas de alteraciones detalladas en el mapa (figura A30).

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

A partir de los resultados adquiridos se ha distinguido la posición y composición de zonas de alteraciones con una mayor precisión, con un argumento metodológico y práctico de campo, donde de las 19 firmas tres (3) fueron consideradas para definir la alteración propilitica tales como clorita 70 % montmorillonita 30 % (M-105), chamosita 80 % montmorillonita 20 % (M-106) y por último de la M-069 con montmorillonita 90 %, clorita 10 %. Seguida por la alteración argílica intermedia para la cual fueron empleadas siete firmas tales como: caolinita Wx 80 % illita 20 % (M-016), montmorillonita 80 % caolinita 20 % (M-041), caolinita Px 100 % (M-062), illita 80 %, jarosita 20 % (M-058), caolinita Px 80 % montmorillonita 20 % (M-082), montmorillonita 70 % jarosita 30 % (M-086) y montmorillonita 80 % halloysita 20 % (M-026). La alteración argílica avanzada fue definida con cinco firmas tales como: pirofilita 90 % alunita 10 % (M-044), dickita 100 % (M-002.1), dickita 70 % pirofilita 30 % (M-004), dickita 70 % caolinita Px 30 % (M-059) y jarosita (M 060). Finalmente, se definió en menores zonas la alteración argílica a filica y fueron empleadas cuatro firmas con mezcla de minerales como: moscovita 80 % illita 20 % (M-090), illita 80 % montmorillonita 20 % (M-095), montmorillonita 80 % (M-040) e illita 100 % de la M-065.

Por lo consiguiente el área de estudio está dominado por la alteración propilitica; es la dominante en el área, seguida por la argílica intermedia, argílica avanzada y argílica a filica

Los cerros Zaruma Urcu y Santa Bárbara constituyen cerros testigos, formados a partir de la erosión diferencial que se produce por las rocas alteradas ricas en sílice, particularmente por la presencia de alteración argílica avanzada que en ellos se encuentran zona de alteración definida primeramente como parte del proceso de interpretación de las imágenes ASTER y, luego, por la comprobación de campo y la toma de muestras para el análisis Terraspec. Este estudio por ser más local se diferencia de otros aplicando una metodología existente que ha sido utilizada en estudios de área regionales; no obstante, resultó ser eficiente en un área local precisando con la validación en campo y análisis TerraSpec.

4.2 Recomendaciones

Para un análisis más minucioso de las alteraciones presentes en todo el distrito minero Zaruma-Portovelo aplicando técnicas espectrales, se debe emplear imágenes satelitales de mayor resolución espacial y espectral, para obtener una mejor comparación; además, tomar una mayor cantidad de muestras junto con comprobaciones en campo, análisis TerraSpec y análisis geoquímicos.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Bonilla, Metalogenia del Distrito Minero Zaruma-Portovelo, Ph.D. Univ. Buenos Aires., 2009.
- [2] Kalinaj, Zaruma Project: Ecuador Technical Report. October,2004.
- [3] F. Van Thournout, J. Salemink, G. Valenzuela, M. Merlyn, A. Boven y P. Muchez, Portovelo a volcanic hosted epithermal vein-system in Ecuador, South America, 1996.
- [4] A. Egúez, A. Albán, E. Gallardo, Reinoso y W. Lomas, Mapa Metalogénico de la República del Ecuador: Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2019.
- [5] Chuvieco, Fundamentos de Teledetección Espacial, España, 1995.
- [7] C. Marquetti, R. Becchio, R. Seggiaro y K. Nakashima, Aplicación de datos ASTER para el mapeo de la Hoja Geológica Andalgalá, Catamarca, Argentina, Simposio ASTER-GEOSAT, Buenos Aires, 2004.
- [8] I. Tommaso y N. Rubinstein, Mapeo de alteración hidrotermal a partir de datos ASTER en el Pórfido de Cu-Mo El Infiernillo, Mendoza, Argentina, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 2005.
- [9] M. Rodríguez, D. Marchionni y D. Ducart, Identificación u mapeo de minerales de alteración hidrotermal con imágenes ASTER en el Distrito Minero San José. Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brasil, 2013.
- [10] M. Honarmand, H. Ranjbar, J. Shahabpour, Application of Principal Component Analysis and Spectral Angle Mapper in the Mapping of Hydrothermal Alteration in the Jebel-Barez Area, Southeastern Iran, Resource Geology, V.62, no. 2, 2011.

[11] Mars y Rowan ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonatite volcano, Afghanistan, v. 7, no, 2011. Doi: 1130/GES00630.1

[12] Marquetti, Tommaso, Herrmann y Nakashinma, Datos ASTER en la Quebrada de Alcaparrosa Calingasta, Provincia de San Juan, Argentina, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 2005.

[13] T. Mamani, Aplicación de Imágenes ASTER en la detección de zonas de alteraciones Hidrotermales, Sector Titire, Carumas, Moquegua, Ing. Univ. Nacional del Altiplano., Puno, Peru, 2017

[14] D. Pérez, D. Azcurra, P. D'Odorico y N. Sequeira, Mapeo de Alteración Hidrotermal con Datos ASTER, en la región de La Coipa, Cordillera Frontal (31°45'S), Provincia de San Juan, Argentina, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 2007.

[15] D. Azcurra, G. Castro, M. Kaku, I. Kohno y M. Graciela, Procesamiento y Productos ASTER del area de Sierra de Fematina, Provincia de la Rioja, República Argentina, 2003.

[16] Y. Ninomiya, A stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data, 2003.

[17] Y, Ninomiya, Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data, 2004.

[18] A. Kalinowski y S. Oliver, ASTER Mineral Index Processing Manual, Remote Sensing Applications, Geoscience Australia, 2004.

[19] Pérez, D'Odorico, Godeas, Reconocimiento de Alteración Hidrotermal con el sensor ASTER, en el curso medio del Río Santa Cruz (31°40'S), Provincia de San Juan, Revista de la asociación Geologica Argentina, p.630, 2010.

[20] ProdeMinca, Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador: Depósitos porfídicos y Epi-mesotermiales relacionados con intrusiones de las Cordilleras Occidental y Real: Ecuador, British Geological Survey, 2000.

[21] A. Camprubí y T. Albinson, Depósitos Epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, no. 1, 2006.

[22] A. Arribas, J. Hedenquist, Environments of advanced argillic alteration: II) Steam-heated, and exploration implications.

ANEXOS

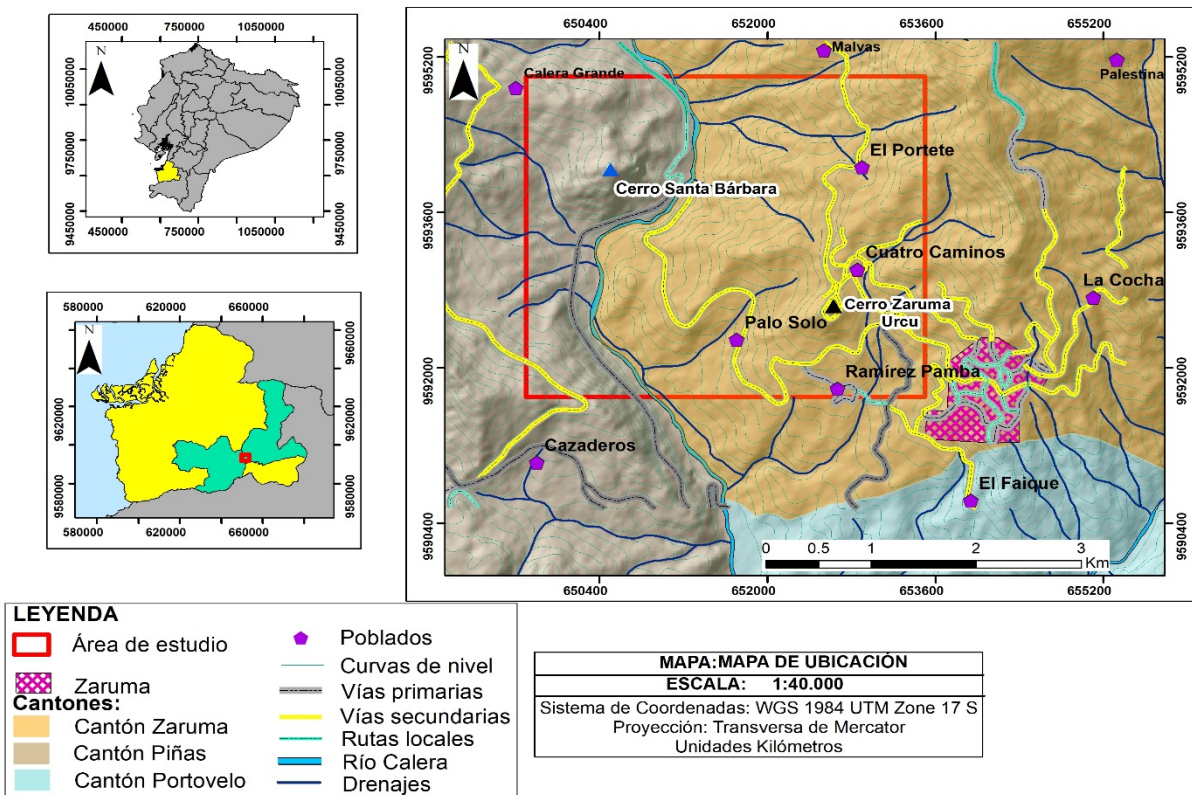


Figura A1: Mapa de ubicación del área de estudio.

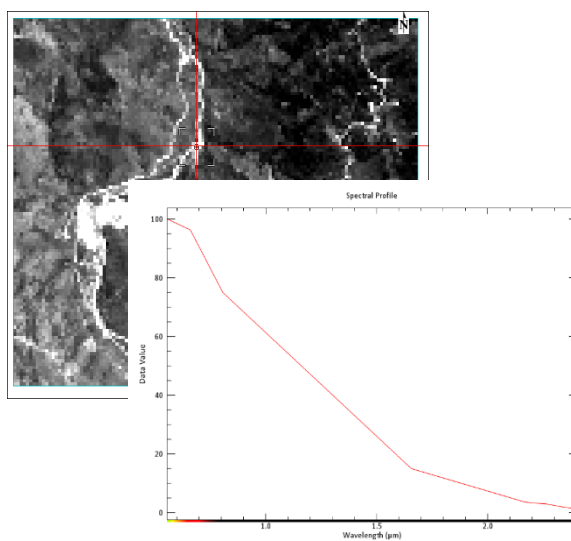


Figura A2: Imagen del área de estudio: con datos en ND.

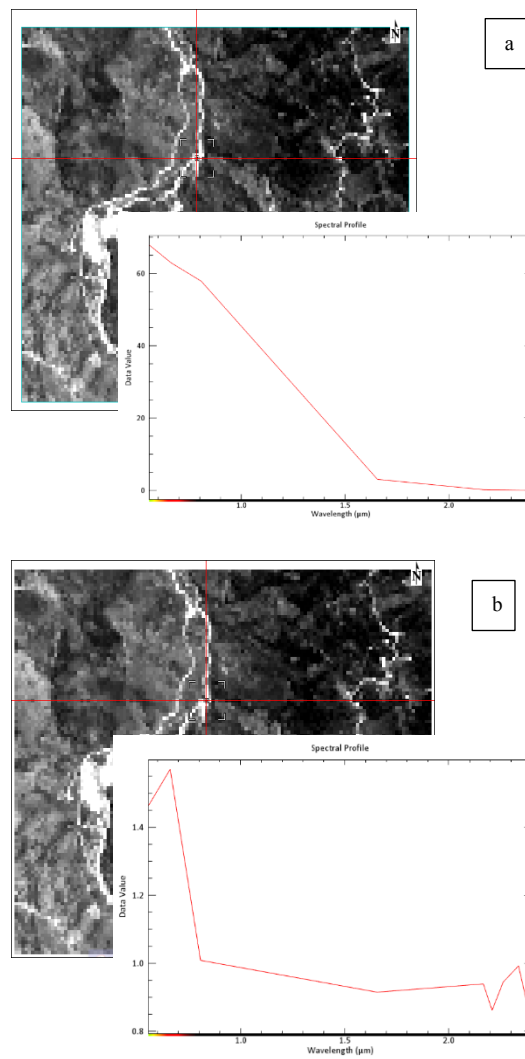


Figura A3: Imagen del área de estudio a) datos corregidos a radiancia, b) datos corregidos a valores de reflectancia.

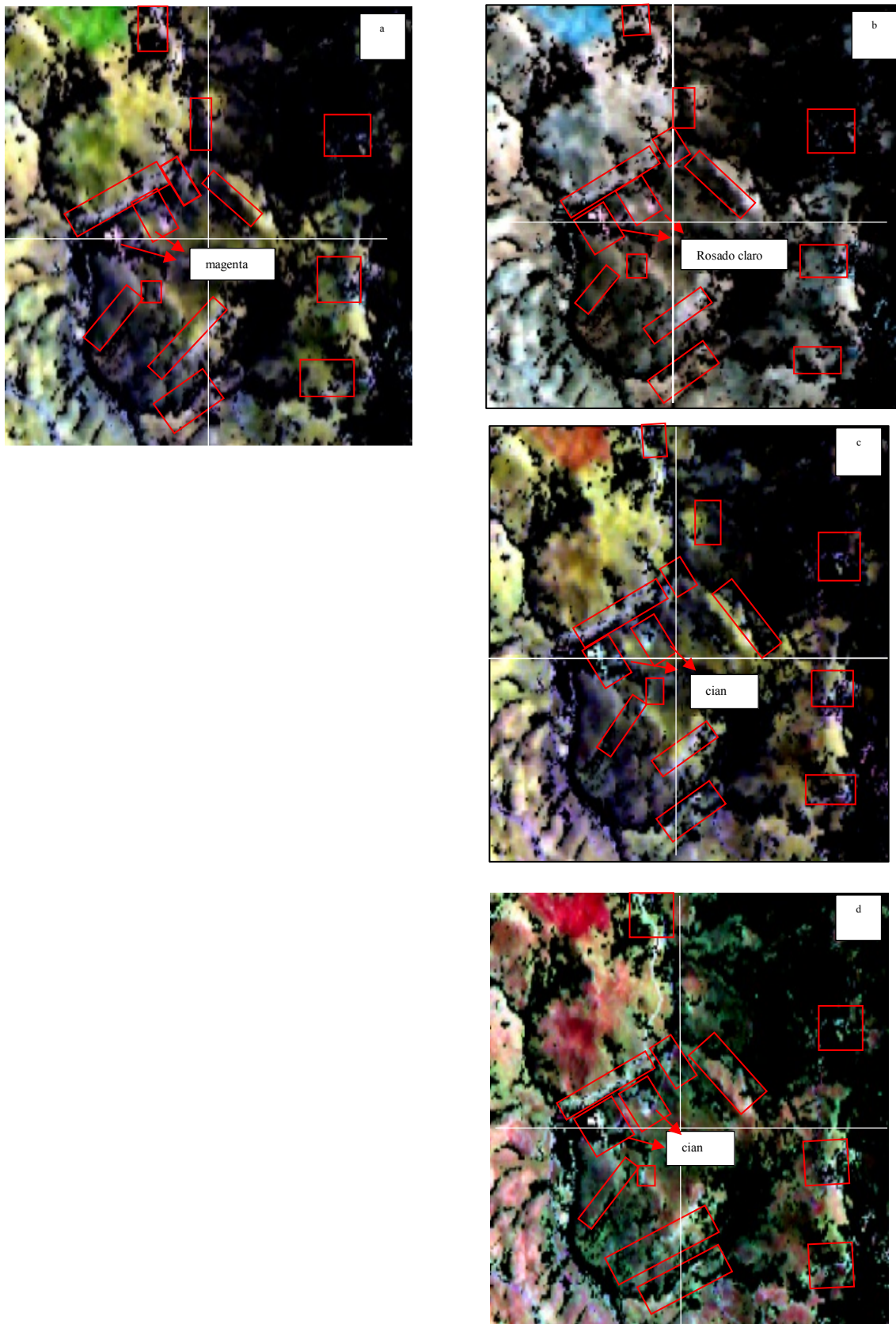


Figura A4 Combinaciones de bandas, zonas alteradas enmarcadas por recuadros rojos a) RGB 461, b) RGB 468, c) RGB 641, d) RGB 531

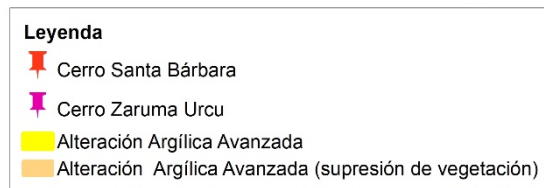
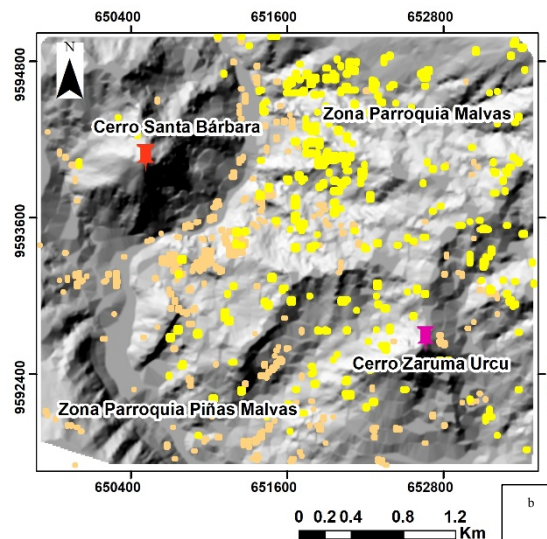
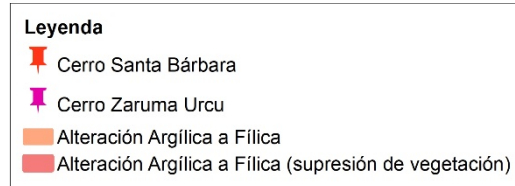
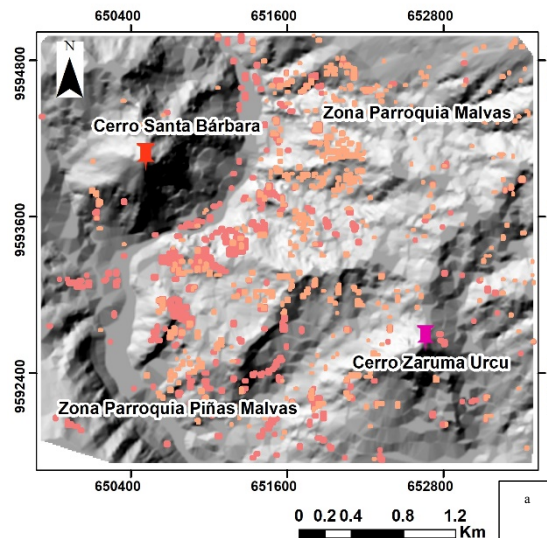


Figura A5 Comparación de las zonas obtenidas con el NDVI y la supresión de vegetación en los cocientes de bandas a) 4/6: alteración argílica a filica, b) 4/5: alteración argílica avanzada.

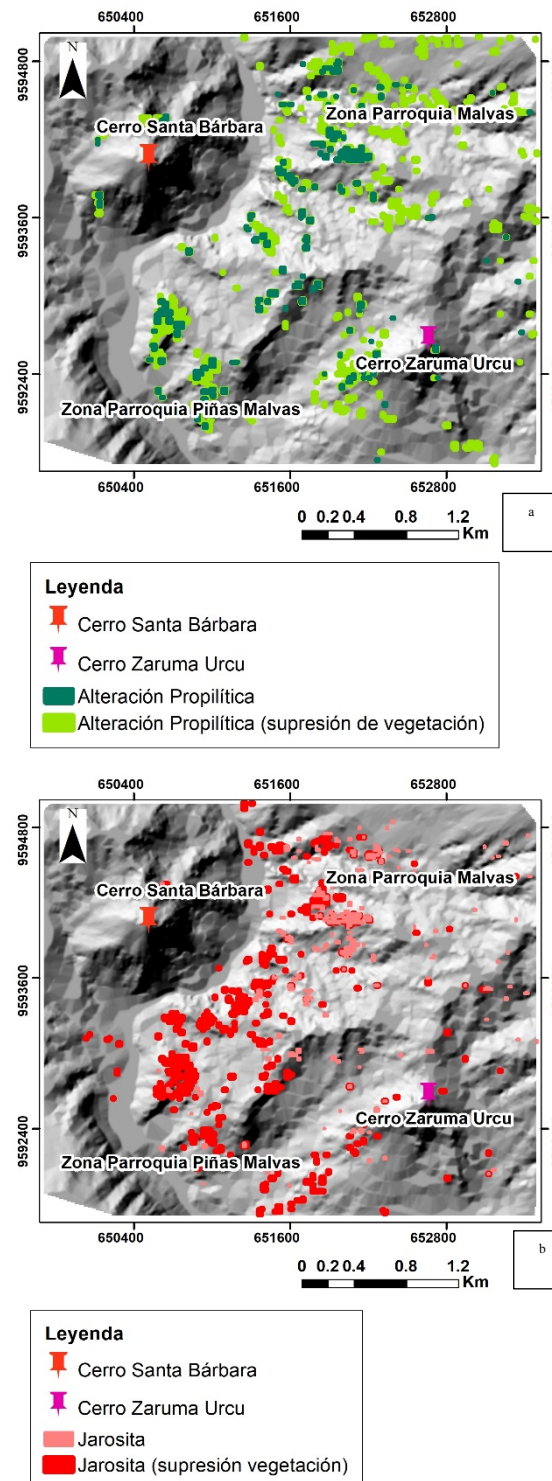


Figura A6 Comparación de las zonas obtenidas con el NDVI y la supresión de vegetación en los cocientes de bandas a) 5/8: alteración propilítica, b) 4/7: jarosita.

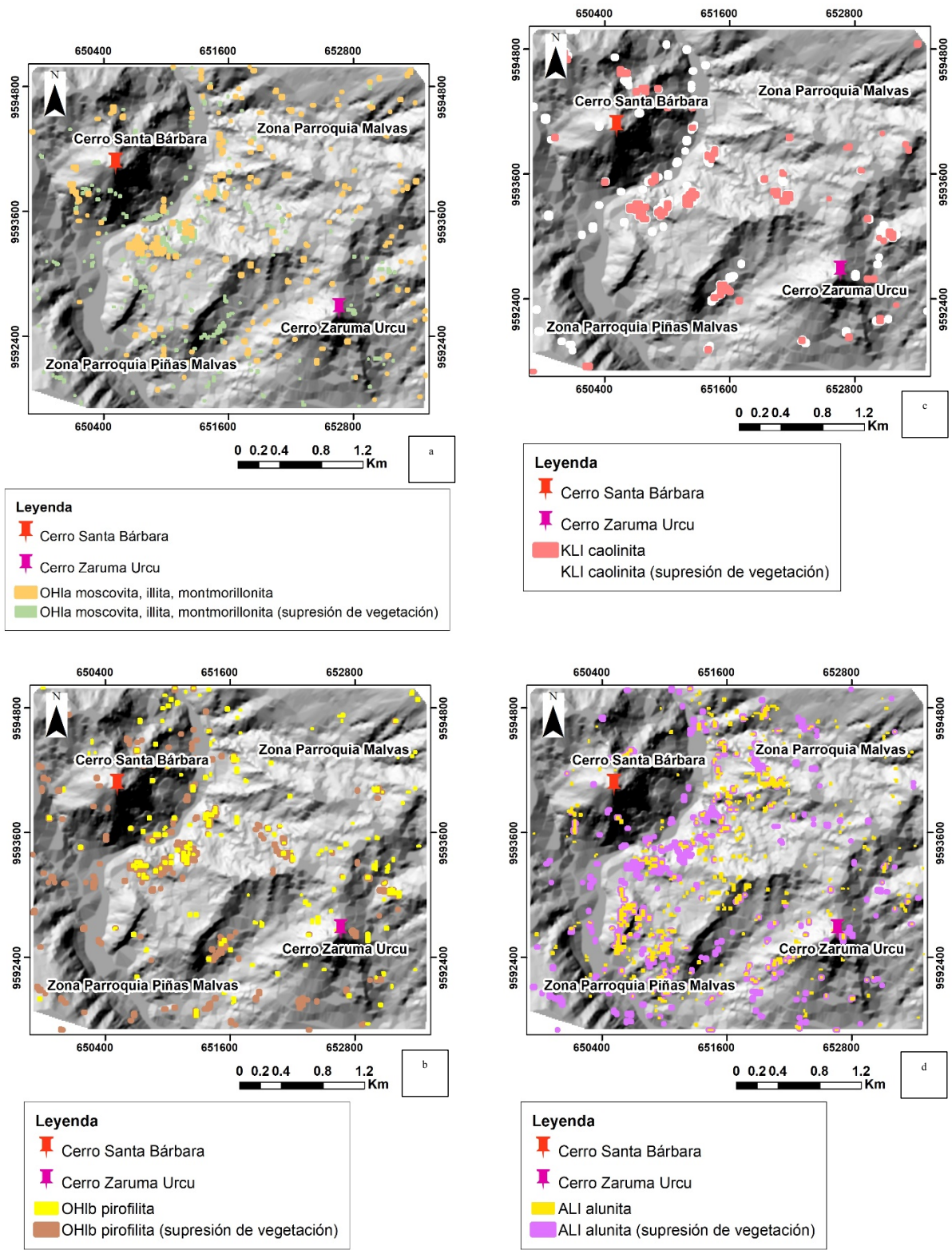


Figura A7 Comparación de las zonas obtenidas con el NDVI y la supresión de vegetación aplicada en los índices definidos por Ninomiya (2003-2004), a) OHla, b) OHlb, c) KLI, d) ALI.

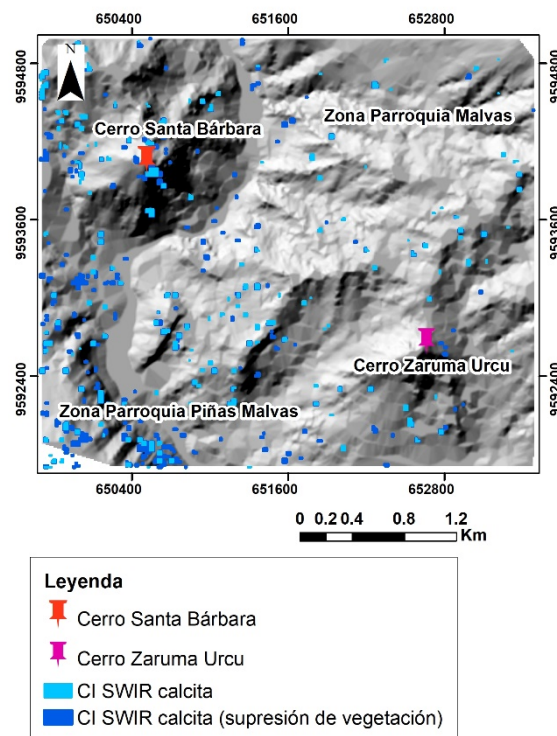
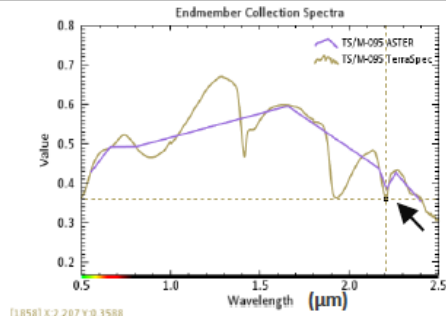
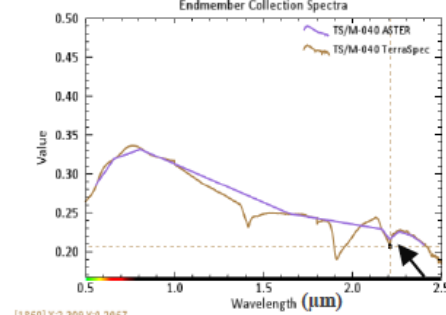
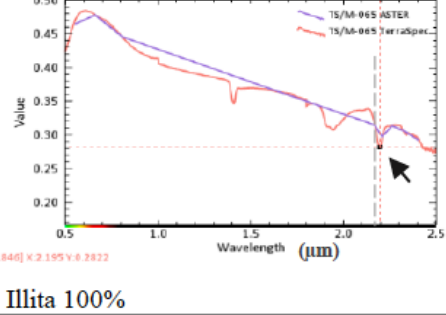
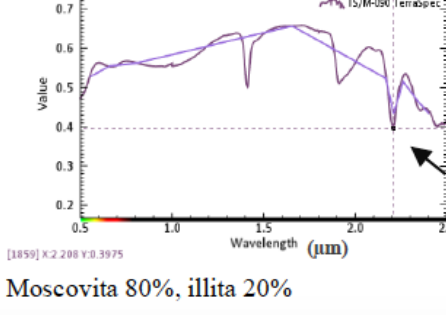


Figura A8 Comparación de las zonas obtenidas con el NDVI y la supresión de vegetación aplicada en los índices definidos por Ninomiya (2003-2004): CI_{SWIR}

Tabla A1: Rasgos de absorción de los minerales característicos de la alteración argílica a filica comparados entre la imagen ASTER y TerraSpec

Firmas espectrales	Rasgos de absorción (μm)	
	TerraSpec	ASTER
 <p>[1858] X:2.207 Y:0.3588</p>	2.207	2.209
Illita 80%, montmorillonita 20%.		
 <p>[1860] X:2.209 Y:0.2067</p>	2.209	2.209
Montmorillonita 80%		
 <p>[1846] X:2.195 Y:0.2822</p>	2.195	2.209
Illita 100%		
 <p>[1859] X:2.208 Y:0.3975</p>	2.208	2.209
Moscovita 80%, illita 20%		

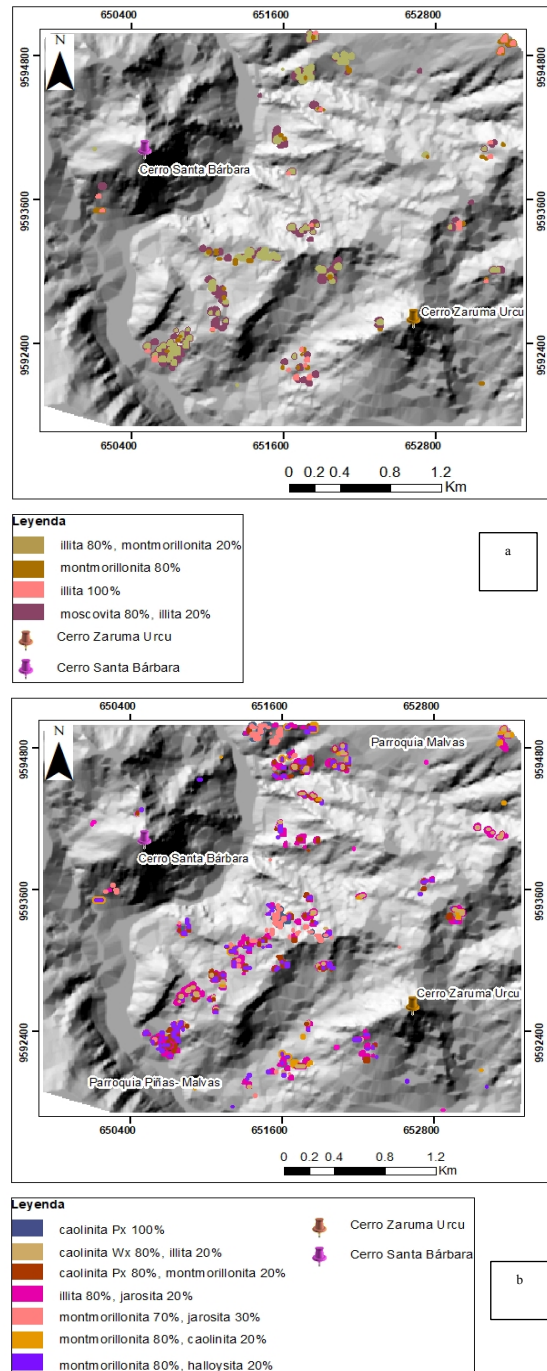
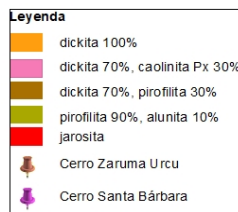
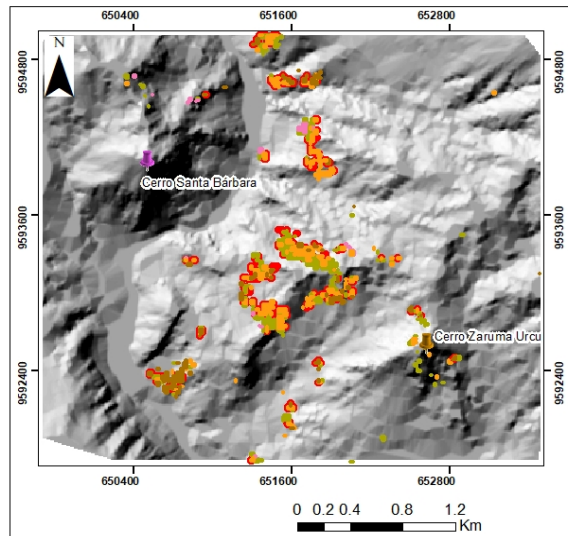
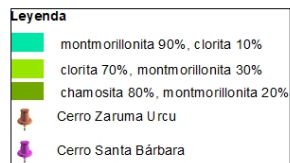
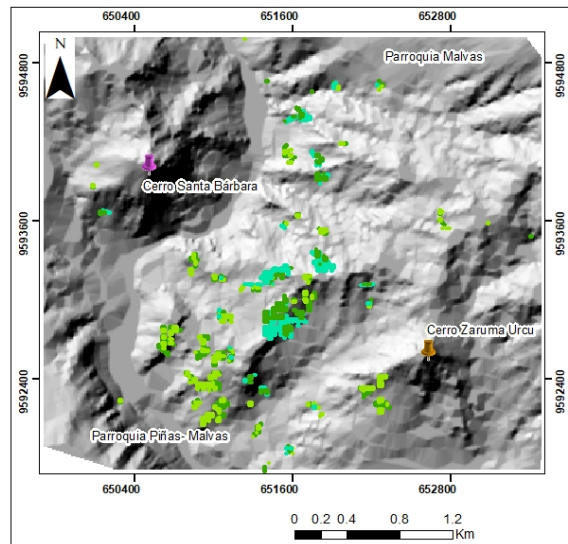


Figura A9 Clasificación mediante el método SAM, a) alteración argilica a filica, b) alteración argilica intermedia.



a



b

Figura A10 Clasificación mediante el método SAM, a) alteración argílica avanzada, b) alteración propilítica.

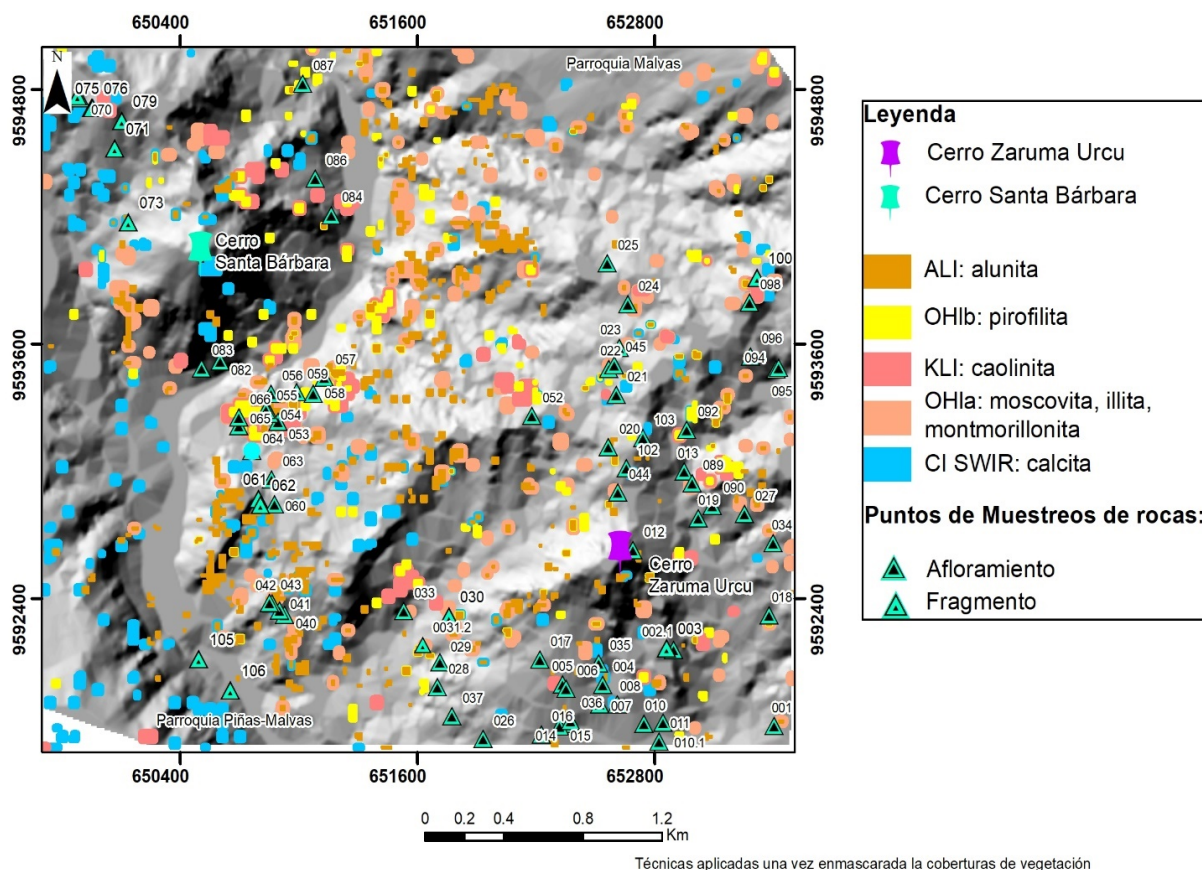


Figura A11 Puntos de muestreos en las zonas obtenidas de la técnica de índices con la vegetación enmascarada (NDVI).

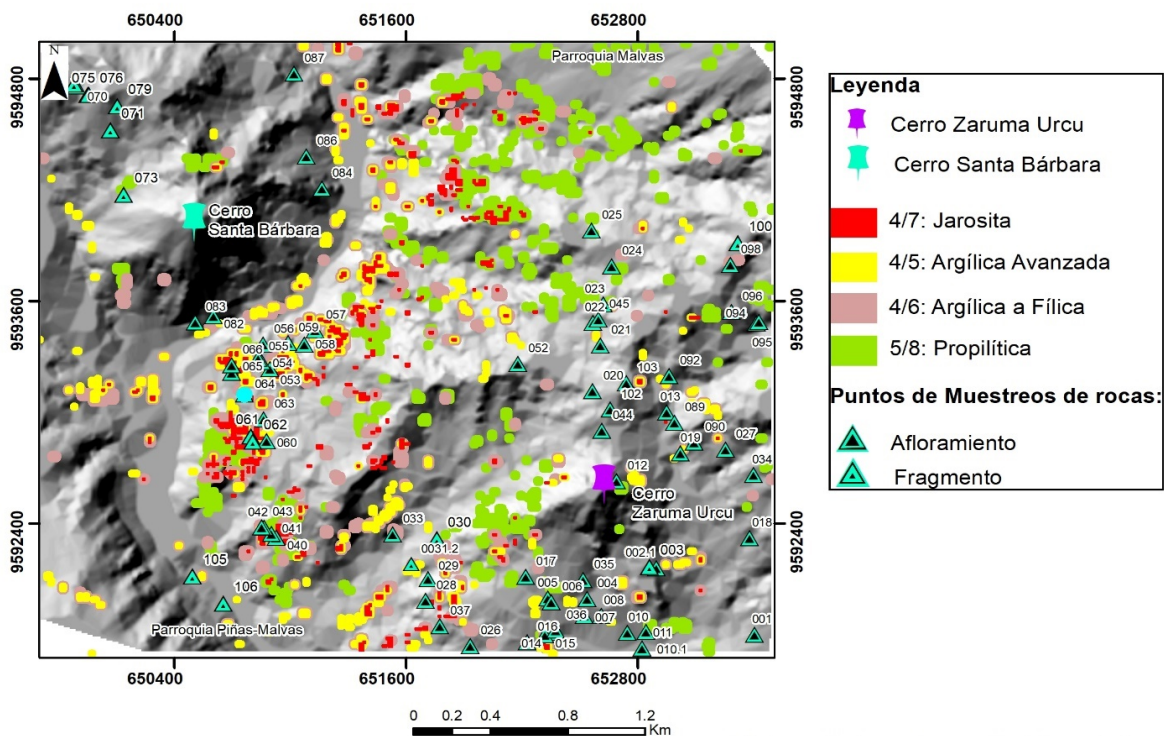


Figura A12 Puntos de muestreos en las zonas obtenidas de la técnica de cocientes con la supresión de vegetación aplicada.



Figura A13 Reconocimiento de la alteración argílica a filíca: a) Afloramiento TS-041 en la zona de argílica a filíca mapeada del cociente 4/6 con la aplicación del NDVI b) muestra M-041.



Figura A14 Reconocimiento de alteración argílica avanzada mediante el cociente 4/5 e índice KLI con la supresión: a) Lugar de la toma de muestra afloramiento TS-059 b) Muestra M-059.

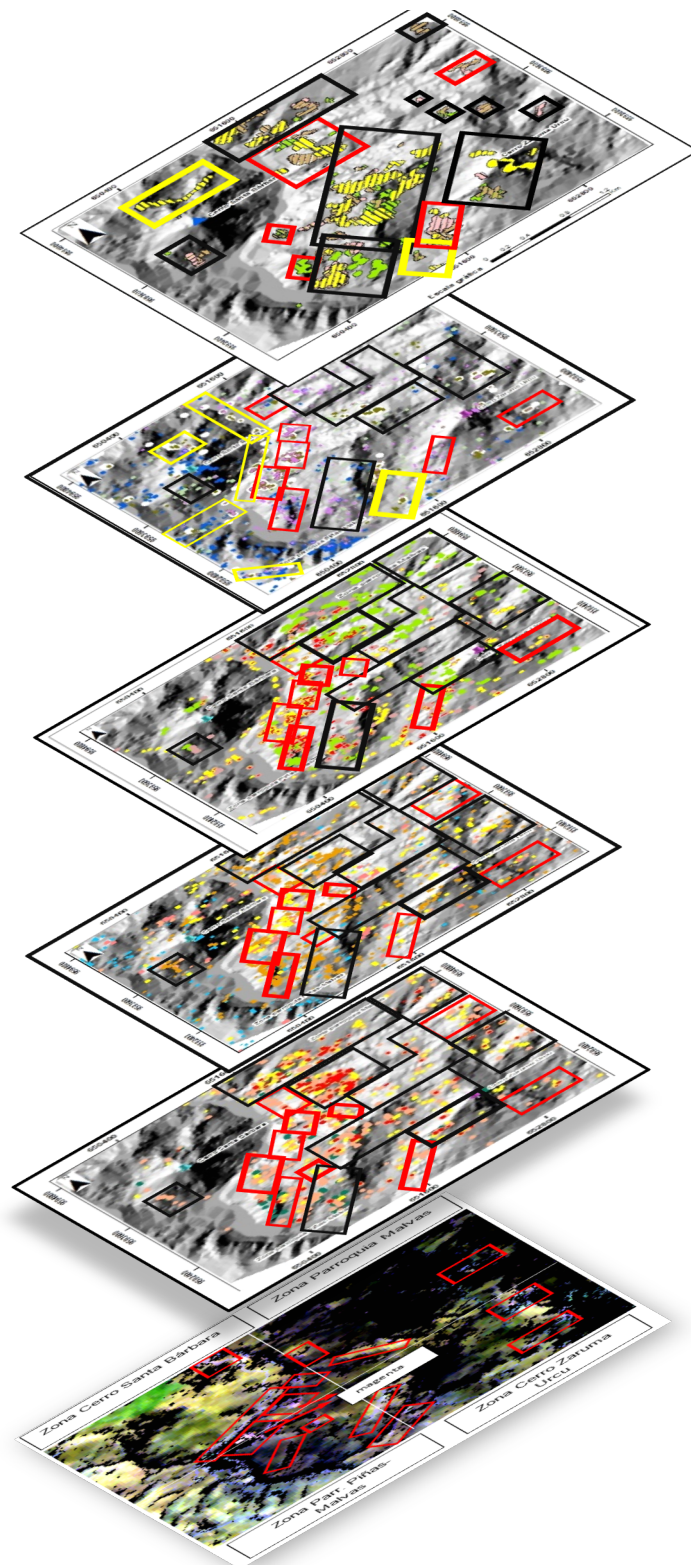


Figura A15 Zonas de alteraciones precisadas mediante comparación de las técnicas espectrales.

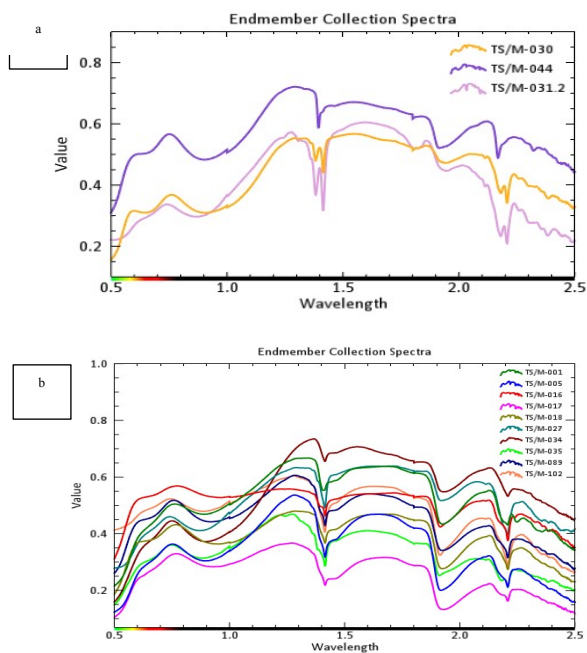


Figura A16 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con la técnica del NDVI: a) dickita, pirofilita, alunita b) montmorillonita, caolinita, illita.

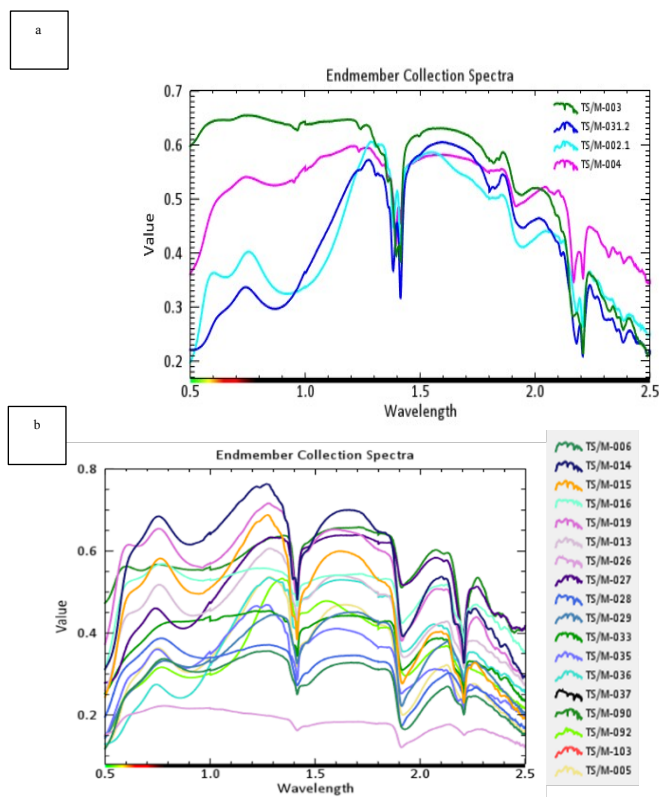


Figura A17 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con la técnica de supresión: a) dickita, pirofilita, caolinita b) montmorillonita, illita, moscovita.

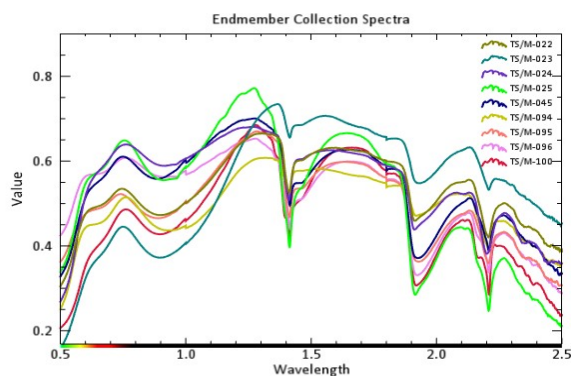


Figura A18 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo obtenidas de la técnica NDVI: caolinita, illita, montmorillonita y moscovita

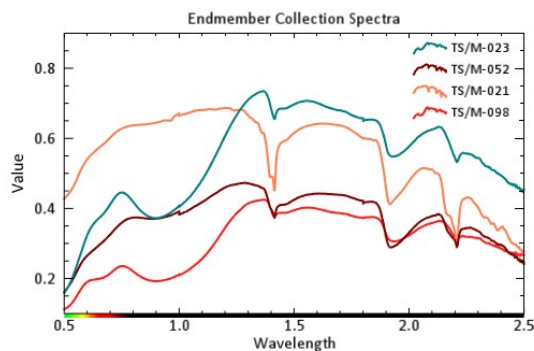


Figura A19 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo obtenidas de la técnica supresión de vegetación: montmorillonita, illita y caolinita.

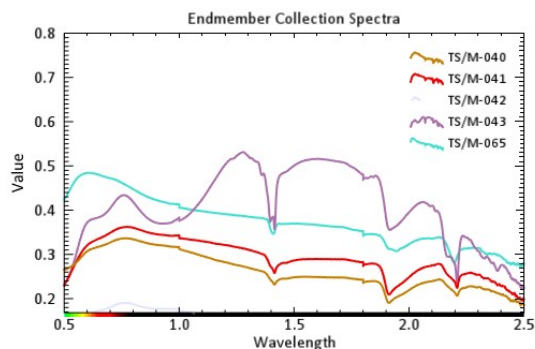


Figura A20 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con la técnicas NDVI: montmorillonita, caolinita, illita.

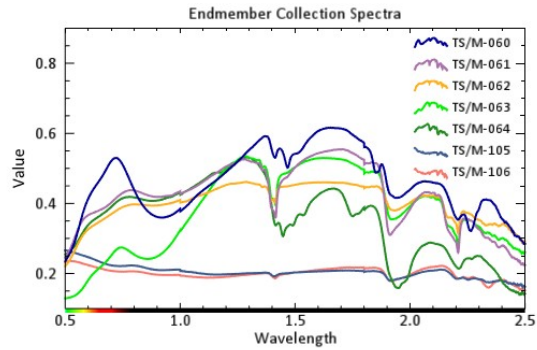


Figura A21 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con la técnica NDVI: montmorillonita, caolinita, jarosita.

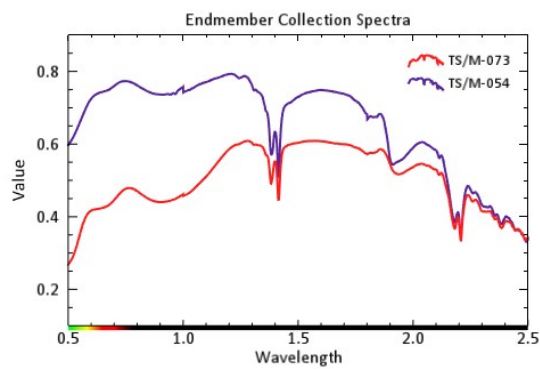


Figura A22 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con la técnica NDVI: dickita.

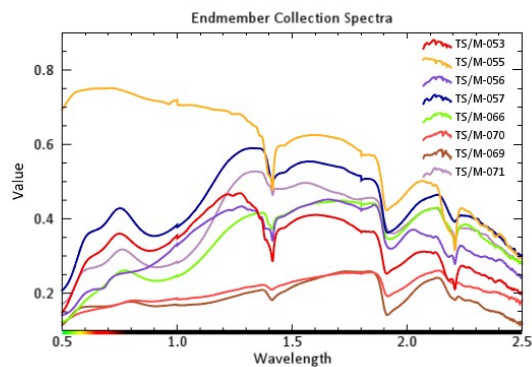


Figura A23 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con la técnica supresión de vegetación: montmorillonita, illita y caolinita.

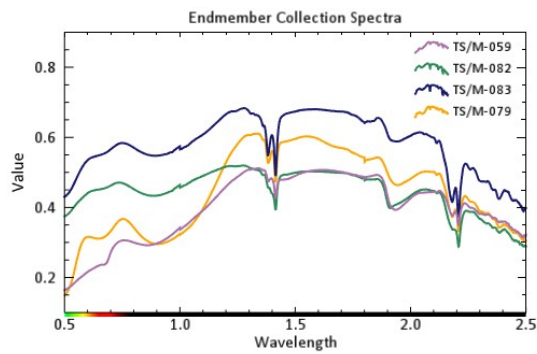


Figura A24 Firmas espectrales de los minerales de alteración validados en campo con las técnicas: a) NDVI dickita y caolinita.

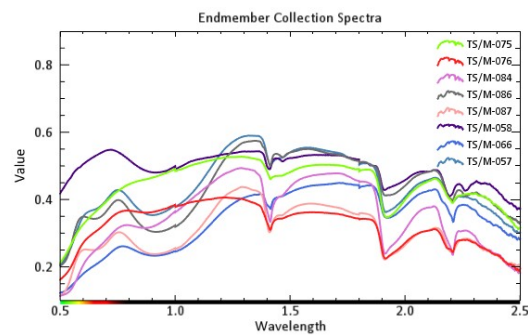


Figura A25 supresión de vegetación montmorillonita e illita

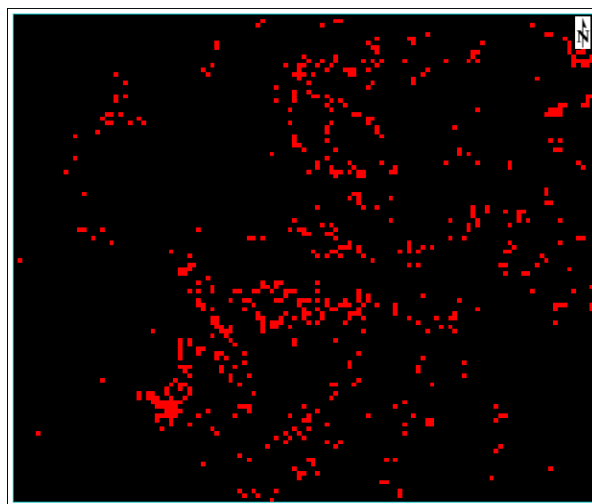


Figura A26 Píxeles obtenidos al plotear la firma al software Envi para comparar la firma espectral de la muestra M-090 con los píxeles de la imagen empleada mediante la técnica Spectral Angle Mapper.

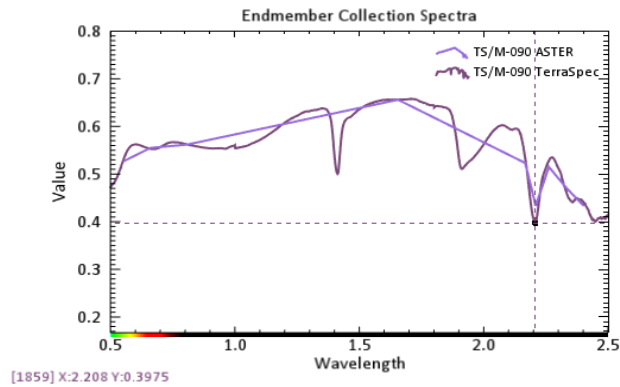


Figura A27 Comparación de la firma espectral de TerraSpec y la imagen ASTER de la muestra M-090.

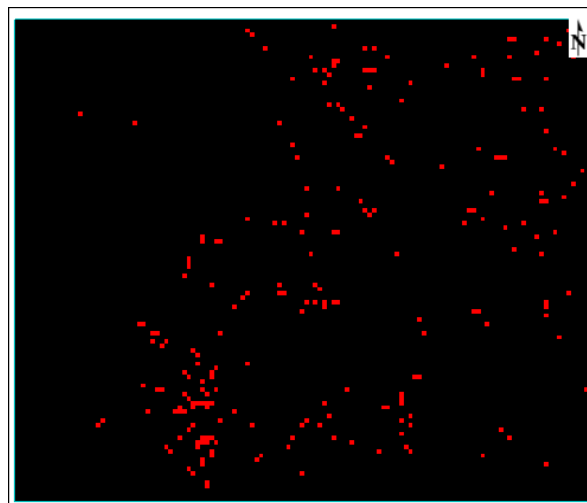


Figura A28 Píxeles obtenidos al plotear la firma al software Envi para comparar la firma espectral de la muestra M-105 con los píxeles de la imagen empleada mediante la técnica Spectral Angle Mapper.

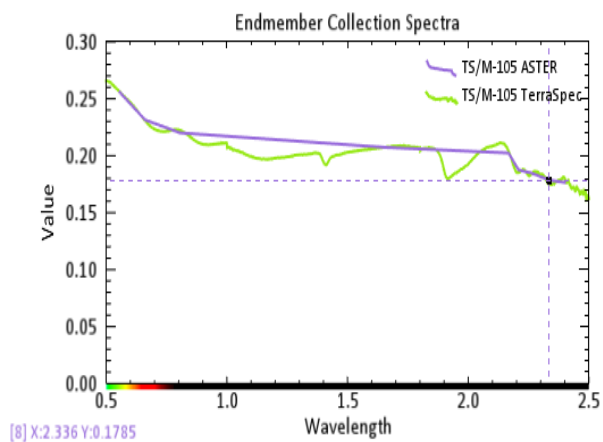


Figura A29 Comparación de la firma espectral de TerraSpec y la imagen ASTER de la muestra M-105

Tabla A2: Alteraciones hidrotermales presentes en cada zona, los colores fuertes indican mayores zonas de píxeles, colores bajos menores zonas de píxeles que representan dicho grupos de minerales

Alteración:	Zonas			
	1	2	3	4
Propilítica				
chl 70% mnt 30%				
chm 80% mnt 20%				
mnt 90% chl 10%				
chl 70% mnt 30%				
chm 80% mnt 20%				
mnt 90% chl 10%				
chm 80% mnt 20%				
Argílica Intermedia				
kln Px 100%				
kln Wx 80% ill 20%				
kln Px 80% mnt 20%				
ill 80% jrs 20%				
mnt 70% jrs 30%				
mnt 80% kln 20%				
mnt 80% hal 20%				
kln Wx 80% ill 20%				
kln Px 80% mnt 20%				
ill 80% jrs 20%				
mnt 80% kln 20%				
mnt 80% hal 20%				
kln Wx 80%, ill 20%				
kln Px 80%, mnt 20%				
ill 80%, jrs 20%				
mnt 80%, hal 20%				
Argílica Avanzada				
dck 100%				
dck 70% kln Px 30%				
dck 70% prl 30%				
prl 90% alu 10%				
jrs				
dck 100%				
dck 70% prl 30%				
prl 90% alu 10%				
jrs				
dck 100% / prl 90% alu 10%				
Argílica a Filica				
ill 100%				
mnt 80%				
ms 80% ill 20%				
ill 100%				
ill 80% mnt 20%				
mnt 80%				
ms 80% ill 20%				
mnt 80%				
ill 80% mnt 20%				
ms 80% ill 20%				

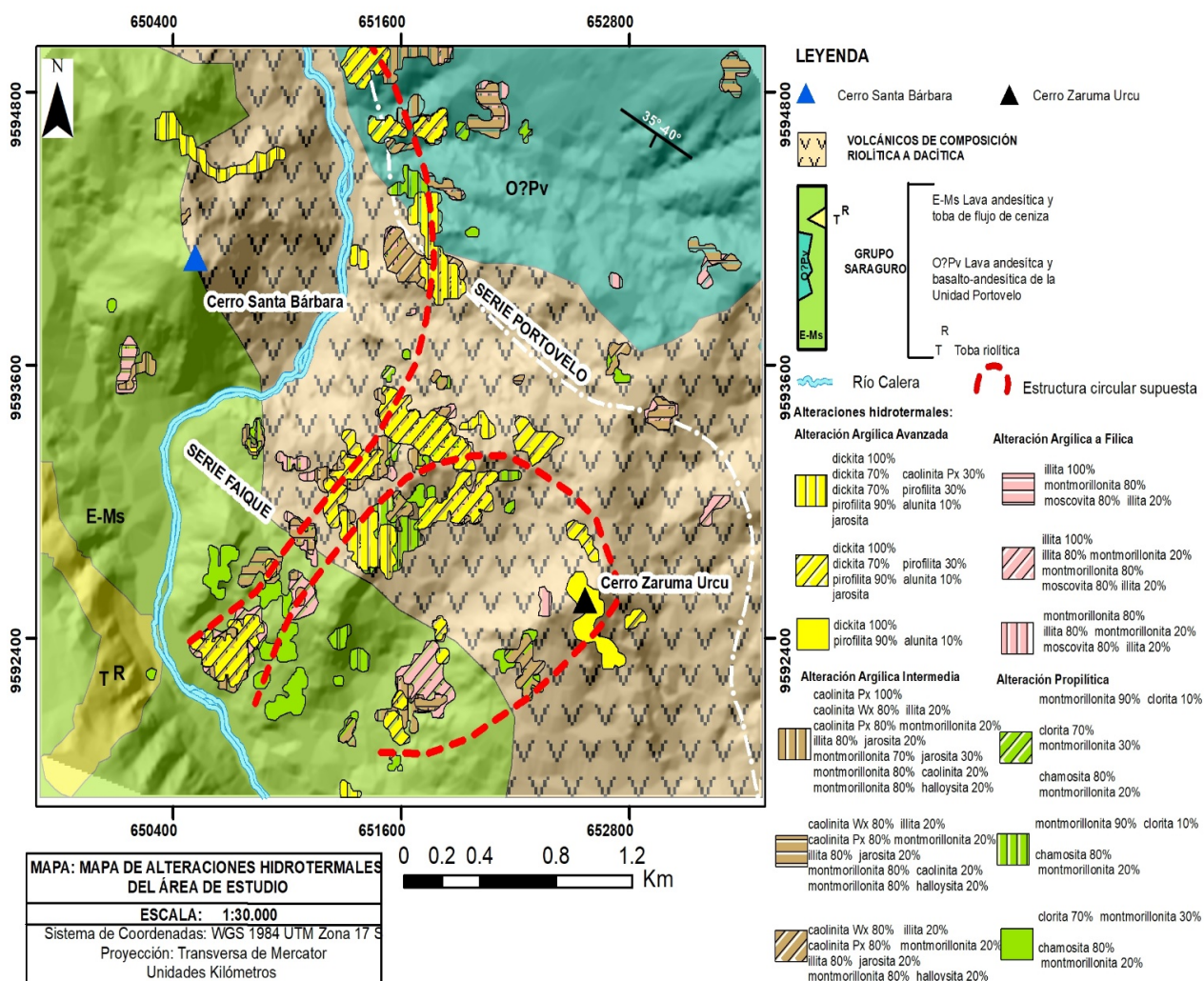


Figura A30 Mapa de zonas de minerales de alteración hidrotermal en la base geológica tomada de Bonilla, 2008 mostrando patrón de estructuras circulares supuestas.